

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**В.Г. БАСМАНОВ**

## **ЗАЗЕМЛЕНИЕ И МОЛНИЕЗАЩИТА**

### **Часть 2**

#### **Молниезащита**

Специальность 140211 «Электроснабжение», III, IV курс д/о, IV, V курс з/о  
Дисциплины «Изоляция и перенапряжение», «Системы электроснабжения»,  
Специальность 140610 «Электрооборудование и электрохозяйство предприятий, организаций и учреждений», III, IV курс д/о  
Дисциплины «Высоковольтная изоляция», «Потребители электрической энергии»  
Специальность 140205 «Электроэнергетические системы и сети», IV, V курс д/о  
Дисциплины «Техника высоких напряжений», «Проектирование энергосистем», Специальность 140204 «Электрические станции», III курс д/о, IV курс з/о  
Дисциплина «Техника высоких напряжений», магистры направления подготовки 140400.68 «Электроэнергетика и электротехника» д/о, з/о.  
Дисциплина «Современные направления развития средств координации изоляции, часть 2», «Современные средства защиты от перенапряжений»

Киров

2012

**УДК 621.311.015**

**Б 274**

Рекомендовано к изданию методическим советом  
электротехнического факультета ФГБОУ ВПО  
«ВятГУ»

Допущено редакционно-издательской комиссией методического совета  
ФГБОУ ВПО «ВятГУ» в качестве учебного пособия для студентов  
электроэнергетических специальностей всех форм обучения

Рецензенты: кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Электротехника»  
ГОУ ВПО «ИжГТУ» В.К. Барсуков;  
кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетических  
систем ФГБОУ ВПО «ВятГУ» А.В. Вычегжанин

**Басманов, В.Г.**

Заземление и молниезащита: учеб. пособие для вузов в двух частях. Часть 2  
Молниезащита/ В.Г. Басманов – Киров: ПРИП ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2012. – 246 с.

В учебном пособии рассматриваются вопросы, связанные с заземлением и молниезащитой. В представленной части рассматриваются вопросы, связанные с молниезащитой. Изложены основные требования к устройствам молниезащиты, рассматриваются методы расчета с примерами расчетов, приведены справочные данные.

Учебное пособие предназначено для студентов дневного, заочного отделения, обучающихся по специальностям 140211 «Электроснабжение», 140610 «Электрооборудование и электрохозяйства предприятий, организаций, учреждений», 140205 «Электроэнергетические системы и сети», магистров направления подготовки 140400.68 «Электроэнергетика и электротехника». Рекомендуются при изучении дисциплин: «Изоляция и перенапряжение», «Техника высоких напряжений (ТВН)», «Высоковольтная изоляция», «Системы электроснабжения», «Потребители электрической энергии», «Проектирование энергосистем», дипломное проектирование, «Современные направления развития средств координации изоляции, часть 2», «Современные средства защиты от перенапряжений»

**УДК 621.311.015**

**Б 274**

© Басманов В.Г., 2012.

© ФГБОУ ВПО «ВятГУ», 2012.

## **Введение**

Одним из важных условий бесперебойной работы подстанций является обеспечение надежной молниезащиты зданий, сооружений и электрооборудования.

Защита элементов подстанций от прямых ударов молнии осуществляется стержневыми и тросовыми молниеотводами.

При разработке системы молниезащиты для конкретных подстанций следует пользоваться рекомендациями ПУЭ и другими нормативными документами.

Молниезащита включает в себя:

- защиту от прямых ударов молнии воздушных линий электропередачи, станций и подстанций с помощью молниеотводов различных конструкций;
- защиту электрооборудования станций и подстанций от импульсных грозовых перенапряжений, набегаящих с линий, с помощью защитных аппаратов: нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН) и вентильных разрядников (РВ); в отдельных случаях для защиты электрооборудования и воздушных линий электропередачи применяются трубчатые разрядники (РТ), а также защитные промежутки (ПЗ) размеры которых рекомендованы ПУЭ.

## ГЛАВА 6. МОЛНИЕЗАЩИТА

### §6.1. Грозовая деятельность и электрические характеристики молнии

Интенсивность грозовой деятельности характеризуется средним числом грозовых часов в году  $D_{г.}$ . Подробная картина интенсивности грозовой деятельности для России, стран СНГ и Балтии имеется в ПУЭ. Данные об интенсивности грозовой деятельности для некоторых регионов России приведены в табл. 6.1 и в приложении В.

Таблица 6.1.

Среднегодовая интенсивность грозовой деятельности на территории России

| Район                                                                                                                                                           | Среднее<br>число<br>грозовых<br>часов в год |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Мурманск, Нарьян-Мар, Хатанга, Верхоянск, Магадан, Сахалин, Камчатка                                                                                            | Менее 10                                    |
| Архангельск, Салехард, Игарка, Якутск, Владивосток                                                                                                              | 10 - 20                                     |
| Санкт-Петербург, Петрозаводск, Москва, Вологда, Сыктывкар, Киров, Оренбург, Астрахань, Ханты-Мансийск, Красноярск, Иркутск, Бодайбо, Хабаровск                  | 20 - 40                                     |
| Псков, Новгород, Калуга, Кострома, Арзамас, Нижний Новгород, Тамбов, Пенза, Волгоград, Ставрополь, Уфа, Екатеринбург, Тюмень, Омск, Барнаул, Чита, Благовещенск | 40 - 60                                     |
| Орел, Воронеж, Самара, Горно-Алтайск, Краснодар, Владикавказ                                                                                                    | 60 - 80                                     |
| Курск, Белгород, Майкоп                                                                                                                                         | 80 - 100                                    |
| Красная поляна, Сочи                                                                                                                                            | Более 100                                   |

Среднее число ударов молнии в 1 км поверхности земли за 100 грозовых часов (гр. ч) на территории России и стран СНГ принимается равным:

$$n_0 = 6,7 \cdot 100.$$

Число ударов молнии в воздушную линию электропередачи (ВЛ) длиной 100 км при 100 гр.ч определяется соотношением:

$$n_{0ВЛ} = 6,7 \cdot 100 \cdot h_{cp} \cdot 10^{-3} \approx 4 h_{cp}. \quad (6.1)$$

Число ударов молнии в ВЛ длиной  $l_{ВЛ}$ , км, за  $D_{г}$  грозовых часов

$$n_{удВЛ} = 4h_{cp} \frac{l_{ВЛ}}{100} \frac{D_{г}}{100}. \quad (6.2)$$

Число ударов молнии за  $D_{г}$  грозовых часов в год в сооружение, например открытое распределительное устройство (ОРУ) подстанции длиной  $A$ , м, шириной  $B$ , м, рассчитывается по формуле:

$$n_{уд.п/ст} = 6,7(A + 7h)(B + 7h) \frac{D_{г}}{100} 10^{-6}. \quad (6.3)$$

Для ВЛ с тросами за высоту объекта  $h_{cp}$  принимается  $h_{тр. cp}$  – средняя высота подвески троса; для ВЛ без тросов  $h_{пр. cp}$  – средняя высота подвески проводов верхней фазы; для ОРУ  $h$  – высота молниеотводов. Значения этих параметров можно определить по формулам, м:

$$h_{тр. cp} = h_{оп} - 2/3f_{тр}; \quad (6.4)$$

$$h_{пр. cp} = h_1 - l_{г} - 2/3f_{пр}, \quad (6.5)$$

где  $h_{оп}$  – высота опоры с учетом тросостойки, м;

$h_1$  – высота крепления на опоре верхней фазы, м;

$l_{г}$  – длина гирлянды изоляторов, м;

$f_{тр}$  и  $f_{пр}$  – стрела провеса троса и провода соответственно, м.

За расчетный ток молнии принимается апериодический импульс, характеризуемый максимальным значением  $I_m$ , кА, и средней крутизной фронта  $a_m$ , кА/мкс. Формула для приближенного определения вероятностей  $P(I_m)$  и  $P(a_m)$ , рекомендованных СИГРЕ, приведены в табл. 6.2.

При расчетах молния рассматривается как источник тока. При этом значения  $I_m$  и  $a_m$  не зависят от сопротивления заземления объекта, волнового сопротивления троса или провода при ударе молнии в провод или трос.

Формулы для приближенного определения вероятностей токов молнии

$$P(I_M) = P(>I_M) \text{ и крутизны их фронта } P(a_M) = P(>a_M)$$

| Параметр | Диапазон        | Формула                     |
|----------|-----------------|-----------------------------|
| $I_M$    | 3 – 20 кА       | $P(I_M) = \exp(-0,008 I_M)$ |
|          | 20 – 200 кА     | $P(I_M) = \exp(-0,03 I_M)$  |
| $a_M$    | 10 – 100 кА/мкс | $P(a_M) = \exp(-0,06 a_M)$  |

## §6.2. Зона защиты молниеотводов

Электроустановки, находящиеся на открытом воздухе, защищаются от прямых ударов молнии молниеотводами. ОРУ подстанций, как правило, защищаются стержневыми молниеотводами. Для защиты протяженных объектов: ВЛ, шинных мостов, гибких связей большой протяженности и т.п. – применяются горизонтально расположенные заземленные тросы. Такие молниеотводы называются тросовыми.

Молниеотводы характеризуются зонами защиты. Границы зон защиты характеризуются вероятностями прорыва молнии в зону защиты  $P_\alpha$  или надежностью защиты  $Q_\alpha = 1 - P_\alpha$ .

Упрощенное построение зон защиты молниеотводов, используемых для защиты установок электроэнергетики, показано на рис. 6.1 ÷ 6.5, где  $h$  – высота стержневого молниеотвода;  $h_x$  – высота защищаемого объекта (или защищаемый уровень);  $r_x$  – радиус (или ширина) зоны защиты на высоте  $h_x$ . Коэффициент  $p$  равен 1 при  $h \leq 30$  м и  $\sqrt{30/h}$  при  $h = 30 \div 100$  м. Существуют и другие способы построения зон защиты молниеотводов, методика построения и порядок расчета по которым описаны в /2/ и /12/. Эти методики действуют одновременно согласно письму Управления по надзору в электроэнергетике Ростехнадзора от 01.12.2004 № 10-03-04/182. В приложении А приведена методика, описанная в /2/.

ОРУ обычно защищены несколькими молниеотводами (рис. 6.3). Уровень  $h_x$  внутри остроугольного треугольника, образованного ближайшими тремя стержневыми молниеотводами, или прямоугольника, образованного четырьмя стержневыми молниеотводами, будет защищен, если диаметр  $D$  окружности, проходящей через вершины треугольника, или диагональ  $D$  прямоугольника удовлетворяют условию:

$$D < 8(h - h_x)p. \quad (6.6)$$

При этом границы верхней части зон защиты определяются для каждой пары молниеотводов по рис. 6.2.

Вероятность прорыва молнии в зоны защиты молниеотводов, построенных на рис. 6.1 ÷ 6.5, с учетом ограниченного объема испытаний на моделях, в результате которых эти зоны были получены, многолетнего опыта проектирования и эксплуатации защиты от прямых ударов молнии электрических станций и подстанций может быть оценена значением не менее  $P_\alpha = 0,01$ , а надежность защиты — соответственно не более  $Q_\alpha = 0,99$ . Эти оценки следует рассматривать как ориентировочные.

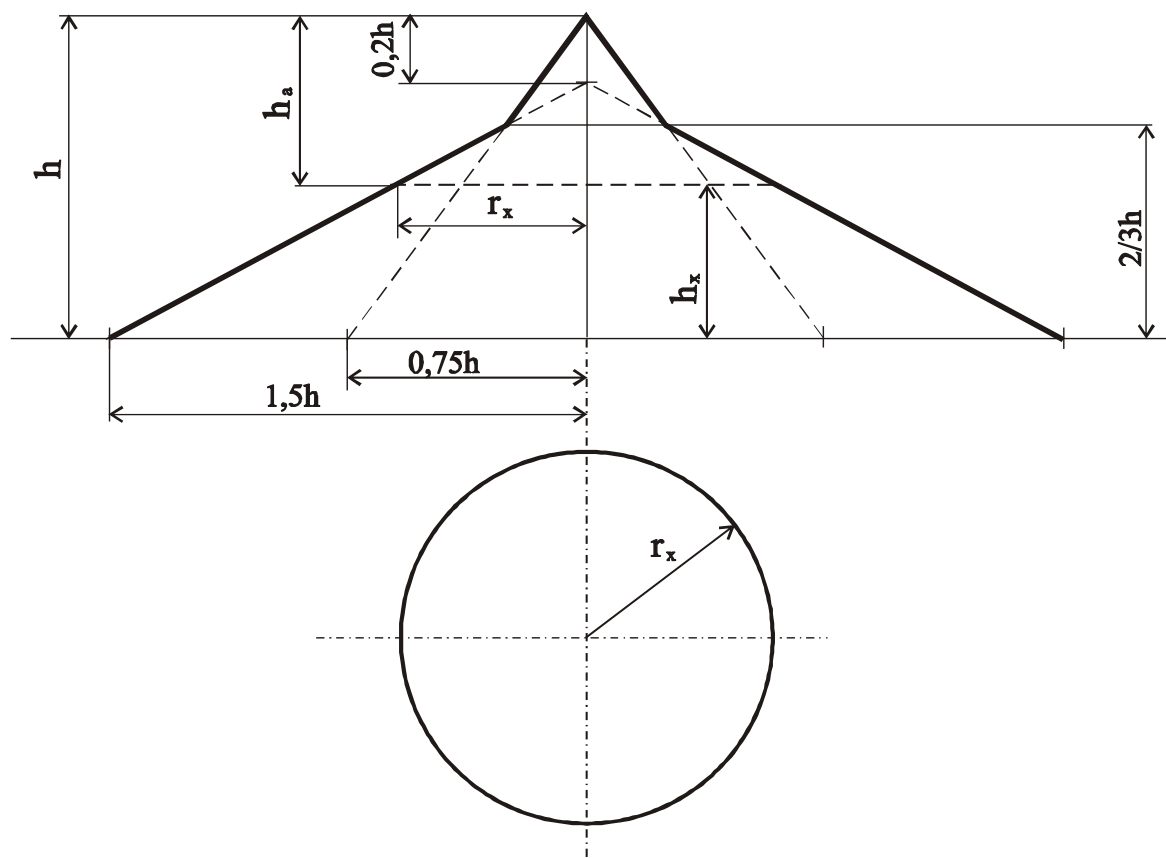


Рис. 6.1. Сечение зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода

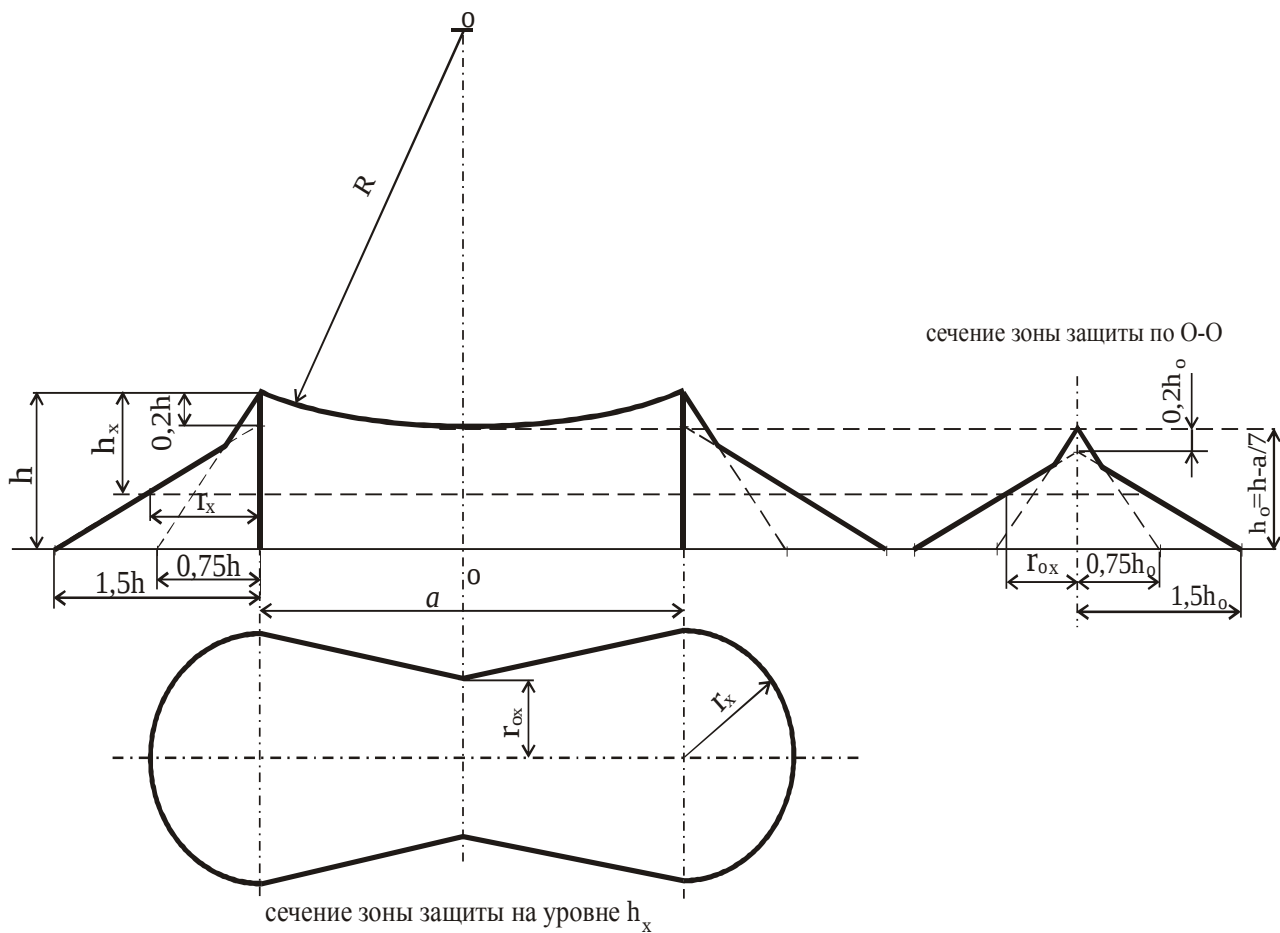


Рис. 6.2. Зона защиты двух стержневых молниеотводов одинаковой высоты

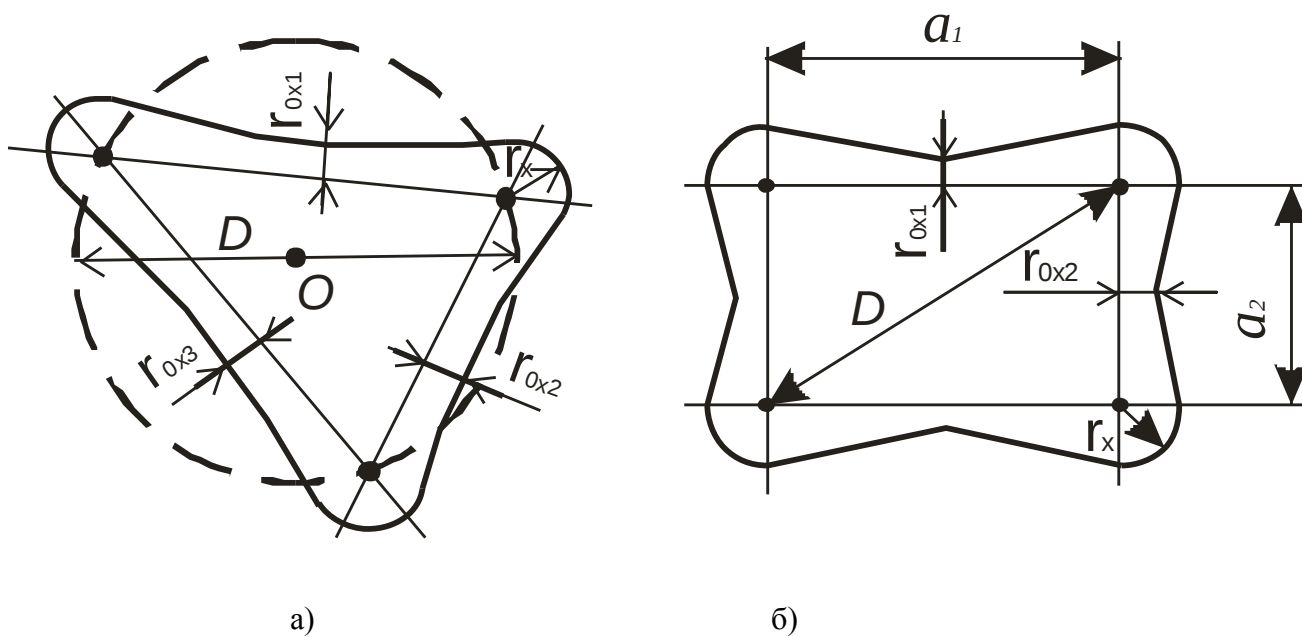


Рис. 6.3. Сечение зоны защиты на высоте  $h_x$ , образованных тремя (а) и четырьмя (б) молниеотводами высотой  $h$

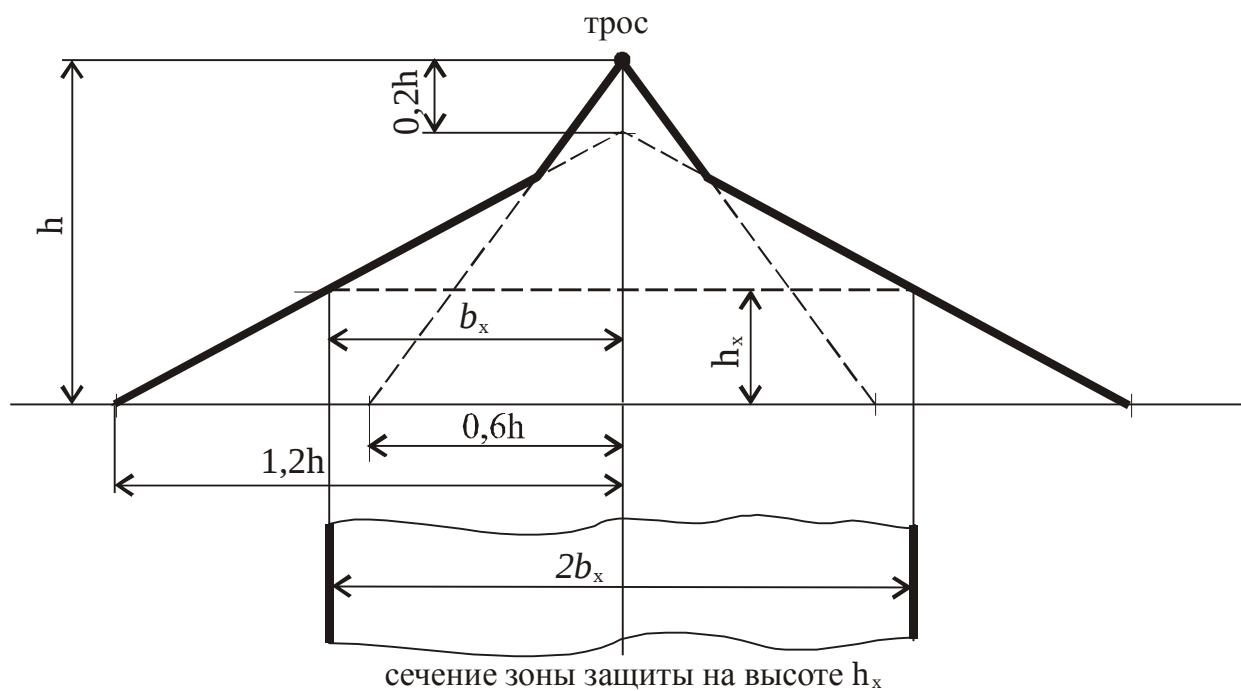


Рис. 6.4. Зона защиты тросового молниеотвода

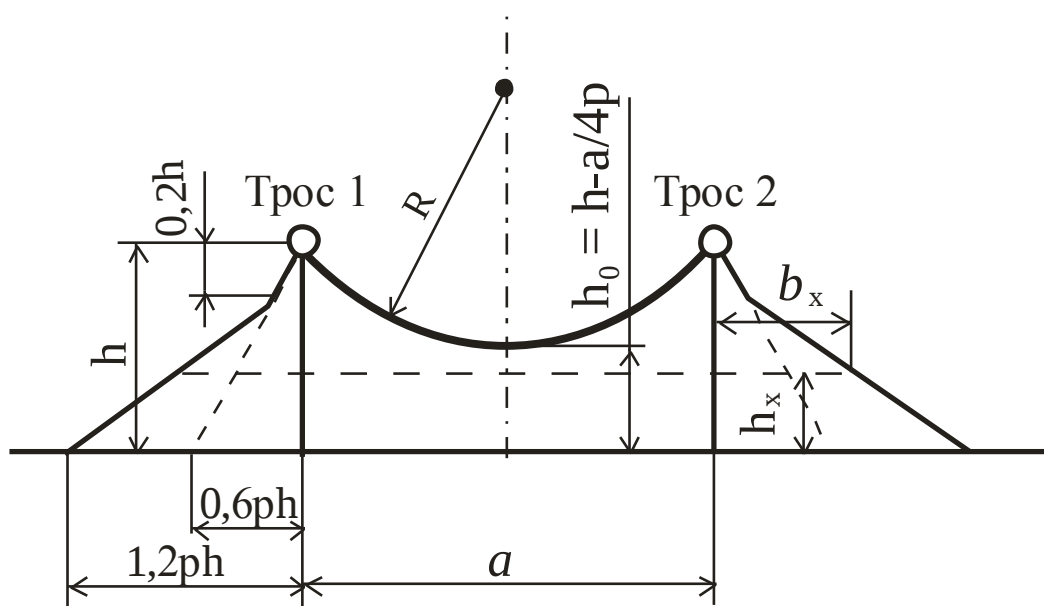


Рис. 6.5. Сечение зоны защиты двух параллельных тросовых молниеотводов

## §6.3. Молниезащита воздушных линий электропередачи

### 6.3.1. Средства молниезащиты ВЛ

Показателем грозоупорности ВЛ является удельное число грозовых отключений  $n_{\text{откл}}$  линии на 100 км длины и 100 гр. ч в году. Для конкретных линий рассчитывается число грозовых отключений на полную длину и 1 год:

$$N_{\text{откл}} = n_{\text{откл}} \frac{l_{\text{ВЛ}}}{100} \frac{D_{\text{г}}}{100}. \quad (6.7)$$

Для количественной оценки качества молниезащиты линий применяются следующие критерии:

1. Уровень грозоупорности – предельный (критический) ток молнии  $I_{\text{кр}}$ , при котором еще не происходит импульсного перекрытия изоляции.
2. Кривая опасных токов молнии. Применяется в тех случаях, когда опасность перекрытия определяется не только максимальным значением тока молнии  $I_{\text{м}}$ , но и его крутизной  $a_{\text{м}}$ . Она представляет собой нижнюю границу области опасных сочетаний этих двух параметров молнии.
3. Показатель надежности молниезащиты – ожидаемое среднее число лет между грозовыми отключениями  $T_{\text{г}}$ , приходящееся обычно на 100 км и 100 гр.ч.

Молниезащита ВЛ имеет целью уменьшение до экономически обоснованного числа грозовых отключений линий.

К основным средствам молниезащиты ВЛ относят:

1. Защиту от прямых ударов молнии с помощью тросовых молниеотводов, подвешенных на линиях напряжением 110 кВ и более на металлических и железобетонных опорах. Сооружение воздушных линий 110 кВ и выше без тросов допускается:

- в районах с числом грозовых часов в году менее 20;
- на отдельных участках линии в районах с плохо проводящими грунтами ( $\rho \geq 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ );

– на участках трассы с расчетной толщиной стенки гололеда более 25 мм.

Линии на деревянных опорах имеют достаточную грозоупорность, поэтому тросы на таких линиях применяются только на подходах к подстанциям.

Применение тросов на линии 35 кВ малоэффективно вследствие невысокой импульсной прочности линейной изоляции и большой вероятности перекрытия с троса на провод при ударе молнии в трос. На линиях 3 – 10 кВ тем более применение тросов бесполезно.

2. Выполнение сопротивления заземления опор в соответствии с требованиями /1/. Снижение сопротивления заземления опор обеспечивает уменьшение вероятности обратного перекрытия с опоры на провод при прямых ударах молнии в опору.

3. Автоматическое повторное включение (АПВ), предотвращающее перерыв в передаче энергии при грозовом перекрытии линейной изоляции, рассматриваемое как эффективное средство молниезащиты. Поскольку частая работа АПВ (при большом числе грозовых перекрытий) усложняет эксплуатацию и сокращает межремонтный период выключателей, то его целесообразно применять в комплексе с другими средствами молниезащиты.

4. Увеличение числа изоляторов в гирлянде часто поражаемых опор, в частности очень высоких переходных опор, что повышает импульсную прочность линейной изоляции.

5. Применение трубчатых разрядников или защитных промежутков (реже нелинейных ограничителей перенапряжений и вентильных разрядников) для защиты ослабленной изоляции или отдельных опор.

6. Соблюдение нормированных расстояний по воздуху (табл. 6.3) при пересечении воздушных линий между собой и с линиями связи, а в случае линий на деревянных опорах применение РТ, которые устанавливаются на опорах, ограничивающих пролет пересечения.

Таблица 6.3

Наименьшее расстояние, м, между проводами и тросами пересекающихся ВЛ

| Пересечение                                                        | Длина<br>пролета не<br>более, м | Наименьшее расстояние от места<br>пересечения до ближайшей опоры, м |     |     |     |     |     |
|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                                                    |                                 | 30                                                                  | 50  | 70  | 110 | 120 | 150 |
| ВЛ 500–330 кВ<br>между собой и с ВЛ<br>более низкого<br>напряжения | 200                             | 5                                                                   | 5   | 5   | 5,5 | -   | -   |
|                                                                    | 300                             | 5                                                                   | 5   | 5,5 | 6   | 6,5 | 7   |
|                                                                    | 450                             | 5                                                                   | 5,5 | 6   | 7   | 7,5 | 8   |
| ВЛ 220–150 кВ<br>между собой и с ВЛ<br>более низкого<br>напряжения | 200                             | 4                                                                   | 4   | 4   | 4   | -   | -   |
|                                                                    | 300                             | 4                                                                   | 4   | 4   | 4,5 | 5   | 5,5 |
|                                                                    | 450                             | 4                                                                   | 4   | 5   | 6   | 6,5 | 7   |
| ВЛ 110–20 кВ между<br>собой и с ВЛ более<br>низкого напряжения     | 200                             | 3                                                                   | 3   | 3   | 4   | -   | -   |
|                                                                    | 300                             | 3                                                                   | 3   | 4   | 4,5 | 5   | -   |
| ВЛ 10 кВ между<br>собой и с ВЛ более<br>низкого напряжения         | 100                             | 2                                                                   | 2   | -   | -   | -   | -   |
|                                                                    | 150                             | 2                                                                   | 2,5 | 2,5 | -   | -   | -   |

Подвеска заземленных тросов позволяет уменьшить в сотни раз число ударов молнии непосредственно в провода, представляющих наибольшую опасность для изоляции ВЛ: в этом случае гирлянды ВЛ 110–1150 кВ перекрываются при небольших токах молнии (от нескольких килоампер до 30 кА). Расположение тросов относительно проводов должно обеспечить наибольшую эффективность тросовой защиты при преобладающем для данной ВЛ типе грозовых отключений (прорывы или обратные перекрытия). В первом случае снижение вероятности прорыва достигается уменьшением угла защиты троса (тросов), в том числе подвеской тросов с отрицательным углом защиты, и увеличением расстояния между тросом и проводом по вертикали. Во втором

случае вероятность обратного перекрытия уменьшается при увеличении числа тросов, разнесении их на большее расстояние, в том числе при подвеске части тросов под проводами. Перечисленные мероприятия способствуют уменьшению импульсного тока через опору и усиливают электростатическое экранирование проводов тросами.

Для снижения потерь энергии от индуктированных в тросах токов, а также для использования тросов в качестве канала высокочастотной связи или в целях емкостного отбора мощности грозозащитный трос крепится к опоре на изоляторах, снабженных шунтирующими искровыми промежутками. При разряде молнии искровые промежутки пробиваются уже во время развития лидерного канала, и в стадии главного разряда трос работает как заземленный наглухо.

Снижение сопротивлений заземления опор ВЛ с тросом является одним из основных средств уменьшения вероятности импульсного перекрытия изоляции при ударе молнии в трос или опору. Исключением являются ВЛ или участки на очень высоких опорах (переходы через реки и т.п.), грозоупорность которых в значительной мере определяется индуктивностью опор.

В тех случаях, когда не удастся обеспечить требуемое низкое сопротивление заземления опор, тросовая защита может оказаться малоэффективной, так как большинство ударов молнии в трос или опору будет приводить к перекрытиям изоляции.

Сопротивление заземления металлических и железобетонных опор на ВЛ без троса должно быть по возможности низким. Это способствует уменьшению вероятности перекрытия изоляции при ударах в опору и уменьшению вероятности перехода однофазных перекрытий в многофазные при ударах молнии в опоры и провода.

В обычных грунтах с удельным сопротивлением не более 100–300 Ом·м выполнение заземлений опор с достаточно низким сопротивлением не вызывает больших трудностей и их стоимость невысока. В сухих песчаных и скальных грунтах для этого приходится применять глубинные вертикальные

заземлители, достигающие хорошо проводящих слоев грунта, или горизонтальные (лучевые) заземлители длиной до 60 м. Применение сплошных противовесов, проложенных в земле от опоры к опоре, часто неэкономично, так как даже в грунтах высокого удельного сопротивления большая часть импульсного тока стекает с противовеса в землю на участке 60 – 100 м от опоры. Прокладка параллельных лучей нецелесообразна из-за снижения коэффициента их использования вследствие взаимного экранирования. При применении двух лучей их следует направлять в противоположные стороны вдоль оси ВЛ. Электромагнитная связь между проводами ВЛ и лучами в земле не оказывает существенного влияния на эффективность заземлителя.

Для повышения грозоупорности ВЛ, проходящих в районах с высоким удельным сопротивлением грунта, по совокупности факторов (трудности прокладки, повреждаемость в эксплуатации, низкая эффективность при стекании тока молнии) можно увеличить число тросов (с подвеской одного или двух из них под проводами).

Импульсная прочность изоляции ВЛ с тросом определяется типом изоляторов, длиной гирлянды, длиной воздушных промежутков на опоре и промежутка трос-провод в пролете. Тип изоляторов и длина гирлянды для ВЛ всех классов напряжения выбираются не по соображениям грозозащиты, а по рабочему напряжению. Увеличение длины гирлянды и скоординированных с ней воздушных промежутков на опоре повышает капитальные затраты и практически не используется как средство грозозащиты.

Изоляцию очень высоких переходных опор, выбранную по рабочему напряжению, рекомендуется усиливать на 15%. Эта мера позволяет компенсировать накапливаемые в эксплуатации поврежденные изоляторы и исключить проведение труднодоступных профилактических и ремонтных работ по замене изоляторов на переходных опорах в течение 25 лет.

Грозоупорность ВЛ 6–35 кВ на железобетонных и металлических опорах существенно повышается при использовании для подвески нижних проводов изоляционных траверс из пластических материалов. Кроме того, на ВЛ 6–10 кВ

для повышения грозоупорности в настоящее время могут использоваться разрядники длинно-искровые (РДИ), принцип действия которых, характеристики и конструкция приведены в приложении М.

Особое внимание уделяется защите опор с ослабленной изоляцией. На ранее построенных ВЛ с деревянными опорами без троса к ним относятся:

- отдельные металлические или железобетонные опоры;
- опоры, ограничивающие тросовый подход к ПС;
- опоры отпаек, подключенных через трехполюсные разъединители, скомплектованные на металлической раме;
- транспозиционные опоры.

К ослабленной изоляции относятся также воздушные промежутки, образующиеся при пересечении воздушных линий между собой.

При наличии на трассе опор с ослабленной изоляцией грозоупорность ВЛ снижается вследствие увеличения вероятности перекрытия ослабленной изоляции при ударе молнии в такую опору и от волн атмосферных перенапряжений, набегających на нее с прилегающих участков трассы с нормальной изоляцией.

Защита опор с ослабленной изоляцией ранее осуществлялась с помощью трубчатых разрядников, обеспечивающих гашение дуги после импульсного перекрытия. Недостатком трубчатых разрядников является нестабильность их характеристик, что нередко приводит к развитию аварий при отказе и разрушении разрядников. Обслуживание трубчатых разрядников трудоемко. Более перспективно использование ОПН. Опоры с ослабленной изоляцией могут защищаться также специально предусмотренными искровыми промежутками.

Грозозащита пересечений ВЛ между собой и с линиями электрифицированного транспорта и связи обеспечивается соблюдением нормированных расстояний по воздуху. Кроме того, на ВЛ с деревянными опорами и АПВ для ограничения амплитуды перенапряжений применялись

разрядники или искровые промежутки, установленные на опорах, ограничивающих пролет пересечения.

Средством повышения грозоупорности ВЛ могут служить ОПН, устанавливаемые непосредственно на опорах ВЛ. Применение ОПН на ВЛ наиболее эффективно в следующих случаях:

- на одной из цепей двухцепной ВЛ, что практически полностью предотвращает грозовые отключения одновременно двух цепей;
- при высоком сопротивлении заземления опор;
- на высоких опорах, например, на переходах через водные преграды.

При этом ОПН могут устанавливаться либо на всех фазах каждой опоры, либо на части опор или только на одной или двух фазах.

Резервным средством повышения надежности и бесперебойности работы ВЛ является автоматическое повторное включение (АПВ), в особенности быстродействующее (БАПВ) и однофазное (ОАПВ). Коэффициент успешности АПВ при грозовых отключениях, по данным опыта эксплуатации, для ВЛ 110–500 кВ составляет в среднем 0,6–0,8, а для ВЛ 750 и 1150 кВ – 0,8–0,9. АПВ позволяет частично компенсировать низкую грозоупорность ВЛ при трудностях устройства хороших заземлений и т.п. Однако применение АПВ не должно исключать использование основных средств грозозащиты.

### *6.3.2. Грозовые отключения ВЛ*

Грозовое перекрытие изоляции ВЛ может наступить (рис. 6.6):

А. При ударе молнии в вершину металлической или железобетонной опоры или в трос вблизи опоры. Вследствие высокого потенциала в точке подвеса гирлянды изоляторов, возникающего из-за падения напряжения на индуктивном сопротивлении тела опоры и заземлителя опоры, при определенных токах молнии происходит обратное перекрытие с тела опоры на провод.

Б. При ударе молнии в трос в пролете между опорами.

В. При ударе молнии в провод с последующим перекрытием с провода на ближайшую опору или между фазами. Это возможно на ВЛ с тросовой защитой при прорыве молнии через эту защиту, на ВЛ без тросовой защиты при непосредственном ударе молнии в провод.

Г. При ударе молнии в землю вблизи линии (на расстоянии не менее  $3h_{cp}$ ) вследствие индуцированных перенапряжений и низкой импульсной прочности гирлянд изоляторов воздушных линий 6, 10, 35 кВ. Вероятность перекрытия линейной изоляции линии 110 кВ и выше при таких разрядах весьма мала, и ею можно пренебречь.

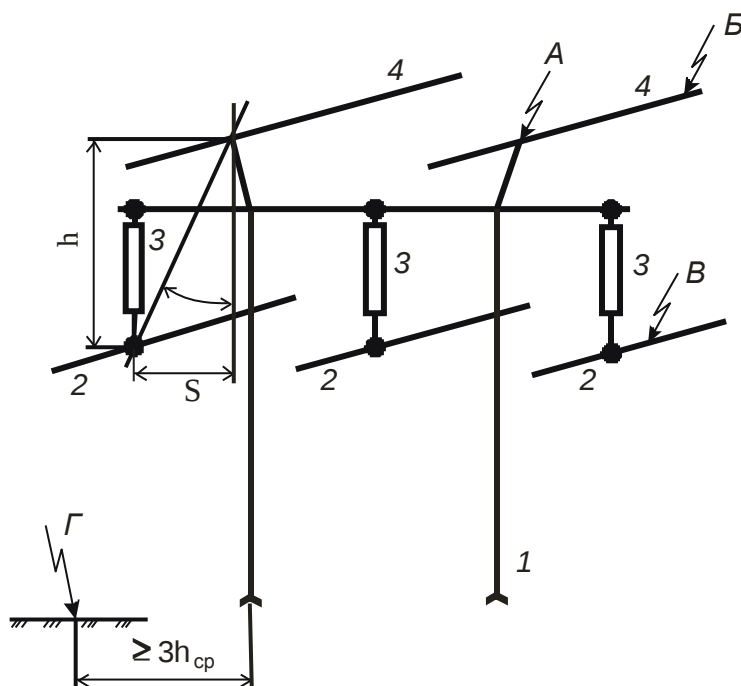


Рис. 6.6. Расчетные случаи грозового поражения ВЛ:

А – удар молнии в вершину опоры; Б – удар молнии в трос в пролете; В – удар молнии в провод; Г – удар молнии в землю вблизи ВЛ на расстоянии не менее трех средних высот ВЛ ( $3h_{cp}$ );  $\Delta h$  – превышение троса над проводом, м;  $\Delta S$  – горизонтальное смещение троса относительно провода, м; 1 – опора ВЛ; 2 – фазные провода; 3 – изоляционная подвеска фазных проводов; 4 – тросовые молниеотводы с защитным углом  $\alpha$

Грозовое перекрытие линейной изоляции не является достаточным условием для отключения линии. Отключение линии произойдет только в том

случае, если импульсное перекрытие перейдет в устойчивую дугу переменного тока. Коэффициент такого перехода для воздушных промежутков и изоляции линий на деревянных опорах определяется по формуле

$$\eta_b = \left( 1,6 \frac{U}{l_{\text{раз}}} - 6 \right) 10^{-2}, \quad (6.8)$$

где  $U$  – наибольшее действующее значение рабочего напряжения: фазного  $U_{\text{раб. наиб}}$  при однофазных перекрытиях и линейного при двухфазных перекрытиях, кВ;  $l_{\text{раз}}$  – длина пути разряда, м.

Если при расчете получается  $\eta_b \leq 0,1$  или  $\eta_b \geq 0,9$ , то принимают соответственно  $\eta_b = 0,1$  или  $\eta_b = 0,9$ .

Для гирлянд изоляторов линий на металлических и железобетонных опорах коэффициент перехода  $\eta_r$  принимается:

$$\eta_r = 0,7 \text{ для линий } U_{\text{ном}} \leq 220 \text{ кВ};$$

$$\eta_r = 1,0 \text{ для линий } U_{\text{ном}} \geq 330 \text{ кВ}.$$

При расчетах грозоупорности ВЛ необходимо знать 50%-ные импульсные разрядные напряжения  $U_{50\%}$  поддерживающих провода гирлянд изоляторов при грозовых импульсах, значения которых в зависимости от длины гирлянды  $l_r$  и полярности напряжения, приложенного к проводу, приведены на рис. 6.7.

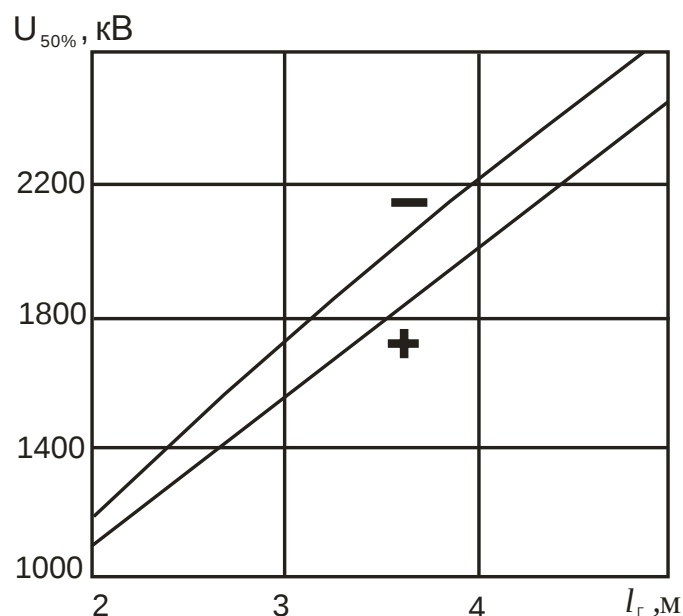


Рис. 6.7. 50%-ные разрядные напряжения гирлянд изоляторов с защитной арматурой при грозовых импульсах

При определении 50%-ных разрядных напряжений для линий на деревянных опорах нужно учитывать импульсную прочность части деревянной траверсы, которая определяется как  $70 l_d$ , кВ, где  $l_d$  – длина части пути разряда по дереву в метрах.

Рассмотрим методы расчета удельного числа отключений ВЛ  $n_{\text{откл}}$ .

*ВЛ, защищенные тросовыми молниеотводами*, имеют  $U_{\text{ном}} \geq 110$  кВ и работают в системах с заземленной нейтралью.

Удельное число грозовых отключений таких ВЛ

$$n_{\text{откл}} = 4 \cdot h_{\text{тр.ср}} \cdot P_{\alpha} \cdot P_{\text{пр}} \cdot \eta_{\Gamma} + (1 - P_{\alpha}) \left[ \Delta_{\text{оп}} \cdot P_{\text{оп}} \cdot \eta_{\Gamma} + \Delta_{\text{тр}} \cdot P_{\text{тр}} \cdot \eta_{\Gamma} \right], \quad (6.9)$$

где  $P_{\alpha} \cdot P_{\text{пр}}$  – вероятность перекрытия гирлянды изоляторов в результате прорыва молнии через тросовую защиту к проводам;

$\Delta_{\text{оп}} \cdot P_{\text{оп}}$  – вероятность перекрытия гирлянды при ударе молнии в опору и в трос вблизи опоры;

$\Delta_{\text{тр}} \cdot P_{\text{тр}}$  – вероятность перекрытия при ударе молнии в трос в середине пролета;

$\Delta_{\text{оп}} \approx 4h_{\text{оп}}/r_{\text{п}}$  – доля ударов молнии в опору;

$l_{\text{п}}$  – длина пролета;

$\Delta_{\text{тр}} \approx 1 - 4h_{\text{оп}}/r_{\text{п}}$  – доля ударов, приходящихся в середину пролета.

Вероятность прорыва молнии через тросовую защиту к проводам  $P_{\alpha}$  определяется по формуле

$$P_{\alpha} = \exp \left[ \frac{1}{D} \left( \frac{0,55}{\Delta h} \sqrt{\alpha h_{\text{тр.ср}} \Delta S} - \frac{9}{D} \right) \right], \quad (6.10)$$

в которой

$$D = 1 + U_{\text{ном}} \frac{h_{\text{тр.ср}}}{\Delta h} \left( \frac{117 U_{\text{ном}}^2}{\Delta h \Delta S l_{\text{п}} \frac{2 h_{\text{тр.ср}}}{r_{\text{пр}}}} \right), \quad (6.11)$$

где  $U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение ВЛ, кВ;

$\Delta h$  – превышение троса над проводом, м (см. рис. 6.6);

$\Delta S$  – горизонтальное смещение троса относительно провода, м;

$r_{\text{пр}}$  – радиус провода (в случае расщепления фазы  $r_{\text{экв}}$ ), м;

$h_{\text{тр.ср}}$  и  $h_{\text{пр.ср}}$  – средняя высота подвеса троса и провода, м, (см. рис. 6.3, 6.4);

$\alpha$  – защитный угол, град.

Вероятность перекрытия гирлянды изоляторов при ударе молнии в провод  $P_{\text{пр}}$  определяется по критическому току молнии  $I_{\text{кр1}}$ , рассчитанному из условия равенства падения напряжения на волновом сопротивлении провода с учетом короны  $Z_{\text{к}}$  (табл. 6.4) разрядному напряжению гирлянды изоляторов  $U_{50\%}$ :

$$I_{\text{кр1}} = 2 U_{50\%} / Z_{\text{к}}. \quad (6.12)$$

Таблица 6.4

Волновые сопротивления проводов воздушных линий и коэффициенты электромагнитной связи провода и троса (или другого провода)

| Тип опоры                                                         | Материал опоры | $U_{\text{ном}}$ , кВ | Число проводов в фазе | Волновое сопротивление, Ом |                                     | Коэффициенты связи |                                     |
|-------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|-------------------------------------|--------------------|-------------------------------------|
|                                                                   |                |                       |                       | $Z$<br>(расчетное)         | $Z_{\text{к}}$<br>(с учетом короны) | $K$<br>(расчетный) | $K_{\text{к}}$<br>(с учетом короны) |
| Одностоечная, одноцепная, с тросом                                | Железобетон    | 110                   | 1                     | 505                        | 455                                 | 0,215              | 0,240                               |
|                                                                   |                | 220                   | 1                     | 475                        | 420                                 | 0,200              | 0,210                               |
| Одностоечная, двухцепная, с тросом                                | Металл         | 35                    | 1                     | 510                        | 475                                 | 0,215              | 0,240                               |
|                                                                   | Железобетон    | 110                   | 1                     | 520                        | 470                                 | 0,210              | 0,250                               |
|                                                                   | Металл         | 220                   | 1                     | 505                        | 455                                 | 0,200              | 0,245                               |
|                                                                   |                | 330                   | 2                     | 400                        | 375                                 | 0,175              | 0,215                               |
| Портальная, с двумя тросами, горизонтальное расположение проводов | Дерево         | 35                    | 1                     | 490                        | 450                                 | 0,285              | 0,310                               |
|                                                                   |                | 110                   | 1                     | 465                        | 420                                 | 0,260              | 0,305                               |
|                                                                   |                | 220                   | 1                     | 445                        | 385                                 | 0,245              | 0,300                               |
|                                                                   | Металл         | 330                   | 2                     | 360                        | 330                                 | 0,200              | 0,245                               |
|                                                                   | Железобетон    | 500                   | 3                     | 320                        | 305                                 | 0,180              | 0,225                               |

В расчетах  $I_{кр1}$  часто используют наименьшее значение  $U_{50\%}$ , соответствующее положительной полярности напряжения (см. рис. 6.7). При этом разрядный градиент напряжения составляет примерно 500 кВ/м, а на 50%-ное разрядное напряжение в зависимости от  $l_{\Gamma}$ , м, представляется как

$$U_{50\%} \approx 500 \cdot l_{\Gamma}. \quad (6.13)$$

Для определения вероятности перекрытия гирлянды изоляторов при ударе молнии в опору и в трос вблизи опоры  $P_{оп}$  необходимо знать напряжение, приложенное к гирлянде изоляторов  $U_{из}$ , равное разности напряжений на опоре  $U_{оп}$  и на проводе  $U_{пр}$ .

Напряжение опоры в точке подвеса гирлянды изоляторов имеет три составляющие: напряжение на сопротивлении заземления опоры  $R_{и}$  от тока в опоре  $i_{оп}$ , напряжение на индуктивности опоры  $L_{оп}(di_{оп}/dt)$ , напряжение на опоре вследствие взаимоиндукции между каналом молнии и опорой на высоте подвеса провода  $M_{пр}(di_{м}/dt)$ :

$$U_{оп} = R_{и} i_{оп} + L_{оп} \frac{di_{оп}}{dt} + M_{пр} \frac{di_{м}}{dt}, \quad (6.14)$$

где  $M_{пр} \approx 0,2 h_{пр.ср}$ , мкГн;  $L_{оп} = L_0 h_{оп}$ , мкГн;  $L_0$  – удельная индуктивность опоры, мкГн/м (табл. 6.5);  $h_{оп}$ , м;  $U_{оп}$ , кВ;  $i_{оп}$ , кА;  $di_{оп}/dt$  и  $di_{м}/dt$ , кА/мкс.

Таблица 6.5

Удельная индуктивность  $L_0$  опор

| Тип опоры                                                    | $L_0$ , мкГн/м |
|--------------------------------------------------------------|----------------|
| Однотростовая, металлическая                                 | 0,6            |
| Однотростовая, железобетонная                                | 0,7            |
| Двухтростовая, металлическая, на оттяжках                    | 0,4            |
| Портальная, металлическая                                    | 0,5            |
| Двухтростовая, деревянная, с двумя заземляющими токоотводами | 0,7            |
| Отдельно стоящая опора для молниевывода                      | 1,3 - 1,7      |

При косоугольной форме тока молнии в пределах его фронта  $i_m = a_m t$  ток в опоре в пределах фронта определяется как

$$i_{\text{оп}} = a_m t \left[ \frac{0,5L_{\text{тр}} - M_{\text{тр}}}{0,5L_{\text{тр}} + L_{\text{оп}}} \right] \frac{1 - e^{-\alpha_1 t}}{\alpha_1 t}, \quad (6.15)$$

а производная тока в опоре как

$$\frac{di_{\text{оп}}}{dt} = a_m \left[ \frac{0,5L_{\text{тр}} - M_{\text{тр}}}{0,5L_{\text{тр}} + L_{\text{оп}}} \right] e^{-\alpha_1 t}, \quad (6.16)$$

где  $\alpha_1 = \frac{R_{\text{и}}}{0,5L_{\text{тр}} + L_{\text{оп}}}$ ;

$L_{\text{тр}} = Z_{\text{тр}} \frac{l_{\text{п}}}{c}$  – индуктивность троса, мкГн;

$Z_{\text{тр}} \approx 350 \text{ Ом}$ ;  $l_{\text{п}}$  – длина пролета, м;

$c = 300 \text{ м/мкс}$  – скорость света;

$M_{\text{тр}} \approx 0,5 h_{\text{тр.ср}}$  – взаимная индуктивность между каналом молнии и петлей опора – трос – земля, мкГн.

Напряжение на проводе имеет три составляющие:

– рабочее напряжение на проводе  $U_{\text{раб}} \approx 0,5U_{\text{ном}}$ , кВ, имеющее полярность, противоположную полярности напряжения опоры;

– напряжение  $U_{\text{инд}} \approx 10 h_{\text{пр.ср}}(1 - K_{\text{к}})$ , кВ, индуцируемое на проводе зарядом лидера молнии и имеющее полярность, противоположную полярности напряжения на опоре; коэффициенты электромагнитной связи между тросом и проводом  $K_{\text{к}}$  приведены в табл. 6.4;

– напряжение  $U_{\text{инд1}} = K_{\text{к}} U_{\text{оп}}$ , кВ, индуцированное на проводе в результате распространения по тросу импульса напряжения с максимальным значением  $U_{\text{оп}}$ .

Максимальное напряжение на изоляции  $U_{\text{из. max}} = U_{\text{оп}} - U_{\text{пр}}$  определяется в момент времени, равный длительности фронта тока молнии  $\tau_{\text{ф}}$ , т.е. при максимальном значении тока молнии  $I_m = a_m \tau_{\text{ф}}$  и соответственно при максимальном значении тока в опоре  $I_{\text{оп}}$ :

$$U_{\text{из. max}} = U_{\text{оп}}(1 - K_{\text{к}}) + U_{\text{инд}} + U_{\text{раб.}} \quad (6.17)$$

Напряжение  $U_{\text{из. max}}$  может иметь множество значений, определяемых сочетанием случайных величин  $a_{\text{м}}$  и  $I_{\text{м}}$ ;  $U_{\text{из. max}}$  превысит разрядное напряжение гирлянды  $U_{\text{р}}$ , заданное вольт-секундной характеристикой,

$$U_{\text{р}} = A \sqrt{1 + \frac{T}{t_{\text{р}}}}, \quad (6.18)$$

где  $t_{\text{р}}$  – время разряда. Коэффициенты  $A$  и  $T$  определяются по двум значениям:  $U_{\text{р}} = U_{50\%}$  при  $t_{\text{р}} = 10$  мкс и  $U_{\text{р}} = U_{2\text{мкс}}$  при  $t_{\text{р}} = 2 - 3$  мкс; можно принять  $U_{2\text{мкс}} \approx 1,25 U_{50\%}$ .

На рис. 6.8 показаны построения для определения сочетаний  $a_{\text{м}}$  и  $I_{\text{м}}$  при перекрытии гирлянды изоляторов. По (6.18) построена вольт-секундная характеристика 1. Задаваясь значениями крутизны тока молнии  $a_{\text{м}}$  по (6.17) рассчитывается  $U_{\text{из. max}}(t_{\text{р}})$  – кривые 2. Точки пересечения кривых 1 и 2 позволяют определить для каждого случая время разряда  $t_{\text{р}} = \tau_{\text{ф}}$  и соответствующее значение тока молнии  $I_{\text{м}} = a_{\text{м}} t_{\text{р}}$ . В результате получается зависимость  $a_{\text{м}} = f(I_{\text{м}})$ , называемая кривой опасных параметров и показанная на рис. 6.9, а. Эта кривая делит зону сочетаний  $a_{\text{м}}$  и  $I_{\text{м}}$  на две области: область опасного сочетания  $a_{\text{м}}$  и  $I_{\text{м}}$  (заштриховано), в которой сочетания  $a_{\text{м}}$  и  $I_{\text{м}}$  таковы, что  $U_{\text{из. max}} > U_{\text{р}}$ , и область безопасного сочетания  $a_{\text{м}}$  и  $I_{\text{м}}$ , в которой  $U_{\text{из. max}} < U_{\text{р}}$ .

Используя формулы табл. 6.2, осуществляем переход к зависимости  $P(a_{\text{м}}) = f_1[P(I_{\text{м}})]$  (рис. 6.9, б).

Поскольку  $a_{\text{м}}$  и  $I_{\text{м}}$  считаются независимыми случайными величинами, то

$$P_{\text{оп}} = \int_0^1 P(I_{\text{м}}) dP(a_{\text{м}}), \quad (6.19)$$

что определяется заштрихованной областью на рис. 6.9, б.

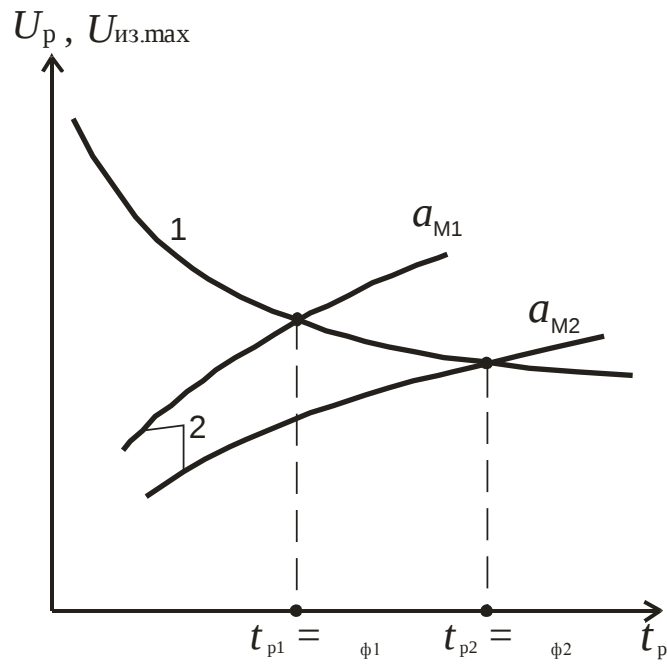


Рис. 6.8. Определение времени разряда линейной изоляции при разной крутизне фронта тока молнии ( $a_{M1} > a_{M2}$ ):

1 – вольт-секундная характеристика изоляции; 2 – напряжения изоляции

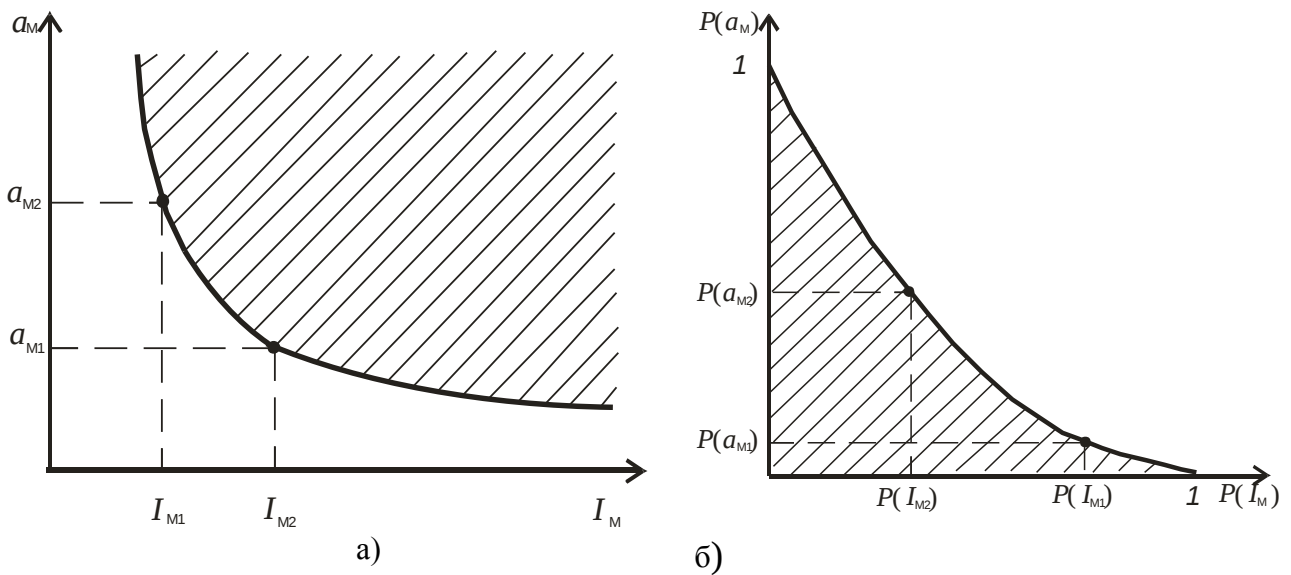


Рис. 6.9. Определение вероятности перекрытия гирлянды изоляторов при ударе молнии в опору:

а – кривая опасных параметров; б – кривая для определения вероятности  $P_{оп}$

Расчеты по изложенной методике достаточно громоздки. Упрощенно значение  $P_{оп}$  можно оценить, используя некоторый условный критический ток молнии

$$I_{кр.усл} = \frac{U_{50\%}}{R_{и} + \delta h_{оп}}, \quad (6.20)$$

где  $U_{50\%}$ , кВ;  $R_{и}$ , Ом;  $h_{оп}$ , м;  $I_{кр2}$ , кА;  $\delta = 0,15$  для ВЛ с двумя тросами и  $\delta = 0,3$  для ВЛ с одним тросом.

Расчетным случаем для определения  $P_{тр}$  является удар молнии в трос в середине пролета. При этом возможно перекрытие воздушного промежутка трос – провод в середине пролета практически всегда на фронте тока молнии, чему соответствует вероятность  $P_{тр1}$ . Вторым случаем является перекрытие гирлянды изоляторов на опоре при протекании тока троса по опоре, что определяется вероятностью  $P_{тр2}$ .

Вероятность  $P_{тр}$  рассчитывается по формуле

$$P_{тр} \approx P_{тр1} + P_{тр2} - P_{тр1} P_{тр2}. \quad (6.21)$$

При этом принимается, что  $P_{тр1}$  и  $P_{тр2}$  – вероятности двух независимых и совместимых событий.

Вероятность  $P_{тр1}$  определяется по критической крутизне тока молнии, кА/мкс, которая рассчитывается по формуле

$$a_{кр} = \frac{2E_{р.ср} l_{тр.пр}}{Z_{тр} \tau_{тр} (1 - K_{к})}, \quad (6.22)$$

где  $E_{р.ср} = 500 \left( 1 + \frac{2,4}{\tau_{тр}} \right)$  – средний разрядный градиент промежутка трос – провод, кВ/м;

$\tau_{тр} = l_{п} / v_{тр}$  – время распространения волны по коронирующему тросу в пределах пролета ВЛ, мкс;

$l_{п}$  – длина пролета, м;

$v \approx 250$  м/мкс – скорость распространения волны;

$l_{тр.пр}$  – расстояние между тросом и проводом в середине пролета, м, которое вычисляется по нормированному ПУЭ наименьшему расстоянию между проводом и тросом по вертикали  $h_{тр.пр}$ , м (см. табл. 6.6), и защитному углу  $\alpha$ :  $l_{тр.пр} = h_{тр.пр} / \cos \alpha$ ; значения  $Z_{тр}$  и  $K_k$  указаны выше.

При  $a_m > a_{кр}$  происходит пробой промежутка трос – провод. Это условие позволяет рассчитать  $P_{тр1}$  по соответствующей формуле табл. 6.2.

Вероятность  $P_{тр2}$  определяется по критическому току молнии  $I_{кр2}$ . При расчете  $I_{кр2}$ , кА, учитывается  $U_{50\%}$ ,  $U_{раб} \approx 0,5U_{ном}$ , кВ, импульсное сопротивление опоры  $R_{и}$ , Ом, коэффициент связи трос – провод  $K_k$ , (см. табл. 6.4):

$$I_{кр2} = \frac{2(U_{50\%} - U_{раб})}{R_{и}(1 - K_k)} \quad (6.23)$$

Таблица 6.6

Наименьшее расстояние между тросом и проводом в середине пролета

| Длина пролета, м | Наименьшее расстояние между тросом и проводом по вертикали, м | Длина пролета, м | Наименьшее расстояние между тросом и проводом по вертикали, м |
|------------------|---------------------------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------------------------|
| 100              | 2,0                                                           | 700              | 11,5                                                          |
| 150              | 3,2                                                           | 800              | 13,0                                                          |
| 200              | 4,0                                                           | 900              | 14,5                                                          |
| 300              | 5,5                                                           | 1000             | 16,0                                                          |
| 400              | 7,0                                                           | 1200             | 18,0                                                          |
| 500              | 8,5                                                           | 1500             | 21,0                                                          |
| 600              | 10,0                                                          |                  |                                                               |

По формуле (6.9) определяется число грозových отключений, приводящих к работе выключателей. Для ВЛ с АПВ число устойчивых отключений при успешном АПВ определяется по формуле:

$$n_{\text{откл. уст}} = n_{\text{откл}} (1 - \beta_{\text{АПВ}}), \quad (6.24)$$

где  $\beta_{\text{АПВ}}$  – коэффициент успешности АПВ, который по данным опыта эксплуатации для ВЛ 110 – 330кВ составляет в среднем 0,8, а для ВЛ 500 – 750 кВ – 0,9.

*ВЛ без тросовой молниезащиты.* Удельное число отключений ВЛ на металлических и железобетонных опорах

$$n_{\text{откл}2} = 4h_{\text{пр.ср}} (\Delta_{\text{пр}} P_{\text{пр}} + \Delta_{\text{оп}} P_{\text{оп}}) \eta_{\Gamma}. \quad (6.25)$$

Считается, что удары молнии между проводами и опорами распределены примерно поровну, т.е.  $\Delta_{\text{пр}} \approx \Delta_{\text{оп}} = 0,5$ .

Вероятность  $P_{\text{пр}}$  для ВЛ в системах с заземленной нейтралью ( $U_{\text{ном}} \geq 110$  кВ) определяется по критическому току  $I_{\text{кр}1}$ , который рассчитывается по (6.12). У ВЛ в системах с изолированной нейтралью ( $U_{\text{ном}} \leq 35$  кВ) для определения  $P_{\text{пр}}$  используется критический ток  $I_{\text{кр}3}$ , кА:

$$I_{\text{кр}3} = \frac{U_{50\%}}{R_{\text{и}} (1 - K_{\text{к}})}, \quad (6.26)$$

рассчитанный по условию образования двухфазного перекрытия на землю.

Для определения вероятности  $P_{\text{оп}}$  для ВЛ в системах с заземленной нейтралью необходимо рассчитать максимальное напряжение  $U_{\text{оп. макс}}$ , кВ, в точке крепления гирлянды изоляторов, т.е. на вершине опоры. Упрощенно это напряжение вычисляется по соотношению

$$U_{\text{оп. макс}} = R_{\text{и}} I_{\text{м}} + a_{\text{м}} L_0 h_{\text{оп}}. \quad (6.27)$$

Считая, что импульсное напряжение перекрытия гирлянды равно  $U_{50\%}$ , из равенства  $U_{\text{оп. макс}} = U_{50\%}$  получаем соотношение

$$a_{\text{м}} = \frac{U_{50\%} - R_{\text{и}} I_{\text{м}}}{L_0 h_{\text{оп}}}. \quad (6.28)$$

По соотношению (6.28) строится кривая опасных параметров  $a_m = f(I_m)$ , аналогичная кривой на рис. 6.9, а, и далее зависимость  $P(a_m) = f_1[P(I_m)]$ , аналогичная зависимости, приведенной на рис. 6.9, б. С помощью последней зависимости вычисляется  $P_{оп}$ .

У ВЛ в системах с изолированной нейтралью при ударе молнии в опору отключение возможно только при перекрытии изоляции по крайней мере двух гирлянд и образовании двухфазного замыкания на землю. Расчеты с использованием (6.28) позволяют определить вероятность перекрытия изоляции одной гирлянды  $P_{оп1}$ . Считая, что наиболее вероятным случаем, являются перекрытия изоляции двух гирлянд, которые можно рассматривать как совместные, независимые, случайные события, получим, что

$$P_{оп} = P_{оп1} \cdot P_{оп1} = P_{оп1}^2. \quad (6.29)$$

Удельное число отключений ВЛ на деревянных опорах определяется только ударами молнии в фазные провода и условием перекрытия изоляции между фазами по пути гирлянда – деревянная траверса – гирлянда:

$$n_{откл3} = 4 \cdot h_{пр.ср} \cdot P_{пер} \cdot \eta_v. \quad (6.30)$$

Критический ток, необходимый для расчета  $P_{пер}$ , вычисляется по соотношению

$$I_{кр4} = \frac{2 \cdot U_{50\%1}}{Z_k \cdot (1 - K_k)}, \quad (6.31)$$

причем  $U_{50\%1} = 2 \cdot U_{50\%} + 70 \cdot l_d$ , где  $l_d$  – длина деревянной траверсы между точками крепления гирлянд изоляторов, м.

Коэффициент  $\eta_v$  рассчитывается по (6.6) при  $U_{раб. наиб}$ , кВ, и длине пути разряда  $l_{раз} = 2l_{Г} + l_d$ , м. Учет влияния АПВ производится по (6.24).

*Отключения ВЛ при индуктированных перенапряжениях.* При ударах молнии в землю вблизи ВЛ удельное число отключений за счет индуктированных перенапряжений определяется как

$$n_{инд. откл} = n_{инд} \cdot \eta_{Г}, \quad (6.32)$$

где  $n_{\text{инд. откл}}$  – число отключений в год на 100 км длины ВЛ и 100 грозových ч;

$n_{\text{инд}}$  – годовое число индуктированных перенапряжений на 100 км длины ВЛ и 100 грозových ч, приводящих к перекрытию изоляции ВЛ;

$\eta_{\text{г}}$  определяется по (6.9).

Расчет  $n_{\text{инд}}$  – довольно сложная задача. Известны некоторые значения  $n_{\text{инд}}$  для ВЛ 10; 35 и 110 кВ на металлических и железобетонных опорах:

|                               |     |     |     |
|-------------------------------|-----|-----|-----|
| $U_{\text{ном}}, \text{кВ}$   | 10  | 35  | 110 |
| $U_{50\%}, \text{кВ}$         | 100 | 350 | 700 |
| $h_{\text{пр. ср}}, \text{м}$ | 10  | 15  | 20  |
| $n_{\text{инд}}$              | 25  | 5   | 1   |

В табл. 6.7 и 6.8 приведены некоторые данные по удельному числу грозových отключений для ВЛ различных классов напряжения.

Таблица 6.7

#### Характеристики молниезащиты ВЛ 35 – 500 кВ

| Опора                                          | Сопротивление<br>заземления<br>опоры, Ом | $U_{\text{ном}}, \text{кВ}$                                    |     |     |     |      |      |
|------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|------|------|
|                                                |                                          | 35                                                             | 110 | 150 | 220 | 330  | 500  |
|                                                |                                          | Число грозových отключений на 100 км ВЛ 100<br>грозových часов |     |     |     |      |      |
| Деревянная без<br>тросов                       | -                                        | 10                                                             | 8,5 | -   | -   | -    | -    |
| Одноцепная<br>металлическая<br>с одним тросом  | 5                                        | -                                                              | 2   | 1,2 | 1,2 | 0,8  | -    |
|                                                | 10                                       | -                                                              | 3   | 2   | 2   | 1,2  | -    |
|                                                | 20                                       | -                                                              | 4,8 | 3   | 3   | 1,8  | -    |
| Двухцепная<br>металлическая<br>с одним тросом  | 5                                        | -                                                              | 4,3 | 3   | 3   | 2    | -    |
|                                                | 10                                       | -                                                              | 6   | 4   | 3,5 | 2,8  | -    |
|                                                | 20                                       | -                                                              | 9   | 6   | 5,5 | 4    | -    |
| Металлическая<br>портальная с<br>двумя тросами | 5                                        | -                                                              | -   | -   | 0,5 | 0,12 | 0,1  |
|                                                | 10                                       | -                                                              | -   | -   | 0,8 | 0,2  | 0,15 |
|                                                | 20                                       | -                                                              | -   | -   | 1,2 | 0,7  | 0,5  |

Таблица 6.8

## Характеристики молниезащиты ВЛ 110 – 750 кВ

| Параметр                                                                                    | Напряжение ВЛ, кВ |        |         |         |          |          |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|--------|---------|---------|----------|----------|------------|
|                                                                                             | 110               |        | 220     |         | 330      | 500      | 750        |
| Материал опор                                                                               | Железо-бетон      | металл | металл  |         | металл   | металл   | металл     |
| Марка провода                                                                               | АС-120            | АС-150 | АСО-330 | АСО-330 | 2АСО-400 | 3АСО-400 | 4АСУ-400   |
| Количество и тип изолятора на опоре                                                         | 8ПС6-Б            | 8ПС6-Б | 14ПС6-Б | 14ПС6-Б | 22ПС6-Б  | 28ПС12-А | 2х41ПС12-А |
| Защитный угол троса $\alpha$ , град                                                         | 31,2              | 20,7   | 29,0    | 24,2    | 22,6     | 22,7     | 24,7       |
| Импульсное сопротивление заземления опор, Ом                                                | 20                | 15     | 15      | 10      | 10       | 10       | 10         |
| Удельное число прямых ударов молнии в линию за год $n_{уд. ВЛ}$ , уд/(100 км·100гр.ч)       | 100               | 165    | 182     | 227     | 153      | 174      | 207        |
| Удельное число отключений линии при ударе молнии в провод $n_{пр}$ , 1/год                  | 0,06              | 0,06   | 0,23    | 0,18    | 0,22     | 0,11     | 0,063      |
| Удельное число отключений линии при ударе в опору $n_{оп}$ , 1/год                          | 0,81              | 1,73   | 0,41    | 0,45    | 0,002    | <0,001   | <0,001     |
| Удельное число отключений линии при ударе в трос $n_{тр}$ , 1/год                           | 0,43              | 0,89   | 0,13    | <0,01   | <0,001   | <0,001   | <0,001     |
| Удельное число отключений линии вследствие индуктированных перенапряжений $n_{инд}$ , 1/год | 0,25              | 0,38   | 0,03    | 0,04    | 0,003    | <0,001   | <0,001     |
| Удельное суммарное число грозовых отключений линии $n_{откл \Sigma}$ , 1/год                | 1,55              | 3,06   | 0,80    | 0,68    | 0,23     | 0,11     | 0,066      |

### *6.3.3. Мероприятия по повышению грозоупорности ВЛ 6-35 кВ*

ВЛ 6 и 10 кВ на железобетонных опорах имеют очень низкий уровень грозоупорности из-за малой электрической прочности штыревых изоляторов и высокой вероятности возникновения к.з. после импульсного перекрытия. Кроме того, с большой вероятностью изоляция этих ВЛ перекрывается от индуктированных перенапряжений при близких ударах молнии в землю. Небольшое улучшение эксплуатационных показателей этих ВЛ достигается при повышении электрической прочности изоляции и снижении сопротивления заземлений. Улучшение характеристик также достигается в результате применения разрядников длинно-искровых (РДИ).

