

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра электроснабжения

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»,

Киров 2010

УДК 621.311.015

Б 274

Басманов В.Г. Заземление и молниезащита: Учеб. пособие для вузов в двух частях. Часть 2 Молниезащита – Киров: Изд-во ВятГУ, 2010. – 215 с.

Рецензент: кандидат технических наук,

доцент кафедры электроэнергетических систем А.В. Вычегжанин

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». Рекомендуется при изучении дисциплин: «Изоляция и перенапряжение», «Техника высоких напряжений (ТВН)», «Высоковольтная изоляция», «Системы электроснабжения», «Потребители электрической энергии», «Проектирование энергосистем», дипломное проектирование.

Авторская редакция

Подписано в печать

Усл.печ.л. 13,43

Бумага офсетная

Печать копир Aficio 1022

Заказ

Тираж 100.

Бесплатно

Текст напечатан с оригинал-макета, предоставленного автором.

610000, г Киров, ул. Московская, 36.

Оформление обложки, изготовление – ПРИП ВятГУ.

© Вятский государственный университет, 2010.

© В.Г. Басманов, 2010.

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, набегających 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_g . 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 число грозовых 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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

h_1 – высота крепления на опоре верхней фазы, м;

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

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

За расчетный ток молнии принимается апериодический импульс, характеризуемый максимальным значением $I_{\text{м}}$, кА, и средней крутизной фронта $a_{\text{м}}$, кА/мкс. Формула для приближенного определения вероятностей $P(I_{\text{м}})$ и $P(a_{\text{м}})$, рекомендованных СИГРЕ, приведены в табл. 6.2.

При расчетах молния рассматривается как источник тока. При этом значения $I_{\text{м}}$ и $a_{\text{м}}$ 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 $P(I_M)=P(>I_M)$ 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_α 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:

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

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.

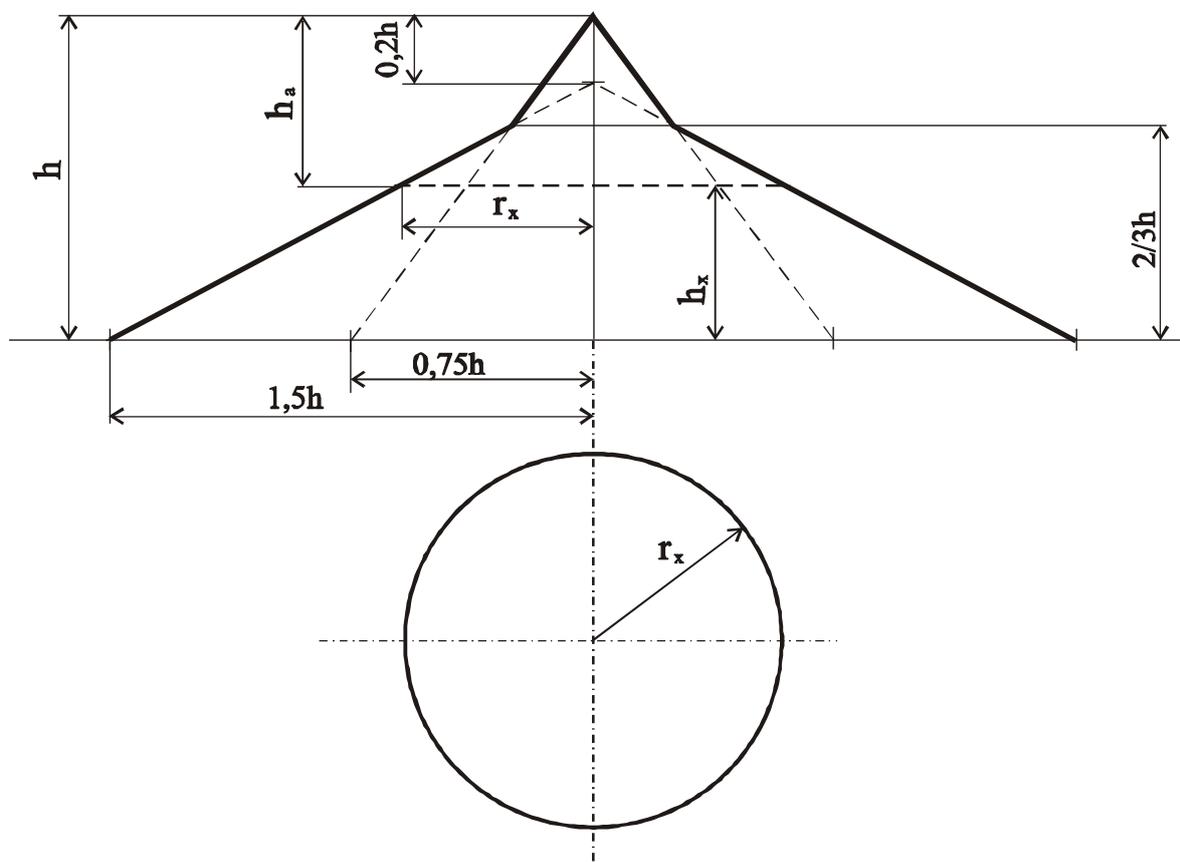


Рис. 6.1. Сечение зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода

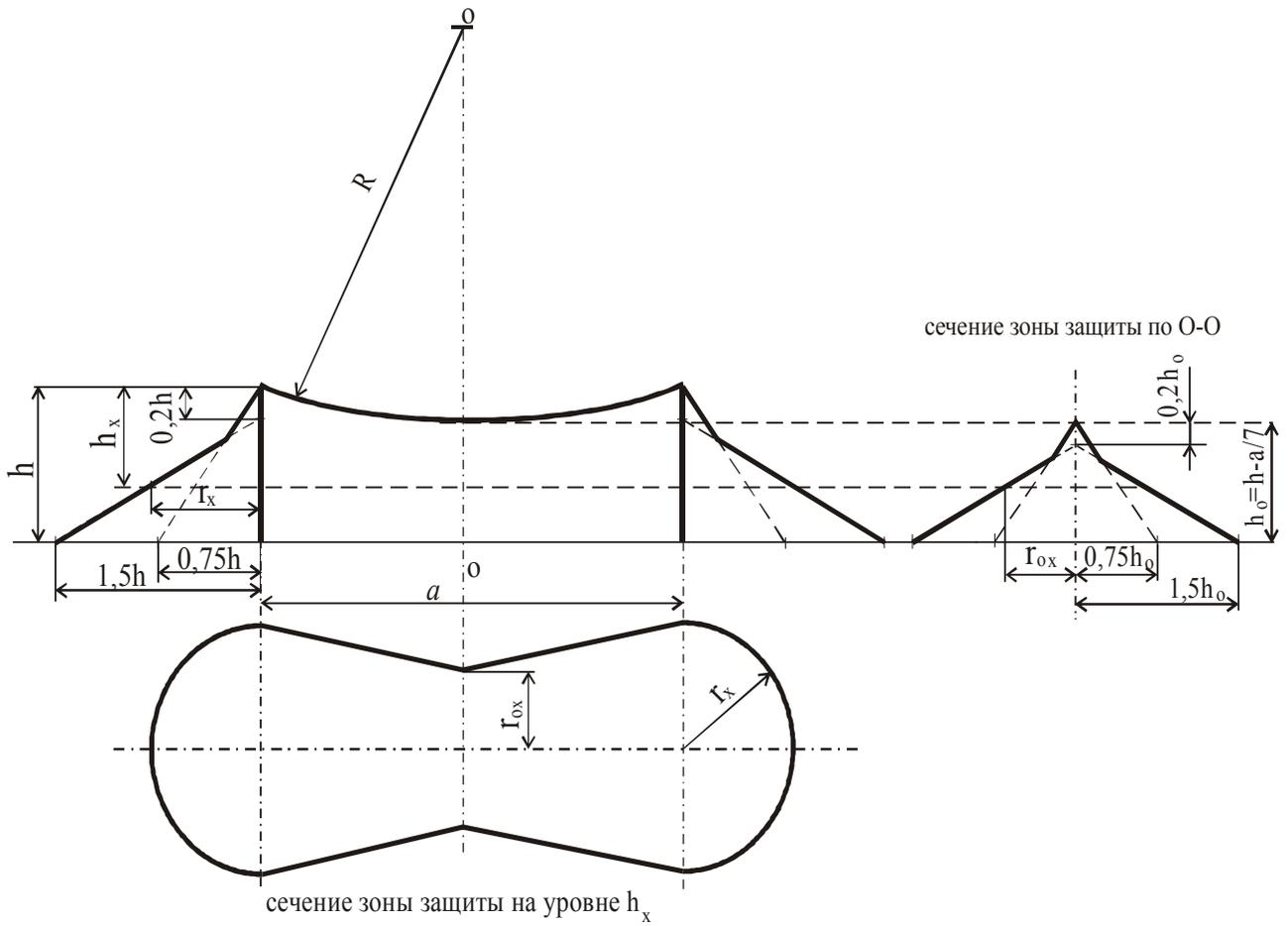


Рис. 6.2. Зона защиты двух стержневых молниеотводов одинаковой высоты

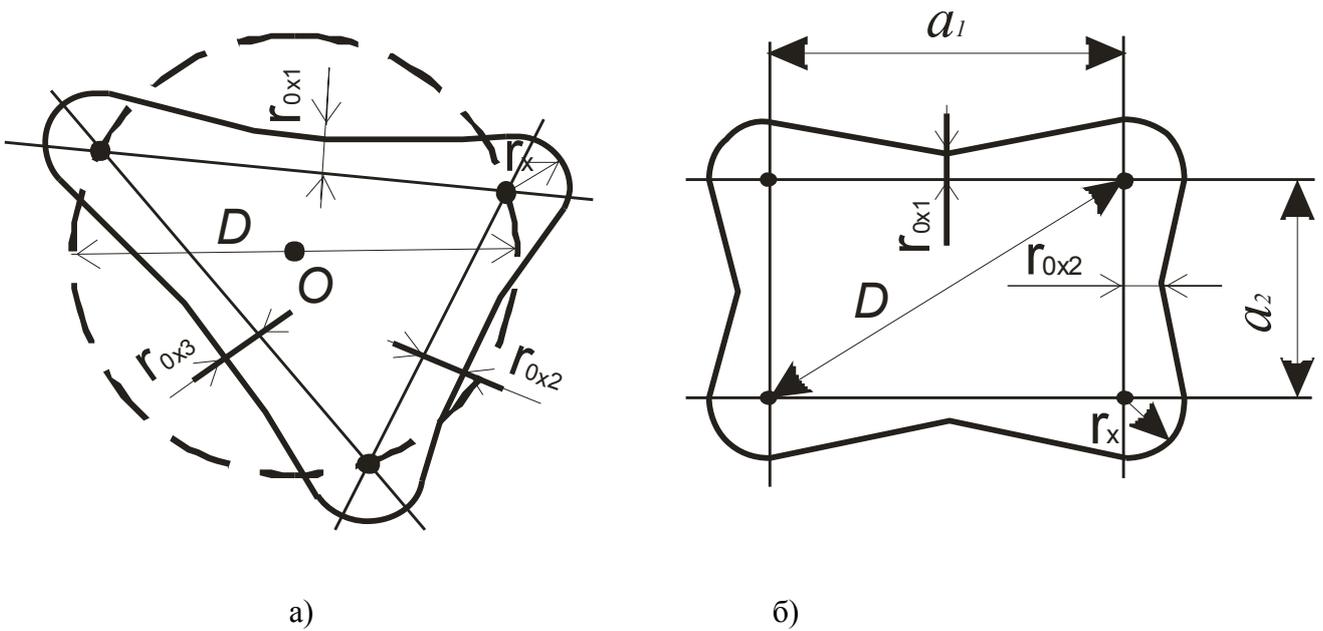


Рис. 6.3. Сечение зоны защиты на высоте h_x , образованных тремя (а) и четырьмя (б) молниеотводами высотой h

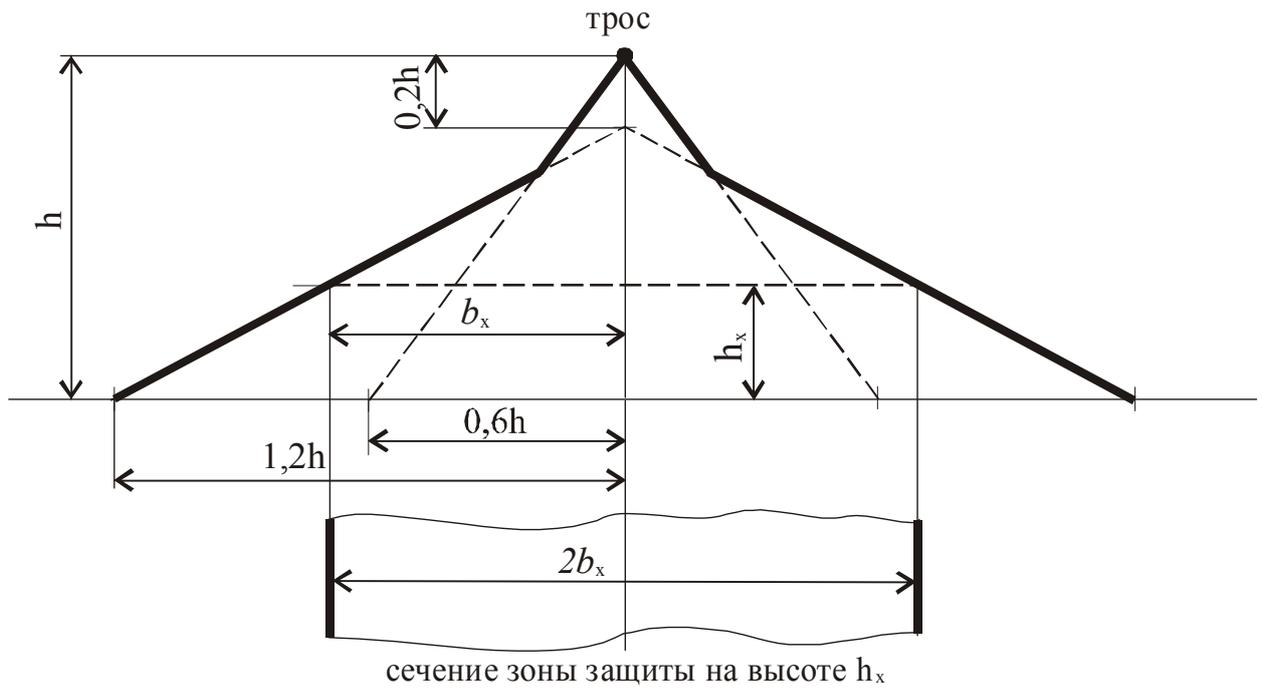


Рис. 6.4. Зона защиты тросового молниеотвода

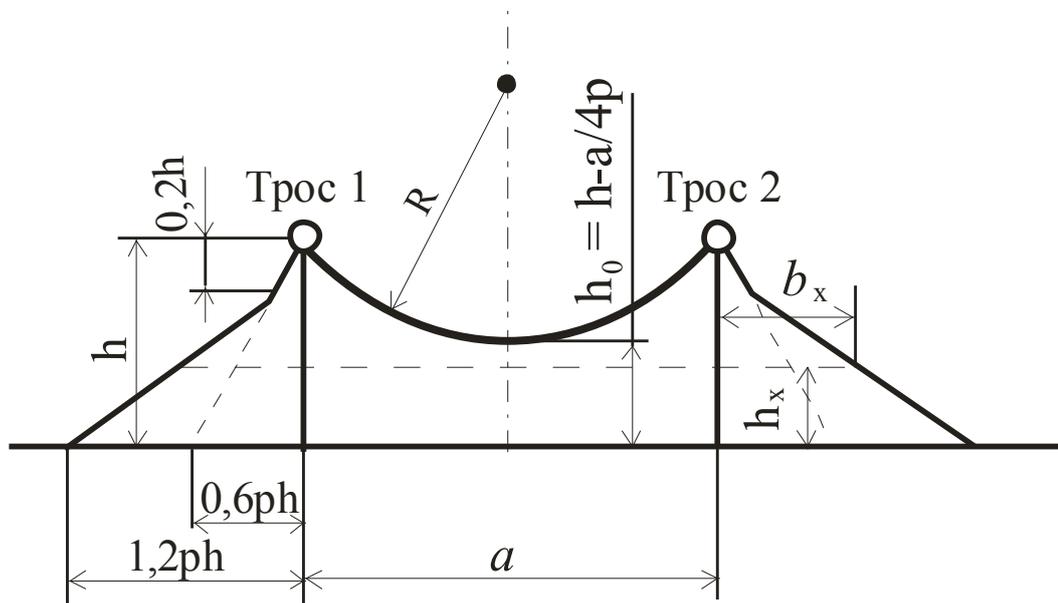


Рис. 6.5. Сечение зоны защиты двух параллельных тросовых молниеотводов

§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 пролета не более, м	Наименьшее расстояние от места пересечения до ближайшей опоры, м					
		30	50	70	110	120	150
ВЛ 500-330 кВ между собой и с ВЛ более низкого 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 между собой и с ВЛ более низкого 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 собой и с ВЛ более низкого напряжения	200	3	3	3	4	-	-
	300	3	3	4	4,5	5	-
ВЛ 10 кВ между собой и с ВЛ более 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.

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.

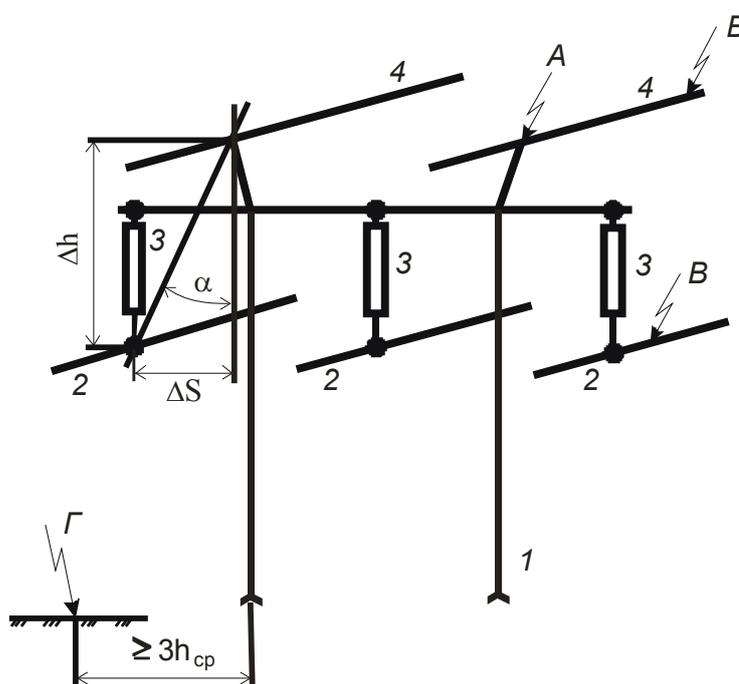


Рис. 6.6. Расчетные случаи грозового поражения ВЛ:

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 ($3h_{cp}$); Δh – превышение троса над проводом, м; ΔS – горизонтальное смещение троса относительно провода, м; 1 – опора ВЛ; 2 – фазные провода; 3 – изоляционная подвеска фазных проводов; 4 – тросовые молниеотводы с защитным углом α

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 η_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.

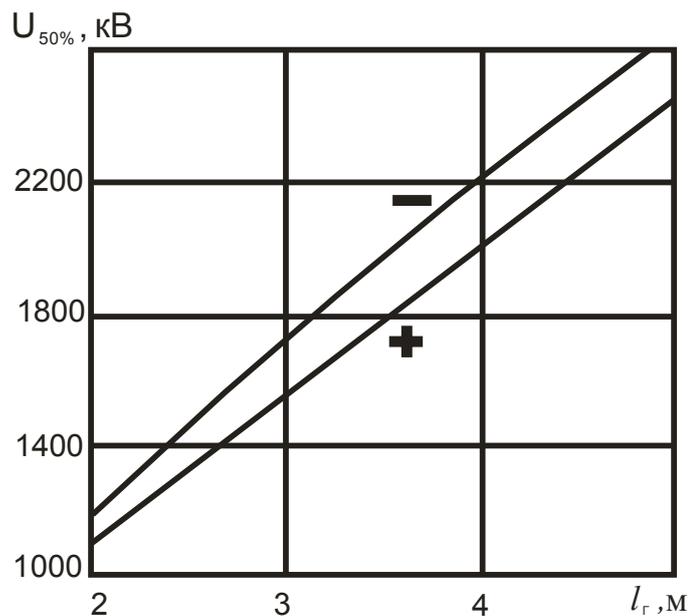


Рис. 6.7. 50%-ные разрядные напряжения гирлянд изоляторов с защитной арматурой при грозовых импульсах

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

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

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_{α} определяется по формуле

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

в которой

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

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

Δh – превышение троса над проводом, м (см. рис. 6.6);

ΔS – 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);

α - 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 (расчетное)	$Z_{\text{к}}$ (с учетом короны)	K (расчетный)	$K_{\text{к}}$ (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 $l_{Г}$, м, представляется как

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

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
Одностоечная, металлическая	0,6
Одностоечная, железобетонная	0,7
Двустоечная, металлическая, на оттяжках	0,4
Портальная, металлическая	0,5
Двустоечная, деревянная, с двумя заземляющими токоотводами	0,7
Отдельно стоящая опора для молниеотвода	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;

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

$c = 300$ 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, индуктируемое 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, индуктированное на проводе в результате распространения по тросу импульса напряжения с максимальным значением $U_{\text{оп}}$.

Максимальное напряжение на изоляции $U_{\text{из. макс}} = U_{\text{оп}} - U_{\text{пр}}$ 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 $I_{\text{оп}}$:

$$U_{\text{из. макс}} = U_{\text{оп}}(1 - K_K) + U_{\text{инд}} + U_{\text{раб}}. \quad (6.17)$$

Напряжение $U_{\text{из. макс}}$ может иметь множество значений, определяемых сочетанием случайных величин a_M и I_M ; $U_{\text{из. макс}}$ превысит разрядное напряжение гирлянды U_p , заданное вольт-секундной характеристикой,

$$U_p = A \sqrt{1 + \frac{T}{t_p}}, \quad (6.18)$$

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

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

Используя формулы табл. 6.2, осуществляем переход к зависимости $P(a_M) = f_1[P(I_M)]$ (рис. 6.9, б).

