

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Амурский государственный университет»



«Кадры для регионов»



ФГБОУ ВПО «Амурский государственный
университет»

Учебное пособие подготовлено в рамках реализации проекта о подготовке высококвалифицированных кадров для предприятий и организаций регионов («Кадры для регионов»)

Н.В. Савина

ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ. ГРОЗОВЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ И ЗАЩИТА ОТ НИХ

Учебное пособие

Благовещенск
Издательство АмГУ

2015

УДК 621.311.1.015.38
ББК 31.24я73
С13

*Печатается по решению
редакционно-издательского совета
Амурского государственного
университета*

Разработано в рамках реализации гранта «Подготовка высококвалифицированных кадров в сфере электроэнергетики и горно-металлургической отрасли для предприятий Амурской области» по заказу предприятия-партнера ОАО «Дальневосточная распределительная сетевая компания»

Рецензенты:

Блейхман Александр Сергеевич, заместитель генерального директора по правовому и корпоративному обеспечению АО «Дальневосточная распределительная сетевая компания», канд. техн. наук, доцент.

Теличенко Денис Алексеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры АППиЭ ФГБОУ ВПО «Амурский государственный университет».

С 13 Савина Н.В. Техника высоких напряжений. Перенапряжения и защита от них: учебное пособие / Н.В. Савина. - Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2015. – 191 с.

В пособии приведена характеристика грозовых перенапряжений, показано как определяется грозоупорность воздушных линий, дана характеристика защитных аппаратов, изложена молниезащита воздушных линий, электрических станций и подстанций. Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профилям «Электрические станции», «Электроэнергетические системы и сети», «Электроснабжение», «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем».

В авторской редакции.

©Амурский государственный университет, 2015
©САВИНА Н.В., 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ	8
1.1. Закономерности распространения электромагнитных волн перенапряжений.....	8
1.2. Практические задачи молниезащиты	10 Ошибка!
Закладка не определена.	
1.3. Прохождение ЭМВ вдоль провода, расположенного вблизи другого изолированного провода.....	Ошибка! Закладка не определена. 17
1.4. Прохождение ЭМВ по двум соединенным между собой одинаковым и подвешенным на одной высоте проводам вблизи третьего изолированного провода.....	19
1.5. Распространение ЭМВ с одинаковым напряжением по нескольким проводам одновременно	20
1.6. Влияние импульсной короны на волновой процесс.....	20
2. ГРОЗОВЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ	23
2.1. Развитие молнии.....	23
2.2. Количественные характеристики разряда молнии.....	30
2.3. Характеристика грозовой деятельности.....	34
3. ГРОЗОУПОРНОСТЬ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ.....	36
3.1. Грозопоражаемость воздушных линий.....	36
3.2. Определение грозоупорности воздушных линий.....	38
3.3. Грозовые отключения ВЛ напряжением 6 – 35 кВ.....	57
3.4. Грозоупорность ВЛ с композитными опорами.....	62
4. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ, ВЛ ОТ ПРЯМЫХ УДАРОВ МОЛНИИ.....	66
4.1. Задачи и критерии молниезащиты. Основные определения.....	66
4.2. Принцип действия молниеотводов.....	68
4.3. Определение зон защиты молниеотводов.....	72
4.4. Конструктивное исполнение молниеотводов.....	81

4.5. Заземление молниезащиты.....	89
4.6. Условия безопасного прохождения тока молнии по молниеотводу.....	103
5. ЗАЩИТНЫЕ АППАРАТЫ И УСТРОЙСТВА.....	105
5.1. Искровые промежутки и роговые разрядники.....	106
5.2. Трубочатые разрядники.....	108
5.3. Вентильные разрядники.....	112
5.4. Нелинейные ограничители перенапряжений.....	128
5.5. Длинно-искровые разрядники.....	154
6. МОЛНИЕЗАЩИТА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ.....	161
6.1. Средства молниезащиты ВЛ.....	162
6.2. Критерии выбора средств молниезащиты ВЛ 110 кВ и выше.....	167
6.3. Мероприятия по повышению грозоупорности ВЛ 6 – 35 кВ.....	169
7. ЗАЩИТА ПОДСТАНЦИЙ И СТАНЦИЙ ОТ НАБЕГАЮЩИХ ВОЛН ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ С ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ.....	172
7.1. Защищенный подход линии.....	174
7.2. Средства защиты РУ от набегающих грозовых волн.....	176
7.3. Надежность молниезащиты электрических станций подстанций.....	184
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	188

ВВЕДЕНИЕ

Изоляция воздушных линий и электроустановок постоянно находится под воздействием рабочего напряжения. В процессе эксплуатации на изоляции электроустановок кратковременно возникают значительные повышения напряжения сверх рабочего, которые принято называть перенапряжениями. Их источником является разряд молнии в электроустановку или в землю возле нее, а также э.д.с. генераторов электроэнергетической системы, а причиной – нормальные или аварийные коммутации, сопровождающиеся колебательными процессами или резонансными явлениями в системе.