ВЛ 6 и 10 кВ на деревянных опорах с креплением изоляторов с помощью крюков на стойках также имеют низкий уровень грозоупорности: междуфазное перекрытие изоляции происходит практически при каждом прямом ударе молнии в провод. Число грозовых отключений этих ВЛ меньше по сравнению с ВЛ на железобетонных опорах: меньше вероятность возникновения к.з. после импульсного перекрытия; индуктированные перенапряжения не вызывают перекрытия линейной изоляции. Близкие, но несколько худшие показатели имеют линии на деревянных опорах с металлическими траверсами за счет уменьшения импульсной прочности изоляции между фазами и увеличения вероятности перехода импульсного перекрытия в силовую дугу. Основным мероприятием для повышения эксплуатационных показателей этих ВЛ является АПВ. На этих ВЛ целесообразно использование АПВ двухкратного действия. Учитывая небольшую длину ВЛ 10 кВ, при соблюдении этих мероприятий удастся обеспечить приемлемые эксплуатационные показатели в районах с умеренной грозовой деятельностью. Кроме того, средством повышения грозоупорности таких ВЛ являются разрядники длинно-искровые (РДИ).

В качестве мероприятий по повышению грозоупорности ВЛ основных сетей 10 кВ могут использоваться изоляционные траверсы (из сухой и пропитанной древесины или пластических масс) для крепления нижних

проводов. Верхний провод крепится на изоляторе, устанавливаемом на вершине железобетонной или деревянной стойки, и работает как трос. На деревянных опорах от штыря изолятора верхнего провода вдоль стойки прокладывается стальной спуск с разрывом 15 см на высоте 4 м от земли. Заземляющий спуск погружается в грунт на глубину заложения стойки. Такая конструкция ВЛ за счет повышения импульсной прочности изоляции и снижения вероятности возникновения к.з. после импульсного перекрытия позволяет снизить число грозовых отключений по сравнению с ВЛ на железобетонных и деревянных опорах с металлическими траверсами и креплениями изоляторов на крюках.

Уровень грозоупорности ВЛ 35 кВ на железобетонных опорах существенно зависит от сопротивления заземлений опор. Для обеспечения эксплуатационной надежности этих ВЛ необходимо ограничить сопротивление заземлений в соответствии с рекомендациями /1/.

Повышенная (примерно на порядок) грозоупорность ВЛ 35 кВ на железобетонных опорах может быть достигнута при использовании изоляционных траверс для подвески нижних проводов.

ВЛ 35 кВ на деревянных порталных опорах с расстоянием между проводами 3 м при выполнении сопротивлений заземления опор в соответствии с рекомендациями /1/ более грозоупорны. Для повышения надежности таких ВЛ от траверсы вдоль стоек опор следует проложить заземляющие спуски, которые закладываются в грунт на глубину 0,5 м и соединяются между собой в земле. При этом уровень грозоупорности ВЛ повышается и предотвращается расщепление стоек.

На ВЛ 6-35 кВ с деревянными опорами отдельные железобетонные (металлические) опоры с ослабленной изоляцией и крайние опоры участка с железобетонными опорами (или участка с чередующимися железобетонными и деревянными опорами) должны защищаться подвесными ОПН.

На ВЛ 35 кВ с деревянными опорами защиту единичных железобетонных или металлических опор следует выполнять либо с помощью ОПН, либо за счет

усиления изоляции (до 10-12 изоляторов) в гирлянде, при этом должен быть обеспечен габарит до земли в соответствии с /1/ и импульсная прочность воздушного промежутка не ниже импульсной прочности гирлянды.

На отпайках от ВЛ 6-35 кВ на деревянных опорах за отпаечным разъединителем со стороны питания устанавливается ОПН.

Грозозащита ВЛ 6-20 кВ с защищенными (изолированными) проводами должна выполняться в соответствии с рекомендациями «Правил устройства воздушных линий электропередачи напряжением 6-20 кВ с защищенными проводами».

## **§6.4. Молниезащита электрических станций и подстанций**

### *6.4.1. Общие положения*

Опасные грозовые воздействия на подстанционном оборудовании возникают при ударах молнии непосредственно в подстанцию (ПС), а также при поражениях ВЛ и приходе по ним на распределительное устройство (РУ) и ПС грозовых волн. Кроме того, для РУ 6 и 10 кВ опасны перенапряжения, индуктированные на токоведущих частях при ударах молнии в землю или другие объекты вблизи ВЛ или ПС.

Эффективность защиты от грозовых перенапряжений внутренней изоляции подстанционного оборудования должна быть значительно более высокой по сравнению с воздушной и линейной изоляцией ВЛ, так как внутренняя изоляция оборудования подстанций имеет небольшие запасы по отношению к импульсным испытательным напряжениям и не обладает свойством самовосстановления после грозового перекрытия.

Защита оборудования подстанций от прямых ударов молнии обеспечивается системой стержневых и тросовых молниеотводов. Для оценки эффективности грозозащиты изоляции оборудования, подвесной и воздушной

изоляции на ПС от прямых ударов молнии применяется такой же качественный, но более жесткий количественный критерий, что и для ВЛ, т.е. ожидаемое число обратных перекрытий при ударах молнии в молниеотводы, а также от прорывов через систему молниезащиты. В качестве критерия используется среднее ожидаемое число лет безаварийной работы ПС при этих воздействиях  $T_{п.у}$ . Считается, что если  $T_{п.у}$  расчетно оценивается 500-3000 годами соответственно для ПС 35-1150 кВ, то грозозащита оборудования, подвесной и воздушной изоляции ПС надежно защищена от обратных перекрытий и прорывов на территории РУ.

Защита ПС от набегающих с ВЛ волн грозовых перенапряжений основана на выборе соответствующих защитных аппаратов (ОПН, разрядников), числа и места их установки на ПС с тем, чтобы обеспечить такое снижение воздействующих волн грозовых перенапряжений по амплитуде и крутизне, при котором в течение нормированного срока безаварийной эксплуатации  $T_{н.в}$  не будут превышены допустимые значения перенапряжений для наиболее ответственного и дорогостоящего оборудования (трансформаторов, автотрансформаторов, шунтирующих реакторов и т.д.). Показатель надежности грозозащиты ПС 35-1150 кВ от набегающих волн  $T_{н.в}$  должен быть соответственно не менее 200-1500 лет.

#### *6.4.2. Защита станций и подстанций от прямых ударов молнии*

Для защиты подстанционного оборудования от прямых ударов молнии используется система молниеотводов. Требуемое количество и высота молниеотводов выбирается в соответствии с рекомендациями приложения А. При этом должны быть приняты меры по предотвращению обратных перекрытий с молниеотводов на токоведущие части РУ по воздуху и выноса высокого потенциала по земле.

Расчетное значение надежности защиты станций и ПС от прямых ударов молнии выбирают в зависимости от степени ответственности защищаемого объекта, от тяжести ущербов, возникающих при его поражении, интенсивности грозовой деятельности и пр. Наибольшая надежность грозозащиты должна обеспечиваться следующим объектам: ОРУ вместе с его шинными мостами и гибкими связями, зданиям машинного зала и ЗРУ; зданиям трансформаторной башни, маслохозяйства, нефтехозяйства, электролизной и ацетиленогенераторной станции; угледробилке, вагоноопрокидывателям, резервуарам с горючими жидкостями или газами; местам хранения баллонов с водородом; градирням и дымовым трубам. Электрические цепи 6 и 10 кВ, имеющие гальванические связи с генераторным напряжением, также защищаются от прямых ударов молнии.

Согласно требованиям /1/ для защиты от прямых ударов молнии выполняются мероприятия, указанные в табл. 6.9.

Допускается не защищать от прямых ударов молнии:

- ОРУ 20 - 35 кВ с трансформаторами единичной мощностью 1600 кВ·А и менее независимо от значения  $D_r$ ;
- ОРУ 20 - 35 кВ в районах с  $D_r < 20$ ;
- подстанции напряжением 220 кВ и ниже на площадках с  $\rho \geq 2000$  Ом·м при  $D_r < 20$ ;
- здания ЗРУ в районе с  $D_r < 20$ .

Места и условия установки стержневых молниеотводов указаны в табл. 6.10.

При установке стержневых молниеотводов на конструкциях ОРУ следует использовать защитные действия высоких объектов (опор ВЛ, прожекторных мачт и т.п.).

Порталы трансформаторов, связанных с вращающимися машинами, открытыми токопроводами или гибкими связями, должны входить в зону защиты отдельно стоящих или установленных на других порталах молниеотводов. Не допускается установка молниеотводов на конструкциях

ОРУ, находящихся ближе 15 м от указанных выше объектов, связанных с вращающимися машинами.

Таблица 6.9

Мероприятия защиты электростанций и подстанций от прямых ударов молнии

| Защищаемый объект                                                                                                    | Защитные устройства                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ОРУ, в том числе гибкие мосты и шинные связи                                                                         | Стержневые молниеотводы                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Здания машинного зала, ЗРУ при $D_r > 20$                                                                            | 1. Заземление металлических и железобетонных конструкций кровли и металлической кровли<br>2. Стержневые молниеотводы или заземленные молниеприемные сетки на крыше зданий                                                                                                             |
| Дымовые трубы:<br>– металлические;<br>– кирпичные, бетонные и железобетонные.                                        | Заземления<br>Стальные полосы-молниеприемники на вершине и заземляющие спуски, присоединенные к заземлителю                                                                                                                                                                           |
| Здания трансформаторной башни, маслохозяства, нефтехозяства, электролизной станции                                   | 1. Отдельно стоящий стержневой или тросовый молниеотвод. Импульсное сопротивление каждого заземления не более 100 Ом при $\rho < 500$ Ом·м и не более 40 Ом при $\rho > 500$ Ом·м<br>2. Заземление металлических корпусов                                                             |
| Угледробилки, вагоноопрокидыватели, резервуары с горючими жидкостями или газами, места хранения баллонов с водородом | 1. Стержневые молниеотводы, устанавливаемые отдельно или на самом сооружении при толщине крыши или стенки не менее 4 мм<br>2. Заземление корпуса установки при толщине металлической крыши или стенки 4 мм и более; при объеме менее 200 м <sup>3</sup> независимо от толщины металла |

Таблица 6.10

## Места и условия установки стержневых молниеотводов

| Места           | Условия                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1               | 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Конструкции ОРУ | <p>1. На конструкциях ОРУ напряжением 35-150 кВ стержневые молниеотводы могут устанавливаться:</p> <p>а) при эквивалентном удельном сопротивлении грунта в грозовой сезон: до 500 Ом·м (35кВ) и до 1000 Ом·м (110 и 150 кВ) – независимо от площади заземляющего устройства подстанции; от 500 до 750 Ом·м (35кВ) и от 1000 до 2000 Ом·м (110 и 150 кВ) – при площади заземляющего устройства подстанции (ПС) 10000 м<sup>2</sup> и более;</p> <p>б) от стоек конструкций ОРУ молниеотводами должно быть обеспечено растекание тока молнии по магистралям заземления не менее чем в трех-четырех направлениях для ОРУ 35 кВ и не менее чем в двух-трех для ОРУ 110 и 150 кВ, с углом не менее 90° между соседними.</p> <p>в) должно быть установлено не менее одного вертикального электрода длиной 3-5 м на каждом направлении, на расстоянии не менее длины электрода от места присоединения к магистрали заземления стойки с молниеотводом.</p> <p>г) гирлянды подвесной изоляции на порталах ОРУ 35 кВ должны иметь следующее количество изоляторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– не менее шести изоляторов при расположении вентильных разрядников или соответствующих им по уровню остающихся напряжений ОПН не далее 15 м по магистралям заземляющего устройства от места присоединения к нему;</li> <li>– не менее семи изоляторов в остальных случаях;</li> </ul> <p>д) расстояние по воздуху от конструкций ОРУ, на которых установлены молниеотводы, до токоведущих частей должно быть не менее длины гирлянды.</p> <p>2. В ОРУ 220 кВ и выше.</p> |

| 1                                                                                                                                                                         | 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Трансформаторные порталы, порталы шунтирующих реакторов и конструкции ОРУ, удаленные от трансформаторов или реакторов по магистралям заземления менее, чем на 15 м</p> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. В пределах контура заземления в грозовой сезон, <math>\rho &lt; 350 \text{ Ом}\cdot\text{м}</math>.</li> <li>2. Непосредственно на выводах обмоток трансформаторов 3 - 35 кВ или на расстоянии не более 5 м от них по ошиновке (включая ответвления к защитным аппаратам) должны быть установлены защитные аппараты: ограничители напряжения нелинейные – ОПН или вентильные разрядники – РВ.</li> <li>3. От портала с молниеотводом должно обеспечиваться растекание тока молнии по магистралям заземления в трех-четырех направлениях.</li> <li>4. На расстоянии 3 - 5 м от портала с молниеотводом на каждой магистрали заземления должны быть установлены по два-три вертикальных электрода длиной 3 - 5 м.</li> <li>5. На подстанциях с высоким напряжением 20 - 35 кВ при установке молниеотвода на трансформаторном портале у заземляющего контура должно быть сопротивление <math>R \leq 4 \text{ Ом}</math> (без учета выносного заземления).</li> <li>6. Заземляющие проводники защитных аппаратов и трансформаторов рекомендуется присоединять к заземляющему устройству подстанции поблизости один от другого.</li> </ol> |
| <p>Отдельно стоящие молниеотводы с обособленными заземлителями</p>                                                                                                        | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Если не могут быть выполнены условия установки молниеотвода на конструкциях ОРУ.</li> <li>2. Расстояние по земле <math>l_3</math> между обособленным заземлителем молниеотвода и заземляющим контуром ОРУ должно быть таким, чтобы исключать перекрытие по земле между заземлителями с вероятностью не более 0,1. При этом должно выполняться условие (6.37).</li> <li>3. Расстояние по воздуху <math>l_v</math> от отдельно стоящего молниеотвода с обособленным заземлителем до токоведущих частей, заземленных конструкций и оборудования ОРУ должно быть таким, чтобы исключать перекрытия по воздуху с вероятностью не более 0,1. При этом должно выполняться условие (6.36).</li> <li>4. Сопротивление заземлителя должно быть не более 80 Ом.</li> </ol>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |

Установка молниеотводов на зданиях ЗРУ не является обязательной. В случае выполнения кровли здания полностью из металла или применения металлических несущих конструкций достаточно заземлить металлические части кровли. Плоскую неметаллическую или железобетонную кровлю защищают наложением молниеприемной сварной сетки из стальной проволоки непосредственно на кровлю или под слой негорючего утеплителя или гидроизоляции. При этом для предотвращения нежелательной разности потенциалов между различными металлическими элементами здания (трубы, вентиляционные устройства, заземляющие спуски и пр.) они должны быть соединены между собой.

При использовании в качестве молниеприемной сетки стальной арматуры железобетонных плит кровли возможно расщепление бетона. Этот способ грозозащиты зданий не рекомендуется в районах с высокой грозовой активностью. Защита зданий ЗРУ от прямых ударов экономически оправдана при интенсивности грозовой деятельности 20 грозовых часов в год и более. Число грозовых разрядов в сооружение  $N$  определяется по формуле

$$N = n_0 (a_c + 2R_{\text{экв}})(b_c + 2R_{\text{экв}})10^{-6}, \quad (6.33)$$

где  $n_0$  – плотность разрядов молнии на 1 км<sup>2</sup> земной поверхности (принимается по рекомендациям приложения В);

$a_c, b_c, h_c$  – длина, ширина и высота сооружения, м;

$R_{\text{экв}}$  – эквивалентная ширина, с которой сооружение собирает боковые разряды молнии, м:

$$\text{при } h_c \leq 30 \text{ м} \quad R_{\text{экв}} = 5h_c - \frac{2h_c^2}{30};$$

$$\text{при } h_c > 30 \text{ м} \quad R_{\text{экв}} = 0,75(h_c + 90).$$

Здания с неметаллической или железобетонной кровлей допускается не защищать, если  $N < 0,05$  в год.

Для предотвращения обратных перекрытий с заземляющих спусков и металлических конструкций здания на ошиновку и оборудование ЗРУ, а также на токоведущие части наружных вводов должны быть приняты меры по улучшению экранировки здания за счет увеличения числа заземляющих спусков, их объединения (на крыше и у фундамента) и уменьшения сопротивления заземляющего контура.

Для защиты ОРУ от прямых ударов молнии применяются стержневые и тросовые молниеотводы. Последние в основном используются для защиты ошиновки большой протяженности. Наиболее простым и дешевым решением является расположение молниеотводов на металлических конструкциях ОРУ и других высоких объектах. При такой схеме молниезащиты для ОРУ 35-150 кВ следует предусмотреть меры по предотвращению обратных перекрытий путем устройства дополнительного сосредоточенного заземлителя в месте входа тока молнии в землю. Для ОРУ 220 кВ и выше обратные перекрытия практически исключены.

При расчете вероятности обратного перекрытия следует учитывать, что портал с молниеотводами имеет более сложную конструкцию, чем отдельно стоящий молниеотвод (несколько стоек и молниеотводов) и располагается вблизи элементов ОРУ с различными уровнями изоляции. Контур заземления такого портала имеет сетчатую конструкцию с вертикальными заземляющими электродами.

Большую опасность для изоляции трансформаторов представляет установка молниеотводов на трансформаторных порталах, так как при поражении молнией молниеотвода, находящегося вблизи трансформатора, кожух трансформатора приобретает потенциал молниеотвода, который может привести к обратному перекрытию изоляции трансформатора. Допускается установка молниеотводов на трансформаторных порталах при выполнении условий, указанных в табл. 6.10.

Надежность защиты ОРУ станций и подстанций от прямых ударов молнии характеризуется числом случаев перекрытия изоляции при прорывах

молнии через зону защиты молниеотводов и обратных перекрытий при ударах молнии в молниеотводы (для ОРУ 35-150 кВ) в год. Это число может быть определено по формуле

$$N_{п.у} = n_0 (a_t + 2R_{экв})(b_t + 2R_{экв})(\eta_{пр} P_{\alpha} P_{пр} + \eta_{оп} P_{оп}) 10^{-6}, \quad (6.34)$$

где  $a_t, b_t$  – длина и ширина территории ОРУ, м;

$R_{экв}$ , и  $n_0$  – как в формуле (6.33);

$\eta_{пр}, \eta_{оп}$  – вероятность перехода импульсного перекрытия изоляции в силовую дугу, соответственно, при разрядах молнии в ОРУ, минуя молниеотводы, и при обратных перекрытиях (в расчетах принимается равной 0,9);

$P_{\alpha}$  – вероятность грозового поражения ошиновки ОРУ, минуя молниеотводы (при использовании для выбора системы молниезащиты рекомендаций указанная вероятность имеет значение 0,05 или 0,005);

$P_{оп}$  – вероятность обратного перекрытия (может быть определена с помощью методов расчета обратных перекрытий, используемых для ВЛ);

$P_{пр}$  – доля опасных грозовых перенапряжений, возникающих при непосредственном грозовом разряде в ошиновку ОРУ, минуя молниеотводы.

Наряду со значением  $N_{п.у}$  в качестве показателя надежности ПС используется обратная величина

$$T_{п.у} = 1 / N_{п.у}, \quad (6.35)$$

которая характеризует среднюю повторяемость (в годах) опасных перенапряжений на ПС из-за грозовых разрядов непосредственно в ЗРУ или ОРУ.

Система молниезащиты ПС должна обеспечить в зависимости от класса ее номинального напряжения  $T_{п.у}$  не ниже следующих значений:

|                  |     |     |      |      |      |      |      |
|------------------|-----|-----|------|------|------|------|------|
| $U_n, \text{кВ}$ | 35  | 110 | 220  | 330  | 500  | 750  | 1150 |
| $T_{п.у}$        | 500 | 700 | 1000 | 1500 | 2000 | 2500 | 3000 |

Если при установке молниеотводов на конструкциях ОРУ необходимая грозоупорность не может быть достигнута или порталы не рассчитаны на установку молниеотводов, грозозащиту следует выполнять отдельно стоящими молниеотводами с обособленными заземлителями, которые при хороших грунтах допускается подключать к контуру заземления подстанции. Сопротивление заземления молниеотвода при этом определяется сопротивлением заземления части контура подстанции в радиусе 20 м от места присоединения к нему заземляющего спуска молниеотвода.

Расстояние по воздуху  $l_B$  от отдельно стоящего молниеотвода с обособленным заземлителем до токоведущих частей ОРУ, а также до ЗРУ, зданий и сооружений должно удовлетворять условиям:

$$l_B \geq (0,12R_{\text{и}} + H_{\text{с}}) \text{ и } l_B \geq 5 \text{ м}, \quad (6.36)$$

где  $H_{\text{с}}$  – высота до точки возможного перекрытия над уровнем земли, м.

В грунтах с низкой проводимостью соединение заземлителя отдельно стоящего молниеотвода с контуром подстанции не допускается. Для предотвращения выноса высокого потенциала расстояние  $l_3$  между обособленным заземлителем отдельно стоящего молниеотвода и ближайшей к нему точкой заземляющего контура подстанции, ЗРУ, зданий и сооружений следует определять из условий:

$$l_3 \geq 0,2R_{\text{и}} \text{ и } l_3 \geq 3 \text{ м}, \quad (6.37)$$

где  $R_{\text{и}}$  – сопротивление заземления отдельно стоящего молниеотвода, значение которого должно быть не более 40 Ом.

При этом тросовая защита ВЛ не должна соединяться с порталами ОРУ: последний пролет ВЛ следует защищать отдельно стоящими молниеотводами.

При установке на конструкциях с молниеотводами, имеющими обособленные заземлители, светильников, радиоантенн или электрооборудования напряжением до 1000 В необходимы мероприятия по защите цепей электропроводки от грозовых повреждений, выноса высокого

потенциала на контур заземления ОРУ и в цепи вторичной коммутации. Электропроводку рекомендуется прокладывать в металлической трубе на всем протяжении от электрооборудования на конструкции с молниеотводом до места присоединения к контуру заземления ОРУ и ввода в кабельный канал. Расстояние в земле от спуска трубы в землю до места присоединения к заземляющему контуру ОРУ ( $L_T$ , м) должно удовлетворять условиям:

$$L_T \geq 0,6R_{\text{и}} \text{ и } L_T \geq 10 \text{ м}, \quad (6.38)$$

Для увеличения скорости спада грозового перенапряжения вдоль трубы на ней рекомендуется устанавливать ряд вертикальных заземляющих электродов. В месте ввода в кабельный канал трубу с кабелем следует присоединить к контуру заземления ОРУ и соединить с оболочками других кабелей. По концам кабеля, идущего от конструкции с молниеотводом, во взрывоопасных помещениях рекомендуется устанавливать защитные – ОПН.

Заземлители отдельно стоящих молниеотводов в ОРУ могут быть присоединены к заземляющему устройству ОРУ (ПС) при соблюдении условий установки молниеотводов на конструкциях ОРУ. Место присоединения заземлителя отдельно стоящего молниеотвода к заземляющему устройству ПС должно быть удалено по магистралям заземления на расстояние не менее 15 м от места присоединения к нему трансформатора (реактора). В месте присоединения заземлителя отдельно стоящего молниеотвода к заземляющему устройству ОРУ 35-150 кВ магистрали заземления должны быть выполнены по двум-трем направлениям с углом не менее  $90^\circ$  между ними.

Расстояние по воздуху  $l_{\text{в.с}}$  от отдельно стоящего молниеотвода, заземлитель которого соединен с заземляющим устройством ОРУ (ПС), до токоведущих частей должно составлять:

$$l_{\text{в.с}} > 0,1H + m, \quad (6.39)$$

где  $H$  – высота токоведущих частей над уровнем земли, м;  $m$  – длина гирлянды изоляторов, м.

Все объекты на территории подстанции высотой  $h_{xi}$  должны находиться в зонах защиты системы молниеотводов на таких высотах. При этом выбирается такой вариант расстановки молниеотводов, при котором их число и высота были бы наименьшими.

При ударах молнии в молниеотводы возможны обратные перекрытия изоляции из-за падения напряжения от тока молнии на системе молниеотвод – заземлитель. Максимальное значение этого напряжения на высоте  $h_x$  определяется суммой падения напряжения на импульсном сопротивлении заземления  $R_{\text{и}}$  и на индуктивности молниеотвода  $L_0 h_x$ . При косоугольной форме тока молнии с  $I_{\text{м}}$  и  $a_{\text{м}}$  напряжение

$$U_{\text{max}} = R_{\text{и}} I_{\text{м}} + a_{\text{м}} L_0 h_x. \quad (6.40)$$

Рассмотрим отдельно стоящий молниеотвод с обособленным заземлителем (рис. 6.10) и молниеотвод на портале ОРУ (рис. 6.11). Значения  $L_0$  приведены в табл. 6.5.

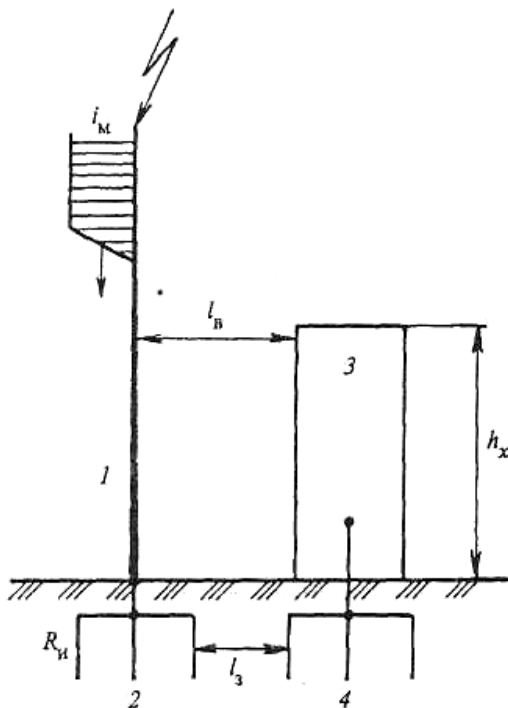


Рис. 6.10. Отдельно стоящий молниеотвод:

1 – молниеотвод; 2 – заземлитель молниеотвода; 3 – защищаемый объект; 4 – заземлитель объекта

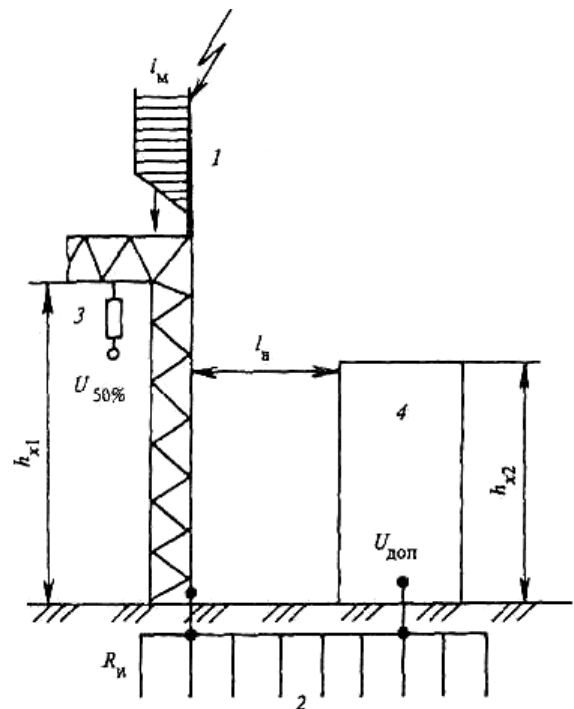


Рис. 6.11. Молниеотвод на конструкции ОРУ:

1 – молниеотвод; 2 – заземляющий контур; 3 – гирлянда изоляторов; 4 – защищаемый объект

Известны средние разрядные градиенты воздушного промежутка  $l_b$  ( $E_b \approx 500$  кВ/м) и промежутка в земле  $l_3$  ( $E_3 \approx 300$  кВ/м);  $U_{50\%}$  – среднее разрядное напряжение гирлянды изоляторов и  $U_{доп}$  – допустимое импульсное напряжение оборудования, кВ.

Условия безопасного протекания тока молнии по молниеотводу имеют следующий вид:

для отдельно стоящего молниеотвода

$$\begin{aligned} E_b l_b &> I_m R_{и} + a_m L_0 h_{x1}; \\ E_3 l_3 &> I_m R_{и}; \end{aligned} \quad (6.41)$$

для молниеотвода на портале ОРУ

$$\begin{aligned} U_{50\%} &> I_m R_{и} + a_m L_0 h_{x1}; \\ E_b l_b &> a_m L_0 h_{x2}; \\ U_{доп} &> I_m R_{и}. \end{aligned} \quad (6.42)$$

Эти соотношения позволяют решить задачи оценки надежности молниезащиты при прямом ударе молнии в подстанцию: по известным значениям  $l_b$ ,  $l_3$ ,  $U_{50\%}$ ,  $U_{доп}$  определить параметры  $I_m$ ,  $a_m$ , а по ним соответствующие вероятности повреждения изоляции  $P_{пi}$  либо решить обратную задачу.

Годовое число повреждений оборудования при прямом ударе молнии в подстанцию определяется соотношением

$$\beta_1 = n_{уд.н/см} \left[ P_{\alpha 1} + (1 - P_{\alpha 1}) \sum_i P_{пi} \right], \quad (6.43)$$

где  $n_{уд.н/см}$  рассчитывается по (6.3);  $P_{\alpha 1} = 0,01$ ;  $P_{пi}$  определяются с использованием методов, изложенных в § 6.3.

#### *6.4.3. Защита от импульсов грозовых перенапряжений, набегающих с линии*

На подходе к ПС грозовые волны возникают при прорыве молнии на провода или при обратных перекрытиях линейной изоляции при ударах молнии в опоры (тросы). Амплитуда грозовых волн в точке удара при прорывах молнии на провода ограничена импульсной прочностью линейной изоляции, а при обратных перекрытиях зависит от момента перекрытия (на фронте или хвосте волны) и падения напряжения на сопротивлении заземления и индуктивности опоры. При прорывах на проводах могут появляться срезанные и полные волны. Полные волны более опасны, так как срезанные быстрее затухают за счет потерь энергии на импульсную корону. При обратных перекрытиях на проводах возникают волны с отвесным фронтом, опасные для междувитковой внутренней изоляции трансформаторов (автотрансформаторов) и реакторов.

При воздействии набегающих с ВЛ волн атмосферных перенапряжений схема РУ ведет себя, как сложный колебательный контур, в котором подстанционное оборудование участвует своими входными емкостями, а ошиновка – отрезками длинной линии с распределенными параметрами. Значения входных емкостей подстанционного оборудования и рекомендации по составлению расчетной схемы замещения распределительного устройства приведены в приложении И. В отдельных случаях, например, при расчете грозоупорности схем с вращающимися машинами, последние более правильно представлять не только входной емкостью, но и моделировать обмотку машины входным сопротивлением или отрезком длинной линии с распределенными параметрами. Волновые сопротивления обмоток, особенно мощных вращающихся машин, невелики (50-100 Ом), что существенно снижает воздействующие перенапряжения. Силовые трансформаторы представляются входной емкостью и отрезком длинной линии, замещающим обмотку. Однако волновое сопротивление обмотки обычно составляет несколько тысяч Ом и поэтому слабо снижает амплитуду колебательного импульса. Представление силового трансформатора входной емкостью несколько увеличивает расчетные

грозовые перенапряжения на нем. При анализе схем грозозащиты мощных силовых трансформаторов должны быть учтены волновые свойства обмотки путем использования частотно-зависимых характеристик обмоток, предварительно полученных расчетным или экспериментальным путем.

При переходном процессе в сложном колебательном контуре ПС в отдельных ее точках могут появляться перенапряжения, превышающие импульсную прочность изоляции оборудования. Задача грозозащиты ПС состоит в снижении значений перенапряжений на ПС за счет использования защитных аппаратов с нелинейными вольт-амперными характеристиками (ограничителей перенапряжений или вентильных разрядников) и уменьшения числа опасных набегаящих волн путем повышения грозоупорности ВЛ на подходе к ПС.

Старые методики и рекомендации по выбору типа, количества и места установки защитных аппаратов, а также длины защищенного подхода основывались на понятии «опасной зоны». Длина «опасной зоны» соответствовала предельной длине участка ВЛ на подходе к ПС, после пробега которого полная волна с отвесным фронтом максимальной возможной амплитуды в результате деформации из-за потерь энергии на импульсную корону становилась безопасной для изоляции подстанционного оборудования. Описание этого метода дано далее.

Современные методы расчета грозозащиты ПС основаны на учете статистических распределений параметров импульсов атмосферных перенапряжений в точке их возникновения и вероятности поражения разрядами молнии отдельных участков ВЛ на подходе к ПС. Критерием выбора схемы грозозащиты ПС является повторяемость опасных перенапряжений в точках присоединения наиболее ответственного оборудования ПС (трансформаторов, автотрансформаторов и шунтирующих реакторов).

*Средства защиты РУ от набегаящих грозовых волн.* С воздушных линий электропередачи в результате поражения их молнией на подстанцию по проводам ВЛ набегает импульсы перенапряжений, которые могут иметь

различную форму.

Средства грозозащиты и требуемая длина защищенного тросом подхода, определяемая затуханием волн при распространении по проводам за счет импульсной короны и потерь в земле, зависят от класса номинального напряжения ВЛ и схемы ПС. Наиболее опасные воздействия на изоляции ПС возникают при ударах молнии в ближайшие опоры и прорывах на провода в первых пролетах.

Комплекс средств грозозащиты ВЛ на подходе к ПС в зависимости от класса номинального напряжения должен выбираться с учетом рекомендаций в части влияния конструктивных параметров ВЛ 110-750 кВ на показатели их грозоупорности и с использованием справочных кривых по удельному числу грозовых отключений ВЛ 110-750 кВ на унифицированных опорах (приложение 23), а для ВЛ 6-35 кВ с учетом рекомендаций приложения 22 /4/.

Для оценочных расчетов защиты от набегающих импульсов перенапряжений используется расчетный импульс, который в месте удара молнии в ВЛ является бесконечно длинным прямоугольным с максимальным значением  $U_0$  равным среднему разрядному напряжению изоляции ВЛ  $U_{50\%}$ . Импульс такой формы позволяет получить при расчетах наибольшие возможные значения перенапряжений на изоляции оборудования подстанции. Напряжение  $U_0$  импульса не может превышать  $U_{50\%}$  (при возможном  $U_0 > U_{50\%}$  происходит перекрытие изоляции на опорах ВЛ). Таким образом, изоляция ВЛ обеспечивает первый уровень ограничения перенапряжений.

Однако этот уровень оказывается недостаточным, так как не снижает воздействующее на изоляцию напряжение до безопасных значений. Организуется второй уровень ограничения перенапряжений путем установки в схеме подстанции защитных аппаратов ОПН и РВ в сочетании с выполнением защищенных подходов на ВЛ непосредственно у шин подстанции. Отметим, что в современных решениях применяются только ОПН, РВ установлены в схемах, разработанных в начале и середине XX в.

Защитные характеристики ОПН, выпускаемых различными фирмами, даны в приложении Г. Необходимое количество и схема расстановки ОПН определяются на основании расчета грозозащиты ПС. Примеры расчета грозозащиты ПС даны в приложениях И и К.

Все силовые трансформаторы, автотрансформаторы и шунтирующие реакторы 330 кВ и более высокого напряжения должны защищаться ОПН от грозовых и коммутационных перенапряжений.

#### 6.4.4. Защита подстанции номинальным напряжением 35 кВ и выше

Типовая схема защиты показана на рис. 6.12. В схему подстанции включены защитные аппараты  $F_1$  (ОПН или РВ). На некоторых расстояниях по ошиновке от защитного аппарата находятся защищаемые объекты, например, силовой трансформатор  $T$  (расстояние  $l_1$ ); линейные выключатели  $Q$  (расстояние  $l_2$ ). Участки ВЛ непосредственно у шин подстанции защищены тросами. Это защищенные подходы (ЗП) длиной  $l_{з.п.}$ .

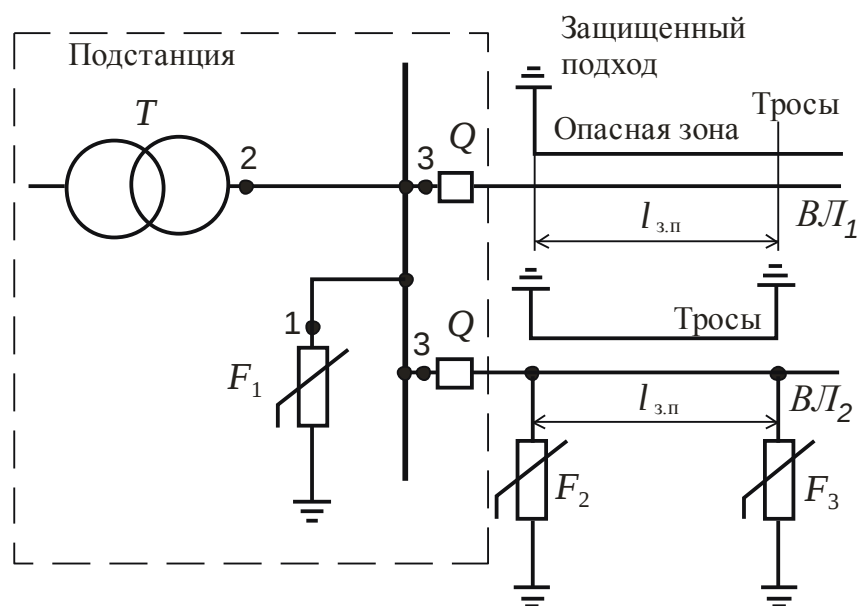


Рис. 6.12. Типовая схема молниезащиты подстанций напряжением 35 кВ и выше

На ВЛ с тросовой защитой по всей длине (ВЛ<sub>1</sub> на рис. 6.12) участки  $l_{з.п}$  часто называют условными защищенными подходами, на которых применяют уменьшенные защитные углы  $\alpha$  и выполняют опоры с более низкими значениями  $R_n$ .

На ВЛ без тросовой защиты (ВЛ<sub>2</sub> на рис. 6.12) на длине  $l_{з.п}$  установлены тросы. В начале ЗП у ВЛ на деревянных опорах на опоре монтируется разрядник (ОПН)  $F_3$ , так как первая подтросовая опора является местом с ослабленной изоляцией. Разрядник (ОПН)  $F_2$ , устанавливаемый в конце ЗП, ограничивает перенапряжения при отражении волны напряжения от отключенного выключателя Q. Разрядник (ОПН)  $F_2$  может устанавливаться и на подходах ВЛ с тросами по всей длине.

При воздействии импульса напряжения  $U_0$  на подстанцию защитный аппарат при протекании импульсного тока по его нелинейному резистору ограничивает на своих зажимах импульсное напряжение до значения остающегося напряжения  $U_{ост}$ . Однако в схеме развивается сложный волновой процесс: на изоляцию объектов, удаленных от защитного аппарата, воздействует напряжение, превышающее  $U_{ост}$ . Его максимальное значение, кВ, связано с  $U_{ост}$  соотношением:

$$U_{из. max} = U_{ост} + \Delta U_k, \quad (6.44)$$

где  $\Delta U_k$  – координационный интервал напряжения, значение которого зависит от взаимного удаления защитного аппарата и защищаемого объекта  $l$ , м, а также от крутизны фронта воздействующего импульса напряжения  $a$ , кВ/мкс. Точный расчет  $\Delta U_k$  осуществляется путем математического или физического моделирования волновых процессов в схеме. Однако приближенно его можно оценить как

$$\Delta U_k = 2al/300. \quad (6.45)$$

Для изоляции электрооборудования известно допустимое импульсное напряжение  $U_{доп}$ , кВ. Условие защищенности изоляции определяется соотношением

$$U_{\text{доп}} \geq U_{\text{из. макс}} = U_{\text{ост}} + 2al/300. \quad (6.46)$$

Длина  $l_{3,п}$  на ВЛ определяется следующим образом. Для наиболее удаленных от защитного аппарата защищаемых объектов (для схемы рис. 6.12 это расстояние  $l_1$  между точками 1 и 2;  $l_2$  между точками 1 и 3) рассчитываются зависимости  $U_{\text{из. макс}} = f(a)$ , с помощью которых по известным значениям  $U_{\text{доп}}$  определяются допустимые значения  $a_{\text{доп}i}$ , превышение которых опасно для изоляции в различных точках схемы (для рис. 6.12 это значение  $a_{\text{доп}2}$  и  $a_{\text{доп}3}$  указанное на рис. 6.13). Меньшее из всех значений  $a_{\text{доп}i}$  дает значение  $a_{\text{доп}}$  для всей схемы.

Допустимые напряжения для изоляции определяются испытательными напряжениями грозвым импульсом по ГОСТ 1516.3-96. Для изоляции силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов допустимое напряжение, кВ, рассчитывается по соотношению

$$U_{\text{доп. т}} = 1,1(U_{\text{п.и}} - 0,5U_{\text{ном}}), \quad (6.47)$$

где  $U_{\text{п.и}}$  – испытательное напряжение при полном импульсе для внутренней изоляции при испытании без возбуждения;

$U_{\text{ном}}$  – действующее значение линейного номинального напряжения.

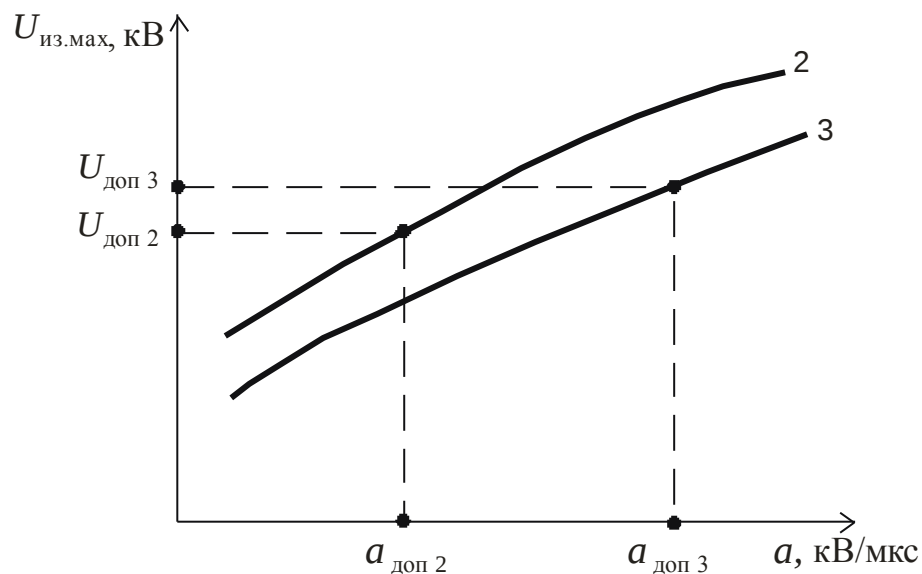


Рис. 6.13. Зависимости  $U_{\text{из. макс}} = f(a)$  для точек 2 и 3 схемы рис. 6.12

Допустимое напряжение для изоляции остальных аппаратов, кВ, можно принять ориентировочно равным испытательному напряжению срезанным импульсом внешней изоляции  $U_{с.и.}$ , кВ:

$$U_{доп. ап} \approx U_{с.и.} \quad (6.48)$$

Длина защищенного подхода  $l_{з.п.}$ , км, рассчитывается по соотношению:

$$l_{з.п.} = U_{50\%} / (a_{доп} \Delta\tau_{\phi}). \quad (6.49)$$

Входящая в соотношение величина  $\Delta\tau_{\phi}$  определяет удлинение фронта набегающего импульса за счет его деформации под действием импульсной короны. Значение  $\Delta\tau_{\phi}$ , мкс/км, вычисляется по эмпирическому выражению:

$$\Delta\tau_{\phi} = \left( 0,5 + \frac{0,008U_{50\%}}{h_{пр.ср}} \right) \frac{1}{k}, \quad (6.50)$$

где  $h_{пр.ср}$  – средняя высота подвеса провода, м;

$k$  – коэффициент, учитывающий влияние расщепления фазы ВЛ на  $\Delta\tau_{\phi}$ . При числе проводов в фазе 1; 2; 3; 4 коэффициент  $k$  соответственно равен 1,0; 1,2; 1,45; 1,55.

В соответствии с требованиями ПУЭ и других руководящих указаний при выполнении схемы защиты необходимо учитывать следующие рекомендации:

- для повышения надежности защиты использовать защитные аппараты I и II групп;
- защитные аппараты должны устанавливаться в непосредственной близости от выводов автотрансформаторов;
- в цепи между защитным аппаратом и защищаемым объектом не допускает установка коммутационных аппаратов, если аппарат предназначен для защиты автотрансформаторов и шунтирующих реакторов, а также обмоток трансформаторов напряжением 150 кВ и выше с основным уровнем изоляции по ГОСТ 1516.3-96;

– количество устанавливаемых на подстанции защитных аппаратов и места их включения должны обеспечивать выполнение условия (6.46);

– наиболее тяжелым режимом работы подстанции в отношении обеспечения защиты от импульсов грозовых перенапряжений, набегающих с ВЛ, является режим с одной ВЛ, подключенной к шинам подстанции (тупиковый режим). Наличие других ВЛ, подключенных к шинам подстанции, снижает  $U_{ост}$  за счет уменьшения импульсного тока через защитный аппарат из-за параллельного подключения к его нелинейному резистору волновых сопротивлений ВЛ;

– в случае подключения волновых трансформаторов 35 кВ и выше к шинам РУ длинными кабелями их большая емкость и малая индуктивность существенно облегчают условия молниезащиты; в этом случае достаточно установить защитный аппарат на шинах возможно ближе к месту подключения к ним кабеля.

Основные характеристики защищенных подходов к подстанциям напряжением 35 кВ и выше, нормированные ПУЭ, приведены в табл. 6.11.

Таблица 6.11

Характеристики защищенных подходов к подстанциям номинальным напряжением 35 кВ и выше

| Параметр                                                     | Номинальное напряжение, кВ |         |         |         |         |            |
|--------------------------------------------------------------|----------------------------|---------|---------|---------|---------|------------|
|                                                              | 35                         | 110     | 150     | 220     | 330     | 500 и выше |
| Длина защищенного подхода $l_{з.п.}$ , км                    | 1 - 2                      | 1 - 3   | 2 - 3   | 2 - 3   | 2 - 4   | 3 - 4      |
| Защитный угол $\alpha$ , град                                | 25 - 30                    | 25 - 30 | 25 - 30 | 20 - 25 | 20 - 25 | 25         |
| Сопротивление заземления R, Ом, не более, при $\rho$ , Ом·м: |                            |         |         |         |         |            |
| до 100                                                       | 10                         | 10      | 10      | 10      | 10      | 10         |
| 100 – 500                                                    | 15                         | 15      | 15      | 15      | 15      | 15         |
| 500 – 1000                                                   | 20                         | 20      | 20      | 20      | 20      | 20         |
| более 1000                                                   | 30                         | 30      | 30      | 30      | 30      | 30         |

Отметим, что на подходах ВЛ 110 – 330 кВ с очень высокими одностоечными двухцепными опорами рекомендуется выполнять сопротивление заземления  $R = 5; 10; 15$  Ом соответственно при  $\rho$  до 100; 100 – 500; более 500 Ом·м.

Годовое число повреждений оборудования подстанций напряжением 35 кВ и выше от импульсов грозовых перенапряжений, набегающих с ВЛ, характеризующие надежность защиты  $\beta_2$ , определяется числом таких импульсов, образующихся в пределах защищенных подходов  $l_{з.п.}$ , вследствие прорыва молнии сквозь тросовую защиту (вероятность  $P_\alpha$ ); удара молнии в вершину опоры (доля ударов  $\Delta_{оп}$ ) с последующим перекрытием изоляции на опоре (вероятность  $P_{оп}$ ); удара молнии в трос в пролете (доля ударов  $\Delta_{тр}$ ) с последующим перекрытием воздушного промежутка трос – провод (вероятность  $P_{тр}$ ).

При известных длинах  $l_{з.п.}$ , км; числе грозовых часов за год  $D_\Gamma$ ; числе ВЛ, подключенных к шинам подстанций,  $m$  значение  $\beta_2$  рассчитывается следующим образом:

$$\beta_2 = m n_{уд.з.п} [P_\alpha + (1 - P_\alpha)(\Delta_{оп} P_{оп} + \Delta_{тр} P_{тр})], \quad (6.51)$$

где  $n_{уд.з.п}$  – число ударов молнии в защищенный подход.

#### 6.4.5. Защита РУ номинальным напряжением 3-20 кВ

Рекомендуемые схемы защиты РУ 3-20 кВ приведены на рис. 6.14.

Применение тросов для защиты подходов ВЛ 3-20 кВ неэффективно. В РУ устанавливается элемент  $F_1$  (РВ или ОПН). Ограничение  $U_{\max}$  импульса, набегающего на подстанцию с ВЛ на деревянных опорах (ВЛ<sub>1</sub> на рис. 6.14), осуществляется элементом  $F_2$  (РТ, ОПН), установленным на расстоянии 200-300 м от ввода на подстанцию. Сопротивление его заземления должно быть не выше 10 Ом. На ВЛ с металлическими или железобетонными опорами

установки  $F_2$  не требуется. Однако при применении на ВЛ 3-20 кВ изоляции, усиленной более чем на 30 % (например, из-за загрязнения атмосферы), на расстоянии 200-300 м от ПС и на ее вводе должны быть установлены ИП. Металлические и железобетонные опоры на протяжении 200-300 м подхода к ПС должны быть заземлены с сопротивлением согласно /1/.

Разрядник  $F_3$  (РТ, ОПН) защищает изоляцию разомкнутого выключателя ВЛ, который может быть длительно отключен. При этом расстояние по ошиновке от  $F_3$  до отключенного выключателя должно быть не более 10 м. При мощности трансформатора до 0,63 МВ·А допускается не устанавливать трубчатые разрядники на подходах ВЛ 3-20 кВ с деревянными опорами. Если невозможно выдержать указанные расстояния или на отключенном конце ВЛ имеются трансформаторы напряжения (ТН), то вместо  $F_3$  должны быть установлены РВ или ОПН. Расстояние от РВ до защищаемого оборудования должно быть при этом не более 10 м, а для ОПН – увеличенное пропорционально разности испытательного напряжения ТН и остающегося напряжения ОПН.

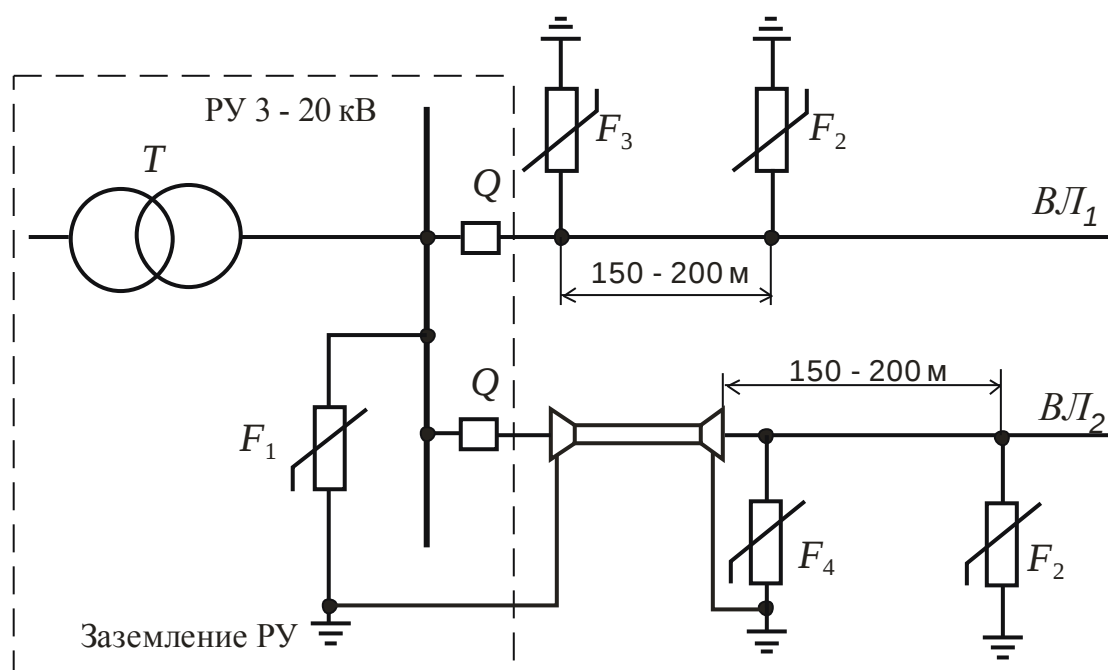


Рис. 6.14. Типовая схема молниезащиты РУ напряжением 3-20 кВ

Удовлетворительная надежность схемы достигается за счет небольшой поражаемости сравнительно коротких ВЛ 3-20 кВ, а также за счет относительно большого координационного интервала напряжения  $\Delta U$ .

Защита ПС 3-20 кВ с низшим напряжением до 1 кВ, присоединенных к ВЛ 3-20 кВ, должна выполняться РВ или ОПН, устанавливаемыми со стороны высокого и низкого напряжения ПС.

Если ВЛ 3-20 кВ соединены с РУ кабельной перемычкой (ВЛ<sub>2</sub> на рис. 6.14), то для защиты кабельной воронки в месте перехода ВЛ в кабель устанавливается элемент F<sub>4</sub> (РВ или ОПН). В этом случае заземляющий зажим разрядника, металлические оболочки кабеля, а также корпус кабельной муфты должны быть соединены между собой по кратчайшему пути. Заземляющий зажим разрядника должен быть соединен с заземлителем отдельным спуском. Если ВЛ выполнена на деревянных опорах, то на расстоянии 200-300 м от конца кабеля необходимо устанавливать комплект защитных аппаратов. При длине кабельной вставки более 50 м установка РВ или ОПН на ПС не требуется. Сопротивление заземлителя аппарата должно быть в соответствии с /1/.

Длина опасной зоны на ВЛ 3-20 кВ оценивается значением  $l_{0.3} = 150-200$  м. Повреждение оборудования РУ 3-20 кВ возможно при ударе молнии в провод ВЛ в пределах опасной зоны. Это определяет годовое число  $\beta_3$  повреждений оборудования РУ 3-20 кВ от импульсов перенапряжений, набегающих с ВЛ.

При известных длинах  $l_{0.3}$ , км; числе грозových часов за год  $D_{\Gamma}$ ; числе ВЛ, подключенных к шинам РУ 3-20 кВ,  $m_1$  значение  $\beta_3$  рассчитывается с учетом (6.2) по соотношению:

$$\beta_3 = m_1 n_{\text{уд.0.3}}. \quad (6.52)$$

#### *6.4.6. Защита вращающихся машин высокого напряжения*

Молниезащита электрических машин (генераторов, синхронных компенсаторов, высоковольтных электродвигателей) имеет свои особенности:

а) уровень электрической прочности изоляции у машин, бывших длительное время в эксплуатации, значительно ниже, чем у другого электрооборудования;

б) отсутствуют вентильные разрядники или ОПН, которые смогли бы обеспечить достаточно высокую надежность защиты такой изоляции от перенапряжений;

в) грозовые повреждения изоляции машины весьма значительны, так как через место пробоя изоляции машины продолжает протекать аварийный ток за счет э.д.с. остаточного намагничивания даже после снятия возбуждения машины, отключенной от сети;

г) выход из строя электрических машин обуславливает большой экономический ущерб.

С учетом отмеченных особенностей для надежной молниезащиты электрических машин приходится использовать специальные мероприятия. В частности, на подходе линии устанавливают дополнительные разрядники, отводящие часть тока набегающей волны в землю и снижающие таким образом импульсное напряжение на машине. Кроме того, используется защитное действие кабельных вставок на подходах. Чтобы снизить крутизну фронта импульсов перенапряжений на зажимах машины, параллельно с ней подключают конденсаторы. Снижению крутизны фронта способствуют также фидерные реакторы, установленные для ограничения токов короткого замыкания.

Задача молниезащиты намного упрощается, если электрическая машина присоединяется к воздушной линии не непосредственно, а через трансформатор. В этом случае трансформатор существенно ограничивает

амплитуду и крутизну импульсов грозовых перенапряжений на зажимах машины.

В соответствии с требованиями ПУЭ запрещается присоединять непосредственно к ВЛ (без разделительного трансформатора) вращающиеся машины (ВМ) мощностью выше 50 МВ·А при металлических или железобетонных опорах на ВЛ и свыше 25 МВ·А при деревянных. При мощностях, превышающих указанные, присоединение ВЛ должно осуществляться только через трансформатор.

ПУЭ рекомендуют для ВМ мощностью ниже указанной выше ряд схем присоединения к ВЛ, которые обеспечивают многоуровневое ограничение перенапряжений (рис. 6.15, 6.16).

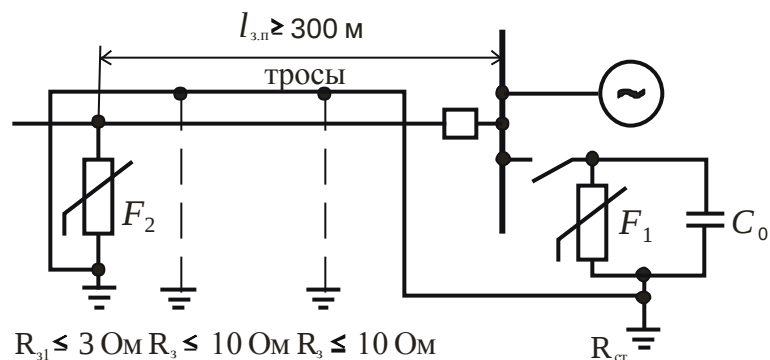
Схемы молниезащиты электрических машин, непосредственно связанных с воздушной линией, обычно содержат комплекс следующих защитных средств: ОПН или вентильный разрядник и малоиндуктивный конденсатор на шинах; защищенный подход воздушной линии  $l_{з.п.}$ , ОПН или разрядники на подходе линии, токоограничивающий реактор и кабельную вставку (рис. 6.15).

Защитные аппараты  $F_3$ ,  $F_4$  (РВ IV группы или соответствующий ОПН) и  $F_2$  (РВ IV группы или соответствующий ОПН), установленные по ходу движения волн грозовых перенапряжений, предназначены для отвода части тока волны в землю и ограничения тока в ОПН, установленном на электрической машине. Их эффективность зависит от величины сопротивления заземления, достаточная для практики надежность работы схемы обеспечивается при  $R_3 \leq 10$  Ом. Оптимальная длина защищенного подхода  $l_{з.п.}$  составляет 100 – 150 м. Для защиты подхода от прямых ударов молнии используются грозозащитные тросы. Реактор  $L$  в схеме рис. 6.15 сглаживает фронт импульса перенапряжений на шинах, а также облегчает условия срабатывания разрядника  $F_2$ .

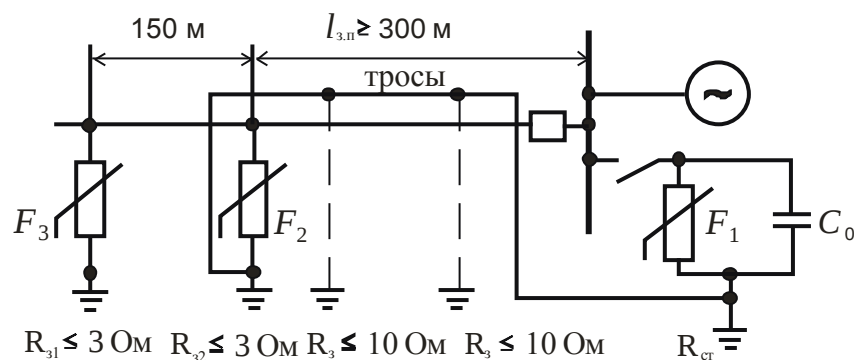
Емкость  $C_0$  на шинах предназначена для ликвидации колебательной составляющей напряжения на зажимах машины. Обычно длительность фронта

импульса  $\tau_{\phi}$  грозových перенапряжений на зажимах машины за счет малоиндуктивной емкости  $C_0$  увеличивается до 20 – 50 мкс.

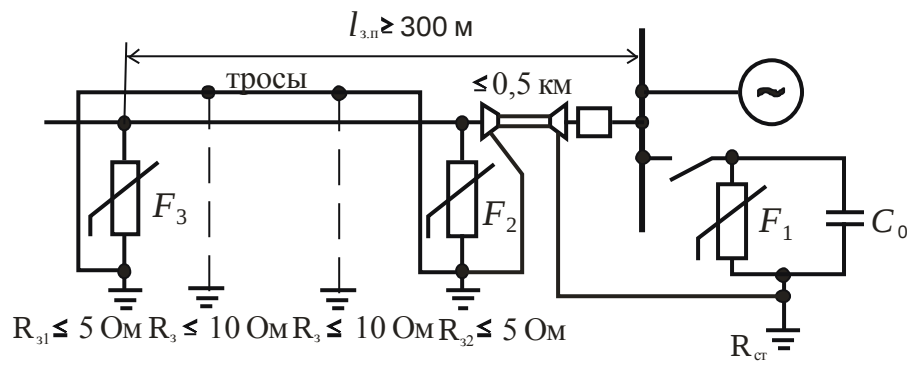
Если используется кабельная вставка, отделяющая воздушную линию от шин с электрической машиной, то ее защитная роль не ограничивается добавлением дополнительной емкости, сглаживающей волну. Кабельная вставка служит для отвода значительной доли тока волны в землю помимо шинного разрядника. Это достигается следующим образом. При срабатывании разрядника (ОПН)  $F_2$  на входе кабельной вставки жила кабеля оказывается соединенной параллельно с его оболочкой (через динамическое сопротивление  $F_2$ ). Вследствие большой скорости изменения напряжения волны ее движение по кабелю сопровождается появлением поверхностного эффекта. Ток волны вытесняется из жилы на оболочку кабеля, имеющую контакт с землей, и уходит в землю, минуя шины подстанции. Достаточная для практики надежность требует, чтобы длина кабельной вставки  $l_k$  составляла не менее 300 м, а защищенного воздушного подхода  $l_{з.п1} \approx l_{з.п2}$  – не менее 100 м.



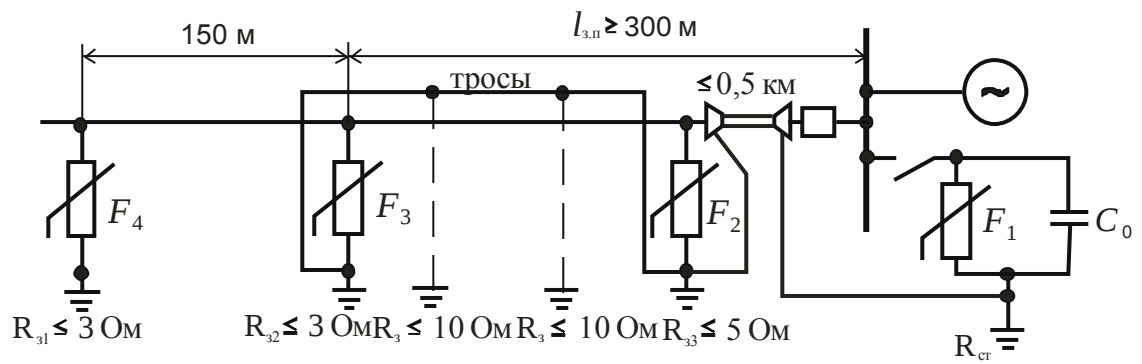
а)



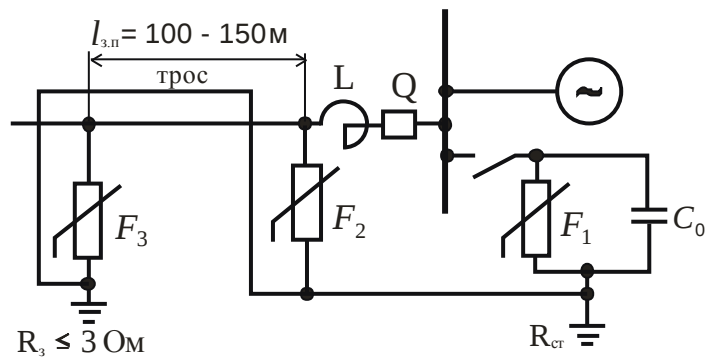
б)



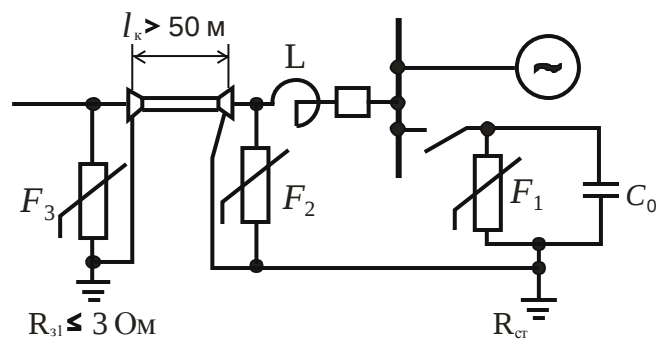
в)



г)



д)



е)

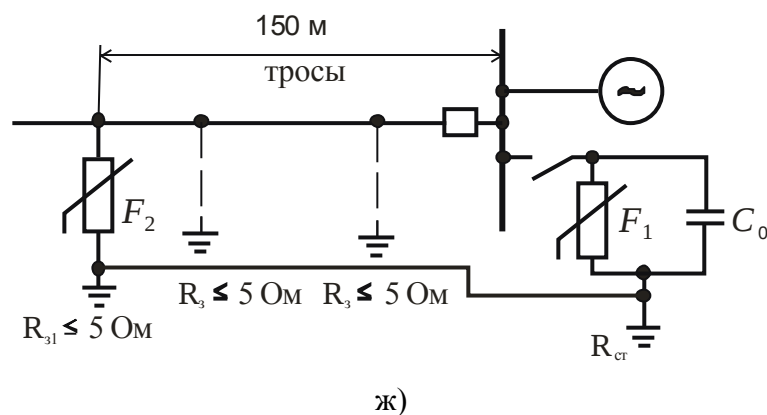


Рис. 6.15. Схемы защиты вращающихся машин, присоединенных к ВЛ, от импульсов грозových перенапряжений, набегающих с линии

Если вращающиеся машины и ВЛ присоединены к общим шинам РУ электростанций или ПС, то подходы этих ВЛ должны быть защищены от грозových воздействий с соблюдением следующих требований:

1) подход ВЛ с металлическими и железобетонными опорами должен быть защищен тросом на протяжении не менее 300 м, в начале подхода должен быть установлен комплект РВ IV группы (рис. 6.15, а) или соответствующих ОПН. Сопротивление заземления РВ или ОПН не должно превышать 3 Ом, а сопротивление заземления опор на тросовом участке – 10 Ом. Рекомендуется использование деревянных траверс с расстоянием не менее 1 м по дереву от точки крепления гирлянды изоляторов до стойки опоры;

2) на подходах ВЛ с деревянными опорами дополнительно к средствам защиты, применяемым на ВЛ с железобетонными опорами, следует устанавливать комплект РВ IV группы или соответствующих ОПН на расстоянии 150 м от начала тросового подхода в сторону линии (рис. 6.15, б). Сопротивление заземления разрядников должно быть не более 3 Ом. Допускается установка РТ в начале подхода. Сопротивление заземления таких разрядников не должно превышать 5 Ом;

3) на ВЛ, присоединенных к электростанциям и ПС кабельными вставками длиной до 0,5 км, защита подхода должна быть выполнена так же, как на ВЛ без кабельных вставок (см. п.1) и дополнительно должен быть установлен комплект  $F_2$  (РВ IV группы или соответствующие ОПН) в месте

присоединения ВЛ к кабелю. Заземляемый вывод защитного аппарата кратчайшим путем следует присоединить к броне, металлической оболочке кабеля и к заземлителю (рис. 6.15, в, г). Сопротивление заземления аппарата не должно превышать 5 Ом;

4) при наличии токоограничивающего реактора на присоединении ВЛ подход на длине 100-150 м должен быть защищен от прямых ударов молнии тросовым молниеотводом (рис. 6.15, д). В начале подхода, защищенного молниеотводом, а также у реактора должны быть установлены комплекты  $F_2$  и  $F_3$  (РВ IV группы или соответствующие ОПН). Сопротивление заземления аппарата, установленного в начале подхода со стороны линии, должно быть не более 3 Ом;

5) при присоединении ВЛ к шинам РУ с вращающимися машинами через токоограничивающий реактор и кабельную вставку длиной более 50 м защита подхода ВЛ от прямых ударов молнии не требуется. В месте присоединения ВЛ к кабелю и перед реактором должны быть установлены комплекты  $F_2$  и  $F_3$  (РВ IV группы или ОПН) с сопротивлением заземления не более 3 Ом (рис. 6.15, е);

6) на ВЛ, присоединенных к шинам РУ с вращающимися машинами мощностью менее 3 МВт (менее 3 МВ·А), подходы которых на длине не менее 0,5 км выполнены на железобетонных или металлических опорах с сопротивлением заземления не более 5 Ом, должен быть установлен комплект  $F_2$  (РВ IV группы или соответствующих ОПН) на расстоянии 100-150 м от ПС (электростанции) (рис. 6.15, ж). Сопротивление заземления защитных аппаратов должно быть не более 3 Ом. При этом защита подхода ВЛ тросом не требуется.

На шинах ВМ устанавливается  $F_1$  – вентильный разрядник I группы или соответствующий ОПН и конденсатор емкостью 0,5 мкФ.

Допускается не выполнять защиту подходов от прямых ударов молнии при присоединении ВЛ или открытых токопроводов:

- 1) к электродвигателям мощностью до 3 МВт;

2) к генераторам дизельных электростанций мощностью до 1 МВт, расположенным в районах с интенсивностью грозовой деятельности до 20 грозовых часов в году.

При этом требуется установка на подходе ВЛ двух комплектов РВ IV группы или соответствующих ОПН на расстояниях 150 ( $F_2$ ) и 250 м ( $F_3$ ) от шин ПС (рис. 6.16, а). Сопротивление заземления защитных аппаратов должно быть не более 3 Ом. Спуски заземления кратчайшим путем должны быть соединены с заземляющим устройством ПС или электростанции.

При наличии кабельной вставки любой длины непосредственно перед кабелем должен быть установлен РВ IV группы или соответствующий ОПН. Их заземляющий зажим должен быть кратчайшим путем присоединен к металлическим оболочкам кабеля и к заземлителю (рис. 6.16, б).

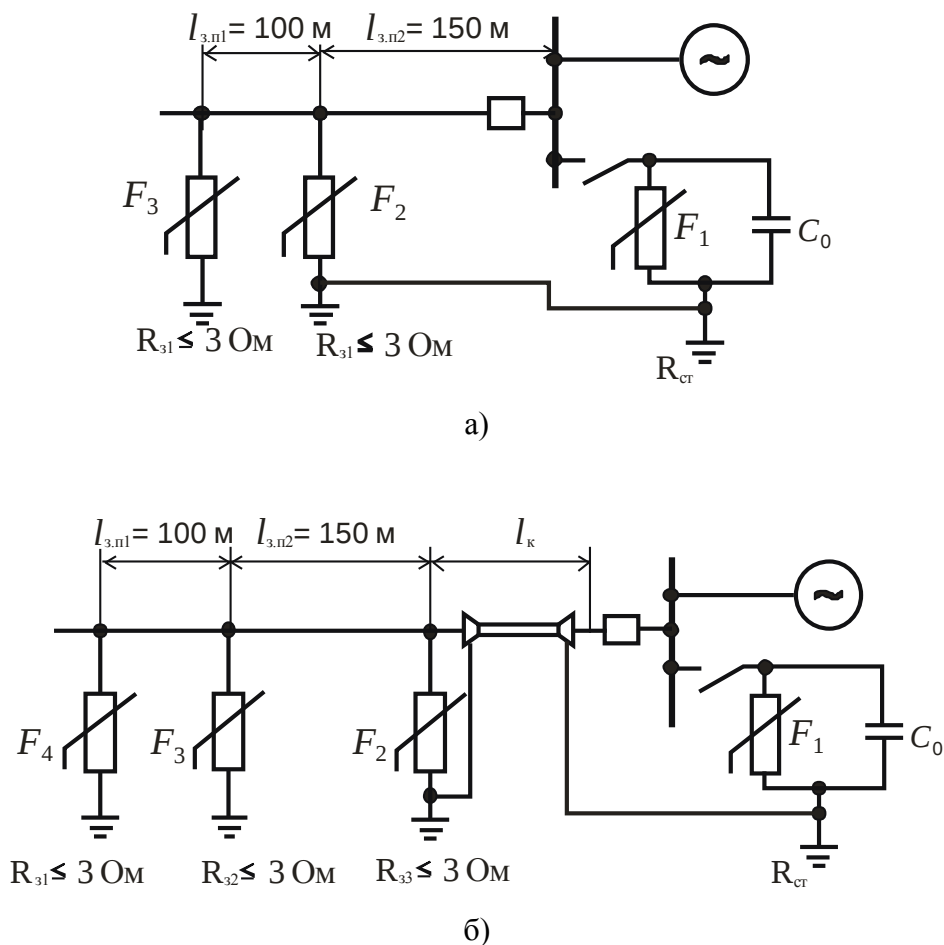


Рис. 6.16. Схемы защиты электродвигателей мощностью до 3000 кВт от импульсов грозовых перенапряжений, воздействующих с ВЛ на деревянных опорах

На шинах, питающих электродвигатели через кабельные вставки, должны быть установлены РВ I группы или соответствующие ОПН и защитные емкости не менее 0,5 мкФ на фазу.