Поскольку a_M и I_M считаются независимыми случайными величинами, то

$$P_{\text{оп}} = \int_0^1 P(I_M) dP(a_M), \quad (6.19)$$

что определяется заштрихованной областью на рис. 6.9, б.

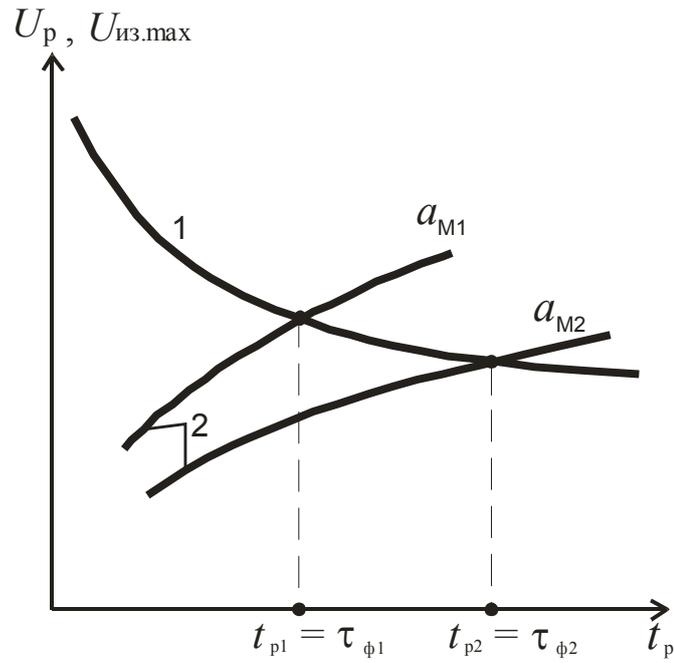


Рис. 6.8. Определение времени разряда линейной изоляции при разной крутизне фронта тока молнии ($a_{M1} > a_{M2}$):

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

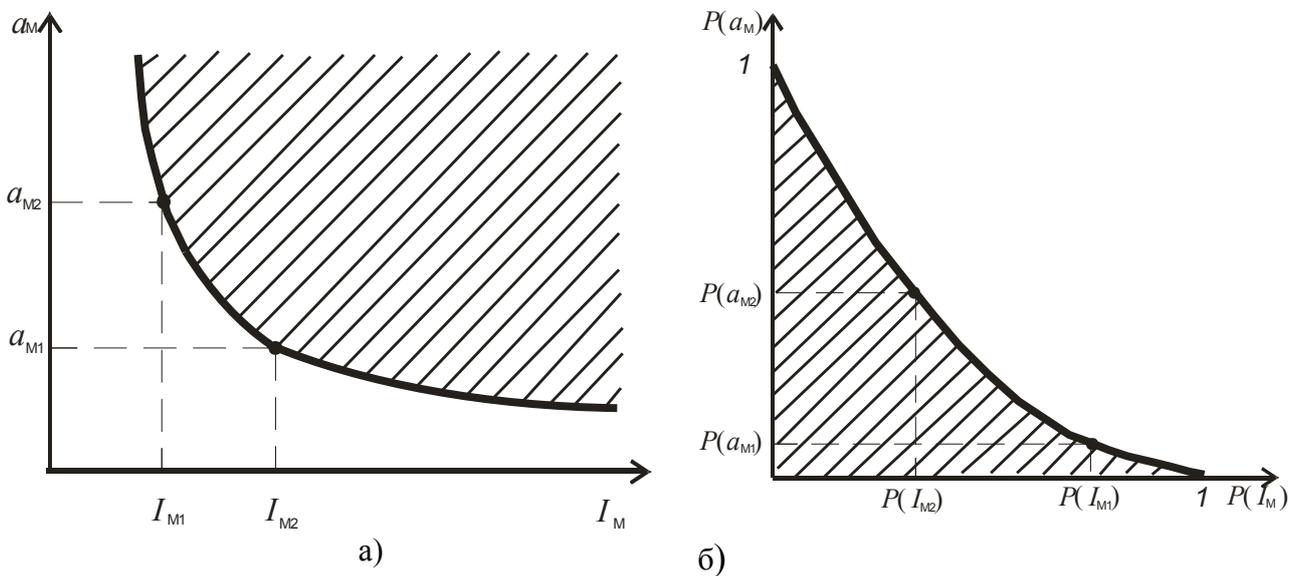


Рис. 6.9. Определение вероятности перекрытия гирлянды изоляторов при ударе молнии в опору:

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;

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

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

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

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

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 $a_{\text{м}} = f(I_{\text{м}})$, аналогичная кривой на рис. 6.9, а, и далее зависимость $P(a_{\text{м}}) = f_1[P(I_{\text{м}})]$, аналогичная зависимости, приведенной на рис. 6.9, б. С помощью последней зависимости вычисляется $P_{\text{оп}}$.

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

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

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

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

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

η_r определяется по (6.9).

Расчет $n_{инд}$ - довольно сложная задача. Известны некоторые значения

$n_{инд}$ для ВЛ 10; 35 и 110 кВ на металлических и железобетонных опорах:

$U_{ном}, \text{кВ}$	10	35	110
$U_{50\%}, \text{кВ}$	100	350	700
$h_{пр. ср}, \text{м}$	10	15	20
$n_{инд}$	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	Сопротивле- ние заземления опоры, Ом	$U_{ном}, \text{кВ}$					
		35	110	150	220	330	500
		Число грозových отключений на 100 км ВЛ 100 грозových часов					
Деревянная без тросов	-	10	8,5	-	-	-	-
Одноцепная металлическая 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 металлическая с одним тросом	5	-	4,3	3	3	2	-
	10	-	6	4	3,5	2,8	-
	20	-	9	6	5,5	4	-
Металлическая портальная с 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	14П С6-Б	14ПС 6-Б	22ПС6-Б	28ПС1 2-А	2x41П С12-А
Защитный угол троса α , 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.

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.

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 $D_r > 20$	<ol style="list-style-type: none"> 1. Заземление металлических и железобетонных конструкций кровли и металлической кровли 2. Стержневые молниеотводы или заземленные молниеприемные сетки на крыше зданий
Дымовые трубы: - металлические; - кирпичные, бетонные и железобетонные.	Заземления Стальные полосы-молниеприемники на вершине и заземляющие спуски, присоединенные к заземлителю
Здания трансформаторной башни, маслохозяйства, нефтехозяйства, электролизной станции	<ol style="list-style-type: none"> 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 2. Заземление металлических корпусов
Угледробилки, вагоноопрокидыватели, резервуары с горючими жидкостями или газами, места хранения баллонов с водородом	<ol style="list-style-type: none"> 1. Стержневые молниеотводы, устанавливаемые отдельно или на самом сооружении при толщине крыши или стенки не менее 4 мм 2. Заземление корпуса установки при толщине металлической крыши или стенки 4 мм и более; при объеме менее 200 м³ независимо от толщины металла

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 м² и более;</p> <p>б) от стоек конструкций ОРУ молниеотводами должно быть обеспечено растекание тока молнии по магистралям заземления не менее чем в трех-четыре 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"> - 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; - не менее семи изоляторов в остальных случаях; <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>

<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"> 1. В пределах контура заземления в грозовой сезон, $\rho < 350 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. 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. 3. От портала с молниеотводом должно обеспечиваться растекание тока молнии по магистралям заземления в трех-четырех направлениях. 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. 5. На подстанциях с высоким напряжением 20 - 35 кВ при установке молниеотвода на трансформаторном портале у заземляющего контура должно быть сопротивление $R \leq 4 \text{ Ом}$ (без учета выносного заземления). 6. Заземляющие проводники защитных аппаратов и трансформаторов рекомендуется присоединять к заземляющему устройству подстанции поблизости один от другого.
<p>Отдельно стоящие молниеотводы с обособленными заземлителями</p>	<ol style="list-style-type: none"> 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 исключать перекрытие по земле между заземлителями с вероятностью не более 0,1. При этом должно выполняться условие (6.37). 3. Расстояние по воздуху l_v 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). 4. Сопротивление заземлителя должно быть не более 80 Ом.

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 км² 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_{α} - 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 , 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:

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

где H_C - 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:

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

где $R_{и}$ - 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:

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

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 аппараты - 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° между ними.

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

$$l_{в.с} > 0,1H + m, \quad (6.39)$$

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 $R_{и}$ и на индуктивности молниеотвода $L_0 h_x$. При косоугольной форме тока молнии с I_M и a_M напряжение

$$U_{\text{макс}} = R_{и} I_M + a_M L_0 h_x. \quad (6.40)$$

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

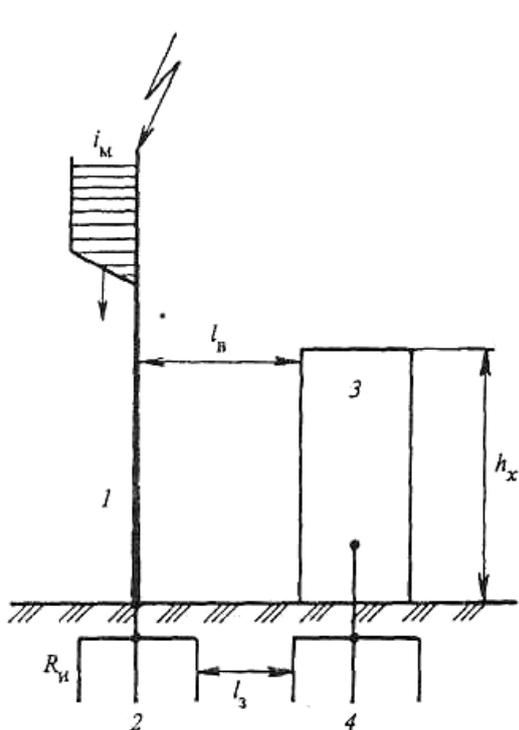


Рис. 6.10. Отдельно стоящий молниеотвод:

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

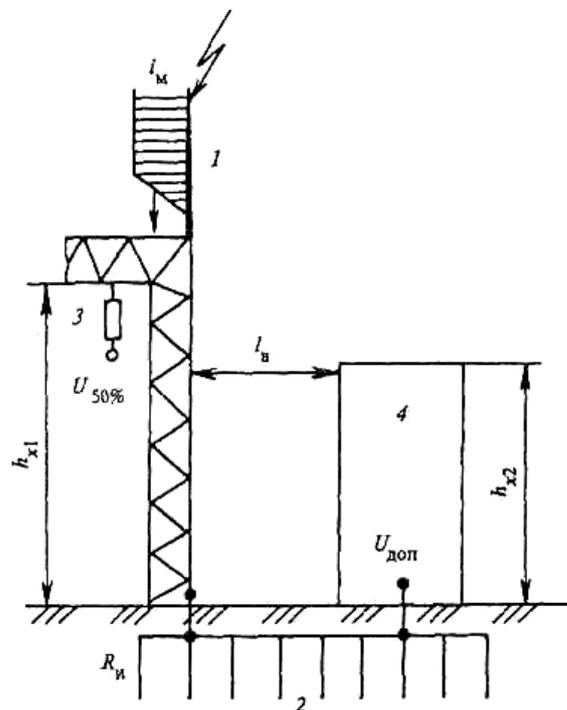


Рис. 6.11. Молниеотвод на конструкции ОРУ:

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

Условия безопасного протекания тока молнии по молниеотводу имеют следующий вид:

для отдельно стоящего молниеотвода

$$\begin{aligned} E_{\text{в}}l_{\text{в}} &> I_{\text{м}}R_{\text{и}} + a_{\text{м}}L_0h_{\text{х}}; \\ E_{\text{з}}l_{\text{з}} &> I_{\text{м}}R_{\text{и}}; \end{aligned} \quad (6.41)$$

для молниеотвода на портале ОРУ

$$\begin{aligned} U_{50\%} &> I_{\text{м}}R_{\text{и}} + a_{\text{м}}L_0h_{\text{х}1}; \\ E_{\text{в}}l_{\text{в}} &> a_{\text{м}}L_0h_{\text{х}2}; \\ U_{\text{доп}} &> I_{\text{м}}R_{\text{и}}. \end{aligned} \quad (6.42)$$

Эти соотношения позволяют решить задачи оценки надежности молниезащиты при прямом ударе молнии в подстанцию: по известным значениям $l_{\text{в}}$, $l_{\text{з}}$, $U_{50\%}$, $U_{\text{доп}}$ определить параметры $I_{\text{м}}$, $a_{\text{м}}$, а по ним соответствующие вероятности повреждения изоляции $P_{\text{п}i}$ либо решить обратную задачу.

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

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

где $n_{\text{уд.н/cm}}$ рассчитывается по (6.3); $P_{\alpha 1} = 0,01$; $P_{\text{п}i}$ 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 набегающих 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 набегающих грозовых волн. С воздушных линий электропередачи в результате поражения их молнией на подстанцию по проводам ВЛ набегают 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 грозových 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 грозových 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 $l_{з.п.}$.

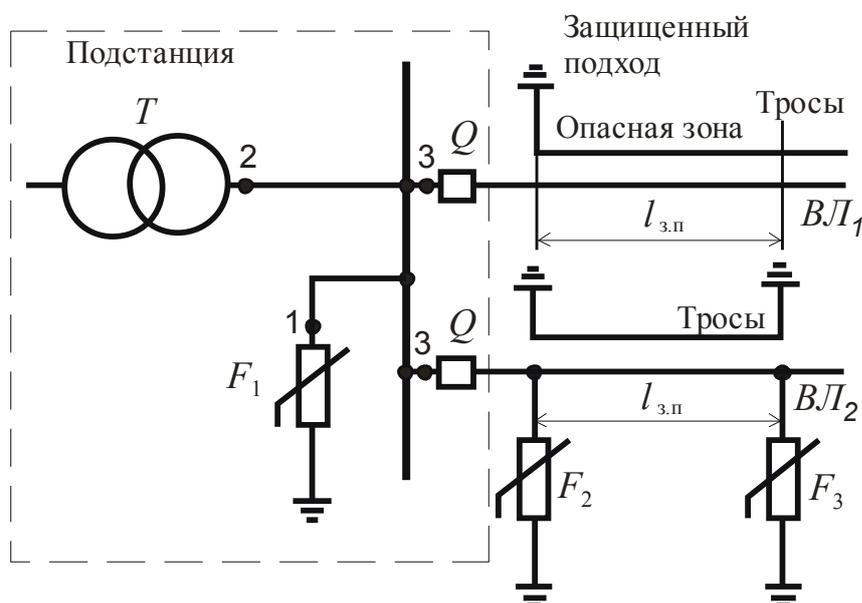


Рис . 6.12. Типовая схема молниезащиты подстанций напряжением 35 кВ и выше

На ВЛ с тросовой защитой по всей длине (ВЛ₁ на рис. 6.12) участки $l_{з.п.}$ часто называют условными защищенными подходами, на которых применяют уменьшенные защитные углы α и выполняют опоры с более низкими значениями $R_{и.}$

На ВЛ без тросовой защиты (ВЛ₂ 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_2 , так как первая подтросовая опора является местом с ослабленной изоляцией. Разрядник (ОПН) F_3 , устанавливаемый в конце ЗП, ограничивает перенапряжения при отражении волны напряжения от

отключенного выключателя Q. Разрядник (ОПН) F_3 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:

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

где ΔU_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 ΔU_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

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

Длина $l_{з.п}$ 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 $U_{из. макс} = f(a)$, с помощью которых по известным значениям $U_{доп}$ определяются допустимые значения $a_{допi}$, превышение которых опасно для изоляции в различных точках схемы (для рис. 6.12 это значение $a_{доп2}$ и $a_{доп3}$ указанное на рис. 6.13). Меньшее из всех значений $a_{допi}$ дает значение $a_{доп}$ 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.

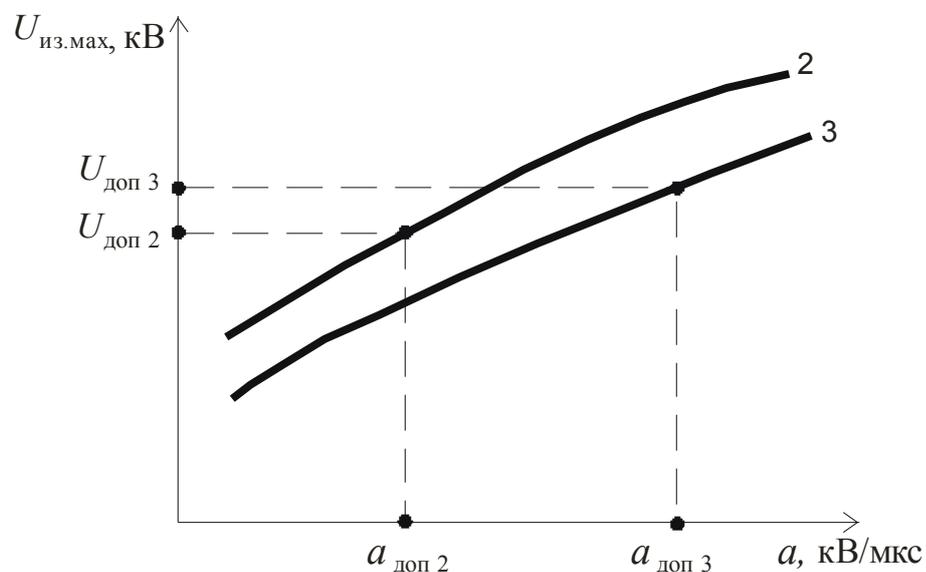


Рис. 6.13. Зависимости $U_{\text{из. макс}} = f(a)$ для точек 2 и 3 схемы рис. 6.12

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

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

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

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

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

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

где $h_{\text{пр.ср}}$ - 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 $U_{\text{ост}}$ 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. 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 ρ до 100; 100 – 500; более 500 Ом·м.

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 α , град	25 - 30	25 - 30	25 - 30	20 - 25	20 - 25	25
Сопротивление заземления R , Ом, не более, при ρ , 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

Годовое число повреждений оборудования подстанций напряжением 35 кВ и выше от импульсов грозовых перенапряжений, набегающих с ВЛ, характеризующие надежность защиты β_2 , определяется числом таких импульсов, образующихся в пределах защищенных подходов $l_{з.п.}$, вследствие прорыва молнии сквозь тросовую защиту (вероятность P_a); 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 грозových часов за год $D_г$; числе ВЛ, подключенных к шинам подстанций, m значение β_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 $U_{макс}$ импульса, набегающего на подстанцию с ВЛ на деревянных опорах (ВЛ₁ 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.