На подходах ВЛ или открытых токопроводов с железобетонными или металлическими опорами установки РВ не требуется, если сопротивление заземления каждой опоры подхода на длине не менее 250 м составляет не более 10 Ом.

Годовое число повреждений ВМ от импульсов перенапряжений, набегающих с ВЛ, при выполнении защиты по схемам рис. 6.15, 6.16 оценивается значением  $\beta_4 \approx 0,025-0,03$  повреждений/год.

#### *6.4.7. Координация импульсной прочности изоляции подстанционного оборудования с защитными характеристиками ОПН*

На оборудовании, установленном между ВЛ и защитным аппаратом по ходу волны (по ошиновке), форма импульсного перенапряжения в первый момент повторяет форму исходного грозового импульса (рис. 6.17, а). После прихода волны, отраженной от вступившего в работу защитного аппарата, перенапряжение быстро снижается, приближаясь к значению, равному сумме остающегося напряжения на защитном аппарате и падению напряжения на индуктивности ошиновки. Такое воздействие на изоляцию менее опасно, чем воздействие полного стандартного грозового импульса той же амплитуды. Перенапряжение в точках подстанции, расположенных по движению волны за защитным аппаратом, имеет вид импульса унipoлярной формы (рис. 6.17, б); период затухающих колебаний, наложенных на остающееся напряжение защитного аппарата, зависит от параметров схемы подстанции.

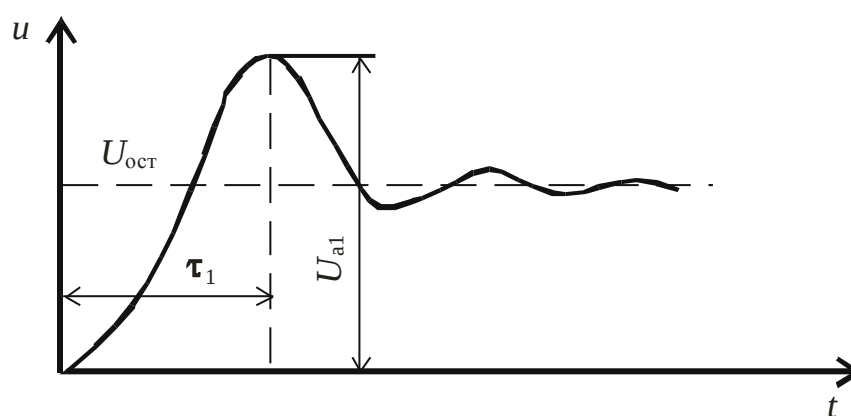
Шкала допустимых воздействий ( $U_{don}$ ) для различных расчетных условий для силовых трансформаторов, автотрансформаторов и шунтирующих реакторов приведена в табл.6.12.

Таблица 6.12

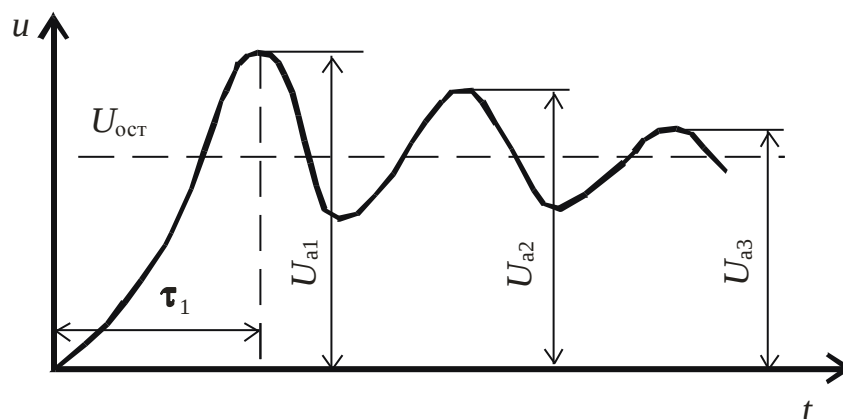
Амплитуда грозových униполярных волн с наложенными колебаниями, кВ,  
допустимая в эксплуатации для изоляции силовых трансформаторов,  
(автотрансформаторов) и шунтирующих реакторов

| Вид оборудования                            | Класс напряжения, кВ |     |     |     |      |                     |                     |                     |
|---------------------------------------------|----------------------|-----|-----|-----|------|---------------------|---------------------|---------------------|
|                                             | 35                   | 110 | 150 | 220 | 330  | 500                 | 750                 | 1150                |
| Силовые трансформаторы (автотрансформаторы) | 210                  | 480 | 550 | 750 | 1050 | $\frac{1550}{1650}$ | $\frac{2100}{2250}$ | $\frac{2200}{2550}$ |
| Шунтирующие реакторы                        | -                    | -   | -   | -   | -    | $\frac{1650}{1800}$ | $\frac{2250}{2400}$ | $\frac{2200}{2550}$ |

Примечание: числитель – полная волна, знаменатель – срезанная волна.



а)



б)

Рис. 6.17. Характерная форма грозových перенапряжений на подстанционном оборудовании:

а) на входных элементах схемы подстанции (линейный выключатель, разъединитель, конденсатор связи и пр.); б) на силовом трансформаторе, шунтирующем реакторе;

$U_{a1}$ ,  $U_{a2}$ ,  $U_{a3}$  – амплитуды последовательных максимумов грозového перенапряжения;

$\tau_1$  – время наступления первого максимума  $U_{a1}$ ;  $U_{ост}$  – остающееся напряжение защитных аппаратов

Одним из условий обеспечения надежной грозозащиты ПС является координация прочности изоляции подстанционного оборудования и характеристик защитных аппаратов по (6.46).

Перенапряжения на оборудовании, в непосредственной близости к которому установлен защитный аппарат, практически совпадают с напряжением на защитном аппарате и определяются его характеристиками, амплитудой и формой протекающего через него тока. Перенапряжения на оборудовании, удаленном на некоторое расстояние от защитного аппарата, превышают напряжение на защитном аппарате вследствие многократных преломлений и отражений грозовых импульсов в узловых точках подстанции. Это превышение зависит, в основном, от крутизны фронта, амплитуды набегающего на подстанцию импульсного напряжения и параметров схемы подстанции: количества установленных защитных аппаратов и расстояний от них до защищаемого оборудования, волнового сопротивления ошиновки и входных емкостей аппаратов ближайших участков подстанции, количества подключенных к ней ВЛ.

Координационный интервал необходим для компенсации: превышения грозового перенапряжения на защищаемом оборудовании по отношению к напряжению на защитном аппарате из-за его удаленности; увеличения остающегося напряжения при крутом фронте волны тока через защитный аппарат. Значение координационного интервала обычно составляет 20-50%, при этом большие значения соответствуют ПС до 500 кВ.

Достаточность координационного интервала проверяется путем сопоставления тока, протекающего через защитный аппарат  $I_{3.A}$ , с нормированным током координации. Ток  $I_{3.A}$  определяется по результатам измерений импульсных токов через защитный аппарат в эксплуатации и по формуле

$$I_{3.A} = \frac{2U_a - U_{ocm}}{Z}, \quad (6.53)$$

где  $z$  – волновое сопротивление провода,  $U_a$  – амплитудное значение грозового импульса, равное 50%-ному разрядному напряжению линейной изоляции.

Для выполнения условия (6.46)  $I_{3.A}$  должен быть меньше нормированного тока координации.

Графическое построение для определения тока  $I_{3.A}$  и соответствующего ему  $U_{ост}$  приведено на рис. 6.18. При наличии в РУ нескольких защитных аппаратов должна использоваться обобщающая вольт-амперная характеристика, полученная в результате параллельного сложения вольт-амперных характеристик всех защитных аппаратов и волновых сопротивлений отходящих линий. Получение обобщающих характеристик пояснено на рис. 6.19.

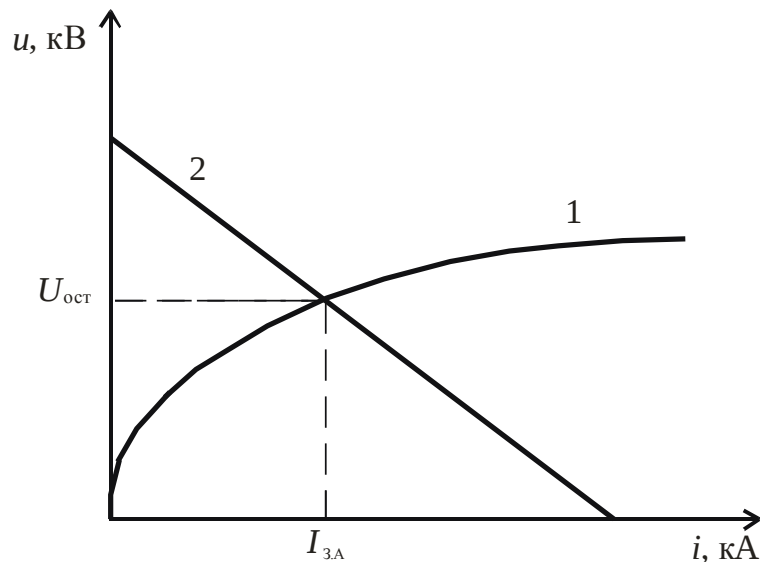


Рис. 6.18. Графическое определение тока через защитный аппарат

1 – вольт-амперная характеристика защитного аппарата; 2 – зависимость  $u = 2U_a - iz$

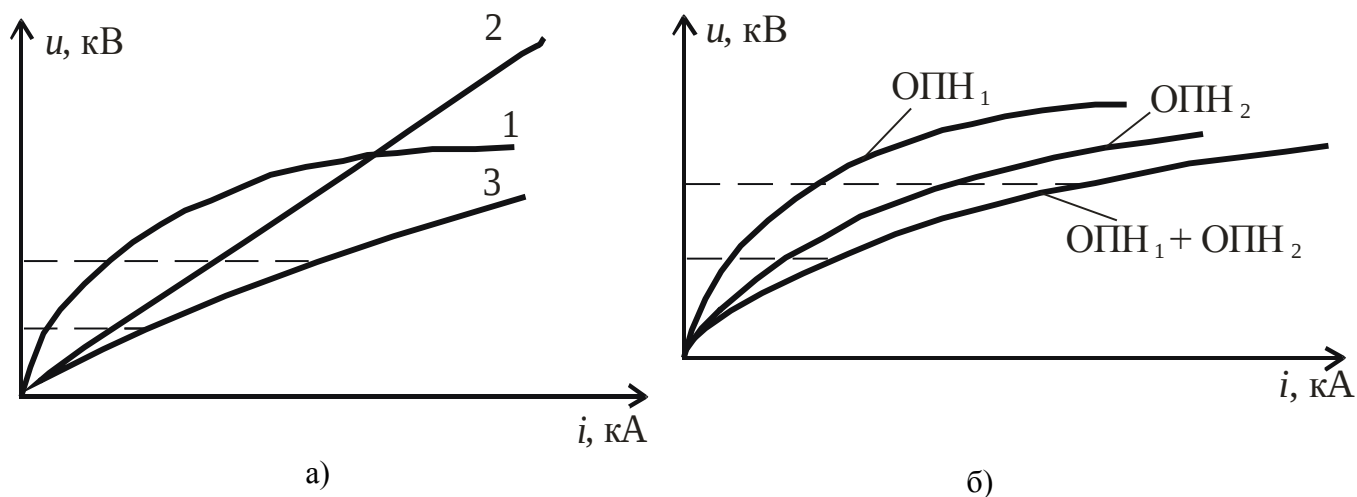


Рис. 6.19. Построение обобщающей вольт-амперной характеристики:

- а) сложение вольт-амперных характеристик защитного аппарата и волнового сопротивления отходящей линии; 1 – вольт-амперная характеристика защитного аппарата ( $ОПН_1$ ); 2 – вольт-амперная характеристика волнового сопротивления отходящей линии; 3 – обобщающая вольт-амперная характеристика.
- б) сложение вольт-амперных характеристик нескольких защитных аппаратов, установленных в РУ

#### 6.4.8. Определение максимальной длины защитного подхода (опасной зоны)

Амплитуда атмосферных перенапряжений в различных точках ПС с выбранными компоновкой и характеристиками подстанционного оборудования и защитных аппаратов зависят от амплитуды и формы грозового импульса на входе ПС. Параметры этого импульса определяются параметрами разряда молнии в точке удара, импульсным уровнем изоляции ВЛ и показателями грозоупорности ВЛ на подходе, расстоянием от места удара до ПС и характеристиками деформации грозового импульса при распространении его по проводам. При известных характеристиках защитных аппаратов и допустимой амплитуде грозовых волн для подстанционного оборудования (табл. 6.12), амплитуде, крутизне и длине импульса в точке удара, для фиксированного расстояния между разрядником и защищаемым объектом может быть определена максимальная длина участка ВЛ на подходе (опасная зона  $l_{0.3}$ ),

после пробега которого амплитуда атмосферного перенапряжения на защищаемом оборудовании не превысит допустимого.

Расчеты переходных процессов на ПС проводятся с использованием «метода бегущих волн»: перенапряжения в каждом узле рассчитываются, как сумма всех набегающих на него грозовых импульсов с учетом коэффициентов преломления. Импульсы, отраженные от узла, определяются, как разность напряжения в узле и падающего на узел импульса напряжения и т.д. Одновременный расчет процессов в каждом узле позволяет моделировать переходный процесс на ПС в целом.

При определении длины опасной зоны параметры грозового импульса в точке удара принимаются фиксированными: фронт импульса – вертикальный, длина импульса до 100-200 мкс; амплитуда равна  $U_{50\%}$  – 50%-ному импульсному разрядному напряжению линейной изоляции. Грозовые импульсы с большими амплитудами будут срезаны при малых предразрядных временах и деформируются под действием импульсной короны. Колебательная составляющая грозового перенапряжения (рис. 6.17) при таких воздействиях не успевает дорасти до максимального значения.

Деформация грозового импульса под действием короны рассчитывается с учетом докоронного порога и влияния рабочего напряжения  $U_p$  при  $u = U_{\text{доп}}$  (см. приложение Д). Учитывается также, что рабочее напряжение на ошиновке подстанции оказывает влияние на время вступления в работу защитных аппаратов.

В качестве исходного принимается наиболее неблагоприятный случай: грозовой импульс совпадает с максимальным значением  $U_p$  противоположной полярности. При этом амплитуда расчетного грозового импульса (см. рис. Д.1):

$$U_{p.v} = U_{50\%} = U_p, \quad (6.54)$$

а значение докоронного порога

$$U_{k.п} = U_k + U_p, \quad (6.55)$$

где  $U_k$  – напряжение начала короны.

Расчет длины опасной зоны не позволяет оценить надежность грозозащиты ПС. Однако такой метод позволяет выбрать схему, защитные аппараты и их размещение на ПС в соответствии с требованиями /3/ по длине опасной зоны (при использовании в качестве защитных аппаратов вентильных разрядников, на применение которых были ориентированы рекомендации /3/). В этом случае показатели надежности грозозащиты ПС с ОПН будут того же порядка или лучше, чем по рекомендациям /3/, которые проверены многолетним опытом эксплуатации.

#### *6.4.9. Показатели надежности молниезащиты РУ станций и подстанций от набегающих волн*

Надежность молниезащиты РУ оценивается средним числом случаев появления опасных для изоляции РУ грозовых импульсов в год. Опасность могут представлять только грозовые импульсы, возникающие при ударе молнии в ВЛ в пределах опасной зоны  $l_{0.3}$ . Часть этих импульсов небольшой амплитуды или с малой крутизной фронта и небольшой длительности не вызывают повреждения или перекрытия изоляции оборудования подстанций. При оценке надежности грозозащиты ПС от набегающих с ВЛ грозовых импульсов используются методы, учитывающие статистические распределения амплитуды, крутизны и длительности первого и последующих импульсов тока многократного разряда, а также рабочее напряжение и удаленность грозового разряда. Анализируются перенапряжения, создаваемые на изоляции подстанционного оборудования полными и срезанными грозовыми импульсами.

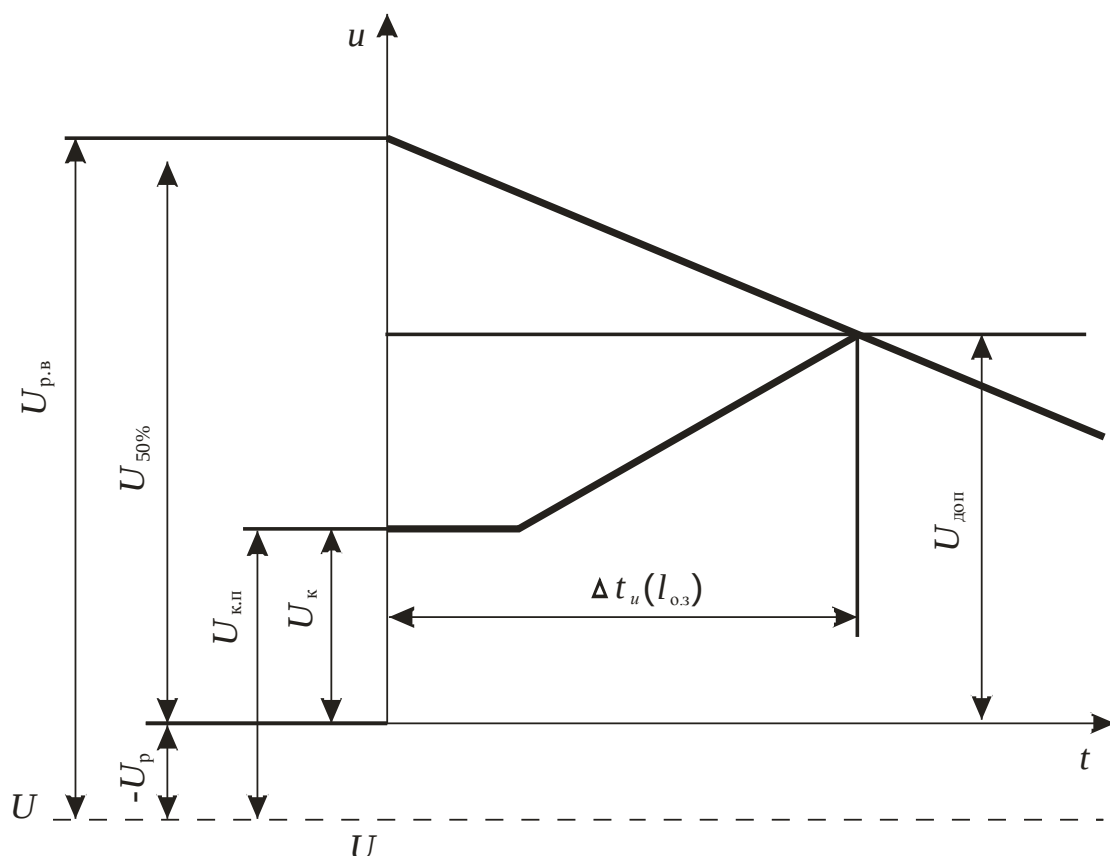


Рис. 6.20. Определение длины опасной зоны ( $l_{0.3}$ ) по «методу бегущей волны»

Оценка надежности грозозащиты РУ станций и подстанций состоит в определении доли опасных импульсов среди поражающих ВЛ в пределах опасной зоны. Среднее число опасных грозовых перенапряжений от набегающих волн на каком-то аппарате или на подстанции в целом (т.е. перенапряжений, превышающих допустимые значения) за год может быть определено по формуле:

$$N_{Н.В} = N N_{Г.Ч} l_{0.3} n_{ВЛ} (1 - k_{Э}) (P_{\alpha} \psi_{ПР} + \delta_{ОП} P_{ОП} \psi_{ОП}) \cdot 10^{-4}, \quad (6.56)$$

где  $N_{Н.В}$  – среднее число опасных перенапряжений, возникающих на защищаемом аппарате или на ПС в целом в течение года;

$N$  – число грозовых ударов в ВЛ длиной 100 км при 100 грозовых часах в год;

$N_{Г.Ч}$  – число грозовых часов в год;  $l_{0.3}$  – длина опасной зоны, км;

$n_{ВЛ}, k_{Э}$  – число отходящих ВЛ и коэффициент их взаимного экранирования;

$P_\alpha$  – вероятность прорыва молнии на провода;  $\delta_{оп}$  – доля грозových ударов в опоры и прилегающие участки троса, о.е.;

$P_{оп}$  – вероятность обратного перекрытия линейной изоляции;

$\psi_{пр}$ ,  $\psi_{оп}$  – доли опасных для изоляции ПС импульсов, соответственно, при прорыве молнии на провода и при обратных перекрытиях изоляции ВЛ, возникающих в пределах опасной зоны, о.е.

При определении  $\psi_{пр}$  и  $\psi_{оп}$  необходимо учитывать более 10 статистически изменяющихся параметров, что может быть реализовано при использовании ЭВМ. В настоящее время разработано и апробировано несколько версий программ расчета вероятности возникновения опасных перенапряжений на оборудовании ПС. Две из них представлены в /3,4/.

Величина, обратная  $N_{н.в}$ , характеризует среднюю повторяемость опасных перенапряжений, возникающих на защищаемом аппарате или на ПС в целом, (в годах):

$$T_{н.в} = \frac{1}{N_{н.в}} . \quad (6.57)$$

Для установления критерия достаточности надежности грозозащиты подстанционного оборудования использован многолетний опыт эксплуатации ПС 35-220 кВ с высокими показателями надежности. Показатели надежности грозозащиты ПС более высокого класса номинального напряжения получены экстраполяцией имеющихся значений по ПС 35-220 кВ с учетом большей стоимости и ответственности ПС высших классов напряжения. Рекомендуемые показатели надежности грозозащиты наиболее дорогого и ответственного подстанционного оборудования (силовых трансформаторов, автотрансформаторов и шунтирующих реакторов) в зависимости от класса номинального напряжения ПС оцениваются следующими значениями:

|                  |         |         |         |         |          |           |           |
|------------------|---------|---------|---------|---------|----------|-----------|-----------|
| $U_n$ , кВ       | 35      | 110     | 220     | 330     | 500      | 750       | 1150      |
| $T_{н.в}$ , годы | 200-300 | 300-400 | 400-600 | 600-800 | 800-1000 | 1000-1200 | 1200-1500 |

## 6.5. Конструкция молниеприемников

Устройства молниезащиты (молниеотводы) должны включать в себя молниеприемники, непосредственно воспринимающие на себя удар молнии, токоотводы и заземлители.

Вертикальные молниеприемники должны быть изготовлены из круглой стали сечением не менее  $200 \text{ мм}^2$ , длиной не менее 500 мм и укреплены на опоре или непосредственно на самом защищаемом здании или сооружении.

Горизонтальные молниеприемники должны быть изготовлены из стальных многопроволочных тросов сечением не менее  $50 \text{ мм}^2$ .

Токоотводы, соединяющие молниеприемники всех видов с заземлителями, следует выполнять из стали. Их размеры должны быть не менее приведенных ниже:

|                                                                 | Снаружи здания |         |
|-----------------------------------------------------------------|----------------|---------|
|                                                                 | на воздухе     | в земле |
| Диаметр круглых токоотводов и перемычек, мм                     | 8              | -       |
| Диаметр круглых вертикальных (горизонтальных) электродов, мм    | -              | 16 (14) |
| Сечение (толщина) прямоугольных токоотводов, $\text{мм}^2$ (мм) | 50 (4)         | 160 (4) |

Наименьшие размеры поперечного сечения молниезащитных проводников, выполненных из оцинкованной стали, меди и других материалов, даны для вертикальных молниеприемников и вертикальных заземлителей в табл. 6.14, для токоотводов и горизонтальных молниеприемников – в табл. 6.15.

Таблица 6.14

Наименьшие размеры поперечного сечения вертикальных молниеприемников и вертикальных заземлителей

| Материал           | Класс проводников                             | Сортамент | Размеры            |                                |
|--------------------|-----------------------------------------------|-----------|--------------------|--------------------------------|
|                    |                                               |           | Диаметр прутка, мм | Площадь сечения, $\text{мм}^2$ |
| Медь               | Молниеприемники (A),<br>Заземлители ( $E_2$ ) | Пруток    | 16                 | 200                            |
| Оцинкованная сталь |                                               |           |                    |                                |
| Нержавеющая сталь  |                                               |           |                    |                                |
| Алюминиевый сплав  | Молниеприемники (A)                           |           |                    |                                |

Таблица 6.15

Наименьшие размеры поперечного сечения токоотводов и горизонтальных  
молниеприемников

| Материал           | Сортамент                | Размеры            |                    |                       |                                  |
|--------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|----------------------------------|
|                    |                          | Диаметр прутка, мм | Толщина полосы, мм | Диаметр проволоки, мм | Площадь сечения, мм <sup>2</sup> |
| Медь               | Пруток<br>Полоса<br>Трос | 8                  | 2                  | 1,8                   | 50                               |
| Луженая медь       |                          |                    |                    |                       |                                  |
| Алюминий           | Пруток<br>Трос           |                    | 2,5                |                       |                                  |
| Алюминиевый сплав  | Пруток<br>Полоса<br>Трос |                    |                    |                       |                                  |
| Оцинкованная сталь |                          | 10                 | 3                  | 2,2                   |                                  |
| Нержавеющая сталь  | Пруток                   |                    |                    |                       | 78                               |
|                    | Полоса                   |                    |                    |                       | 75                               |
|                    | Трос                     |                    |                    |                       | 72                               |
| Алюминий           | Полоса                   |                    |                    |                       | 75                               |

Молниеприемная сетка должна быть выполнена из стальных проводников диаметром не менее 8 мм, уложена на неметаллическую кровлю здания сверху или под несгораемые или трудносгораемые утеплитель или гидроизоляцию. Размер ячеек сетки должен быть не более 6×6 или 12х12 м в зависимости от категории по молниезащите. Сетка в узлах должна быть соединена сваркой.

В зданиях с покрытиями по металлическим фермам или балкам молниеприемную сетку на кровле не укладывают. В этом случае несущие конструкции покрытия должны быть связаны токоотводами из стальных стержней марки А1 диаметром 12 мм. Все металлические детали, расположенные на кровле (трубы, вентиляционные устройства, водосточные воронки и т.п.) должны быть соединены с молниеприемной сеткой молниеотводами. На неметаллических возвышающихся частях зданий следует дополнительно уложить металлическую сетку и соединить ее при помощи сварки с молниеприемной сеткой на кровле.

При прокладке молниеприемной сетки и установке молниеотводов следует использовать на защищаемом объекте всюду, где это возможно, в

качестве токоотводов металлические конструкции зданий и сооружений (колонны, фермы, рамы, пожарные лестницы и т.п., а также арматуру железобетонных конструкций) при условии обеспечения непрерывной электрической связи в соединениях конструкций и арматуры с молниеприёмниками и заземлителями, выполняемых, как правило, сваркой.

Если строительные конструкции здания используются для молниезащиты, то устройство молниезащиты здания с использованием строительных конструкций включает в себя молниеприемную сетку (или стержневые молниеотводы), соединенную с помощью металлических перемычек с арматурой колонн и железобетонных фундаментов-заземлителей.

Для соединения с арматурой колонн, используемой в качестве токоотводов, молниеприемная сетка приваривается к специальным соединительным изделиям, заложенным в швы между плитами перекрытия. Примеры узлов, обеспечивающих непрерывность электрической цепи в системе молниезащиты в зданиях со сборным железобетонным каркасом, даны на рис. 6.21, 6.22.

Железобетонные фундаменты зданий и сооружений, наружных установок, опор молниеотводов следует, как правило, использовать в качестве заземлителей молниезащиты при условии обеспечения непрерывной электрической связи по их арматуре и присоединения ее к закладным деталям с помощью сварки.

Битумные и битумно-латексные покрытия не являются препятствием для использования фундаментов.

Металлические конструкции и корпуса всего электротехнического оборудования и аппаратов, находящихся в защищаемом здании, должны быть присоединены к заземляющему устройству электроустановок, о чем должны быть даны указания в электротехнической части проекта.

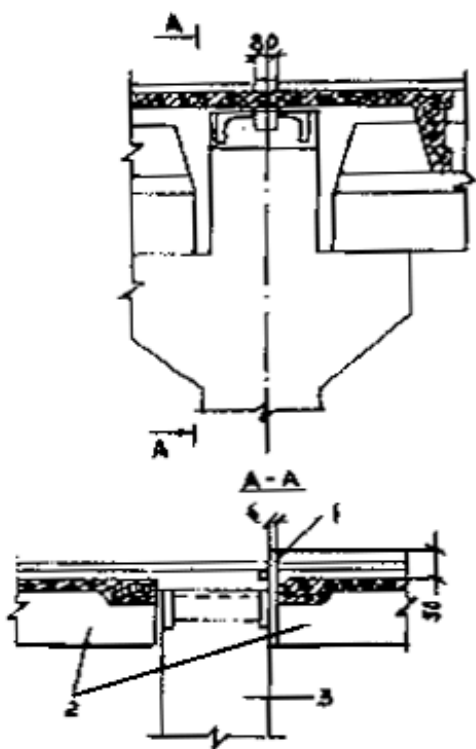


Рис. 6.21. Узел в системе молниезащиты многоэтажного здания с железобетонными ригелями с полками:  
1 – соединительная деталь; 2 – плиты покрытия; 3 – колонна

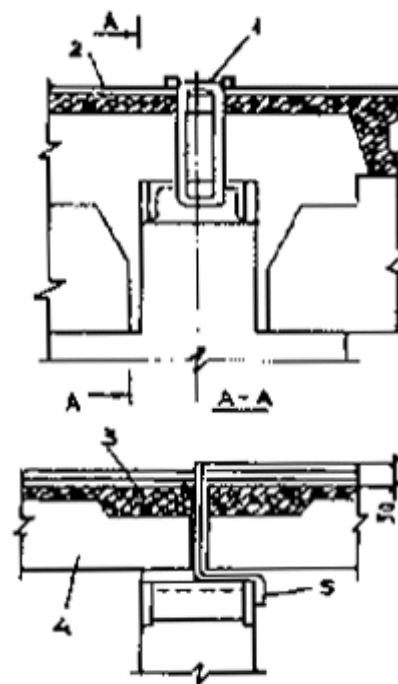


Рис. 6.22. Узел в системе молниезащиты многоэтажного здания с прямоугольными железобетонными ригелями:  
1 – соединительная деталь; 2 – сетка молниезащиты; 3 – бетон замоноличивания; 4 – плита покрытия; 5 – соединительная деталь

Конструкции токоотводов и заземлителей в устройствах молниезащиты аналогичны конструкциям заземляющих проводников и заземлителей в устройствах защитного заземления электроустановок, поэтому требования к их устройству и прокладке, а также требования к электромонтажным работам, аналогичны изложенным.

Установку молниеприемной сетки, отдельно стоящих, крышных и пристенных молниеотводов, а также углубленных заземлителей, выполняют строительные организации.

### Зоны защиты молниеотводов

1. *Одиночный стержневой молниеотвод.* Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой  $h$  представляет собой круговой конус (рис. А1), вершина которого находится на высоте  $h_0 < h$ . На уровне земли зона защиты образует круг радиусом  $r_0$ . Горизонтальное сечение зоны защиты на высоте защищаемого сооружения  $h_x$  представляет собой круг радиусом  $r_x$ .

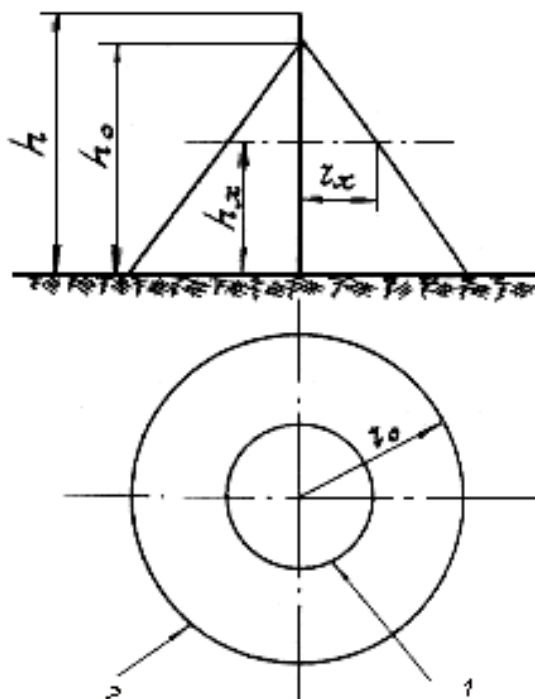


Рис. А1. Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода:

1 – граница зоны защиты на уровне  $h_x$ ; 2 – то же на уровне земли

Зоны защиты одиночных стержневых молниеотводов высотой  $h \leq 150$  м имеют следующие габаритные размеры.

Зона А:

$$h_0 = 0,85 h; r_0 = (1,1 - 0,002 h) h; r_x = (1,1 - 0,002 h)(h - h_x / 0,85). \quad (A1)$$

Зона Б:

$$h_0 = 0,92 h; r_0 = 1,5 h; r_x = 1,5(h - h_x / 0,92). \quad (A2)$$

Для зоны Б высота одиночного стержневого молниеотвода при известных значениях  $h_x$  и  $r_x$  может быть определена по формуле

$$h = (r_x + 1,63h_x)/1,5 \quad (A3)$$

Зоны защиты одиночных стержневых молниеотводов высотой  $150 < h < 600$  м имеют следующие габаритные размеры:

зона А:

$$h_0 = [0,85 - 1,7 \cdot 10^{-3}(h - 150)]h, \quad (A4)$$

$$r_0 = [0,8 - 1,8 \cdot 10^{-3}(h - 150)]h, \quad (A5)$$

$$r_x = [0,8 - 1,8 \cdot 10^{-3}(h - 150)]h \cdot \left\{ 1 - \frac{h_x}{[0,85 - 1,7 \cdot 10^{-3}(h - 150)]h} \right\}; \quad (A6)$$

зона Б:

$$h_0 = [0,92 - 0,8 \cdot 10^{-3}(h - 150)]h, \quad (A7)$$

$$r_0 = 225 \text{ м},$$

$$r_x = 225 - \frac{225h_x}{[0,92 - 0,8 \cdot 10^{-3}(h - 150)]h}. \quad (A8)$$

2. *Двойной стержневой молниеотвод.* Зона защиты двойного стержневого молниеотвода высотой  $h \leq 150$  м предоставлена на рис. А2. Торцевые области зоны защиты определяются как зоны одиночных стержневых молниеотводов, габаритные размеры которых  $h_0$ ,  $r_0$ ,  $r_{x1}$ ,  $r_{x2}$  определяются по формулам п.1 настоящего приложения для обоих типов зон защиты.

Внутренние области зон защиты двойного стержневого молниеотвода имеют следующие габаритные размеры.

Зона А:

при  $L \leq h$

$$h_x = h_0; \quad r_{cx} = r_x; \quad r_c = r_0; \quad (A9)$$

при  $h < L \leq 2h$

$$h_c = h_0 - (0,17 + 3 \cdot 10^{-4}h)(L - h); \quad (A10)$$

$$r_c = r_0; \quad r_{cx} = r_0(h_c - h_x)/h_c; \quad (A11)$$

при  $2h < L \leq 4h$

$$h_c = h_0 - (0,17 + 3 \cdot 10^{-4} h(L - h)); \quad (A12)$$

$$r_c = r_0 \left[ 1 - \frac{0,2(L - 2h)}{h} \right]; \quad (A13)$$

$$r_{cx} = r_c(h_c - h_x) / h_c. \quad (A14)$$

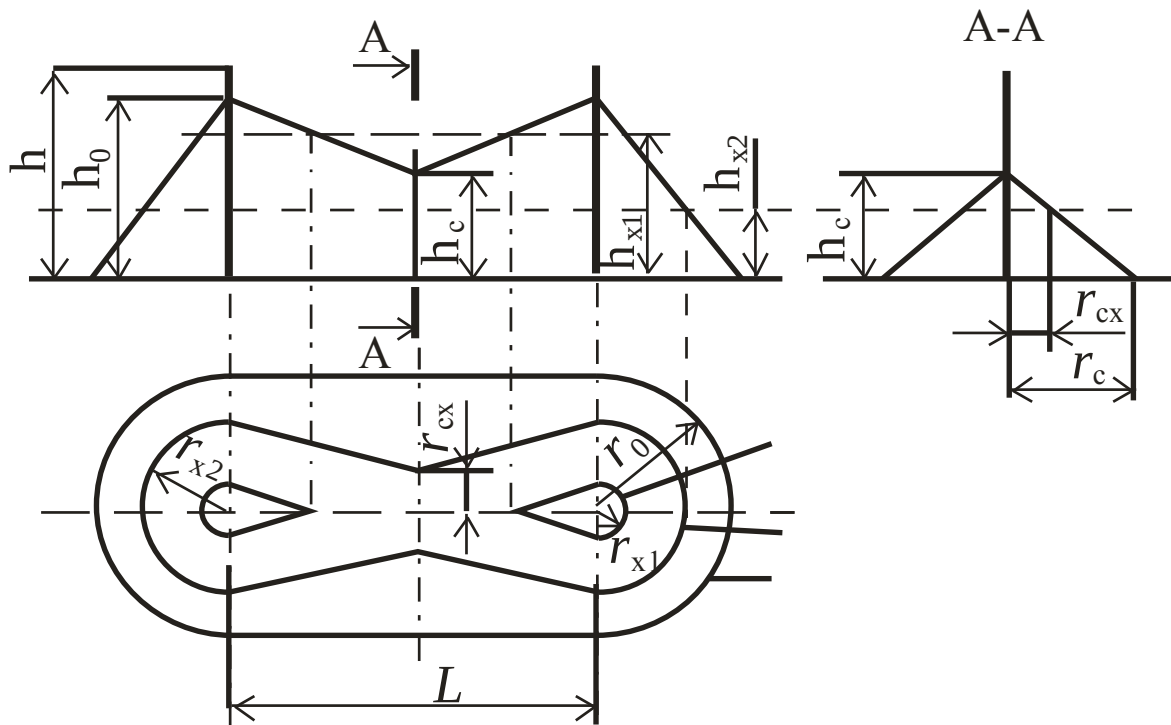


Рис. А2. Зона защиты двойного стержневого молниеотвода:

1 – граница зоны защиты на уровне  $h_{x1}$ ; 2 – то же на уровне  $h_{x2}$ ;

3 – то же на уровне земли

При расстоянии между стержневыми молниеотводами  $L > 4h$  для построения зоны А молниеотводы следует рассматривать как одиночные.

Зона Б:

при  $L \leq h$

$$h_c = h_0; \quad r_{cx} = r_x; \quad r_c = r_0; \quad (A15)$$

при  $h < L \leq 6h$

$$h_c = h_0 - 0,14(L - h); \quad r_c = r_0; \quad r_{cx} = r_0(h_c - h_x) / h_c. \quad (A16)$$

При расстоянии между стержневыми молниеотводами  $L > 6h$  для построения зоны Б молниеотводы следует рассматривать как одиночные.

При известных значениях  $h_c$  и  $L$  (при  $r_{cx} = 0$ ) высота молниеотвода для зоны Б определяется по формуле

$$h = (h_c + 0,14L)/1,06. \quad (A17)$$

Зона защиты двух стержневых молниеотводов разной высоты  $h_1$  и  $h_2 \leq 150$  м приведена на рис. А3. Габаритные размеры торцевых областей зон защиты  $h_{01}$ ,  $h_{02}$ ,  $r_{01}$ ,  $r_{02}$ ,  $r_{x1}$ ,  $r_{x2}$  определяются по формулам, как для зон защиты обоих типов одиночного стержневого молниеотвода. Габаритные размеры внутренней области зоны защиты определяются по формулам:

$$r_c = (r_{01} + r_{02})/2; h_c = (h_{c1} + h_{c2})/2; r_{cx} = r_c(h_c - h_x)/h_c, \quad (A18)$$

где значения  $h_{c1}$  и  $h_{c2}$  вычисляются по формулам для  $h_c$  п.2 настоящего приложения.

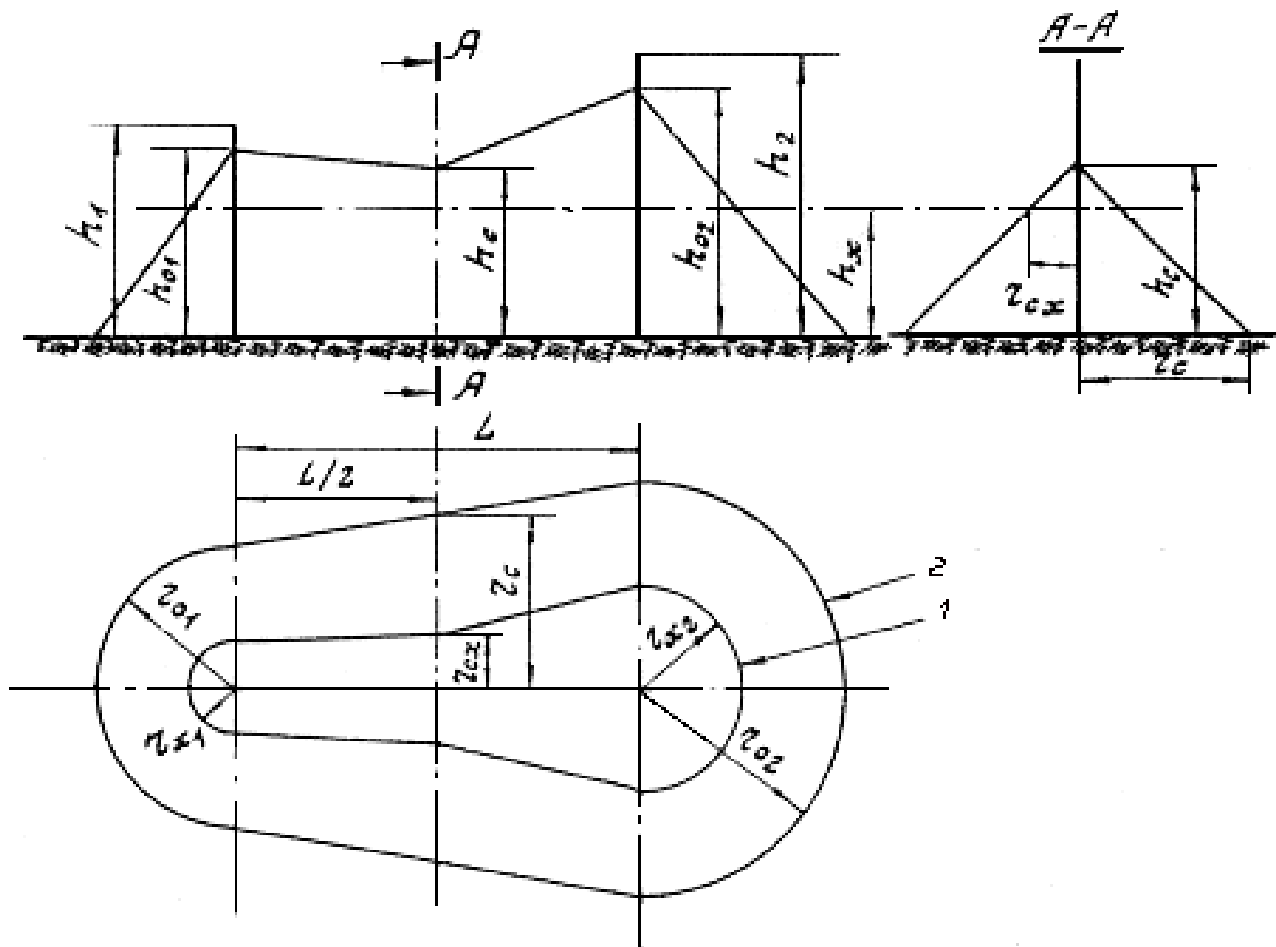


Рис. А3. Зона защиты двух стержневых молниеотводов разной высоты.

Обозначения те же, что и на рис. А1

Для двух молниеотводов разной высоты построение зоны А двойного стержневого молниеотвода выполняется при  $L \leq 4h_{\min}$ , а зоны Б – при  $L \leq 6h_{\min}$ . При соответствующих больших расстояниях между молниеотводами они рассматриваются как одиночные.

3. *Многократный стержневой молниеотвод.* Зона защиты многократного стержневого молниеотвода (рис. А4) определяется как зона защиты попарно взятых соседних стержневых молниеотводов высотой  $h \leq 150$  м (см. п.2 настоящего приложения).

Основным условием защищенности одного или нескольких объектов высотой  $h_x$  с надежностью, соответствующей надежности зоны А и зоны Б, является выполнение неравенства  $r_{cx} > 0$  для всех попарно взятых молниеотводов. В противном случае построение зон защиты должно быть выполнено для одиночных или двойных стержневых молниеотводов в зависимости от выполнения условий п.2 настоящего приложения.

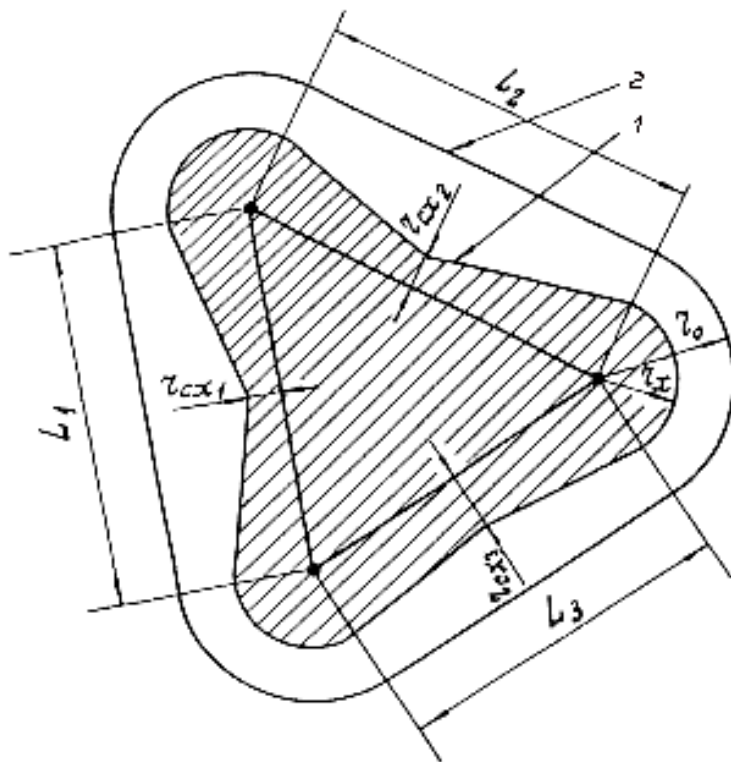


Рис. А4. Зона защиты (в плане) многократного стержневого молниеотвода.

Обозначения те же, что и на рис. А1

4. *Одиночный тросовый молниеотвод.* Зона защиты одиночного тросового молниеотвода высотой  $h \leq 150$  м приведена на рис. А5, где  $h$  – высота троса в середине пролета. С учетом стрелы провеса троса сечением 35-50 мм<sup>2</sup> при известной высоте опор  $h_{оп}$  и длине пролета  $a$  высота троса (в метрах) определяется:

$$h = h_{оп} - 2 \text{ при } a < 120 \text{ м}; \quad (\text{A19})$$

$$h = h_{оп} - 3 \text{ при } 120 < a < 150 \text{ м}. \quad (\text{A20})$$

Зоны защиты одиночного тросового молниеотвода имеют следующие габаритные размеры.

Зона А:

$$h_0 = 0,85 h; r_0 = (1,35 - 0,0025 h) h; \quad (\text{A21})$$

$$r_x = (1,35 - 0,0025 h)(h - h_x / 0,85). \quad (\text{A22})$$

Зона Б:

$$h_0 = 0,92 h; r_0 = 1,7 h; r_x = 1,7(h - h_x / 0,92); \quad (\text{A23})$$

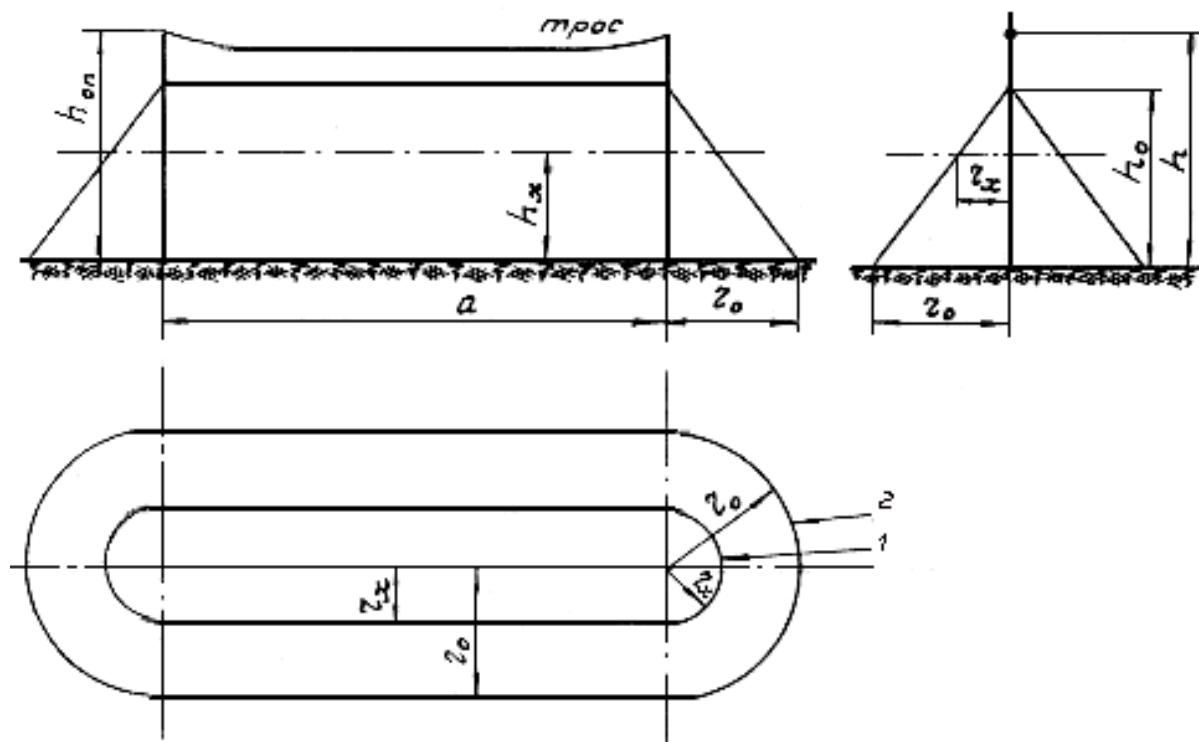


Рис. А5. Зона защиты одиночного тросового молниеотвода.

Обозначения те же, что и на рис. А1

Для зоны типа Б высота одиночного тросового молниеотвода при известных величинах  $h_x$  и  $r_x$  определяется по формуле

$$h = (r_x + 1,85h_x) / 1,7. \quad (A24)$$

5. *Двойной тросовый молниеотвод.* Зона защиты двойного тросового молниеотвода высотой  $h \leq 150$  м приведена на рис. А6. Размеры  $r_0$ ,  $h_0$ ,  $r_x$  для зон защиты А и Б определяются по соответствующим формулам п.4 настоящего приложения. Остальные размеры зон определяются следующим образом.

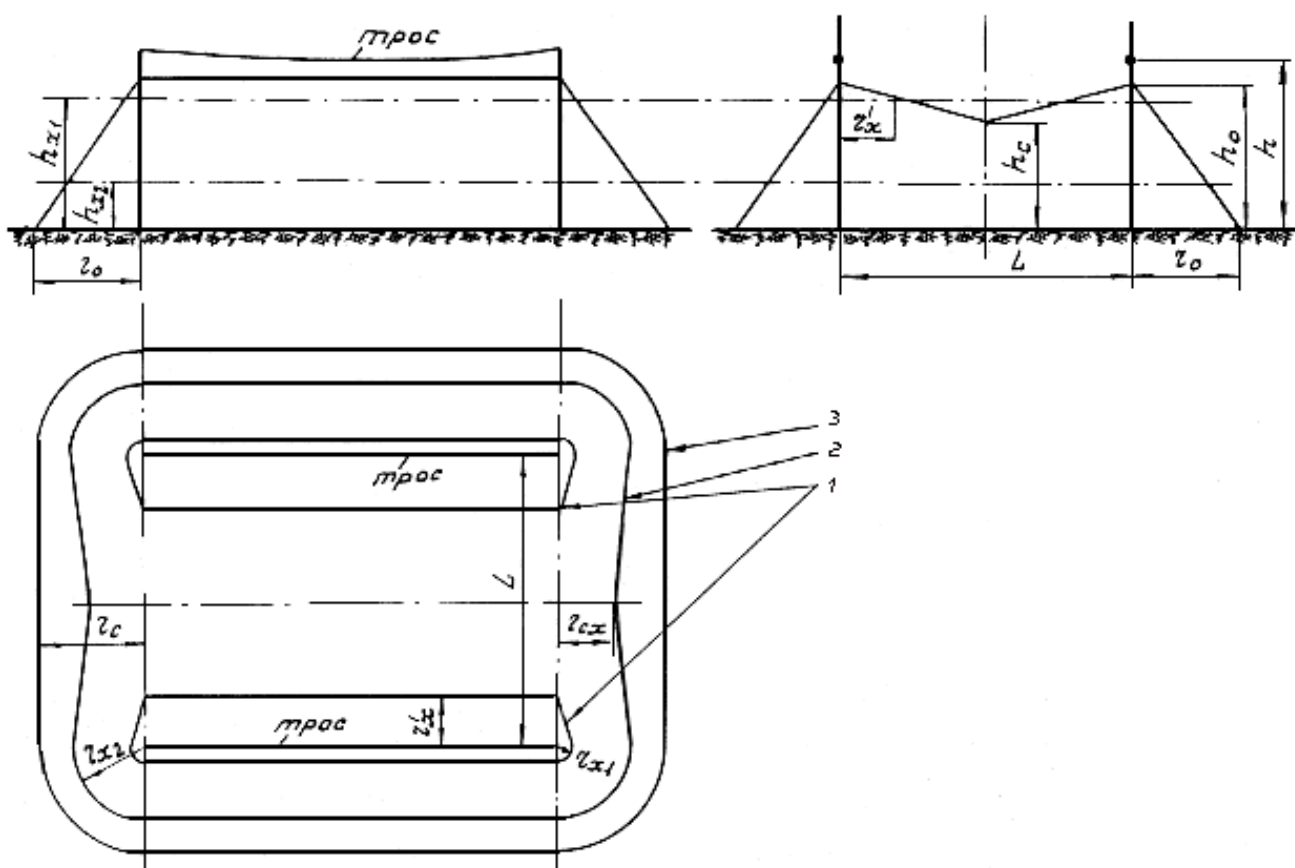


Рис. А6. Зона защиты двойного тросового молниеотвода.

Обозначения те же, что и на рис. А2

Зона А:

при  $L \leq h$

$$h_c = h_0; \quad r_{cx} = r_x; \quad r_c = r_0; \quad (A25)$$

при  $h < L \leq 2h$

$$h_c = h_0 - (0,14 + 5 \cdot 10^{-4}h)(L - h); \quad (A26)$$

$$r'_x = \frac{L}{2} \frac{h_0 - h_x}{h_0 - h_c}; \quad (A27)$$

$$r_c = r_0; \quad r_{cx} = r_0(h_c - h_x)/h_c; \quad (A28)$$

при  $2h < L \leq 4h$

$$h_c = h_0 - (0,14 + 5 \cdot 10^{-4} h)(L - h); \quad (A29)$$

$$r'_x = \frac{L}{2} \frac{h_0 - h_x}{h_0 - h_c}; \quad (A30)$$

$$r_c = r_0 \left[ 1 - \frac{0,2(L - 2h)}{h} \right]; \quad (A31)$$

$$r_{cx} = r_c(h_c - h_x)/h_c. \quad (A32)$$

При расстоянии между тросовыми молниеотводами  $L > 4h$  для построения зоны А молниеотводы следует рассматривать как одиночные.

Зона Б:

при  $h < L$

$$h_c = h_0; \quad r_{cx} = r_x; \quad r_c = r_0; \quad (A33)$$

при  $h < L \leq 6h$

$$h_c = h_0 - 0,12(L - h); \quad (A34)$$

$$r'_x = \frac{L}{2} \frac{h_0 - h_x}{h_0 - h_c}; \quad (A35)$$

$$r_c = r_0; \quad r_{cx} = r_0(h_c - h_x)/h_c. \quad (A36)$$

При расстоянии между тросовыми молниеотводами  $L > 6h$  для построения зоны Б молниеотводы следует рассматривать как одиночные.

При известных величинах  $h_c$  и  $L$  (при  $r_{cx} = 0$ ) высота тросового молниеотвода для зоны Б определяется по формуле

$$h = (h_c + 0,12L)/1,06. \quad (A37)$$

Зона защиты двух тросов разной высоты  $h_1$  и  $h_2$  приведена на рис. А7. Габариты  $h_{01}$ ,  $h_{02}$ ,  $r_{01}$ ,  $r_{02}$ ,  $r_{x1}$ ,  $r_{x2}$  определяются по формулам п.4 настоящего

приложения как для одиночного тросового молниеотвода. Для определения размеров  $r_c$  и  $h_c$  используются формулы:

$$r_c = (r_{01} + r_{02}) / 2; h_c = (h_{c1} + h_{c2}) / 2, \quad (A38)$$

где  $h_{c1}$  и  $h_{c2}$  вычисляются по формулам для  $h_c$  п.5 настоящего приложения.

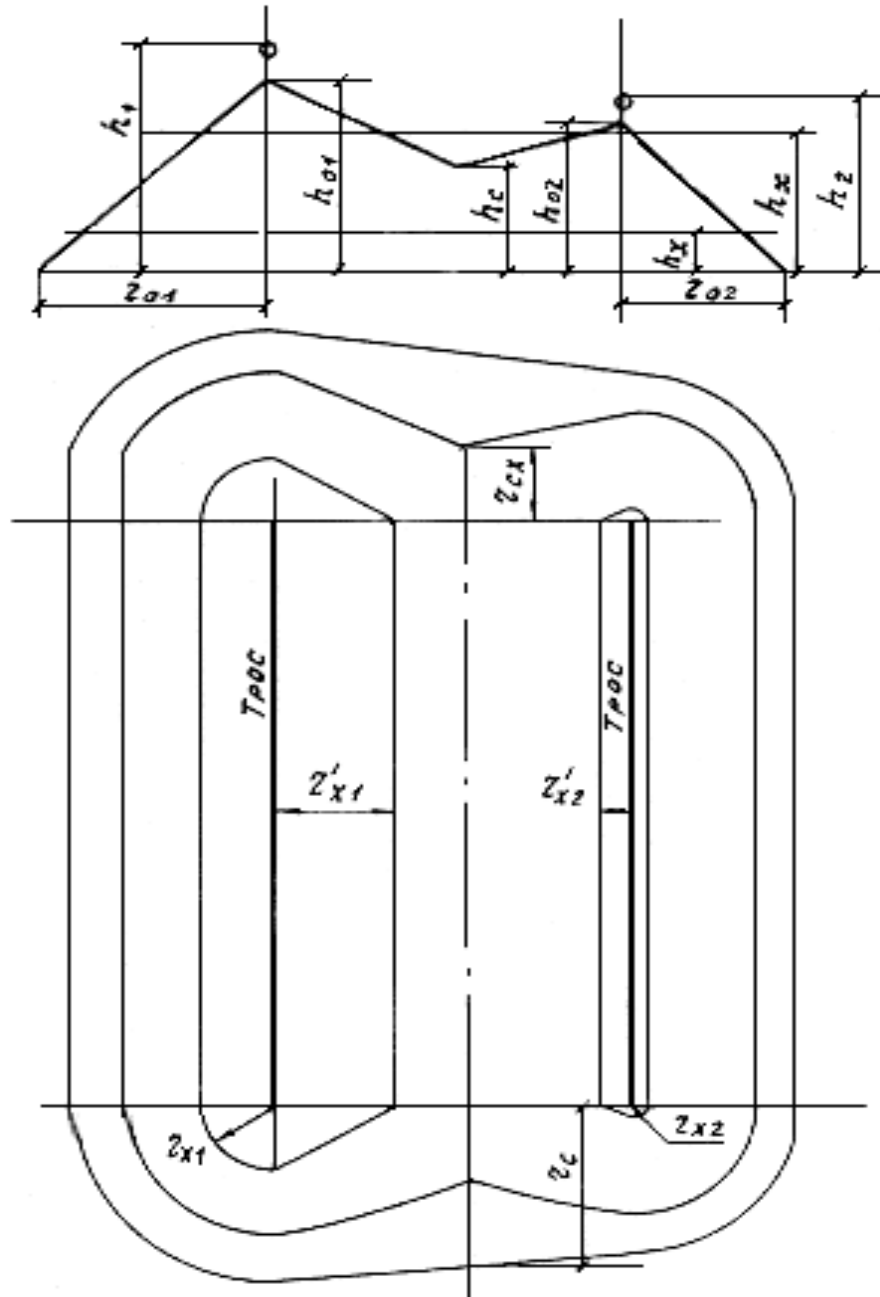


Рис. А7. Зона защиты двух тросовых молниеотводов разной высоты

Далее по формулам того же п.4 вычисляются  $r'_{x1}$ ,  $r'_{x2}$ ,  $r_{cx}$ .

### Пример расчета молниезащиты ГПП 35/10 кВ

Опасные грозовые воздействия на подстанционном оборудовании возникают при ударах молнии непосредственно в подстанцию (ПС), а также при поражениях ВЛ и приходе по ним на распределительное устройство (РУ) и ПС грозовых волн. Кроме того, для РУ 6 и 10 кВ опасны перенапряжения, индуктированные на токоведущих частях при ударах молнии в землю или другие объекты вблизи ВЛ или ПС.

Защита оборудования подстанций от прямых ударов молнии обеспечивается системой стержневых и тросовых молниеотводов.

Защита ПС от набегающих с ВЛ волн грозовых перенапряжений основана на выборе соответствующих защитных аппаратов (ОПН, разрядников), числа и места их установки на ПС с тем, чтобы обеспечить такое снижение воздействующих волн грозовых перенапряжений по амплитуде и крутизне, при котором в течение нормированного срока безаварийной эксплуатации  $T_{н.в}$  не будут превышены допустимые значения перенапряжений для наиболее ответственного и дорогостоящего оборудования (трансформаторов, автотрансформаторов, шунтирующих реакторов и т.д.).

На рис. Б1 показана компоновка ГПП 35/10 кВ, которое требуется защитить от прямых ударов молнии. Исходными данными для расчетов являются геометрические размеры конструктивных элементов ГПП:

- А – ширина ГПП, м;
- В – длина ГПП, м;
- $h_x$  – высота защищаемого объекта, м;

–  $n$  – среднегодовое число ударов молний в 1 км<sup>2</sup> земной поверхности в месте нахождения объекта, в зависимости от среднегодовой продолжительности гроз в часах.

Для защиты рассматриваемой ГПП от прямых ударов молний применяются 4 молниеотвода, которые устанавливаются отдельно стоящими, при этом должны соблюдаться условия, приведенные в табл. 6.10:

1. Если не могут быть выполнены условия установки молниеотвода на конструкциях ОРУ.

2. Расстояние по земле  $l_3$  между обособленным заземлителем молниеотвода и заземляющим контуром ОРУ должно быть таким, чтобы исключить перекрытие по земле между заземлителями с вероятностью не более 0,1. При этом должно выполняться условие  $l_3 \geq 0,2R_{\text{и}}$  и  $l_3 \geq 3$  м.

3. Расстояние по воздуху  $l_{\text{в}}$  от отдельно стоящего молниеотвода с обособленным заземлителем до токоведущих частей, заземленных конструкций и оборудования ОРУ должно быть таким, чтобы исключить перекрытия по воздуху с вероятностью не более 0,1. При этом должно выполняться условие  $l_{\text{в}} \geq (0,12R_{\text{и}} + H_{\text{с}})$  и  $l_{\text{в}} \geq 5$  м.

4. Сопротивление заземлителя должно быть не более 80 Ом.

1. Определяется ожидаемое количество поражений молнией ГПП в год,

$$N = [(A + 6 \cdot h_{\text{х}})(B + 6 \cdot h_{\text{х}}) - 7,7h_{\text{х}}^2] \cdot n \cdot 10^{-6}, \quad (\text{Б1})$$

где  $A$  – ширина ГПП, м,

$B$  – длина ГПП, м,

$h_{\text{х}}$  – высота защищаемого объекта, м,

$n$  – среднегодовое число ударов молний в 1 км<sup>2</sup> земной поверхности в месте нахождения объекта, в зависимости от среднегодовой продолжительности гроз в часах. Для нахождения  $n$  необходимо определить среднее число грозовых часов в году по табл. 6.1 или по карте грозовой деятельности, приведенной в приложении В. Для Кировской области среднее число грозовых часов в году  $D_{\text{г}} = 20 - 40$  ч/год, тогда по приложению В  $n = 2$ .

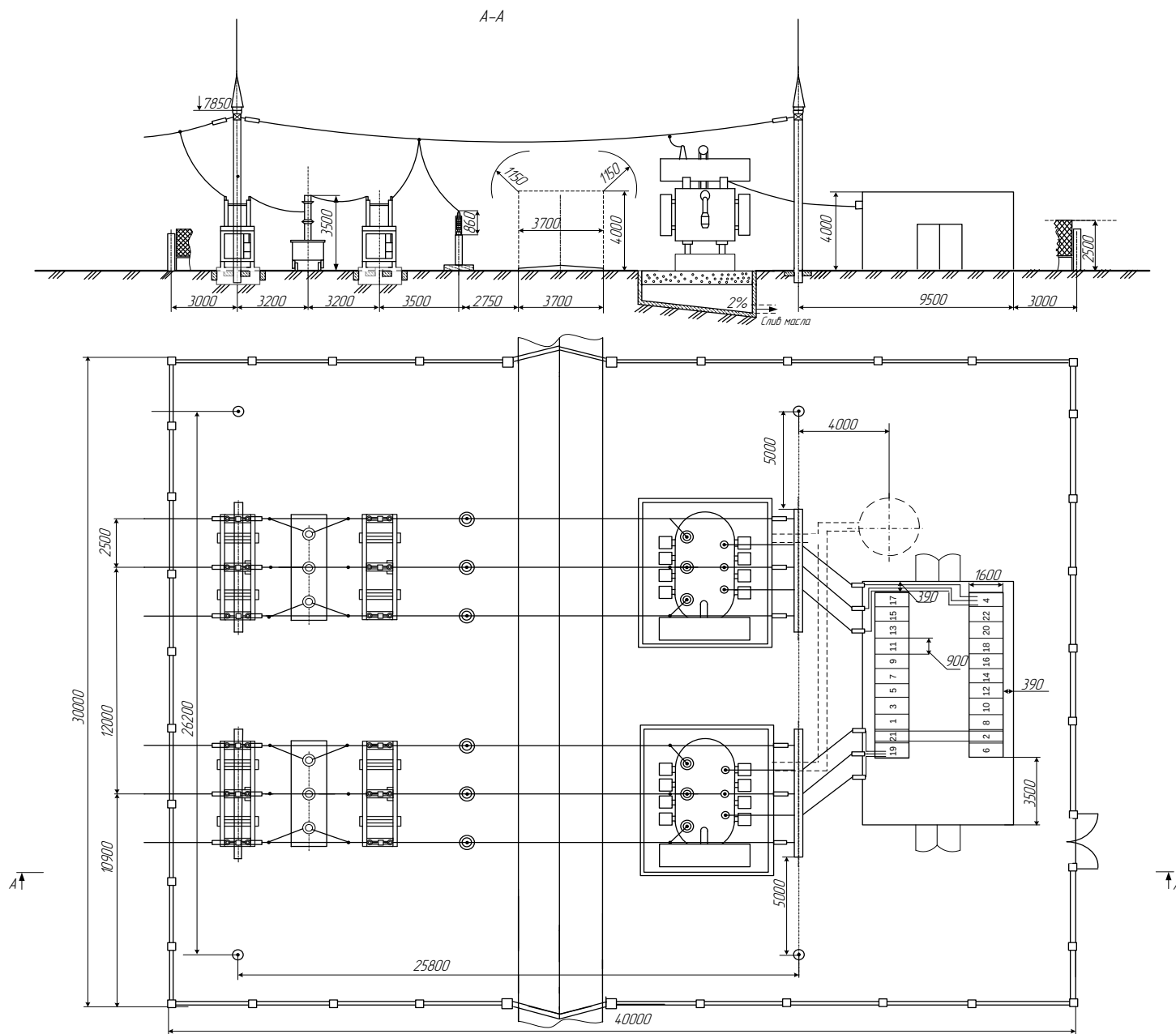


Рис. Б1. Конструктивное исполнение ГПП 35/10 кВ

Геометрические размеры ГПП  $A=30$  м,  $B=40$  м, а высота защищаемых объектов на территории ГПП принимается равной высоте портала,  $h_x=7,85$  м.

$$N = [(30 + 6 \cdot 7,85)(40 + 6 \cdot 7,85) - 7,7 \cdot 7,85^2] \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 0,0125.$$

2. Принимается тип зоны защиты Б, так как  $N < 1$ .

3. Определяется высота молниеотвода из условия (6.6), по которому уровень  $h_x$  внутри остроугольного треугольника или прямоугольника, образованного ближайшими тремя или четырьмя стержневыми молниеотводами, будет защищен, если диаметр  $D$  окружности, проходящей через вершины треугольника, или диагональ  $D$  прямоугольника удовлетворяют условию

$$D < 8(h - h_x)p, \quad (B2)$$

где коэффициент  $p=1$  при  $h < 30$  м.

При этом границы верхней части зон защиты определяются для каждой пары молниеотводов.

В случае рассматриваемого примера диагональ  $D$  прямоугольника определяется по выражению:

$$D = \sqrt{L_1^2 + L_2^2}, \quad (B3)$$

где  $L_1, L_2$  – расстояние между молниеотводами по ширине и длине ГПП.

$$D = \sqrt{26,2^2 + 25,8^2} = 36,77 \text{ м},$$

$$36,77 < 8(h - 7,85) = 8h - 62,8.$$

Откуда  $h > 12,44$  м, поэтому к исполнению принимаются молниеотводы высотой  $h = 12,5$  м.

4. Зона защиты многократного стержневого молниеотвода определяется как зона защиты попарно взятых соседних стержневых молниеотводов высотой  $h \leq 150$  м (см. п.2 приложения А). Зона защиты двойного стержневого молниеотвода высотой предоставлена на рис. А2. Торцевые области зоны защиты определяются как зоны одиночных стержневых

молниеотводов, габаритные размеры которых  $h_0$ ,  $r_0$ ,  $r_{x1}$  определяются по формулам п.1 приложения А для зоны защиты типа Б.

Вершина конуса зоны защиты

$$h_0 = 0,92 \cdot h = 0,92 \cdot 12,5 = 11,5 \text{ м.}$$

Радиус основания конуса на уровне земли

$$r_0 = 1,5 \cdot h = 1,5 \cdot 12,5 = 18,75 \text{ м.}$$

Радиус зоны защиты на высоте  $h_{x1}$ .

$$r_{x1} = 1,5 \cdot (h - h_x / 0,92) = 1,5 \cdot (12,5 - 7,85 / 0,92) = 5,95 \text{ м.}$$

Высота зоны защиты посередине между молниеотводами

$$h_{c1} = h_0 - 0,14 \cdot (L_1 - h) = 11,5 - 0,14 \cdot (26,2 - 12,5) = 9,58 \text{ м,}$$

$$h_{c2} = h_0 - 0,14 \cdot (L_2 - h) = 11,5 - 0,14 \cdot (25,8 - 12,5) = 9,64 \text{ м.}$$

Ширина горизонтального сечения совместной зоны защиты на высоте  $h_x$  от уровня земли

$$r_{cx1} = r_0 \cdot \frac{(h_{c1} - h_x)}{h_{c1}} = 18,75 \cdot \frac{9,58 - 7,85}{9,58} = 3,39 \text{ м,}$$

$$r_{cx2} = r_0 \cdot \frac{(h_{c2} - h_x)}{h_{c2}} = 18,75 \cdot \frac{9,64 - 7,85}{9,64} = 3,48 \text{ м.}$$

Ширина совместной зоны защиты

$$r_c = r_0 = 18,75 \text{ м.}$$

5. Строится зона защиты стержневых молниеотводов. Если зона защиты, построенная на высоте  $h_{x1}$ , не защищает какие-либо объекты, то производится расчет параметров зоны защиты для высоты этих объектов. В данном примере такими объектами являются здание ЗРУ и забор с  $h_{x2} = 4$  м и  $h_{x3} = 2,5$  м соответственно.

6. Расчет параметров зоны защиты для здания ЗРУ.

Радиус зоны защиты на высоте  $h_{x2}$ .

$$r_{x2} = 1,5 \cdot (h - h_{x2} / 0,92) = 1,5 \cdot (12,5 - 4,00 / 0,92) = 12,23 \text{ м.}$$

Ширина горизонтального сечения совместной зоны защиты на высоте  $h_x$  от уровня земли

$$r_{cx12} = r_0 \cdot \frac{(h_{c1} - h_{x2})}{h_{c1}} = 18,75 \cdot \frac{9,58 - 4,00}{9,58} = 10,92 \text{ м},$$

$$r_{cx22} = r_0 \cdot \frac{(h_{c2} - h_{x2})}{h_{c2}} = 18,75 \cdot \frac{9,64 - 4,00}{9,64} = 10,97 \text{ м}.$$

7. Строится зона защиты стержневых молниеотводов.

8. Расчет параметров зоны защиты для высоты забора.

Радиус зоны защиты на высоте  $h_{x3}$ .

$$r_{x3} = 1,5 \cdot (h - h_{x3}/0,92) = 1,5 \cdot (12,5 - 2,50/0,92) = 14,67 \text{ м}.$$

Ширина горизонтального сечения совместной зоны защиты на высоте  $h_x$  от уровня земли

$$r_{cx13} = r_0 \cdot \frac{(h_{c1} - h_{x3})}{h_{c1}} = 18,75 \cdot \frac{9,58 - 2,50}{9,58} = 13,86 \text{ м},$$

$$r_{cx23} = r_0 \cdot \frac{(h_{c2} - h_{x3})}{h_{c2}} = 18,75 \cdot \frac{9,64 - 2,50}{9,64} = 13,89 \text{ м}.$$

9. Строится зона защиты стержневых молниеотводов.

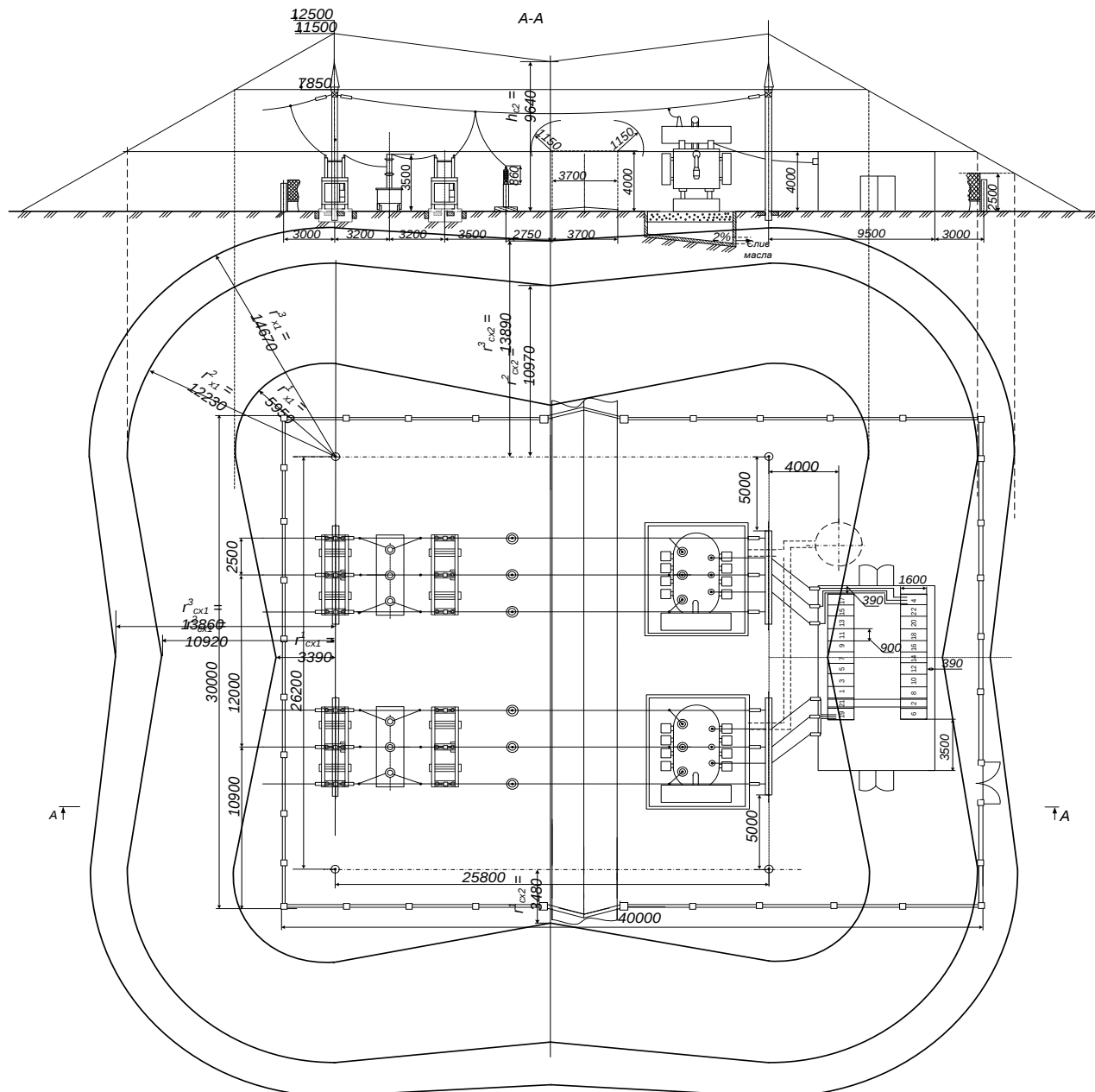


Рис. Б2. Зона защиты стержневых молниеотводов для ГПП 35/10 кВ

Защита от перенапряжений, набегающих с линии, осуществляется с помощью ОПН и троса, который подвешивается только на подходах к подстанциям с длиной защитного подхода  $l_{зп} = 1 \div 2$  км, определенной для 35 кВ по [1]. На ГПП устанавливаются ограничители перенапряжения ОПН-35, кроме того на концевых опорах защищенного подхода устанавливаются ОПН, в качестве которых могут применяться подвесного типа. Схема защиты от перенапряжений для железобетонных опор представлена на рисунке Б3.

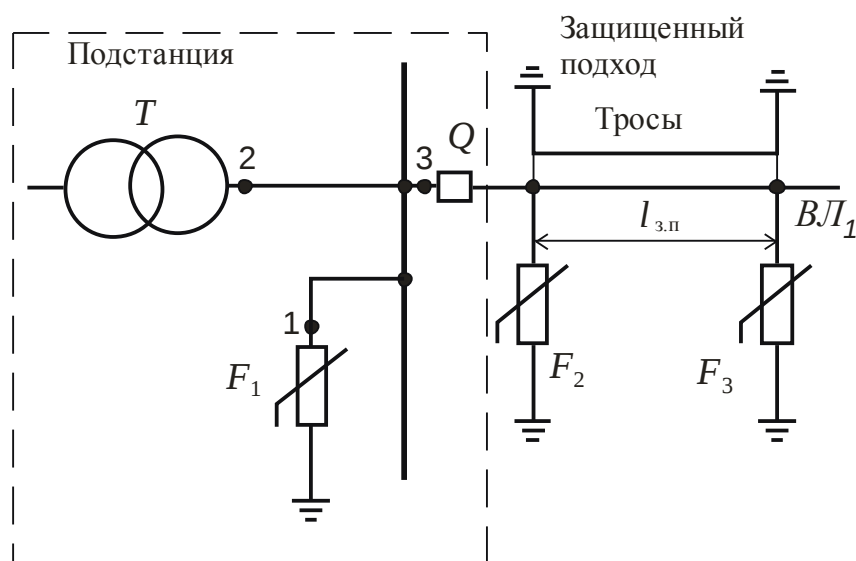
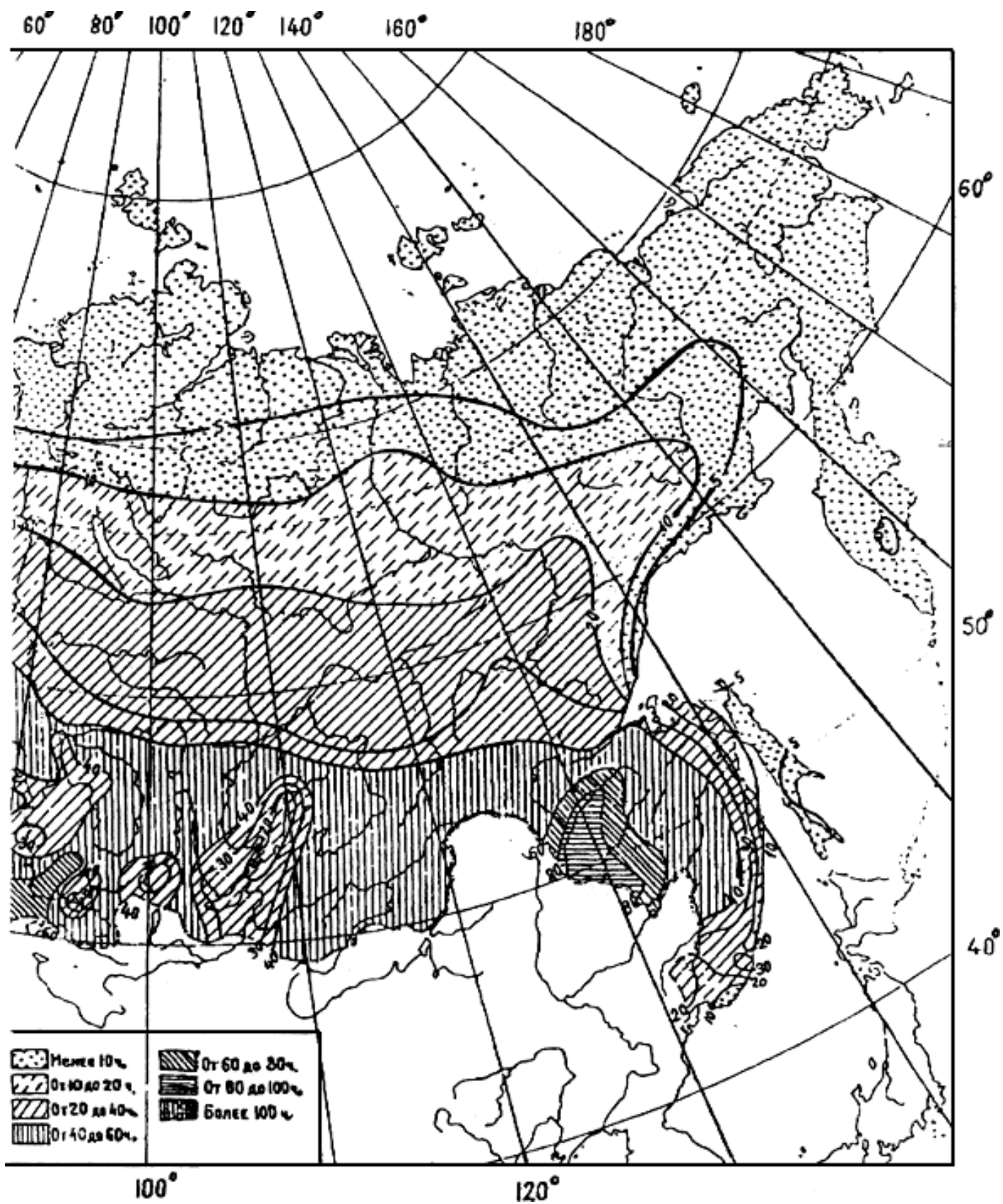


Рис. Б3. Схема защиты ГПП от перенапряжений, набегающих с линий

**Характеристики интенсивности грозовой деятельности и  
грозопоражаемости зданий и сооружений**



Рис. В1. Карта годовой продолжительности гроз в часах для территории бывшего СССР



Продолжение рис. В1.

Для произвольного пункта на территории бывшего СССР удельная плотность ударов молнии в землю  $n$  определяется исходя из среднегодовой продолжительности гроз в часах следующим образом:

| Среднегодовая<br>продолжительность<br>гроз, ч | Удельная плотность ударов молнии в<br>землю $n$ , 1/(км <sup>2</sup> ·год) |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 10 - 20                                       | 1                                                                          |
| 20 - 40                                       | 2                                                                          |
| 40 - 60                                       | 4                                                                          |
| 60 - 80                                       | 5,5                                                                        |
| 80 - 100                                      | 7                                                                          |
| 100 и более                                   | 8,5                                                                        |

**Основные характеристики ОПН, выпускаемых НПО  
«ЭЛЕКТРОКЕРАМИКА», «АВВ-УЭТМ», «ФЕНИКС-88», «ТАВРИДА-  
ЭЛЕКТРИК»**

В этом Приложении приведены основные электрические характеристики ОПН, серийно выпускаемых в России. Характеристики соответствуют техническим требованиям на защитные аппараты, утвержденным РАО «ЕЭС России». Более подробную информацию об ОПН необходимо запрашивать у фирм-поставщиков.

*1. Электрические характеристики ОПН, выпускаемых  
НПО «ЭЛЕКТРОКЕРАМИКА» в фарфоровых покрышках*

Данные о выпуске и надежности ОПН 110-750 кВ производства НПО «Электрокерамика» (в числителе – общее количество повреждений, в знаменателе – количество повреждений за вычетом случаев нарушения условий эксплуатации и соответствия техническим условиям) приведены в табл. Г1.1. НПО «Электрокерамика» серийно выпускает также ОПН 0,4-35 кВ.

Таблица Г1.1

| Класс<br>напряжения,<br>кВ | Количество<br>фаз, шт. | Объем<br>эксплуатации,<br>фазо-лет | Количество<br>повреждений | % повреждений<br>на 1 фазу в году |
|----------------------------|------------------------|------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| 110                        | 4032                   | 20950                              | 9/6                       | 0,043/0,029                       |
| 150                        | 455                    | 2374                               | 3/1                       | 0,126/0,042                       |
| 220                        | 2827                   | 15214                              | 8                         | 0,053                             |
| 330                        | 529                    | 2460                               | 2/1                       | 0,081/0,041                       |
| 500                        | 1066                   | 6829                               | 10/4                      | 0,161/0,059                       |
| 750                        | 164                    | 1312                               | 11/6                      | 0,762/0,457                       |

Таблица Г1.2

## Электрические характеристики ОПН 110-1150 кВ

| Наименование                                                                          | ОПН-110<br>УХЛ1 | ОПН-110<br>ХЛ4 | ОПН-220<br>УХЛ1 | ОПН-220<br>У1<br>ОПН-220<br>УХЛ4 | ОПН-330<br>У1 | ОПН-500<br>УХЛ1 | ОПН-750<br>У1 | ОПН-О-750<br>У1 | ОПН-1150<br>У1 |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|----------------|
| 1                                                                                     | 2               | 3              | 4               | 5                                | 6             | 7               | 8             | 9               | 10             |
| Класс напряжения, кВ                                                                  | 110             | 110            | 220             | 220                              | 330           | 500             | 750           | 750             | 1150           |
| Наибольшее рабочее напряжение, кВ                                                     | 73              | 73             | 146             | 146                              | 210           | 303             | 455           | 455             | 694            |
| Напряжение на ограничителе, кВ дейст., допустимое в течение времени                   |                 |                |                 |                                  |               |                 |               |                 |                |
| 8 ч                                                                                   | 81              |                | 162             |                                  | 233           | 336             |               |                 |                |
| 3 ч                                                                                   | 83              |                | 166             |                                  | 239           | 345             |               |                 |                |
| 1 ч                                                                                   | 85              |                | 171             |                                  | 246           | 355             |               |                 | 765            |
| 20 мин                                                                                | 88              | 88             | 175             | 175                              | 250           | 365             | 545           | 545             | -              |
| 20 с                                                                                  | 95              | 95             | 190             | 190                              | 270           | 390             | 590           | 590             | 830            |
| 3,0 с                                                                                 | -               | -              | -               | -                                | -             | -               |               | -               | 900            |
| 3,5 с                                                                                 | 100             | 100            | 200             | 200                              | 290           | 420             | 635           | 635             | -              |
| 1,0 с                                                                                 | 105             | -              | 210             | -                                | 305           | 440             | 660           | 660             | -              |
| 0,15 с                                                                                | 112             | -              | 225             | -                                | 325           | 470             | 705           | 705             | 935            |
| 0,12 с                                                                                | -               | -              | -               | -                                | -             | -               | -             | -               | -              |
| 0,05 с                                                                                | -               | -              | -               | -                                | -             | -               | -             | -               | 970            |
| Расчетный ток коммутационного перенапряжения, волна 1,2/2,5 мс, А                     | 280             | 350            | 420             | 500                              | 700           | 1200            | 1800          | 1200            | 2000           |
| Остающееся напряжение при расчетном токе коммутационного перенапряжения, кВ, не более | 180             | 175            | 360             | 350                              | 520           | 750             | 1125          | 1125            | 1670           |

Продолжение табл. Г1.2

| 1                                                                                                      | 2       | 3    | 4       | 5    | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|------|---------|------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Остающееся напряжение, кВ при импульсном токе с длительностью фронта волны 8 мкс с амплитудой не более |         |      |         |      |         |         |         |         |         |
| 3000 А                                                                                                 | 230*    | -    | 430*    | -    | 620*    | 825     | -       | -       | -       |
| 5000 А                                                                                                 | 250     | 205  | 460     | 410  | 650     | 860     | 1280    | 1300    | -       |
| 7000 А                                                                                                 | -       | -    | -       | -    | -       | 865     | -       | -       | -       |
| 10000 А                                                                                                | 280*    | -    | 500*    | -    | 700     | 920     | 1320    | 1350    | -       |
| 14000 А                                                                                                | -       | -    | -       | -    | -       | -       | -       | -       | 1900    |
| 15000 А                                                                                                | -       | -    | -       | -    | -       | 980     | 1380    | 1420    | -       |
| 30000 А                                                                                                | -       | -    | -       | -    | -       | -       | 1550*   | 1600*   | -       |
| Пропускная способность:                                                                                |         |      |         |      |         |         |         |         |         |
| 20 импульсов тока 1,2/2,5 мс с амплитудой, А                                                           | 280     | 350  | 420     | 500  | 630     | 1200    | 1800    | 1450    | 2000    |
| 20 импульсов тока 8/20 мкс с амплитудой, А                                                             | 5000    | 5000 | 5000    | 5000 | -       | -       | -       | -       | -       |
| 20 импульсов тока 16/40 мкс с амплитудой, А                                                            | -       | -    | -       | -    | 8000    | 15000   | 15000   | 15000   | 20000   |
| 2 импульса тока 8/20 мкс с амплитудой, А                                                               | 15000   | -    | 15000   | -    | 24000   | 30000   | 40000   | 30000   | 40000   |
| Взрывобезопасность при токах к.з.:                                                                     |         |      |         |      |         |         |         |         |         |
| 0,2 с, кА                                                                                              | 20-40** | 20   | 20-40** | 20   | 20-40** | 20-40** | 20-40** | 20-40** | 20-40** |
| 2 с, кА                                                                                                | 0,8     | 0,8  | 0,8     | 0,8  | 0,8     | 0,8     | 0,8     | 0,8     | 0,8     |
| Длина пути утечки внешней изоляции, мм, не менее                                                       | 2270    | 2270 | 4550    | 4550 | 6600    | 9500    | 14200   | 14200   | 21600   |

Примечания 1) \* – значения для справок.

2) \*\* – по требованию заказчика с 2000 г.

3) прочерк означает, что параметр не нормируется.

Таблица Г1.3

## Электрические характеристики грязестойких ОПН 110 и 220 кВ

| Наименование параметра                                                                                        | Норма                 |                       |                       |                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                                                                                               | ОПН-110<br>II<br>УХЛ1 | ОПН-110<br>IV<br>УХЛ1 | ОПН-220<br>II<br>УХЛ1 | ОПН-220<br>IV<br>УХЛ1 |
| Класс напряжения, кВ                                                                                          | 110                   | 110                   | 220                   | 220                   |
| Наибольшее рабочее напряжение, кВ дейст.                                                                      | 73                    | 73                    | 146                   | 146                   |
| Напряжение на ограничителе, допустимое в течение времени, кВ дейст.                                           |                       |                       |                       |                       |
| 20 мин                                                                                                        | 101                   | 101                   | 201                   | 201                   |
| 20 с                                                                                                          | 109                   | 109                   | 217                   | 217                   |
| 3,5 с                                                                                                         | 114                   | 114                   | 227                   | 227                   |
| 1 с                                                                                                           | 120                   | 120                   | 240                   | 240                   |
| 0,15 с                                                                                                        | 128                   | 128                   | 256                   | 256                   |
| Расчетный ток коммутационных перенапряжений на волне 1,2/2,5 мс, А                                            | 280                   | 280                   | 420                   | 420                   |
| Остающееся напряжение при расчетном токе коммутационных перенапряжений, кВ не более                           | 220                   | 220                   | 435                   | 435                   |
| Остающееся напряжение при импульсном токе с длительностью фронта волны 8 мкс с амплитудой 5000 А, кВ не более | 285                   | 285                   | 525                   | 525                   |
| Пропускная способность                                                                                        |                       |                       |                       |                       |
| 20 импульсов тока 1,2/2,5 мс с амплитудой, А                                                                  | 280                   | 280                   | 420                   | 420                   |
| 20 импульсов тока 8/20 мкс с амплитудой, А                                                                    | 5000                  | 5000                  | 5000                  | 5000                  |
| Длина пути утечки внешней изоляции, мм, не менее                                                              | 2800                  | 3900                  | 5700                  | 7900                  |
| Взрывобезопасность при токах к.з.:                                                                            |                       |                       |                       |                       |
| 0,2 с, кА                                                                                                     | 20-40*                | 20-40*                | 20-40*                | 20-40*                |
| 2 с, кА                                                                                                       | 0,8                   | 0,8                   | 0,8                   | 0,8                   |

Примечание: \* – по требованию заказчика с 2000 года.

Таблица Г1.4

Электрические характеристики ОПН для защиты нейтрали трансформаторов

| Наименование параметра                                                                | Норма           |                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|
|                                                                                       | ОПНН-110 У1     | ОПНН-220 У1     |
|                                                                                       | ОПНН-110<br>ХЛ1 | ОПНН-220<br>ХЛ1 |
| Класс напряжения, кВ                                                                  | 110             | 220             |
| Наибольшее рабочее напряжение, кВ действ.                                             | 56              | 115             |
| Напряжение на ограничителе, допустимое в течение 1 мин, кВ действ.                    | 73              | 150             |
| Расчетный ток коммутационного перенапряжения, А                                       |                 |                 |
| волна 30/60 мкс,                                                                      | -               | -               |
| волна 300/800 мкс                                                                     | 1500            | 1500            |
| Остающееся напряжение при расчетном токе коммутационного перенапряжения, кВ, не более | 155             | 310             |
| Пропускная способность: 20 импульсов тока 2000 мкс с амплитудой, А                    | 400             | 400             |
| Взрывобезопасность при токах к.з.:                                                    |                 |                 |
| 0,2 с, кА                                                                             | 20-40*          | 20-40*          |
| 2 с, кА                                                                               | 0,8             | 0,8             |
| Длина пути утечки внешней изоляции, мм, не менее                                      | 1750            | 3600            |

Примечание: \* – по требованию заказчика с 2000 года.

1.2. Электрические характеристики ОПН 110-750 кВ,  
выпускаемых «АВВ-УЭТМ» в фарфоровых покрышках  
«АВВ-УЭТМ» производит также ОПН 6-35 кВ.

Таблица Г2.1

Модификации ОПН серии Exlim для разных уровней загрязнения атмосферы

| Уровень<br>загрязнения | Длина удельного пути<br>утечки | Условное обозначение |
|------------------------|--------------------------------|----------------------|
| I – легкий             | 1,6 см/кВ                      | L                    |
| II – средний           | 2,0 см/кВ                      | M                    |
| III – тяжелый          | 2,5 см/кВ                      | H                    |
| IV – очень тяжелый     | 3,1 см/кВ                      | V                    |

Таблица Г2.2

Электрические характеристики ОПН 110 кВ

| Характеристика                                                              | Тип ограничителя                  |     |     |     |     |     |     |     |     |     |           |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                                                             | EXLIM ABB с классом энергоемкости |     |     |     |     |     |     |     |     |     |           |     |     |     |     |     |     |     |     |
|                                                                             | R                                 |     |     |     |     | Q   |     |     |     |     | P-A и P-B |     |     |     |     | T   |     |     |     |
| 1                                                                           | 2                                 | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12        | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  |
| Наибольшее рабочее напряжение                                               | 77                                | 86  | 92  | 106 | 92  | 77  | 86  | 92  | 106 | 108 | 77        | 86  | 92  | 92  | 108 | 77  | 92  | 92  | 108 |
| Номинальный разрядный ток 8/20 мкс, кА                                      | 10                                | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10        | 10  | 10  | 10  | 10  | 20  | 20  | 20  | 20  |
| Квазиустановившиеся перенапряжения, допустимые в течение времени, кВ дейст: |                                   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |           |     |     |     |     |     |     |     |     |
| 20 мин                                                                      | 95                                | 107 | 119 | 130 | 137 | 93  | 105 | 116 | 128 | 139 | 93        | 105 | 117 | 140 | 139 | 91  | 114 | 132 | 154 |
| 20 с                                                                        | 104                               | 117 | 130 | 142 | 149 | 104 | 117 | 130 | 142 | 156 | 104       | 117 | 130 | 155 | 156 | 102 | 127 | 146 | 172 |
| 10 с                                                                        | 106                               | 119 | 132 | 145 | 152 | 106 | 119 | 132 | 145 | 158 | 106       | 119 | 130 | 158 | 158 | 103 | 129 | 149 | 174 |
| 3,5 с                                                                       | 108                               | 121 | 134 | 147 | 155 | 108 | 121 | 134 | 148 | 162 | 109       | 122 | 135 | 163 | 163 | 106 | 133 | 154 | 180 |
| 1 с                                                                         | 110                               | 124 | 138 | 152 | 159 | 111 | 125 | 139 | 153 | 167 | 111       | 125 | 139 | 167 | 167 | 109 | 136 | 157 | 184 |
| 0,15                                                                        | 114                               | 128 | 143 | 157 | 162 | 116 | 132 | 145 | 160 | 175 | 116       | 131 | 145 | 174 | 173 | 114 | 143 | 165 | 193 |
| Остающееся напряжение при расчетном токе коммутационного напряжения, кВ:    |                                   |     |     |     |     |     |     |     |     |     |           |     |     |     |     |     |     |     |     |

Продолжение табл. Г2.2

| 1                                                                          | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12           | 13           | 14           | 15           | 16           | 17  | 18  | 19  | 20  |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----|-----|-----|-----|
| при волне 1,2/2,5 мс 280 А                                                 | 192 | 217 | 240 | 264 | 276 | 185 | 207 | 230 | 252 | 276 | 175          | 198          | 223          | 257          | 257          | 174 | 219 | 251 | 295 |
| при волне 2 мс 500 А                                                       | 199 | 224 | 248 | 273 | 286 | 188 | 211 | 234 | 257 | 281 | -            | -            | -            | -            | -            | -   | -   | -   | -   |
| при волне 2 мс 1000 А                                                      | 207 | 232 | 258 | 284 | 298 | 192 | 216 | 239 | 263 | 287 | 187          | 210          | 235          | 280          | 280          | 184 | 230 | 265 | 310 |
| Остающееся напряжение при импульсном токе 8/20 мкс с амплитудой, кВ        |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |              |              |              |              |              |     |     |     |     |
| 3000 А                                                                     | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | 198          | 223          | 248          | 297          | 297          | 194 | 242 | 278 | 327 |
| 5000 А                                                                     | 240 | 270 | 300 | 330 | 345 | 219 | 246 | 273 | 300 | 327 | 209          | 235          | 261          | 314          | 314          | 203 | 253 | 291 | 342 |
| 10000 А                                                                    | 256 | 288 | 320 | 352 | 369 | 231 | 260 | 288 | 317 | 346 | 221          | 249          | 276          | 332          | 332          | 212 | 264 | 304 | 357 |
| Максимальный ток короткого замыкания для сброса давления, кА длительностью |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |              |              |              |              |              |     |     |     |     |
| 0,2 с                                                                      | 40  | 40  | 40  | 40  | 50  | 65  | 65  | 65  | 65  | 65  | A-65<br>B-80 | A-65<br>B-80 | A-65<br>B-80 | A-65<br>B-80 | A-65<br>B-80 | 80  | 80  | 80  | 80  |
| 1 с                                                                        | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6          | 0,6          | 0,6          | 0,6          | 0,6          | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |

Таблица Г2.3

## Электрические характеристики ОПН 220 кВ

| Характеристика                                                                        | Тип ограничителя                  |     |     |     |     |     |     |           |     |     |     |     |     |     |     |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
|                                                                                       | EXLIM ABB с классом энергоемкости |     |     |     |     |     |     |           |     |     |     |     |     |     |     |  |
|                                                                                       | R                                 |     |     | Q   |     |     |     | P-A и P-B |     |     |     | T   |     |     |     |  |
| 1                                                                                     | 2                                 | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9         | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  |  |
| Расчетное<br>(номинальное)<br>напряжение,<br>действ. кВ                               | 198                               | 216 | 228 | 192 | 216 | 240 | 264 | 192       | 228 | 258 | 294 | 264 | 192 | 228 | 264 |  |
| Наибольшее рабочее<br>напряжение<br>ограничителя,<br>действ. кВ                       | 156                               | 156 | 156 | 154 | 174 | 191 | 191 | 154       | 156 | 191 | 191 | 211 | 154 | 182 | 211 |  |
| Номинальный<br>разрядный ток 8/20<br>мкс, кА                                          | 10                                | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10  | 10        | 10  | 10  | 10  | 10  | 20  | 20  | 20  |  |
| Квазиустановившиеся<br>перенапряжения,<br>допустимые в течение<br>времени, кВ действ: |                                   |     |     |     |     |     |     |           |     |     |     |     |     |     |     |  |
| а) 20 мин                                                                             | 196                               | 214 | 226 | 186 | 210 | 233 | 256 | 186       | 221 | 250 | 285 | 256 | 182 | 217 | 251 |  |
| б) 20 с                                                                               | 214                               | 233 | 246 | 207 | 233 | 259 | 285 | 207       | 246 | 279 | 318 | 285 | 204 | 242 | 280 |  |
| в) 10 с                                                                               | 218                               | 238 | 251 | 211 | 238 | 264 | 290 | 211       | 251 | 284 | 323 | 290 | 207 | 246 | 285 |  |
| г) 3,5 с                                                                              | 222                               | 242 | 255 | 216 | 243 | 270 | 297 | 217       | 258 | 292 | 332 | 298 | 213 | 253 | 293 |  |
| д) 1 с                                                                                | 228                               | 248 | 262 | 223 | 251 | 278 | 306 | 223       | 264 | 299 | 341 | 306 | 218 | 259 | 300 |  |
| е) 0,15                                                                               | 236                               | 257 | 271 | 233 | 262 | 292 | 321 | 232       | 276 | 312 | 356 | 319 | 228 | 271 | 314 |  |
| Остающееся<br>напряжение при<br>расчетном токе<br>коммутационного<br>напряжения, кВ   |                                   |     |     |     |     |     |     |           |     |     |     |     |     |     |     |  |
| а) при волне 1,2/2,5 мс<br>420 А                                                      | 400                               | 437 | 460 | 372 | 419 | 466 | 513 | 360       | 425 | 482 | 550 | 493 | 353 | 420 | 486 |  |
| б) при волне 2 мс 500<br>А                                                            | 404                               | 441 | 465 | 374 | 421 | 468 | 515 | -         | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |  |
| в) при волне 2 мс 1000<br>А                                                           | 420                               | 458 | 483 | 382 | 430 | 477 | 525 | 374       | 444 | 502 | 572 | 514 | 368 | 437 | 506 |  |
| Остающееся<br>напряжение<br>при импульсном токе<br>8/20 мкс с<br>амплитудой, кВ       |                                   |     |     |     |     |     |     |           |     |     |     |     |     |     |     |  |

Продолжение табл. Г2.3

| 1                                                                          | 2                                                                                                          | 3   | 4   | 5   | 6   | 7    | 8    | 9            | 10           | 11           | 12           | 13           | 14   | 15   | 16   |
|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------|------|------|
| 3000 А                                                                     | -                                                                                                          | -   | -   | -   | -   | -    | -    | 396          | 470          | 532          | 606          | 544          | 387  | 459  | 532  |
| 5000 А                                                                     | 488                                                                                                        | 532 | 561 | 436 | 491 | 545  | 600  | 418          | 496          | 562          | 640          | 575          | 405  | 481  | 557  |
| 10000 А                                                                    | 521                                                                                                        | 569 | 600 | 461 | 519 | 576  | 634  | 442          | 525          | 594          | 677          | 608          | 423  | 502  | 581  |
| Удельная энергоемкость, кДж/кВ расчетного напряжения                       | 2,5                                                                                                        | 2,5 | 2,5 | 4,5 | 4,5 | 4,5  | 4,5  | 7,0          | 7,0          | 7,0          | 7,0          | 7,0          | 10,0 | 10,0 | 10,0 |
| Полная энергоемкость всего ограничителя, кДж                               | 495                                                                                                        | 540 | 570 | 864 | 972 | 1080 | 1188 | 1344         | 1596         | 1806         | 2058         | 1848         | 1920 | 2280 | 2640 |
| Максимальный ток короткого замыкания для сброса давления, кА длительностью |                                                                                                            |     |     |     |     |      |      |              |              |              |              |              |      |      |      |
| 0,2 с                                                                      | 50                                                                                                         | 50  | 50  | 65  | 65  | 65   | 65   | A-65<br>B-80 | A-65<br>B-80 | A-65<br>B-80 | A-65<br>B-80 | A-65<br>B-80 | 80   | 80   | 80   |
| 2 с                                                                        | Сброс давления происходит за время от 0,5 с; до 1 с при горении дуги ограничитель термически устойчив      |     |     |     |     |      |      |              |              |              |              |              |      |      |      |
| Испытательные напряжения внешней изоляции:                                 |                                                                                                            |     |     |     |     |      |      |              |              |              |              |              |      |      |      |
| а) коммутационный импульс 250/2500 мкс в сухом состоянии и под дождем, кВ  | Должно быть не менее, чем на 20% выше остающегося напряжения при токе коммутационного перенапряжения 420 А |     |     |     |     |      |      |              |              |              |              |              |      |      |      |
| б) полный грозовой импульс, кВ                                             | Должно быть не менее, чем на 10% выше остающегося напряжения при токе 5000 А                               |     |     |     |     |      |      |              |              |              |              |              |      |      |      |

Таблица Г2.4

## Электрические характеристики ОПН 330 кВ

| Характеристика                                         | Тип ограничителя                  |     |     |           |     |     |     |     |     |     |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------|-----|-----|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                                        | EXLIM ABB с классом энергоемкости |     |     |           |     |     |     |     |     |     |
|                                                        | Q                                 |     |     | P-A и P-B |     |     |     | T   |     |     |
| 1                                                      | 2                                 | 3   | 4   | 5         | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  |
| Расчетное (номинальное) напряжение, кВ действ.         | 264                               | 276 | 288 | 276       | 312 | 336 | 360 | 276 | 288 | 360 |
| Наибольшее рабочее напряжение ограничителя, кВ действ. | 211                               | 221 | 230 | 221       | 230 | 230 | 267 | 221 | 230 | 267 |
| Номинальный разрядный ток 8/20 мкс, кА                 | 10                                | 10  | 10  | 10        | 10  | 10  | 10  | 20  | 20  | 20  |

Продолжение табл. Г2.4

| 1                                                                           | 2   | 3   | 4   | 5            | 6            | 7            | 8            | 9   | 10  | 11  |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|--------------|--------------|--------------|--------------|-----|-----|-----|
| Квазиустановившиеся перенапряжения, допустимые в течение времени, кВ дейст: |     |     |     |              |              |              |              |     |     |     |
| а) 20 мин                                                                   | 256 | 268 | 279 | 268          | 303          | 326          | 349          | 262 | 274 | 342 |
| б) 20 с                                                                     | 285 | 298 | 311 | 298          | 337          | 363          | 389          | 292 | 305 | 382 |
| в) 10 с                                                                     | 290 | 304 | 317 | 304          | 343          | 370          | 396          | 398 | 311 | 388 |
| г) 3,5 с                                                                    | 297 | 311 | 324 | 312          | 353          | 380          | 407          | 306 | 320 | 400 |
| д) 1 с                                                                      | 306 | 320 | 334 | 320          | 362          | 390          | 418          | 314 | 328 | 410 |
| е) 0,15                                                                     | 321 | 335 | 350 | 334          | 378          | 407          | 436          | 328 | 343 | 428 |
| Остающееся напряжение при расчетном токе коммутационного напряжения, кВ     |     |     |     |              |              |              |              |     |     |     |
| а) при волне 1,2/2,5 мс 630 А                                               | 519 | 542 | 566 | 525          | 592          | 640          |              | 518 | 541 | 675 |
| б) при волне 2 мс 500 А                                                     | 515 | 538 | 562 | -            | -            | -            | -            | -   | -   | -   |
| в) при волне 2 мс 1000 А                                                    | 525 | 549 | 573 | 537          | 607          | 654          | 701          | 529 | 552 | 689 |
| Остающееся напряжение при импульсном токе 8/20 мкс с амплитудой, кВ         |     |     |     |              |              |              |              |     |     |     |
| 3000 А                                                                      | -   | -   | -   | 569          | 643          | 693          | 742          | 556 | 580 | 725 |
| 5000 Л                                                                      | 600 | 627 | 654 | 601          | 679          | 731          | 783          | 582 | 607 | 759 |
| 10000 А                                                                     | 637 | 663 | 692 | 635          | 718          | 773          | 828          | 608 | 634 | 792 |
| Максимальный ток короткого замыкания для сброса давления, кА длительно      |     |     |     |              |              |              |              |     |     |     |
| 0,2 с                                                                       | 65  | 65  | 65  | А-65<br>В-80 | А-65<br>В-80 | А-65<br>В-80 | А-65<br>В-80 | 80  | 80  | 80  |
| 1 с, А                                                                      | 600 | 600 | 600 | 600          | 600          | 600          | 600          | 600 | 600 | 600 |

Таблица Г2.5

## Электрические характеристики ОПН 500 кВ и 750 кВ

| Характеристика                                                              | Тип ОПН                                                                                               |              |      |      |                   |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|------|------|-------------------|
|                                                                             | Exlim ABB                                                                                             |              |      |      |                   |
|                                                                             | Р                                                                                                     |              | Т    |      |                   |
|                                                                             | 500 кВ                                                                                                |              |      |      | 750 кВ            |
| Расчетное (номинальное) напряжение, кВ действ.                              | 396                                                                                                   | 468          | 396  | 444  | 588               |
| Наибольшее рабочее напряжение ограничителя, кВ действ.                      | 318                                                                                                   | 350          | 318  | 350  | 462               |
| Номинальный разрядный ток 8/20 мкс, кА                                      | 10                                                                                                    | 10           | 20   | 20   | 20                |
| Квазиустановившиеся перенапряжения, допустимые в течение времени, кВ дейст: |                                                                                                       |              |      |      |                   |
| а) 20 мин                                                                   | 384                                                                                                   | 454          | 376  | 422  | 559               |
| б) 20 с                                                                     | 428                                                                                                   | 505          | 420  | 471  | 623               |
| в) 10 с                                                                     | 436                                                                                                   | 515          | 427  | 479  | 635               |
| г) 3,5 с                                                                    | 447                                                                                                   | 529          | 440  | 493  | 653               |
| д) 1 с                                                                      | 459                                                                                                   | 543          | 451  | 506  | 670               |
| е) 0,15                                                                     | 479                                                                                                   | 566          | 471  | 528  | 700               |
| Остающееся напряжение при расчетном токе коммутационного напряжения, кВ     |                                                                                                       |              |      |      |                   |
| а) при волне 1,2/2,5 мс 1200/1800 А                                         | 778                                                                                                   | 918          | 764  | 857  | 1156              |
| б) при волне 2 мс 500 А                                                     | -                                                                                                     | -            | -    | -    | -                 |
| в) при волне 2 мс 1000 А                                                    | 771                                                                                                   | 911          | 758  | 850  | 1125              |
| Остающееся напряжение при импульсном токе 8/20 мкс с амплитудой, кВ         |                                                                                                       |              |      |      |                   |
| 3000 А                                                                      | 816                                                                                                   | 964          | 798  | 894  | 1183              |
| 5000 А                                                                      | 862                                                                                                   | 1018         | 835  | 936  | 1239              |
| 10000 А                                                                     | 911                                                                                                   | 1077         | 872  | 977  | 1293              |
| Удельная энергоемкость, кДж/кВ расчетного напряжения                        | 7,0                                                                                                   | 7,0          | 10,0 | 10,0 | 10,0              |
| Полная энергоемкость всего ограничителя, кДж                                | 2772                                                                                                  | 3276         | 3960 | 4440 | 5880              |
| Максимальный ток короткого замыкания для сброса давления, кА длительностью  |                                                                                                       |              |      |      |                   |
| 0,2 с                                                                       | A-65<br>B-80                                                                                          | A-65<br>B-80 | 80   | 80   | 80                |
| 2 с                                                                         | Сброс давления происходит за время до 0,5 с; до 1 с при горении дуги ограничитель термически устойчив |              |      |      | То же, что 500 кВ |
| Испытательные напряжения внешней изоляции:                                  |                                                                                                       |              |      |      |                   |
| а) коммутационный импульс 250/2500 мкс в сухом состоянии и под дождем, кВ   | *                                                                                                     |              |      |      | **                |
| б) полный грозовой импульс, кВ                                              | ***                                                                                                   |              |      |      |                   |

Примечания:

\* Должно быть не менее, чем на 20% выше остающегося напряжения при токе коммутационного перенапряжения 1200 А.

\*\* Должно быть не менее, чем на 20% выше остающегося напряжения при токе коммутационного перенапряжения 1800 А.

\*\*\* Должно быть не менее, чем на 10% выше остающегося напряжения при токе 5000 А.

*1.3. Электрические характеристики ОПН, выпускаемых фирмой «ФЕНИКС-88» в полимерных покрытиях*

ОПН для сетей классов напряжения до 35 кВ

Таблица ГЗ.1

| Параметры                                                                                                                   | ОПН-3/3,8-10/250 (I) | ОПН-6/7,2-10/250 (I) | ОПН-6/7,5-10/250 (I) | ОПН-6/8,2-10/250 (I) | ОПН-6/5,5-10/650 (II) | ОПН-6/6,5-10/650 (II) | ОПН-6/7,2-10/650 (II) | ОПН-10/12-10/250 (I) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| 1                                                                                                                           | 2                    | 3                    | 4                    | 5                    | 6                     | 7                     | 8                     | 9                    |
| Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение, кВ, действ.                                                             | 3,8                  | 7,2                  | 7,5                  | 8,2                  | 5,5                   | 6,5                   | 7,2                   | 12,0                 |
| Номинальное напряжение, кВ, действ.                                                                                         | 5,5                  | 10,0                 | 10,5                 | 11,0                 | 7,5                   | 8,0                   | 10,0                  | 17,0                 |
| Классификационное напряжение, кВ, действ., не менее                                                                         | 5,6                  | 10,0                 | 10,5                 | 10,5                 | 7,0                   | 8,3                   | 9,3                   | 15,3                 |
| Остающееся на ОПН напряжение, кВ, ампл., не более, при коммутационном импульсе тока 30/60 мкс                               |                      |                      |                      |                      |                       |                       |                       |                      |
| 250 А                                                                                                                       | 10,9                 | 19,4                 | 20,9                 | 19,8                 | 13,4                  | 15,8                  | 17,8                  | 32,7                 |
| 500 А                                                                                                                       | 11,4                 | 20,2                 | 21,8                 | 20,5                 | 13,8                  | 16,4                  | 18,4                  | 34,1                 |
| 1000 А                                                                                                                      | 11,9                 | 21,2                 | 22,9                 | 21,5                 | 14,5                  | 17,2                  | 19,3                  | 35,8                 |
| Остающееся на ОПН напряжение, кВ, ампл., не более, при грозовом импульсе тока 8/20 мкс                                      |                      |                      |                      |                      |                       |                       |                       |                      |
| 500 А                                                                                                                       | 11,5                 | 20,6                 | 22,1                 | 20,7                 | 13,8                  | 16,4                  | 18,4                  | 34,6                 |
| 5000 А                                                                                                                      | 14,2                 | 25,3                 | 27,2                 | 25,6                 | 17,0                  | 20,0                  | 22,5                  | 42,6                 |
| 10000 А                                                                                                                     | 15,9                 | 28,3                 | 30,4                 | 28,3                 | 18,4                  | 21,7                  | 24,4                  | 47,6                 |
| 20000 А                                                                                                                     | 18,6                 | 32,8                 | 35,2                 | 33,1                 | 20,7                  | 24,4                  | 27,4                  | 55,2                 |
| Остающееся на ОПН напряжение, кВ, ампл. при крутом импульсе тока 1/10 мкс с амплитудой, равной номинальному разрядному току | 17,6                 | 31,4                 | 33,7                 | 31,4                 | 20,4                  | 24,1                  | 27,1                  | 52,8                 |

Продолжение табл. ГЗ.1

| 1                                                                                                                                                      | 2   | 3    | 4    | 5    | 6   | 7   | 8    | 9    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|------|------|------|-----|-----|------|------|
| Амплитуда выдерживаемого не менее 2 раз импульса большого тока 4/10 мкс, кА., не менее                                                                 | 65  | 65   | 65   | 65   | 100 | 100 | 100  | 65   |
| Амплитуда выдерживаемого не менее 18 раз импульса пропускной способности, А, не менее                                                                  | 250 | 250  | 250  | 250  | 650 | 650 | 650  | 250  |
| Удельная энергия одиночного импульса пропускной способности, кДж/кВ <sub>УНР</sub> , не менее                                                          | 1,4 | 1,4  | 1,4  | 1,4  | 3,7 | 3,7 | 3,7  | 1,4  |
| Удельная энергоемкость – энергия, вводимая перед проверкой термической устойчивости, кДж/кВ <sub>УНР</sub> , не менее                                  | 2,5 | 2,5  | 2,5  | 2,5  | 7,4 | 7,4 | 7,4  | 2,5  |
| Характеристика «НАПРЯЖЕНИЕ – ВРЕМЯ»: напряжение, кВ, допустимое на ОПН после разогрева до 60°C и введения энергии, равной энергоемкости ОПН, в течение |     |      |      |      |     |     |      |      |
| 0,1 с                                                                                                                                                  | 5,8 | 11,0 | 11,7 | 12,4 | 8,3 | 9,9 | 11,0 | 18,6 |
| 1,0 с                                                                                                                                                  | 5,5 | 10,5 | 11,1 | 11,8 | 7,9 | 9,5 | 10,5 | 17,7 |
| 10 с                                                                                                                                                   | 5,3 | 10,0 | 10,6 | 11,2 | 7,5 | 8,9 | 10,0 | 16,8 |
| 1 мин.                                                                                                                                                 | 5,1 | 9,6  | 10,1 | 10,8 | 7,3 | 8,6 | 9,6  | 16,2 |
| 20 мин.                                                                                                                                                | 4,8 | 9,0  | 9,4  | 10,1 | 6,8 | 8,0 | 9,0  | 15,1 |
| 2 часа                                                                                                                                                 | 4,6 | 8,6  | 9,1  | 9,7  | 6,5 | 7,7 | 8,6  | 14,5 |
| 24 часа                                                                                                                                                | 4,3 | 8,1  | 8,6  | 9,1  | 6,1 | 7,3 | 8,1  | 13,7 |

Таблица Г3.2

| Параметры                                                                                                                   | ОПН-<br>10/12,<br>7-<br>10/250<br>(I) | ОПН-<br>10/13,7-<br>10/250(<br>I) | ОПН-<br>10/11-<br>10/650(<br>II) | ОПН-<br>10/12-<br>10/650(<br>II) | ОПН-<br>35/40,5-<br>10/650(<br>II) | ОПН-<br>35/38-<br>10/900<br>(III) | ОПН-<br>35/41-<br>10/900(<br>III) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 1                                                                                                                           | 2                                     | 3                                 | 4                                | 5                                | 6                                  | 7                                 | 8                                 |
| Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение, кВ, действ.                                                             | 12,7                                  | 13,7                              | 11,0                             | 12,0                             | 40,5                               | 38,0                              | 41,0                              |
| Номинальное напряжение, кВ, действ.                                                                                         | 18,0                                  | 18,0                              | 15,0                             | 16,0                             | 54,0                               | 52,0                              | 56,0                              |
| Классификационное напряжение, кВ, действ., не менее                                                                         | 18,4                                  | 17,5                              | 14,0                             | 15,3                             | 52,0                               | 48,5                              | 52,5                              |
| Остающееся на ОПН напряжение, кВ, ампл., не более, при коммутационном импульсе тока 30/60 мкс                               |                                       |                                   |                                  |                                  |                                    |                                   |                                   |
| 250 А                                                                                                                       | 35,4                                  | 33,1                              | 26,7                             | 29,2                             | 100                                | 91,7                              | 98,9                              |
| 500 А                                                                                                                       | 36,9                                  | 34,2                              | 27,7                             | 30,2                             | 103                                | 92,5                              | 100                               |
| 1000 А                                                                                                                      | 38,9                                  | 35,9                              | 29,0                             | 31,7                             | 108                                | 96,0                              | 104                               |
| Остающееся на ОПН напряжение, кВ, ампл., не более, при грозовом импульсе тока 8/20 мкс                                      |                                       |                                   |                                  |                                  |                                    |                                   |                                   |
| 500 А                                                                                                                       | 37,4                                  | 34,5                              | 27,7                             | 30,2                             | 102                                | 94,5                              | 102                               |
| 5000 А                                                                                                                      | 46,0                                  | 42,8                              | 33,9                             | 37,0                             | 126                                | 109                               | 118                               |
| 10000 А                                                                                                                     | 51,5                                  | 47,3                              | 36,8                             | 40,1                             | 136                                | 118                               | 127                               |
| 20000 А                                                                                                                     | 59,7                                  | 55,2                              | 41,3                             | 45,1                             | 153                                | 130                               | 140                               |
| Остающееся на ОПН напряжение, кВ, ампл. при крутом импульсе тока 1/10 мкс с амплитудой, равной номинальному разрядному току | 57,1                                  | 52,5                              | 40,8                             | 44,5                             | 151                                | 130                               | 140                               |

Продолжение табл. Г3.2

| 1                                                                                                                                                      | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Амплитуда выдерживаемого не менее 2 раз импульса большого тока 4/10 мкс, кА, не менее.                                                                 | 65   | 65   | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| Амплитуда выдерживаемого не менее 18 раз импульса пропускной способности, А, не менее                                                                  | 250  | 250  | 650  | 650  | 650  | 900  | 900  |
| Удельная энергия одиночного импульса пропускной способности, кДж/кВ <sub>УНР</sub> , не менее                                                          | 1,4  | 1,4  | 3,7  | 3,7  | 3,7  | 5,4  | 5,4  |
| Удельная энергоемкость – энергия, вводимая перед проверкой термической устойчивости, кДж/кВ <sub>УНР</sub> , не менее                                  | 2,5  | 2,5  | 7,4  | 7,4  | 7,4  | 10,8 | 10,8 |
| Характеристика «НАПРЯЖЕНИЕ – ВРЕМЯ»: напряжение, кВ, допустимое на ОПН после разогрева до 60°C и введения энергии, равной энергоемкости ОПН, в течение |      |      |      |      |      |      |      |
| 0,1 с                                                                                                                                                  | 19,7 | 20,7 | 16,7 | 18,2 | 61,9 | 58,0 | 62,6 |
| 1,0 с                                                                                                                                                  | 18,7 | 19,7 | 15,9 | 17,3 | 58,7 | 55,4 | 59,5 |
| 10 с                                                                                                                                                   | 17,8 | 18,8 | 15,1 | 16,5 | 55,7 | 52,3 | 56,5 |
| 1 мин.                                                                                                                                                 | 17,1 | 18,1 | 14,5 | 15,8 | 53,6 | 50,3 | 54,2 |
| 20 мин.                                                                                                                                                | 16,0 | 16,9 | 13,6 | 14,8 | 49,8 | 47,0 | 51,0 |
| 2 часа                                                                                                                                                 | 15,3 | 16,1 | 13,0 | 14,2 | 48,1 | 45,2 | 48,7 |
| 24 часа                                                                                                                                                | 14,5 | 15,3 | 12,3 | 13,4 | 45,4 | 42,6 | 46,0 |

Таблица ГЗ.3

## Электрические характеристики ОПН 110-220 кВ

| Параметры                                                                                          |                  | ОПН-110/73 | ОПН-110/80 | ОПН-110/88 | ОПН-220/146 | ОПН-220/157 | ОПН-220/176 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 1                                                                                                  |                  | 2          | 3          | 4          | 5           | 6           | 7           |
| Длительное рабочее напряжение ОПН, кВ                                                              |                  | 73         | 80         | 88         | 146         | 157         | 176         |
| Класс напряжения сети, кВ                                                                          |                  | 110        |            |            | 220         |             |             |
| Напряжение, допустимое на ОПН в течение, кВ                                                        | 0,1 с            | 110        | 120        | 132        | 219         | 236         | 264         |
|                                                                                                    | 1,0 с            | 105        | 115        | 127        | 210         | 226         | 253         |
|                                                                                                    | 10 с             | 100        | 110        | 121        | 200         | 215         | 241         |
|                                                                                                    | 20 мин           | 90         | 98         | 108        | 180         | 193         | 216         |
|                                                                                                    | 2 ч              | 86         | 94         | 104        | 172         | 185         | 208         |
|                                                                                                    | 10 ч             | 82         | 90         | 99         | 165         | 177         | 199         |
|                                                                                                    | 24 ч             | 80         | 88         | 97         | 161         | 173         | 194         |
| Остающиеся напряжения, кВ, при импульсе тока с фронтом 30 мкс длительностью 60 мкс и с амплитудой: | 250 А, не более  | 176        | 193        | 212        | 359         | 386         | 433         |
|                                                                                                    | не менее         | 169        | 186        | 204        | 346         | 372         | 417         |
|                                                                                                    | 500 А, не более  | 180        | 197        | 216        | 365         | 393         | 440         |
|                                                                                                    | не менее         | 172        | 189        | 208        | 352         | 378         | 424         |
|                                                                                                    | 1000 А, не более | 185        | 203        | 224        | 378         | 407         | 456         |
|                                                                                                    | не менее         | 178        | 195        | 215        | 364         | 391         | 438         |
|                                                                                                    | 2000 А, не более | 195        | 214        | 235        | 397         | 427         | 479         |
|                                                                                                    | не менее         | 187        | 205        | 225        | 381         | 410         | 459         |
| Остающиеся напряжения, кВ, при импульсе тока с фронтом 8 мкс, длительностью 20 мкс и с амплитудой: |                  |            |            | 217        | 366         | 394         | 442         |
|                                                                                                    |                  |            |            | 209        | 353         | 380         | 426         |
|                                                                                                    | 3000 А, не более | 201        | 220        | 242        | 409         | 440         | 493         |
|                                                                                                    | не менее         | 193        | 212        | 233        | 394         | 424         | 475         |
|                                                                                                    | 5000 А, не более | 210        | 230        | 253        | 428         | 460         | 516         |
|                                                                                                    | не менее         | 202        | 222        | 244        | 412         | 443         | 496         |

Продолжение табл. Г3.3

| 1                                                                                                                                | 2                                | 3          | 4          | 5          | 6          | 7          | 8          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                                                                                                                                  | 10000 А,<br>не более<br>не менее | 226<br>218 | 248<br>238 | 273<br>262 | 461<br>444 | 496<br>477 | 556<br>535 |
|                                                                                                                                  | 20000 А,<br>не более<br>не менее | 247<br>237 | 270<br>260 | 297<br>286 | 502<br>483 | 540<br>520 | 605<br>583 |
| Остающиеся<br>напряжения, кВ,<br>при импульсе<br>тока с фронтом<br>1 мкс,<br>длительностью 4<br>мкс и с<br>амплитудой<br>10000 А | не более                         | 246        | 270        | 297        | 501        | 539        | 604        |
|                                                                                                                                  | не менее                         | 237        | 259        | 285        | 482        | 518        | 581        |
| Амплитуда выдерживаемого<br>не менее 20 раз импульса<br>большой длительности<br>(прямоугольный импульс<br>2000 мкс), А           | 600                              |            |            |            |            |            |            |
| Длина пути утечки изоляции,<br>см, не менее                                                                                      | 230                              |            |            | 460        |            |            |            |

Таблица Г3.4

**Электрические характеристики ОПН для защиты разземленных нейтралей  
трансформаторов 110-220 кВ**

| Параметры                                                                                             |                 | ОПНН-110 | ОПНН-220 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|----------|----------|
| 1                                                                                                     |                 | 2        | 3        |
| Длительное рабочее напряжение ОПН, кВ                                                                 |                 | 56       | 120      |
| Класс напряжения сети, кВ                                                                             |                 | 110      | 220      |
| Напряжение, кВ, допустимое на ОПН в течение                                                           | 0,1 с           | 84,0     | 180      |
|                                                                                                       | 1,0 с           | 80,6     | 173      |
|                                                                                                       | 10 с            | 76,7     | 164      |
|                                                                                                       | 60 с            | 73,9     | 158      |
|                                                                                                       | 20 мин          | 68,9     | 148      |
|                                                                                                       | 2 ч             | 66,1     | 142      |
|                                                                                                       | 24 ч            | 61,6     | 132      |
| Остающиеся напряжения, кВ, при импульсе тока с фронтом 30 мкс, с длительностью 60 мкс и с амплитудой: | 250 А, не более | 135      | 295      |
|                                                                                                       | не менее        | 130      | 286      |

Продолжение табл. Г3.4

| 1                                                                                                          | 2                 | 3   | 4   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----|-----|
|                                                                                                            | 500 А, не более   | 138 | 300 |
|                                                                                                            | не менее          | 132 | 290 |
|                                                                                                            | 1000 А, не более  | 142 | 311 |
|                                                                                                            | не менее          | 137 | 301 |
|                                                                                                            | 2000 А, не более  | 150 | 326 |
|                                                                                                            | не менее          | 143 | 316 |
| Остающиеся напряжения, кВ, при импульсе тока с фронтом 8 мкс, с длительностью 20 мкс и с амплитудой:       | 500 А, не более   | 138 | 302 |
|                                                                                                            | не менее          | 133 | 293 |
|                                                                                                            | 3000 А, не более  | 154 | 336 |
|                                                                                                            | не менее          | 148 | 325 |
|                                                                                                            | 5000 А, не более  | 161 | 352 |
|                                                                                                            | не менее          | 155 | 341 |
|                                                                                                            | 10000 А, не более | 174 | 379 |
|                                                                                                            | не менее          | 167 | 368 |
|                                                                                                            | 20000 А, не более | 189 | 413 |
|                                                                                                            | не менее          | 182 | 402 |
| Остающиеся напряжения, кВ, при импульсе тока с фронтом 1 мкс, с длительностью 4 мкс и с амплитудой 10000 А | не более          | 189 | 412 |
|                                                                                                            | не менее          | 181 | 400 |
| Амплитуда выдерживаемого не менее 20 раз импульса большой длительности (прямоугольный импульс 2 мс), А     |                   | 600 |     |
| Длина пути утечки изоляции, см, не менее                                                                   |                   | 150 | 300 |

Таблица Г3.5

## ОПН для сетей классов напряжения 330 кВ

| Параметры                                                       | ОПН-330/210<br>-<br>10/900(III) | ОПН-330/220<br>-<br>10/900(II) | ОПН-330/230<br>-<br>10/900(II) | ОПН-330/210-0-20/1600(IV) | ОПН-330/220-0-20/1600(IV) | ОПН-330/230-0-20/1600(IV) | ОПН-330/210-0-20/2500(V) | ОПН-330/220-0-20/2500(V) | ОПН-330/230-0-20/2500(V) |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 1                                                               | 2                               | 3                              | 4                              | 5                         | 6                         | 7                         | 8                        | 9                        | 10                       |
| Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение, кВ, действ. | 210                             | 220                            | 230                            | 210                       | 220                       | 230                       | 210                      | 220                      | 230                      |
| Номинальное напряжение, кВ, действ.                             | 282                             | 294                            | 306                            | 282                       | 294                       | 306                       | 282                      | 294                      | 306                      |
| Классификационное напряжение, кВ, действ.                       | 279                             | 293                            | 306                            | 278                       | 292                       | 305                       | 269                      | 282                      | 295                      |

Продолжение табл. Г3.5

| 1                                                                                                                                                      | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Остающееся на ОПН напряжение, кВ, ампл. при коммутационном импульсе тока 30/60 мкс с амплитудой                                                        |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 250 А                                                                                                                                                  | 527  | 552  | 577  | 510  | 535  | 559  | 486  | 510  | 533  |
| 500 А                                                                                                                                                  | 538  | 564  | 589  | 525  | 550  | 576  | 501  | 525  | 549  |
| 1000 А                                                                                                                                                 | 551  | 578  | 604  | 542  | 568  | 594  | 517  | 542  | 567  |
| 2000 А                                                                                                                                                 | 575  | 604  | 630  | 564  | 591  | 618  | 537  | 563  | 589  |
| Остающееся на ОПН напряжение, кВ, ампл. при грозовом импульсе тока 8/20 мкс с амплитудой                                                               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 500 А                                                                                                                                                  | 543  | 569  | 595  | 533  | 559  | 584  | 508  | 533  | 557  |
| 5000 А                                                                                                                                                 | 628  | 658  | 688  | 607  | 636  | 666  | 568  | 595  | 622  |
| 10000 А                                                                                                                                                | 676  | 709  | 741  | 642  | 673  | 704  | 596  | 625  | 654  |
| 20000 А                                                                                                                                                | 744  | 780  | 815  | 691  | 724  | 758  | 633  | 663  | 694  |
| 40000 А                                                                                                                                                | -    | -    | -    | 759  | 795  | 832  | 681  | 714  | 746  |
| Остающееся на ОПН напряжение, кВ, ампл. при крутом импульсе тока 1/10 мкс с амплитудой, равной номинальному разрядному току                            | 735  | 771  | 806  | 753  | 789  | 826  | 668  | 700  | 732  |
| Амплитуда выдерживаемого не менее 2 раз импульса большого тока 4/10 мкс, кА.                                                                           | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| Амплитуда выдерживаемого не менее 18 раз импульса пропускной способности, А                                                                            | 900  | 900  | 900  | 1600 | 1600 | 1600 | 2500 | 2500 | 2500 |
| Удельная энергия одиночного импульса пропускной способности, кДж/кВ <sub>УНР</sub>                                                                     | 5,4  | 5,4  | 5,4  | 8,8  | 8,8  | 8,8  | 14,7 | 14,7 | 14,7 |
| Удельная энергоемкость – энергия, вводимая перед проверкой термической устойчивости, кДж/кВ <sub>УНР</sub>                                             | 10,8 | 10,8 | 10,8 | 17,6 | 17,6 | 17,6 | 29,4 | 29,4 | 29,4 |
| Характеристика «НАПРЯЖЕНИЕ – ВРЕМЯ»: напряжение, кВ, допустимое на ОПН после разогрева до 60°C и введения энергии, равной энергоемкости ОПН, в течение |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| 0,1 с                                                                                                                                                  | 313  | 328  | 343  | 313  | 328  | 343  | 313  | 328  | 343  |

| 1       | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1,0 с   | 298 | 313 | 327 | 298 | 313 | 327 | 298 | 313 | 327 |
| 10 с    | 284 | 298 | 311 | 284 | 298 | 311 | 284 | 298 | 311 |
| 1 мин.  | 273 | 286 | 300 | 273 | 286 | 300 | 273 | 286 | 300 |
| 20 мин. | 255 | 268 | 280 | 255 | 268 | 280 | 255 | 268 | 280 |
| 2 часа  | 245 | 257 | 268 | 245 | 257 | 268 | 245 | 257 | 268 |

Таблица Г3.6

## Электрические характеристики ОПН 500 кВ

| Параметры                                                                                                                   | ОПН-500/303-20/1600 (IV) | ОПН-500/318-20/1600 (IV) | ОПН-500/333-20/1600 (IV) | ОПН-500/303-20/2500 (V) | ОПН-500/318-20/2500 (V) | ОПН-500/333-20/2500(V) |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| 1                                                                                                                           | 2                        | 3                        | 4                        | 5                       | 6                       | 7                      |
| Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение, кВ, действ.                                                             | 303                      | 318                      | 333                      | 303                     | 318                     | 333                    |
| Номинальное напряжение, кВ, действ.                                                                                         | 402                      | 420                      | 438                      | 402                     | 420                     | 438                    |
| Классификационное напряжение, кВ, действ.                                                                                   | 390                      | 410                      | 425                      | 393                     | 413                     | 427                    |
| Остающееся на ОПН напряжение, кВ, ампл. при коммутационном импульсе тока 30/60 мкс с амплитудой                             |                          |                          |                          |                         |                         |                        |
| 250 А                                                                                                                       | 716                      | 752                      | 778                      | 709                     | 745                     | 771                    |
| 500 А                                                                                                                       | 736                      | 774                      | 801                      | 731                     | 767                     | 794                    |
| 1000 А                                                                                                                      | 761                      | 799                      | 827                      | 754                     | 792                     | 820                    |
| 2000 А                                                                                                                      | 791                      | 831                      | 860                      | 784                     | 822                     | 851                    |
| Остающееся на ОПН напряжение, кВ, ампл. при грозовом импульсе тока 8/20 мкс с амплитудой                                    |                          |                          |                          |                         |                         |                        |
| 500 А                                                                                                                       | 747                      | 785                      | 813                      | 741                     | 779                     | 806                    |
| 5000 А                                                                                                                      | 852                      | 894                      | 926                      | 828                     | 869                     | 900                    |
| 10000 А                                                                                                                     | 902                      | 946                      | 980                      | 870                     | 914                     | 946                    |
| 20000 А                                                                                                                     | 970                      | 1018                     | 1054                     | 923                     | 969                     | 1003                   |
| 40000 А                                                                                                                     | 1064                     | 1118                     | 1157                     | 993                     | 1043                    | 1079                   |
| Остающееся на ОПН напряжение, кВ, ампл. при крутом импульсе тока 1/10 мкс с амплитудой, равной номинальному разрядному току | 1010                     | 1060                     | 1097                     | 974                     | 1023                    | 1059                   |

Продолжение табл. ГЗ.6

| 1                                                                                                                                                         | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Амплитуда<br>выдерживаемого<br>не менее 2 раз<br>импульса<br>большого тока 4/10<br>мкс, кА.                                                               | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| Амплитуда<br>выдерживаемого<br>не менее 18 раз<br>импульса<br>пропускной<br>способности, А                                                                | 1600 | 1600 | 1600 | 2500 | 2500 | 2500 |
| Удельная энергия,<br>которую способен<br>поглотить<br>ограничитель при<br>однократном<br>воздействии,<br>кДж/кВ <sub>УНР</sub>                            | 8,8  | 8,8  | 8,8  | 14,7 | 14,7 | 14,7 |
| Удельная<br>энергоёмкость –<br>энергия, вводимая<br>при рабочих<br>испытаниях перед<br>проверкой<br>термической<br>устойчивости,<br>кДж/кВ <sub>УНР</sub> | 17,6 | 17,6 | 17,6 | 29,4 | 29,4 | 29,4 |
| Характеристика «НАПРЯЖЕНИЕ – ВРЕМЯ»: напряжение, кВ, допустимое на ОПН<br>после разогрева до 60°C и введения энергии, равной энергоёмкости ОПН, в течение |      |      |      |      |      |      |
| 0,1 с                                                                                                                                                     | 450  | 472  | 489  | 450  | 472  | 489  |
| 1,0 с                                                                                                                                                     | 430  | 451  | 467  | 430  | 451  | 467  |
| 10 с                                                                                                                                                      | 410  | 430  | 445  | 410  | 430  | 445  |
| 1 мин.                                                                                                                                                    | 394  | 414  | 428  | 394  | 414  | 428  |
| 20 мин.                                                                                                                                                   | 368  | 386  | 400  | 368  | 386  | 400  |
| 2 часа                                                                                                                                                    | 352  | 370  | 383  | 352  | 370  | 383  |

## ОПН для сетей классов напряжения 750 кВ

| Параметры                                                                                                                            | ОПН-<br>750/455-<br>20/1800<br>(V) | ОПН-<br>750/477-<br>20/1800<br>(V) | ОПН-<br>750/490-<br>20/1800<br>(V) | ОПН-<br>750/455-<br>20/2500<br>(V) | ОПН-<br>750/477-<br>20/2500<br>(V) | ОПН-<br>750/490-<br>20/2500<br>(V) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1                                                                                                                                    | 2                                  | 3                                  | 4                                  | 5                                  | 6                                  | 7                                  |
| Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение, кВ, действ.                                                                      | 455                                | 477                                | 490                                | 455                                | 477                                | 490                                |
| Номинальное напряжение, кВ, действ.                                                                                                  | 600                                | 624                                | 648                                | 570                                | 597                                | 612                                |
| Классификационное напряжение, кВ, действ.                                                                                            | 589                                | 617                                | 634                                | 600                                | 628                                | 646                                |
| Остающееся на ОПН напряжение, кВ, ампл. при коммутационном импульсе тока 30/60 мкс с амплитудой                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 500 А                                                                                                                                | 1075                               | 1115                               | 1145                               | 1060                               | 1110                               | 1145                               |
| 1000 А                                                                                                                               | 1090                               | 1143                               | 1177                               | 1075                               | 1125                               | 1160                               |
| 2000 А                                                                                                                               | 1128                               | 1182                               | 1217                               | 1100                               | 1155                               | 1185                               |
| Остающееся на ОПН напряжение, кВ, ампл. при грозовом импульсе тока 8/20 мкс с амплитудой                                             |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 500 А                                                                                                                                | 1130                               | 1185                               | 1220                               | 1105                               | 1160                               | 1190                               |
| 5000 А                                                                                                                               | 1255                               | 1320                               | 1355                               | 1200                               | 1260                               | 1295                               |
| 10000 А                                                                                                                              | 1325                               | 1390                               | 1430                               | 1265                               | 1325                               | 1365                               |
| 20000 А                                                                                                                              | 1425                               | 1495                               | 1535                               | 1345                               | 1415                               | 1455                               |
| 40000 А                                                                                                                              | 1555                               | 1630                               | 1675                               | 1450                               | 1520                               | 1565                               |
| Остающееся на ОПН напряжение, кВ, ампл. при крутом импульсе тока 1/10 мкс с амплитудой, равной номинальному разрядному току (2000 А) | 1525                               | 1600                               | 1645                               | 1440                               | 1510                               | 1555                               |
| Амплитуда выдерживаемого не менее 2 раз импульса большого тока 4/10 мкс, кА.                                                         | 100                                | 100                                | 100                                | 100                                | 100                                | 100                                |

| 1                                                                                                                                                      | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Амплитуда выдерживаемого не менее 18 раз импульса пропускной способности, А                                                                            | 1800 | 1800 | 1800 | 2500 | 2500 | 2500 |
| Удельная энергия одиночного импульса пропускной способности, кДж/кВ <sub>УНР</sub>                                                                     | 10   | 10   | 10   | 14   | 14   | 14   |
| Удельная энергоемкость – энергия, вводимая при рабочих испытаниях перед проверкой термической устойчивости, кДж/кВ <sub>УНР</sub>                      | 20   | 20   | 20   | 28   | 28   | 28   |
| Характеристика «НАПРЯЖЕНИЕ – ВРЕМЯ»: напряжение, кВ, допустимое на ОПН после разогрева до 60°С и введения энергии, равной энергоемкости ОПН, в течение |      |      |      |      |      |      |
| 0,1 с                                                                                                                                                  | 705  | 740  | 760  | 705  | 740  | 760  |
| 1,0 с                                                                                                                                                  | 660  | 691  | 710  | 660  | 691  | 710  |
| 10 с                                                                                                                                                   | 615  | 644  | 660  | 615  | 644  | 660  |
| 1 мин.                                                                                                                                                 | 580  | 607  | 624  | 580  | 607  | 624  |
| 20 мин.                                                                                                                                                | 540  | 563  | 580  | 540  | 563  | 580  |
| 2 часа                                                                                                                                                 | 486  | 510  | 551  | 486  | 510  | 551  |

*1.4. Электрические характеристики ограничителей серии ОПН-У, выпускаемых фирмой «ТАВРИДА-ЭЛЕКТРИК» в полимерных покрышках*

Ограничители перенапряжений нелинейные типа ОПН - У - 35 предназначены для защиты от грозовых и коммутационных перенапряжений электрооборудования распределительных устройств в сетях 35 кВ переменного тока частоты 48 - 62 Гц с изолированной или компенсированной нейтралью. Ограничители перенапряжений нелинейные типа ОПН - У - 110 и ОПН - У - 220 предназначены для защиты от грозовых и коммутационных перенапряжений электрооборудования электрических сетей переменного тока

частоты 58 - 62 Гц с заземленной нейтралью. Ограничители типа ОПН - У - 110/56 и ОПН - У -220/120 предназначены для защиты нейтрали силового трансформатора.