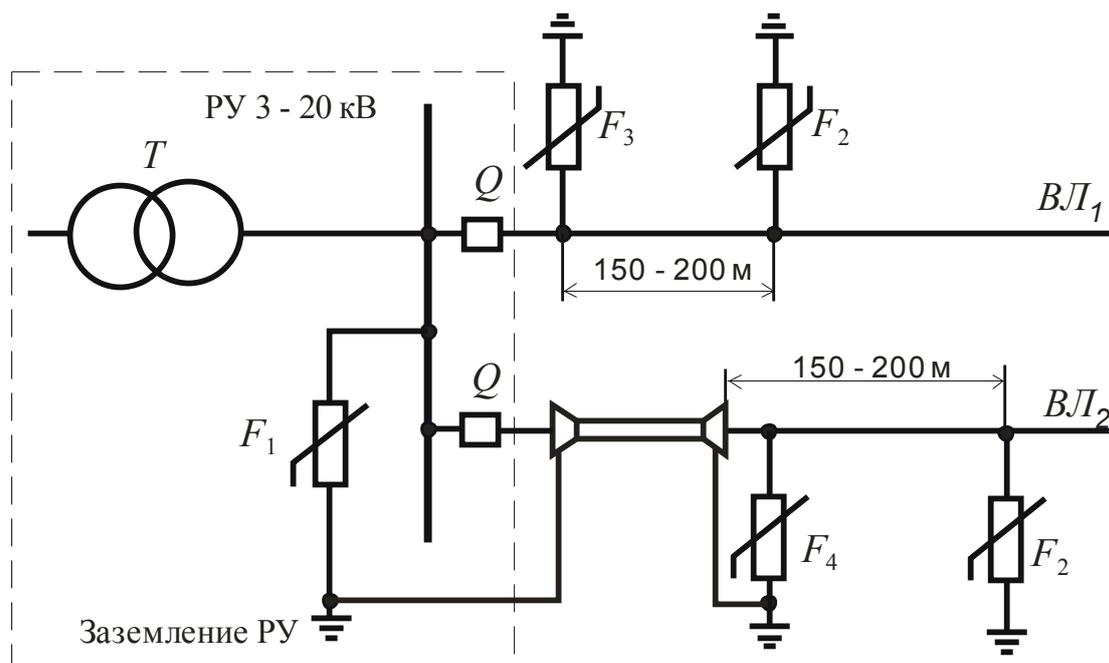


Рис. 6.14 Типовая схема молниезащиты РУ напряжением 3-20 кВ

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

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 (ВЛ₂ на рис. 6.14), то для защиты кабельной воронки в месте перехода ВЛ в кабель устанавливается элемент F₄ (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 β_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_g ; числе ВЛ, подключенных к шинам РУ 3-20 кВ, m_1 значение β_3 рассчитывается с учетом (6.2) по соотношению:

$$\beta_3 = m_1 n_{уд.0,3} \cdot \quad (6.52)$$

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) грозové 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

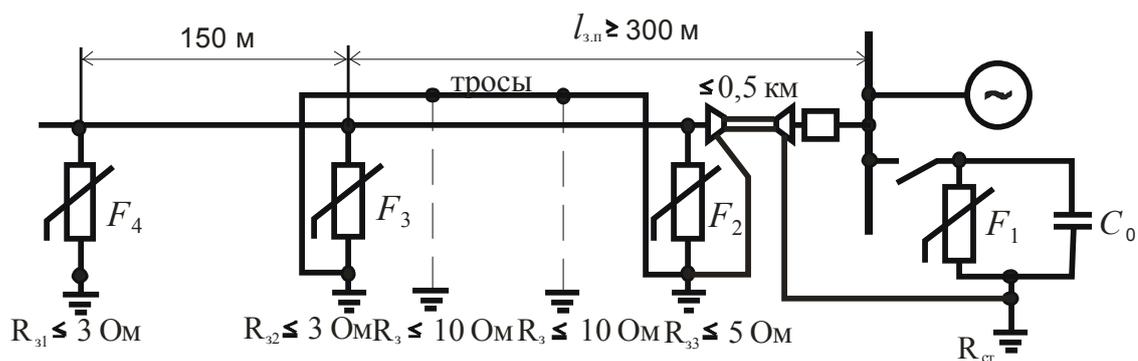
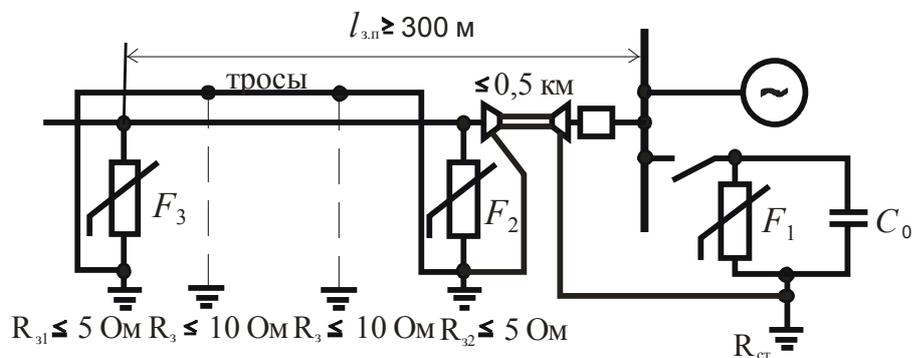
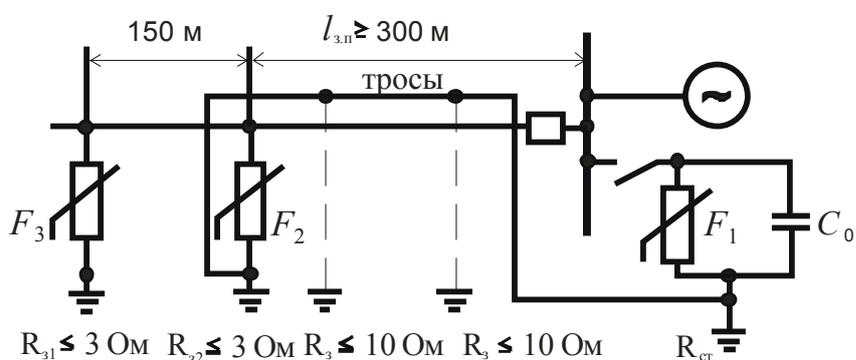
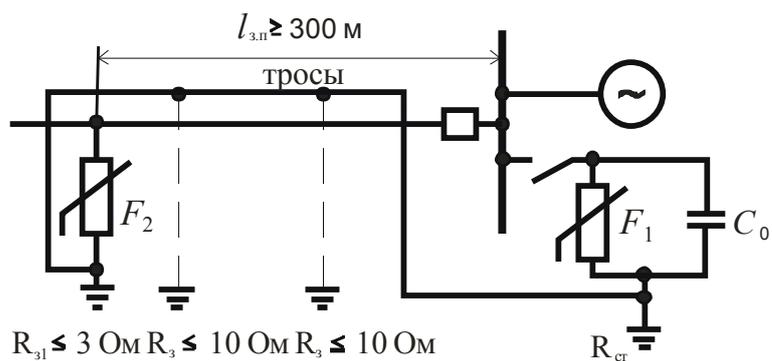
средств: ОПН или вентильный разрядник и малоиндуктивный конденсатор на шинах; защищенный подход воздушной линии $l_{з.п.}$, ОПН или разрядники на подходе линии, токоограничивающий реактор и кабельную вставку (рис. 6.15).

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 грозových 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 τ_ϕ 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 $l_{3.п1} \approx l_{3.п2}$ – не менее 100 м.



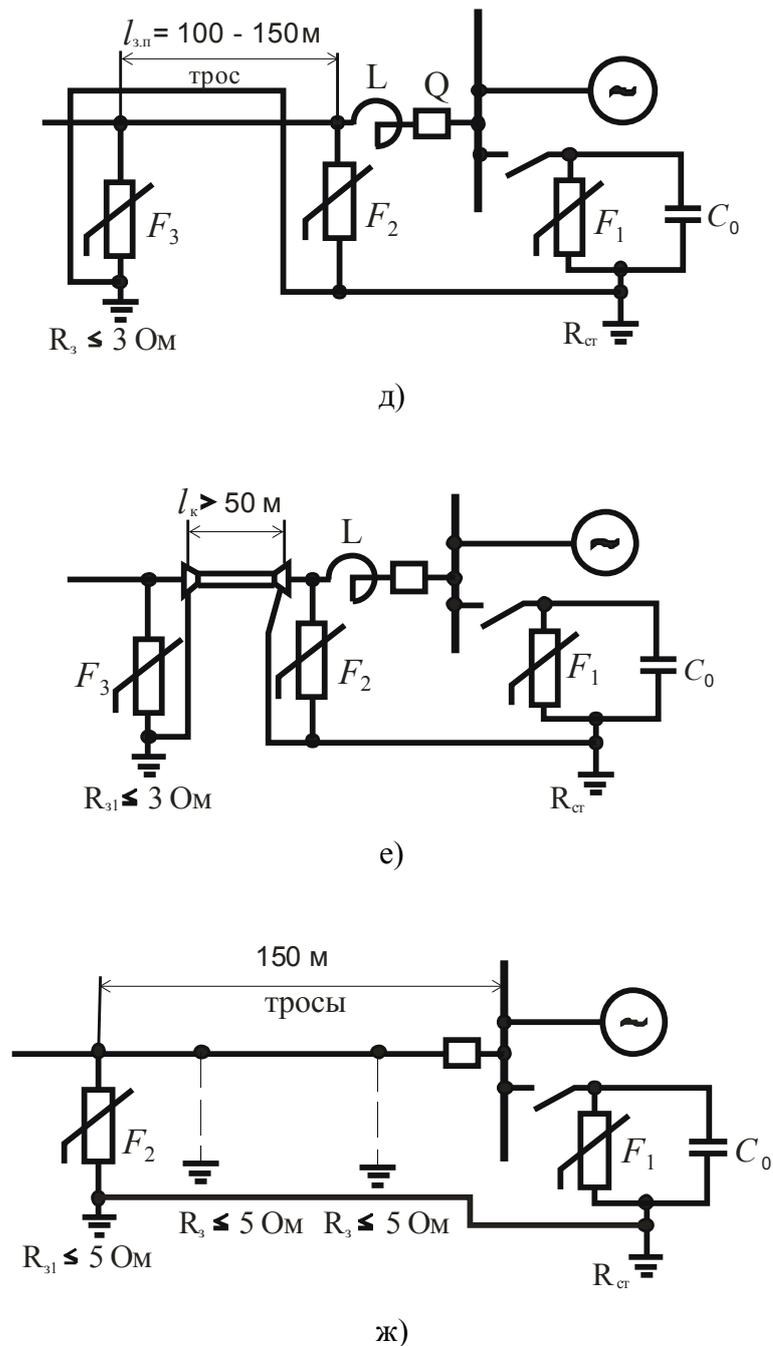


Рис. 6.15. Схемы защиты вращающихся машин, присоединенных к ВЛ, от импульсов грозовых перенапряжений, набегающих с линии

Если вращающиеся машины и ВЛ присоединены к общим шинам РУ электростанций или ПС, то подходы этих ВЛ должны быть защищены от грозовых 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);

б) 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).

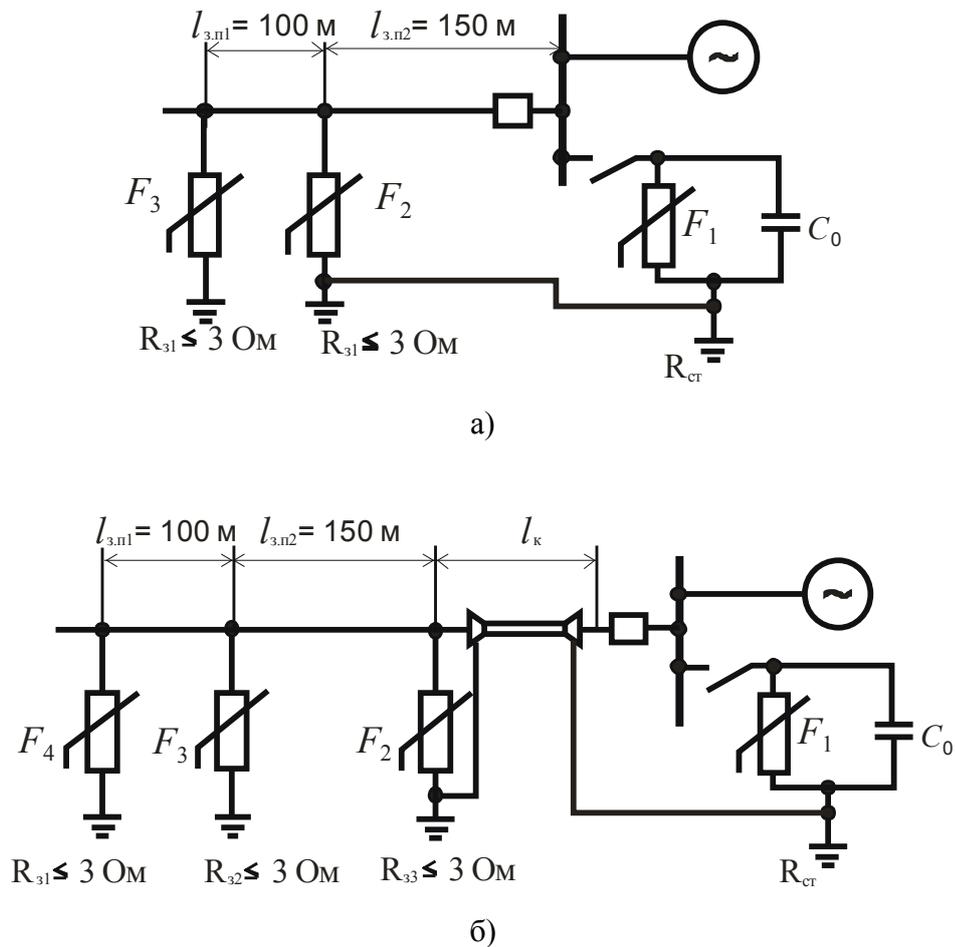


Рис. 6.16. Схемы защиты электродвигателей мощностью до 3000 кВт от импульсов грозовых перенапряжений, воздействующих с ВЛ на деревянных опорах

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 униполярной формы (рис. 6.17, б); период затухающих колебаний, наложенных на остающееся напряжение защитного аппарата, зависит от параметров схемы подстанции.

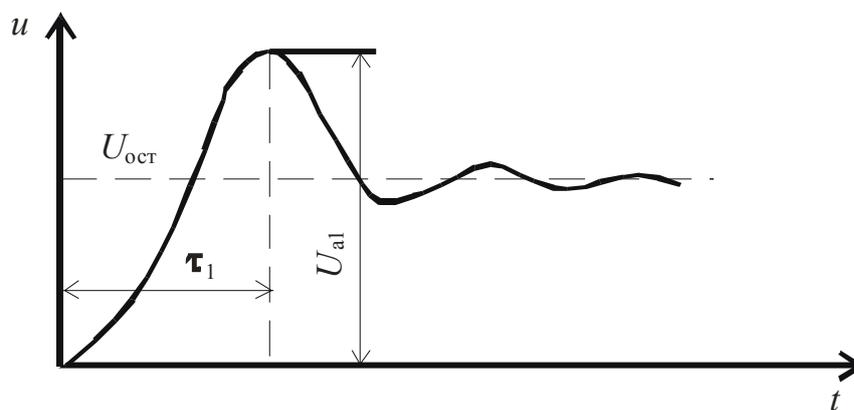
Шкала допустимых воздействий ($U_{дон}$) для различных расчетных условий для силовых трансформаторов, автотрансформаторов и шунтирующих реакторов приведена в табл.6.12.

Таблица 6.12

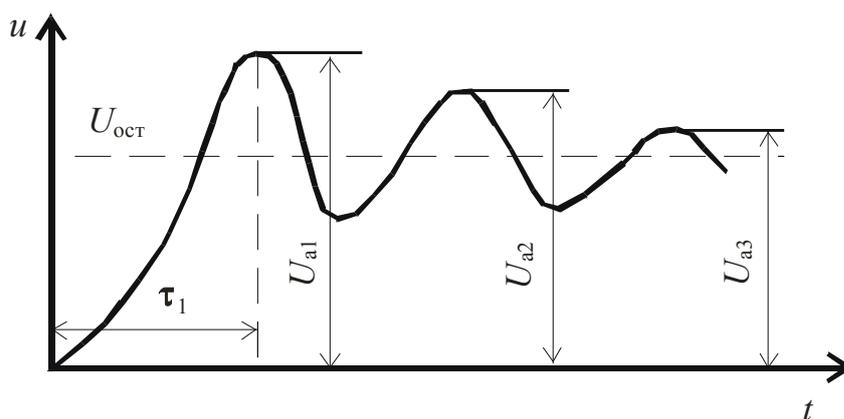
Амплитуда грозовых униполярных волн с наложенными колебаниями, кВ,
допустимая в эксплуатации для изоляции силовых трансформаторов,
(автотрансформаторов) и шунтирующих реакторов

Вид оборудования	Класс напряжения, кВ							
	35	110	150	220	330	500	750	1150
Силовые трансформаторы (автотрансформаторы)	210	480	550	750	1050	<u>1550</u> 1650	<u>2100</u> 2250	<u>2200</u> 2550
Шунтирующие реакторы	-	-	-	-	-	<u>1650</u> 1800	<u>2250</u> 2400	<u>2200</u> 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; τ_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 грозových 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 грозowego 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 грозowego 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_{ocm} 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.

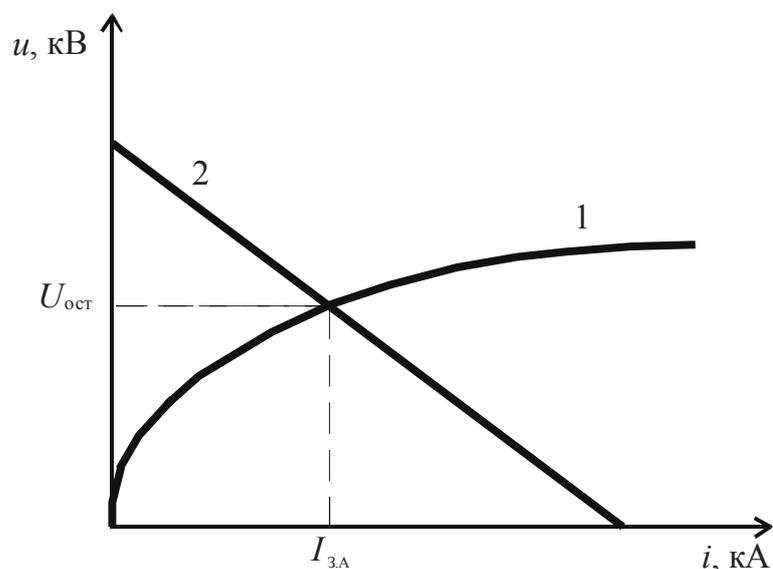


Рис. 6.18. Графическое определение тока через защитный аппарат

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

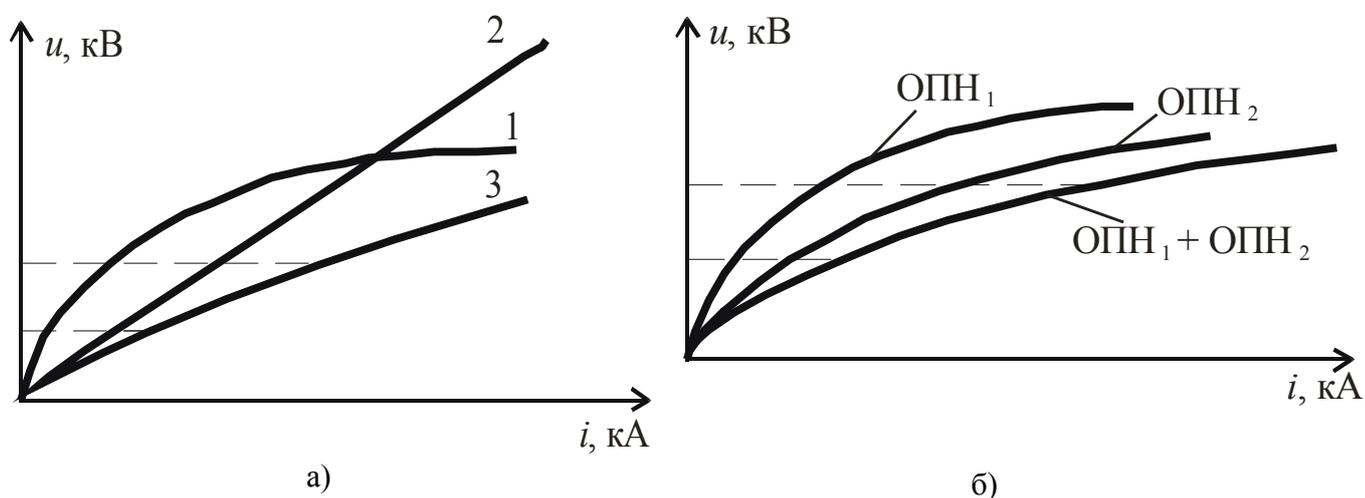


Рис. 6.19. Построение обобщающей вольт-амперной характеристики:

а) сложение вольт-амперных характеристик защитного аппарата и волнового сопротивления отходящей линии; 1 - вольт-амперная характеристика защитного аппарата (ОПН₁); 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):

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

а значение докоронного порога

$$U_{к.п} = U_k + U_p, \quad (6.55)$$

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

набегающих волн на каком-то аппарате или на подстанции в целом (т.е. перенапряжений, превышающих допустимые значения) за год может быть определено по формуле:

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

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

N - число грозových ударов в ВЛ длиной 100 км при 100 грозových часах в год;

$N_{Г.Ч}$ - число грозových часов в год; $l_{О.З}$ - длина опасной зоны, км;

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

P_{α} - 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:

$U_{н},$ 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 мм², 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 мм².

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, 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, мм ²
Медь	Молниеприемники (А), Заземлители (Е ₂)	Пруток	16	200
Оцинкованная сталь				
Нержавеющая сталь				
Алюминиевый сплав	Молниеприемники (А)			

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 ²
Медь	Пруток Полоса Трос	8	2	1,8	50
Луженая медь					
Алюминий	Пруток Трос	8	2,5	1,8	50
Алюминиевый сплав	Пруток Полоса Трос				
Оцинкованная сталь	Пруток Полоса Трос	10	3	2,2	78
Нержавеющая сталь	Пруток				75
		Полоса	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 молниеприёмную сетку (или стержневые молниеотводы), соединённую с помощью металлических перемычек с арматурой колонн и железобетонных фундаментов-заземлителей.

Для соединения с арматурой колонн, используемой в качестве токоотводов, молниеприёмная 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.

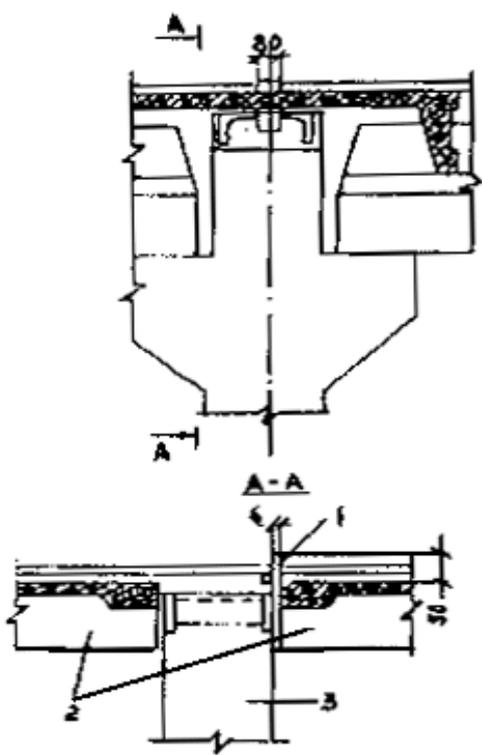


Рис. 6.21. Узел в системе молниезащиты многоэтажного здания с железобетонными ригелями с полками:
1 - соединительная деталь; 2 - плиты покрытия; 3 - колонна

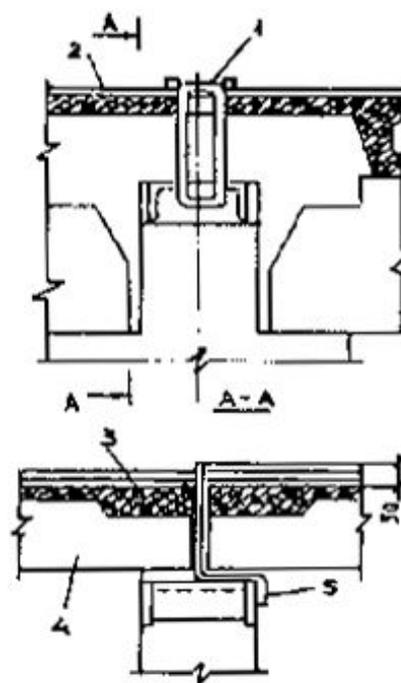


Рис. 6.22. Узел в системе молниезащиты многоэтажного здания с прямоугольными железобетонными ригелями:
1 - соединительная деталь; 2 - сетка молниезащиты; 3 - бетон замоноличивания; 4 - плита покрытия; 5 - соединительная деталь

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 молниеприёмной сетки, отдельно стоящих, крышных и пристенных молниеотводов, а также углублённых 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 .

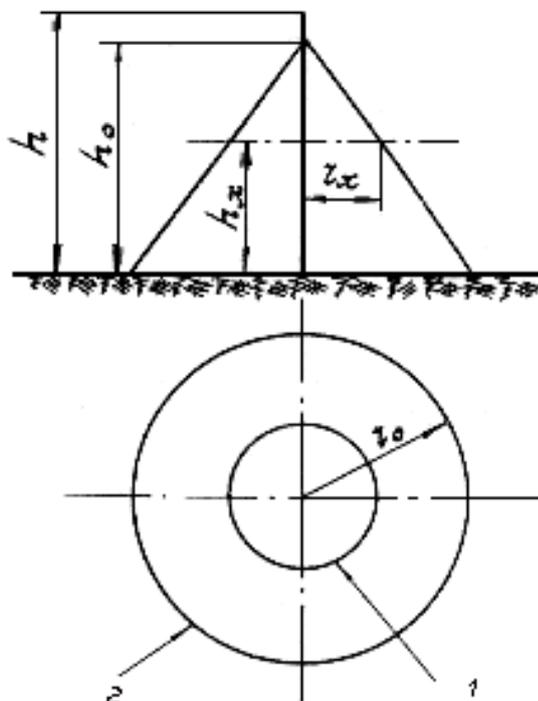


Рис. А1. Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода:

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:

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

Зона Б:

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

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 $L \leq h$

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

при $h < L \leq 2h$

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

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

при $2h < L \leq 4h$

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

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

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

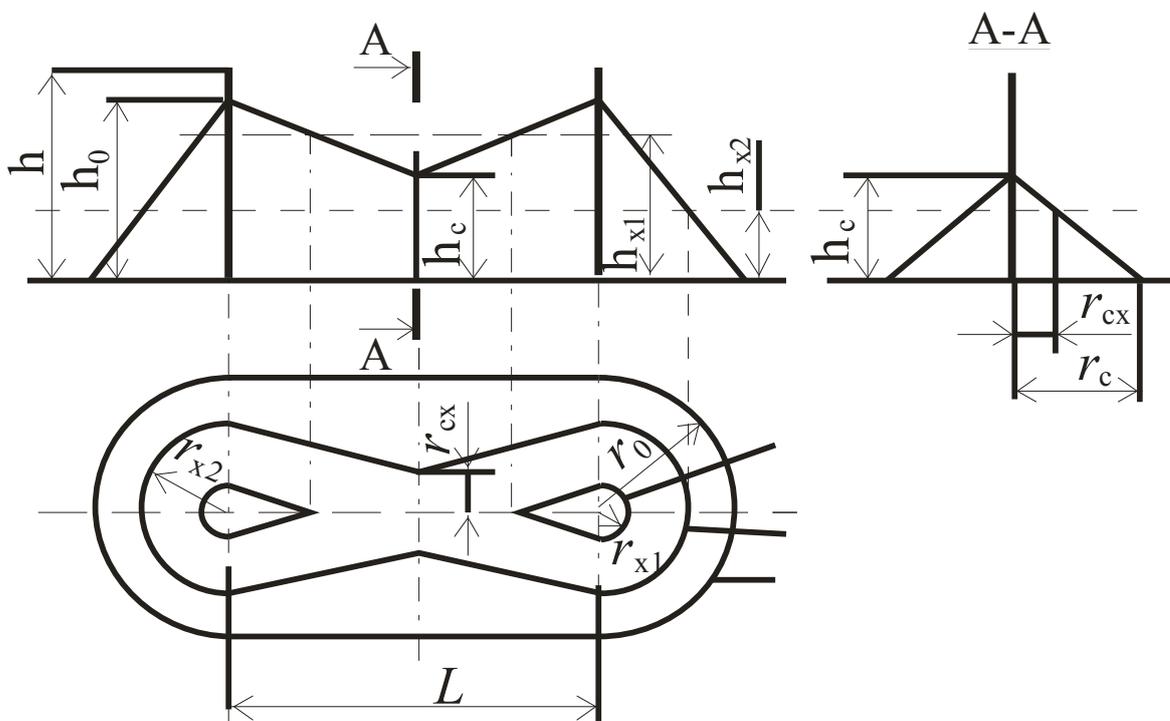


Рис. А2. Зона защиты двойного стержневого молниеотвода:

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 $L \leq h$

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

при $h < L \leq 6h$

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

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.

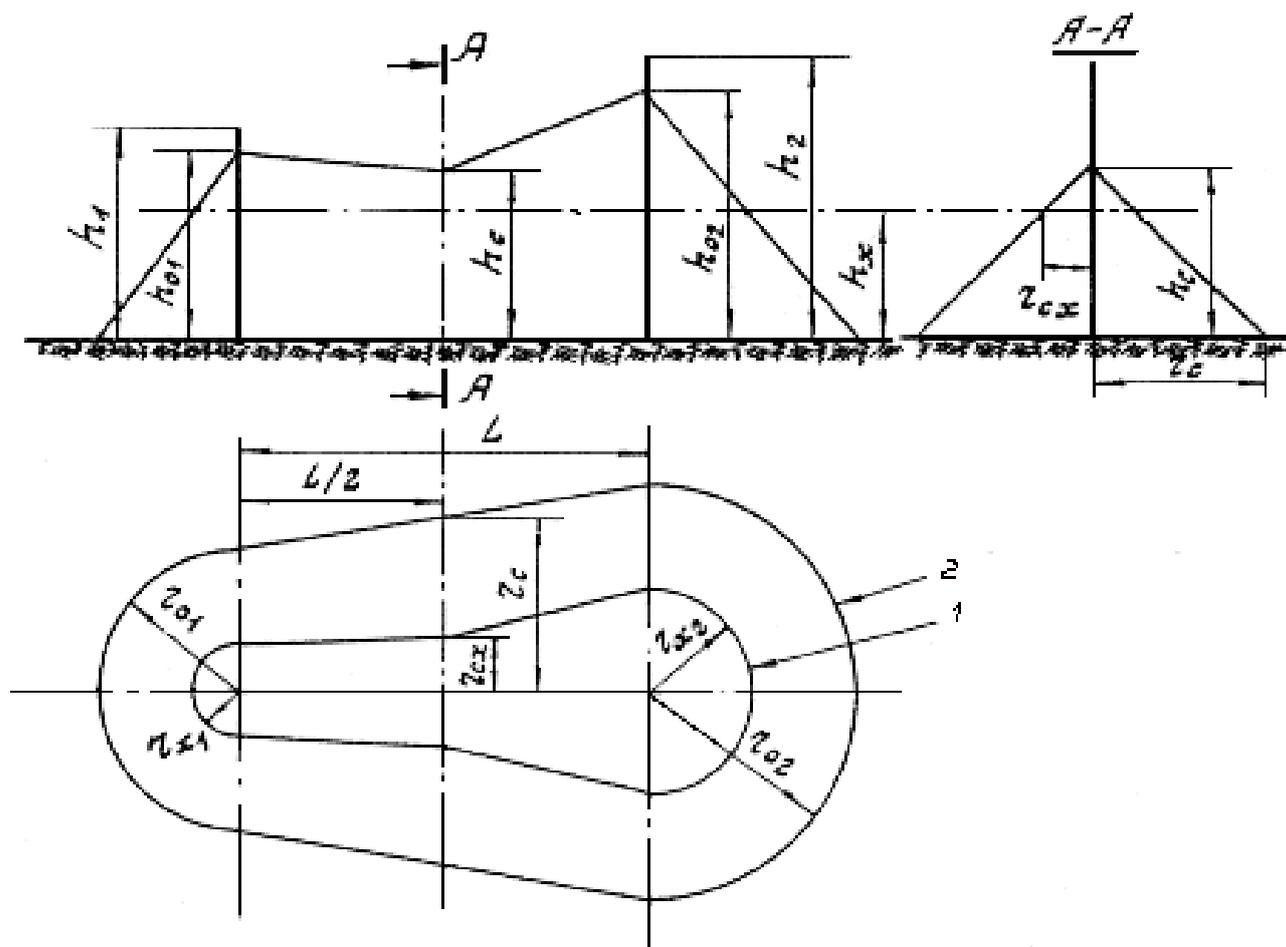


Рис. А3. Зона защиты двух стержневых молниеотводов разной высоты.

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. *Множественный стержневой молниеотвод.* Зона защиты множественного 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.

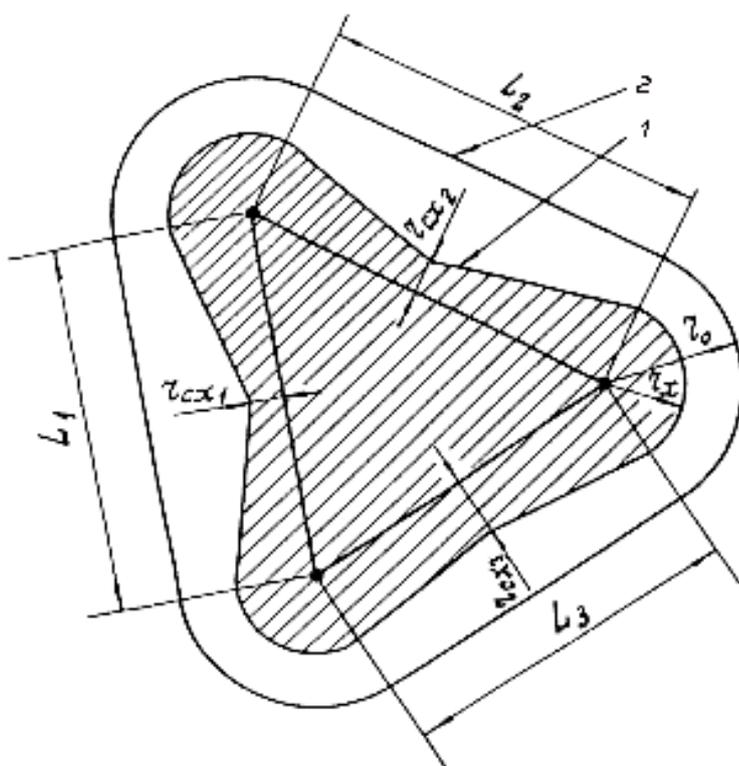


Рис. А4. Зона защиты (в плане) множественного стержневого молниеотвода.

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 мм² 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:

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

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

Зона Б:

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

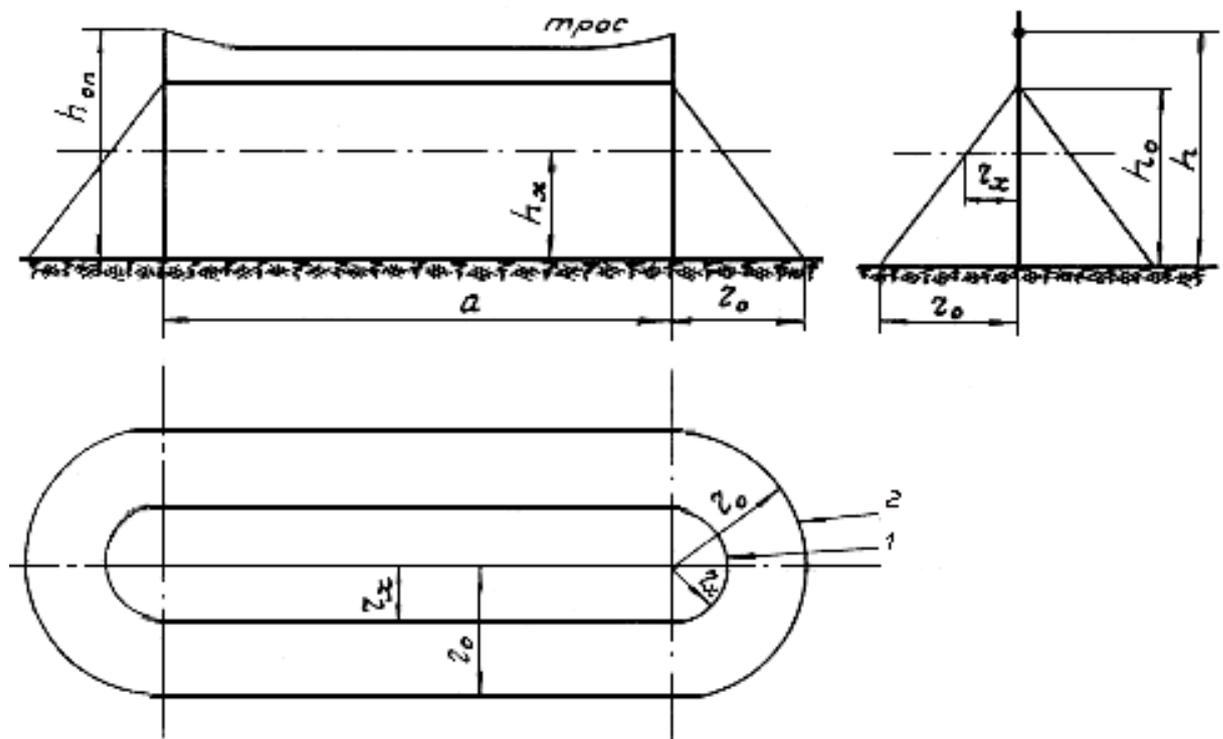


Рис. А5. Зона защиты одиночного тросового молниеотвода.

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.

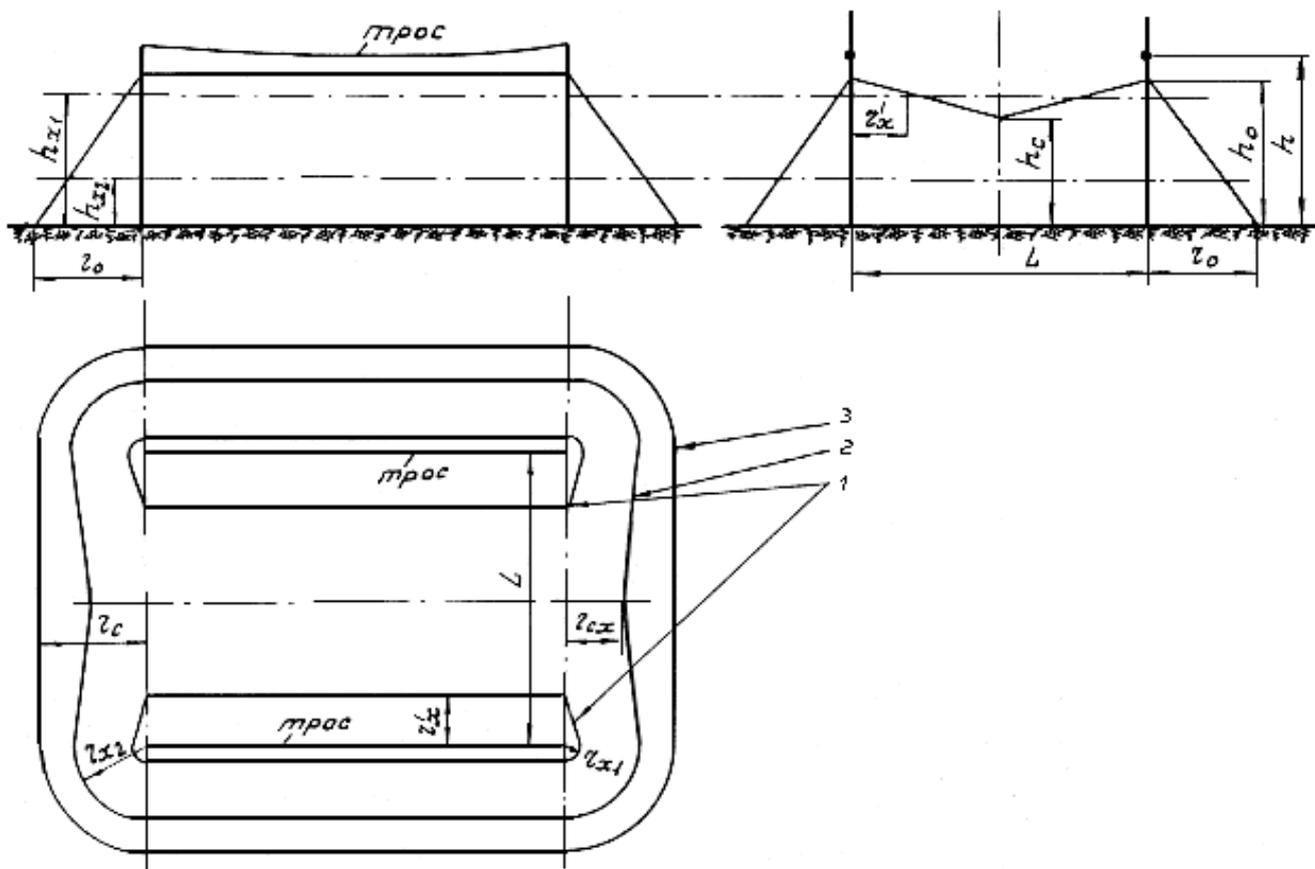


Рис. А6. Зона защиты двойного тросового молниеотвода.

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 $h < L \leq 2h$

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

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

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

при $2h < L \leq 4h$

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

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

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

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

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

Зона Б:

при $h < L$

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

при $h < L \leq 6h$

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

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

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

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

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

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.

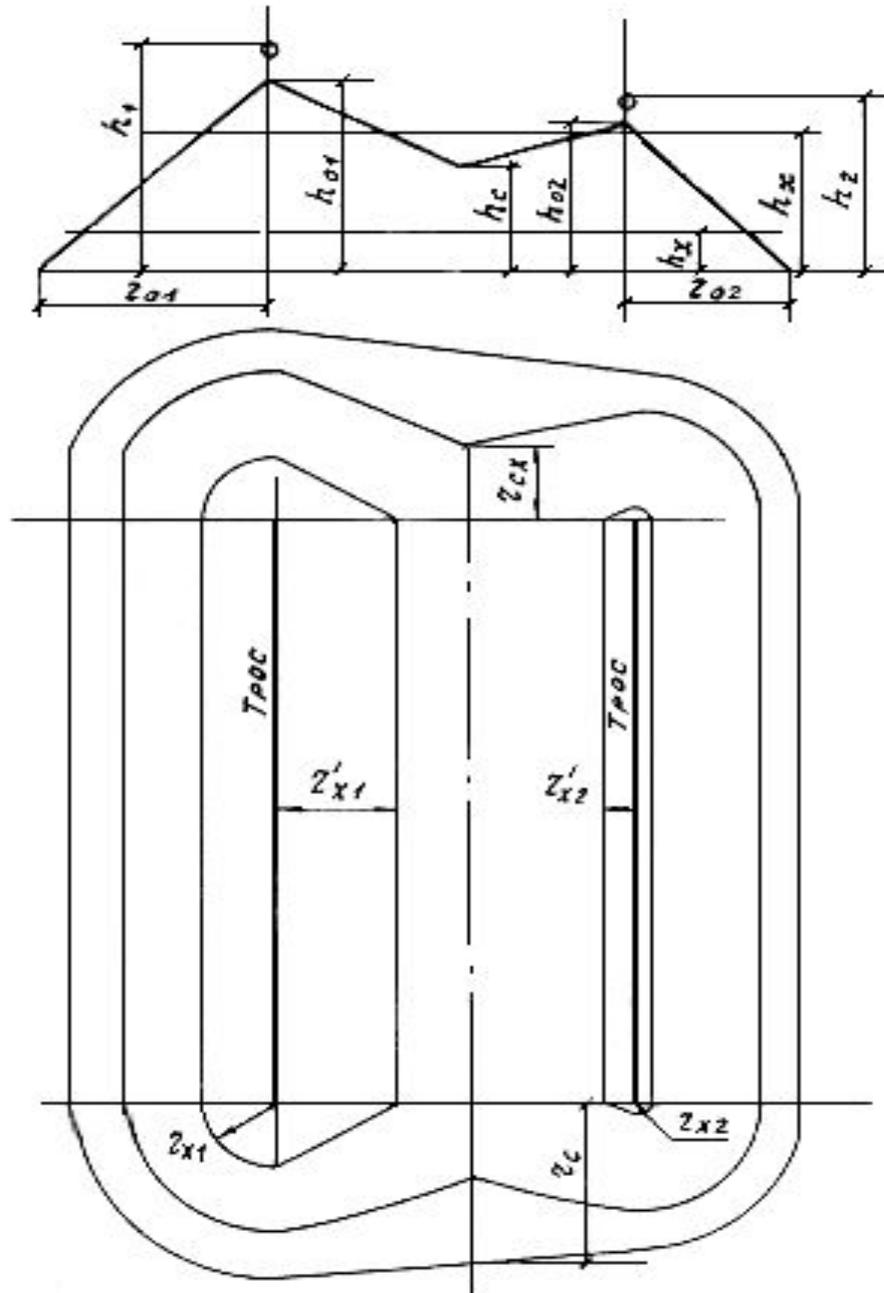


Рис. А7. Зона защиты двух тросовых молниеотводов разной высоты

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 км² земной поверхности в месте нахождения объект, 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 $l_3 \geq 0,2R_{и}$ и $l_3 \geq 3$ м.

3. Расстояние по воздуху l_B 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 $l_B \geq (0,12R_{и} + H_C)$ и $l_B \geq 5$ м.

4. Сопротивление заземлителя должно быть не более 80 Ом.

1. Определяется ожидаемое количество поражений молнией ГПП в год,

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

где A - ширина ГПП, м,

B - длина ГПП, м,

h_x - высота защищаемого объекта, м,

n – среднегодовое число ударов молний в 1 км² 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 $D_r = 20 - 40$ ч/год, тогда по приложению В $n = 2$.