Таблица Г4.1

Параметры ОПН класса напряжения сети 35 кВ

| Наименование параметра, размерность                                                                                              |              | Значение для ограничителя типа ОПН - У - |               |             |               |               |             |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------------------------------------|---------------|-------------|---------------|---------------|-------------|
|                                                                                                                                  |              | 35/38,5-<br>2                            | 35/40,5-<br>2 | 35/42-<br>2 | 35/38,5-<br>3 | 35/40,5-<br>3 | 35/42-<br>3 |
| 1 Класс напряжения сети, кВ                                                                                                      |              | 35                                       |               |             |               |               |             |
| 2 Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение, кВ                                                                         |              | 38,5                                     | 40,5          | 42          | 38,5          | 40,5          | 42          |
| 3 Остающееся напряжение при импульсе тока 1 / 10 с амплитудой 10000 А, кВ max, не более                                          |              | 141                                      | 147           | 153         | 135           | 141           | 146         |
| 4 Остающееся напряжение, кВ max, не более, при импульсе тока 30 / 60 с амплитудой:                                               | 250 А max    | 93,5                                     | 98            | 102         | 91,3          | 95,2          | 99          |
|                                                                                                                                  | 500 А max    | 95                                       | 100           | 104         | 95            | 99            | 103         |
|                                                                                                                                  | 1 000 А max  | 101                                      | 106           | 110         | 101           | 105           | 110         |
| 5 Остающееся напряжение, кВ max, не более, при импульсе тока 8 / 20 с амплитудой:                                                | 500 А max    | 96                                       | 101           | 105         | 93            | 96            | 100         |
|                                                                                                                                  | 5 000 А max  | 113                                      | 119           | 123         | 110           | 115           | 119         |
|                                                                                                                                  | 10 000 А max | 122                                      | 128           | 133         | 117           | 122           | 127         |
|                                                                                                                                  | 20 000 А max | 137                                      | 144           | 149         | 130           | 136           | 141         |
| 6 Классификационное напряжение при амплитуде тока 3 мА, кВ, не менее                                                             |              | 48                                       | 50,9          | 53          | 46,6          | 48,8          | 50,9        |
| 7 Номинальный разрядный ток, кА max                                                                                              |              | 10                                       |               |             |               |               |             |
| 8 Максимальная амплитуда импульса тока 4 / 10, кА                                                                                |              | 100                                      |               |             |               |               |             |
| 9 Амплитуда прямоугольного импульса тока длительностью 2 000 мкс, Аmax                                                           |              | 500                                      |               |             | 850           |               |             |
| 10 Удельная энергия коммутационных перенапряжений, поглощаемая ОПН после воздействия двух прямоугольных импульсов тока, кДж / кВ |              | 4,5                                      |               |             | 8,8           |               |             |

Таблица Г4.2

Параметры ОПН класса напряжения сети 110 кВ, класс разряда линии 2

| Наименование параметра,<br>размерность                                                                                                             | Значение для ограничителя типа ОПН - У - |              |              |              |              |              |              |               |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-----|
|                                                                                                                                                    | 110/5<br>6-2                             | 110/73-<br>2 | 110/77-<br>2 | 110/8<br>0-2 | 110/84-<br>2 | 110/88-<br>2 | 110/96-<br>2 | 110/102-<br>2 |     |
| 1 Класс напряжения сети,<br>кВ                                                                                                                     | 110                                      |              |              |              |              |              |              |               |     |
| 2 Наибольшее длительно<br>допустимое рабочее<br>напряжение, кВ                                                                                     | 56                                       | 73           | 77           | 80           | 84           | 80           | 96           | 102           |     |
| 3 Остающееся напряжение<br>при импульсе тока 1 / 10 с<br>амплитудой 10000 А, кВ<br>тах, не более                                                   | 206                                      | 268          | 283          | 295          | 310          | 325          | 353          | 375           |     |
| 4 Остающееся<br>напряжение,<br>кВ тах, не<br>более, при<br>импульсе тока<br>30 / 60 с<br>амплитудой:                                               | 250 А тах                                | 137          | 179          | 189          | 196          | 206          | 216          | 236           | 250 |
|                                                                                                                                                    | 500 А тах                                | 141          | 183          | 193          | 201          | 211          | 221          | 242           | 256 |
|                                                                                                                                                    | 1 000 А тах                              | 148          | 193          | 203          | 212          | 222          | 233          | 254           | 269 |
| 5 Остающееся<br>напряжение,<br>кВ тах, не<br>более, при<br>импульсе тока<br>8 / 20 с<br>амплитудой:                                                | 500 А тах                                | 142          | 185          | 195          | 203          | 213          | 223          | 244           | 259 |
|                                                                                                                                                    | 5 000 А тах                              | 168          | 218          | 230          | 239          | 251          | 263          | 288           | 306 |
|                                                                                                                                                    | 10 000 А<br>тах                          | 179          | 233          | 246          | 256          | 269          | 282          | 307           | 326 |
|                                                                                                                                                    | 20 000 А<br>тах                          | 200          | 261          | 276          | 287          | 301          | 316          | 344           | 365 |
| 6 Классификационное<br>напряжение при амплитуде<br>тока 3 мА, кВ, не менее                                                                         | 71                                       | 93           | 98           | 101          | 107          | 112          | 122          | 129           |     |
| 7 Номинальный разрядный<br>ток, кА тах                                                                                                             | 10                                       |              |              |              |              |              |              |               |     |
| 8 Максимальная амплитуда<br>импульса тока 4 / 10, кА                                                                                               | 100                                      |              |              |              |              |              |              |               |     |
| 9 Амплитуда<br>прямоугольного импульса<br>тока длительностью 2 000<br>мкс, А тах                                                                   | 500                                      |              |              |              |              |              |              |               |     |
| 10 Удельная энергия<br>коммутационных<br>перенапряжений,<br>поглощаемая ОПН после<br>воздействия двух<br>прямоугольных импульсов<br>тока, кДж / кВ | 4,5                                      |              |              |              |              |              |              |               |     |

Таблица Г4.3

Параметры ОПН класса напряжения сети 110 кВ, класс разряда линии 3

| Наименование параметра,<br>размерность                                                                                           |              | Значение для ограничителя типа ОПН - У - |              |              |              |              |              |              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                                                                                                                                  |              | 110/56-<br>3                             | 110/73-<br>3 | 110/77-<br>3 | 110/80-<br>3 | 110/84-<br>3 | 110/88-<br>3 | 110/96-<br>3 |
| 1 Класс напряжения сети, кВ                                                                                                      |              | 110                                      |              |              |              |              |              |              |
| 2 Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение, кВ                                                                         |              | 56                                       | 73           | 77           | 80           | 84           | 80           | 96           |
| 3 Остающееся напряжение при импульсе тока 1 / 10 с амплитудой 10000 А, кВ max, не более                                          |              | 196                                      | 254          | 269          | 279          | 292          | 307          | 334          |
| 4 Остающееся напряжение, кВ max, не более, при импульсе тока 30 / 60 с амплитудой:                                               | 500 А max    | 133                                      | 173          | 183          | 189          | 198          | 209          | 229          |
|                                                                                                                                  | 1 000 А max  | 138                                      | 181          | 192          | 199          | 208          | 219          | 238          |
|                                                                                                                                  | 2 000 А max  | 146                                      | 190          | 201          | 208          | 219          | 230          | 250          |
| 5 Остающееся напряжение, кВ max, не более, при импульсе тока 8 / 20 с амплитудой:                                                | 500 А max    | 134                                      | 175          | 186          | 191          | 300          | 206          | 229          |
|                                                                                                                                  | 5 000 А max  | 160                                      | 208          | 220          | 227          | 238          | 245          | 273          |
|                                                                                                                                  | 10 000 А max | 170                                      | 221          | 234          | 242          | 254          | 261          | 290          |
|                                                                                                                                  | 20 000 А max | 189                                      | 245          | 260          | 269          | 282          | 297          | 322          |
| 6 Классификационное напряжение при амплитуде тока 3 мА, кВ, не менее                                                             |              | 68                                       | 88           | 93           | 96           | 101          | 106          | 116          |
| 7 Номинальный разрядный ток, кА max                                                                                              |              | 10                                       |              |              |              |              |              |              |
| 8 Максимальная амплитуда импульса тока 4 / 10, кА                                                                                |              | 100                                      |              |              |              |              |              |              |
| 9 Амплитуда прямоугольного импульса тока длительностью 2 000 мкс, Аmax                                                           |              | 850                                      |              |              |              |              |              |              |
| 10 Удельная энергия коммутационных перенапряжений, поглощаемая ОПН после воздействия двух прямоугольных импульсов тока, кДж / кВ |              | 8,8                                      |              |              |              |              |              |              |

Параметры ОПН класса напряжения сети 220 кВ, класс разряда линии 2

| Наименование параметра, размерность                                                                                              |              | Значение для ограничителя типа ОПН - У - |           |           |           |           |           |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                                                                                                                  |              | 220/120-2                                | 220/146-2 | 220/154-2 | 220/160-2 | 220/168-2 | 220/176-2 | 220/180-2 |
| 1 Класс напряжения сети, кВ                                                                                                      |              | 220                                      |           |           |           |           |           |           |
| 2 Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение, кВ                                                                         |              | 120                                      | 146       | 154       | 160       | 168       | 176       | 180       |
| 3 Остающееся напряжение при импульсе тока 1 / 10 с амплитудой 10000 А, кВ тах, не более                                          |              | 441                                      | 536       | 566       | 589       | 619       | 649       | 663       |
| 4 Остающееся напряжение, кВ тах, не более, при импульсе тока 30 / 60 с амплитудой:                                               | 250 А тах    | 294                                      | 357       | 377       | 393       | 412       | 432       | 442       |
|                                                                                                                                  | 500 А тах    | 301                                      | 366       | 386       | 402       | 422       | 442       | 452       |
|                                                                                                                                  | 1000 А тах   | 316                                      | 385       | 406       | 423       | 444       | 466       | 476       |
| 5 Остающееся напряжение, кВ тах, не более, при импульсе тока 8 / 20 с амплитудой:                                                | 500 А тах    | 304                                      | 370       | 390       | 406       | 426       | 446       | 457       |
|                                                                                                                                  | 5000 А тах   | 358                                      | 436       | 460       | 478       | 502       | 526       | 539       |
|                                                                                                                                  | 10000 А тах  | 383                                      | 466       | 492       | 512       | 538       | 564       | 576       |
|                                                                                                                                  | 20 000 А тах | 429                                      | 522       | 551       | 574       | 603       | 632       | 646       |
| 6 Классификационное напряжение при амплитуде тока 3 мА, кВ, не менее                                                             |              | 152                                      | 185       | 195       | 202       | 213,5     | 224       | 229       |
| 7 Номинальный разрядный ток, кА тах                                                                                              |              | 10                                       |           |           |           |           |           |           |
| 8 Максимальная амплитуда импульса тока 4/10, кА                                                                                  |              | 100                                      |           |           |           |           |           |           |
| 9 Амплитуда прямоугольного импульса тока длительностью 2 000 мкс, А тах                                                          |              | 500                                      |           |           |           |           |           |           |
| 10 Удельная энергия коммутационных перенапряжений, поглощаемая ОПН после воздействия двух прямоугольных импульсов тока, кДж / кВ |              | 4,5                                      |           |           |           |           |           |           |

Параметры ОПН класса напряжения сети 220 кВ, класс разряда линии 3

| Наименование параметра, размерность                                                                                              |              | Значение для ограничителя типа ОПН - У - |           |           |           |           |           |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                                                                                                                  |              | 220/120-3                                | 220/146-3 | 220/154-3 | 220/160-3 | 220/168-3 | 220/176-3 | 220/180-3 |
| 1 Класс напряжения сети, кВ                                                                                                      |              | 220                                      |           |           |           |           |           |           |
| 2 Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение, кВ                                                                         |              | 120                                      | 146       | 154       | 160       | 168       | 176       | 180       |
| 3 Остающееся напряжение при импульсе тока 1 / 10 с амплитудой 10000 А, кВ тах, не более                                          |              | 419                                      | 509       | 539       | 557       | 585       | 613       | 628       |
| 4 Остающееся напряжение, кВ тах, не более, при импульсе тока 30 / 60 с амплитудой:                                               | 500 А тах    | 284                                      | 345       | 365       | 378       | 397       | 416       | 426       |
|                                                                                                                                  | 1000 А тах   | 296                                      | 358       | 380       | 392       | 413       | 437       | 442       |
|                                                                                                                                  | 2000 А тах   | 313                                      | 380       | 403       | 417       | 437       | 459       | 470       |
|                                                                                                                                  |              |                                          |           |           |           |           |           |           |
| 5 Остающееся напряжение, кВ тах, не более, при импульсе тока 8 / 20 с амплитудой:                                                | 500 А тах    | 288                                      | 350       | 372       | 382       | 400       | 421       | 432       |
|                                                                                                                                  | 5000 А тах   | 340                                      | 416       | 440       | 454       | 476       | 501       | 513       |
|                                                                                                                                  | 10 000 А тах | 364                                      | 442       | 468       | 484       | 508       | 533       | 546       |
|                                                                                                                                  | 20 000 А тах | 404                                      | 491       | 520       | 538       | 564       | 592       | 606       |
| 6 Классификационное напряжение при амплитуде тока 3 мА, кВ, не менее                                                             |              | 145                                      | 177       | 187       | 193       | 202       | 213       | 217       |
| 7 Номинальный разрядный ток, кА тах                                                                                              |              | 10                                       |           |           |           |           |           |           |
| 8 Максимальная амплитуда импульса тока 4/10, кА                                                                                  |              | 100                                      |           |           |           |           |           |           |
| 9 Амплитуда прямоугольного импульса тока длительностью 2 000 мкс, А тах                                                          |              | 850                                      |           |           |           |           |           |           |
| 10 Удельная энергия коммутационных перенапряжений, поглощаемая ОПН после воздействия двух прямоугольных импульсов тока, кДж / кВ |              | 8,8                                      |           |           |           |           |           |           |

1.5. Подвесные ОПН для защиты изоляции воздушных линий

Таблица Г5.1

ОПН-ЛИр-110/75-10/650(II) 2 УХЛ1 М

| №   | Наименование параметра                                                                                                           |                                                                                                            | Значение |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 1   | 2                                                                                                                                |                                                                                                            | 3        |
| 1.  | Класс напряжения сети, кВ <sub>действ.</sub>                                                                                     |                                                                                                            | 110      |
| 2.  | Номинальное напряжение промышленной частоты, кВ <sub>действ.</sub>                                                               |                                                                                                            | 75       |
| 3.  | Номинальный разрядный ток, А                                                                                                     |                                                                                                            | 10000    |
| 4.  | Остающееся напряжение при коммутационном импульсе тока с длительностью фронта 30 мкс и более, и с амплитудой 500 А, кВ, не более |                                                                                                            | 140      |
| 5.  | Остающиеся напряжения при грозовом импульсе тока 8/20 мкс, кВ, не более; при амплитуде тока                                      | 5000 А                                                                                                     | 165      |
|     |                                                                                                                                  | 10000 А                                                                                                    | 180      |
|     |                                                                                                                                  | 20000 А                                                                                                    | 200      |
| 6.  | Остающееся на ОПН напряжение, кВ, ампл. при крутом импульсе тока 1/10 мкс с амплитудой, равной номинальному разрядному току      |                                                                                                            | 185      |
| 7.  | Амплитуда выдерживаемого не менее 18 раз импульса пропускной способности, А                                                      |                                                                                                            | 650      |
| 8.  | Амплитуда выдерживаемого не менее 2 раз импульса большого тока 4/10 мкс, кА                                                      |                                                                                                            | 100      |
| 9.  | Ток к.з., при котором гарантируется взрывобезопасность ОПН, кА                                                                   |                                                                                                            | 40       |
| 10. | При расстоянии между роговым электродом и проводом 370 мм                                                                        | Среднее разрядное напряжение промышленной частоты в сухом состоянии и под дождем, кВ, не менее             | 200      |
|     |                                                                                                                                  | Пятидесятипроцентное разрядное напряжение грозового импульса положительной полярности, кВ, не более        | 450      |
|     |                                                                                                                                  | Разрядное напряжение грозового импульса положительной полярности при времени до разряда 1 мкс, кВ не более | 950      |

| 1   | 2                                                              | 3     |
|-----|----------------------------------------------------------------|-------|
| 11. | Длина пути утечки внешней изоляции по ГОСТ 15150, не менее, см | 170   |
| 12. | Сопротивление изоляции элемента ОПН при 2,5 кВ, МОм, не менее  | 10000 |
| 13. | Уровень частичных разрядов, пКл, не более                      | 10    |
| 14. | Масса, кг, не более                                            | 12    |

ОПН-ЛИР – подвесные ОПН с искровым промежутком рогового типа для защиты изоляции воздушных линий класса напряжения 110 кВ

Таблица Г5.2

## ОПН-ЛИТ-110/75-10/650(II) 2 УХЛ1

| №  | Наименование параметра                                                                                                           |         | Значение |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------|
| 1  | 2                                                                                                                                |         | 3        |
| 1. | Класс напряжения сети, кВ <sub>действ.</sub>                                                                                     |         | 110      |
| 2. | Номинальное напряжение промышленной частоты, кВ <sub>действ.</sub>                                                               |         | 75       |
| 3. | Номинальный разрядный ток, А                                                                                                     |         | 10000    |
| 4. | Остающееся напряжение при коммутационном импульсе тока с длительностью фронта 30 мкс и более, и с амплитудой 500 А, кВ, не более |         | 140      |
| 5. | Остающиеся напряжения при грозовом импульсе тока 8/20 мкс, кВ, не более; при амплитуде тока                                      | 5000 А  | 165      |
|    |                                                                                                                                  | 10000 А | 180      |
|    |                                                                                                                                  | 20000 А | 200      |
| 6. | Остающееся на ОПН напряжение, кВ, ампл. при крутом импульсе тока 1/10 мкс с амплитудой, равной номинальному разрядному току      |         | 185      |
| 7. | Амплитуда выдерживаемого не менее 18 раз импульса пропускной способности, А                                                      |         | 650      |
| 8. | Амплитуда выдерживаемого не менее 2 раз импульса большого тока 4/10 мкс, кА                                                      |         | 100      |
| 9. | Ток к.з., при котором гарантируется взрывобезопасность ОПН, кА                                                                   |         | 63       |

Продолжение табл. Г5.2

| 1   | 2                                                              | 3                                                                                                          | 4     |
|-----|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 10. | При расстоянии между тороидальными электродами 400 мм          | Среднее разрядное напряжение промышленной частоты в сухом состоянии и под дождем, кВ, не менее             | 200   |
|     |                                                                | Пятидесятипроцентное разрядное напряжение грозового импульса положительной полярности, кВ, не более        | 450   |
|     |                                                                | Разрядное напряжение грозового импульса положительной полярности при времени до разряда 1 мкс, кВ не более | 950   |
| 11. | Длина пути утечки внешней изоляции по ГОСТ 15150, не менее, см |                                                                                                            | 280   |
| 12. | Сопротивление изоляции при 2,5 кВ, МОм, не менее               | элемента ОПН                                                                                               | 10000 |
|     |                                                                | изолятора ЛК 70/110                                                                                        |       |
| 13. | Уровень частичных разрядов, пКл, не более                      |                                                                                                            | 10    |
| 14. | Масса, кг, не более                                            |                                                                                                            | 27,5  |

ОПН-ЛИТ – подвесные ОПН с искровым промежутком тороидального типа для защиты изоляции воздушных линий класса напряжения 110 кВ

Таблица Г5.3

## ОПН-Л-110/88-10/650(II) 2 УХЛ1

| №  | Наименование параметра                                                                                                           |         | Значение |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------|
| 1  | 2                                                                                                                                |         | 3        |
| 1. | Класс напряжения сети, кВ <sub>действ.</sub>                                                                                     |         | 110      |
| 2. | Длительно допустимое напряжение промышленной частоты, кВ <sub>действ.</sub>                                                      |         | 88       |
| 3. | Номинальный разрядный ток, А                                                                                                     |         | 10000    |
| 4. | Остающееся напряжение при коммутационном импульсе тока с длительностью фронта 30 мкс и более, и с амплитудой 500 А, кВ, не более |         | 216      |
| 5. | Остающиеся напряжения при грозовом импульсе тока 8/20 мкс, кВ, не более; при амплитуде тока                                      | 5000 А  | 264      |
|    |                                                                                                                                  | 10000 А | 287      |
|    |                                                                                                                                  | 20000 А | 322      |

| 1   | 2                                                                                                                           | 3     |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 6.  | Остающееся на ОПН напряжение, кВ, ампл. при крутом импульсе тока 1/10 мкс с амплитудой, равной номинальному разрядному току | 318   |
| 7.  | Амплитуда выдерживаемого не менее 18 раз импульса пропускной способности, А                                                 | 650   |
| 8.  | Амплитуда выдерживаемого не менее 2 раз импульса большого тока 4/10 мкс, кА                                                 | 100   |
| 9.  | Ток к.з., при котором гарантируется взрывобезопасность ОПН, кА                                                              | 63    |
| 10. | Длина пути утечки внешней изоляции по ГОСТ 15150, не менее, см                                                              | 250   |
| 11. | Сопротивление изоляции элемента ОПН при 2,5 кВ, МОм, не менее                                                               | 10000 |
| 12. | Уровень частичных разрядов, пКл, не более                                                                                   | 10    |
| 13. | Масса, кг, не более                                                                                                         | 27,5  |

ОПН-Л – подвесные ОПН без искрового промежутка для защиты изоляции воздушных линий класса напряжения 110 кВ

### Деформация грозовых импульсов при распространении по проводам на подходах к РУ

При прорыве молнии через тросовую защиту ВЛ на подходе к РУ или в результате обратного перекрытия линейной изоляции при ударе молнии в опоры на проводе или проводах появляется импульс атмосферного перенапряжения. При распространении по проводам фронт и амплитуда импульса деформируются под действием импульсной короны и потерь в земле. Наиболее тяжелые условия с точки зрения грозозащиты возникают при хорошей проводимости земли, когда докоронный порог, определяемый напряжением начала импульсной короны  $U_k$ , сохраняет практически исходную крутизну фронта (рис. Д1).

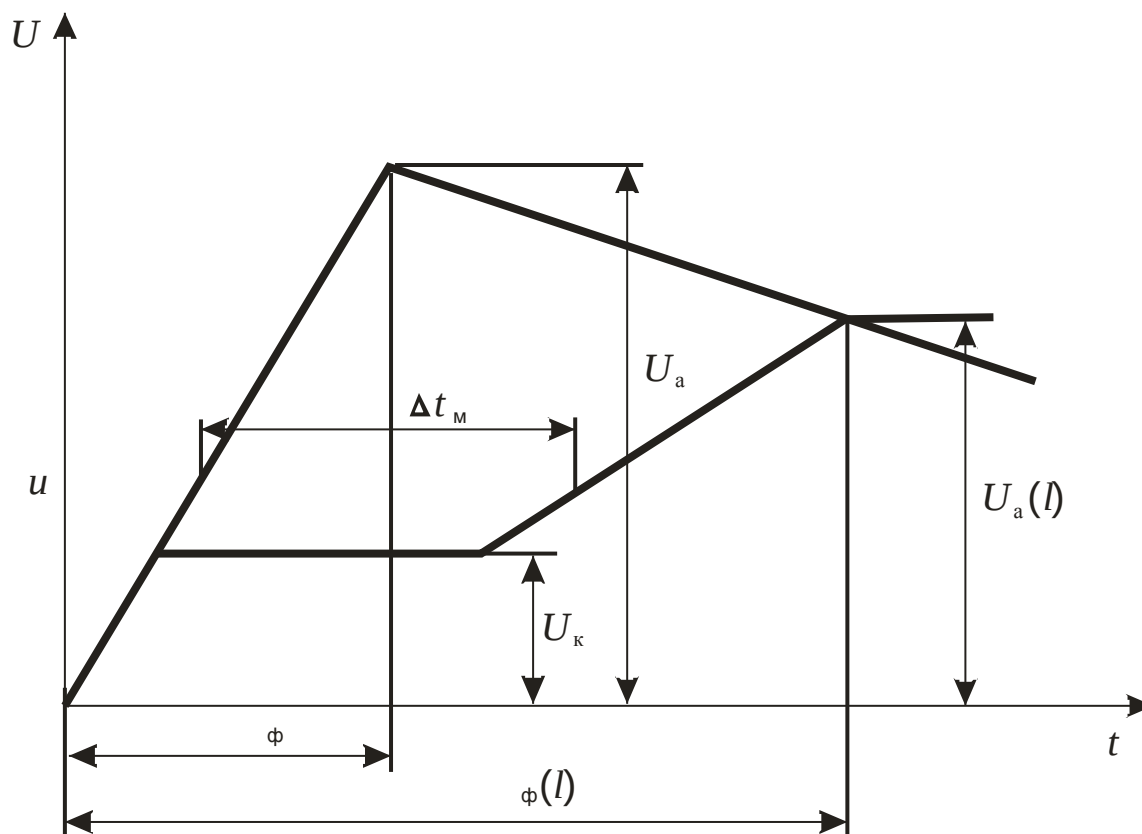


Рис. Д1. Деформация фронта грозовой волны под действием импульсной короны:

$U_a$  и  $\tau_\phi$  — амплитуда и длительность фронта исходного импульса;  
 $U_a(l)$  и  $\tau_\phi(l)$  — амплитуда и длительность фронта грозового импульса

При анализе переходного процесса в системе ВЛ-ПС в схеме замещения ВЛ вводится динамическая емкость для коронирующего провода и в процессе решения системы нелинейных дифференциальных уравнений многопроводной ВЛ учитывается влияние отраженных от ПС волн на величину этой емкости.

В оценочных расчетах деформация волны под действием импульсной короны рассчитывается по эмпирическим формулам:

а) ВНИИЭ –

$$\Delta t_u = \frac{1}{k_n} \left( \frac{u - U_k - 0,2}{0,14h_{cp} - 0,2} + 0,55 \right) l, \quad (D1)$$

где  $\Delta t_u$  – смещение ординаты  $u$  (МВ) на фронте после пробега расстояния, равного длине  $l$  (км), мкс;

$k_n$  – коэффициент, учитывающий число составляющих расщепленного провода, принимается равным 1; 1,2; 1,5; 1,6 и 2 соответственно для 1, 2, 3, 4-5, 8-12 составляющих в фазе;

$U_k$  – напряжение начала импульсной короны, определяется по формуле

$$U_k = \frac{E_k \cdot R_p}{k_p} \ln \frac{2h_{cp}}{r_3}, \quad (D2)$$

где  $E_k$  – напряженность начала короны, кВ/м:

$$E_k = 24,6 \cdot 10^2 \left( 1 + \frac{0,301}{\sqrt{r_{np}} \cdot 10^2} \right), \quad (D3)$$

в которой  $r_{np}$  – радиус составляющего провода в расщепленной фазе, м;  $R_p$  – радиус расщепления фазы и  $r_3$  – эквивалентный радиус фазы (см. формулы (D4) и (D5)), м;  $h_{cp}$  – средняя высота подвеса провода, м;  $k_p$  – коэффициент, учитывающий взаимный экранирующий эффект  $n$  составляющих, расположенных на окружности радиусом  $R_p$  (отн.ед.), равный

Для расщепленного провода эквивалентный радиус определяется по выражению

$$r_{\text{э}} = (n \cdot r \cdot R_{\text{р}}^{n-1})^{\frac{1}{n}}, \quad (\text{Д4})$$

где  $n$  – число составляющих расщепленного провода;  $r$  – радиус составляющего провода, м;  $R_{\text{р}}$  – радиус расщепления, рассчитывающийся по формуле

$$R_{\text{р}} = \frac{d}{2 \cdot \sin \frac{\pi}{n}}, \quad (\text{Д5})$$

в которой  $d$  – шаг расщепления, м.

$$k_{\text{р}} = \frac{R_{\text{р}} + (n-1) \cdot r_{\text{пр}}}{n \cdot R_{\text{р}}}. \quad (\text{Д6})$$

б) СПБГТУ –

$$\Delta t_u = 3,33 \left( \sqrt{1 + 0,63 \left( \frac{u}{U_{\text{k}}} - 1 \right)^{\frac{2}{3}}} - 1 \right). \quad (\text{Д7})$$

Форма фронта и амплитуда набегающей волны существенно зависит от заряда провода, обусловленного рабочим напряжением  $U_{\text{р}}$ . Суммарное напряжение на проводе ограничено импульсной прочностью линейной изоляции  $U_{\text{имп}}$ . При противоположных полярностях  $U_{\text{р}}$  и  $U_{\text{а}}$  корона может возникнуть только после перезаряда провода, поэтому амплитуда грозового импульса должна иметь большее значение, чем при совпадающих полярностях  $U_{\text{р}}$  и  $U_{\text{а}}$ .

## **Оценка показателей надежности грозозащиты ПС с использованием метода статистических испытаний Монте-Карло**

### *1. Исходные положения*

1.1. Многокомпонентный разряд молнии представляется двухкомпонентной моделью, в которой второй импульс заменяет воздействие серии из трех последующих. При этом расчетное распределение амплитуд тока последующих импульсов принимается по статистике наибольших амплитуд в серии из трех импульсов. Такая модель допустима: с точки зрения оценки надежности грозозащиты не имеет значения, на каком по порядку импульсе разряда молнии произошло перекрытие изоляции подстанционного оборудования.

1.2. Перенапряжения анализируются в трех точках: 1-ая точка – воздушная или газовая изоляция (линейный выключатель, холостой конец шин и др.); две другие точки – силовой трансформатор и реактор, два трансформатора и т.п.

1.3. Все переходные процессы на проводах ВЛ и ошиновке подстанции рассчитываются с учетом влияния рабочего напряжения на деформацию грозовой волны, на перекрытие линейной и подстанционной изоляции.

1.4. Грозовые импульсы, приходящие с ВЛ, рассматриваются с докоронным порогом, существенно влияющим на результаты расчета грозозащиты.

### *2. Оценка импульсной прочности изоляции при реальных грозовых воздействиях*

2.1. Прочность внешней изоляции оборудования (вводов, разъединителей, выключателей и др.) обычно представляется вольт-секундной характеристикой (ВСХ) для стандартного испытательного импульса 1,2/50 мкс. Эта характеристика используется для оценки вероятности перекрытия изоляции при воздействиях, по форме близких к стандартному испытательному импульсу. При отсутствии вольт-секундной характеристики используются данные ТУ и ГОСТ по испытательным импульсным напряжениям. Испытательное напряжение срезанным импульсом принимается соответствующим ВСХ при времени 2 мкс, испытательное напряжение полным грозовым импульсом

соответствует точке при 8 мкс. Подстановкой указанных значений в формулу ВСХ Горева-Машкиллейсона определяются коэффициенты  $B_0$  и  $T_0$  графика допустимых воздействий

$$U_{\text{доп}} = B_0 \sqrt{1 + \frac{T_0}{t}}. \quad (\text{Ж1})$$

Расчеты грозозащиты с использованием кривой допустимых воздействий, полученной по формуле (Ж1), дают определенные запасы, так как испытательные меньше 50%-ных разрядных и пробивных напряжений.

2.2. Уточненное значение импульсной прочности изоляции при реальном грозовом импульсе определяется следующим образом:

- для рассматриваемого оборудования устанавливается вольт-секундная характеристика для прямоугольного импульса. ВСХ для импульса 1,2/50 мкс пересчитывается на импульс  $0/\infty$ ;

- полученная характеристика описывается аналитическим выражением (Ж1) с выбором соответствующих значений  $B_0$  и  $T_0$ ;

- в ходе расчета переходного процесса для каждого момента времени  $t_i$ , начиная от  $t_{\min}$  с шагом  $\Delta t$ , рассчитывается напряжение на рассматриваемом объекте  $u_i$  и при  $u_i \geq U_{50}$  определяется параметр

$$T_i = \frac{T_0}{\left(\frac{u_i}{B_0}\right)^2 - 1}; \quad (\text{Ж2})$$

- время, при котором выполняется неравенство

$$\Delta t \sum_{t_{\min}}^{t_{\text{Ф}}} \frac{1}{T_i} \geq 1 \quad (\text{Ж3})$$

считается временем среза импульса напряжения при перекрытии изоляции ( $t_{\text{ср}}$ ).

Если  $u_i$  стало меньше  $U_{50}$ , а неравенство не выполнялось, принимается, что рассматриваемое воздействие не опасно для изоляции.

Рассчитываемые таким образом ВСХ для грозовых воздействий, как правило, идут выше графика допустимых воздействий, рассчитанного по (Ж1), однако и при описанном способе корректировки ВСХ расчетные оценки грозозащиты ПС дают некоторый запас.

### 3. Алгоритм программы расчета

3.1. Для расчета вероятности появления на оборудовании ПС опасных перенапряжений от набегающих волн ( $\psi_{\text{пр}}$  – от прорывов молнии на провода и  $\psi_{\text{оп}}$  – от обратных перекрытий при ударе молнии в опору) используется метод статистических испытаний. Процедура расчета  $\psi_{\text{пр}}$  и  $\psi_{\text{оп}}$  имеет некоторые различия.

3.2. Алгоритм программы расчета  $\psi_{\text{пр}}$  построен следующим образом:

- с помощью датчика случайных чисел выбирается случайное число;
- используя его, определяется случайное значение  $U_p$  на синусоиде рабочего напряжения;
- аналогичным образом, используя каждый раз новые значения датчика случайных чисел и распределения вероятностей амплитуды, крутизны и длительности импульса первого грозового разряда, а также его удаленности от ПС, определяются их случайные значения;
- для сформированного первого грозового импульса корректируется ВСХ линейной изоляции и оценивается вероятность его среза; при срезе рассчитывается напряжение на сопротивлении заземления опоры;
- рассчитывается деформация полного или срезанного импульса после пробега по ВЛ и переходный процесс, вызванный им, на ПС; оценивается его опасность в упомянутых выше точках ПС.

Если линейная изоляция первым грозовым импульсом не перекрывается, то алгоритм повторяется для последующего импульса.

В конце расчета на печать ПЭВМ выводятся следующие значения:

$$M_1; \frac{m_1}{M_1}; \frac{m_2}{M_1}; \frac{m_3}{M_1}; \frac{m_4}{M_1}; \frac{m_{12}}{M_1}; \frac{m_{13}}{M_1}; \frac{m_{23}}{M_1}; \frac{m_{123}}{M_1}; \frac{m_{\text{ав}}}{M_1}; \quad (\text{Ж4})$$

$$M_2; \frac{M_2}{M_1}; \frac{m'_1}{M_1}; \frac{m'_2}{M_1}; \frac{m'_3}{M_1}; \frac{m'_4}{M_1}; \frac{m'_{12}}{M_1}; \frac{m'_{13}}{M_1}; \frac{m'_{23}}{M_1}; \frac{m'_{123}}{M_1}; \frac{m'_{\text{ав}}}{M_1}; \quad (\text{Ж5})$$

где  $M_1$  и  $M_2$  – число испытаний схемы ПС импульсами от первого и последующего импульсов тока молнии;

$m_1, m_2, m_3$  – число опасных воздействий на изоляции в трех выбранных точках ПС от первых импульсов;

$m_4$  – число перекрытий линейной изоляции;

$m_{12}, m_{13}, m_{23}, m_{123}$  – количество случаев появления опасных воздействий от первых импульсов одновременно в нескольких точках ПС, например,

линейного выключателя (событие 1) и силового трансформатора (событие 2), линейного выключателя (1) и реактора (3) и т.д.;

$m_{ав}$  – число возможных аварийных случаев от первых импульсов, под которыми понимается выполнение во время одного испытания хотя бы одного из событий 1 или 2, или 3 (одновременное выполнение событий 1 и 2, 1 и 3, 2 и 3, 1, 2, 3 принимается за одну аварию).

Числа со штрихами соответствуют аналогичным, перечисленным выше событиям, но для последующих импульсов тока молнии.

3.3. В алгоритме для определения  $\psi_{оп}$  используется только первый импульс грозового разряда.

Результаты опасности импульсов от обратных перекрытий для изоляции ПС представляются аналогичными отношениями:

$$Q; q; \frac{q}{Q}; \frac{s_1}{Q}; \frac{s_2}{Q}; \frac{s_3}{Q}; \frac{s_{12}}{Q}; \frac{s_{13}}{Q}; \frac{s_{23}}{Q}; \frac{s_{123}}{Q}; \frac{s_{ав}}{Q}, \quad (Ж6)$$

где  $Q$  – общее число статистических испытаний при анализе грозоупорности ПС от импульсов, возникающих при обратных перекрытиях;

$q$  – число обратных перекрытий;

$s_1, s_2, \dots, s_{ав}$  – те же события, что и  $m_1, m_2, \dots, m_{ав}$ , но происходящие от импульсов, возникающих при обратных перекрытиях.

При подстановке в (6.56) значений

$$\psi_{пр} = \frac{m_1}{M_1} + \frac{m'_1}{M'_1} \text{ и } \psi_{оп} = \frac{s_1}{q} \quad (Ж7)$$

определяется надежность грозозащиты аппарата с воздушной (газовой) изоляцией. Аналогичным образом оценивается надежность грозозащиты силовых трансформаторов, реакторов и пр. Используя отношения

$$\frac{m_{ав}}{M_1}; \frac{m'_{ав}}{M'_1}; \frac{s_{ав}}{M_1}, \quad (Ж8)$$

рассчитывается надежность грозозащиты ПС в целом.

Результаты расчета  $\psi_{пр}$  и  $\psi_{оп}$  зависят от числа статистических испытаний и абсолютных значений определяемых величин.

При неудовлетворительной схеме грозозащиты величины  $\psi_{пр}$  и  $\psi_{оп}$  имеют большие значения и для их определения не требуется большого числа статистических испытаний.

При надежной схеме грозозащиты, т.е. когда рекомендованные показатели надежности грозозащиты существенно превышаются, величины  $\psi_{пр}$  и  $\psi_{оп}$  имеют малые значения и статистический разброс при их расчете может

быть существенным. При выборе числа статистических испытаний необходимо исходить из рекомендованных показателей надежности грозозащиты. Например, если ожидаемая надежность грозозащиты превышает рекомендованное значение в 5-10 раз, то для расчетной надежности допустим доверительный интервал 20-40%. Для большей точности расчетных оценок следует увеличить число статистических испытаний.

#### 4. Пример расчета грозозащиты ПС

Объект исследований – пусковая схема ПС 750 кВ «Днепровская» с одной отходящей ВЛ 750 кВ, одним автотрансформатором ( $U_{доп.а}=1980$  кВ) и одним шунтирующим реактором ( $U_{доп.р}=2120$  кВ). На ПС были установлены два комбинированных разрядника типа РВМК-750 на расстоянии  $l_{р-а}=50$  м от автотрансформатора и  $l_{р-р}=110$  м от реактора.

Результаты расчетов приведены в табл. Ж1. В ней приняты следующие обозначения:

|                                                  |                                                                                                                                                          |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $l_{р-а}, l_{р-р}$                               | – расстояния «разрядник-автотрансформатор» и «разрядник-реактор»;                                                                                        |
| $l_{0.3}$                                        | – длина опасной зоны, рассчитанная по методу, представленному в подразделе 6.4.8;                                                                        |
| $l_{0.3}^{ст}$                                   | – длина опасной зоны, определенная в процессе статистических испытаний рассматриваемой схемы;                                                            |
| $T_{M_y}$                                        | – число лет, которое потребовалось бы для регистрации $M_y$ грозовых разрядов в участок $l_{0.3}$ ;                                                      |
| $M_1, M_2$                                       | – то же самое, что и отношения (Ж4) и (Ж5), приведенных выше;                                                                                            |
| $\psi_a, \psi_p, \psi_l$                         | – соответствуют отношениям (Ж4) и характеризуют доли первых опасных импульсов, соответственно, для автотрансформатора, реактора и линейного выключателя; |
| $\psi'_a, \psi'_p, \psi'_l$                      | – соответствуют отношениям (Ж5), т.е. долям последующих опасных импульсов для оборудования ПС (%);                                                       |
| $\psi_{a\Sigma}, \psi_{p\Sigma}, \psi_{l\Sigma}$ | – суммарные значения $\psi_a$ и $\psi'_a$ , $\psi_p$ и $\psi'_p$ и т.д. (%);                                                                             |
| $T_a, T_p, T_l$                                  | – показатели надежности грозозащиты, рассчитанные по зависимостям (6.56) и (6.57).                                                                       |

Оценки выполнены при двух вариантах расчетных условий: рабочее напряжение постоянно, полярности  $U_p$  и грозового импульса противоположны (второй столбец табл. Ж1); грозовой разряд равновероятен в течение периода рабочего напряжения (третий столбец табл. Ж1). В обоих случаях проведено по 3000 статистических испытаний. Из табл. Ж1 видно, что для автотрансформатора и реактора 750 кВ наибольшую опасность представляют последующие импульсы грозового разряда. Для линейного выключателя во втором варианте, соответствующем реальным условиям эксплуатации, в равной мере оказались опасными первые и последующие импульсы. При фиксированном значении рабочего напряжения расчетные показатели надежности грозозащиты автотрансформатора снизились на 28%, реактора и линейного выключателя – примерно на 10%. На рис. Ж1 приведены кривые  $\Psi_{a\Sigma}$ ,  $\Psi_{p\Sigma}$ ,  $\Psi_{л\Sigma}$  и их доверительных интервалов в зависимости от числа проведенных статистических испытаний.

Таблица Ж1

Результаты оценок надежности пусковой схемы ПС 750 кВ «Днепровская»

( $l_{p-a} = 110$  м,  $l_{p-p} = 50$  м,  $l_{0.3} = 6,18$  км,  $l_{0.3}^{CT} = 5,88$  км)

| Параметры            | Результаты при разных вариантах расчетных условий |                                                                           |
|----------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
|                      | Грозовые разряды при $U_p = +610$ кВ              | Грозовой разряд равновероятен в течение всего периода рабочего напряжения |
| $M_1$                | 3000                                              | 3000                                                                      |
| $M_2$                | 1472                                              | 1510                                                                      |
| $T_m$                | 54000                                             | 54000                                                                     |
| $\Psi_a, \%$         | 0,4                                               | 0,17                                                                      |
| $\Psi_p, \%$         | 0                                                 | 0                                                                         |
| $\Psi_{л}, \%$       | 0,6                                               | 0,27                                                                      |
| $\Psi'_a, \%$        | 6,6                                               | 5,5                                                                       |
| $\Psi'_p, \%$        | 1,6                                               | 1,5                                                                       |
| $\Psi'_{л}, \%$      | 0                                                 | 0,27                                                                      |
| $\Psi_{a\Sigma}, \%$ | 7                                                 | 5,7                                                                       |
| $\Psi_{p\Sigma}, \%$ | 1,6                                               | 1,5                                                                       |
| $\Psi_{л\Sigma}, \%$ | 0,6                                               | 0,5                                                                       |
| $T_a$                | 250                                               | 320                                                                       |
| $T_p$                | 1100                                              | 1230                                                                      |
| $T_{л}$              | 3000                                              | 3400                                                                      |

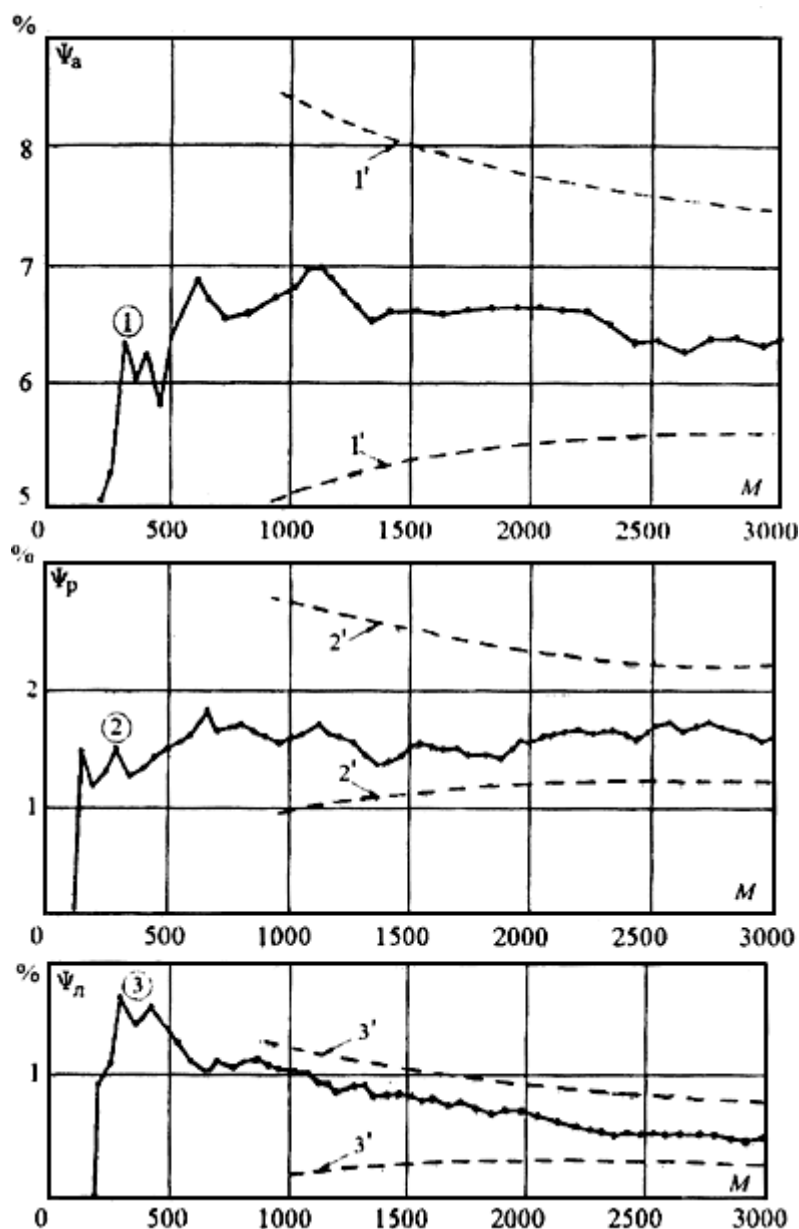


Рис. Ж1 Доля опасных волн (•••••) и ее доверительные интервалы (---) в зависимости от числа статистических испытаний для трех точек ПС:

- 1 – автотрансформатор ( $\psi_a$  и  $1' - 1'$ ); 2 – реактор ( $\psi_p$  и  $2' - 2'$ );  
3 – линейный выключатель ( $\psi_{л}$  и  $3' - 3'$ )

Доля опасных импульсов  $\psi_{л\Sigma}$  быстро достигает наибольшего значения (1,65%), а затем медленно падает. После 3000 испытаний  $\psi_{л\Sigma}$  составляет 0,6%, что соответствует надежности грозозащиты линейного выключателя примерно 3000 лет. Доверительные интервалы для рассчитанной величины составляют от 36% до + 60%, т.е. надежность грозозащиты линейного выключателя находится

в пределах 1250-4500 лет и превышает рекомендованную для ПС 750 кВ (1000-1200 лет).

Доля опасных волн для реактора  $\psi_{p\Sigma}$  составляет 1,6% и надежность его грозозащиты – 1100 лет. После 600 испытаний  $\psi_{p\Sigma}$  колеблется около некоторого значения. Наибольшее отклонение от расчетного значения равно 15%. Надежность грозозащиты реактора в пусковой схеме составляет 935-1265 лет. Полученные значения практически совпадают с рекомендованными значениями надежности (1000-1200 лет), и увеличение числа испытаний нецелесообразно.

Доля опасных волн для автотрансформатора  $\psi_{a\Sigma}$  наибольшая (7,0%) и после 600 испытаний достигает своего предельного значения. Наибольшие отклонения от рассчитанного значения составляют 6%, т.е. точность ее определения наибольшая. Надежность грозозащиты автотрансформатора 235-265 лет существенно ниже рекомендованной в (1000-1200 лет), т.е. необходимы дополнительные грозозащитные мероприятия на период эксплуатации пусковой схемы.

## Статистический метод анализа грозозащиты ПС совместно с ВЛ

### 1. Исходные положения

1.1. Атмосферные перенапряжения, возникающие на ПС от грозовых волн, набегающих с ВЛ, моделируются в единой системе: молния-ВЛ-ПС.

1.2. Расчетный импульс тока молнии имеет косоугольный фронт и линейно спадающий хвост. Расчеты проводятся для одной обобщенной компоненты, без учета различия параметров импульса первой и последующих составляющих многократного разряда. Вероятность амплитуды и крутизны тока определяется с использованием экспоненциальных функций:

$$P(I > I_i) = \exp(-0,04I_i); \quad (\text{И1})$$

$$P(A > A_i) = \exp(-0,08A_i). \quad (\text{И2})$$

Предельные значения амплитуды тока молнии и длины импульса принимаются по данным /3/.

1.3. Волновое сопротивление канала молнии рассчитывается по формуле

$$z_{\text{м}} = 140(1 + 240/I). \quad (\text{И3})$$

1.4. Перенапряжения в системе ВЛ-подстанция моделируются с помощью метода бегущих волн. Волны записываются в виде цифровых последовательностей с постоянным шагом по времени  $\Delta t$ . Шаг по времени является производным от шага расчета по длине  $\Delta l$ , принимаемом обычно в диапазоне 5-30 м. ВЛ моделируется в многопроводной подстановке, но в большинстве случаев принимается 2 провода - фазный провод и трос.

Деформация волны вследствие влияния сопротивления земли и проводов моделируется включением  $RL$ -двухполюсников, параметры которых зависят от спектра импульса. Влияние импульсной короны моделируется включением динамической емкости, рассчитанной по эмпирической формуле

$$c_{\text{д}} = c_0 \left( 1 + m_{\text{н}} \left( \frac{u}{U_{\text{к}} - 1} \right)^{2/3} \right), \quad (\text{И4})$$

где  $c_0$  – геометрическая емкость;

$U_{\text{к}}$  – напряжение начала короны;

$m_n$  – 1,3 для положительной полярности и 0,63 для отрицательной полярности.

На подстанции деформация волн не учитывается.

1.5. Перекрытие линейной изоляции определяется разностью напряжений между проводом и тросом, в формировании которых участвуют и отражения от узлов подстанции и соседних опор. Вероятность перекрытия рассчитывается для каждой опоры по пути движения волн к подстанции.

Перекрытие гирлянды изоляторов определяется путем сопоставления воздействующего напряжения с ее вольт-секундной характеристикой (ВСХ), которая описывается формулой:

$$u(t) = A_0 \sqrt{1 + \frac{B_0}{t}}. \quad (\text{И5})$$

Параметры формулы определяются, как и в Приложении Ж, через импульсное разрядное напряжение при предразрядном времени 2 мкс и 50%-ное разрядное напряжение (при 20 мкс) с учетом их полярности. Разность в полярности особо существенна при анализе грозозащиты ПС 500 кВ и выше.

1.6. Допустимое напряжение на каждом аппарате ( $U_{\text{доп}}$ ) представляется двумя участками: некоторой зависимостью  $U(t)$ , описываемой 10 парами значений напряжения и времени, и ВСХ внешней изоляции. Зависимость  $U(t)$  моделирует допустимое напряжение для главной изоляции, которое определяется полной испытательной волной и учитывает предельную крутизну напряжения на трансформаторе, опасную для продольной изоляции обмоток.

1.7. Рабочее напряжение в расчетах грозозащиты ПС 500 кВ и выше учитывается путем задания ненулевых начальных условий как для напряжений на подстанционном оборудовании, так и для прямых и обратных волн ( $0,5 U_p$ ).

Для ПС напряжением до 330 кВ рабочее напряжение учитывается только уменьшением допустимого напряжения для трансформаторов по формуле

$$U_{\text{доп}} = 1,1(U_{\text{п.в}} - 0,5U_p), \quad (\text{И6})$$

где  $U_{\text{п.в}}$  – амплитуда испытательного напряжения полной волны.

1.8. Защитные аппараты – ОПН и вентильные разрядники (ВР) моделируются нелинейными вольт-амперными характеристиками, которые аппроксимируются отрезками прямых. ВСХ для ВР задаются по уравнению гиперболы. При определении момента срабатывания разрядника учитывается

наличие колебательной составляющей в напряжении, что приводит к запаздыванию его срабатывания.

## 2. Алгоритм программы расчета

2.1. Методика базируется на совместном расчете переходных процессов в линии и подстанции. С этой целью объединяется последний узел модели ВЛ с узлом подстанции, к которому эта ВЛ присоединена, рис. И1. На ближайшей к подстанции опоре трос присоединен к контуру заземления ПС. Пораженный провод ВЛ соединяется с однолинейной схемой замещения ПС.

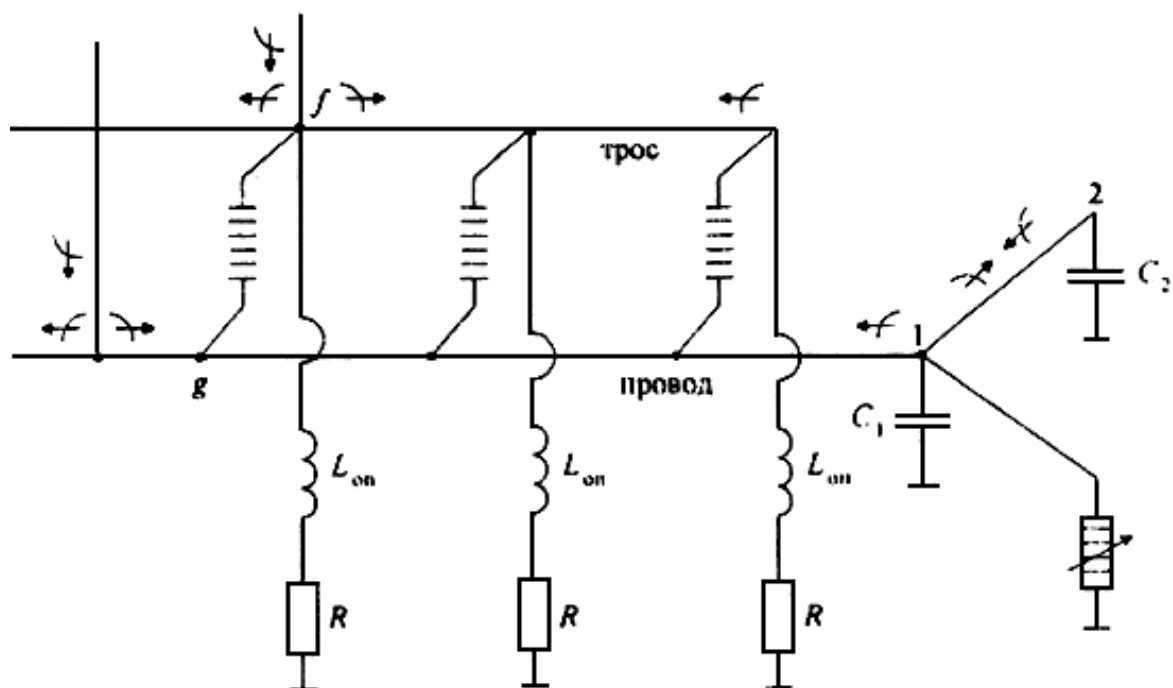


Рис. И1. Модель линии и подстанции для расчета волновых процессов в системе молния-ВЛ-подстанция

Эквивалентная схема ПС в однофазной постановке включает в себя наиболее ответственные аппараты (трансформаторы, реакторы, выключатели, конденсаторы связи), которые моделируются входными емкостями, защитные аппараты (ОПН или вентильные разрядники), заменяющиеся нелинейными активными сопротивлениями. Все участки проводов между узлами подстанции моделируются отрезками линий без потерь.

Импульс подается либо непосредственно на фазный провод (прорывы мимо тросовой защиты), либо на трос (обратные перекрытия) в месте их присоединения к опоре. В процессе развития переходного процесса линейная

изоляция между проводом и тросом перекрывается под действием напряжения ( $U_g - U_f$ ). В схеме учитываются сопротивления заземления опор, индуктивности опор и взаимоиндукция пораженной опоры и канала молнии.

2.2. Анализ волнового процесса в системе молния-ВЛ-ПС основывается на решении телеграфных уравнений для напряжений в виде суммы прямых и обратных волн, распространяющихся по проводам со скоростью света. Волны записываются последовательностью прямоугольных волн, длительностью  $\Delta t$  каждая. При расчете напряжений в узловых точках используется правило эквивалентной волны и эквивалентной ЭДС, причем для ВЛ в многопроводной постановке.

2.3. Основным этапом расчета является определение кривой опасных волн (КОВ) – совокупности ординат амплитуды и крутизны импульса тока молнии при неизменном расстоянии точки удара на ВЛ от входа подстанции, приводящих к появлению на исследуемом элементе подстанции напряжений, равных допустимому значению. КОВ является границей между воздействиями, приводящими к появлению опасных перенапряжений, и не приводящих к этому. Рассматривая различные случаи поражения линии ударами молнии: в непосредственной близости от подстанции, затем на небольшом расстоянии от подстанции и далее на больших расстояниях, несколько раз определяются кривые опасных волн. По мере удаления точки удара молнии от входа подстанции площади опасных областей будут уменьшаться. Показатели надежности грозозащиты подстанции определяются путем интегрирования по всему объему опасных волн с учетом плотности вероятностей амплитуды и крутизны тока молнии и поражаемости ВЛ на подходе к ПС.

2.4. Области и объем опасных волн рассчитываются для двух типов поражения ВЛ – прорывов молнии на провода и при обратных перекрытиях с опоры на провод. Область может быть представлена в координатах – амплитуда волны напряжения ( $U_a$ ) и длительность фронта импульса ( $\tau_f$ ) (рис. И2), или в координатах – амплитуда ( $I$ ), крутизна ( $A$ ) тока молнии (для большей наглядности –  $I$  и  $1/A$ ) (рис. И3). Снизу область ограничена кривой опасных параметров (волн) КОВ, представляющей совокупность критических значений опасных параметров волн, возникающих при ударе молнии в ВЛ на расстоянии  $l_i$  от ПС. Ниже этой кривой находятся неопасные, выше опасные для оборудования подстанции волны. Как правило, нижние слева точки КОВ

соответствуют несрезанным волнам, т.е. волнам, не вызывающим перекрытие линейной изоляции (например, волна 1 на рис. И2), затем срезанным волнам трапециoidalной формы (волна 2 на рис. И2) с косоугольным фронтом  $\tau_{\Phi} = U_a / U'_a$  и спадом напряжения после среза до величины, определяемой сопротивлением заземления опоры. При определенной амплитуде срез волны произойдет при времени, равном длине фронта волны (волна 3 на рис. И2). Это будет соответствовать точке условного пересечения КОВ и ВСХ линейной изоляции (точка  $N$  на рис. И2 и точка  $N'$  на рис. И3).

Из рис. И2 следует, что все волны с крутизной, равной крутизне волны 3 и амплитудой больше  $U_N$ , при малых сопротивлениях заземления опор будут создавать практически одинаковые перенапряжения на ПС. Независимость перенапряжений от амплитуды этих волн дает вертикальную границу  $N'K'$  на рис. И3.

Волны, находящиеся выше КОВ, безусловно являются опасными для ПС. Но дальнейшее увеличение крутизны воздействия с амплитудой более  $U_N$  приводит к более раннему перекрытию линейной изоляции на фронте волны и срабатыванию защитных разрядников (при их использовании). Начиная с некоторой крутизны (волна 4 на рис. И2), приходящие на подстанцию волны становятся настолько короткими, что не создают опасных перенапряжений. Волне 4 соответствует точка  $P$  на рис. И2 и  $P'$  на рис. И3 с координатами  $l_4$  и  $1/A_4$  и вертикальная граница  $P'L'$ . В результате появляется дополнительная граница, идущая от точки  $P$  ( $P'$  на рис. И3) влево. Волны с амплитудой, превышающей или равной  $U_P$ , будут опасны для подстанции в случае большей крутизны фронта и срезом волны после ее амплитуды (волна 5 на рис. И2). Параметры таких волн лежат на кривой  $P'R'$ , которую называют верхней КОВ. Область  $M'N'K'L'P'R'$  является областью опасных волн при прорыве молнии на расстоянии  $l=0$  от входа ПС. Аналогичным образом можно выполнить построения для различных  $l_i$ . При удалении от входа подстанции нижняя и верхняя КОВ сближаются. Реальная крутизна расположения кривых опасных волн в каждом случае будет зависеть от конкретных условий, но общие закономерности – преимущественно монотонно нарастающий характер нижней КОВ с увеличением  $l_i$  и убывающий для верхней КОВ сохраняются.

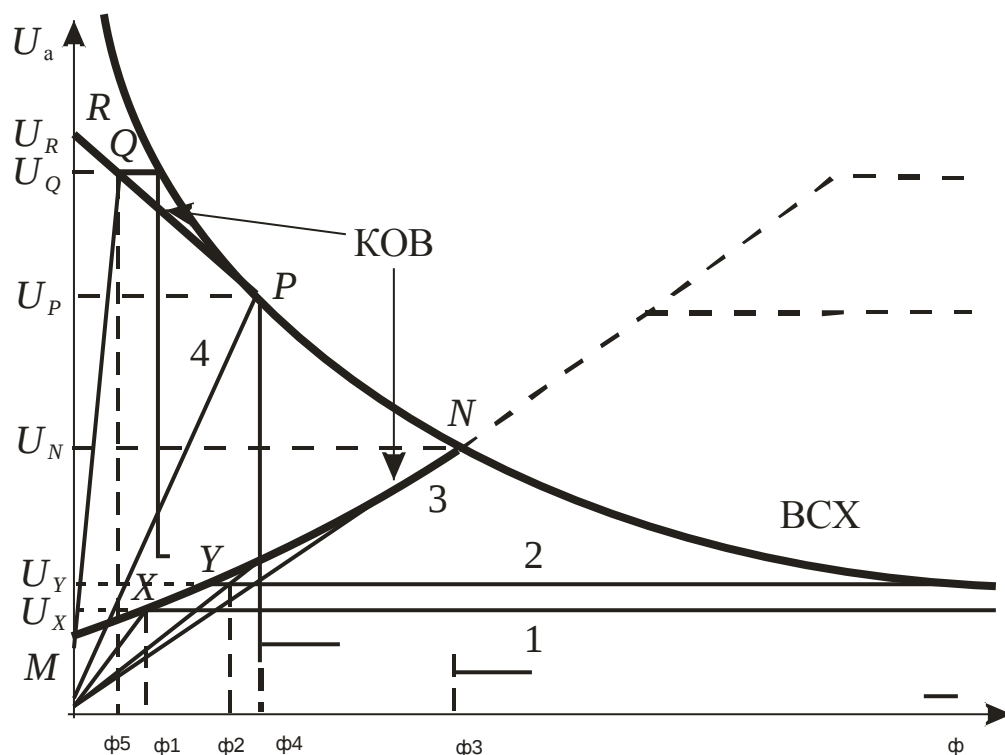


Рис. И2. Область параметров опасных волн в координатах  $U_a$  и  $\tau_\phi$

При ударах молнии в трос или опору ВЛ с последующим обратным перекрытием гирлянды изоляторов кривые опасных волн имеют несколько другой характер. Волны, возникающие после перекрытия, имеют весьма крутой фронт, поэтому КОВ, как правило, меньше зависят от длины фронта исходных волн. Верхние КОВ практически отсутствуют, а нижние в координатах  $(I, 1/A)$  не имеют вертикальной границы, однако общие закономерности остаются прежними.

2.5. Поиск точек КОВ представляет итерационный процесс. Нулевое приближение значения амплитуды волны, подаваемой на подстанцию, определяется по минимальному разрядному напряжению  $U_{\min}$  из формулы (И5) для ВСХ линейной изоляции, а именно:

$$U_1^{(0)} = (1,1 \div 1,2) U_{\min} = (1,1 \div 1,2) A_0. \quad (\text{И6})$$

Как показала практика расчетов, в этом случае  $U_1^{(0)}$  расположено, как правило, ниже точки пересечения КОВ и условной границы определения КОВ слева (рис. И4). По этой формуле для  $U_a = U_1^{(0)}$  находится длина фронта  $\tau_1^{(0)}$  нулевого приближения, соответствующего заданной границе. Для полученных величин  $U_1^{(0)}$  и  $\tau_1^{(0)}$  рассчитывается переходный процесс в схеме замещения

системы ВЛ-подстанция и перенапряжения на каждом шаге расчета сравниваются с  $U_{\text{доп}}(t)$ , например, для трансформатора. Находится «невязка», соответствующая нулевому приближению (рис. И5):

$$\Delta U_1^{(0)} = \max(U_T(t)), \quad (\text{И7})$$

по которой определяется первое приближение амплитуды волны  $U_1^{(0)}$ . Процесс следующих итерационных приближений иллюстрируют рис. И4 и рис. И5.

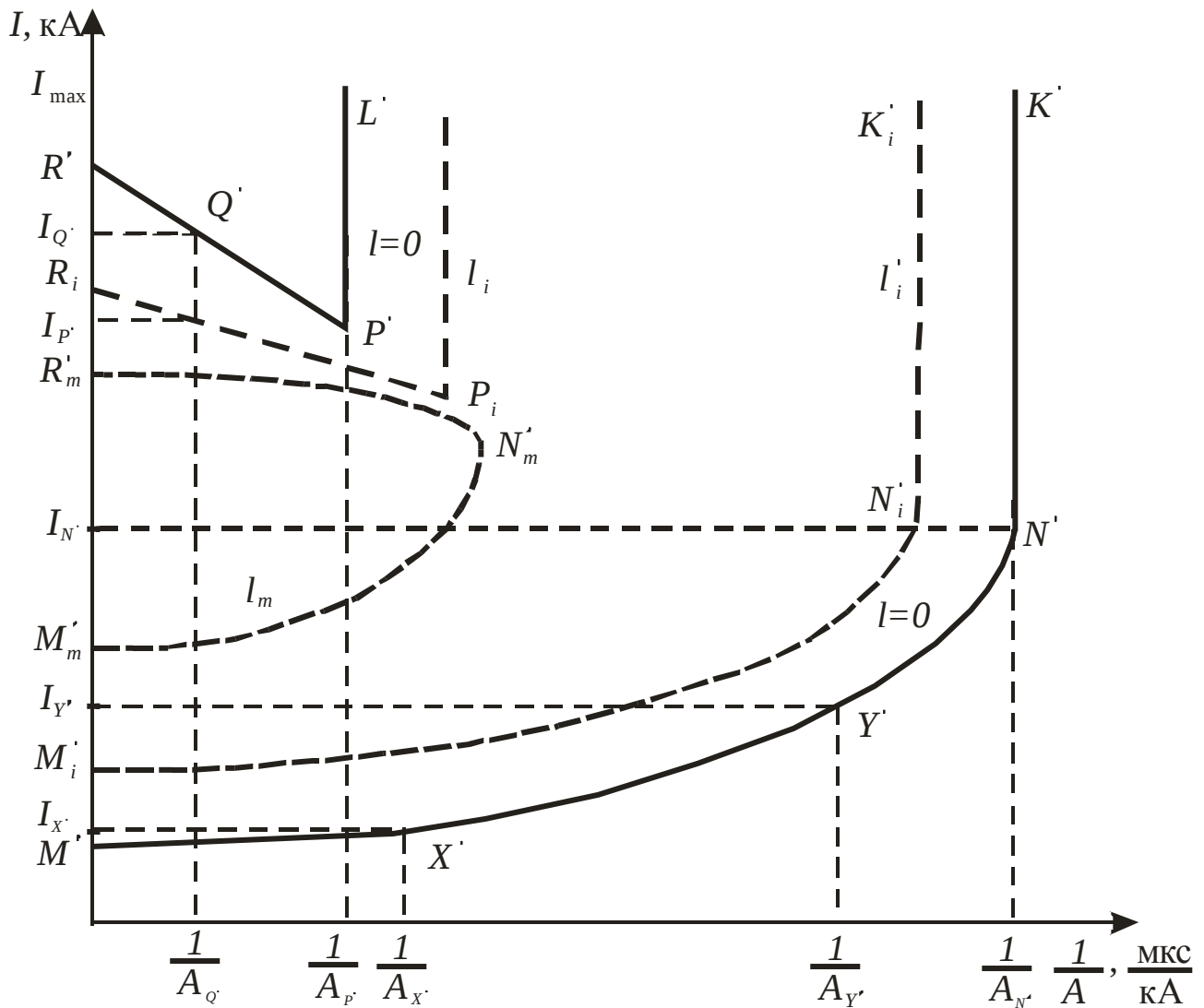


Рис. И3. Область существования параметров опасных волн в координатах  $I, 1/A$

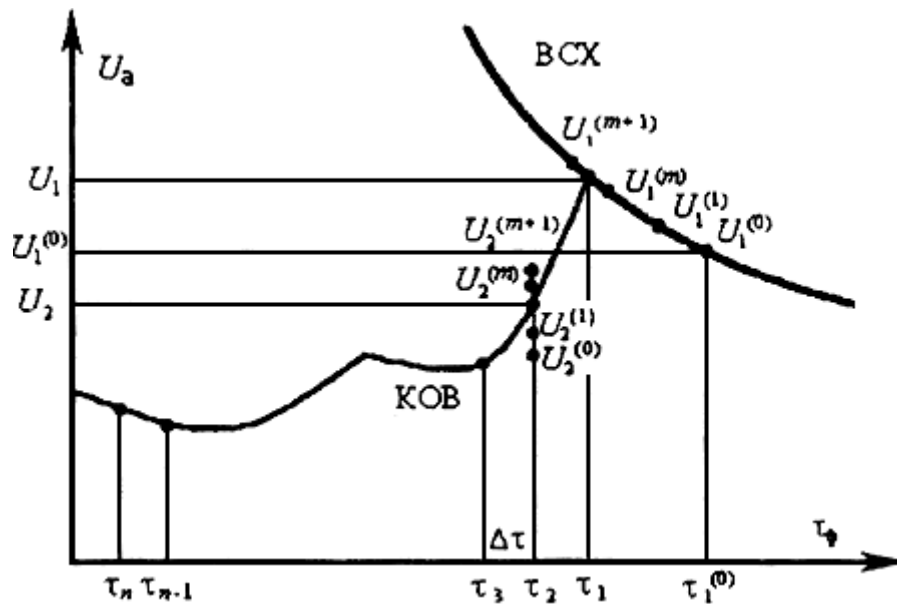


Рис. И4. Последовательность определения точек КОВ

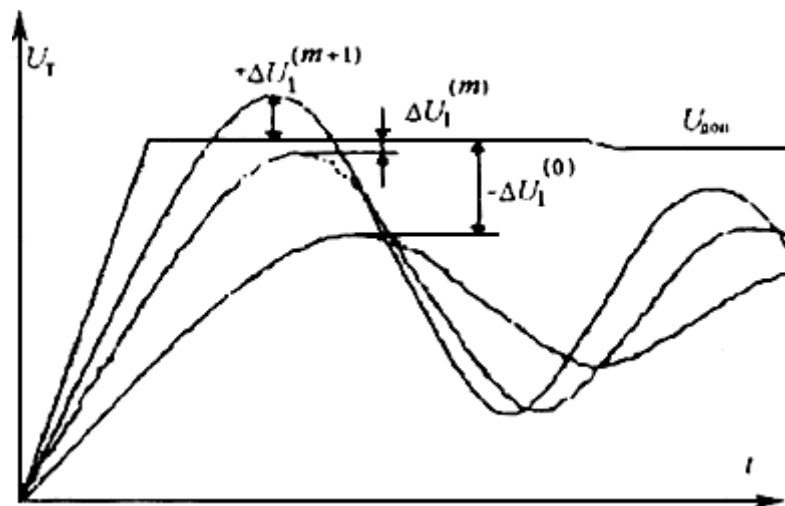


Рис. И5. Определение «невязки» ( $\Delta U$ ) в процессе итерационного расчета координат точек КОВ

Описанный итерационный процесс поиска точек КОВ является приближением по функции, т.е. по напряжению на исследуемом аппарате. Для ускорения сходимости параллельно проводится приближение по аргументу, т.е. по амплитудам импульса тока молнии.

### 3. Пример расчета грозозащиты подстанции

Анализ грозоупорности выполнен для ПС 500 кВ, используемой в качестве примера составления схемы замещения в /4, Приложение 30/.

Показатели грозоупорности получены с учетом полной гаммы набегающих на ПС волн, возникающих на ВЛ в результате прорывов молнии на провода и обратных перекрытий при поражении опор и тросов на подходе. В табл. И1-И17 представлены исходные данные и результаты для одного из расчетов. Эта серия таблиц дает пример сервисной обработки вводимой информации и работы программного комплекта. В качестве защитных аппаратов используются ОПН. В соответствии с нумерацией узлов, приведенной на схеме подстанции (рис. И9), анализируются перенапряжения на силовых трансформаторах, расположенных в узлах 3 и 4 от грозовых волн, набегающих с ВЛ1 и ВЛ2, ОПН расположены в узлах 13 и 14. Расстояние между каждым трансформатором и соответствующим ОПН варьировалось от 60 до 230 м. Всего было выполнено 80 вариантов расчетов (по данным СПбГТУ), результаты которых приведены в табл. И14-И17.

В табл. И1-И11 приведены исходные данные для расчета кривых опасных волн и показателя надежности грозозащиты для одного из вариантов, а именно, трансформатора в узле 3 (табл. И10), при прорывах молнии мимо тросовой защиты ВЛ1 (узел 1), что зафиксировано в табл. И9. Параметры, используемые для расчета вольт-секундной характеристики для прорывов молнии, приведены в табл. И8. Расстояние между вторым трансформатором (узел 3) и ОПН (узел 13), а также между трансформатором (узел 4) и ОПН (узел 14) составляет 150 м (табл. И3). Сопротивление заземления опор - 10 Ом (табл. И8). В программе предусмотрена возможность изменения некоторых расчетных параметров, таких как: шаг расчета по длине, погрешности определения точек КОВ, набор расстояний между местом удара молнии и шинами подстанции (длины подхода), для которых определяются КОВ (табл. И9), число расчетных точек КОВ, время окончания расчета перенапряжений и начальная амплитуда импульса молнии (табл. И10). Для удобства ориентации в списке базы данных в табл. И1 предусмотрена позиция «Краткое описание варианта расчета» (табл. И1). В процессе расчета одного варианта накапливаются параметры кривых опасных волн, сведенные в табл. И12. Окончательные результаты расчета одного варианта – показатели грозоупорности  $N_{н.в}$  и  $T_{н.в}$  для трансформатора в узле 3 от грозовых волн, набегающих с ВЛ1 от прорывов молнии на провода, при удалении ОПН на 150 м от защищаемого

трансформатора - приведены в табл. И13. Эти же результаты вошли в итоговую табл. И14.