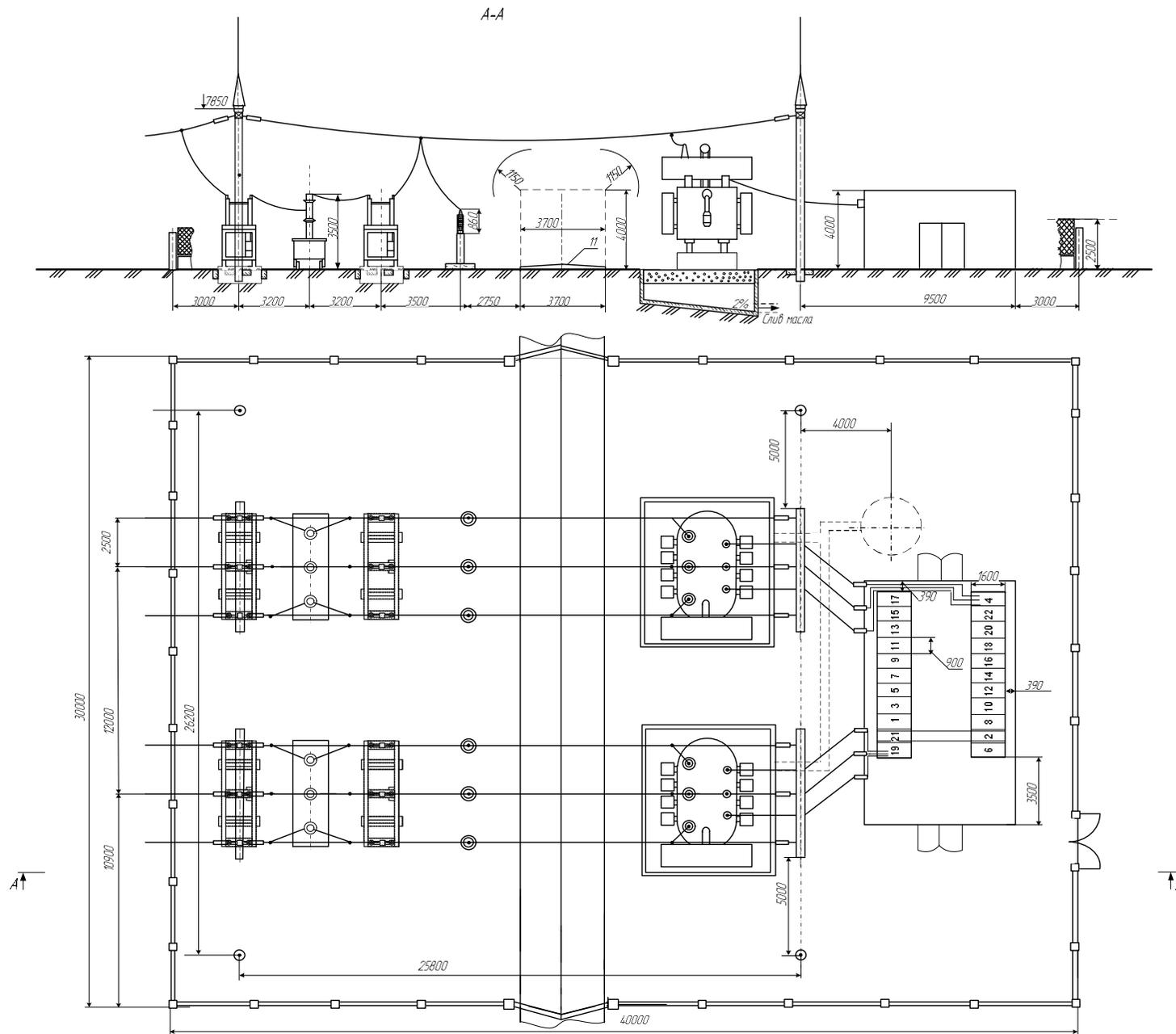


Рис. Б1. Конструктивное исполнение ГПП 35/10 кВ

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

$$D < 8(h - h_x)p, \quad (\text{Б2})$$

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:

$$D = \sqrt{L_1^2 + L_2^2}, \quad (\text{Б3})$$

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.

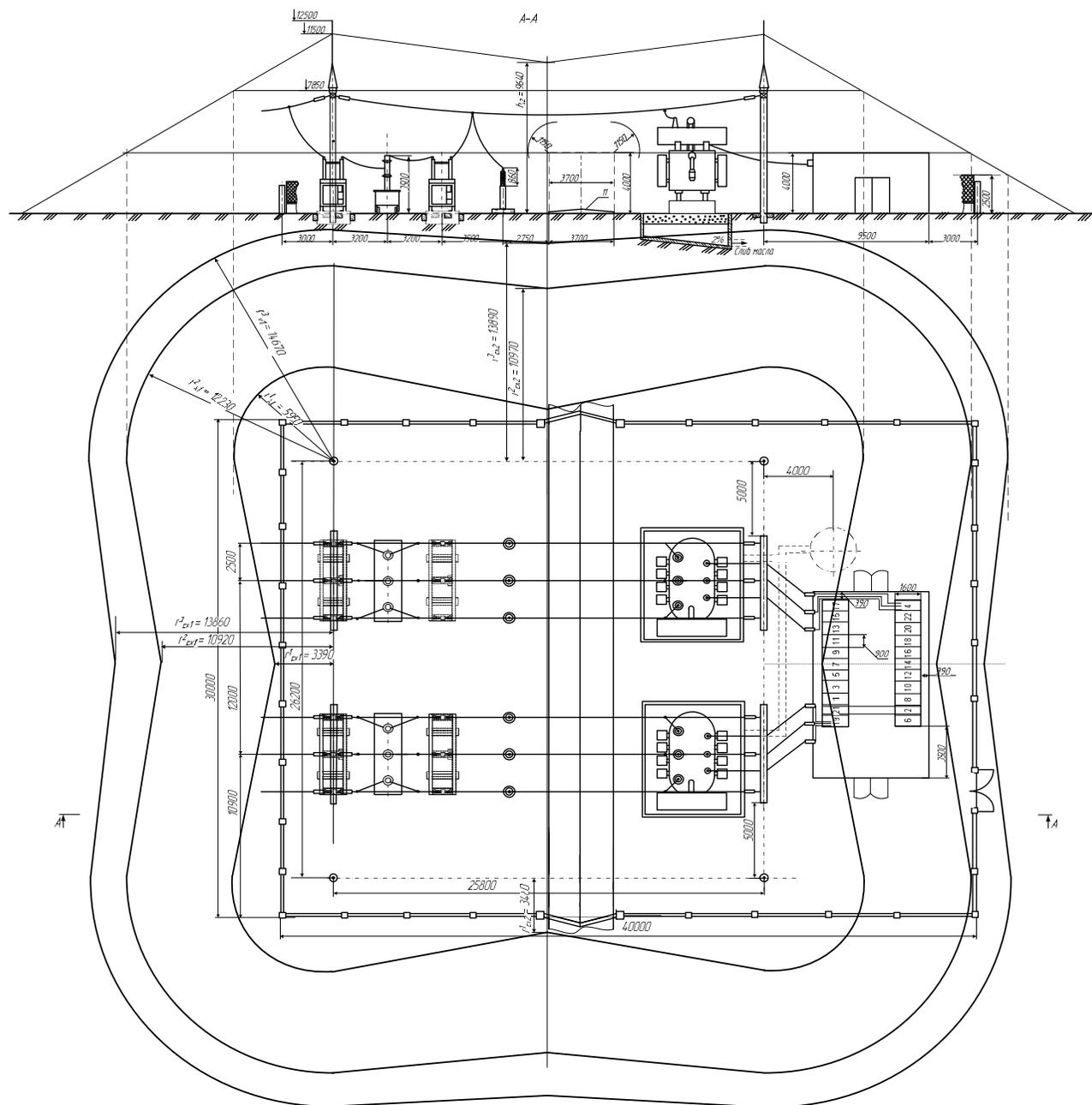


Рис. Б.2 Зона защиты стержневых молниеотводов для ГПП 35/10 кВ

Защита от перенапряжений, набегающих с линии, осуществляется с помощью ОПН и троса, который подвешивается только на подходах к подстанциям с длиной защитного подхода $l_{эл} = 1 \div 2$ 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.

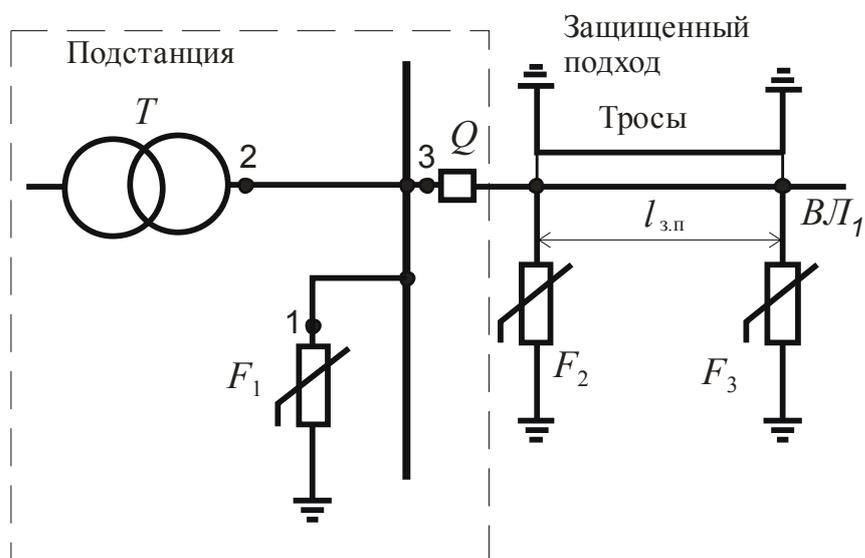
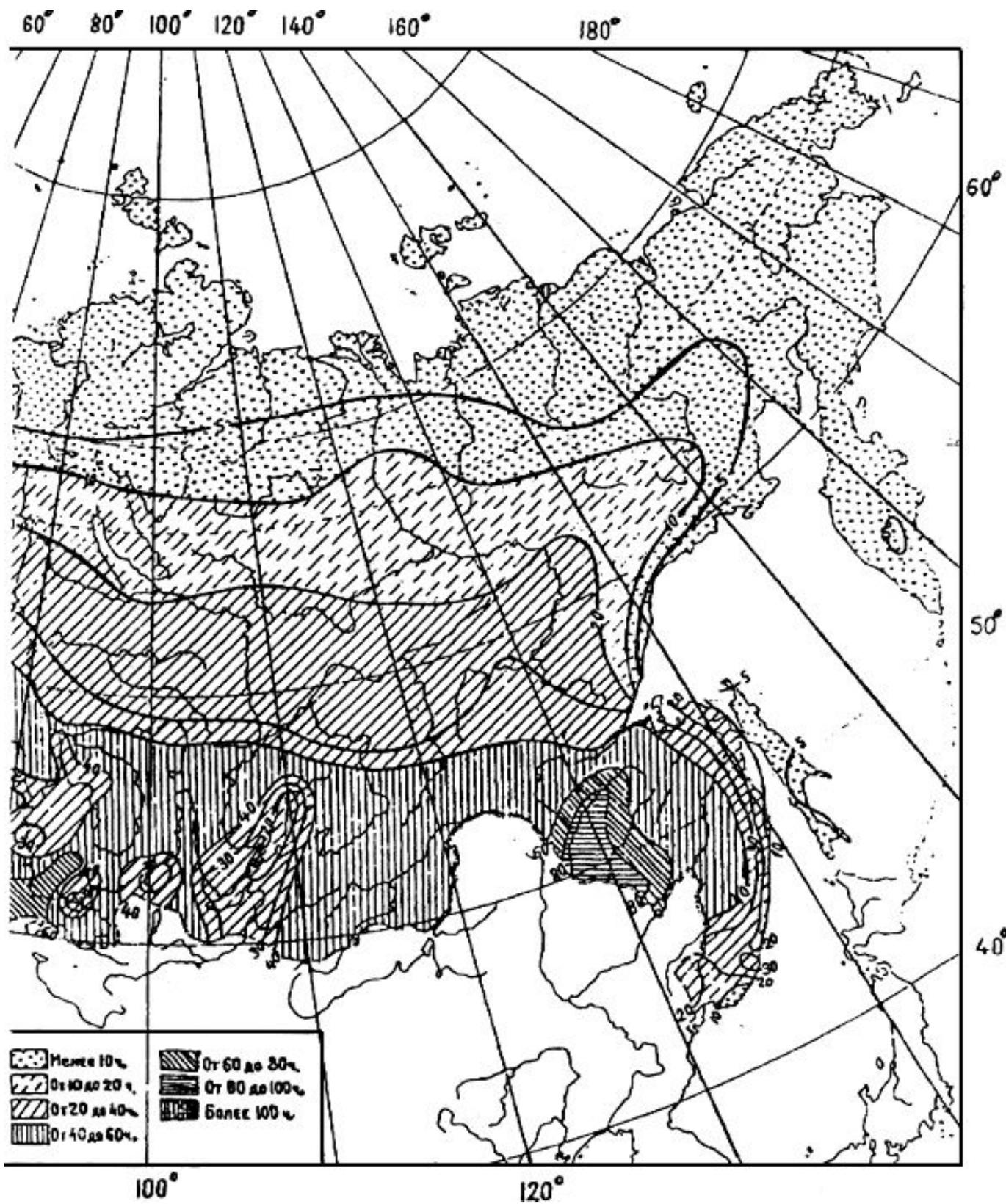


Рис. Б.3 – Схема защиты ГПП от перенапряжений, набегающих с линий

**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 продолжительность гроз, ч	Удельная плотность ударов молнии в землю n , $1/(\text{км}^2 \cdot \text{год})$
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 напряжения, кВ	Количество фаз, шт.	Объем эксплуатации, фазо-лет	Количество повреждений	% повреждений 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

Электрические характеристики ОПН 110-1150 кВ

Наименование	ОПН-110 УХЛ1	ОПН-110 ХЛ4	ОПН-220 УХЛ1	ОПН-220 У1 ОПН-220 УХЛ4	ОПН-330 У1	ОПН-500 УХЛ1	ОПН-750 У1	ОПН-750 У1	ОПН-1150 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.

Электрические характеристики грязестойких ОПН 110 и 220 кВ

Наименование параметра	Норма			
	ОПН-110 II УХЛ1	ОПН-110 IV УХЛ1	ОПН-220 II УХЛ1	ОПН-220 IV 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 ХЛ1	ОПНН-220 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 загрязнения	Длина удельного пути 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

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 B-80	A-65 B-80	A-65 B-80	A-65 B-80	A-65 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

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 (номинальное) напряжение, действ. кВ	198	216	228	192	216	240	264	192	228	258	294	264	192	228	264	
Наибольшее рабочее напряжение ограничителя, действ. кВ	156	156	156	154	174	191	191	154	156	191	191	211	154	182	211	
Номинальный разрядный ток 8/20 мкс, кА	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	20	20	20	
Квазиустановившиеся перенапряжения, допустимые в течение 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 напряжение при расчетном токе коммутационного напряжения, кВ																
а) при волне 1,2/2,5 мс 420 А	400	437	460	372	419	466	513	360	425	482	550	493	353	420	486	
б) при волне 2 мс 500 А	404	441	465	374	421	468	515	-	-	-	-	-	-	-	-	
в) при волне 2 мс 1000 А	420	458	483	382	430	477	525	374	444	502	572	514	368	437	506	
Остающееся напряжение при импульсном токе 8/20 мкс с 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 B-80	A-65 B-80	A-65 B-80	A-65 B-80	A-65 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 длительностью										
0,2 с	65	65	65	А- 65 В- 80	А- 65 В- 80	А- 65 В- 80	А- 65 В- 80	80	80	80
1 с, А	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600

Электрические характеристики ОПН 500 кВ и 750 кВ

Характеристика	Тип ОПН				
	Exlim ABB				
	P		T		
	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 действ:					
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 B-80	A-65 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 покрышках

ОПН для сетей классов напряжения до 35 кВ

Таблица Г3.1

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 у разрядному току	17,6	31,4	33,7	31,4	20,4	24,1	27,1	52,8

Продолжение табл. Г3.1

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 _{УНР} , 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 _{УНР} , 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°С 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-10/12, 7-10/250 (I)	ОПН-10/13,7-10/250(I)	ОПН-10/11-10/650(II)	ОПН-10/12-10/650(II)	ОПН-35/40,5-10/650(II)	ОПН-35/38-10/900(III)	ОПН-35/41-10/900(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 _{УНР} , 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 _{УНР} , 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

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

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
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 3.5

ОПН для сетей классов напряжения 330 кВ

Параметры	ОПН-330/210	ОПН-330/220	ОПН-330/230	ОПН-330/210-0	ОПН-330/220-0	ОПН-330/230-0	ОПН-330/210-0	ОПН-330/220-0	ОПН-330/230-0
	10/900(III)	10/900(II)	10/900(II)	20/1600(IV)	20/1600(IV)	20/1600(IV)	20/2500(V)	20/2500(V)	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. 3.5

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 _{УНР}	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 _{УНР}	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. 3.6

1	2	3	4	5	6	7
Амплитуда выдерживаемого не менее 2 раз импульса большого тока 4/10 мкс, кА.	100	100	100	100	100	100
Амплитуда выдерживаемого не менее 18 раз импульса пропускной способности, А	1600	1600	1600	2500	2500	2500
Удельная энергия, которую способен поглотить ограничитель при однократном воздействии, кДж/кВ _{УНР}	8,8	8,8	8,8	14,7	14,7	14,7
Удельная энергоемкость – энергия, вводимая при рабочих испытаниях перед проверкой термической устойчивости, кДж/кВ _{УНР}	17,6	17,6	17,6	29,4	29,4	29,4
Характеристика «НАПРЯЖЕНИЕ – ВРЕМЯ»: напряжение, кВ, допустимое на ОПН после разогрева до 60°С и введения энергии, равной энергоемкости 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-750/455-20/1800(V)	ОПН-750/477-20/1800(V)	ОПН-750/490-20/1800(V)	ОПН-750/455-20/2500(V)	ОПН-750/477-20/2500(V)	ОПН-750/490-20/2500(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 _{УНР}	10	10	10	14	14	14
Удельная энергоемкость – энергия, вводимая при рабочих испытаниях перед проверкой термической устойчивости, кДж/кВ _{УНР}	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 грозových 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 грозových 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- 2	35/40,5- 2	35/42- 2	35/38,5- 3	35/40,5- 3	35/42- 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
	5000 А max	113	119	123	110	115	119
5 Остающееся напряжение, кВ max, не более, при импульсе тока 8 / 20 с амплитудой:	10 000 А max	122	128	133	117	122	127
	20 000 А max	137	144	149	130	136	141
	30 000 А max	148	156	161	141	148	154
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		

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

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

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

Наименование параметра, размерность		Значение для ограничителя типа ОПН - У -						
		110/56- 3	110/73- 3	110/77- 3	110/80- 3	110/84- 3	110/88- 3	110/96- 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 -							
	220/120-0-2	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 max, не более	441	536	566	589	619	649	663	
4 Остающееся напряжение, кВ max, не более, при импульсе тока 30 / 60 с амплитудой:	250 А max	294	357	377	393	412	432	442
	500 А max	301	366	386	402	422	442	452
	1 000 А max	316	385	406	423	444	466	476
5 Остающееся напряжение, кВ max, не более, при импульсе тока 8 / 20 с амплитудой:	500 А max	304	370	390	406	426	446	457
	5 000 А max	358	436	460	478	502	526	539
	10 000 А max	383	466	492	512	538	564	576
	20 000 А max	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 max	10							
8 Максимальная амплитуда импульса тока 4 / 10, кА	100							
9 Амплитуда прямоугольного импульса тока длительностью 2 000 мкс, Аmax	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 -							
	220/120-0-3	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 max, не более	419	509	539	557	585	613	628	
4 Остающееся напряжение, кВ max, не более, при импульсе тока 30 / 60 с амплитудой:	500 А max	284	345	365	378	397	416	426
	1 000 А max	296	358	380	392	413	437	442
	2 000 А max	313	380	403	417	437	459	470
5 Остающееся напряжение, кВ max, не более, при импульсе тока 8 / 20 с амплитудой:	500 А max	288	350	372	382	400	421	432
	5 000 А max	340	416	440	454	476	501	513
	10 000 А max	364	442	468	484	508	533	546
	20 000 А max	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 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							

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 _{действ.}	110	
2.	Номинальное напряжение промышленной частоты, кВ _{действ.}	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 _{действ.}	110	
2.	Номинальное напряжение промышленной частоты, кВ _{действ.}	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	

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 5.3

ОПН-Л-110/88-10/650(II) 2 УХЛ1

№	Наименование параметра	Значение	
1	2	3	
1.	Класс напряжения сети, кВ _{действ.}	110	
2.	Длительно допустимое напряжение промышленной частоты, кВ _{действ.}	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).