Рекомендуемое значение  $T_{н.в}$  для трансформаторов 500 кВ оценивается значением 800-1000 лет. Из табл. И14 и И16 видно: при расстоянии между ОПН и трансформатором (60-120) м, что соответствует реальной схеме конкретной подстанции, и сопротивлении заземления опор  $R=10$  Ом, трансформатор будет надежно защищен. При сопротивлении заземления опор ВЛ, равной 20 Ом, расстояние 60 м является уже недопустимым. Длина опасного подхода определяется в ходе каждого конкретного расчета. Например, для варианта, приведенного в табл. И14, длина подхода ВЛ, с которой могут прийти опасные для ПС волны, составляет 1000 м.

Время, затраченное на выполнение всей серии расчетов и обработку результатов, составило около трех часов машинного времени на стандартной ПЭВМ.

Таблица И1

Вариант расчета

|                                   |                                                              |              |          |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------|----------|
| Класс напряжения                  | 500 кВ                                                       | Дата расчета | 20.10.98 |
| Номер варианта                    | 44                                                           |              |          |
| Краткое описание варианта расчета | РУ: ВЛ1, Т.3, пр., $l_{т-ОПН}=150$ м, $R=10$ - $T_{н.в}=940$ |              |          |

Таблица И2

Схема подстанции

|                                                 |     |                                     |       |
|-------------------------------------------------|-----|-------------------------------------|-------|
| Количество узлов (до 100)                       | 14  | Высота подвеса ошиновки, м          | 11,0  |
| Количество участков ошиновки (до 100)           | 14  | Число составляющих проводов         | 3     |
| Количество подходящих ВЛ (до 10)                | 2   | Радиус составляющего провода, мм    | 13,80 |
| Количество разрядников и ОПН (до 10)            | 2   | Радиус расщепления, м               | 0,230 |
| Сопротивление заземления контура подстанции, Ом | 0,5 | Удельное сопротивление грунта, Ом·м | 200   |

Таблица И3

## Топология схемы

| Номер<br>линии | Длина, м | Номера соединяемых узлов |    |
|----------------|----------|--------------------------|----|
| 1              | 34,0     | 1                        | 5  |
| 2              | 34,0     | 2                        | 6  |
| 3              | 150,0    | 3                        | 11 |
| 4              | 60,0     | 4                        | 12 |
| 5              | 121,0    | 5                        | 7  |
| 6              | 121,0    | 6                        | 8  |
| 7              | 40,0     | 7                        | 9  |
| 8              | 287,0    | 7                        | 10 |
| 9              | 40,0     | 8                        | 9  |
| 10             | 111,0    | 9                        | 10 |
| 11             | 132,0    | 9                        | 11 |
| 12             | 222,0    | 10                       | 12 |
| 13             | 10,0     | 11                       | 13 |
| 14             | 10,0     | 12                       | 14 |

Таблица И4

## Емкости в узлах схемы

| Номер узла | Емкость, пФ |
|------------|-------------|
| 1          | 0,0         |
| 2          | 0,0         |
| 3          | 4200,0      |
| 4          | 4200,0      |
| 5          | 5315,0      |
| 6          | 5315,0      |
| 7          | 2925,0      |
| 8          | 2300,0      |
| 9          | 1885,0      |
| 10         | 960,0       |
| 11         | 910,0       |
| 12         | 990,0       |
| 13         | 0,0         |
| 14         | 0,0         |

Таблица И5

## Вольт-амперные характеристики разрядников и ОПН

| Номер<br>разрядника<br>или ОПН | 1-я точка ВАХ |          | 2-я точка ВАХ |          | 3-я точка ВАХ |          |
|--------------------------------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|----------|
|                                | $I$ , кА      | $U$ , кВ | $I$ , кА      | $U$ , кВ | $I$ , кА      | $U$ , кВ |
| 1                              | 1,0           | 780      | 5,0           | 860      | 10,0          | 920      |
| 2                              | 1,0           | 780      | 5,0           | 860      | 10,0          | 920      |

Таблица И6

## Вольт-секундные характеристики разрядников

| Номер<br>разрядника<br>или ОПН | 1-я точка<br>BCX |             | 2-я точка<br>BCX |             | 3-я точка<br>BCX |             | Начальное<br>напряжение |
|--------------------------------|------------------|-------------|------------------|-------------|------------------|-------------|-------------------------|
|                                | $t$ , мкс        | $U$ ,<br>кВ | $t$ , мкс        | $U$ ,<br>кВ | $t$ , мкс        | $U$ ,<br>кВ | кВ                      |
| 1                              | 0,01             | 0,0         | 1,0              | 0,0         | 10,0             | 0,0         | 0,0                     |
| 2                              | 0,01             | 0,0         | 1,0              | 0,0         | 10,0             | 0,0         | 0,0                     |

Таблица И7

## Параметры проводов ВЛ

| Номер<br>ВЛ | Высота<br>подвеса<br>проводов, м | Количество<br>расщепленных<br>составляющих | Радиус<br>составляющего<br>провода, мм | Радиус<br>расщепления<br>провода, м |
|-------------|----------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|
| 1           | 15,7                             | 3                                          | 13,8                                   | 0,23                                |
| 2           | 15,7                             | 3                                          | 13,8                                   | 0,23                                |

Таблица И8

## Параметры пораженной ВЛ

|                                                           |                                   |                                                      |                                     |                                  |                       |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Номер ВЛ, по которой приходит воздействие (пораженной ВЛ) |                                   |                                                      |                                     |                                  | 1                     |
| Расчетное число проводов в пораженной ВЛ                  |                                   |                                                      |                                     |                                  | 2                     |
| Номер провода                                             | Средняя высота подвеса провода, м | Расстояние по горизонтали от оси опоры до провода, м | Количество составляющих их проводов | Радиус составляющего провода, мм | Радиус расщепления, м |
| 1                                                         | 15,70                             | 0,00                                                 | 3                                   | 13,80                            | 0,230                 |
| 2                                                         | 26,80                             | 4,50                                                 | 1                                   | 5,50                             | 1,0                   |
| Вольт-секундная характеристика изоляции ВЛ                |                                   |                                                      |                                     | $A_0$ , МВ                       | 2,244                 |
|                                                           |                                   |                                                      |                                     | $B_0$ , мкс                      | 1,942                 |
| Расстояние до первой опоры, м                             |                                   |                                                      |                                     |                                  | 200,0                 |
| Длина пролета, м                                          |                                   |                                                      |                                     |                                  | 450,0                 |
| Сопротивление заземления опоры, Ом                        |                                   |                                                      |                                     |                                  | 10,0                  |
| Индуктивность опоры, мкГн                                 |                                   |                                                      |                                     |                                  | 16,0                  |
| Взаимная индуктивность молнии и опоры, мкГн               |                                   |                                                      |                                     |                                  | 6,40                  |

Таблица И9

## Параметры расчета

|                                                |          |                |          |
|------------------------------------------------|----------|----------------|----------|
| Учет прорывов молнии через тросовую защиту     |          |                | да*      |
| Учет обратных перекрытий с опоры на провод     |          |                | нет*     |
| Расчет кривых опасных волн (КОВ)               |          |                | да       |
| Волновое сопротивление канала молнии, Ом       |          |                | 1000,0   |
| Шаг расчета по длине, м                        |          |                | 5,00     |
| Погрешность определения первой точки КОВ, о.е. |          |                | 0,001    |
| Погрешность определения прочих точек КОВ, о.е. |          |                | 0,005    |
| Число вариантов длин подхода (до 10)           |          |                | 9        |
| Номер варианта                                 | Длина, м | Номер варианта | Длина, м |
| 1                                              | 0,0      | 6              | 300,0    |
| 2                                              | 20,0     | 7              | 500,0    |
| 3                                              | 50,0     | 8              | 700,0    |
| 4                                              | 100,0    | 9              | 1000,0   |
| 5                                              | 200,0    | 10             | 0,0      |

\* «да» и «нет» – ключи, показывающие используемый в данной серии расчетов вариант («да») задания исходных воздействий.

Таблица И10

## Параметры расчета КОВ

|                                                                |          |           |
|----------------------------------------------------------------|----------|-----------|
| Число расчетных точек на КОВ (до 10)                           | 5        |           |
| Номер узла, для которого рассчитывается КОВ                    | 3        |           |
| Время окончания каждого расчета перенапряжений, мкс            | 50,0     |           |
| Начальная амплитуда импульса напряжения молнии, МВ             | 2,0      |           |
| Максимальная амплитуда импульса молнии, МВ                     | 100,0    |           |
| Коэффициент уменьшения импульса $U(t_{x.в.})/U_m$              | 0,010    |           |
| к заданному моменту времени $t_{x.в.}$ , мкс                   | 200,0    |           |
| Массив огибающих допустимых напряжений на обследуемом аппарате |          |           |
| N (до 10)                                                      | $U$ , МВ | $t$ , мкс |
| 1                                                              | 1,430    | 0,0       |
| 2                                                              | 1,430    | 1,0       |
| 3                                                              | 1,430    | 100,0     |
| 4                                                              | 1,430    | 200,0     |

Таблица И11

## Исходные данные для расчета надежности грозозащиты

|                                                           |       |
|-----------------------------------------------------------|-------|
| Количество грозовых часов                                 | 40,0  |
| Показатель экспоненты для функции распределения крутизны  | 12,5  |
| Показатель экспоненты для функции распределения амплитуды | 25,0  |
| Число ударов молнии на 100 км, 100 грозовых часов         | 94,10 |
| Угол тросовой защиты, град.                               | 22,7  |
| Высота полвеса троса, м                                   | 32,0  |

Таблица И12

## Результаты расчета кривых опасных волн

| Длина подхода 0,0 м |       |             |       | Длина подхода 20,0 м |       |             |       |
|---------------------|-------|-------------|-------|----------------------|-------|-------------|-------|
| Нижняя КОВ          |       | Верхняя КОВ |       | Нижняя КОВ           |       | Верхняя КОВ |       |
| t, мкс              | U, МВ | t, мкс      | U, МВ | t, мкс               | U, МВ | t, мкс      | U, МВ |
| 0,769               | 7,66  | -           | -     | 0,769                | 7,7   | -           | -     |
| 1,54                | 8,08  | -           | -     | 1,54                 | 8,12  | -           | -     |
| 2,31                | 8,98  | -           | -     | 2,31                 | 9,02  | -           | -     |
| 3,07                | 10,4  | -           | -     | 3,07                 | 10,5  | -           | -     |
| 3,84                | 12,4  | -           | -     | 3,84                 | 12,4  | -           | -     |

| Длина подхода 50 м      |          |             |          | Длина подхода 100 м    |          |             |          |
|-------------------------|----------|-------------|----------|------------------------|----------|-------------|----------|
| Нижняя КОВ              |          | Верхняя КОВ |          | Нижняя КОВ             |          | Верхняя КОВ |          |
| $t$ , мкс               | $U$ , МВ | $t$ , мкс   | $U$ , МВ | $t$ , мкс              | $U$ , МВ | $t$ , мкс   | $U$ , МВ |
| 0,768                   | 7,81     | -           | -        | 0,768                  | 7,96     | -           | -        |
| 1,54                    | 8,25     | -           | -        | 1,54                   | 8,43     | -           | -        |
| 2,3                     | 9,19     | -           | -        | 2,3                    | 9,41     | -           | -        |
| 3,07                    | 10,8     | -           | -        | 3,07                   | 11,0     | -           | -        |
| 3,84                    | 12,7     | -           | -        | 3,84                   | 13,1     | -           | -        |
| Длина подхода 200,00 м  |          |             |          | Длина подхода 300,00 м |          |             |          |
| Нижняя КОВ              |          | Верхняя КОВ |          | Нижняя КОВ             |          | Верхняя КОВ |          |
| $t$ , мкс               | $U$ , МВ | $t$ , мкс   | $U$ , МВ | $t$ , мкс              | $U$ , МВ | $t$ , мкс   | $U$ , МВ |
| 0,386                   | 8,31     | -           | -        | 0,385                  | 8,49     | -           | -        |
| 0,771                   | 8,31     | -           | -        | 0,771                  | 8,65     | -           | -        |
| 1,16                    | 8,51     | -           | -        | 1,16                   | 8,90     | -           | -        |
| 1,54                    | 8,80     | -           | -        | 1,54                   | 9,28     | -           | -        |
| 1,93                    | 9,25     | -           | -        | 1,93                   | 9,79     | -           | -        |
| Длина подхода 500,00 м  |          |             |          | Длина подхода 700,00 м |          |             |          |
| Нижняя КОВ              |          | Верхняя КОВ |          | Нижняя КОВ             |          | Верхняя КОВ |          |
| $t$ , мкс               | $U$ , МВ | $t$ , мкс   | $U$ , МВ | $t$ , мкс              | $U$ , МВ | $t$ , мкс   | $U$ , МВ |
| 0,193                   | 8,75     | -           | -        | 0,193                  | 9,13     | -           | -        |
| 0,386                   | 8,96     | -           | -        | 0,386                  | 9,45     | -           | -        |
| 0,578                   | 8,96     | -           | -        | 0,578                  | 9,45     | -           | -        |
| 0,771                   | 9,28     | -           | -        | 0,771                  | 9,69     | -           | -        |
| 0,964                   | 9,28     | -           | -        | 0,963                  | 9,97     | -           | -        |
| Длина подхода 1000,00 м |          |             |          | Длина подхода м        |          |             |          |
| Нижняя КОВ              |          | Верхняя КОВ |          | Нижняя КОВ             |          | Верхняя КОВ |          |
| $t$ , мкс               | $U$ , МВ | $t$ , мкс   | $U$ , МВ | $t$ , мкс              | $U$ , МВ | $t$ , мкс   | $U$ , МВ |
| 0,0963                  | 10,2     | 0,0962      | 11,6     | -                      | -        | -           | -        |
| 0,193                   | 10,2     | 0,192       | 11,4     | -                      | -        | -           | -        |
| 0,289                   | 10,2     | 0,289       | 11,3     | -                      | -        | -           | -        |
| 0,385                   | 10,5     | 0,385       | 11,3     | -                      | -        | -           | -        |
| 0,481                   | 10,5     | 0,481       | 11,1     | -                      | -        | -           | -        |

## Результаты расчета надежности грозозащиты\*

|                                          |          |
|------------------------------------------|----------|
| Показатель грозоупорности, $N_{н.в}$     | 0,000576 |
| Число лет безаварийной работы, $T_{н.в}$ | 1740     |

Примечания:

\* Приведенные в табл. И13 показатели грозоупорности  $N_{н.в}$  и  $T_{н.в}$  получены для трансформатора (узел 3) при прорывах молнии мимо тросовой защиты ВЛ1 (узел 1). Расстояние между трансформатором и защитным аппаратом – ОПН (узлами 3 и 13 и узлами 4 и 14) составляет 150 м. Сопротивление заземления опор – 10 Ом. Исходные данные приведены в таблицах И1-И11, промежуточные результаты в виде серий кривых опасных волн – в табл. И12.

Таблица И14

Результаты расчета надежности грозозащиты трансформатора в узле 3 подстанции 500 кВ  
при варьировании расстояний между трансформатором и защитным аппаратом (узел 13).  
( $R_3 = 10 \text{ Ом}$ )

| l <sub>Т-опн</sub> ,<br>м | Прорывы мимо тросовой защиты              |                           |                                           |                           |                                           |                           | Обратные перекрытия                       |                           |                                           |                           |                                           |                           | Сумма                                     |                           |
|---------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|
|                           | Удары в ВЛ1                               |                           | Удары в ВЛ2                               |                           | Сумма                                     |                           | Удары в ВЛ1                               |                           | Удары в ВЛ2                               |                           | Сумма                                     |                           |                                           |                           |
|                           | $N_{\text{н.в.}} \cdot 10^{-6},$<br>1/год | $T_{\text{н.в.}},$<br>лет | $N_{\text{н.в.}} \cdot 10^{-6},$<br>1/год | $T_{\text{н.в.}},$<br>лет | $N_{\text{н.в.}} \cdot 10^{-6},$<br>1/год | $T_{\text{н.в.}},$<br>лет | $N_{\text{н.в.}} \cdot 10^{-6},$<br>1/год | $T_{\text{н.в.}},$<br>лет | $N_{\text{н.в.}} \cdot 10^{-6},$<br>1/год | $T_{\text{н.в.}},$<br>лет | $N_{\text{н.в.}} \cdot 10^{-6},$<br>1/год | $T_{\text{н.в.}},$<br>лет | $N_{\text{н.в.}} \cdot 10^{-6},$<br>1/год | $T_{\text{н.в.}},$<br>лет |
| 60                        | 26                                        | 37500                     | 67                                        | 14900                     | 94                                        | 10600                     | 340                                       | 2940                      | 1                                         | 1547                      | 341                                       | 2940                      | 435                                       | 2290                      |
| 85                        | 51                                        | 19200                     | 41                                        | 24000                     | 94                                        | 10600                     | 98                                        | 10200                     | 1                                         | 2218                      | 99                                        | 10100                     | 193                                       | 5180                      |
| 120                       | 139                                       | 7190                      | 78                                        | 12800                     | 218                                       | 4580                      | 612                                       | 1630                      | 267                                       | 3,73                      | 880                                       | 1140                      | 1098                                      | 910                       |
| 150                       | 75                                        | 1740                      | 532                                       | 1880                      | 1108                                      | 910                       | 407                                       | 2460                      | 358                                       | 2,79                      | 765                                       | 1310                      | 1874                                      | 540                       |
| 230                       | 500                                       | 2000                      | 790                                       | 1260                      | 1292                                      | 780                       | 1751                                      | 570                       | 1475                                      | 0,68                      | 3225                                      | 310                       | 4511                                      | 220                       |

Таблица И15

Результаты расчета надежности грозозащиты трансформатора в узле 3 подстанции 500 кВ  
при варьировании расстояний между трансформатором и защитным аппаратом (узел 13).  
( $R_3=20$  Ом)

| l <sub>Т-ОПН</sub> ,<br>м | Прорывы мимо тросовой защиты     |                  |                                  |                  |                                  |                  | Обратные перекрытия              |                  |                                  |               |                               |               | Сумма                         |               |
|---------------------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|---------------|-------------------------------|---------------|-------------------------------|---------------|
|                           | Удары в ВЛ1                      |                  | Удары в ВЛ2                      |                  | Сумма                            |                  | Удары в ВЛ1                      |                  | Удары в ВЛ2                      |               | Сумма                         |               |                               |               |
|                           | $N_{НБ} \cdot 10^{-6},$<br>1/год | $T_{НБ},$<br>лет | $N_{НБ} \cdot 10^{-6},$<br>1/год | $T_{НБ},$<br>лет | $N_{НБ} \cdot 10^{-6},$<br>1/год | $T_{НБ},$<br>лет | $N_{НБ} \cdot 10^{-6},$<br>1/год | $T_{НБ},$<br>лет | $N_{НБ} \cdot 10^{-6},$<br>1/год | $T_{НБ},$ лет | $N_{НБ} \cdot 10^{-6},$ 1/год | $T_{НБ},$ лет | $N_{НБ} \cdot 10^{-6},$ 1/год | $T_{НБ},$ лет |
| 60                        | 30                               | 33800            | 140                              | 7130             | 170                              | 5900             | 3047                             | 330              | 1                                | 1547000       | 3040                          | 330           | 3209                          | 314           |
| 85                        | 64                               | 15700            | 42                               | 24030            | 105                              | 9500             | 3678                             | 280              | 3644                             | 280           | 7335                          | 140           | 7416                          | 135           |
| 120                       | 388                              | 2590             | 87                               | 11460            | 475                              | 2110             | 4723                             | 200              | 4527                             | 220           | 9213                          | 110           | 9644                          | 104           |
| 150                       | 140                              | 7170             | 267                              | 3730             | 406                              | 24600            | 8053                             | 120              | 4469                             | 220           | 12546                         | 80            | 12988                         | 78            |
| 230                       | 593                              | 1680             | 590                              | 0                | 1183                             | 850              | 11649                            | 85               | 10947                            | 90            | 22802                         | 44            | 23726                         | 43            |

Таблица И16

Результаты расчета надежности грозозащиты трансформатора в узле 4 подстанции 500 кВ  
при варьировании расстояний между трансформатором и защитным аппаратом (узел 14).  
( $R_3=10 \text{ Ом}$ )

| $l_{\text{Т-ОПН}},$<br>м | Прорывы мимо тросовой защиты              |                           |                                           |                           |                                           |                           | Обратные перекрытия                       |                        |                                           |                        |                                           |                        | Сумма                                     |                           |
|--------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|------------------------|-------------------------------------------|------------------------|-------------------------------------------|------------------------|-------------------------------------------|---------------------------|
|                          | Удары в ВЛ1                               |                           | Удары в ВЛ2                               |                           | Сумма                                     |                           | Удары в ВЛ1                               |                        | Удары в ВЛ2                               |                        | Сумма                                     |                        |                                           |                           |
|                          | $N_{\text{н.в.}} \cdot 10^{-6},$<br>1/год | $T_{\text{н.в.}},$<br>лет | $N_{\text{н.в.}} \cdot 10^{-6},$<br>1/год | $T_{\text{н.в.}},$<br>лет | $N_{\text{н.в.}} \cdot 10^{-6},$<br>1/год | $T_{\text{н.в.}},$<br>лет | $N_{\text{н.в.}} \cdot 10^{-6},$<br>1/год | $T_{\text{н.в.}},$ лет | $N_{\text{н.в.}} \cdot 10^{-6},$<br>1/год | $T_{\text{н.в.}},$ лет | $N_{\text{н.в.}} \cdot 10^{-6},$<br>1/год | $T_{\text{н.в.}},$ лет | $N_{\text{н.в.}} \cdot 10^{-6},$<br>1/год | $T_{\text{н.в.}},$<br>лет |
| 60                       | 23                                        | 43070                     | 66                                        | 15160                     | 89                                        | 11220                     | 1                                         | 1375000                | 1                                         | 1675000                | 13                                        | 756000                 | 92                                        | 10900                     |
| 85                       | 51                                        | 19410                     | 152                                       | 6580                      | 203                                       | 4920                      | 1                                         | 2902000                | 1                                         | 2311000                | 1                                         | 1283000                | 204                                       | 4900                      |
| 120                      | 170                                       | 5880                      | 84                                        | 11890                     | 254                                       | 3940                      | 231                                       | 4320                   | 242                                       | 4140                   | 473                                       | 2110                   | 727                                       | 1370                      |
| 150                      | 531                                       | 1880                      | 524                                       | 1900                      | 1054                                      | 940                       | 298                                       | 3360                   | 304                                       | 3290                   | 602                                       | 1660                   | 1657                                      | 610                       |
| 230                      | 788                                       | 1270                      | 789                                       | 1270                      | 1576                                      | 630                       | 1513                                      | 665                    | 1386                                      | 720                    | 2895                                      | 350                    | 1577                                      | 630                       |

Таблица И17

Результаты расчета надежности грозозащиты трансформатора в узле 4 подстанции 500 кВ  
при варьировании расстояний между трансформатором и защитным аппаратом (узел 14).  
( $R_3 = 20 \text{ Ом}$ )

| $l_{\text{Т-ОПН}},$<br>м | Прорывы мимо тросовой защиты                   |                           |                                                |                           |                                                |                           | Обратные перекрытия                            |                           |                                                |                           |                                                |                           | Сумма                                          |                           |
|--------------------------|------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------|---------------------------|
|                          | Удары в ВЛ 1                                   |                           | Удары в ВЛ2                                    |                           | Сумма                                          |                           | Удары в ВЛ1                                    |                           | Удары в ВЛ2                                    |                           | Сумма                                          |                           |                                                |                           |
|                          | $N_{\text{н.в.}}$<br>$\cdot 10^{-6},$<br>1/год | $T_{\text{н.в.}},$<br>лет | $N_{\text{н.в.}}$<br>$\cdot 10^{-6},$<br>1/год | $T_{\text{н.в.}},$<br>лет | $N_{\text{н.в.}}$<br>$\cdot 10^{-6},$<br>1/год | $T_{\text{н.в.}},$<br>лет | $N_{\text{н.в.}}$<br>$\cdot 10^{-6},$<br>1/год | $T_{\text{н.в.}},$<br>лет | $N_{\text{н.в.}}$<br>$\cdot 10^{-6},$<br>1/год | $T_{\text{н.в.}},$<br>лет | $N_{\text{н.в.}}$<br>$\cdot 10^{-6},$<br>1/год | $T_{\text{н.в.}},$<br>лет | $N_{\text{н.в.}}$<br>$\cdot 10^{-6},$<br>1/год | $T_{\text{н.в.}},$<br>лет |
| 60                       | 35                                             | 28500                     | 66                                             | 15160                     | 101                                            | 9890                      | 3396                                           | 300                       | 1428                                           | 700                       | 4830                                           | 200                       | 4931                                           | 200                       |
| 85                       | 66                                             | 15140                     | 38                                             | 26400                     | 104                                            | 9610                      | 4424                                           | 220                       | 3452                                           | 300                       | 7880                                           | 130                       | 7945                                           | 126                       |
| 120                      | 94                                             | 10610                     | 70                                             | 14200                     | 164                                            | 6080                      | 275                                            | 3620                      | 4298                                           | 240                       | 4569                                           | 220                       | 4749                                           | 200                       |
| 150                      | 270                                            | 3700                      | 95                                             | 10500                     | 365                                            | 2740                      | 4673                                           | 220                       | 4690                                           | 204                       | 9368                                           | 110                       | 9693                                           | 104                       |
| 230                      | 183                                            | 5470                      | 183                                            | 5490                      | 365                                            | 2740                      | 7837                                           | 130                       | 9732                                           | 100                       | 17501                                          | 57                        | 17817                                          | 55                        |

## Расчет напряжения на изоляции силового трансформатора при заданной волне перенапряжения

### 1 Правило эквивалентной волны

Расчет производится по правилу эквивалентной волны. Данный метод заключается в следующем: пусть в узле  $x$  сходятся  $n$  линий, по которым в узел  $x$  набегают волны перенапряжения  $U_{mx}$ . К узлу  $x$  подключено сопротивление нагрузки  $Z_x$ . Каждая линия обладает собственным волновым сопротивлением  $W_m$  (рис. К1.).

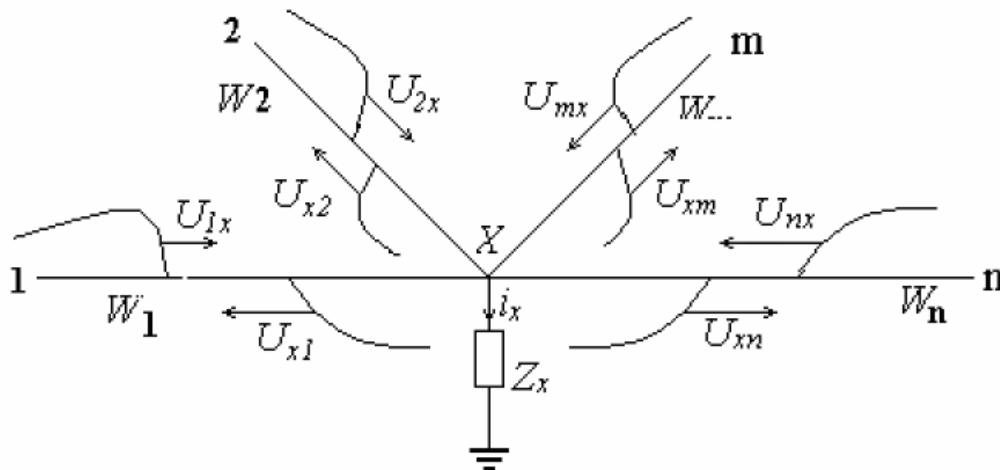


Рис. К1. Схема с распределенными параметрами

В соответствии с правилом эквивалентной волны (ПЭВ) схема с распределенными параметрами (рис. К1) приводится к схеме с сосредоточенными параметрами (рис. К2).

Эквивалентное волновое сопротивление  $W_{э\kappa\text{в}}$  находится параллельным сложением всех волновых сопротивлений линий, сходящихся в узле  $x$ :

$$\frac{1}{W_{э\kappa\text{в}}} = \frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2} + \dots + \frac{1}{W_m} + \dots + \frac{1}{W_n}. \quad (\text{К1})$$

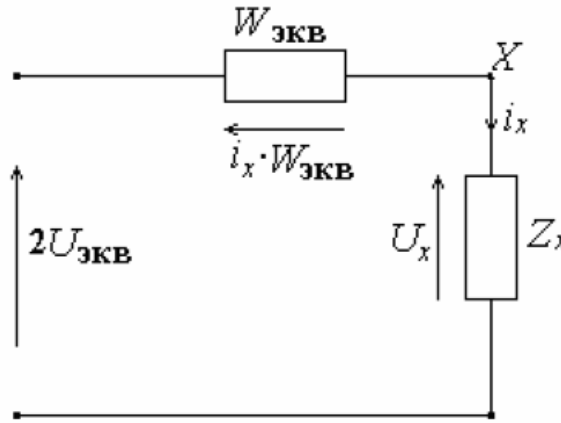


Рис. К2. Эквивалентная схема с сосредоточенными параметрами

Падающие волны заменены включением ЭДС  $E=2U_{\text{эКВ}}$ , равной сумме преломленных в узле  $x$  волн, т.е.

$$2U_{\text{эКВ}} = \sum_{m=1}^n \alpha_{mx} \cdot U_{mx}, \quad (\text{K2})$$

где  $\alpha_{mx} = \frac{2W_{\text{эКВ}}}{W_m}$  – коэффициент преломления в узле  $x$ , проходящей по линии  $m$ .

Ток через сопротивление  $z_x$  будет равен:

$$i_x = \frac{2U_{\text{эКВ}}}{z_x + W_{\text{эКВ}}}, \quad (\text{K3})$$

тогда искомое напряжение в узле  $x$  найдется из уравнения:

$$2U_{\text{эКВ}} = U_x + i_x \cdot W_{\text{эКВ}}. \quad (\text{K4})$$

При этом в выражении (K2) необходимо учитывать запаздывание волн, приходящих в узел  $x$  относительно друг друга.

## 2 Расчет напряжений в узловых точках подстанции методом бегущих волн

Метод бегущих волн, включая в себя правило эквивалентной волны, позволяет производить расчет схем содержащих ряд узлов. Для этого определяют по правилу эквивалентной волны суммарное напряжение  $U_x(t)$  в каждом из узлов, возникающее вследствие прихода в узел волн  $U_{mx}(t)$  по всем линиям. Далее вычисляют для каждой из линий волну, распространяющуюся от данного узла к соседнему:  $U_{xm} = U_x - U_{mx}$ . Каждая из этих условных отраженных

волн  $U_{xm}$  (с соответствующим смещением во времени) будет для соседнего узла  $m$  приходящей волной.

Для расчета напряжений в узловых точках подстанции выбрана простейшая схема, приведенная на рис К3. В табл. К1 приведены исходные данные для расчета и характеристики используемого разрядника РВС-220.

Таблица К1

| $U_n$ ,<br>кВ | $U_{п}$ ,<br>кВ | $\tau_{ф}$ ,<br>мкс | $l_{12}$ ,<br>м | $W_1$ ,<br>Ом | $W_2$ ,<br>Ом | $C_T$ ,<br>пФ | $U_{пр}$ ,<br>кВ | $U_{ост}$ , кВ при токах |      |       |
|---------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|------------------|--------------------------|------|-------|
|               |                 |                     |                 |               |               |               |                  | 3кА                      | 5 кА | 10 кА |
| 220           | 900             | 0,3                 | 36              | 600           | 700           | 1230          | 530              | 630                      | 670  | 734   |

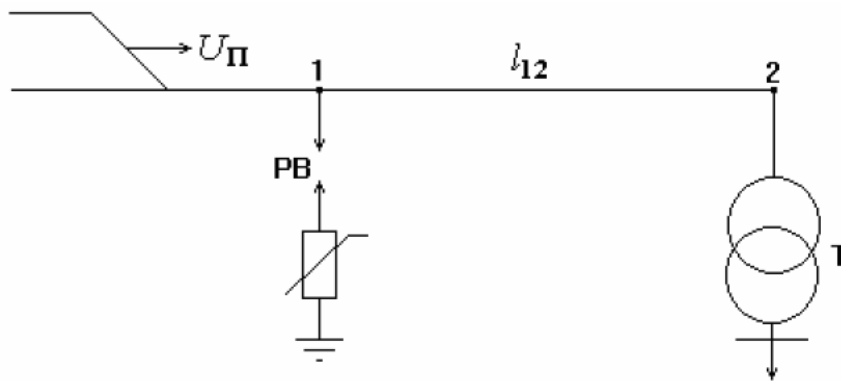


Рис. К3. Схема подстанции

На рис. К4 изображена схема замещения подстанции, в которой трансформатор заменен входной емкостью.

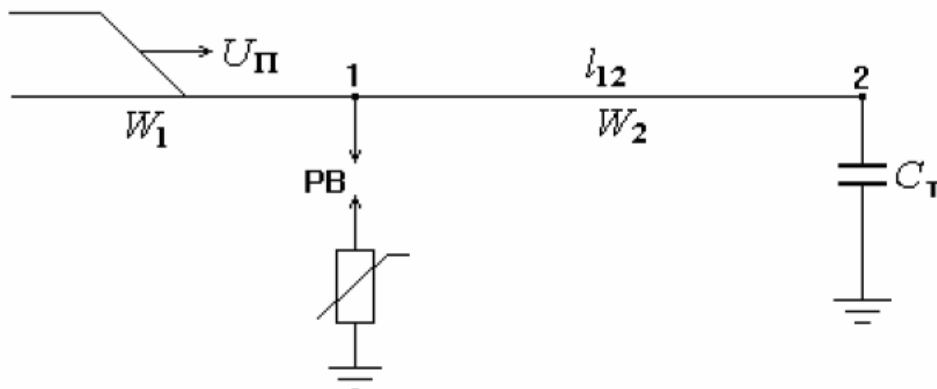


Рис. К4. Схема замещения подстанции

Порядок расчета:

1. Рассчитывается крутизна волны перенапряжения:

$$a = \frac{U}{\tau_{\phi}} = \frac{900}{0,3} = 3000 \frac{\kappa B}{\text{мкс}} . \quad (\text{K5})$$

2. Выбирается расчетный интервал времени  $\Delta t$ . Обычно для достижения высокой точности расчета рекомендуется  $\Delta t$  выбирать из условия:

$$\Delta t = \left( \frac{1}{50} \div \frac{1}{100} \right) \tau_{\phi} . \quad (\text{K6})$$

В этом случае достигается высокая точность расчета. Но в условиях ручного счета обычно снижают требования к точности, и рекомендуется выбирать  $\Delta t = 0,1 \Delta \tau_{\phi}$ . В нашем примере  $\Delta t = 0,03$  мкс.

3. Заменяется нелинейная вольтамперная характеристика (ВАХ) вентильного разрядника (РВ) отрезками прямых и находятся уравнения этих отрезков.

Когда срабатывает РВ, то в соответствии с правилом эквивалентной волны схема замещения узла с разрядником будет иметь вид (рис. К5).

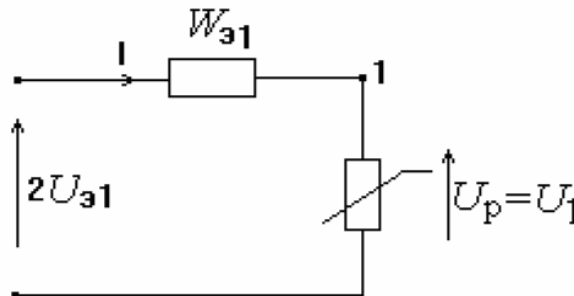


Рис. К5. Эквивалентная схема замещения узла с разрядником

Уравнение (К8) является уравнением прямой линии, которая отсекает на оси ординат отрезок  $2U_{з1}$ , а на оси абсцисс отрезок  $2U_{з1}/W_1$ . Вентильный разрядник сработает, когда  $2U_{з1} = U_{пр}$ , следовательно, точку 1 на ВАХ можно найти, если провести линию через точку  $U_{пр}$  на оси ординат и через точку  $U_{пр}/W_{з1}$  на оси абсцисс (рис. К6).

На основании второго закона Кирхгофа можно записать:

$$2U_{з1} = U_p + I \cdot W_{з1} , \quad (\text{K7})$$

откуда

$$U_p = 2U_{э1} - I \cdot W_{э1} \quad (K8)$$

Примечание: вольтамперная характеристика РВ задается тремя точками при токах 3, 5, 10 кА и соответствующим этим токам  $U_{ост}$ . Начальный же участок ВАХ от 0 до 3 кА проводится фактически произвольно. В связи с этим положение точки 1 как точки пересечения начального участка ВАХ с прямой линией по уравнению (K8) также определяется фактически произвольно. Точка 1 выбирается на прямой по уравнению (K8) вблизи точки пересечения, чтобы обеспечить наиболее точное определение координат  $I_1$ ;  $U_1$ , которые используются в дальнейшем при расчете параметров уравнений отрезков 1-2 и 2-3 ВАХ. При этом следует отметить, что некоторый произвол в выборе точки 1, по-видимому, не внесет значительной погрешности в расчет напряжения в узловых точках подстанции, так как точка 1 определяет наклон начального участка ВАХ защитного аппарата.

Точка 3 на ВАХ выбирается при токе 10 кА. Точка 2 выбирается из соображений лучшей аппроксимации нелинейной ВАХ прямыми отрезками. Через выбранную точку 2 проводится прямая параллельная прямой, проходящей через точку 1. Эта прямая отсекает на оси ординат значение  $U_r$ , которое можно определить по выражению:

$$U_r = U_2 + I_2 \cdot W_{э1}, \quad (K9)$$

где  $I_2$ ,  $U_2$  – координаты точки 2, определяемые из графика;  $W_{э1}$  – эквивалентное сопротивление линий, сходящихся в узле 1.

Значение  $U_r$  определяет условие перехода с отрезка 1-2 ВАХ на отрезок 2-3.

Прямую линию через точку 2 можно и не проводить, т.к. значение  $U_r$  определяется расчетным путем по формуле (K9). Но координаты  $I_2$ ,  $U_2$  должны быть определены с максимальной точностью. Поэтому рекомендуется точку 2 выбирать из табличных данных ВАХ вентильного разрядника (3 кА;  $U_{ост3}$ ).

$$U_r = 630 + 3 \cdot 323,08 = 1599,2 \text{ кВ}$$

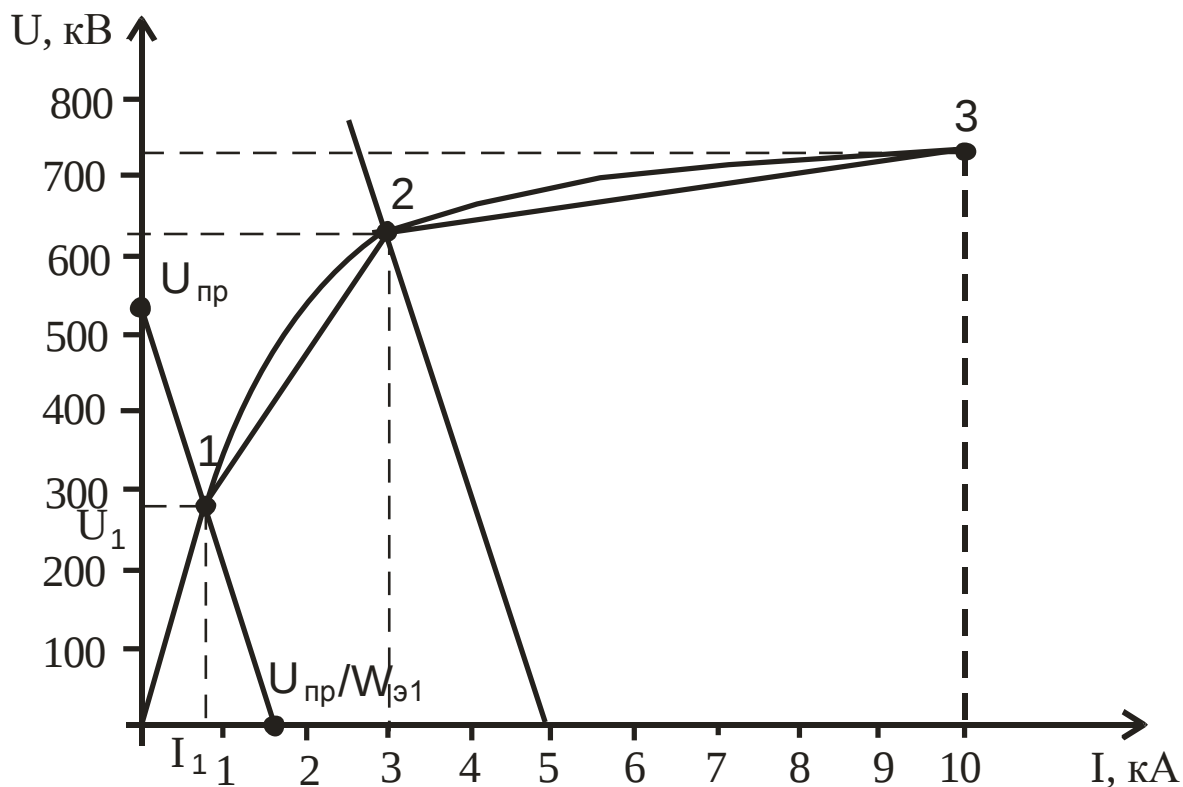


Рис. К6. Замена реальной ВАХ РВ двумя отрезками прямых

Уравнение прямой, проходящей через точки 1 – 2 имеет вид:

$$U_p = E_1 + I \cdot Z_{p1}. \quad (K10)$$

Значение  $E_1$  находится из графика (рис. К6) или вычисляется по формуле:

$$E_1 = \frac{U_1 I_2 - U_2 I_1}{I_2 - I_1} = \frac{275 \cdot 3 - 630 \cdot 0,75}{3 - 0,75} = 156,7 \text{ кВ}, \quad (K11)$$

где  $I_1, U_1$  – координаты точки 1;

$I_2, U_2$  – координаты точки 2.

Сопротивление разрядника  $Z_{p1}$  определяется по формуле:

$$Z_{p1} = \frac{U_2 - U_1}{I_2 - I_1} = \frac{630 - 275}{3 - 0,75} = 157,8 \text{ Ом}. \quad (K12)$$

Уравнения (K7) и (K10) решаются совместно:

$$\begin{cases} 2U_{э1} = U_p + I \cdot W_{э1} \\ U_p = E_1 + I \cdot Z_{p1} \end{cases} \quad (K13)$$

$$I = \frac{U_p - E_1}{Z_{p1}};$$

$$\begin{aligned}
2U_{\text{э1}} &= U_{\text{п}} + \frac{U_{\text{п}} \cdot W_{\text{э1}} - E_1 \cdot W_{\text{э1}}}{Z_{\text{п1}}}; \\
2U_{\text{э1}} \cdot Z_{\text{п1}} &= U_{\text{п}} \cdot Z_{\text{п1}} + U_{\text{п}} \cdot W_{\text{э1}} - E_1 \cdot W_{\text{э1}}; \\
U_{\text{п}}(Z_{\text{п1}} + W_{\text{э1}}) &= 2U_{\text{э1}} \cdot Z_{\text{п1}} + E_1 \cdot W_{\text{э1}}; \\
U_{\text{п}} &= \frac{Z_{\text{п1}}}{Z_{\text{п1}} + W_{\text{э1}}} \cdot 2U_{\text{э1}} + \frac{E_1 \cdot W_{\text{э1}}}{Z_{\text{п1}} + W_{\text{э1}}}; \quad (\text{K14})
\end{aligned}$$

или

$$U_{\text{п}} = b_1 \cdot 2U_{\text{э1}} + d_1; \quad (\text{K15})$$

где

$$\begin{aligned}
b_1 &= \frac{Z_{\text{п1}}}{Z_{\text{п1}} + W_{\text{э1}}}, \quad d_1 = \frac{E_1 \cdot W_{\text{э1}}}{Z_{\text{п1}} + W_{\text{э1}}}. \\
b_1 &= \frac{157,8}{157,8 + 323,08} = 0,328, \quad d_1 = \frac{156,7 \cdot 323,08}{157,8 + 323,08} = 105,3 \text{ кВ}.
\end{aligned}$$

Учитывая, что  $U_{\text{п}} = U_1$ , для узла 1 имеем:

$$U_1 = b_1 \cdot 2U_{\text{э1}} + d_1, \quad (\text{K16})$$

Для второго отрезка ВАХ 2-3 можно также записать:

$$U_{\text{п}} = E_2 + I \cdot Z_{\text{п2}}. \quad (\text{K17})$$

Тогда повторив вышеприведенные рассуждения, получим:

$$U_1 = b_2 \cdot 2U_{\text{э1}} + d_2, \quad (\text{K18})$$

где

$$b_2 = \frac{Z_{\text{п2}}}{Z_{\text{п2}} + W_{\text{э1}}}, \quad d_2 = \frac{E_2 \cdot W_{\text{э1}}}{Z_{\text{п2}} + W_{\text{э1}}},$$

где

$$\begin{aligned}
Z_{\text{п2}} &= \frac{U_3 - U_2}{I_3 - I_2}; \quad E_2 = \frac{U_2 I_3 - U_3 I_2}{I_3 - I_2}. \\
Z_{\text{п2}} &= \frac{734 - 630}{10 - 3} = 14,86 \text{ Ом}; \quad E_2 = \frac{630 \cdot 10 - 734 \cdot 3}{10 - 3} = 585,43 \text{ кВ}. \\
b_2 &= \frac{14,86}{14,86 + 323,08} = 0,044, \quad d_2 = \frac{585,43 \cdot 323,08}{14,86 + 323,08} = 559,7 \text{ кВ},
\end{aligned}$$

Таким образом, для узла 1, где подключен вентильный разрядник, используются следующие уравнения для нахождения напряжения  $U_1$ :

$$1. U_1 = 2 \cdot U_{\text{э1}} \text{ до пробоя РВ}; \quad (\text{K19})$$

$$2. U_1 = b_1 \cdot 2U_{\text{э1}} + d_1, \text{ если } U_{\text{пр}} \leq 2 \cdot U_{\text{э1}} \leq U_{\text{г}}; \quad (\text{K20})$$

$$3. U_1 = b_2 \cdot 2U_{\text{э1}} + d_2, \text{ если } 2 \cdot U_{\text{э1}} > U_{\text{г}}. \quad (\text{K21})$$

Для нашего примера построения и расчеты дали, следующие результаты:

$U_{\text{г}} = 1599,2 \text{ кВ}; b_1 = 0,328; d_1 = 105,3 \text{ кВ}; b_2 = 0,044; d_2 = 559,7 \text{ кВ}.$

4. Расчет эквивалентных сопротивлений для каждого узла ( $W_{\text{э1}}; W_{\text{э2}}; W_{\text{э3}}$ ) и коэффициентов преломления для каждой линии ( $\alpha_{11}; \alpha_{21}; \alpha_{22}$ ).

$$W_{\text{э1}} = \frac{W_1 \cdot W_2}{W_1 + W_2} = \frac{600 \cdot 700}{600 + 700} = 323,08 \text{ Ом}; \quad W_{\text{э2}} = W_2 = 700 \text{ Ом};$$

$$\alpha_{11} = \frac{2W_{\text{э1}}}{W_1}; \quad \alpha_{21} = \frac{2W_{\text{э1}}}{W_2}; \quad \alpha_{22} = \frac{2W_{\text{э2}}}{W_2};$$

$$\alpha_{11} = 1,077; \alpha_{21} = 0,923; \alpha_{22} = 2.$$

5. На основе приведенных формул составляется таблица исходных данных (табл. K2).

6. Составим расчетные уравнения для каждого узла.

Узел 1.

$$2U_{\text{э1}} = U_1 + i_1 \cdot W_{\text{э1}}. \quad (\text{K22})$$

Пока разрядник не сработал  $i_1=0$  и

$$2U_{\text{э1}} = U_1 \quad (\text{K23})$$

$$2U_{\text{э1}} = \sum_{m=1}^n \alpha_{m1} \cdot U_{m1}, \quad (\text{K24})$$

где  $U_{m1}$  – волна напряжения, идущая по m-ной линии к узлу 1;

$\alpha_{m1}$  – коэффициент преломления для волны  $U_{m1}$ ;

$n$  – число линий, сходящихся в узле 1.

Учитывая принятые обозначения, запишем уравнение (K20) в виде:

$$2U_{\text{э1}} = \alpha_{11}U_{\text{п}} + \alpha_{21}U'_{21}, \quad (\text{K25})$$

где  $U'_{21}$  – значение отраженной от точки 2 волны, которая приходит в узел 1 с запаздыванием на время двойного пробега по участку 1 – 2, т.е:

$$U'_{21} = U_{21}(t - 2t_{12}). \quad (\text{K26})$$

Исходные данные

| Параметр          | $a$ , кВ/мкс  | $\Delta t$ , мкс     |                      |       | $t_{12}$ , мкс |
|-------------------|---------------|----------------------|----------------------|-------|----------------|
| Числовое значение | 3000          | 0,03                 |                      |       | 0,12           |
| Параметр          | $b_1$         | $d_1$                | $b_2$                | $d_2$ |                |
| Числовое значение | 0,33          | 105,3                | 0,044                | 559,7 |                |
| Параметр          | $U_r$ , кВ    | $W_{\text{э}1}$ , Ом | $W_{\text{э}2}$ , Ом |       |                |
| Числовое значение | 1599          | 323,08               | 700                  |       |                |
| Параметр          | $\alpha_{11}$ | $\alpha_{21}$        | $\alpha_{22}$        |       |                |
| Числовое значение | 1,077         | 0,923                | 2                    |       |                |

Таким образом, до пробоя РВ напряжение в узле 1 определяется по формуле:

$$U_1 = 2U_{\text{э}1}. \quad (\text{K27})$$

Когда разрядник сработает:

$$\begin{aligned} U_1 &= b_1 \cdot (2U_{\text{э}1}) + d_1, \text{ если } U_{\text{пр}} \leq 2 \cdot U_{\text{э}1} \leq U_r; \\ U_1 &= b_2 \cdot (2U_{\text{э}1}) + d_2, \text{ если } 2 \cdot U_{\text{э}1} > U_r. \end{aligned} \quad (\text{K28})$$

Определим волну напряжения, идущую от узла 1 к узлу 2 –  $U_{12}$ :

$$U_{12} = U_1 - U'_{21} = U_1 - U_{21}(t - 2t_{12}). \quad (\text{K29})$$

Узел 2

$$2U_{\text{э}2} = U_2 + i_2 \cdot W_{\text{э}2}, \quad i_2 = C \frac{dU_2}{dt}, \quad (\text{K30})$$

$$2U_{\text{э}2} = U_2 + C \cdot W_{\text{э}2} \cdot \frac{dU_2}{dt}, \quad (\text{K31})$$

$$\frac{dU_2}{dt} + \frac{1}{C \cdot W_{\text{э}2}} U_2 = \frac{1}{C \cdot W_{\text{э}2}} 2U_{\text{э}2}, \quad (\text{K32})$$

$$\frac{dU_2}{dt} + \frac{1}{T} U_2 = \frac{1}{T} 2U_{\text{э}2}; \quad T = C \cdot W_{\text{э}2} = 700 \cdot 1230 \cdot 10^{-12} = 0,861 \text{ мкс}. \quad (\text{K33})$$

Волна, отраженная от узла 2, равна:

$$U_{21} = U_2 - U_{12}. \quad (\text{K34})$$

Напряжение  $U_2$  находится графическим методом подкасательной.

Метод подкастальной позволяет рассчитать напряжение на емкости при воздействии на неё импульса напряжения произвольной формы. Рассмотрим схему, в которой волна перенапряжения произвольной формы набегаёт на ёмкость  $C$  по линии с волновым сопротивлением  $W$  (рис. К7).

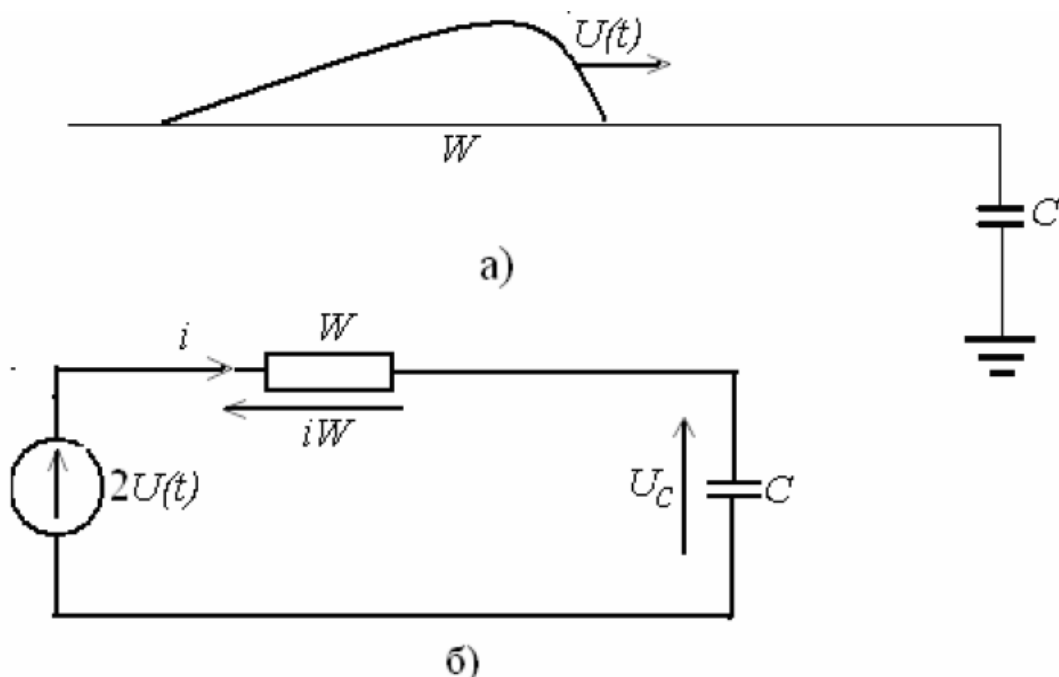


Рис. К7. а) схема с распределенными параметрами  
б) схема замещения с сосредоточенными параметрами

На основании 2-го закона Кирхгофа для схемы б запишется

$U_c + i \cdot W = 2U(t)$ ; ток через ёмкость равен  $i = C \frac{dU_c}{dt}$ ; с учетом этого можно записать:

$$U_c + C \frac{dU_c}{dt} W = 2U(t), \quad (\text{K35})$$

или

$$\frac{dU_c}{dt} + \frac{1}{WC} U_c = \frac{1}{WC} 2U(t), \quad (\text{K36})$$

где  $WC = T$  – постоянная времени данной схемы.

В итоге получим расчетное дифференциальное уравнение в виде:

$$\frac{dU_c}{dt} + \frac{1}{T} U_c = \frac{1}{T} 2U(t). \quad (\text{K37})$$

Полученное уравнение можно решить графическим методом подкасательной, который разработал и внедрил М.В. Костенко. Для этого необходимо построить функцию  $2U(t)$  в координатах  $U_2O_2t$ , а также провести координатную систему  $U_1O_1t$ , сдвинутую влево по времени на величину постоянной  $T$  (рис. К8). В координатах  $U_1O_1t$  и будет осуществляться построение искомого напряжения на емкости  $U_c(t)$ . При этом необходимо отметить, что  $U_c(0)=0$ , т.е. емкость не заряжена (нулевые начальные условия). Отрезок  $O_1O_2$  оси времени разбивается на 8 отрезков длительностью  $\Delta t_k$  ( $\Delta t_1 - \Delta t_8$ ). На отрезке  $O_2 - t$  откладываются отрезки  $\Delta \tau_k$ , равные временным отрезкам  $\Delta t_k$  ( $\Delta \tau_1 - \Delta \tau_{12}$ ). Из середины каждого отрезка  $\Delta \tau_k$  восстанавливается перпендикуляр (пунктирная линия) до пересечения с кривой  $2U(t)$  и находятся точки  $B_1 - B_{12}$ . Точка  $B_1$  соединяется прямой линией с точкой  $A_0$  (рис. 4). Из конца отрезка  $\Delta t_1$  необходимо восстановить перпендикуляр до пересечения с прямой  $B_1A_0$  для получения величины напряжения на емкости  $C$  в момент времени  $\Delta t_1$  (точка  $A_1$ ). Далее соединяется прямой линией точка  $B_2$  с точкой  $A_1$  и из конца отрезка  $\Delta t_2$  восстанавливается перпендикуляр до пересечения с прямой  $B_2A_1$  и находится напряжение на емкости  $C$  в момент времени  $2\Delta t_1$  (точка  $A_2$ ). На следующем этапе построения напряжения  $U_c(t)$  соединяется точка  $B_3$  с точкой  $A_2$  и соответствующим образом находится напряжение на емкости в момент времени  $3\Delta t_1$  (точка  $A_3$ ) и так далее, пока напряжение  $U_c(t)$  не начнет снижаться. Чем меньше длительность отрезков  $\Delta t_k$  ( $\Delta \tau_k$ ), тем точнее будет определено искомое напряжение  $U_c(t)$ . При применении метода подкасательной для нахождения напряжения в узловых точках подстанции, когда напряжение  $2U(t)$  само определяется на каждом шаге расчета с учетом волн напряжения, отраженных от соседних узловых точек, порядок определения напряжения на емкости остается неизменным (на каждом шаге изменения  $2U(t)$  определяется новое значение  $U_c(t)$ ).

Постоянную  $T$  нужно изменить так, чтобы отношение  $T/\Delta t$  было целым числом: уменьшаем расчетное значение  $T$  до 0,84 мкс, тогда  $T/\Delta t = 0,84/0,03=28$ . Уменьшая  $T$ , мы этим как бы уменьшаем  $C_T$  и загроубляем расчет, т.е. величина напряжения на изоляции трансформатора будет в реальности меньше расчетной.

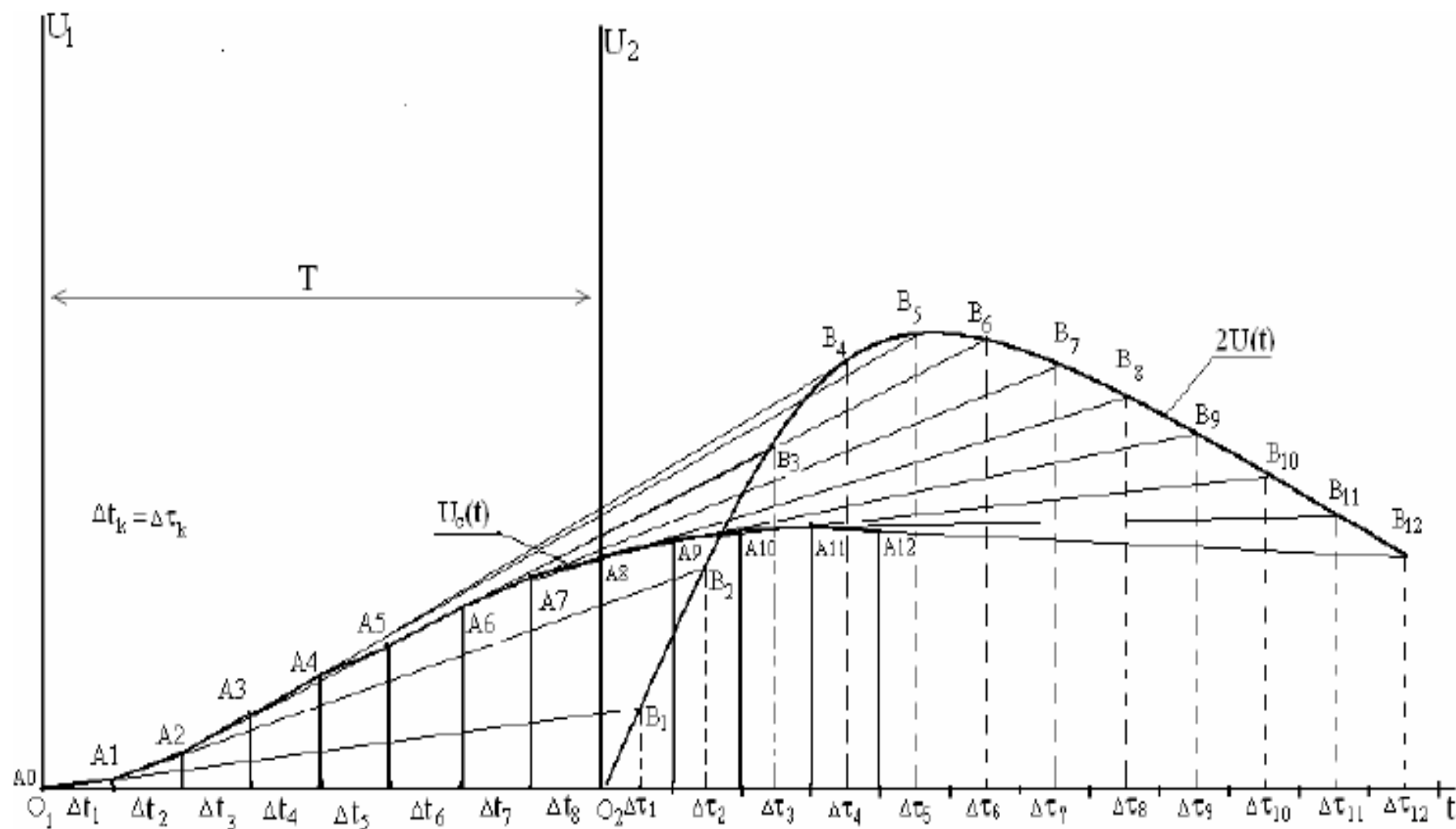


Рис. К8. Определение напряжения на емкости методом подкасательной

С учетом того, что время зарядки емкости составляет порядка  $3T$ , следовательно, необходимо будет произвести более 84 ( $28 \cdot 3$ ) расчетов, чтобы напряжение  $U_2$ , достигнув максимума начало снижаться. Для уменьшения числа расчетов можно изменить величину расчетного интервала –  $\Delta t$ .

При расчете напряжения на изоляции трансформатора  $U_2(t)$  в пределах фронта импульса используем расчетный интервал  $\Delta t_1 = 0,03$  мкс (10 строчек расчетной таблицы). Затем находим интервал  $T - \tau_\phi = 0,84 - 0,3 = 0,54$  мкс и принимаем на этом интервале расчетный интервал  $\Delta t_2 = 0,06$  мкс (девять строчек расчетной таблицы). Далее предлагается увеличить расчетный интервал ещё в два раза, т.е.  $\Delta t_3 = 0,12$  мкс и расчет ведем до начала спада напряжения  $U_2(t)$ .

При нахождении  $U_2(t)$  графически методом подкасательной выбран следующий масштаб по времени:  $\Delta t_1 = 0,03$  мкс соответствует – 5 мм. Тогда постоянная времени  $T = 0,84$  мкс соответствует – 140 мм.

При графическом расчете  $U_2(t)$  на первых двух интервалах для повышения точности изменен масштаб по оси ординат.

7. Составляется расчетная таблица, которая заполняется построчно (табл. К3)

Строится  $U_2(t)$  и на этот же график наносится допустимое напряжение для внутренней и внешней изоляции трансформатора, а также исходная (заданная) падающая волна.

Таблица КЗ

Расчет напряжения на изоляции силового трансформатора методом бегущих  
волн с применением метода подкасательной

| $t$  | $U_{01}$ | $A11U_{01}$ | $U_{21}$        | $\alpha_{21}U_{21}$ | $2U_{91}$ | $U_1$                                                                 | $U_{12}$ | $2U_{92}$ | $U_2$           | $U_{21}$ |
|------|----------|-------------|-----------------|---------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------|----------|-----------|-----------------|----------|
| $t$  | 3000A1   | 1,077A2     | A11(t-<br>0,24) | 0,923A4             | A3+A5     | 1. $U_1=2U_{91}$ ;<br>2. $U_1=0,33A6+105,3$<br>3. $U_1=0,044A6+559,7$ | A7-A4    | 2A8       | Граф.<br>расчет | A10-A8   |
| A1   | A2       | A3          | A4              | A5                  | A6        | A7                                                                    | A8       | A9        | A10             | A11      |
| 1    | 2        | 3           | 4               | 5                   | 6         | 7                                                                     | 8        | 9         | 10              | 11       |
| 0    | 0        | -           | -               | -                   | 0         | 0                                                                     | 0        | 0         | 0               | 0        |
| 0,03 | 90       | 96,9        | -               | -                   | 96,9      | 96,9                                                                  | 96,9     | 193,8     | 3               | -93,9    |
| 0,06 | 180      | 193,8       | -               | -                   | 193,8     | 193,8                                                                 | 193,8    | 387,7     | 13              | -180,8   |
| 0,09 | 270      | 290,8       | -               | -                   | 290,8     | 290,8                                                                 | 290,8    | 581,6     | 28              | -262,8   |
| 0,12 | 360      | 387,7       | -               | -                   | 387,7     | 387,7                                                                 | 387,7    | 775,4     | 50              | -337,7   |
| 0,15 | 450      | 484,7       | -               | -                   | 484,7     | 484,7                                                                 | 484,7    | 969,4     | 75              | -409,7   |
| 0,18 | 540      | 581,6       | -               | -                   | 581,6     | 297,2                                                                 | 297,2    | 594,4     | 100             | -197,2   |
| 0,21 | 630      | 678,5       | -               | -                   | 678,5     | 329,2                                                                 | 329,2    | 658,4     | 115             | -214,2   |
| 0,24 | 720      | 775,4       | 0               | 0                   | 775,4     | 361,2                                                                 | 361,2    | 772,4     | 140             | -221,2   |
| 0,27 | 810      | 872,4       | -93,9           | -86,7               | 785,7     | 364,6                                                                 | 458,5    | 917       | 160             | -298,5   |
| 0,30 | 900      | 969,3       | -180,8          | -166,9              | 802,4     | 370,1                                                                 | 551,0    | 1102      | 190             | -361     |
| 0,36 | 900      | 969,3       | -337,7          | -311,7              | 657,6     | 322,3                                                                 | 660      | 1320      | 260             | -400     |
| 0,42 | 900      | 969,3       | -197,2          | -182                | 787,3     | 365,1                                                                 | 562,3    | 1124,6    | 320             | -242,3   |

Продолжение табл. К3

| 1    | 2   | 3     | 4      | 5      | 6      | 7     | 8     | 9      | 10  | 11     |
|------|-----|-------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|-----|--------|
| 0,48 | 900 | 969,3 | -221,2 | -204,2 | 765,1  | 357,8 | 579   | 1158   | 370 | -209   |
| 0,54 | 900 | 969,3 | -361   | -333,2 | 636,1  | 315,2 | 676,2 | 1352,4 | 430 | -246,2 |
| 0,60 | 900 | 969,3 | -400   | -369,2 | 600,1  | 303,3 | 703,3 | 1406,6 | 490 | -213,3 |
| 0,66 | 900 | 969,3 | -242,3 | -223,6 | 745,7  | 351,4 | 593,7 | 1187,4 | 540 | -53,7  |
| 0,72 | 900 | 969,3 | -209   | -193   | 776,3  | 361,5 | 570,5 | 1141   | 585 | 14,5   |
| 0,78 | 900 | 969,3 | -246,2 | -227,2 | 742,1  | 350,2 | 596,4 | 1193   | 625 | 28,6   |
| 0,84 | 900 | 969,3 | -213,3 | -196,9 | 772,4  | 360,2 | 573,5 | 1147   | 660 | 86,5   |
| 0,96 | 900 | 969,3 | 14,5   | 13,4   | 982,7  | 429,6 | 415,1 | 830,2  | 700 | 284,9  |
| 1,08 | 900 | 969,3 | 86,5   | 79,8   | 1049,1 | 451,5 | 365   | 730    | 705 | 340    |
| 1,20 | 900 | 969,3 | 284,9  | 263    | 1232,3 | 512   | 227   | 454    | 685 | 458    |
| 1,32 | 900 | 969,3 | 340    | 313,8  | 1283   | 528,7 | 188,7 | 377,5  | 640 | 451,3  |
| 1,44 | 900 | 969,3 | 458    | 422,7  | 1392   | 564,7 | 106,7 | 213,4  | 595 | 488,3  |
| 1,56 | 900 | 969,3 | 451,3  | 416,5  | 1385,8 | 562,6 | 113   | 222,7  | 540 | 427    |
| 1,68 | 900 | 969,3 | 488,3  | 450,7  | 1420   | 573,9 | 85,6  | 171,2  | 499 | 413,4  |

### 3. Расчет кривой опасных параметров (КОП)

Для реализации метода бегущих волн на персональном компьютере необходимо входную емкость силового трансформатора заменить фиктивной линией на холостом ходу длиной  $l_{23}$  с волновым сопротивлением  $W_3$  (рис. К9).

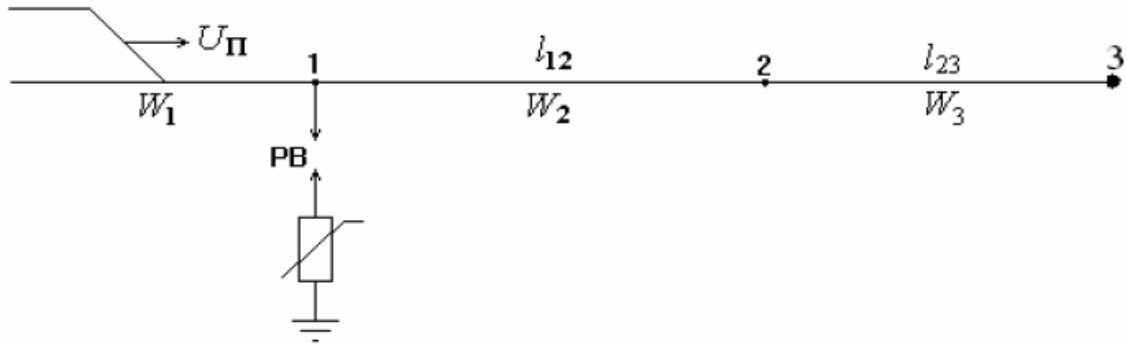


Рис. К9. Расчетная схема замещения

С целью повышения точности расчетов напряжений в узловых точках подстанции необходимо изменить исходные данные:

$$\Delta t = 0,01\tau_\phi = 0,01 \cdot 0,3 = 0,003 \text{ мкс}; \quad M = \frac{2t_{12}}{\Delta t} = \frac{2 \cdot 0,12}{0,003} = 80;$$

$$N = \frac{\tau_\phi}{\Delta t} = \frac{\tau_\phi}{0,01\tau_\phi} = 100.$$

Число шагов расчета  $P$  рекомендуется принимать из условия  $P \geq 3N$ .

Изменение  $\Delta t$  приводит к изменению параметров линии, которой заменяется входная емкость трансформатора

$$l_c = l_{23} = \nu \cdot \frac{\Delta t}{2} = \frac{0,01\tau_\phi}{2} \cdot \nu = \frac{0,01 \cdot 0,3}{2} \cdot 300 = 0,45 \text{ м}.$$

$$W_c = W_3 = \frac{\Delta t}{2C_r} = \frac{0,003 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 1230 \cdot 10^{-12}} = 1,22 \text{ Ом};$$

$$t_{23} = \frac{\Delta t}{2} = \frac{0,003}{2} = 0,0015 \text{ мкс}; \quad \nu = 300 \text{ м/мкс}.$$

При этом изменяется также эквивалентное сопротивление  $W_{32}$ ,  $W_{33}$  и коэффициенты преломления  $\alpha_{22}$ ,  $\alpha_{32}$ .

$$W_{32} = \frac{W_2 \cdot W_3}{W_2 + W_3} = \frac{700 \cdot 1,22}{700 + 1,22} = 1,22 \text{ Ом}; \quad W_{33} = W_3 = 1,22 \text{ Ом};$$

$$\alpha_{22} = \frac{2 \cdot W_{32}}{W_2} = \frac{2 \cdot 1,22}{700} = 0,0035 ;$$

$$\alpha_{32} = \frac{2 \cdot W_{32}}{W_3} = \frac{2 \cdot 1,22}{1,22} = 1,22 .$$

Для расчета кривой опасных параметров подстанции необходимо выбрать 4-5 значений длительности фронта набегающих волн перенапряжений и для каждого значения  $\tau_{\text{ф}}$  определить  $\Delta t$ ,  $M$ ,  $W_{\text{с}}$ ,  $W_{32}$ ,  $W_{33}$ ,  $\alpha_{22}$ ,  $\alpha_{32}$ . После указанных предварительных расчетов составляется таблица исходных данных, необходимых для расчета кривой опасных параметров. В программу вводят также параметры кривой допустимых импульсных перенапряжений для внутренней изоляции трансформатора (рис. К10). Данные для построения этой кривой приведены в табл. К4

Таблица К4

| $U_{\text{н}}$ , кВ | $U_1$ , кВ | $U_2$ , кВ | $U_3$ , кВ | $U_4$ , кВ | $t_2$ , мкс | $t_3$ , мкс | $t_4$ , мкс |
|---------------------|------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| 35                  | 112,5      | 225        | 225        | 160        | 1,5         | 3           | 10          |
| 110                 | 165        | 550        | 550        | 382        | 1,5         | 3           | 10          |
| 150                 | 219        | 730        | 730        | 530        | 1,5         | 2           | 8           |
| 220                 | 300        | 1000       | 1000       | 750        | 1,5         | 2           | 8           |
| 330                 | 400        | 1150       | 1150       | 1050       | 1,5         | 3           | 8           |
| 500                 | 600        | 1650       | 1650       | 1360       | 1,5         | 2           | 8           |

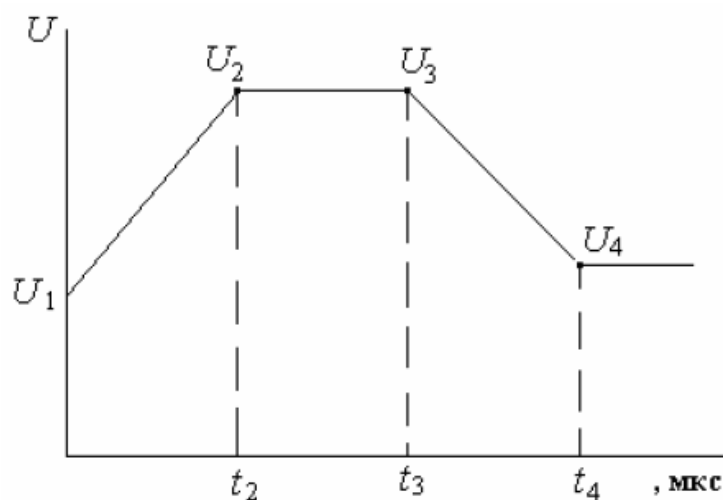


Рис. К10. Кривая допустимых импульсных перенапряжений для внутренней изоляции трансформатора

В программе используются те же уравнения, составленные ранее для каждого узла. Падающая волна представляется дискретными значениями для каждого расчетного шага:

$$U_n^k = a \cdot \Delta t \cdot K, \text{ если } (K-N) \leq 0, \quad (K38)$$

$$U_n^k = a \cdot \tau_{\phi}, \text{ если } (K-N) > 0, \quad (K39)$$

где  $K$  – порядковый номер расчетного шага.

Уравнение (K25) в программе записано в виде:

$$2U_{\text{э}1}^k = \alpha_{11} \cdot U_n^k + \alpha_{21} \cdot U_{21}^{k-m}, \quad (K40)$$

если  $(K-M) \leq 0$ , то  $U_{21}^{k-m} = 0$ .

Напряжение в узле 1 находится по уравнениям (K26, K27, K28):

$$U_1^k = 2U_{\text{э}1}^k, \text{ если } 2U_{\text{э}1}^k < U_{\text{пр}}; \quad (K41)$$

$$U_1^k = b_1 \cdot (2U_{\text{э}1}^k) + d_1, \text{ если } U_{\text{пр}} < 2U_{\text{э}1}^k < U_{\text{г}}; \quad (K42)$$

$$U_1^k = b_2 \cdot (2U_{\text{э}1}^k) + d_2, \text{ если } 2U_{\text{э}1}^k > U_{\text{г}}. \quad (K43)$$

По уравнению (K29) определяется волна напряжения  $U_{12}$ :

$$U_{12}^k = U_1^k - U_{21}^{k-m}, \text{ если } (K-M) \leq 0, \text{ то } U_{21}^{k-m} = 0. \quad (K44)$$

Для узла 2 используются уравнения (K31, K32, K33, K34):

$$U_2^k = 2U_{\text{э}2}^k, \quad 2U_{\text{э}2}^k = \alpha_{22} \cdot U_{12}^k + \alpha_{32} \cdot U_{32}^{k-1}, \text{ если } (K-1) \leq 0, \text{ то } U_{32}^{k-1} = 0. \quad (K45)$$

$$U_{21}^k = U_2^k - U_{12}^k, \quad U_{23}^k = U_2^k - U_{32}^{k-1}, \text{ если } (K-1) \leq 0, \text{ то } U_{32}^{k-1} = 0. \quad (K46)$$

При расчете напряжения в узле 3 используются уравнения (K40, K41, K42):

$$U_3^k = 2U_{\text{э}3}^k, \quad 2U_{\text{э}3}^k = \alpha_{33} \cdot U_{23}^k, \quad U_{32}^k = U_3^k - U_{23}^k. \quad (K47)$$

Расчет КОП производится следующим образом. Вводится заданная амплитуда падающей волны ( $U_{\text{П}}$ ) и длительность фронта ( $\tau_{\text{Ф}}$ ), а также все остальные параметры, приведенные в табл. К5. При этом ( $\tau_{\text{Ф}}$ ) выбирается таким образом, чтобы параметр  $M$  был целым числом.

На рис. К11 приведена кривая допустимых импульсных перенапряжений для внутренней изоляции и напряжения в узловых точках 1 и 2 ( $U_1$  и  $U_2$ ).

Если амплитуда  $U_{\text{П}}$  невелика, то перенапряжение на трансформаторе ( $U_2$ ) ниже импульсной прочности изоляции обмоток (кривая 1). Если амплитуда  $U_{\text{П}}$  велика, то  $U_2$  превысит импульсную прочность изоляции трансформатора (кривая 3) и изоляция пробьется.

## Исходные данные к расчету КОП

|                         |                   |                 |               |               |         |                 |                 |       |       |
|-------------------------|-------------------|-----------------|---------------|---------------|---------|-----------------|-----------------|-------|-------|
| Параметр                | $U_{\text{П оп}}$ | $\tau_{\Phi}^*$ | $\Delta t^*$  | $M^*$         | $W_C^*$ | $\alpha_{22}^*$ | $\alpha_{32}^*$ |       |       |
| Обозначение в программе | $U0$              | $T2$            | $T1$          | $M$           | $W_3$   | $A3$            | $A4$            |       |       |
| Числовые значения       |                   |                 |               |               |         |                 |                 |       |       |
|                         |                   |                 |               |               |         |                 |                 |       |       |
|                         |                   |                 |               |               |         |                 |                 |       |       |
|                         |                   |                 |               |               |         |                 |                 |       |       |
| Параметр                | $N$               | $P$             | $\alpha_{11}$ | $\alpha_{21}$ | $b_1$   | $d_1$           | $b_2$           | $d_2$ |       |
| Обозначение в программе | $N$               | $P$             | $A1$          | $A2$          | $B1$    | $D1$            | $B2$            | $D2$  |       |
| Числовые значения       |                   |                 |               |               |         |                 |                 |       |       |
| Параметр                | $U_{\text{ПР}}$   | $U_{\Gamma}$    | $U_1$         | $U_2$         | $t_2$   | $U_3$           | $t_3$           | $U_4$ | $T_4$ |
| Обозначение в программе | $C1$              | $C2$            | $C3$          | $C4$          | $T4$    | $C5$            | $T5$            | $C6$  | $T6$  |
| Числовые значения       |                   |                 |               |               |         |                 |                 |       |       |

Примечание: звездочкой помечены исходные параметры, которые изменяются в процессе расчета кривой опасных параметров.

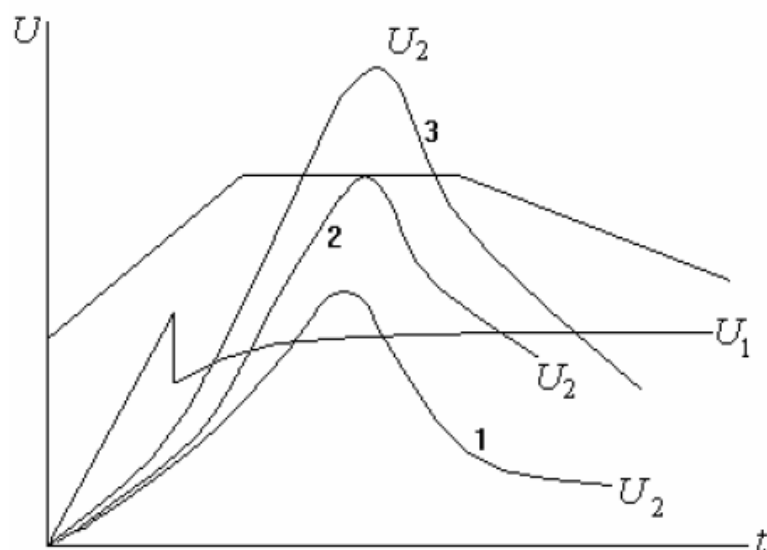


Рис. К11. Напряжения в узловых точках подстанции и кривая импульсной прочности изоляции трансформатора;  $U_2$  показано для различных амплитуд падающей волны –  $U_{\text{П}}$ .

Для нахождения КОП необходимо добиться касания кривой перенапряжения на трансформаторе  $U_2$  с кривой импульсной прочности

изоляции трансформатора (кривая 2), изменяя значения  $U_{П.оп}$ . Таким образом будет найдена первая точка КОП – сочетание опасной амплитуды падающей волны  $U_{П.оп1}$  и опасной длительности фронта волны  $\tau_{Фоп1}$ .

Далее нужно изменить  $\tau_{Ф}$  и, изменяя амплитуду падающей волны, вновь добиться касания  $U_2$  кривой допустимых импульсных перенапряжений для внутренней изоляции трансформатора. Таким образом находится следующая точка КОП ( $U_{П.оп2}$ ;  $\tau_{Фоп2}$ ) и т.д.

Значения опасных амплитуд заносятся в первую колонку ( $U_{П.оп}$ ) табл. К5. По данным табл. К5 строится кривая опасных параметров (рис. К12). На эту же координатную плоскость наносится вольт-секундная характеристика линейной изоляции, которую можно рассчитать по формуле

$$U = 103,2 \cdot n \cdot \sqrt{1 + \frac{1,526}{t}}, \quad (K48)$$

где  $n$  – число изоляторов в гирлянде.

По рис. К12 определяются амплитуда наиболее опасной волны  $U_m$  и максимальное время смещения фронта волны под действием импульсной короны  $\Delta t_{max}$ . Найденные параметры позволяют рассчитать длину защитного подхода для конкретной подстанции.

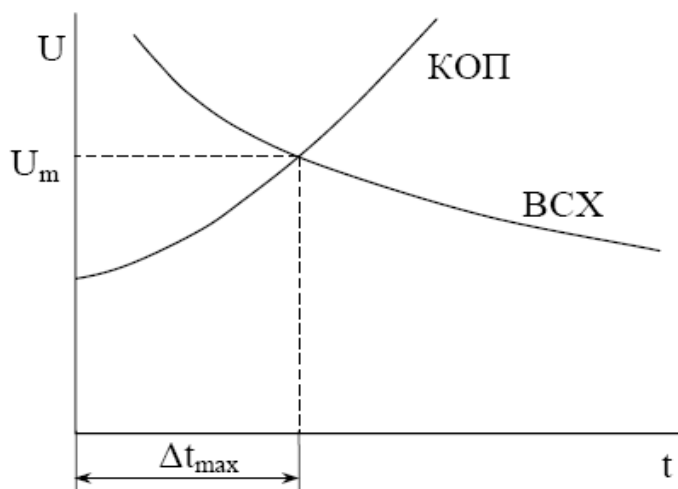


Рис. К12. Кривая опасных параметров подстанции и вольт-секундная характеристика линейной изоляции

$$l_{з.п.} = \frac{\nu \cdot \Delta t_{\max}}{1,15 \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{4U_m}{h_{np}}} - 1 \right)}, \quad (K49)$$

где  $l_{з.п.}$  – длина защитного подхода, м;

$U_m$  – амплитуда волны напряжения, МВ;

$\Delta t_{\max}$  – максимально необходимое смещение фронта волны, мкс;

$h_{np}$  – средняя высота подвеса провода.

$$h_{np} = h_{тр.ср} - h_{т-п}, \quad (K50)$$

где  $h_{тр.ср}$  – средняя высота подвеса троса;

$h_{т-п}$  – нормированное расстояние по вертикали трос-провод в середине пролета.

Средняя высота подвеса троса находится по формуле:

$$h_{тр.ср} = h_{оп} - 2/3 f_{тр}, \quad (K51)$$

где  $h_{оп}$  – высота опоры, м;

$f_{тр}$  – стрела провеса троса, м;

$$f_{тр} = h_{оп} - [h_{п-з} + (h_1 - h_2) + h_{т-п}], \quad (K52)$$

где  $h_{п-з}$  – нормированное минимальное расстояние провод-земля в середине пролета, м;

$h_1, h_2$  – высоты крепления траверс на опоре (см. рис. К13, где приведен, в качестве примера, эскиз одноцепной железобетонной опоры).

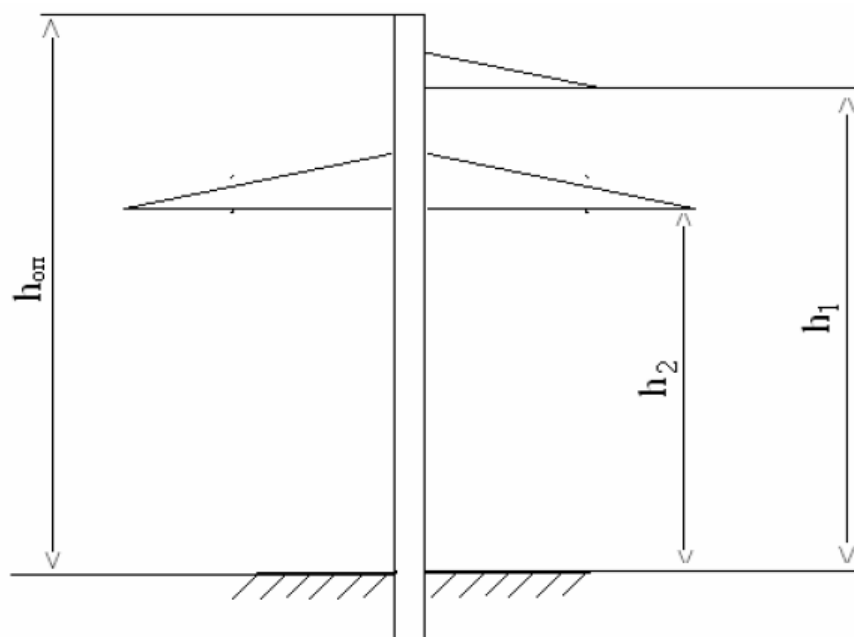


Рис. К13. Эскиз опоры

#### 4. Оценка надежности грозозащиты подстанции от волн, набегающих с линии

Опасные импульсы перенапряжений, набегающие на подстанцию с воздушной линии, могут возникать в результате прорыва молнии через тросовую защиту и при обратных перекрытиях при ударе молнии в опоры или тросы в пределах защитного подхода. Среднее годовое число перекрытий изоляции подстанции вследствие набегания на нее опасных импульсов грозовых перенапряжений определяется:

$$\beta = \beta' + \beta'' + \beta''', \quad (K53)$$

где  $\beta'$  – среднее годовое число перекрытий изоляции вследствие прорыва молнии через тросовую защиту;

$\beta''$  – среднее годовое число перекрытий изоляции вследствие обратных перекрытий при ударах молнии в опору;

$\beta'''$  – среднее годовое число перекрытий изоляции вследствие обратных перекрытий при прямом ударе молнии в трос.

Определим среднее годовое число перекрытий изоляции вследствие прорыва молнии через тросовую защиту:

$$\beta' = N_{\Pi} \cdot P_{\alpha}, \quad (K54)$$

где  $N_{\Pi}$  – число ударов молнии в трос в пределах защитного подхода;

$P_{\alpha}$  – вероятность прорыва молнии через тросовую защиту;

Вероятность прорыва молнии через тросовую защиту:

$$\lg P_{\alpha} = \frac{\alpha \cdot \sqrt{h_{\text{оп}}}}{90} - 4, \quad (K55)$$

где  $h_{\text{оп}}$  – высота опоры;

$\alpha$  – защитный угол троса.

Число ударов молнии в защитный подход равно:

$$N_{\alpha} = 0,067 \cdot l_{\text{з.п}} \cdot 6 \cdot h_{\text{ср}} \cdot D_{\Gamma} \cdot 10^{-3}, \quad (K56)$$

где  $h_{\text{ср}}$  – средняя высота подвеса троса, м;

$l_{\text{з.п}}$  – длина защитного подхода, км;

$D_{\Gamma}$  – число грозовых часов в году для данной местности.

Определим среднее годовое число перекрытий изоляции вследствие обратных перекрытий при ударах молнии в опору:

$$\beta'' = N_{\text{оп}} \cdot P_{\text{оп}}, \quad (K57)$$

где  $N_{\text{оп}}$  – число прямых ударов молнии в опору;

$P_{\text{оп}}$  – вероятность обратных перекрытий при ударе молнии в опору.

$$N_{\text{оп}} = N \cdot 1 - P_{\text{оп}} \cdot \frac{4h_{\text{оп}}}{l_{\text{пр}}}, \quad (\text{K58})$$

где  $l_{\text{пр}}$  – длина пролета, м;  $h_{\text{оп}}$  – высота опоры, м.

Тогда:

$$P_{\text{оп}} = \ell^{\frac{I_{0 \text{ кр}}}{26}}, \quad (\text{K59})$$

где  $I_{0 \text{ кр}}$  – критический ток молнии при ударе в опору, который приводит к перекрытию линейной изоляции.

$$I_{0 \text{ кр}} = \frac{U_{50\%}}{R_{\text{и}} + \delta \cdot h_{\text{оп}}}, \quad (\text{K60})$$

где  $U_{50\%}$  – 50%-ное разрядное напряжение гирлянды изоляторов;

$R_{\text{и}}$  – импульсное сопротивление заземлителя опоры;

$\delta$  – коэффициент, который равен 0,3, если один грозозащитный трос на линии; равен 0,15, если два троса.

Определим среднее годовое число перекрытий изоляции вследствие обратных перекрытий при прямом ударе молнии в трос:

$$\beta''' = N_{\text{тр}} \cdot P_{\text{тр}}, \quad (\text{K61})$$

где  $N_{\text{тр}}$  – число ударов молнии в трос в середине пролета;

$P_{\text{тр}}$  – вероятность пробоя промежутка трос-провод при ударе молнии в трос в середине пролета.

$$N_{\text{тр}} = N_{\text{п}} \cdot 1 - P_{\alpha} - N_{\text{п}} \cdot 1 - P_{\alpha} \cdot \frac{4h_{\text{оп}}}{l_{\text{пр}}} \quad (\text{K62})$$

$$P_{\text{тр}} = \ell^{\frac{a_{\text{кр}}}{15,7}} \quad (\text{K63})$$

где  $a_{\text{кр}}$  – критическая крутизна тока молнии, при которой происходит пробой промежутка трос-провод:

$$a_{\text{кр}} = \frac{2250 \cdot l_{\text{т-п}}}{(1 - K) \cdot l_{\text{пр}}} \left[ \frac{\text{кА}}{\text{мкс}} \right], \quad (\text{K64})$$

где  $l_{\text{т-п}}$  – расстояние между проводом и тросом.

$K$  – геометрический коэффициент связи между проводом и тросом.

Определив все составляющие, находим  $\beta$  и определяем число лет работы подстанции без грозовых отключений от волн, набегающих с линии – показатель грозоупорности подстанции  $M$ :

$$M = 1/\beta \text{ [лет]}. \quad (K65)$$

При этом следует помнить, что в рассчитанном показателе грозоупорности подстанции не учтены прорывы молнии в зону защиты стержневых молниеотводов и обратные перекрытия при ударе молнии в молниеотвод.

### 5. Расчет удельного числа грозовых отключений линии электропередачи

Грозовые отключения воздушных линий с тросами могут происходить по следующим причинам:

- прорыв молнии через тросовую защиту, т.е. поражение провода;
- удар молнии в опору и обратное перекрытие изоляции с опоры на провод;
- удар молнии в трос в середине пролета и пробой воздушного промежутка трос-провод.

Определим число ударов молнии в линию за год:

$$n_{\text{уд}} = 4h_{\text{тр.ср}} \frac{L_{\text{вл}}}{100} \cdot \frac{D_{\text{г}}}{100}, \quad (K66)$$

где  $h_{\text{тр.ср}}$  – средняя высота подвеса троса, м;

$L_{\text{вл}}$  – длина воздушной линии, км;

$D_{\text{г}}$  – число грозовых часов в году.

1. Определим число грозовых отключений линии  $n_{\text{откл1}}$  при прорыве молнии на провода через тросовую защиту:

$$n_{\text{откл1}} = N_{\text{пр}} \cdot P_{\text{пр}} \cdot \eta_{\text{пр}}, \quad (K67)$$

где  $N_{\text{пр}}$  – количество ударов молнии, приходящихся в провод за 1 год;

$P_{\text{пр}}$  – вероятность импульсного перекрытия гирлянды изоляторов ЛЭП при ударе молнии в провод;

$\eta_{\text{пр}}$  – вероятность установления силовой дуги по пути импульсного пробоя,  $\eta_{\text{пр}} = 0,7$  для линий  $U_{\text{ном}} \leq 220$  кВ с металлическим и железобетонными опорами.

$$N_{\text{пр}} = n_{\text{уд}} \cdot P_{\alpha} , \quad (\text{K68})$$

где  $P_{\alpha}$  – вероятность прорыва молнии сквозь тросовую защиту;

$n_{\text{уд}}$  – число ударов молнии в линию за год.

$$\lg P_{\alpha} = \frac{\alpha \sqrt{h_{\text{оп}}}}{A} - B , \quad (\text{K69})$$

где  $\alpha$  – защитный угол троса;  $A = 90$ ,  $B = 4$  – для линий напряжением 110-220кВ. Тогда

$$P_{\alpha} = 10^{\frac{\alpha \sqrt{h_{\text{оп}}}}{A} - B} . \quad (\text{K70})$$

Критический ток молнии при ударе в провод равен:

$$I_{0 \text{ кр}}^{\text{пр}} = \frac{2 \cdot U_{50\%}}{W_{\text{к}}} , \quad (\text{K71})$$

где  $U_{50\%}$  – 50%-ное разрядное напряжение гирлянды изоляторов;

$W_{\text{к}}$  – волновое сопротивление проводов воздушной линии с учетом короны.

При токе  $I_{0 \text{ кр}}^{\text{пр}} \leq 20$  кА вероятность импульсного перекрытия гирлянды изоляторов при ударе молнии в провод вычисляется по формуле:

$$P_{\text{пр}} = \exp(-0,08 \cdot I_{0 \text{ кр}}^{\text{пр}}) . \quad (\text{K72})$$

2. Определим число грозовых отключений  $n_{\text{откл2}}$  линии при ударе молнии в опору:

$$n_{\text{откл2}} = N_{\text{оп}} \cdot P_{\text{оп}} \cdot \eta_{\text{оп}} , \quad (\text{K73})$$

где  $N_{\text{оп}}$  – количество ударов молнии, приходящихся в опору за 1 год;

$P_{\text{оп}}$  – вероятность перекрытия линейной изоляции при ударе молнии в опору линии;

$\eta_{\text{оп}}$  – вероятность установления силовой дуги (см. выше).

$$N_{\text{оп}} = 4 \cdot n_{\text{уд}} \cdot \frac{h_{\text{оп}}}{l_{\text{п}} \alpha} , \quad (\text{K74})$$

где  $h_{\text{оп}}$  – высота опоры, м;  $l_{\text{п}}$  – длина пролета, м.

Вероятность перекрытия линейной изоляции равна:

$$P_{\text{оп}} = \exp(-0,008 \cdot I_{0 \text{ кр}}^{\text{оп}}) \text{ при } I_{\text{кр}} < 20 \text{ кА};$$

$$P_{\text{оп}} = \exp(-0,03 \cdot I_{0 \text{ кр}}^{\text{оп}}) \text{ при } I_{\text{кр}} > 20 \text{ кА};$$

где  $I_{0 \text{ кр}}^{\text{оп}}$  – критический ток молнии, при котором может произойти обратное перекрытие с опоры на провод.

$$I_{0 \text{ кр}}^{\text{оп}} = \frac{U_{50\%}}{R_{\text{и}} + \delta \cdot h_{\text{оп}}} , \quad (\text{K75})$$

где  $R_{\text{и}}$  – импульсное сопротивление заземлителя опоры;

$\delta = 0,3$  при одном грозозащитном тросе на ЛЭП;

$\delta = 0,15$  при двух грозозащитных тросах на ЛЭП.

3. Определим число грозовых отключений  $n_{\text{откл3}}$  линии при ударе молнии в трос в середине пролета:

$$n_{\text{откл3}} = N_{\text{тр}} \cdot P_{\text{тр}} \cdot \eta_{\text{тр}} , \quad (\text{K76})$$

где  $N_{\text{тр}}$  – количество ударов молнии, приходящихся в трос за год;

$P_{\text{тр}}$  – вероятность импульсного пробоя воздушного промежутка трос-провод при ударе молнии в трос в середине пролета;

$\eta_{\text{тр}}$  – вероятность установления силовой дуги при пробое воздушного промежутка трос-провод.

$$N_{\text{тр}} = n_{\text{уд}} - N_{\text{оп}} ; \quad (\text{K77})$$

$$P_{\text{тр}} = P(a_{\text{мкр}})P(I_{0 \text{ кр}}) ; \quad (\text{K78})$$

где  $a_{\text{мкр}}$  – критическая крутизна тока молнии, при которой происходит пробой воздушного промежутка трос-провод;

$$a_{\text{мкр}} = \frac{2\nu \cdot l_{\text{т-п}} \cdot E_{\text{р}}}{W_{\text{тр}} \cdot l_{\text{п}} \cdot (1 - \kappa)} , \quad (\text{K79})$$

где  $\nu = 250$  м/мкс – скорость распространения волны перенапряжения вдоль линии;

$l_{\text{т-п}}$  расстояние трос – провод;

$E_{\text{р}} = 750$  кВ/м – разрядная напряженность для воздушного промежутка трос-провод;

$W_{\text{тр}}$  – волновое сопротивление троса;

$l_{\text{п}}$  – длина пролета;

$\kappa = 0,25$  – коэффициент электромагнитной связи между тросом и проводом.

Вероятность появления тока молнии с крутизной  $a_{\text{мкр}}$  равна:

$$P(a_{\text{мкр}}) = \exp(-0,06 \cdot a_{\text{мкр}}) . \quad (\text{K80})$$

Время прихода волны, отраженной от ближайшей опоры равно:

$$t_{\text{р}} = \frac{l_{\text{п}}}{\nu} . \quad (\text{K81})$$

Величина критического тока молнии, при котором произойдет пробой воздушного промежутка трос-провод, будет равна:

$$I_{\text{мкр}} = a_{\text{мкр}} \cdot t_p. \quad (\text{K82})$$

Вероятность перехода импульсного пробоя воздушного промежутка трос-провод в силовую дугу равна:

$$h_{\text{тр}} = (1,6 \cdot E_{\text{ср}} - 6) \cdot 10^{-2}, \quad (\text{K83})$$

где  $E_{\text{ср}}$  – средняя напряженность, кВ/м:

$$E_{\text{ср}} = \frac{U_{\text{НАИБ.Ф.РАБ}}}{l_{\text{т-п}}}, \quad (\text{K84})$$

где  $U_{\text{НАИБ.Ф.РАБ}}$  – наибольшее фазное рабочее напряжение линии.

Число грозových отключений воздушной линии за год:

$$n_{\text{откл}} = n_{\text{откл1}} + n_{\text{откл2}} + n_{\text{откл3}}. \quad (\text{K85})$$

Число аварийных отключений ВЛ в год равно:

$$n_{\text{ав}} = n_{\text{откл}} \cdot (1 - P_{\text{апв}}), \quad (\text{K86})$$

где  $P_{\text{апв}}$  – коэффициент успешности срабатывания АПВ,  $P_{\text{апв}} = (0,8 \div 0,9)$  для линий 110 кВ и выше на металлических и железобетонных опорах.

Полученное значение  $n_{\text{ав}}$  необходимо сравнить с допустимым числом аварийных отключений ЛЭП:

$N_{\text{доп}} \leq 0,1$  при отсутствии резервирования и  $N \leq 1$  при наличии резервирования.

Таким образом, эффективность защиты подстанции характеризуется числом перекрытия изоляции, поскольку каждое перекрытие сопровождается возникновением больших токов короткого замыкания и мощных дуг, а образующиеся при перекрытиях срезy напряжения представляют серьезную опасность для внутренней изоляции трансформаторов.

Произведя необходимые расчеты, получили, что среднее годовое число перекрытий изоляции  $\beta = 0,0135$ . При таком значении  $\beta$  число лет работы подстанции без отключений  $M = 74$  года. Что говорит о высоком уровне грозоупорности подстанции, если учесть, что срок службы электрооборудования подстанции гораздо ниже.

Эффективность молниезащиты воздушной линии электропередач определяется исходя из среднегодового числа грозových отключений. В результате расчетов получили число отключений  $N_{\text{откл.уст.}} = 0,69$ . Что говорит о том, что для данной ВЛЭП использование одного троса вполне удовлетворяет необходимые требования по молниезащите. Но, следует отметить, что выбор одноцепных железобетонных опор является положительным фактором, так как по статистике среднегодовое число грозových отключений для одноцепных ВЛ существенно меньше, чем для двухцепных.

Для увеличения эффективности молниезащиты следует уменьшать вероятность прорыва молнии сквозь защиту, а также уменьшать среднегодовое число перекрытий изоляции подстанции. Этого добиваются путем применения других конструкций опор (в требуемых ситуациях), заземлителей, используя иную конфигурацию системы молниеотводов, применяя большее, чем один число тросов и т.д.

В целом можно утверждать, что рассчитанная подстанция удовлетворяет требуемым условиям грозозащиты.

## Рекомендации по выбору и применению ОПН для оптимальной защиты электрооборудования

### 1. Основные положения

Ограничитель перенапряжений нелинейный (ОПН) является одним из основных элементов системы защиты от перенапряжений, обеспечивающий защиту электрооборудования распределительного устройства подстанций и линий от коммутационных и грозовых перенапряжений.

В настоящих рекомендациях использована следующая терминология:

*Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ограничителя* - наибольшее значение действующего напряжения промышленной частоты, которое неограниченно долго может быть приложено между выводами ограничителя. Обозначение -  $U_{НР}$ , кВ действ.

*Временно допустимое повышение напряжения на ограничителе* - наибольшее действующее значение напряжения, которое может быть приложено между выводами ограничителя в течение заданного изготовителем времени не вызывая повреждения или термической неустойчивости. Обозначение -  $U_{ВН}$ , кВ действ.

Нормируемые зависимости  $U_{ВН}$  от их допустимой длительности приведены в виде линейных зависимостей «напряжение промышленной частоты - время» в полулогарифмическом масштабе.

Значения  $U_{ВН}$  даны в долях к  $U_{НР}$ . Указанная характеристика приведена для двух случаев:

- «с предварительным нагружением энергией» соответствующей – для ограничителей 1 класса по пропускной способности – одному импульсу большого тока волной 4/10 мкс амплитудой 65 кА;
- для ограничителей 2-5 классов по пропускной способности – двум импульсам тока длительностью 2000 мкс с амплитудой, равной току пропускной способности;
- «без предварительного нагружения».

*Номинальное напряжение ограничителя* – действующее значение напряжения промышленной частоты, которое ограничитель может выдержать

в течение 10 с в процессе рабочих испытаний. Номинальное напряжение должно быть не менее 1,25 наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения ограничителя. Обозначение –  $U_H$ , кВ действ.

*Коммутационные перенапряжения* – перенапряжения, существующие во время переходных процессов при коммутации элементов сети, сопровождающих внезапное изменение ее схемы или режима. Обозначение –  $U_K$ , кВ макс.

*Квазиустановившиеся (квазистационарные) перенапряжения* – перенапряжения, возникающие после окончания переходного процесса при коммутации элементов сети и существующие до тех пор, пока не будут устранены специальными мерами или самоустранены.

К этим перенапряжениям также относятся резонансные и феррорезонансные перенапряжения на промышленной частоте, низших и высших гармониках, перенапряжения с медленно изменяющейся вследствие затухания или изменения параметров системы частотой или амплитудой. Обозначение –  $U_Y$ , кВ действ.

*Остающееся напряжение при нормируемом токе коммутационных перенапряжений* – напряжение на ограничителе при нормируемом токе коммутационных перенапряжений с формой волны тока 30/60 мкс. Обозначение –  $U_{OCT.KOM.}$ , кВ макс.

*Остающееся напряжение при нормируемом токе грозовых перенапряжений* – напряжение на ограничителе при протекании нормируемого тока грозовых перенапряжений. Обозначение –  $U_{OCT.GP.}$ , кВ макс. Нормируемая форма волны – 8/20 мкс. Нормируемые амплитуды – 2,5; 5; 10; 20 кА в зависимости от класса напряжения ограничителя.

*Энергоемкость ограничителя* – значение энергии, поглощаемой ограничителем в переходном процессе. Энергоемкость ограничителя определяется по одному нормируемому испытательному импульсу тока прямоугольной формы длительностью 2000 мкс. Обозначение –  $W$ , кДж.

*Удельная энергоемкость* – рассеиваемая ограничителем энергия после нагрева его до 60 °С и последующего приложения одного нормируемого импульса тока, отнесенная к 1 кВ наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения ограничителя. Обозначение –  $W_{уд.}$ , кДж/кВ· $U_H$ .

*Ток пропускной способности ограничителя (ток большой длительности)* – максимальное значение (амплитуда) прямоугольного

импульса тока длительностью не менее 2000 мкс, которое прикладывается к ограничителю в процессе испытаний на пропускную способность 20 воздействий. Обозначение –  $I_{2000}$  А.

Значение удельной энергии ограничителя ( $W_{уд.}$ ) и прямоугольного импульса тока большой длительности ( $I_{2000}$  А) приведены в таблице Л1.

*Ток срабатывания противовзрывного устройства ограничителя* – это значение тока однофазного или трехфазного (большого из них) короткого замыкания ( $I_{кз.}$ , кА), при котором не происходит взрывного разрушения покрышки ограничителя или при ее повреждении разлет осколков ограничителя находится внутри нормируемой зоны.

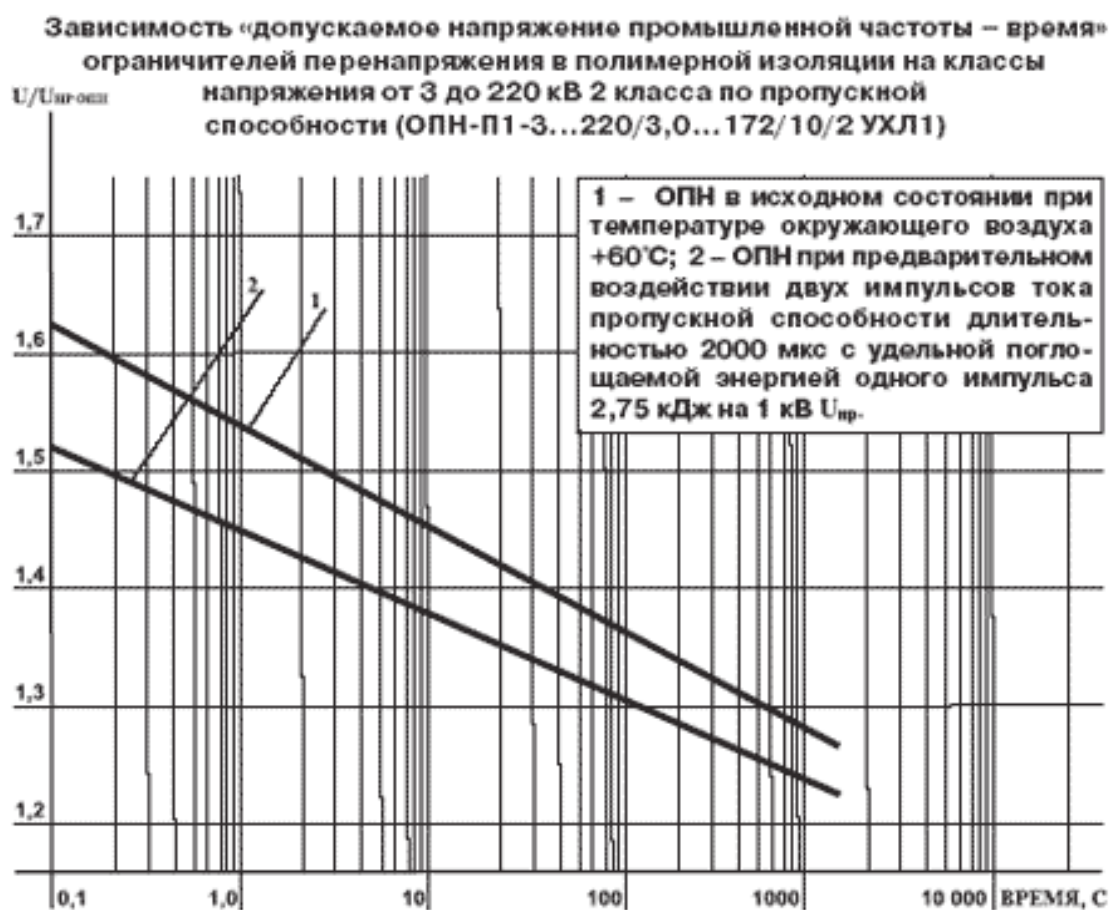


Рис. Л1. Зависимость «допускаемое напряжение промышленной частоты – время» ограничителей перенапряжения в полимерной изоляции на классы напряжения от 3 до 220 кВ 2 класса по пропускной способности

## 2. Основные положения по выбору параметров ОПН

### 2.1 К основным параметрам ограничителя относятся:

- наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение;

- номинальное напряжение, номинальный разрядный ток, класс пропускной способности;
- уровни остающихся напряжений при коммутационных и грозовых импульсах;
- величина тока срабатывания противовзрывного устройства;
- длина пути утечки внешней изоляции.

2.2 Основные параметры ограничителя выбирают исходя из назначения, требуемого уровня ограничения перенапряжений, места установки, а также схемы сети и ее параметров (наибольшего рабочего напряжения сети, способа заземления нейтрали, величины емкостного тока замыкания на землю и степени его компенсации, длительности существования однофазного или трехфазного замыкания на землю и т.д.).

2.3 По назначению ограничители применяют для защиты оборудования от грозовых и коммутационных перенапряжений.

2.4 Места установки и расстояния от ограничителей до защищаемого оборудования должны соответствовать требованиям /1/.

### *3. Методика выбора основных параметров*

3.1 Выбор наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения ОПН

В сетях 3-35 кВ, работающих с изолированной нейтралью или компенсацией емкостного тока замыкания на землю и допускающих неограниченно длительное существование однофазного замыкания на землю, наибольшее рабочее длительно допустимое напряжение ограничителя выбирается равным наибольшему рабочему напряжению электрооборудования для данного класса напряжения по ГОСТ 1516.3-96.

В сетях 110-500 кВ, работающих с эффективно заземленной нейтралью (коэффициент замыкания на землю не выше 1,4), наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ограничителя должно быть не ниже:

$$U_{\text{нс.опн}} > \frac{U_{\text{нс}}}{\sqrt{3}}, \quad (\text{Л1})$$

где  $U_{\text{нс}}$  – наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение в электрической сети.

Во всех случаях для повышения надежности выбирают ограничители с наибольшим длительно допустимым рабочим напряжением  $U_{\text{нРОПН}}$  не менее, чем на 2-5% выше наибольшего уровня напряжения сети в точке установки ОПН.

Нормированные значения по  $U_{\text{нРОПН}}$  действительны для температуры окружающей среды до плюс 45 °С с учетом дополнительного нагрева от солнечной радиации. Если имеются другие источники повышенных температур около ограничителя, длительно воздействующих на ОПН, то увеличивают значение  $U_{\text{нРОПН}}$ . В этом случае для каждых 5 градусов повышения температуры окружающей среды  $U_{\text{нРОПН}}$  увеличивают на 2%.

Значение наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения ограничителя выбирают из номенклатуры предприятия-изготовителя, которое должно быть не ниже расчетных значений, произведенных в соответствии с данным пунктом.

### 3.2 Выбор номинального разрядного тока.

Величина номинального разрядного тока служит для классификации ОПН. Например, ЗАО «ЗЭТО» производит ограничители с номинальными разрядными токами:

- 2500 А – низковольтные ОПН на классы напряжения 0,38 и 0,66 кВ.
- 5000 А – ограничители для защиты распределительных сетей 3, 6 и 10 кВ от грозových перенапряжений.
- 10000 А – ограничители для защиты электрооборудования от коммутационных и грозových перенапряжений на классы напряжения от 3 до 330 кВ.
- 20000 А – ограничители для защиты электрооборудования от коммутационных и грозových перенапряжений на классы напряжения от 220 до 500 кВ.

Выбор номинального разрядного тока производят в случае установки ОПН для защиты от грозových перенапряжений.

Номинальный разрядный ток принимают равным 10 кА в следующих случаях:

- в районах с интенсивной грозовой деятельностью более 50 грозových часов в год;

- в сетях с ВЛ на деревянных опорах;
- в схемах грозозащиты двигателей и генераторов, присоединенных к ВЛ;
- в районах с высокой степенью промышленного загрязнения;
- в схемах грозозащиты, к которым предъявляются повышенные требования к надежности.

Номинальному разрядному току 10 кА соответствует 1, 2 и 3 классы по пропускной способности, номинальному разрядному току 20 кА – 4 и 5 классы по пропускной способности.

### 3.3 Выбор класса энергоемкости ОПН (класса разряда линии).

Практическим критерием оценки энергоемкости ОПН является его способность пропускать нормируемые импульсы тока коммутационного перенапряжения без потери рабочих качеств.

По энергоемкости выпускаемые ограничители ЗАО «ЗЭТО» делятся на 5 классов.

Удельная энергоемкость определена при подаче одного прямоугольного импульса тока с амплитудой, указанной в данной таблице Л1.

Таблица Л1

#### Классы энергоемкости ОПН

|                                                                     |     |      |     |      |      |
|---------------------------------------------------------------------|-----|------|-----|------|------|
| Удельная энергоемкость<br>$\text{кДж/кВ} \cdot U_{\text{нРОПН}}$    | 1,5 | 2,75 | 4,8 | 6,35 | 7,67 |
| Амплитуда прямоугольного импульса<br>тока длительностью 2000 мкс, А | 300 | 550  | 850 | 1200 | 1500 |
| Класс пропускной способности (класс<br>разряда линии)               | 1   | 2    | 3   | 4    | 5    |

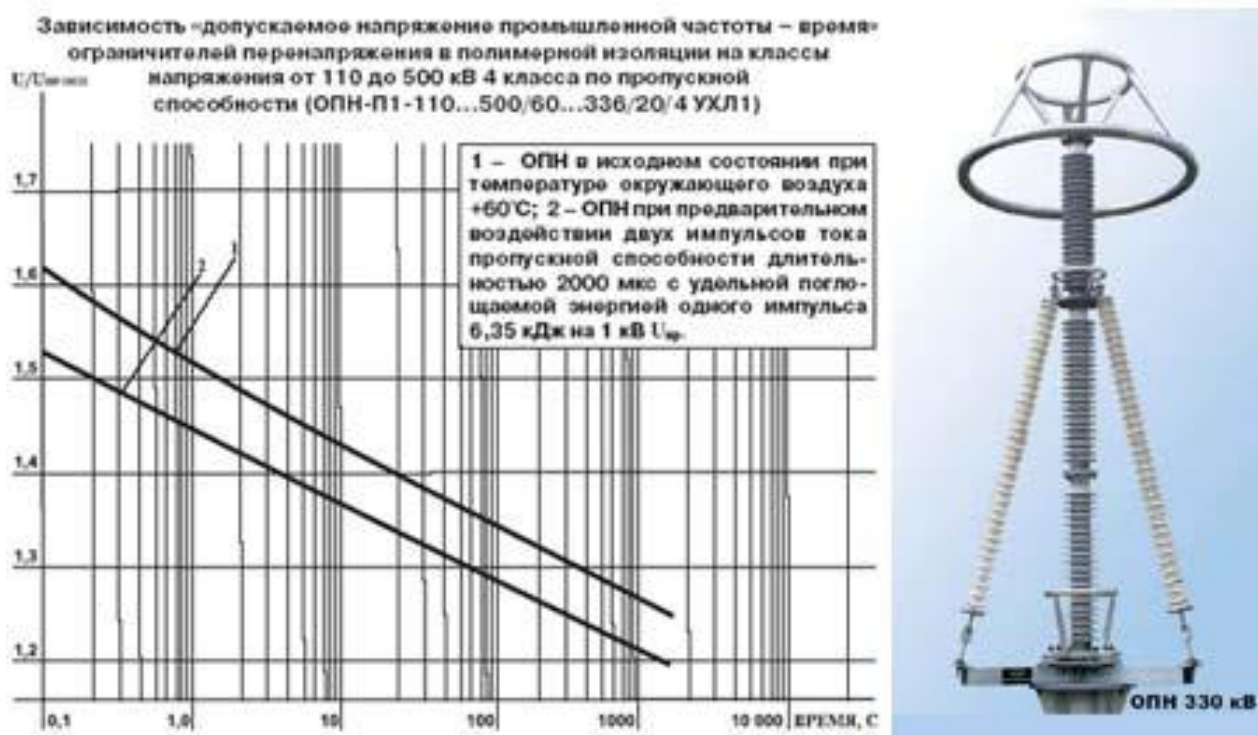


Рис. Л2. Зависимость «допускаемое напряжение промышленной частоты – время» ограничителей перенапряжения в полимерной изоляции на классы напряжения от 110 до 500 кВ 4 класса по пропускной способности

При возможном возникновении переходного резонанса (при отсутствии выключателей на стороне ВН, коммутациях блока линия-трансформатор) на 2-й или 3-й гармонике при установке в сетях 110 кВ с частично разземленными нейтралями трансформаторов ограничитель должен иметь энергоемкость не ниже  $(5,0-5,6) \text{ кДж/кВ} \cdot U_{\text{нр. ОПН}}$ .

При установке ограничителя на шунтовых конденсаторных батареях или кабельных присоединениях энергия, поглощаемая ОПН, может быть рассчитана по формуле:

$$W = \frac{1}{C} \left[ (3 \cdot U_{\text{нр}})^2 - (\sqrt{2} \cdot 1,25 \cdot U_{\text{нр. ОПН}})^2 \right], \quad (\text{Л2})$$

где  $C$  – емкость батареи или кабеля, Ф;

$U_{\text{нр}}$  – амплитуда наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения «фаза - земля», кВ;

$U_{\text{нр. ОПН}}$  – наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ограничителя, кВ.

Расчет энергоемкости ограничителей следует проводить в случаях установки их в электрических сетях 3-35 кВ с изолированной или

компенсированной нейтралью для защиты от коммутационных (дуговых) перенапряжений. В этом случае наибольшие энергетические воздействия соответствуют работе ограничителя при дуговых перенапряжениях однофазного замыкания на землю.

Токовые и энергетические воздействия на ограничитель и рассеиваемая им энергия в этом режиме определяют расчетом по любой программе расчета переходных процессов, позволяющей учитывать величину емкостного тока замыкания на землю, степень его компенсации, наличие и величину реактанса токоограничивающих реакторов.

При расчетах принимают 10% недокомпенсацию емкостного тока замыкания на землю, которая моделирует возможный аварийный режим.

Суммарная энергия, рассеиваемая ограничителем за одно замыкание с учетом повторных замыканий, может быть определена как

$$W_{\Sigma} = n \cdot W_1, \quad (Л3)$$

где  $W_1$  – наибольшая энергия, рассеиваемая ограничителем в одном цикле гашение – зажигание (гашение в ноль тока промышленной частоты и повторное зажигание в момент максимума восстанавливающегося напряжения на поврежденной фазе).

$$n=30-0,1 \cdot I_C, \quad (Л4)$$

где  $n$  – число зажиганий с наибольшей энергией за одно замыкание на землю, определяемое по эмпирической формуле, полученной на основе сетевых испытаний;

$I_C$  – емкостный ток замыкания на землю для сети с изолированной нейтралью, либо ток недокомпенсации для сети с компенсацией емкостного тока на землю, определяется на основе расчета или непосредственных измерений в эксплуатации.

При установке на присоединениях RC-цепочек,  $I_C$  должно быть определено с учетом емкостей этих цепочек.

При наличии в сети токоограничивающих реакторов расчет величины  $W_1$  следует проводить с учетом их расстановки в сети, включая схемы источников питания (например секционные реакторы).

Суммарная расчетная энергия, рассеиваемая ОПН за время ограничения дуговых замыканий, должна быть не более нормируемой для него энергии

$$W_{\text{ОПН}} \geq W_{\Sigma}. \quad (\text{Л5})$$

### 3.4 Определение защитного уровня ОПН

Определяющим при выборе защитного уровня ОПН является его назначение (для защиты от грозовых или коммутационных перенапряжений) и уровень выдерживаемых перенапряжений изоляцией электрооборудования.

3.4.1. Уровень выдерживаемых напряжений электрооборудованием 3-35 кВ при коммутационных перенапряжениях определяется уровнем испытательных напряжений, которое нормируется ГОСТ 1516.3-96.

Переход от испытательных напряжений к выдерживаемому изоляцией электрооборудования уровню коммутационных перенапряжений определяется исходя из одноминутного испытательного напряжения ( $U_{1\text{мин.}}$ ), которое нормируется ГОСТ 1516.3-96.

$$U_{\text{выд}} = K_{\text{и}} \cdot K_{\text{к}} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{1\text{мин.}}, \quad (\text{Л6})$$

где  $K_{\text{и}} = 1,35$  – коэффициент импульса, учитывающий упрочнение изоляции при более коротком импульсе по сравнению с испытательным;

$K_{\text{к}} = 0,9$  – коэффициент кумулятивности, учитывающий многократность воздействий перенапряжений и возможное старение изоляции. Для аппаратов  $K_{\text{и}} = 1,1$  и  $K_{\text{к}} = 1,0$ .

Выдерживаемый уровень грозовых перенапряжений для электрооборудования определяется по формуле:

$$U_{\text{выд. гр}} = 1,1 \cdot (U_{\text{пги.}} - U_{\text{н}}). \quad (\text{Л7})$$

Допустимые (выдерживаемые) кратности коммутационных и грозовых перенапряжений электрооборудования 3-35 кВ приведены в таблице Л2.

$$K_{\text{доп.к}} = \frac{K_{\text{и}} \cdot K_{\text{к}} \cdot U_{1\text{мин.}}}{U_{\text{раб.наиб.ф}}}, \quad (\text{Л8})$$

где  $K_{\text{доп.к}}$  – допустимая кратность (выдерживаемый уровень) коммутационных перенапряжений.

Допустимые (выдерживаемые) кратности коммутационных и грозовых перенапряжений электрических машин приведены в таблице Л3.

Для электрических машин коэффициент импульса и кумулятивности принимаются равными единице.

Таблица Л2

|                          |             |                      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------------|-------------|----------------------|------|------|------|------|------|------|
| $U_{НОМ.}, кВ_д$         |             |                      | 3    | 6    | 10   | 15   | 20   | 35   |
| $U_{РАБ.НАИБ.}, кВ_д$    |             |                      | 3,5  | 6,9  | 11,5 | 17,5 | 24,0 | 40,5 |
| $U_{РАБ.НАИБ.Ф.}, кВ_д$  |             |                      | 2,0  | 4,0  | 6,65 | 10,1 | 13,9 | 23,4 |
| Изоляция трансформаторов | нормальная  | $U_{ИСП.1}, кВ_д$    | 18   | 25   | 35   | 45   | 55   | 85   |
|                          |             | $K_{ДОП.К.}$         | 10,9 | 7,6  | 6,4  | 5,4  | 4,8  | 4,4  |
|                          |             | $U_{ИСП.ПГИ.}, кВ_м$ | 40   | 60   | 80   | 108  | 130  | 200  |
|                          |             | $K_{ДОП.Г.}$         | 14,4 | 10,5 | 8,2  | 7,2  | 6,2  | 5,5  |
|                          | облегченная | $U_{ИСП.1}, кВ_д$    | 10   | 16   | 24   | 37   | 50   | -    |
|                          |             | $K_{ДОП.К.}$         | 6,1  | 6,1  | 5,1  | 4,6  | 4,4  | -    |
|                          |             | $U_{ИСП.ПГИ.}, кВ_м$ | 20   | 40   | 60   | 75   | 95   | -    |
|                          |             | $K_{ДОП.Г.}$         | 6,6  | 6,6  | 5,9  | 4,6  | 4,2  | -    |
| Изоляция аппаратов       | нормальная  | $U_{ИСП.1}, кВ_д$    | 24   | 32   | 42   | 55   | 65   | 95   |
|                          |             | $K_{ДОП.К.}$         | 8,8  | 8,8  | 7,0  | 6,0  | 5,1  | 4,5  |
|                          |             | $U_{ИСП.ПГИ.}, кВ_м$ | 40   | 60   | 75   | 95   | 125  | 190  |
|                          |             | $K_{ДОП.Г.}$         | 14,4 | 10,5 | 7,6  | 6,2  | 5,9  | 5,2  |
|                          | облегченная | $U_{ИСП.1}, кВ_д$    | 10   | 20   | 28   | 38   | 50   | -    |
|                          |             | $K_{ДОП.К.}$         | 5,5  | 5,5  | 4,6  | 4,1  | 4,0  | -    |
|                          |             | $U_{ИСП.ПГИ.}, кВ_м$ | 20   | 40   | 60   | 75   | 95   | -    |
|                          |             | $K_{ДОП.Г.}$         | 6,6  | 6,6  | 5,9  | 4,6  | 4,2  | -    |

Таблица Л3

|                         | Мощность электрической машины, кВт |      |      |      |      |            |      |       |      |      |
|-------------------------|------------------------------------|------|------|------|------|------------|------|-------|------|------|
|                         | до 1000                            |      |      |      |      | свыше 1000 |      |       |      |      |
| $U_{НОМ.}, кВ_д$        | 3,15                               | 6,0  | 6,3  | 10,0 | 10,5 | 3,15       | 6,0  | 6,3   | 10,0 | 10,5 |
| $U_{РАБ.НАИБ.}, кВ_д$   | 3,5                                | 6,6  | 6,9  | 11,0 | 11,5 | 3,5        | 6,6  | 6,9   | 11,0 | 11,5 |
| $U_{РАБ.НАИБ.Ф.}, кВ_д$ | 2,0                                | 3,8  | 4,0  | 6,35 | 6,65 | 2,0        | 3,8  | 4,0   | 6,35 | 6,65 |
| $U_{ИСП.}, кВ_д$        | 7,3                                | 13   | 13,6 | 21   | 22   | 7,9        | 15   | 15,75 | 23   | 24   |
| $U_{ДОП.}, кВ_м$        | 10,3                               | 18,4 | 19,2 | 29,7 | 31,0 | 11,1       | 21,2 | 22,2  | 32,5 | 33,8 |
| $K_{ДОП.}$              | 3,65                               | 3,4  | 3,4  | 3,3  | 3,3  | 4,0        | 4,0  | 4,0   | 3,6  | 3,6  |

Испытательное напряжение для электрических машин определяется по соотношению:

|                          |                                                                                          |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| мощностью до 1000 кВт    | $2 \cdot U_{\text{НОМ.}} + 1$                                                            |
| мощностью свыше 1000 кВт | $2,5 \cdot U_{\text{НОМ.}}$ , где ( $U_{\text{НОМ.}}$ - 3,15; 6,0; 6,3 кВ <sub>д</sub> ) |
| мощностью свыше 1000 кВт | $2 \cdot U_{\text{НОМ.}} + 3$ , где ( $U_{\text{НОМ.}}$ - 10,0; 10,5 кВ <sub>д</sub> )   |

Допустимая кратность (выдерживаемый уровень) коммутационных и грозовых перенапряжений определяется по соотношению:

$$K_{\text{доп}} = \frac{U_{\text{исп}}}{U_{\text{раб.наиб.ф}}} \quad (\text{Л9})$$

3.4.2. Уровень выдерживаемых напряжений электрооборудованием 110-500 кВ при коммутационных перенапряжениях

Для электрооборудования 330 кВ и выше испытательное напряжение на коммутационной волне нормируется ГОСТ 1516.3-96.

Исходя из рассчитанной величины выдерживаемого уровня коммутационных перенапряжений определяется значение остающегося напряжения на ограничителе при расчетном коммутационном токе

$$U_{\text{ост.к.опн}} \leq \frac{U_{\text{к}}}{1,15 \div 1,2} \quad (\text{Л10})$$

Для электрооборудования 110-220 кВ нормируется ГОСТ 1516.3-96 одноминутное испытательное напряжение частоты 50 Гц ( $U_{1\text{мин.}}$ ).

Выдерживаемый уровень коммутационных перенапряжений для электрооборудования 110-220 кВ можно определить по формуле:

$$\begin{aligned} U_{\text{к}} &= K_{\text{и}} \cdot K_{\text{к}} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{1\text{мин.}}, \\ U_{\text{к}} &= 1,35 \cdot 0,9 \cdot 1,41 \cdot U_{1\text{мин.}} = 1,71 \cdot U_{1\text{мин.}} \end{aligned} \quad (\text{Л11})$$

Количество ограничителей для защиты от коммутационных перенапряжений определяют по соотношению испытательного напряжения электрооборудования на коммутационном импульсе и остающегося напряжения ограничителя при коммутационных перенапряжениях. Если одного ограничителя недостаточно, то учитывают все ограничители рассматриваемого

ОРУ данного класса напряжения, на которые воздействуют данное перенапряжение с пропорциональным снижением тока через один ограничитель.

Если рассматриваемый ОПН не удовлетворяет условиям обеспечения требуемого защитного уровня при коммутационном перенапряжении, то выбирают другой ОПН с тем же значением наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения, но большего класса энергоемкости (т.к. с увеличением класса энергоемкости для одинаковых  $U_{нропн}$ , уровень остающихся напряжений снижается).

При замене вентильных разрядников на ОПН, расстояние от ОПН до защищаемого оборудования в соответствии с /1/ определяется по формуле:

$$L_{опн} = \frac{L_{вр} \cdot (U_{исп} - U_{опн})}{(U_{исп} - U_{рв})}, \quad (Л12)$$

где  $U_{исп}$  – испытательное напряжение защищаемого оборудования при полном грозовом импульсе, в кВ;

$U_{опн}$ ,  $U_{рв}$  – остающееся напряжение на ограничителе и вентильном разряднике при токе 10 (5) кА, в кВ;

$L_{опн}$  – расстояние от защищаемого оборудования до ОПН, в м;

$L_{рв}$  – расстояние от защищаемого оборудования до вентильного разрядника, нормируемое в /1/, в м.

Допускается установка ограничителей на место заменяемых разрядников, если значения остающихся напряжений этих ограничителей при токе 10 кА отличается не более, чем на 15% от соответствующих параметров разрядников.

### 3.4.3 Выбор ОПН для защиты от грозовых перенапряжений

Для защиты от грозовых перенапряжений ограничители на классы напряжения от 3 до 35 кВ должны быть установлены там, где в соответствии с рекомендациями ПУЭ должны быть установлены вентильные разрядники.

Ограничители должны быть отстроены от работы при перенапряжениях, вызванных однофазными замыканиями на землю. Это требование выполняется при условии, если величина остающегося напряжения на ограничителе при

импульсе тока 30/60 мкс с амплитудой 500 А не менее значений, приведенных в таблице Л4.

Таблица Л4

| Класс напряжения сети, кВ <sub>д</sub>                                        | 3   | 6    | 10   | 15   | 20   | 25   |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----|------|------|------|------|------|
| Напряжение на ОПН при импульсе тока 30/60 мкс с амплитудой 500 А не менее, кВ | 9,0 | 18,0 | 29,0 | 43,0 | 59,0 | 99,0 |

В этом случае пропускная способность ограничителя при прямоугольном импульсе тока ( $I_{2000 \text{ мкс}}$ ) должна быть не менее 250 А.

Для электрических сетей на классы напряжения 3, 6, 10 кВ рекомендуется применение ОПН-1(2)-3/3,8 III УХЛ; ОПН-1(2)-6/7,6 III УХЛ; ОПН-1(2)-10/12,7 III УХЛ с пропускной способностью 300 А, 2000 мкс.

Если параметры ограничителя по условиям выбора защитного уровня при грозовых перенапряжениях не удовлетворяют требованиям, указанным выше, то энергоемкость и наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ОПН выбирают с учетом работы при однофазном дуговом замыкании на землю.

#### 3.4.4 Выбор ОПН для защиты от коммутационных перенапряжений

1. Выбор параметров ограничителей для защиты сети собственных нужд электростанций от перенапряжений при дуговых замыканиях на землю.

В сетях СН электростанций ограничители устанавливают для защиты сети и электродвигателей от коммутационных перенапряжений, возникающих при дуговых замыканиях на землю. Так как наименьший выдерживаемый уровень изоляции имеет электродвигатель, то ограничитель выбирают в первую очередь из условия ограничения перенапряжений до величины, допустимой для электродвигателя.

Сеть СН электростанции может работать с изолированной нейтралью, с нейтралью, заземленной через дугогасительный реактор (ДГР), или нейтралью, заземленной через резистор.

А. Выбор параметров ОПН для защиты сети СН, работающей с изолированной нейтралью или нейтралью, заземленной через ДГР.

А.1 Наибольшее длительно допустимое напряжение ограничителя для защиты сети СН от дуговых перенапряжений выбирается исходя из следующих положений:

- наибольшее рабочее напряжение сети не должно превышать 1,1 номинального напряжения электродвигателя, т.е. 6,6 кВ;
- длительность однофазного замыкания на землю не должна превышать 2 часов. Учет этих условий определяет  $U_{\text{нропн}} = 6,0$  кВ.

А.2 Требуемый уровень ограничения коммутационных перенапряжений определяют по требованию ограничения перенапряжений при дуговых замыканиях на землю до уровня испытательного, который обеспечивается при расчетном токе коммутационного импульса через ОПН, равным 100 А. Соответственно значение  $U_{500}$  ограничителя должно быть не более 14,5-14,8 кВ.

А.3 Амплитуда импульса тока пропускной способности ограничителя на прямоугольной волне 2000 мкс зависит от величины емкостного тока замыкания на землю сети СН и определяется по п. 3.3 данных рекомендаций.

При этом учитывают, что:

- при емкостном токе замыкания на землю не более 10 А и работе сети с изолированной нейтралью (схема питания сети СН от трансформатора) или при емкостном токе до 100 А и работе сети со 100% компенсацией емкостного тока замыкания на землю амплитуда импульса тока пропускной способности должна быть не ниже 500 А. В данном случае рекомендуется
- применение ограничителя типа ОПН-П1-6/6,0/10/2 УХЛ2 с пропускной способностью 550 А, 2000 мкс;
- при емкостном токе замыкания на землю более 400 А и работе сети с компенсацией емкостного тока замыкания на землю (питание СН от шин ГРУ 6 кВ, как правило, через токоограничивающий реактор) амплитуда импульса тока пропускной способности должна быть не ниже 1000 А.

А.4 Ограничители устанавливаются на шинах СН в свободной ячейке или ячейке трансформатора напряжения (ТН) до предохранителя.

Б. Выбор параметров ОПН для защиты сети СН, работающей с нейтралью, заземленной через резистор.

Б.1 В сетях 6 кВ СН электростанций значение сопротивления резистора, включаемого в нейтраль заземляющего трансформатора, выбирают таким

образом, чтобы ток через резистор при однофазном замыкании на землю был не менее емкостного тока замыкания на землю (обычно сопротивление резистора равно 100 Ом). В этом случае перенапряжения при дуговых замыканиях на землю ограничены до уровня  $(2,2-2,4) \cdot U_{\phi}$ , а релейная защита надежно отключает поврежденное присоединение.

Б.2 Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ограничителя выбирается исходя из:

- наибольшее рабочее напряжение сети не должно превышать 1,1 номинального напряжения электродвигателя, т.е. 6,6 кВ;
- длительность однофазного замыкания на землю определяется временем действия релейной защиты, отключающей замыкание. Это время не превышает обычно 5 с.

Б.3 Расчет показывает, что ограничитель с  $U_{нд} = 5,5$  кВ обеспечивает уровень ограничения дуговых замыканий до  $(2-2,2) U_{\phi}$ .

Б.4 С учетом снижения перенапряжений с помощью резистора в нейтрали до уровня  $(2,3-2,4) U_{\phi}$  и отключения однофазного замыкания на землю за время не более 1 с пропускная способность ограничителя может быть принята не менее 250 А.

Б.5 Ограничитель включается в цепь заземляющего трансформатора до выключателя.

Б.6 В качестве резервного аппарата на шинах СН устанавливается дополнительный ОПН-П1-6/6,0/10/2 УХЛ2, поскольку при отказе в действии релейной защиты и неотключения поврежденного присоединения отключается присоединение с заземляющим трансформатором и сеть переходит в режим работы с изолированной нейтралью.

В. Выбор параметров ограничителей для защиты от перенапряжений, инициируемых вакуумными выключателями.

Установка ОПН на присоединениях с вакуумными выключателями ограничивает перенапряжения, связанные с обрывом тока и эскалацией напряжений, сокращает число повторных зажигания, следовательно, число опасных перенапряжений и полностью исключает перенапряжения при виртуальном срезе тока.

В.1 Защита от перенапряжений требуется при коммутациях вакуумными выключателями присоединений с электродвигателями и трансформаторами.

В.2 Не требуется защита от перенапряжений, инициируемых вакуумными выключателями:

- электродвигателей мощностью 1800 кВт и более;
- трансформаторов, защищенных по условию грозозащиты вентильными разрядниками или ОПН;
- трансформаторов СН в кабельных сетях, длина подключаемых кабелей которых больше или равна приведенной в таблице Л5.

Таблица Л5

| Класс напряжения сети, кВ | Длина кабеля, м, при мощности трансформатора |         |          |          |          |
|---------------------------|----------------------------------------------|---------|----------|----------|----------|
|                           | 250 кВт                                      | 630 кВт | 1000 кВт | 1600 кВт | 2500 кВт |
| 6                         | 50                                           | 120     | 150      | 200      | 240      |
| 10                        | 30                                           | 90      | 115      | 150      | 180      |

В.3 Для защиты электродвигателя от перенапряжений, инициируемых вакуумным выключателем, ограничитель устанавливается в сети 6 кВ собственных нужд электростанций. Поэтому выбор основных параметров ОПН производят в соответствии с п.1 настоящих рекомендаций.

В.4 При установке ограничителей в нескольких ячейках РУ СН характеристики ограничителей должны быть специально подобраны изготовителем для их параллельной работы по спецзаказу.

В этом случае ограничители будут подвержены меньшим токовым и энергетическим воздействиям при однофазных дуговых замыканиях на землю, что повысит надежность работы сети и ОПН.

В.5 Наибольшая эффективность ограничения перенапряжений, инициируемых вакуумными выключателями, достигается при установке ОПН параллельно выключателю или непосредственно у защищаемого объекта.

Параметры ОПН, устанавливаемого параллельно выключателю, при длине отходящего кабеля 100-250 м выбирают как для сети СН 6 кВ, работающей с изолированной нейтралью (п.1 настоящих рекомендаций).

Г. Выбор ОПН по условиям взрывобезопасности.

Г.1 Для ограничителя нормируется величина тока срабатывания противовзрывного устройства, при которой не происходит взрывного разрушения корпуса (покрышки) ОПН при его внутреннем повреждении.

Ограничители производства ЗАО «ЗЭТО» испытаны на взрывобезопасность при следующих токах срабатывания устройств взрывобезопасности:

- ограничители 1 класса по пропускной способности от 3 до 10 кВ при большом токе КЗ-10 кА действ; 0,2 с и малом токе КЗ-800 А действ; 2 с.
- ограничители 2 класса по пропускной способности от 3 до 20 кВ при большом токе КЗ-20 кА действ; 0,2 с и малом токе КЗ-800 А действ; 2 с.
- ограничители 2 и 3 классов по пропускной способности от 35 до 330 кВ при большом токе КЗ-40 кА действ; 0,2 с и малом токе КЗ-800 А действ; 2 с.
- ограничители 4 и 5 классов по пропускной способности от 110 кВ до 500 кВ при большом токе КЗ-40 кА действ.; 0,2 с и малом токе КЗ-800 А действ; 2 с.

При выборе ограничителей с токами срабатывания противовзрывного устройства до 40 кА действ. в электрических сетях 110-750 кВ его значение должно быть на 15-20% больше значения тока (однофазного или трехфазного) к.з. в месте установки ограничителя.

Ток срабатывания взрывопредохранительного устройства ограничителя в электрических сетях 3-35 кВ выбирают не менее чем на 10% больше значения двухфазного или трехфазного (большого из них) тока к.з. в месте установки ограничителя.

Д. Выбор длины пути утечки ОПН.

По зоне загрязнения атмосферы в месте установки ограничителя выбирается нормируемая длина пути утечки для данного типа и конструкции ограничителя в соответствии с ГОСТ 9920-89.

Ограничители производства ЗАО «ЗЭТО» наружной установки выпускаются с длиной пути утечки внешней изоляции не ниже II\* СЗ (подстанционная изоляция), а также соответствующие III и IV СЗ по ГОСТ 9920-89.

Ограничители внутренней установки на классы напряжения от 3 до 10 кВ выпускаются с длиной пути утечки внешней изоляции не менее 1,8 см на 1 кВ наибольшего линейного напряжения.

Е. Выбор ОПН по механическим характеристикам.

Е.1 Ограничители серийно выпускаются для климатического исполнения УХЛ и категории размещения 1 в соответствии с ГОСТ 15150-69.

Ограничители опорного исполнения категории размещения 1 выдерживают суммарные механические нагрузки от напора ветра со скоростью 40 м/с без гололеда или со скоростью 15 м/с при толщине стенки льда 20 мм и оттяжения проводов в горизонтальном направлении не менее:

- до 35 кВ - 330 Н;
- 110 - 220 кВ - 725 Н;
- 330 - 500 кВ - 2500 Н.

Ограничители подвешного исполнения категории размещения 1 выдерживают суммарные механические нагрузки на растяжение от собственного веса, веса льда толщиной стенки до 20 мм, воздействующего на ограничитель, а также веса подводящих проводов не менее:

- на 110 кВ - 1100 Н;
- на 330 - 500 кВ - 4500 Н.

Е.2 Ограничители на классы напряжения 3 - 35 кВ выдерживают механические нагрузки от вибрации по группе механического исполнения М6 ГОСТ 17516.1-90, степень жесткости 10 (что соответствует интенсивности землетрясения 9 баллов по MSK-64 при уровне установки над нулевой отметкой до 25 м).

Е.3 Ограничители на классы напряжения 110 - 500 кВ выдерживают механические нагрузки от вибрации по группе механического исполнения М1 ГОСТ 17516.1-90, степень жесткости 1 (что соответствует интенсивности землетрясения 9 баллов по MSK-64 при уровне установки над нулевой отметкой до 10 м).

#### *4. Применение и место установки ОПН*

##### **4.1 Применение и место установки ОПН на классы напряжения 3 - 35 кВ**

4.1.1. В кабельных сетях 6 - 10 кВ ограничители могут быть установлены только при отсутствии возможности возникновения резонансных перенапряжений.

Резонансные условия могут выполняться в сети, работающей с изолированной нейтралью, при определенных соотношениях емкости шин

(емкостного тока замыкания на землю) и числа трансформаторов напряжения. Резонанс не возникает, если емкостный ток замыкания на землю, приходящийся на один трансформатор напряжения, превышает 1 А, либо если в сети установлены трансформаторы напряжения типа НАМИ.

4.1.2. При защите трансформатора от грозовых перенапряжений ОПН должен устанавливаться на защищаемом трансформаторе до коммутационного аппарата.

4.1.3. В РУ 3-10 кВ при выполнении связи трансформаторов с шинами при помощи кабелей расстояние от ОПН до трансформатора и аппаратов не ограничивается.

При применении воздушной связи с шинами РУ расстояние от ОПН до трансформатора и аппаратов не должно превышать 60 м при ВЛ на деревянных и 90 м на металлических и железобетонных опорах.

В РУ 35 кВ расстояние по ошиновке, включая ответвления от ограничителя до защищаемого объекта выбирается в соответствии с рекомендациями ПУЭ.

При установке ограничителей в РУ должны сохраняться расстояния до заземленных и находящихся под напряжением элементов РУ в соответствии с рекомендациями ПУЭ.

## 4.2. Применение и место установки ОПН на классы напряжения 110-500 кВ

Защита электрооборудования от грозовых и коммутационных перенапряжений должна соответствовать рекомендациям /1/.

4.2.1. Места установки ОПН определяются функциональным назначением соответствующего ограничителя:

- в цепи трансформатора, автотрансформатора или шунтирующего реактора — для защиты от грозовых и коммутационных перенапряжений при их включении или отключении;

- на конце линии — для защиты от коммутационных перенапряжений при ее включении или отключении и ограничения набегающих на РУ волн грозовых перенапряжений.

Дополнительный ограничитель устанавливают на линии для ее защиты от коммутационных перенапряжений, если шунтирующий реактор или

трансформаторы (автотрансформаторы) присоединены к линии через выключатели.

При установке ОПН на шунтирующем реакторе или автотрансформаторе (трансформаторе), подключенном к линии без выключателей, через искровое присоединение или *выключатель-отключатель*, дополнительный ограничитель, присоединяемый непосредственно к линии, не устанавливаются.

4.2.2. Ограничители должны быть установлены без коммутационных аппаратов в цепи присоединения к линии, шинам РУ или ошиновке автотрансформаторов (трансформаторов) или шунтирующих реакторов. Спуск от ошиновки к ограничителю выполняется теми же проводами, что и для остальной аппаратуры РУ. Заземление ограничителя осуществляется присоединением к заземляющему устройству РУ.

4.2.3. Ограничители производства ЗАО «ЗЭТО» не требуют профилактических испытаний в процессе эксплуатации.

По требованию Заказчика ограничители могут комплектоваться датчиками тока для измерения тока проводимости ОПН под рабочим напряжением, пультом измерения для измерения тока проводимости и регистраторами срабатывания.

Примечание:

1. Каждый ОПН в соответствии с заказом комплектуется датчиком тока, который является составной частью измерительного устройства для контроля тока проводимости типа УКТ-02.

2. Один пульт измерения тока проводимости может использоваться на несколько ОПН с датчиками тока.

3. Каждый ОПН в соответствии с заказом комплектуется регистраторами срабатывания РС-1УХЛ1, РС-2УХЛ1 или РС-3УХЛ1 в зависимости от требуемой пропускной способности ОПН.

4. Измерение тока проводимости ОПН под рабочим напряжением производится в соответствии с указаниями, приведенными в «Руководстве по эксплуатации» предприятия-изготовителя.

4.2.4. Точка присоединения ограничителя к заземляющему устройству (ЗУ) должна быть максимально удалена от точек присоединения к этому ЗУ измерительных трансформаторов.