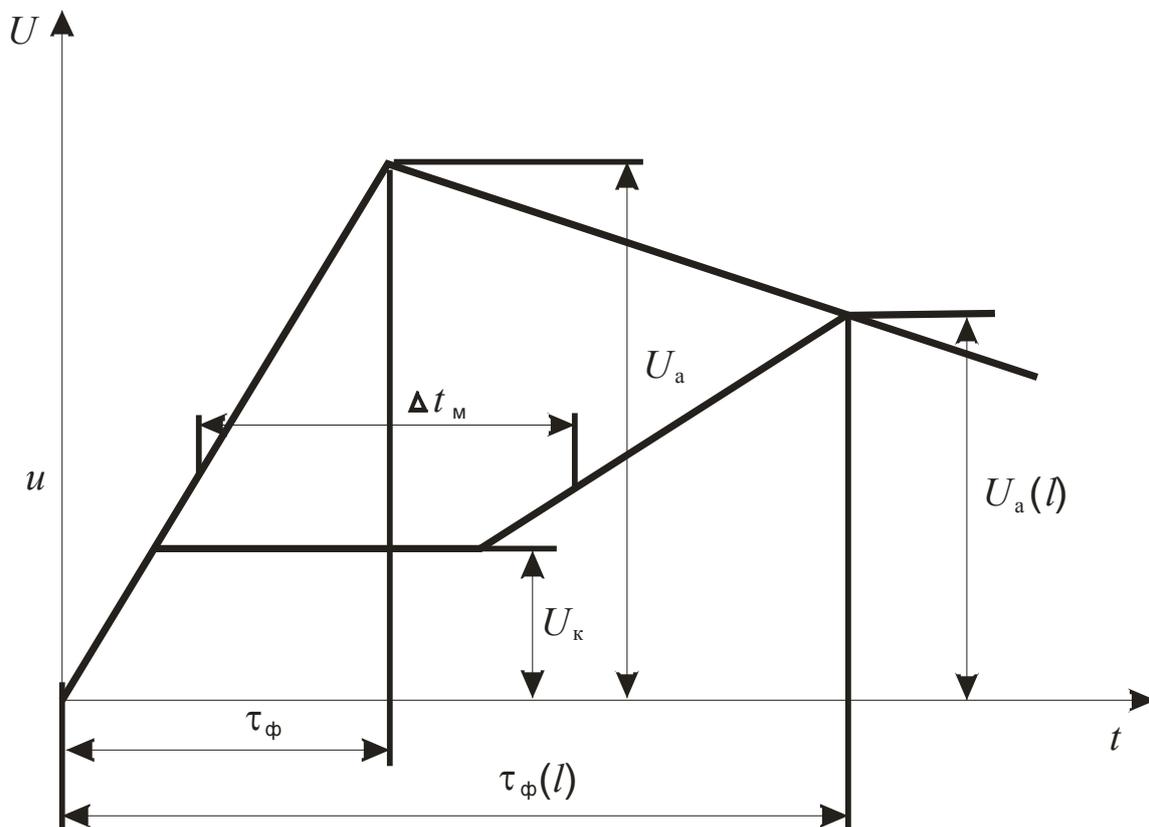


Рис. Д1. Деформация фронта грозовой волны под действием импульсной короны:

U_a и τ_ϕ - 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 Δt_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

$$r_3 = (n \cdot r \cdot R_p^{n-1})^{\frac{1}{n}}, \quad (D4)$$

где n - число составляющих расщепленного провода; r - радиус составляющего провода, м; R_p - радиус расщепления, рассчитывающийся по формуле

$$R_p = \frac{d}{2 \cdot \sin \frac{\pi}{n}}, \quad (D5)$$

в которой d - шаг расщепления, м.

$$k_p = \frac{R_p + (n-1) \cdot r_{\text{пр}}}{n \cdot R_p}. \quad (\text{Д6})$$

б) СПБГТУ -

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

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

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 Δt , 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

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

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

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 ($\psi_{пр}$ - от прорывов молнии на провода и $\psi_{оп}$ - от обратных перекрытий при ударе молнии в опору) используется метод статистических испытаний. Процедура расчета $\psi_{пр}$ и $\psi_{оп}$ имеет некоторые различия.

3.2. Алгоритм программы расчета $\psi_{пр}$ 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:

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

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

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 (5.53) значений

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

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";
$l_{о.з}$	- длина опасной зоны, рассчитанная по методу, представленному в подразделе 5.4.7;
$l_{о.з}^{ст}$	- 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 $l_{о.з}$;
M_1, M_2	- то же самое, что и отношения (Ж4) и (Ж5), приведенных выше;
ψ_a, ψ_p, ψ_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 (%);
$\psi_{а\Sigma}, \psi_{р\Sigma}, \psi_{л\Sigma}$	- суммарные значения ψ_a и ψ'_a, ψ_p и ψ'_p и т.д. (%);
T_a, T_p, T_l	- показатели надежности грозозащиты, рассчитанные по зависимостям (5.53) и (5.54).

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, $l_{o.з}=6,18$ км, $l_{o.з}^{CT}=5,88$ 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

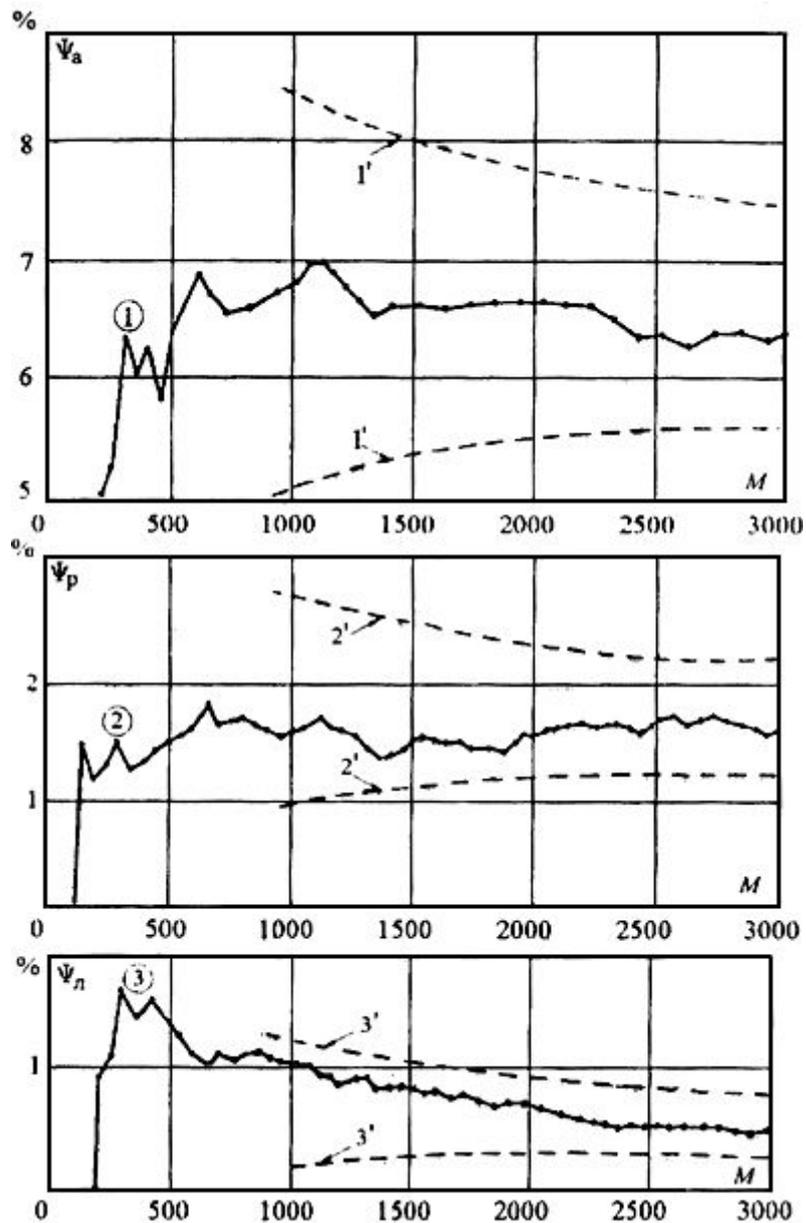


Рис. Ж1 Доля опасных волн (---) и ее доверительные интервалы (---) в зависимости от числа статистических испытаний для трех точек ПС:

- 1 - автотрансформатор (ψ_a и $1'-1'$); 2 - реактор (ψ_r и $2'-2'$);
 3 - линейный выключатель (ψ_l 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 Δt . Шаг по времени является производным от шага расчета по длине Δl , 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.

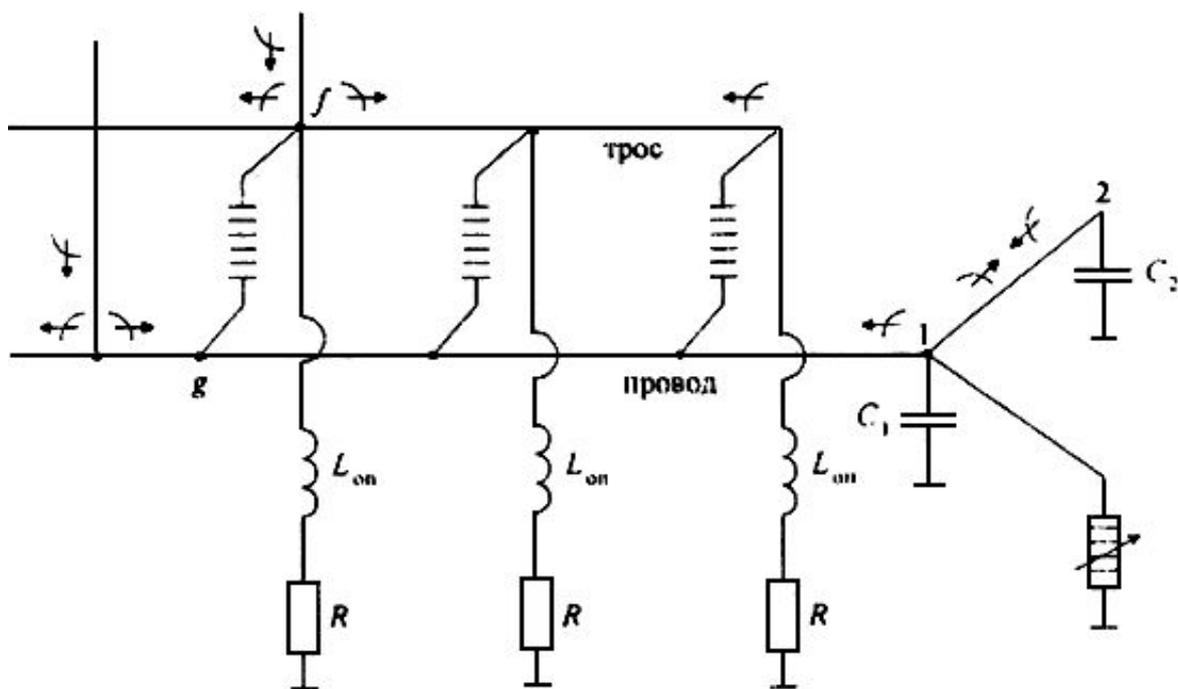


Рис. И1. Модель линии и подстанции для расчета волновых процессов в системе молния-ВЛ-подстанция

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 Δt 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 (τ_{ϕ}) (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 трапециевидальной 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 $MNK'L'P'R'$ 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.

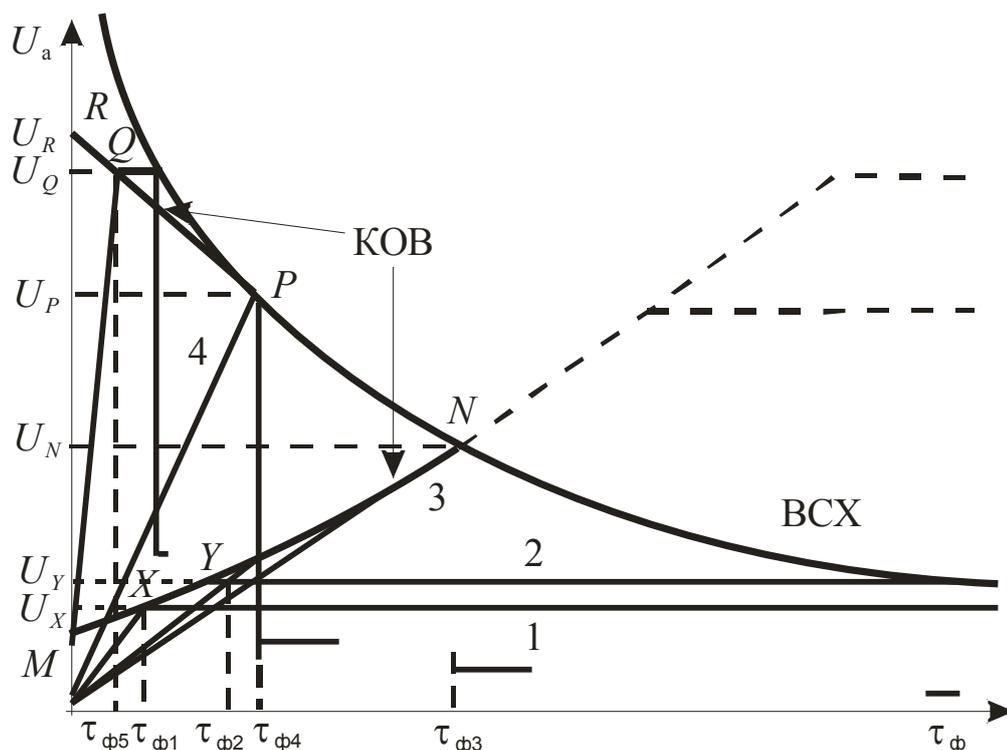


Рис. И2. Область параметров опасных волн в координатах U_a и τ_ϕ

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.

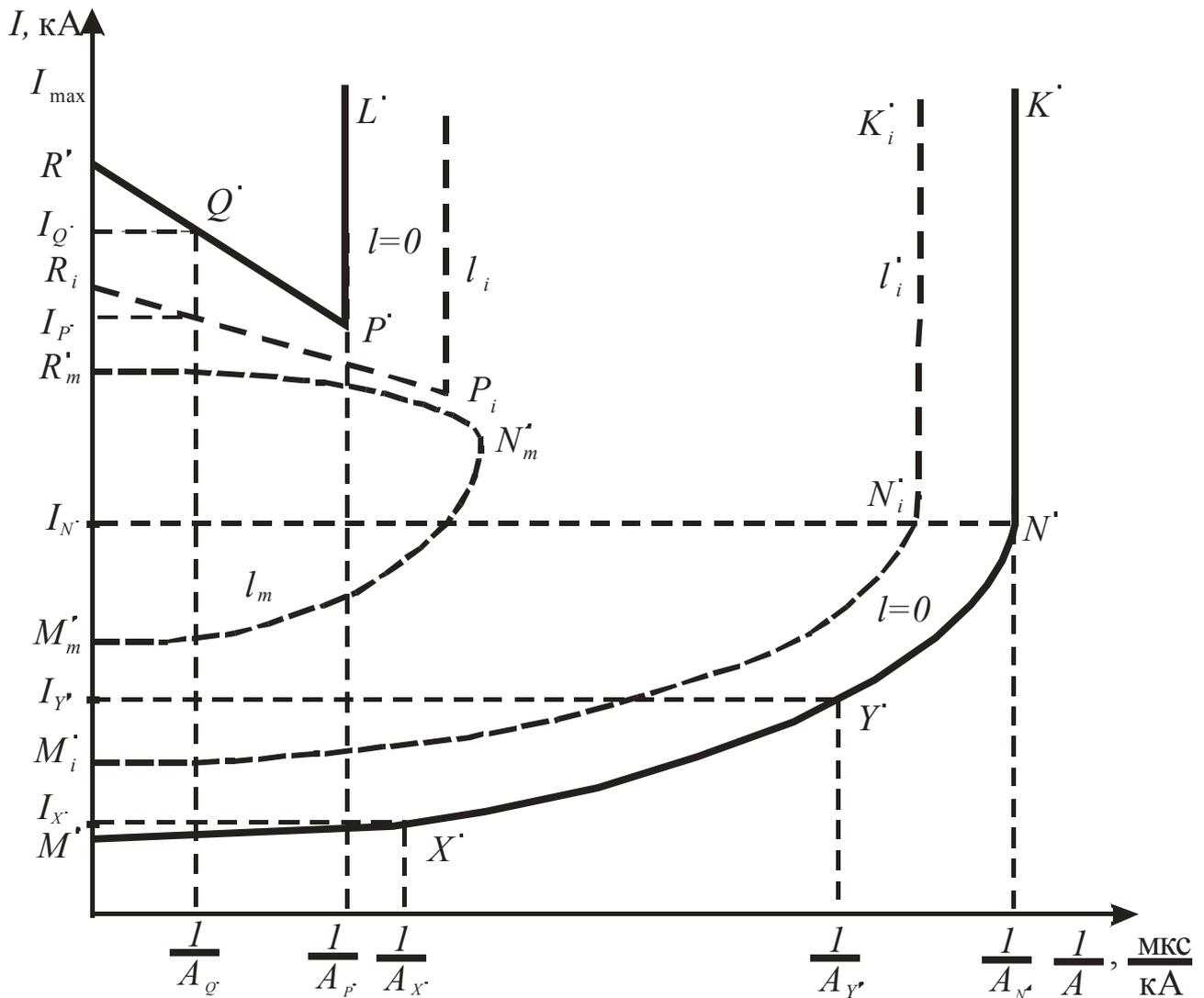


Рис. И3. Область существования параметров опасных волн в координатах $I, 1/A$

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 сопротивлению 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 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 разрядника 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 разрядника или ОПН	1-я точка ВСХ		2-я точка ВСХ		3-я точка ВСХ		Начальное напряжение кВ
	t , мкс	U , кВ	t , мкс	U , кВ	t , мкс	U , 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 ВЛ	Высота подвеса проводов, м	Количество расщепленных составляющих	Радиус составляющего провода, мм	Радиус расщепления 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
				E_0 , мкс	1,942
Расстояние до первой опоры, м					200,0
Длина пролета, м					450,0
Сопrotивление 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 $U(t_{x.B})/U_m$	0,010	
к заданному моменту времени $t_{x.B}$, 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	-	-

Продолжение таблицы И12

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).

($R_3 = 10 \text{ Ом}$)

$l_{\text{Т-ОПН}}$, м	Прорывы мимо тросовой защиты						Обратные перекрытия						Сумма	
	Удары в ВЛ1		Удары в ВЛ2		Сумма		Удары в ВЛ1		Удары в ВЛ2		Сумма		$N_{\text{Н.В.}}$, $\cdot 10^{-6}$, 1/год	$T_{\text{Н.В.}}$, лет
	$N_{\text{Н.В.}}$, $\cdot 10^{-6}$, 1/год	$T_{\text{Н.В.}}$, лет	$N_{\text{Н.В.}}$, $\cdot 10^{-6}$, 1/год	$T_{\text{Н.В.}}$, $\cdot 10^3$, лет	$N_{\text{Н.В.}}$, $\cdot 10^{-6}$, 1/год	$T_{\text{Н.В.}}$, 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)

$l_{Т-ОПН}$, м	Прорывы мимо тросовой защиты						Обратные перекрытия						Сумма	
	Удары в ВЛ1		Удары в ВЛ2		Сумма		Удары в ВЛ1		Удары в ВЛ2		Сумма			
	$N_{Н.В} \cdot 10^{-6}$, 1/год	$T_{Н.В}$, лет	$N_{Н.В} \cdot 10^{-6}$, 1/год	$T_{Н.В}$, лет	$N_{Н.В} \cdot 10^{-6}$, 1/год	$T_{Н.В}$, лет	$N_{Н.В} \cdot 10^{-6}$, 1/год	$T_{Н.В}$, лет	$N_{Н.В} \cdot 10^{-6}$, 1/год	$T_{Н.В}$, лет	$N_{Н.В} \cdot 10^{-6}$, 1/год	$T_{Н.В}$, лет	$N_{Н.В} \cdot 10^{-6}$, 1/год	$T_{Н.В}$, 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).

($R_3 = 10 \text{ Ом}$)

$l_{\text{Т.ОПН}}$, м	Прорывы мимо тросовой защиты						Обратные перекрытия						Сумма	
	Удары в ВЛ1		Удары в ВЛ2		Сумма		Удары в ВЛ1		Удары в ВЛ2		Сумма		$N_{\text{НБ}}$ $\cdot 10^{-6}$, 1/год	$T_{\text{НБ}}$, лет
	$N_{\text{НБ}}$ $\cdot 10^{-6}$, 1/год	$T_{\text{НБ}}$, лет	$N_{\text{НБ}}$ $\cdot 10^{-6}$, 1/год	$T_{\text{НБ}}$, лет	$N_{\text{НБ}}$ $\cdot 10^{-6}$, 1/год	$T_{\text{НБ}}$, лет	$N_{\text{НБ}}$ $\cdot 10^{-6}$, 1/год	$T_{\text{НБ}}$, лет	$N_{\text{НБ}}$ $\cdot 10^{-6}$, 1/год	$T_{\text{НБ}}$, лет	$N_{\text{НБ}}$ $\cdot 10^{-6}$, 1/год	$T_{\text{НБ}}$, 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

Результаты расчета надежности грозозащиты трансформатора в узле 4 подстанции 500 кВ при варьировании расстояний между трансформатором и защитным аппаратом (узел 14).

($R_3 = 20 \text{ Ом}$)

$l_{\text{Т-ОПН}}$, м	Прорывы мимо тросовой защиты						Обратные перекрытия						Сумма	
	Удары в ВЛ 1		Удары в ВЛ2		Сумма		Удары в ВЛ1		Удары в ВЛ2		Сумма			
	$N_{\text{НБ}} \cdot 10^{-6}$, 1/год	$T_{\text{НБ}}$, лет	$N_{\text{НБ}} \cdot 10^{-6}$, 1/год	$T_{\text{НБ}}$, лет	$N_{\text{НБ}} \cdot 10^{-6}$, 1/год	$T_{\text{НБ}}$, лет	$N_{\text{НБ}} \cdot 10^{-6}$, 1/год	$T_{\text{НБ}}$, лет	$N_{\text{НБ}} \cdot 10^{-6}$, 1/год	$T_{\text{НБ}}$, лет	$N_{\text{НБ}} \cdot 10^{-6}$, 1/год	$T_{\text{НБ}}$, лет	$N_{\text{НБ}} \cdot 10^{-6}$, 1/год	$T_{\text{НБ}}$, 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.).

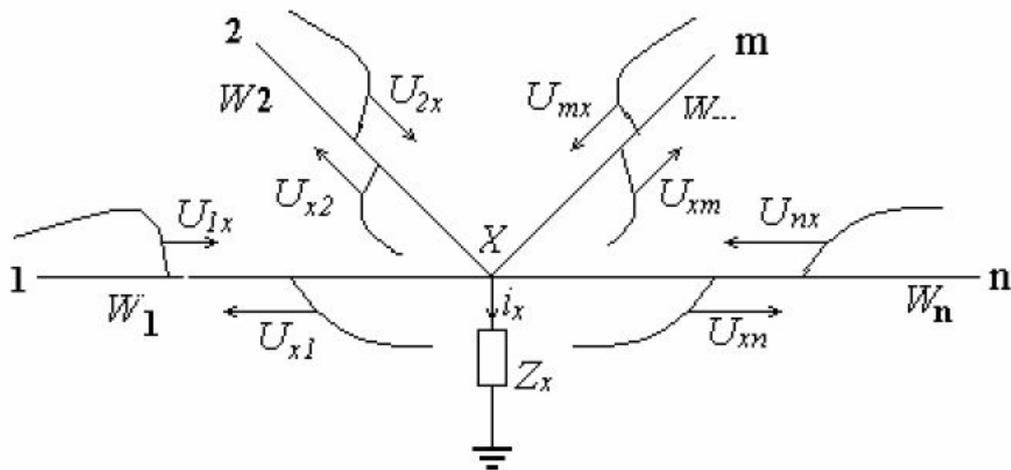


Рис. К1. Схема с распределенными параметрами

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

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

$$\frac{1}{W_{экв}} = \frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2} + \dots + \frac{1}{W_m} + \dots + \frac{1}{W_n}. \quad (K1)$$

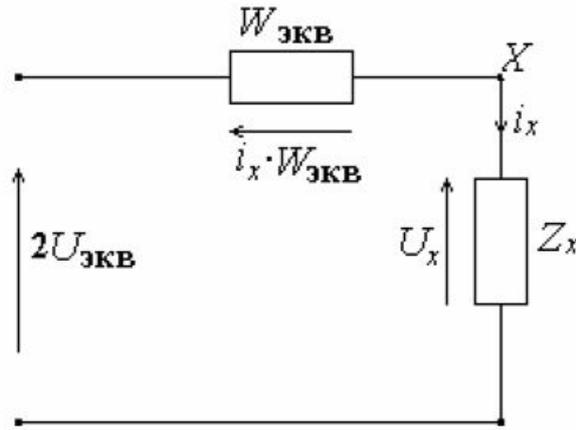


Рис. К2. Эквивалентная схема с сосредоточенными параметрами

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

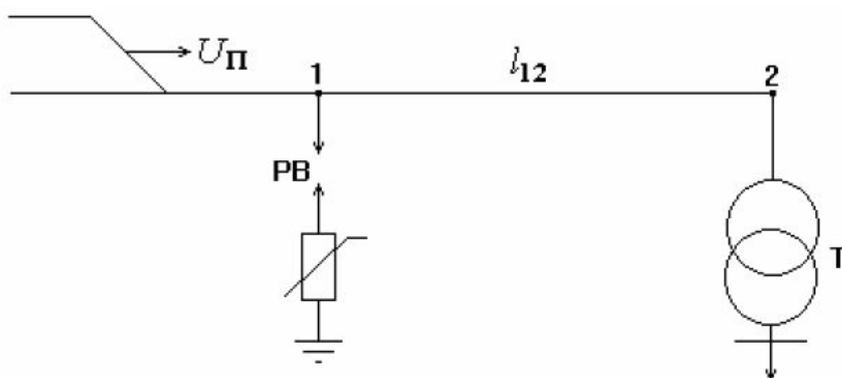


Рис. К3. Схема подстанции

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

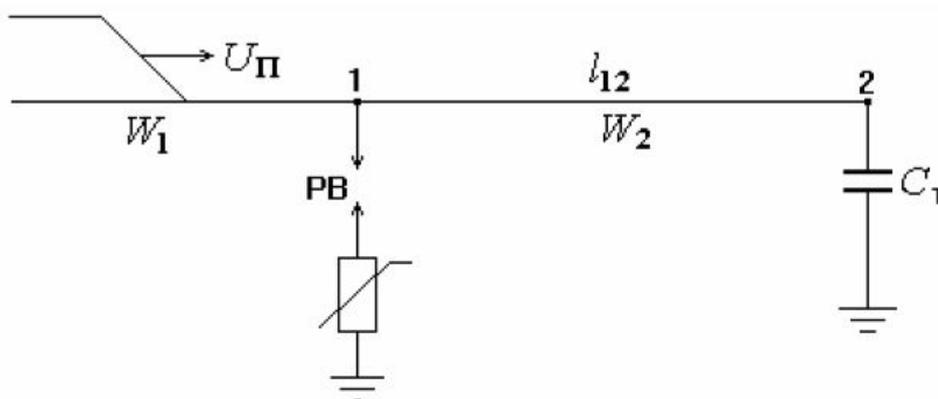


Рис. К4. Схема замещения подстанции

Порядок расчета:

1. Рассчитывается крутизна волны перенапряжения:

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

2. Выбирается расчетный интервал времени Δt . Обычно для достижения высокой точности расчета рекомендуется Δt 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).

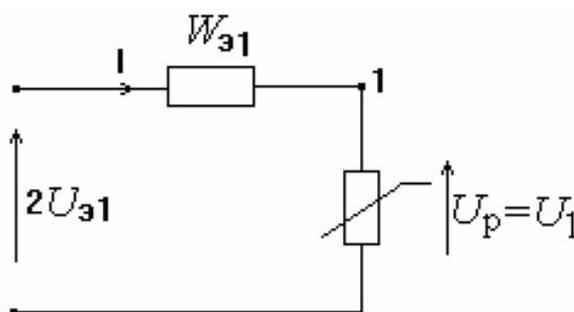


Рис. К5. Эквивалентная схема замещения узла с разрядником

Уравнение (K8) является уравнением прямой линии, которая отсекает на оси ординат отрезок $2U_{31}$, а на оси абсцисс отрезок $2U_{31}/W_1$. Вентильный разрядник сработает, когда $2U_{31} = U_{пр}$, следовательно, точку 1 на ВАХ можно найти, если провести линию через точку $U_{пр}$ на оси ординат и через точку $U_{пр}/W_{31}$ на оси абсцисс (рис. К6).

На основании второго закона Кирхгофа можно записать:

$$2U_{31} = U_p + I \cdot W_{31} , \quad (\text{K7})$$

откуда

$$U_p = 2U_{\text{э1}} - I \cdot W_{\text{э1}} \quad (\text{K8})$$

Примечание: вольтамперная характеристика РВ задается тремя точками при токах 3, 5, 10 кА и соответствующим этим токам $U_{\text{ост}}$. 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:

$$U_r = U_2 + I_2 \cdot W_{\text{э1}}, \quad (\text{K9})$$

где I_2 , U_2 – координаты точки 2, определяемые из графика; $W_{\text{э1}}$ – 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; $U_{\text{ост3}}$).

$$U_r = 630 + 3 \cdot 323,08 = 1599,2 \text{ кВ}$$

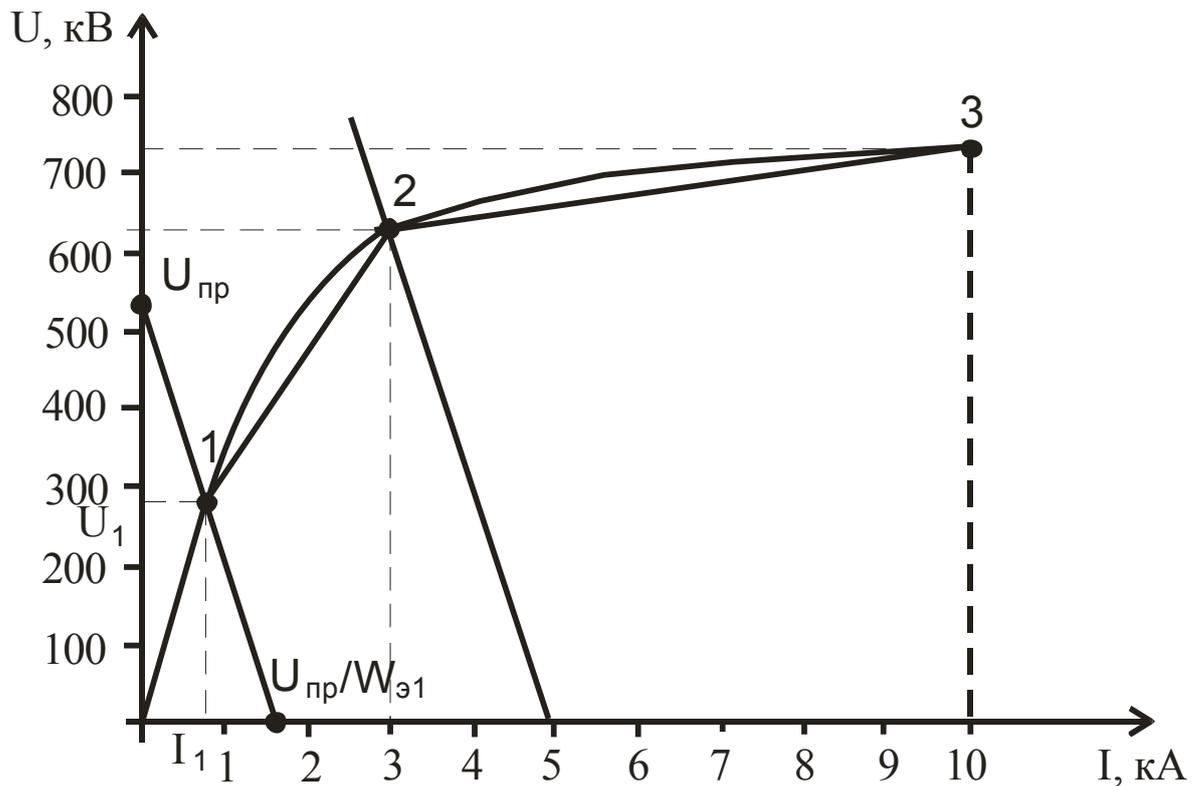


Рис. К6. Замена реальной ВАХ РВ двумя отрезками прямых

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 (К7) и (К10) решаются совместно:

$$\begin{cases} 2U_{э1} = U_p + I \cdot W_{э1} \\ U_p = E_1 + I \cdot Z_{p1} \end{cases} \quad (K13)$$

$$I = \frac{U_p - E_1}{Z_{p1}};$$

$$2U_{\text{э1}} = U_{\text{п}} + \frac{U_{\text{п}} \cdot W_{\text{э1}} - E_1 \cdot W_{\text{э1}}}{Z_{\text{п1}}};$$

$$2U_{\text{э1}} \cdot Z_{\text{п1}} = U_{\text{п}} \cdot Z_{\text{п1}} + U_{\text{п}} \cdot W_{\text{э1}} - E_1 \cdot W_{\text{э1}};$$

$$U_{\text{п}} (Z_{\text{п1}} + W_{\text{э1}}) = 2U_{\text{э1}} \cdot Z_{\text{п1}} + E_1 \cdot W_{\text{э1}};$$

$$U_{\text{п}} = \frac{Z_{\text{п1}}}{Z_{\text{п1}} + W_{\text{э1}}} \cdot 2U_{\text{э1}} + \frac{E_1 \cdot W_{\text{э1}}}{Z_{\text{п1}} + W_{\text{э1}}}; \quad (\text{K14})$$

или

$$U_{\text{п}} = b_1 \cdot 2U_{\text{э1}} + d_1; \quad (\text{K15})$$

где

$$b_1 = \frac{Z_{\text{п1}}}{Z_{\text{п1}} + W_{\text{э1}}}, \quad d_1 = \frac{E_1 \cdot W_{\text{э1}}}{Z_{\text{п1}} + W_{\text{э1}}}.$$

$$b_1 = \frac{157,8}{157,8 + 323,08} = 0,328, \quad d_1 = \frac{156,7 \cdot 323,08}{157,8 + 323,08} = 105,3 \text{ кВ.}$$

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

$$Z_{\text{п2}} = \frac{U_3 - U_2}{I_3 - I_2}; \quad E_2 = \frac{U_2 I_3 - U_3 I_2}{I_3 - I_2}.$$

$$Z_{\text{п2}} = \frac{734 - 630}{10 - 3} = 14,86 \text{ Ом}; \quad E_2 = \frac{630 \cdot 10 - 734 \cdot 3}{10 - 3} = 585,43 \text{ кВ.}$$

$$b_2 = \frac{14,86}{14,86 + 323,08} = 0,044, \quad d_2 = \frac{585,43 \cdot 323,08}{14,86 + 323,08} = 559,7 \text{ кВ,}$$

Таким образом, для узла 1, где подключен вентильный разрядник, используются следующие уравнения для нахождения напряжения U_1 :

$$1. U_1 = 2 \cdot U_{\text{э1}} \text{ до пробоя РВ}; \quad (\text{K19})$$

$$2. U_1 = b_1 \cdot 2U_{\text{э1}} + d_1, \text{ если } U_{\text{пр}} \leq 2 \cdot U_{\text{э1}} \leq U_{\Gamma}; \quad (\text{K20})$$

$$3. U_1 = b_2 \cdot 2U_{\text{э1}} + d_2, \text{ если } 2 \cdot U_{\text{э1}} > U_{\Gamma}. \quad (\text{K21})$$

Для нашего примера построения и расчеты дали, следующие результаты:

$$U_{\Gamma} = 1599,2 \text{ кВ}; b_1 = 0,328; d_1 = 105,3 \text{ кВ}; b_2 = 0,044; d_2 = 559,7 \text{ кВ}.$$

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. К2).

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;

α_{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	Δt , 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	α_{11}	α_{21}	α_{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 срабатывает:

$$\begin{aligned} U_1 &= b_1 \cdot (2U_{\text{э}1}) + d_1, \text{ если } U_{\text{пр}} \leq 2 \cdot U_{\text{э}1} \leq U_r; \\ U_1 &= b_2 \cdot (2U_{\text{э}1}) + d_2, \text{ если } 2 \cdot U_{\text{э}1} > U_r. \end{aligned} \quad (\text{K28})$$

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 емкость C по линии с волновым сопротивлением W (рис. К7).

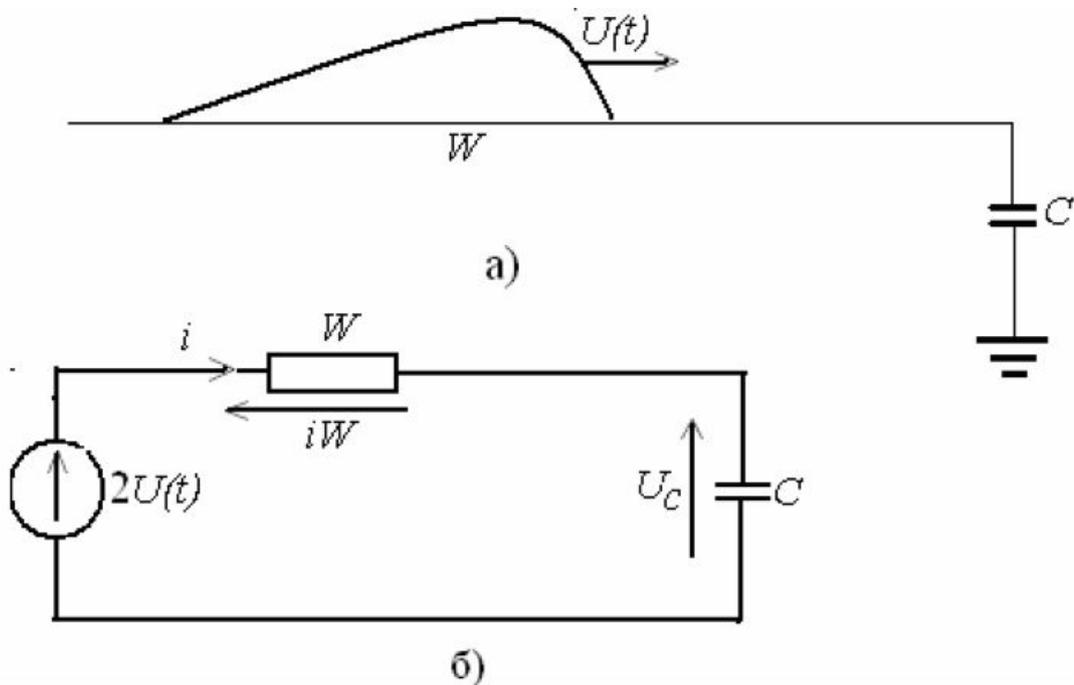


Рис. К7. а) схема с распределенными параметрами
 б) схема замещения с сосредоточенными параметрами

На основании 2-го закона Кирхгофа для схемы б запишется

$U_c + i \cdot W = 2U(t)$; ток через емкость равен $i = C \frac{dU_c}{dt}$; с учетом этого можно записать:

$$U_c + C \frac{dU_c}{dt} W = 2U(t), \quad (K35)$$

или

$$\frac{dU_c}{dt} + \frac{1}{WC} U_c = \frac{1}{WC} 2U(t), \quad (K36)$$

где $WC = T$ – постоянная времени данной схемы.

В итоге получим расчетное дифференциальное уравнение в виде:

$$\frac{dU_c}{dt} + \frac{1}{T} U_c = \frac{1}{T} 2U(t). \quad (K37)$$

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 Δt_k ($\Delta t_1 - \Delta t_8$). На отрезке $O_2 - t$ откладываются отрезки $\Delta \tau_k$, равные временным отрезкам Δt_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 Δt_1 необходимо восстановить перпендикуляр до пересечения с прямой B_1A_0 для получения величины напряжения на емкости C в момент времени Δt_1 (точка A_1). Далее соединяется прямой линией точка B_2 с точкой A_1 и из конца отрезка Δt_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 Δt_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 загружаем расчет, т.е. величина напряжения на изоляции трансформатора будет в реальности меньше расчетной.

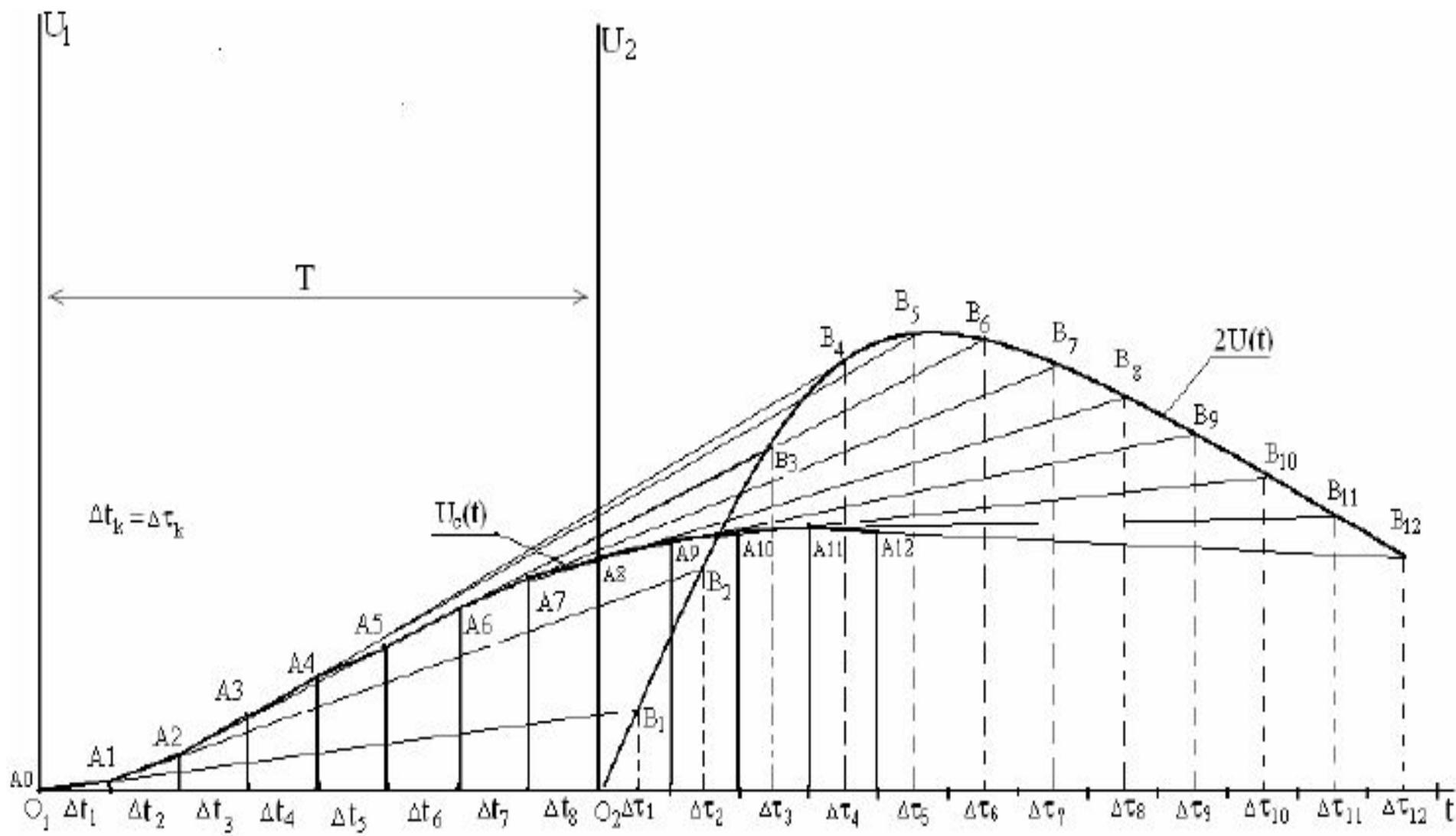


Рис. К8. Определение напряжения на емкости методом подкасательной

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 – Δt .

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.

Расчет напряжения на изоляции силового трансформатора методом бегущих волн с применением метода подкастельной

t	U_{01}	$A11U_{01}$	U_{21}	$\alpha_{21}U_{21}$	$2U_{\text{э}1}$	U_1	U_{12}	$2U_{\text{э}2}$	U_2	U_{21}
t	3000A1	1,077A2	A11($t-0,24$)	0,923A4	A3+A5	1. $U_1=2U_{\text{э}1}$; 2. $U_1=0,33A6+105,3$ 3. $U_1=0,044A6+559,7$	A7-A4	2A8	Граф. 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

173

Продолжение таблицы 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).