## *5. Применение защитных аппаратов для защиты линейной изоляции ВЛ*

Последние 20 лет наряду с подстанционными защитными аппаратами широкое применение находят защитные аппараты, предназначенные для защиты линейной изоляции ВЛ (ОПН-Л).

ОПН-Л были впервые разработаны и начали широко применяться в Японии и США в 80-х годах для защиты ВЛ на напряжения 66 кВ, 77 кВ и 138 кВ.

К 1992 году в электрических сетях Японии было установлено 29580 аппаратов: 840 аппаратов на ВЛ 22 - 33 кВ (2.84 %), 26495 аппаратов на ВЛ 66 – 77 кВ (89.57 %), 1879 на ВЛ 110 – 154 кВ (6.35%) и 366 – на ВЛ 187 – 500 кВ (1.24 %). В Японии ежегодно устанавливается около 7000 штук ОПН-Л. Аналогичное происходит и в США и в других странах. Так, более половины из 30 энергокомпаний в США применяют защитные аппараты на линиях 69 - 230 кВ.

Уже к 1994 году в Японии ОПН-Л были установлены на 22 воздушных линиях класса 500 кВ, а на сегодняшний день ОПН-Л уже установлены и на линиях 800 кВ.

Прежде всего, широкое применение в Японии ОПН-Л находят для защиты двухцепных ВЛ. Аппараты установлены либо на трех фазах одной цепи (97.07 %), либо на всех шести фазах двух цепей (2.58 %), либо на двух фазах одной цепи (0.35 %), либо на одной из шести фаз (всего два аппарата). Статистический анализ эксплуатации ВЛ, оснащенных подвесными ОПН, показал весьма ощутимое повышение их надежности. На ВЛ, на которых ОПН установлены на каждой фазе, отключений одновременно двух цепей не наблюдалось, в 60% случаев происходили лишь отключения одной цепи. На ВЛ же, не оснащенных подвесными ОПН, в 60% случаев наблюдались двухцепные отключения, в остальных случаях – отключения одной цепи. Однако эти данные относились лишь к началу эксплуатации подвесных ОПН, которая в настоящее время продолжается.

Относительно мест расстановки ОПН-Л (т.е. на каких опорах устанавливать защитные аппараты), то в основном практикуется установка ОПН-Л на каждой опоре. В общем случае частоту установки рекомендуется определять в зависимости от требуемой надежности защиты.

Из опыта эксплуатации ВЛ 115 кВ в США известно, что те линии, которые оснащены защитными аппаратами (защищены все опоры и все фазы), уже 5 лет эксплуатируются без отключений. Немаловажно отметить, что в результате установки защитных аппаратов лишь на пяти опорах, принадлежащих участку ВЛ, проходящему по вершине холма, отключения линии прекратились, тогда как до применения защитных аппаратов линия отключалась по 4 раза в год.

Таблица Л6

Эффективность различных способов заземления нейтралей сетей 6-36 кВ

| Требования                                          | ОПН-ЛИ                                                            | ОПН-Л                                                                 |
|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| Область применения.<br>Защита от                    | грозовых перенапряжений                                           | грозовых и коммутационных перенапряжений                              |
| Ограничение перенапряжений                          | Низкий уровень остающегося напряжения                             | Большая зона чувствительности                                         |
| Удар молнии в пролет                                | Работают два ОПН, установленные по концам пролета                 | Работают несколько ОПН, в том числе, установленные на соседних опорах |
| Выявление дефектного аппарата                       | <u>Только после его повреждения</u> по следам повреждений корпуса | Используя тепловизионный контроль                                     |
| Выявление поврежденного аппарата                    | По следам повреждения                                             | При срабатывании отделителя                                           |
| Влияние атмосферных условий                         | Характеристики внешнего ИП зависят от атмосферных условий         | Нет                                                                   |
| Влияние конструкции ИП и способа крепления аппарата | Да                                                                | Нет                                                                   |

*Выбор мест установки ОПН.* Следует отметить, что первостепенными нишами такой защиты являются:

- высокие переходные пролеты через водоемы и другие преграды на рельефе трассы ВЛ;
- места на ВЛ с ослабленной изоляцией;
- двухцепные электропередачи с вертикальной подвеской проводов.
- При этом необходимо защитить хотя бы одну цепь участка трассы ВЛ

- места ВЛ, проходящей через районы с локальной повышенной грозопоражаемостью;
- районы с плохо проводящими грунтами и большим сопротивлением заземления опор;
- ВЛ, на которых отсутствуют грозотросы и др.

Анализ целесообразности установки подвесных ОПН на всех фазах защищаемого участка ВЛ следует производить с учетом их грозопоражаемости, грозовой интенсивности, уровня сопротивления заземления опор, ущербов от перекрытий изоляции, требуемого уровня надежности и т.д. А также, при проектировании необходимо оценить влияние на надежность эксплуатации ВЛ ряда факторов, к которым следует отнести:

- пониженный уровень изоляции;
- не соответствие техническим требованиям состояния тросов (их целостность-нерасплетенность);
- влияние деревьев, расположенных вблизи трасы и т.д.

При наличии хотя бы одного из таких факторов приведет к тому, что установка ОПН на опорах может не только не повысить надежность эксплуатации ВЛ, но и сформировать негативное отношение к самой идее такой защиты ВЛ.

Таким образом, можно предложить различные решения по установке ОПН на опорах. Основные же принципы такой установки можно сформулировать следующим образом:

- для защиты фаз ВЛ от перенапряжений, вызванных ударами молний в опору или в трос вблизи опоры, устанавливается необходимое количество ОПН с малой пропускной способностью;
- для защиты фаз ВЛ от перенапряжений, вызванных ударами молний в фазные провода, на верхних фазах устанавливаются ОПН с большой пропускной способностью;
- для экономически целесообразной надежной защиты ВЛ от перенапряжений, вызванных любыми проявлениями грозовой деятельности, на опорах целесообразно устанавливать ОПН, как с большой, так и с малой пропускной способностью;
- проектирование грозозащиты ВЛ с помощью подвесных ОПН необходимо производить при конкретной привязке к объекту.

Стоит отметить, что существуют два типа аппаратов: без искрового промежутка (ОПН-Л) и ОПН-ЛИ с внешним искровым промежутком (ИП). Оба типа аппаратов имеют как плюсы, так и минусы.

**Защита ВЛ 6-10 кВ от грозových перенапряжений с использованием  
длинно-искровых разрядников**

*1. Общие положения*

По данным РАО «ЕЭС России» общая протяженность находящихся в эксплуатации в РФ ВЛ 6 - 10 кВ превышает 1200 тыс. км. Из них 700 тыс. км подлежат реконструкции и замене. Бесперебойность электроснабжения потребителей в значительной мере определяется надёжностью работы ВЛ 6 - 10 кВ. Одна из основных причин, обуславливающих относительно низкую надёжность во время грозового сезона указанных линий – недостаточная грозоупорность. Необходимо отметить, что в настоящее время изоляция ВЛ 6 - 10 кВ практически не защищена от грозových перенапряжений.

За рубежом и в последние годы в России все больше сооружаются ВЛ с изолированными проводами, которые по сравнению с обычными (неизолированными) проводами обеспечивают высокую надёжность и безопасность работы ВЛ. Однако для исключения пережога проводов вследствие перекрытия изоляции при воздействии грозových перенапряжений и последующего установления силовой дуги изоляторы на ВЛ с изолированными проводами рекомендуется защищать разрядниками или дугозащитной арматурой.

Использование изолированных проводов возобновило интерес энергетиков к грозозащите ВЛ 6 - 10 кВ как с изолированными, так и неизолированными проводами. В последние годы в НПО «Стример» разработаны длинно-искровые разрядники типа РДИ, позволяющие эффективно защитить ВЛ как от индуктированных перенапряжений, так и от прямых ударов молнии в линию. Эти разрядники одобрены на научно-техническом совете РАО

«ЕЭС России» 24.03.2000 и рекомендованы к опытному применению в энергосистемах.

Действия РДИ основано на использовании эффекта скользящего разряда, при котором во время грозового перенапряжения достигается весьма большая длина перекрытия по поверхности разрядника, препятствующая переходу грозового перекрытия в силовую дугу промышленной частоты. После прохождения тока грозового перенапряжения через канал перекрытия протекает сопровождающий ток промышленной частоты. Из-за большой длины перекрытия при переходе тока через ноль разряд гаснет, и линия не отключается.

При ударе молнии в линию или вблизи нее на проводах линии возникает грозовое перенапряжение, под воздействием которого изоляция линии может перекрыться.

После грозового перекрытия изоляции вероятность установления силовой дуги главным образом зависит от средней напряженности электрического поля, создаваемой рабочим напряжением линии на канале перекрытия.

Физические закономерности, связанные с переходом импульсного перекрытия в силовую дугу, исследовались в разных лабораториях мира. На основе обобщения результатов этих исследований и опыта эксплуатации действующих ВЛ в России принято нормативное соотношение, позволяющее оценивать вероятность возникновения силовой дуги при грозовых перекрытиях изоляции:

$$P(д) = (1,59 \cdot U(ф) / L - 6) \cdot 10^{-2} = (1,59 \cdot E - 6) \cdot 10^{-2}, \quad (M1)$$

где  $E = U(ф) / L$  – средняя напряженность электрического поля вдоль пути перекрытия, кВ/м;

$U(ф)$  – фазное напряжение линии, кВ;

$L$  – длина пути перекрытия, м.

Как видно из (M1), при заданном номинальном напряжении вероятность возникновения дуги приблизительно обратно пропорциональна длине пути перекрытия. Поэтому за счет увеличения  $L$  можно снизить вероятность

установления силовой дуги и, следовательно, сократить число отключений линий. Данный способ грозозащиты реализует этот принцип за счет использования специальных разрядников.

Принцип работы разрядника основан на использовании эффекта скользящего разряда, который обеспечивает большую длину импульсного перекрытия по поверхности разрядника, и предотвращении за счет этого перехода импульсного перекрытия в силовую дугу тока промышленной частоты. Разрядный элемент РДИ, вдоль которого развивается скользящий разряд, имеет длину, в несколько раз превышающую длину защищаемого изолятора линии. Конструкция разрядника обеспечивает его более низкую импульсную электрическую прочность по сравнению с защищаемой изоляцией. Главной особенностью длинно-искрового разрядника является то, что вследствие большой длины импульсного грозового перекрытия вероятность установления дуги короткого замыкания сводится к нулю.

#### *Разрядные напряжения скользящего разряда*



Рис. М1. Фотография скользящего разряда

Длинно-искровые разрядники основаны на эффекте скользящего разряда. Упрощенная эквивалентная схема скользящего разряда по поверхности твердого диэлектрика приведена на рис. М.2.

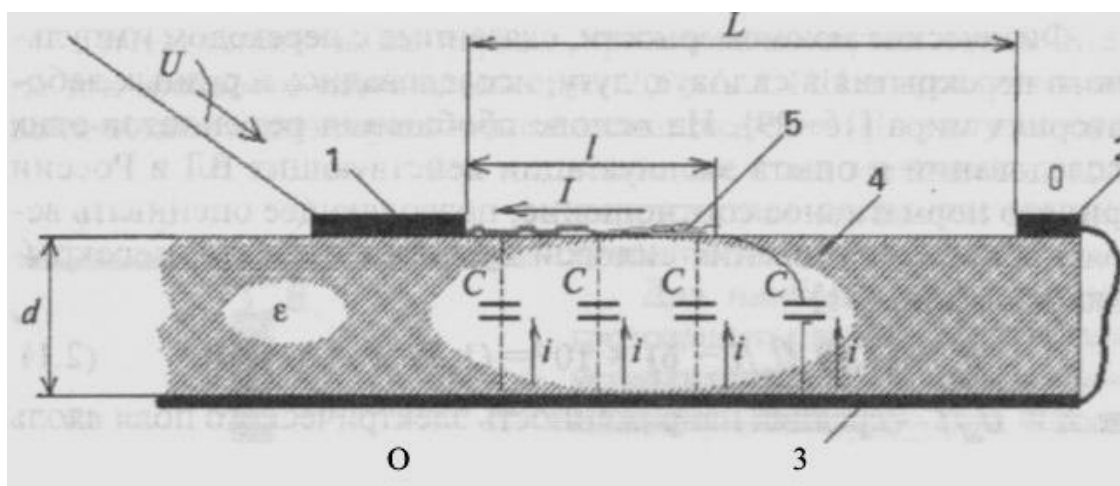


Рис. М2. Эквивалентная схема скользящего разряда: 1 – электрод, находящийся под потенциалом  $U$ ; 2 – электрод, находящийся под потенциалом 0; 3 – проводящая подложка, находящаяся под потенциалом 0; 4 – твердая изоляция; 5 – канал разряда

Электроды 1 и 2, между которыми развивается разряд, расположены на поверхности твердого диэлектрика 4. К электроду 1 прикладывается импульс высокого напряжения  $U$ , а электрод 2 заземляется, то есть имеет потенциал 0. На противоположной поверхности твердого диэлектрика 4 расположена проводящая подложка 3, гальванически связанная с электродом 2. Таким образом, напряжение  $U$ , приложенное между электродами 1 и 2, воздействует также на электроды 1 и 3. Вследствие малой толщины диэлектрика наличие подложки 3 обеспечивает весьма высокие значения напряженности электрического поля на поверхности электрода 1 (особенно на его кромках) при относительно небольшом напряжении  $U$ . При достижении начальной напряженности коронного разряда с электрода 1 начинает развиваться скользящий разряд. Фактически наличие электрода 2 слабо влияет на величину напряженности электрического поля на поверхности электрода 1 и, соответственно, на напряжение коронного разряда. Канал разряда 5 обладает

распределенной емкостью  $C$  относительно подложки 3. Элементарный участок канала имеет емкостное сопротивление относительно подложки:

$$X(c)=1/\omega \cdot C, \quad (M2)$$

где  $\omega$  — эквивалентная круговая частота воздействующего импульса напряжения.

Под воздействием импульса напряжения  $U$  через него течет элементарный ток:

$$i=U/X(c)=U \cdot \omega \cdot C. \quad (M3)$$

Общий емкостной ток есть сумма элементарных токов:

$$I=\Sigma i=\Sigma U \cdot \omega \cdot C=U \cdot \omega \cdot \Sigma C. \quad (M4)$$

Ток, проходящий через основание канала разряда, является током переноса электронов и ионов в канале, однако в диэлектрике он продолжается емкостным током и равен ему по величине. Ток, протекающий через канал, его разогревает, что приводит к термической ионизации газа в канале и к падению сопротивления канала. Вследствие этого потенциал электрода 1 выносится на конец канала разряда, где увеличивается напряженность электрического поля и происходит дальнейшее образование лавин электронов и стримеров с конца канала разряда. Падение напряжения на канале скользящего разряда невелико, поэтому длина его резко увеличивается с ростом напряжения и процесс завершается полным перекрытием промежутка.

Чем больше ток в канале разряда, тем выше проводимость канала и потенциал на его конце, следовательно, длиннее скользящий разряд и ниже напряжение перекрытия. Ток, в свою очередь, определяется емкостью канала разряда по отношению к противоположному электроду. Поэтому чем больше емкость, тем ниже должно быть разрядное напряжение при неизменном расстоянии между электродами по поверхности диэлектрика. Таким образом, разрядное напряжение может быть связано с емкостью канала разряда по отношению к противоположному электроду.

Следует особо отметить слабую зависимость разрядного напряжения от расстояния между электродами, то есть весьма большое расстояние может быть

перекрыто скользящим разрядом при относительно небольшом напряжении. Этот эффект скользящего разряда используется в длинно-искровых разрядниках. Весьма длинные промежутки (5 м и более) по поверхности проводов перекрываются при относительно низком напряжении. Разрядные напряжения при отрицательной полярности импульса существенно ниже, чем при положительной. Чем тоньше слой изоляции, тем ниже разрядные напряжения, а также напряжения пробоя изоляции. Разрядные напряжения по поверхности изолированного провода должны быть ниже, чем пробивное напряжение изоляции. Таким образом, толщина изоляции должна быть скоординирована с необходимой длиной перекрытия РДИ.

## *2. Модификации РДИ*

### *2.1 Разрядник длинно-искровой петлевого типа (РДИП)*

РДИП-10 предназначен для защиты воздушных линий электропередачи напряжением 6 - 10 кВ трехфазного переменного тока с защищёнными и неизолированными проводами от индуктированных грозовых перенапряжений и их последствий и рассчитан для работы на открытом воздухе при температуре окружающего воздуха от минус 60 °С до плюс 50 °С в течение 30-и лет.

Конструктивный эскиз, показывающий общий вид и основные составные части разрядника приведен на рис. МЗ.

Разрядник состоит из согнутого в виде петли металлического стержня, покрытого слоем изоляции из полиэтилена высокого давления. Концы изолированной петли закреплены в зажиме крепления, с помощью которого разрядник присоединяется к штырю изолятора на опоре ВЛ. В средней части петли поверх изоляции расположена металлическая трубка. На проводе ВЛ, напротив металлической трубки разрядника, закрепляется универсальный зажим для создания необходимого воздушного искрового промежутка  $S$ . Закрепление изолированной петли разрядника на ВЛ производится с помощью зажима крепления. Зажим крепления изготовлен из стали, покрытой защитным слоем цинка, и имеет конструкцию, обеспечивающую надежное крепление

### Схема установки на опоре со штыревыми изоляторами



218

имеющим потенциал опоры. Под воздействием приложенного импульсного напряжения вдоль поверхности изоляции петли от металлической трубки к зажиму крепления разрядника (по одному, или по обоим плечам петли) развивается скользящий разряд. Вследствие эффекта скользящего разряда вольт-секундная характеристика разрядника расположена ниже, чем вольт-секундная характеристика изолятора, то есть при воздействии грозового перенапряжения разрядник перекрывается, а изолятор нет. После прохождения импульсного тока молнии разряд гаснет, не переходя в силовую дугу, что предотвращает возникновение короткого замыкания, повреждение провода и отключение ВЛ. На рис. М4 представлен момент срабатывания разрядника при воздействии грозового импульса перенапряжения во время лабораторных испытаний на полномасштабной модели траверсы ВЛ 10 кВ.



Рис. М4. Момент срабатывания разрядника при воздействии грозового импульса перенапряжения во время лабораторных испытаний

### *Основные технические характеристики РДИП-10-4-УХЛ1*

Конструкция узла крепления РДИП-10-4-УХЛ1 позволяет устанавливать его на штырь или крюк изолятора ВЛ и на другие элементы арматуры с защищенными и неизолированными проводами. Длинно-искровые разрядники:

- предотвращают пережог проводов (как и «дугозащитные рога»);
- исключают дуговые замыкания и отключения линии, возникающие вследствие индуктированных грозовых перенапряжений.

Разрядный элемент РДИ, вдоль которого развивается скользящий разряд, имеет длину, в несколько раз превышающую длину импульсного перекрытия защищаемого изолятора линии. Конструктивные особенности разрядника обеспечивают более низкое разрядное напряжение при грозовом импульсе по сравнению с разрядным напряжением защищаемой изоляции. Главной особенностью РДИ является то, что вследствие большой длины грозового перекрытия вероятность установления дуги короткого замыкания практически сводится к нулю.

Таблица М1

#### Технические характеристики РДИП-10-4-УХЛ1

|                                                       |       |
|-------------------------------------------------------|-------|
| Класс напряжения, кВ                                  | 10    |
| Размер внешнего искрового промежутка, см              | 78    |
| Размер внешнего искрового промежутка, см              | 2 - 4 |
| 50% импульсное пробивное напряжение, кВ, не более     | 110   |
| Напряжение координации с изолятором ШФ10-Г, кВ        | 400   |
| Выдерживаемое напряжение коммутационного импульса, кВ | 90    |
| Выдерживаемое напряжение промышленной частоты, кВ:    |       |
| в сухом состоянии                                     | 60    |
| под дождем                                            | 50    |
| Ток гашения дуги при номинальном напряжении, А        | 200   |
| Выдерживаемый импульсный ток 8-20 мкс, кА             | 40    |

### Схема установки

Разрядник предназначен для защиты ВЛ 6, 10 кВ от индуктированных грозовых перенапряжений, которые, как уже отмечалось, составляют подавляющую долю от общего числа грозовых перенапряжений, способных приводить к перекрытиям изоляции.

Известно, что величина индуктированных перенапряжений не превосходит значения 300 кВ, и это позволяет при правильной организации грозозащиты исключить возможность одновременного перекрытия двух или трех фаз на одной опоре и, соответственно, междуфазных коротких замыканий. Для этого необходимо устанавливать по одному разряднику на опору с чередованием фаз, например, на первой опоре разрядник устанавливается на фазу А, на второй — на фазу В, на третьей — на фазу С и т. д. (см. рис. М5).

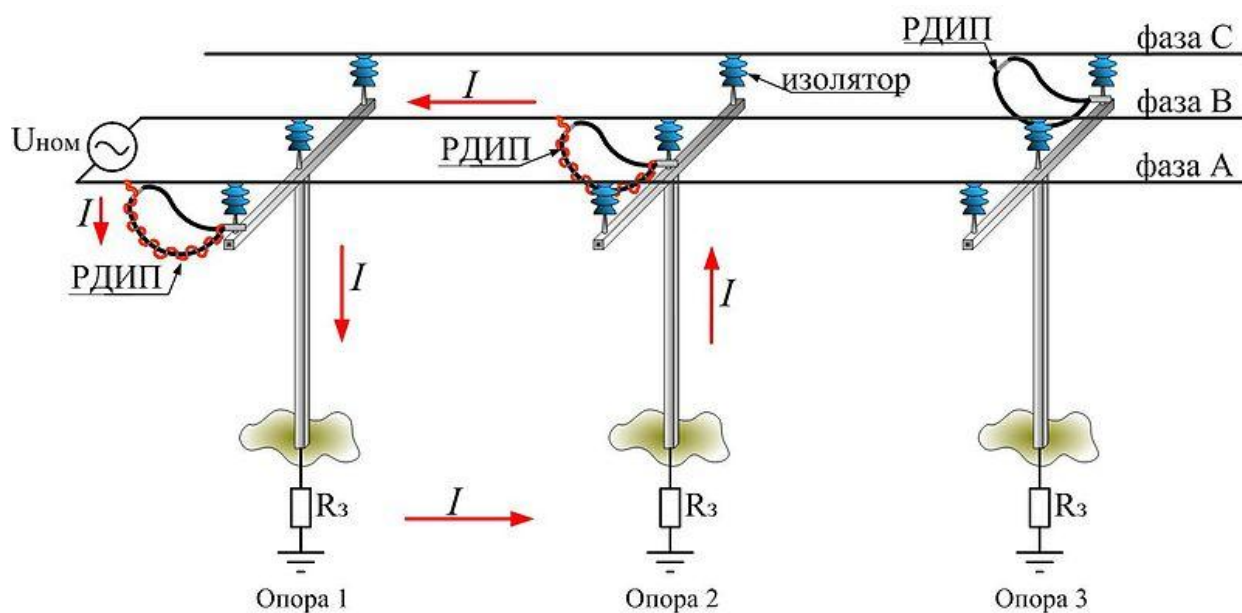


Рис. М5. Схема установки РДИП

При такой системе установки индуктированное на линии грозовое перенапряжение приводит к перекрытию разрядников на разных фазах соседних опор и образованию контура междуфазного замыкания сопровождающего тока напряжения промышленной частоты, в который включены сработавшие разрядники и сопротивления заземления опор  $R_3$  (см.

рис. М5), ограничивающие этот ток на уровне нескольких сотен ампер, способствуя его гашению и предотвращению отключения ВЛ.

Разрядные характеристики РДИП-10 обеспечивают то, что ни один из изоляторов всех трех фаз в данной схеме не перекрывается, поскольку каждый из них защищен разрядником, установленным электрически параллельно ему и расположенным либо непосредственно рядом с изолятором, либо на соседней опоре. При уровнях индуктированных перенапряжений, близких к импульсному напряжению срабатывания разрядника, возможно перекрытие разрядника лишь на одной опоре, приводящее к однофазному замыканию на землю. Ток замыкания при этом не превышает 10 - 20 А, и петлевой разрядник с общей длиной перекрытия 80 см гарантированно исключает возникновение силовой дуги.

## *2.2 Усовершенствованный разрядник длинно-искровой петлевой РДИП1*

РДИП1-10 по характеристикам, принципу действия и назначению не отличается от разрядника РДИП-10-IV-УХЛ1, являясь лишь его конструктивной модификацией.



Рис. М6. Усовершенствованный разрядник длинно-искровой петлевой РДИП1

Конструктивное отличие РДИП1 от РДИП сводится к измененным форме изгиба петли, деталям узла крепления и способу обеспечения воздушного зазора между разрядником и проводом. Общий вид разрядника приведен на рис. М6. Воздушный разрядный промежуток между электродом РДИП1 и проводом сохраняет установленные параметры независимо от геометрии провода в пролете и даже при проскальзывании провода в обвязке на изоляторе.

### *2.3 Разрядник длинно-искровой модульный (РДИМ)*



Рис. М7. Разрядник длинно-искровой модульный (РДИМ)

РДИМ предназначен для защиты от прямых ударов молнии и индуктированных грозовых перенапряжений воздушных линий электропередачи (ВЛ) и подходов к подстанциям напряжением 6, 10 кВ трехфазного переменного тока с неизолированными и защищенными проводами.

РДИМ обладает наилучшими вольт-секундными характеристиками, именно поэтому его целесообразно применять для защиты участков линии, подверженных прямым ударам молнии, а также для защиты подходов к подстанциям ВЛ.

РДИМ состоит из двух отрезков кабеля с корделем, выполненным из резистивного материала. Отрезки кабеля сложены между собой так, что образуются три разрядных модуля 1, 2, 3 (см. рис. М8).

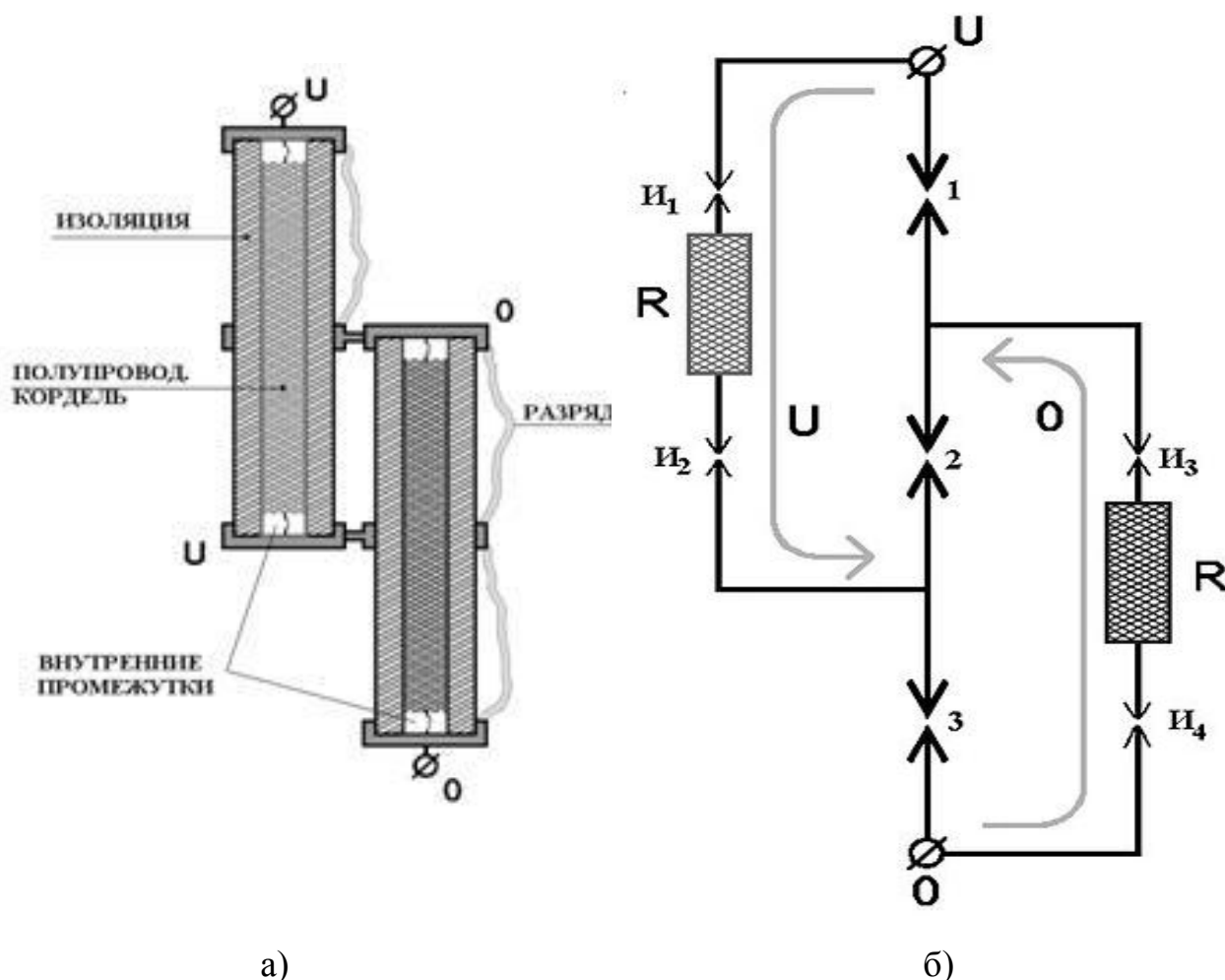


Рис. М8. Конструкция (а) и принципиальная электрическая схема (б)

РДИМ для защиты ВЛ 10кВ

Отрезки резистивного корделя подсоединяются к металлическим оконцевателям через внутренние искровые промежутки И1, И2, И3, И4. При воздействии импульса грозового перенапряжения они перекрываются и резистивный кордель верхнего отрезка кабеля, имеющий сопротивление  $R$ , выносит высокий потенциал  $U$  на поверхность нижнего отрезка кабеля в его

средней части. Аналогично, резистивный кордель нижнего отрезка кабеля, имеющий также сопротивление  $R$ , выносит низкий потенциал 0 на поверхность верхнего отрезка кабеля в его средней части. Таким образом, к каждому разрядному модулю одновременно приложено полное напряжение  $U$  и для всех трёх разрядных модулей 1, 2, 3 созданы условия для одновременного начала развития скользящих разрядов, которые, при перекрытии соответствующих модулей, создают единый, длинный канал перекрытия.

Таблица М2

Технические характеристики РДИМ-10-1,5-IV-УХЛ1

|                                                                                    |                      |
|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Класс напряжения, кВ                                                               | 10                   |
| Длина перекрытия по поверхности, мм                                                | 1500                 |
| 50% импульсное разрядное напряжение, кВ, не более                                  |                      |
| на положительной полярности                                                        | 100                  |
| на отрицательной полярности                                                        | 90                   |
| Напряжение координации с изолятором ШФ10-Г, кВ                                     | 300                  |
| Многokrатно выдерживаемое внутренней изоляцией импульсное напряжение, не менее, кВ | 300, 50<br>импульсов |
| Выдерживаемое напряжение промышленной частоты, не менее, кВ:                       |                      |
| в сухом состоянии                                                                  | 42                   |
| под дождем                                                                         | 28                   |
| Ток гашения дуги при номинальном напряжении, А                                     | 200                  |
| Выдерживаемый импульсный ток 8/20 мкс, кА                                          | 40, 20<br>импульсов  |
| масса, кг                                                                          | 1,6                  |
| срок службы, не менее, лет                                                         | 30                   |

### *Схема установки*

При необходимости обеспечения гарантированной защиты от любых грозовых воздействий, в том числе, от прямого удара молнии в ВЛ, нужно устанавливать на каждую опору защищаемого участка ВЛ по три разрядника модульного типа РДИМ-10-1,5-IV-УХЛ1, на все фазы. При этом необходимо обеспечить низкое (желательно не более 10 Ом) сопротивление заземления лишь на ближайших нескольких опорах подхода ВЛ к подстанции. Остальные опоры по условиям грозозащиты специально заземлять не требуется. В случае если технико-экономический анализ показывает целесообразность защиты от прямых ударов молнии не всей линии, а лишь отдельных участков, их целесообразно защищать следующим образом. На всех опорах защищаемого участка следует установить по три разрядника модульного типа РДИМ-10-1,5-IV-УХЛ1, на все фазы. Две опоры, являющимися крайними с двух сторон защищаемого от прямых ударов молнии участка ВЛ, необходимо заземлять, обеспечивая, по возможности, величину их сопротивления заземления не более 10 Ом. Если это требование по объективным причинам невыполнимо, следует компенсировать это дополнительным заземлением еще одной, или нескольких соседних опор на каждой из сторон участка. Остальные опоры данного участка ВЛ специально заземлять не надо.

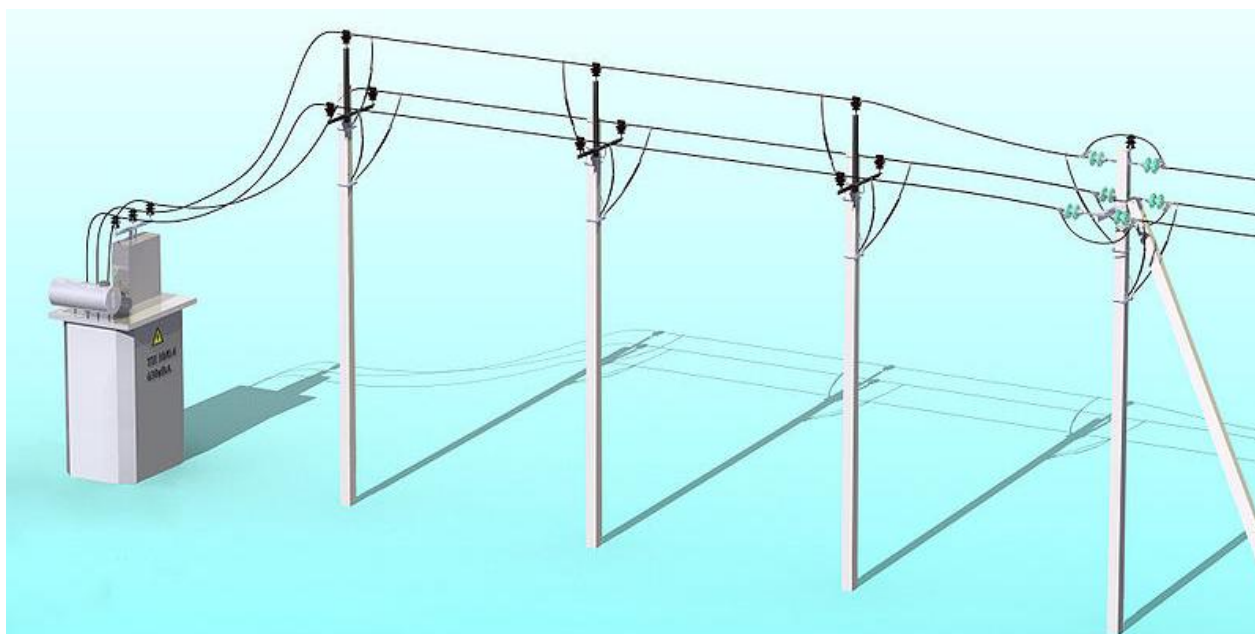


Рис. М9. Установка РДИМ для защиты подходов к подстанции

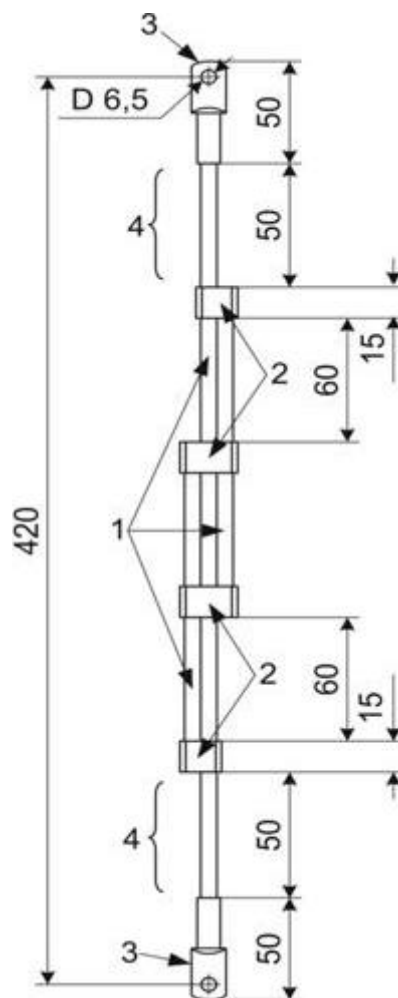
Для защиты подхода к подстанции от набегающих волн грозовых перенапряжений устанавливается комплект их трех разрядников РДИМ на каждую из 4-х ближайших опор к подстанции. Так оборудование ближайших к подстанции опор исключает повреждение оборудования подстанции при любых последствиях удара молнии.

#### *2.4 Разрядник длинно-искровой РДИМ-10-К*

РДИМ-К предназначен для защиты от индуктированных грозовых перенапряжений и их последствий воздушных линий электропередачи (ВЛ) напряжением 6, 10 кВ трехфазного переменного тока с неизолированными и защищенными проводами компактного исполнения с расстоянием между соседними проводами около 0,5 м и с изоляторами класса 20 кВ в районах со степенью загрязнения не выше II.

Разрядник состоит из двух отрезков кабеля с резистивным корделем и стержневого изолятора в виде тонкого жгута из силиконовой резины (см. рис. М10). Стержневой изолятор снабжен оконцевателями, с помощью которых разрядник крепится одним концом к проводу, а другим - к опоре, и служит для обеспечения необходимой механической прочности разрядника, а также для создания внешних искровых разрядных промежутков. Отрезки кабеля крепятся к стержневому изолятору при помощи металлических втулок, образуя три разрядных модуля. Закрепление разрядника на ВЛ (см. рис. М11) производится с помощью крепежного зажима. Конструкция крепежного зажима разрядника может быть изменена и иметь форму, адаптированную под конкретные условия крепления разрядника на опоре ВЛ.

При воздействии импульса грозового перенапряжения сначала перекрываются искровые промежутки по поверхности стержневого изолятора с обоих его концов между металлическими оконцевателями и крайними втулками крепления к нему отрезков кабеля. Импульсное напряжение благодаря проводящим свойствам внутренних корделей двух отрезков кабеля прикладывается одновременно к трем разрядным модулям, при искровом



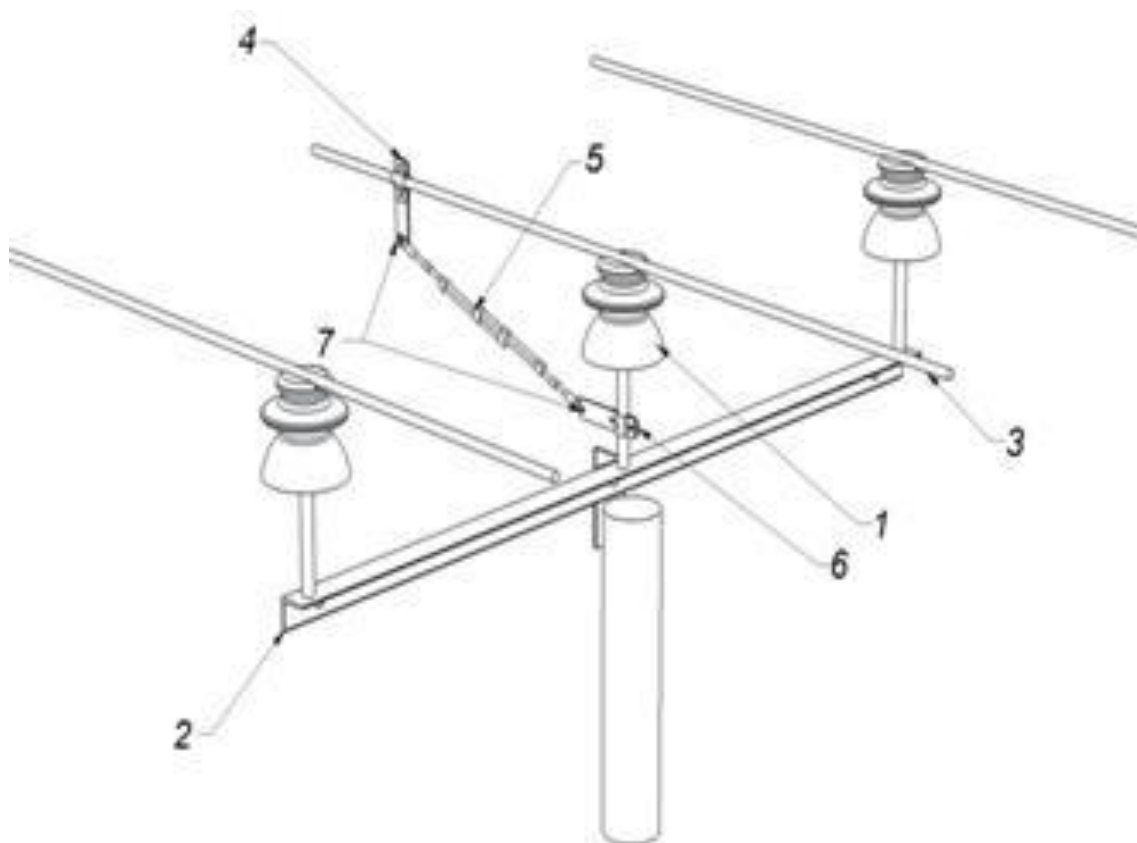
1 – разрядные модули; 2 – металлические втулки; 3 – металлические оконцеватели;  
4 – искровые промежутки

На одноцепных ВЛ разрядники устанавливаются по одному на каждую опору параллельно изолятору только средней фазы.

228

воздействии индуктированных перенапряжений возможно только однофазное замыкание на землю. При этом сопровождающий ток является емкостным и в подавляющем большинстве случаев не превышает 10 А. Поэтому относительно небольшой длины пути перекрытия по разряднику достаточно для гашения сопровождающего тока.

При воздействии индуктированного перенапряжения на ВЛ срабатывают разрядники, установленные на средней фазе, и она приобретает нулевой потенциал. Благодаря большому коэффициенту связи между средней и крайней фазами компактной ВЛ, а также вследствие падения напряжения на сопротивлении заземления опор от тока, протекающего через сработавший разрядник, напряжение на изоляторах крайних фаз не превышает их разрядное напряжение. Таким образом все три фазы ВЛ оказываются защищёнными от индуктированных перенапряжений.



а)



б)

Рис. М11. РДИМ-К на промежуточной опоре а) схема установки; б) фото испытаний:

1 – изолятор; 2 – траверса опоры; 3 – провод; 4 – зажим прокусывающий; 5 – разрядник; 6 – зажим крепёжный; 7 – крепёжные детали

Таблица МЗ

#### Технические характеристики РДИМ-10-К-II-УХЛ1

|                                                                                         |                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Класс напряжения                                                                        | 10 кВ                  |
| Длина перекрытия по поверхности                                                         | 27 см                  |
| Импульсное 50 %-ное разрядное напряжение, не более                                      | 140 кВ                 |
| Напряжение координации с изолятором ШФ10-Г                                              | 300 кВ                 |
| Многokrатно выдерживаемое внутренней изоляцией импульсное напряжение, не менее          | 50 импульсов<br>300 кВ |
| Выдерживаемое напряжение промышленной частоты, не менее в сухом состоянии<br>под дождём | 42 кВ<br>28 кВ         |
| Многokrатно выдерживаемый импульсный ток 8/20 мкс, не менее                             | 20 импульсов<br>40 кА  |
| Масса                                                                                   | 0,15 кг                |
| Срок службы, не менее                                                                   | 30 лет                 |

## 2.5 Разрядник длинно-искровой РДИШ-10

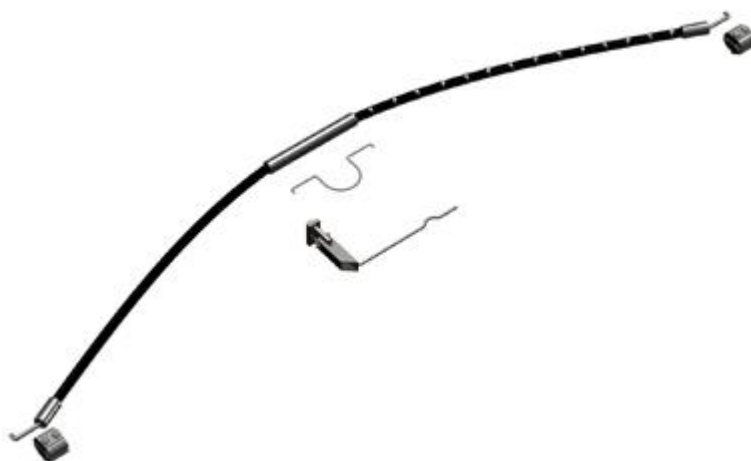
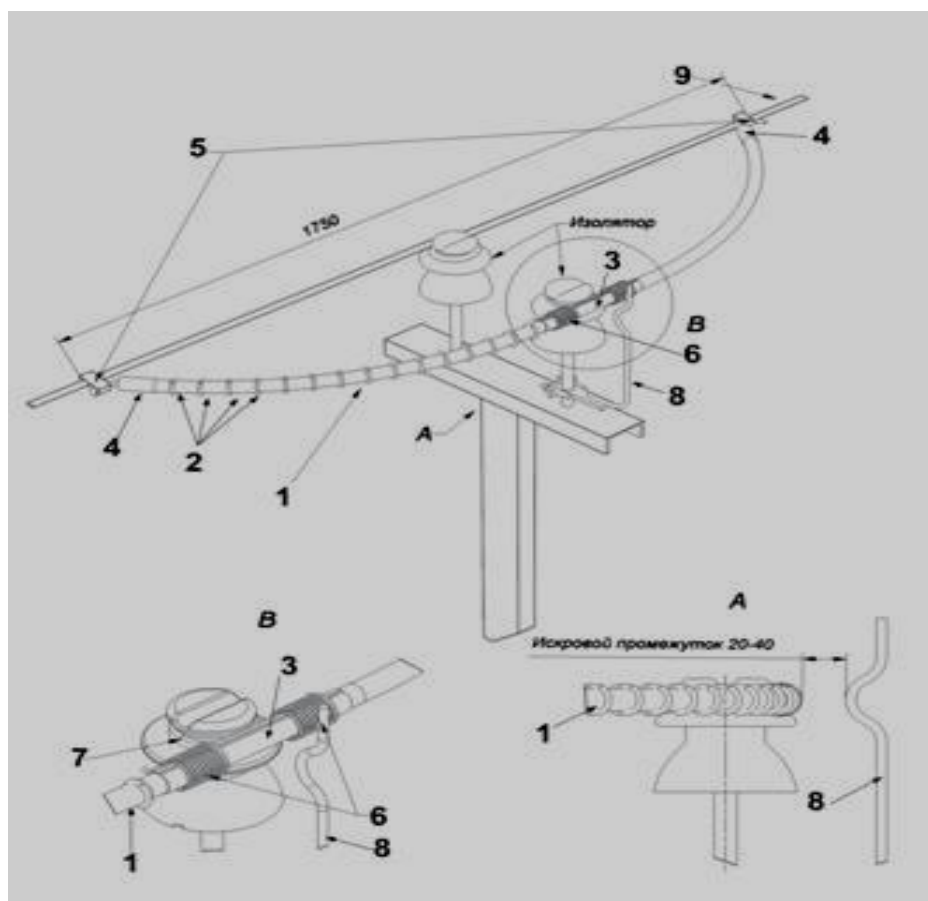


Рис. М12. Внешний вид РДИШ-10

Разрядник предназначен для защиты ВЛ напряжением 6, 10 кВ трехфазного переменного тока с защищенными и неизолированными проводами от индуктированных грозовых перенапряжений и их последствий в тех случаях, когда необходимо применять двойное крепление проводов.



a)

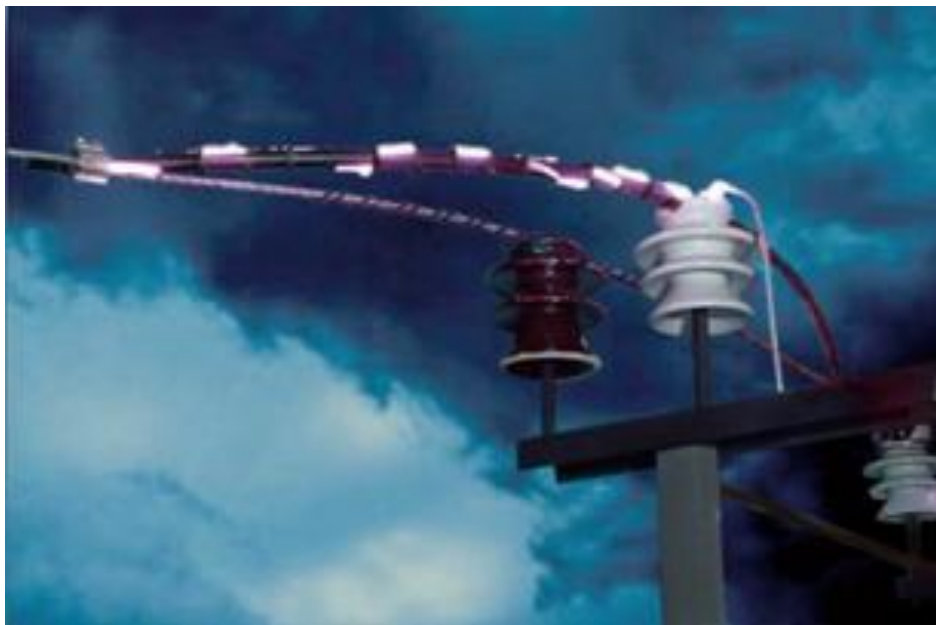


Рис. М13. РДИ шлейфового типа а) эскиз; б) фото испытаний:

- 1 – отрезок кабеля; 2 – кольцевые электроды; 3 – металлическая трубка;  
 4 – оконцеватели; 5 – зажимы; 6 – обвязка проволокой; 7 – скоба;  
 8 – стержневой электрод

Конструкция РДИШ-10 показана на рис. М13. Основным элементом разрядника является отрезок специального кабеля с алюминиевой монолитной жилой  $\varnothing 9$  мм и трёхслойной изоляцией из сшитого полиэтилена (ПЭ) общей толщиной около 4 мм. Прилегающий к жиле слой выполнен из проводящего ПЭ, средний слой – из чисто изоляционного ПЭ, а наружный слой – из светостабилизированного трекингостойкого ПЭ. На одном из плечей отрезка кабеля установлены промежуточные кольцевые электроды, обеспечивающие разбиение канала перекрытия на отдельные отрезки. Кабель снабжён алюминиевыми оконцевателями, через которые жила кабеля выступает за пределы изоляции. Разрядник крепится к проводу за эти выпуски с использованием зажимов. В средней части кабеля установлена металлическая трубка, за которую, посредством скобы и обвязки вязальной проволокой, осуществляется крепеж разрядника к изолятору. К штырю этого же изолятора, напротив металлической трубки, устанавливается стержневой электрод для обеспечения необходимого искрового промежутка.

Соединительные зажимы изготовлены из стали, покрытой защитным слоем цинка, и имеют конструкцию, обеспечивающую надежное крепление разрядника к проводу ВЛ. Конструкция зажима имеет две модификации, позволяющие устанавливать разрядник как на неизолированные провода, так и на защищённые провода, для которых зажим имеет прокусывающие шипы. Для достижения необходимого искрового промежутка 20 - 40 мм возможно изгибание стержневого электрода, путем приложения усилия после его установки.

При возникновении на проводе ВЛ индуктированного грозового импульса перенапряжения металлическая трубка на кабеле разрядника приобретает тот же высокий потенциал, что и провод (вследствие большой емкостной связи между трубкой и жилой кабеля). Поэтому первоначально практически всё грозовое перенапряжение оказывается приложенным к искровому воздушному промежутку между трубкой и заземленным стержневым электродом. При напряжении порядка 50 - 70 кВ промежуток пробивается, и металлическая трубка на поверхности кабеля приобретает нулевой потенциал земли. Таким образом, перенапряжение оказывается приложенным между жилой кабеля и металлической трубкой на его поверхности. Под воздействием этого перенапряжения вдоль поверхности изоляции разрядника развивается скользящий разряд, который проходит от металлической трубки через промежуточные кольцевые электроды к соответствующему оконцевателю. Провод ВЛ оказывается связанным с заземлённой опорой через длинный канал разряда, который разбит на отдельные отрезки кольцевыми электродами. После прохождения импульсного тока грозового перенапряжения по каналу разряда протекает сопровождающий ток промышленной частоты. Однако при первом переходе тока через ноль разряд гаснет, не переходя в силовую дугу, что предотвращает возникновение короткого замыкания и отключение ВЛ.

Основные технические характеристики разрядника приведены в табл. М4.

## Технические характеристики РДИШ-10- IV-УХЛ1

|                                                                                                                  |                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| КЛАСС НАПРЯЖЕНИЯ                                                                                                 | 10 кВ                  |
| Длина перекрытия по поверхности                                                                                  | 80 см                  |
| Внешний искровой промежуток                                                                                      | 2-4 см                 |
| Импульсное 50 %-ное разрядное напряжение, не более<br>на положительной полярности<br>на отрицательной полярности | 110 кВ<br>90 кВ        |
| Напряжение координации с изолятором ШФ10-Г                                                                       | 300 кВ                 |
| Многokrатно выдерживаемое внутренней изоляцией<br>импульсное напряжение, не менее                                | 50 импульсов<br>300 кВ |
| Выдерживаемое напряжение промышленной частоты, не<br>менее<br>в сухом состоянии<br>под дождём                    | 42 кВ<br>28 кВ         |
| Многokrатно выдерживаемый<br>импульсный ток 8/20 мкс, не менее                                                   | 20 импульсов<br>40 кА  |
| Масса                                                                                                            | 2,3 кг                 |
| Срок службы, не менее                                                                                            | 30 лет                 |

Конструкция разрядника, кроме того, обеспечивает усиление крепления провода на опоре, то есть разрядник заменяет обычный шлейф двойного крепления.

Разрядники РДИШ-10 целесообразно применять для защиты ВЛ 6, 10 кВ от индуктированных грозовых перенапряжений в тех случаях, когда необходимо применять двойное крепление проводов. Их надо устанавливать по одному на опору с чередованием фаз, так же как РДИП-10.

## *2.6. Молниезащита ВЛ 6-10 кВ*

Принципы молниезащиты электрических сетей 6-10 кВ с помощью длинно-искровых разрядников

Применение существующих видов длинно-искровых разрядников позволяет решать задачу комплексной защиты электрических сетей от грозовых перенапряжений и их последствий.

Установка разрядников на всем протяжении воздушных линий (ВЛ) и на подходах к подстанциям и кабельным вставкам позволяет исключить перекрытия изоляции на ВЛ и все негативные сопровождающие последствия как при индуктированных грозовых перенапряжениях, так и при прямом ударе молнии (ПУМ). При этом обеспечивается отсутствие грозовых отключений ВЛ, разрушений изоляторов, пережога проводов, экономия ресурсов и защита подстанционного оборудования.

Технология грозозащиты длинно-искровыми разрядниками применима для ВЛ с любыми видами опор – железобетонными, металлическими, деревянными, изоляторов – штыревыми, натяжными, подвесными, фарфоровыми, стеклянными, полимерными, и проводов, как защищенными, так и неизолированными.

В зависимости от установленных технических требований по грозозащите участков электрических сетей возможно применение на них различных видов разрядников и их сочетаний.

### *2.6.1 Защита ВЛ 6-10 на железобетонных и металлических опорах от индуктированных перенапряжений*

Для надежной защиты от индуктированных грозовых воздействий необходимо устанавливать на каждую одноцепную опору защищаемого участка ВЛ по одному разряднику. В зависимости от типа опор, траверс, изоляторов ВЛ и других определяющих обстоятельств применяются разрядники трех типов: РДИП-10-IV-УХЛ1, РДИШ-10-IV-УХЛ1, РДИМ-10-К-II-УХЛ1.

Разрядники петлевые РДИП-10-IV-УХЛ1 можно устанавливать на любые виды опор, с чередованием фаз.

Разрядники шлейфовые РДИШ-10-IV-УХЛ1 целесообразно использовать в местах двойного крепления провода, вместо петлевых.

Разрядники модульные РДИМ-10-К-II-УХЛ1 предназначены для защиты ВЛ только с компактным размещением проводов, расстояние между которыми не превышает 50 см, и с изоляторами ШФ-20 в районах с не более, чем второй степенью загрязнённости атмосферы. Эти разрядники устанавливаются только на среднюю фазу.

На двухцепных ВЛ разрядники должны устанавливаться на обе цепи таким образом, чтобы на каждой из опор защищалась только одна пара одноименных фаз, с тем же принципом чередования, что и для одноцепных ВЛ. Нарушение этого требования создает возможность короткого междуфазного замыкания и отключения линии при индуцированном грозовом перенапряжении.

При схеме установки разрядников с последовательным чередованием фаз токи промышленной частоты, сопровождающие многофазные замыкания, обусловленные грозовыми перенапряжениями, протекают по контурам, включающим в себя сопротивления заземления опор. Принцип действия РДИ основан на предотвращении перехода искрового перекрытия в силовую дугу промышленной частоты. При этом эффективность гашения сопровождающих токов тем выше, чем меньше они по величине, а наличие сопротивлений заземления опор в контуре замыкания благоприятным образом влияет на снижение величины сопровождающих токов.

Поэтому с точки зрения грозозащиты от индуцированных перенапряжений установка РДИ на опору ВЛ не налагает никаких специальных требований к заземлению опоры, связанных со снижением его величины.

Существующие нормы ПУЭ по заземлению опор на ВЛ, установленные в п. 2.5.129 должны применяться с учетом вышеизложенной специфики работы РДИ, которая не позволяет отнести длинно-искровые разрядники к «другим

устройствам молниезащиты» по п. 2.5.129-1), таким, как например, трубчатые разрядники, для которых требование по снижению сопротивления заземления является необходимым исходя из такой их технической характеристики, как нижняя граница тока гашения.

Длинно-искровые разрядники в соответствии со своими конструктивными параметрами, техническими характеристиками и принципу действия не относятся к устройствам, установка которых на ВЛ приводит к дополнительному риску возникновения аварийных режимов, требующему принятия специальных мер технической безопасности. Более того, наличие РДИ на ВЛ должно устранить все случаи однофазных замыканий, вызванных грозовыми перенапряжениями.

Смысл установленных норм ПУЭ по сопротивлениям заземления сводится к ограничению числа грозовых отключений. Поэтому даже нынешняя редакция п.2.5.129 ПУЭ допускает возможность превышения сопротивлений заземления части опор по сравнению с нормируемыми значениями, если удовлетворяется главное требование по ожидаемому числу грозовых отключений. Установка РДИП как раз и обеспечивает снижение числа грозовых отключений, при этом для данной системы грозозащиты увеличение сопротивлений заземления принципиально может лишь повысить ее эффективность.

В связи с этим для опор ВЛ, оснащенных длинно-искровыми разрядниками, следует применять те же нормы по сопротивлению заземления, что и для опор без устройств молниезащиты.

#### *2.6.2 Защита ВЛ 6-10 кВ на железобетонных и металлических опорах от прямых ударов молнии*

При необходимости обеспечения гарантированной защиты от любых грозовых воздействий, в том числе, от прямого удара молнии в ВЛ, необходимо устанавливать на каждую опору защищаемого участка ВЛ по три разрядника модульного типа РДИМ-10-1,5-IV-УХЛ1, на все фазы. При этом необходимо

обеспечить низкое (желательно не более 10 Ом) сопротивление заземления лишь на ближайших нескольких опорах подхода ВЛ к подстанции. Остальные опоры по условиям грозозащиты специально заземлять не требуется.

В случае если технико-экономический анализ показывает целесообразность защиты от прямых ударов молнии не всей линии, а лишь отдельных участков, их целесообразно защищать следующим образом. На всех опорах защищаемого участка следует установить по три разрядника модульного типа РДИМ-10-1,5-IV-УХЛ1, на все фазы. Две опоры, являющимися крайними с двух сторон защищаемого от прямых ударов молнии участка ВЛ, необходимо заземлять, обеспечивая, по возможности, величину их сопротивления заземления не более 10 Ом. Если это требование по объективным причинам невыполнимо, следует компенсировать это дополнительным заземлением еще одной, или нескольких соседних опор на каждой из сторон участка. Остальные опоры данного участка ВЛ специально заземлять не надо.

### *2.6.3 Защита ВЛ 6-10 кВ на деревянных опорах от индуктированных перенапряжений*

В сухом и чистом состоянии деревянные опоры являются изоляторами. И если бы они не подвергались воздействию влаги и грязи, защищать линию от индуктированных перенапряжений не требовалось бы, так как при наибольшей практически возможной величине индуктированного перенапряжения 300 кВ перекрытия изолятора и опоры не происходило бы. Однако при загрязнении и увлажнении опор, что обычно происходит на практике, опоры становятся проводящими, хотя и с довольно большим сопротивлением (порядка десятков и сотен кОм). Как показали проведённые в лаборатории испытания, в этом случае при воздействии импульсов грозовых индуктированных перенапряжений на все три фазы возможно одновременное перекрытие на одной опоре двух изоляторов. При этом на линии возникает междуфазное короткое замыкание со всеми неприятными последствиями: отключением потребителей, возможным

пережогом проводов, дугой сопровождающего тока, большим электродинамическим ударом по оборудованию подстанции. Поэтому ВЛ на деревянных опорах целесообразно защищать от индуктированных перенапряжений таким же образом, как и ВЛ на проводящих опорах.

*Заземлять опоры не требуется.* При срабатывании разрядника, установленного на опоре на одной из фаз, исключается перекрытие изоляторов всех трёх фаз, так как разность потенциалов между проводами и траверсой резко уменьшается. Поскольку сопротивление опоры весьма высокое, при срабатывании одного разрядника на опоре происходит лишь незначительное ограничение перенапряжения, т. е. на всех трёх фазах сохраняется перенапряжение. Это перенапряжение распространяется по линии, поэтому, в соответствии с требованием ПУЭ, обязательно необходимо на расстоянии примерно двести метров от подстанции устанавливать комплект разрядников РДИМ-10-1,5-IV-УХЛ1 и опору заземлять. При срабатывании этих разрядников волны перенапряжения, приходящие на подстанцию, существенно снижаются. Окончательно перенапряжение, поступающее на оборудование подстанции, ограничивается при помощи ОПН.

#### *2.6.4 Защита ВЛ 6-10кВ на деревянных опорах от прямых ударов молнии*

Возможно два варианта защиты от ПУМ:

- защита опор от расщепления, но не от грозовых отключений ВЛ;
- защита опор от расщепления и ВЛ от отключений вследствие грозовых перенапряжений.

Для исключения расщепления опор грозowymi разрядами целесообразно проложить вдоль стоек опор заземляющие спуски и выполнить простое заземление, например в виде одиночного вертикального заземлителя, не стремясь обеспечить низкое значение сопротивления заземления.

Защита ВЛ от грозовых отключений при прямом ударе молнии осуществляется так же, как для ВЛ с железобетонными и металлическими опорами.

### *2.6.5 Защита подходов 6-10 кВ к подстанциям и кабельным вставкам*

Непосредственно защита оборудования подстанций и кабельных вставок осуществляется ОПН или вентильными разрядниками (РВ), установленными вблизи от них. На линиях с деревянными опорами или с проводящими опорами с изоляторами типа ШФ20 (или аналогичными им, имеющими импульсное разрядное напряжение порядка 150-160 кВ) должны быть приняты меры по ограничению приходящих на подстанцию волн перенапряжений. Для защиты подхода к подстанции от набегающих волн грозовых перенапряжений следует устанавливать комплект из трех разрядников РДИМ-10-1,5-IV-УХЛ1 на три опоры примерно за 200 м от подстанции или кабельной вставки. Данные опоры необходимо заземлять в соответствии с установленными нормативными требованиями.

На остальных опорах до подстанции или кабельной вставки также следует устанавливать разрядники. Для обеспечения защиты от прямого удара молнии необходимо устанавливать по три разрядника РДИМ-10-1,5-IV-УХЛ1 на каждую опору, для защиты только от индуктированных перенапряжений достаточна установка по одному разряднику РДИП-10-IV-УХЛ1 на опору с чередованием фаз. При этом необходимо обеспечить низкое (желательно не более 10 Ом) сопротивление заземления на всех опорах подхода ВЛ к подстанции. Если кабельная вставка подходит к линии на промежуточной опоре, то указанные выше мероприятия надо выполнить на линии с обеих сторон от этой опоры.

## 2.7 Сравнительные характеристики длинно-искровых разрядников

Таблица М5

Сравнительные характеристики длинно-искровых разрядников

|                                                                                                                  | РДИП-10-IV-УХЛ1        | РДИМ-10-1,5-IV-УХЛ1    | РДИМ-10-К-II-УХЛ1      | РДИШ-10-IV-УХЛ1        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Класс напряжения                                                                                                 | 10 кВ                  | 10 кВ                  | 10 кВ                  | 10 кВ                  |
| Длина перекрытия по поверхности                                                                                  | 78 см                  | 150 см                 | 27 см                  | 80 см                  |
| Внешний искровой промежуток                                                                                      | 2-4 см                 | Нет                    | Нет                    | 2-4 см                 |
| Импульсное 50 %-ное разрядное напряжение, не более<br>на положительной полярности<br>на отрицательной полярности | 110 кВ<br>90 кВ        | 100 кВ<br>90 кВ        | 140 кВ                 | 110 кВ<br>90 кВ        |
| Напряжение координации с изолятором ШФ10-Г                                                                       | 300 кВ                 | 300 кВ                 | 300 кВ                 | 300 кВ                 |
| Многokrатно выдерживаемое внутренней изоляцией импульсное напряжение, не менее                                   | 50 импульсов<br>300 кВ | 50 импульсов<br>300 кВ | 50 импульсов<br>300 кВ | 50 импульсов<br>300 кВ |
| Выдерживаемое напряжение промышленной частоты, не менее в сухом состоянии под дождём                             | 42 кВ<br>28 кВ         | 42 кВ<br>28 кВ         | 42 кВ<br>28 кВ         | 42 кВ<br>28 кВ         |
| Многokrатно выдерживаемый импульсный ток 8/20 мкс, не менее                                                      | 20 импульсов<br>40 кА  | 20 импульсов<br>40 кА  | 20 импульсов<br>40 кА  | 20 импульсов<br>40 кА  |
| Масса                                                                                                            | 2,3 кг                 | 1,6 кг                 | 0,15 кг                | 2,3 кг                 |

## Библиографический список

1. Правила устройств электроустановок [Текст]. 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАЦ, 2002. – 928 с.
2. РД 34.21.122-87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений [Текст]/Минэнерго СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 56с.: ил.
3. РД 153-34.3-35.125-99 Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений (Части 1-3. Приложения к частям 1, 2, 3) / РАО «ЕЭС России». – 2-ое издание. – Санкт-Петербург: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999 год, 194 с.
4. РД 153-34.3-35.125-99 Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений (Приложения к части 3) / РАО «ЕЭС России». – 2-ое издание. – Санкт-Петербург: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999 год, 143с.
5. Электротехнический справочник: В 4 т. Т.3. Производство, передача и распределение электрической энергии/ Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. (гл. ред. А.И. Попов). – 8-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство МЭИ, 2002. – 964 с.
6. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей [Текст]: Утверждены Приказом Минэнерго РФ от 13.01.2003 N6. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2005. – 304 с.
7. ГОСТ 1516.3-96. Межгосударственный стандарт. Электрооборудование переменного тока на напряжение от 1 до 750 кВ. Требования к электрической прочности изоляции. – М.: Издательство стандартов, 1998. – 59 с.
8. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / Под ред. И.М. Баумштейна и С.А. Бажанова. –3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1989. – 768 с.
9. Ларионов В.П. Основы молниезащиты / Под ред. И.М. Бортника. М.: Знак, 1999. – 104 с.
10. Техника высоких напряжений / И.М. Богатенков, Г.И. Иманов, В.Е.

Кизеветтер и др.; Под ред. ГС. Кучинского. СПб.: Изд-во ПЭИПК, 1998. – 699 с.

11. Перенапряжения в электрических системах и защита от них / В.В. Базуткин, К.П. Кадомская, М.В. Костенко, Ю.А. Михайлов. СПб.: Энергоатомиздат, 1995. – 320 с.

12. СО 153-34.21.122-2003 Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций [Текст]: Утверждено Приказом Минэнерго РФ от 30.06.2003 N280. – М.: Изд-во ЦПТИ ОРГРЭС, 2004. – 36 с.

13. Халилов Ф.Х. Вопросы выбора и размещения нелинейных ограничителей перенапряжений средних классов напряжения (0,22 – 35 кВ). СПб.: Изд-во Позитрон, 2004. – 43 с.

14. Дмитриев В.Л., Дмитриев М.В. – НИИПТ «Использование подвесных ограничителей перенапряжения для повышения грозоупорности ВЛ» – семинар Электрические сети России-2005.

15. СТО 56947007-35.240.01.023-2009 Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ (НТП ПС) [Текст]: Приложение к приказу ОАО «ФСК ЕЭС» от 13.04.09 № 136.– М.: Изд-во ЦПТИ ОРГРЭС, 2009 – 978 с.

16. [kurs@vluki.ru](mailto:kurs@vluki.ru).

17. [www.zaokurs.ru](http://www.zaokurs.ru).

18. . [www.szp.spb.ru](http://www.szp.spb.ru)

19. [www.elma-electro.ru](http://www.elma-electro.ru)

20. [www.ielektro.ru](http://www.ielektro.ru)

21. [www.tavrida.ru](http://www.tavrida.ru)

22. [equipment.bigli.ru](http://equipment.bigli.ru)

23. [www.elektroinfo.ru](http://www.elektroinfo.ru)

24. [www.fenix88.nsk.su](http://www.fenix88.nsk.su)

25. [www.fenix88.nsk.su](http://www.fenix88.nsk.su)

26. <http://rdi.su/catalogue>

27. [www.streamer.ru](http://www.streamer.ru)

28. Подпоркин Г.В., Пильщиков В.Е., Сиваев А.Д. Грозозащита воздушных линий 10 кВ длинно-искровыми разрядниками модульного типа / Электричество, 2002, № 4, с. 8-15.

29. Г. В. Подпоркин, В. Е. Пильщиков, А. Д. Сиваев «Защита ВЛ 6 - 10 кВ от грозовых перенапряжений посредством длинно-искровых разрядников модульного типа», «Энергетик» 2003, №1, стр. 27-29.

## Содержание

|                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Введение                                                                                                                  | 3  |
| Глава 6. Молниезащита.....                                                                                                | 4  |
| §6.1. Грозовая деятельность и электрические характеристики<br>молнии .....                                                | 4  |
| §6.2. Зона защиты молниеотводов.....                                                                                      | 6  |
| §6.3. Молниезащита воздушных линий электропередачи.....                                                                   | 10 |
| 6.3.1. Средства молниезащиты ВЛ.....                                                                                      | 10 |
| 6.3.2. Грозовые отключения ВЛ.....                                                                                        | 16 |
| 6.3.3. Мероприятия по повышению грозоупорности ВЛ 6-35кВ..                                                                | 31 |
| §6.4. Молниезащита электрических станций и подстанций.....                                                                | 33 |
| 6.4.1. Общие положения .....                                                                                              | 33 |
| 6.4.2. Защита станций и подстанций от прямых ударов молнии..                                                              | 34 |
| 6.4.3. Защита от импульсов грозовых перенапряжений,<br>набегающих с линии.....                                            | 46 |
| 6.4.4. Защита подстанции номинальным напряжением 35 кВ и<br>выше.....                                                     | 49 |
| 6.4.5. Защита РУ номинальным напряжением 3-20 кВ.....                                                                     | 54 |
| 6.4.6. Защита вращающихся машин высокого<br>напряжения.....                                                               | 57 |
| 6.4.7. Координация импульсной прочности изоляции<br>подстанционного оборудования с защитными характеристиками<br>ОПН..... | 64 |
| 6.4.8. Определение максимальной длины защитного подхода<br>(опасной зоны).....                                            | 68 |
| 6.4.9. Показатели надежности молниезащиты РУ станций и<br>подстанций от набегающих волн.....                              | 70 |
| §6.5. Конструкция молниеприемников .....                                                                                  | 73 |
| Приложение А (информационное) Зоны защиты молниеотводов .....                                                             | 77 |
| Приложение Б (информационное) Пример расчета молниезащиты ГПП                                                             | 86 |

|                                                                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 35/10 кВ .....                                                                                                                                        |     |
| Приложение В (информационное) Характеристики интенсивности<br>грозовой деятельности и грозопоражаемости зданий и сооружений .....                     | 94  |
| Приложение Г (информационное) Основные характеристики ОПН,<br>выпускаемых НПО «ЭЛЕКТРОКЕРАМИКА», «АВВ-УЭТМ»,<br>«ФЕНИКС-88», «ТАВРИДА-ЭЛЕКТРИК» ..... | 97  |
| Приложение Д (информационное) Деформация грозовых импульсов при<br>распространении по проводам на подходах к РУ .....                                 | 129 |
| Приложение Ж (информационное) Оценка показателей надежности<br>грозозащиты ПС с использованием метода статистических испытаний<br>Монте-Карло.....    | 132 |
| Приложение И (информационное) Статистический метод анализа<br>грозозащиты ПС совместно с ВЛ.....                                                      | 140 |
| Приложение К (информационное) Расчет напряжения на изоляции<br>силового трансформатора при заданной волне перенапряжения.....                         | 160 |
| Приложение Л (информационное) Рекомендации по выбору и<br>применению ОПН для оптимальной защиты электрооборудования.....                              | 188 |
| Приложение М (информационное) Защита ВЛ 6-10 кВ от грозовых<br>перенапряжений с использованием длинно-искровых разрядников .....                      | 212 |
| Библиографический список.....                                                                                                                         | 242 |