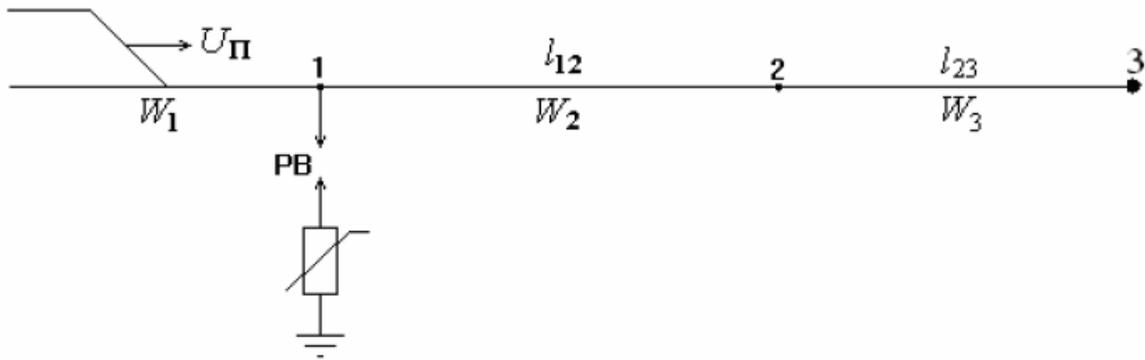


Рис. К9. Расчетная схема замещения

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 Δt приводит к изменению параметров линии, которой заменяется входная емкость трансформатора

$$l_c = l_{23} = v \cdot \frac{\Delta t}{2} = \frac{0,01\tau_{\phi}}{2} \cdot v = \frac{0,01 \cdot 0,3}{2} \cdot 300 = 0,45 \text{ м}.$$

$$W_c = W_3 = \frac{\Delta t}{2C_r} = \frac{0,003 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 1230 \cdot 10^{-12}} = 1,22 \text{ Ом};$$

$$t_{23} = \frac{\Delta t}{2} = \frac{0,003}{2} = 0,0015 \text{ мкс}; \quad v = 300 \text{ м/мкс}.$$

При этом изменяется также эквивалентное сопротивление $W_{\alpha 2}$, $W_{\alpha 3}$ и коэффициенты преломления α_{22} , α_{32} .

$$W_{\alpha 2} = \frac{W_2 \cdot W_3}{W_2 + W_3} = \frac{700 \cdot 1,22}{700 + 1,22} = 1,22 \text{ Ом}; \quad W_{\alpha 3} = W_3 = 1,22 \text{ Ом};$$

$$\alpha_{22} = \frac{2 \cdot W_{32}}{W_2} = \frac{2 \cdot 1,22}{700} = 0,0035 ;$$

$$\alpha_{32} = \frac{2 \cdot W_{32}}{W_3} = \frac{2 \cdot 1,22}{1,22} = 1,22 ;$$

Для расчета кривой опасных параметров подстанции необходимо выбрать 4-5 значений длительности фронта набегающих волн перенапряжений и для каждого значения τ_{ϕ} определить Δt , M , W_C , W_{32} , W_{33} , α_{22} , α_{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_n , 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

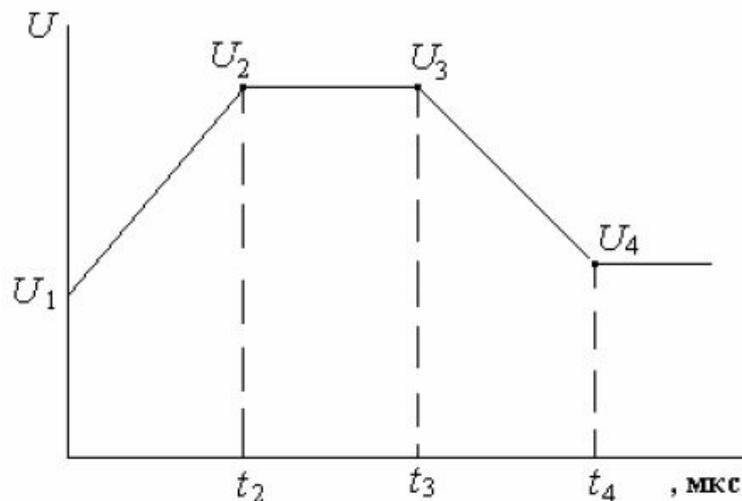


Рис. К10. Кривая допустимых импульсных перенапряжений для внутренней изоляции трансформатора

В программе используются те же уравнения, составленные ранее для каждого узла. Падающая волна представляется дискретными значениями для каждого расчетного шага:

$$U_n^k = a \cdot \Delta t \cdot K, \text{ если } (K-N) \leq 0, \quad (\text{K38})$$

$$U_n^k = a \cdot \tau_\phi, \text{ если } (K-N) > 0, \quad (\text{K39})$$

где K -порядковый номер расчетного шага.

Уравнение (K25) в программе записано в виде:

$$2U_{\text{э1}}^k = \alpha_{11} \cdot U_n^k + \alpha_{21} \cdot U_{21}^{k-m}, \quad (\text{K40})$$

если $(K-M) \leq 0$, то $U_{21}^{k-m} = 0$.

Напряжение в узле 1 находится по уравнениям (K26, K27, K28):

$$U_1^k = 2U_{\text{э1}}^k, \text{ если } 2U_{\text{э1}}^k < U_{\text{пр}}; \quad (\text{K41})$$

$$U_1^k = b_1 \cdot (2U_{\text{э1}}^k) + d_1, \text{ если } U_{\text{пр}} < 2U_{\text{э1}}^k < U_{\text{г}}; \quad (\text{K42})$$

$$U_1^k = b_2 \cdot (2U_{\text{э1}}^k) + d_2, \text{ если } 2U_{\text{э1}}^k > U_{\text{г}}. \quad (\text{K43})$$

По уравнению (K29) определяется волна напряжения U_{12} :

$$U_{12}^k = U_1^k - U_{21}^{k-m}, \text{ если } (K-M) \leq 0, \text{ то } U_{21}^{k-m} = 0. \quad (\text{K44})$$

Для узла 2 используются уравнения (K31, K32, K33, K34):

$$U_2^k = 2U_{\text{э2}}^k, \quad 2U_{\text{э2}}^k = \alpha_{22} \cdot U_{12}^k + \alpha_{32} \cdot U_{32}^{k-1}, \text{ если } (K-1) \leq 0, \text{ то } U_{32}^{k-1} = 0. \quad (\text{K45})$$

$$U_{21}^k = U_2^k - U_{12}^k, \quad U_{23}^k = U_2^k - U_{32}^{k-1}, \text{ если } (K-1) \leq 0, \text{ то } U_{32}^{k-1} = 0. \quad (\text{K46})$$

При расчете напряжения в узле 3 используются уравнения (K40, K41, K42):

$$U_3^k = 2U_{\text{э3}}^k, \quad 2U_{\text{э3}}^k = \alpha_{33} \cdot U_{23}^k, \quad U_{32}^k = U_3^k - U_{23}^k. \quad (\text{K47})$$

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.

Таблица К5

Исходные данные к расчету КОП

Параметр	$U_{П\text{оп}}$	τ_{Φ}^*	Δt^*	M^*	W_C^*	α_{22}^*	α_{32}^*		
Обозначение в программе	$U0$	$T2$	$T1$	M	W_3	$A3$	$A4$		
Числовые значения									
Параметр	N	P	α_{11}	α_{21}	b_1	d_1	b_2	d_2	
Обозначение в программе	N	P	$A1$	$A2$	$B1$	$D1$	$B2$	$D2$	
Числовые значения									
Параметр	$U_{ПР}$	$U_{Г}$	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.

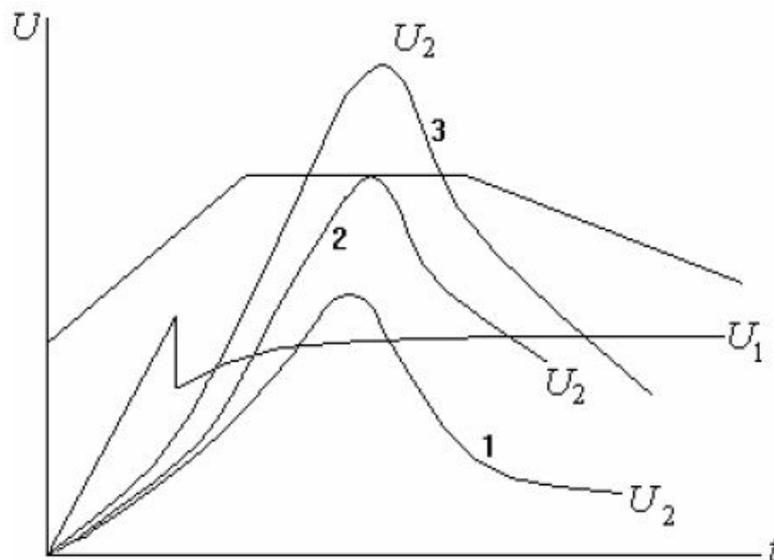


Рис. К11. Напряжения в узловых точках подстанции и кривая импульсной прочности изоляции трансформатора; U_2 показано для различных амплитуд падающей волны – $U_{П}$.

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 Δt_{\max} . Найденные параметры позволяют рассчитать длину защитного подхода для конкретной подстанции.

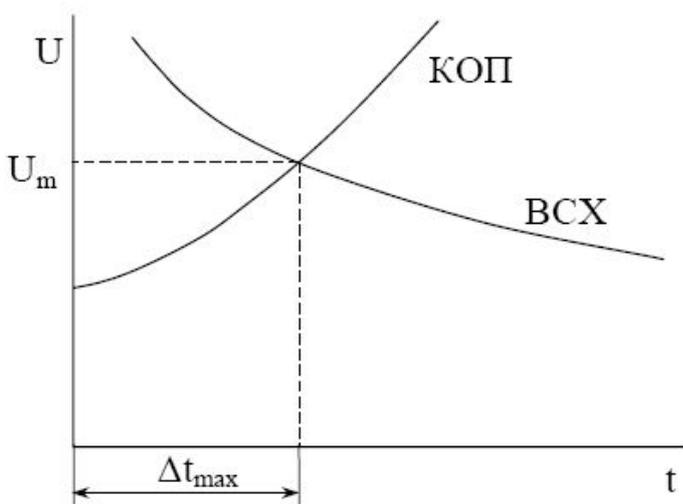


Рис. К12. Кривая опасных параметров подстанции и вольт-секундная характеристика линейной изоляции

$$l_{з.п.} = \frac{v \cdot \Delta t_{\max}}{1,15 \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{4U_m}{h_{np}} - 1} \right)}, \quad (K49)$$

где $l_{з.п.}$ – длина защитного подхода, м;

U_m – амплитуда волны напряжения, МВ;

Δt_{\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).

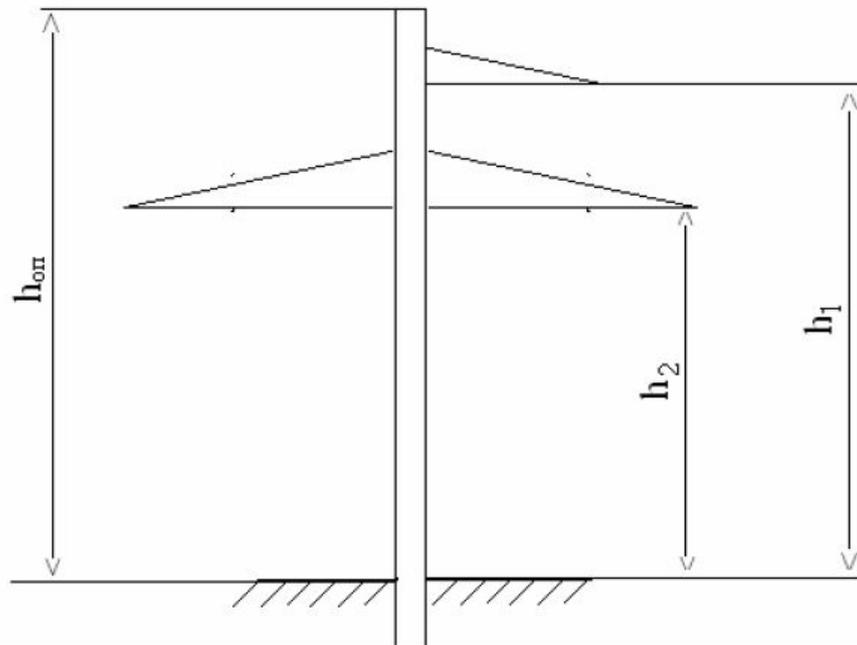


Рис. К13. Эскиз опоры

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 набега на нее опасных импульсов грозовых перенапряжений определяется:

$$\beta = \beta' + \beta'' + \beta''' , \quad (K53)$$

где β' - среднее годовое число перекрытий изоляции вследствие прорыва молнии через тросовую защиту;

β'' - среднее годовое число перекрытий изоляции вследствие обратных перекрытий при ударах молнии в опору;

β''' – 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_{Π} - число ударов молнии в трос в пределах защитного подхода;

P_{α} - 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;

α - защитный угол троса.

Число ударов молнии в защитный подход равно:

$$N_{\alpha} = 0,067 \cdot l_{\text{зп}} \cdot 6 \cdot h_{\text{ср}} \cdot D_{\Gamma} \cdot 10^{-3} , \quad (K56)$$

где $h_{\text{ср}}$ – средняя высота подвеса троса, м;

$l_{\text{зп}}$ – длина защитного подхода, км;

D_{Γ} – число грозовых часов в году для данной местности.

Определим среднее годовое число перекрытий изоляции вследствие обратных перекрытий при ударах молнии в опору:

$$\beta'' = N_{\text{оп}} \cdot P_{\text{оп}}, \quad (\text{K57})$$

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;

δ – 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 β 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_{α} - 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 α - 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 $n_{\text{откл}2}$ линии при ударе молнии в опору:

$$n_{\text{откл}2} = N_{\text{оп}} \cdot P_{\text{оп}} \cdot \eta_{\text{оп}} , \quad (\text{K73})$$

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 $n_{\text{отклз}}$ линии при ударе молнии в трос в середине пролета:

$$n_{\text{отклз}} = N_{\text{тр}} \cdot P_{\text{тр}} \cdot \eta_{\text{тр}}, \quad (\text{K76})$$

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:

$$I_{\text{мкр}} = a_{\text{мкр}} \cdot t_{\text{р}}. \quad (\text{K82})$$

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 срезы напряжения представляют серьезную опасность для внутренней изоляции трансформаторов.

Произведя необходимые расчеты, получили, что среднее годовое число перекрытий изоляции $\beta=0,0135$. При таком значении β 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 - $U_{OCT.COM.}$, кВ макс.

Остающееся напряжение при нормируемом токе грозových перенапряжений - напряжение на ограничителе при протекании нормируемого тока грозových 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· $U_{нр}$.

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 противозрывного устройства ограничителя - это значение тока однофазного или трехфазного (большого из них) короткого замыкания ($I_{кз}$, кА), при котором не происходит взрывного разрушения крышки 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 противозрывного 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 грозовых 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.

Таблица Л1. Классы энергоемкости ОПН

Удельная энергоемкость кДж/кВ·U _{нропн}	1,5	2,75	4,8	6,35	7,67
Амплитуда прямоугольного импульса тока длительностью 2000 мкс, А	300	550	850	1200	1500
Класс пропускной способности (класс разряда линии)	1	2	3	4	5

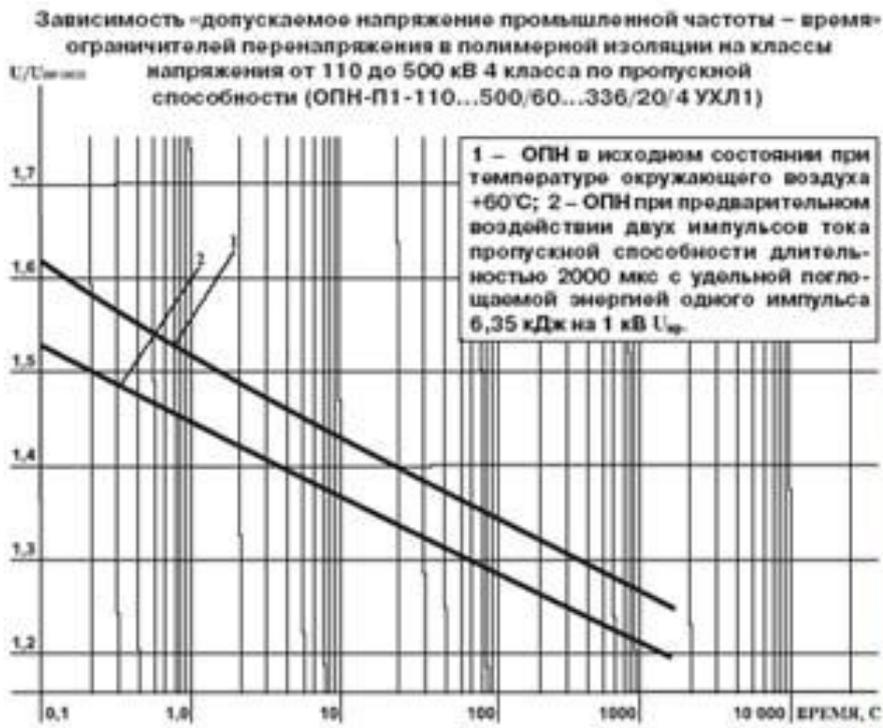


Рис. Л2. Зависимость «допускаемое напряжение промышленной частоты – время» ограничителей перенапряжения в полимерной изоляции на классы напряжения от 110 до 500 кВ 4 класса по пропускной способности

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 нейтралью трансформаторов ограничитель должен иметь энергоемкость не ниже (5,0-5,6) кДж/кВ· $U_{нрОПН}$.

При установке ограничителя на шунтовых конденсаторных батареях или кабельных присоединениях энергия, поглощаемая ОПН, может быть рассчитана по формуле:

$$W = \frac{1}{C} \left[(3 \cdot U_{нр})^2 - (\sqrt{2} \cdot 1,25 \cdot U_{нр. ОПН})^2 \right], \quad (Л2)$$

где: C - емкость батареи или кабеля, Ф;

$U_{нр}$ - амплитуда наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения «фаза - земля», кВ;

$U_{нрОПН}$ - 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

$$W_{\text{ОПН}} \geq W_{\Sigma}. \quad (Л5)$$

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.

$$K_{\text{доп.к}} = \frac{K_{\text{и}} \times K_{\text{к}} \times U_{1\text{мин.}}}{U_{\text{раб.наиб.ф}}}, \quad (\text{Л8})$$

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 _д)
мощностью свыше 1000 кВт	$2 \cdot U_{\text{НОМ.}} + 3$, где ($U_{\text{НОМ.}}$ - 10,0; 10,5 кВ _д)

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:

$$U_{\text{к}} = K_{\text{и}} \times K_{\text{к}} \times \sqrt{2} \times U_{1\text{мин.}},$$

$$U_{\text{к}} = 1,35 \times 0,9 \times 1,41 \times U_{1\text{мин.}} = 1,71 \times U_{1\text{мин.}}. \quad (\text{Л11})$$

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 _д	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 1с 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 зажиганияй, 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 подвешеного 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 от 3 до 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 устанавливают.

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 Лб. Эффективность различных способов заземления нейтралей сетей 6-36 кВ

Требования	ОПН-ЛИ	ОПН-Л
Область применения. 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.

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 грозových 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 грозových 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 Минэнэрга РФ от 13.01.2003 №6. - 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. Г.С. 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.
17. www.zaokurs.ru.
18. www.szp.spb.ru
19. www.elma-electro.ru
20. www.ielektro.ru
21. www.tavrida.ru
22. equipment.bigli.ru
23. www.elektroinfo.ru
24. www.fenix88.nsk.su
25. www.fenix88.nsk.su

Содержание

Введение	3
Глава 6. Молниезащита.....	4
§6.1. Грозовая деятельность и электрические характеристики 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, набегающих с линии.....	45
6.4.4. Защита подстанции номинальным напряжением 35 кВ и выше.....	49
6.4.5. Защита РУ номинальным напряжением 3-20 кВ.....	54
6.4.6. Защита вращающихся машин высокого напряжения.....	56
6.4.7. Координация импульсной прочности изоляции подстанционного оборудования с защитными характеристиками ОПН.....	64
6.4.8. Определение максимальной длины защитного подхода (опасной зоны).....	68
6.4.9. Показатели надежности молниезащиты РУ станций и подстанций от набегающих волн.....	69

§6.5. Конструкция молниеприемников	72
Приложение А (информационное) Зоны защиты молниеотводов	77
Приложение Б (информационное) Пример расчета молниезащиты ГПП 35/10 кВ	86
Приложение В (информационное) Характеристики интенсивности грозовой деятельности и грозопоражаемости зданий и сооружений	94
Приложение Г (информационное) Основные характеристики ОПН, выпускаемых НПО "ЭЛЕКТРОКЕРАМИКА", "АВВ-УЭТМ", "ФЕНИКС-88", "ТАВРИДА-ЭЛЕКТРИК"	97
Приложение Д (информационное) Деформация грозовых импульсов при распространении по проводам на подходах к РУ	129
Приложение Ж (информационное) Оценка показателей надежности грозозащиты ПС с использованием метода статистических испытаний Монте-Карло.....	132
Приложение И (информационное) Статистический метод анализа грозозащиты ПС совместно с ВЛ.....	140
Приложение К (информационное) Расчет напряжения на изоляции силового трансформатора при заданной волне перенапряжения.....	160
Приложение Л (информационное) Рекомендации по выбору и применению ОПН для оптимальной защиты электрооборудования.....	188
Библиографический список.....	212