Перенапряжение – кратковременное значительное повышение напряжения в электроустановках, возникающее в процессе эксплуатации или всякое превышение мгновенным значением напряжения на изоляции амплитуды наибольшего рабочего напряжения. Перенапряжения связаны с появлением в электроустановках потенциалов и разностей потенциалов, значительно превышающих их номинальные значения. Перенапряжения представляют большую опасность и являются основной причиной повреждений и аварий в электроустановках. Перенапряжения характеризуются кратностью перенапряжений.

Кратность перенапряжений – отношение максимального значения напряжения, U_{max} , к амплитуде наибольшего рабочего напряжения, $U_{нр}$, для данного класса напряжения:

$$K_n = \frac{U_{max}}{\sqrt{2} U_{нр}}.$$

Различают две группы перенапряжений:

- **Внешние**, грозовые или атмосферные **перенапряжения** – перенапряжения, связанные с разрядами молний в токоведущие части электроустановки или в землю поблизости от нее;
- **Внутренние перенапряжения** – перенапряжения, возникающие в результате нормальных или аварийных коммутаций в электроэнергетиче-

ской системе, в том числе и при повторных зажиганиях электрической дуги, вследствие резонансных процессов.

Они развиваются за счет энергии подключенных к сети генераторов или реактивных элементов (L , C).

Изоляция электроустановок делится на внешнюю и внутреннюю. К внешней изоляции относятся изоляционные промежутки в атмосферном воздухе: воздушные промежутки, внешние поверхности твердой изоляции. К внутренней изоляции относятся те участки электроизоляционной конструкции электроустановки, в пределах которых изоляционные промежутки между проводниками заполнены диэлектрическими материалами или их комбинациями, но не атмосферным воздухом. Особенностью внутренней изоляции является ее старение, т.е. ухудшение электрических характеристик в процессе ее эксплуатации. Пробой внутренней изоляции приводит к выходу из строя электроустановки, т.е. явление необратимое, в то время как пробой внешней изоляции – явление обратимое, так как после снятия напряжения или гашения дуги внешняя изоляция самовосстанавливается.

Разные свойства внутренней и внешней изоляции приводят к различным физическим воздействиям на изоляцию перенапряжений. При поражении молнией внешней изоляции возникают весьма высокие напряжения, которые приводят к ее пробую, называемому перекрытием изоляции. При перекрытии внешней изоляции на проводниках возникают блуждающие волны, которые распространяются в обе стороны от места удара молнии и воздействуют на внутреннюю изоляцию оборудования подстанций или электрических станций. Повреждение внутренней изоляции оборудования является гораздо более серьезной аварией, чем повреждение внешней изоляции. Следовательно, необходимо защищать электроустановки от прямых ударов молнии и от набегающих волн перенапряжений.

Для защиты от прямых ударов молнии используют молниеотводы, расположенные вблизи защищаемого объекта, а для защиты от набегающих волн перенапряжений – защитные аппараты, такие как длинноискровые разрядники,

нелинейные ограничители перенапряжений. Для устранения дугового разряда, возникающего после перекрытия изоляции воздушной линии, в сетях с глухозаземленной нейтралью производят ее автоматическое отключение с последующим АПВ. В сетях с изолированной нейтралью используют компенсацию емкостного тока замыкания на землю, приводящую к эффективному гашению дуги.

Из отмеченного следует, что поведение изоляции должно рассматриваться не только при длительном воздействии рабочего напряжения, но и при кратковременных воздействиях высокого напряжения, т.е. при перенапряжениях. В связи с этим учебное пособие посвящено изучению физических процессов, протекающих при перенапряжениях, анализу перенапряжений, а также изучению методов и средств их ограничения и защиты от них и их последствий. Учебное пособие направлено на формирование у студентов профессиональных компетенций, позволяющих рассчитывать и анализировать грозовые и внутренние перенапряжения, применять методы и средства их ограничения и защиты от них.

Материалы, изложенные в учебном пособии, представляют собой результат многолетнего чтения автором дисциплин «Изоляция и перенапряжения», «Техника высоких напряжений» студентам электроэнергетических специальностей.

1. ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

1.1. Закономерности распространения электромагнитных волн перенапряжений

При ударе молнии в линию электропередачи (ЛЭП) на проводах создается высокое напряжение относительно земли, под действием которого в обе стороны от места удара вдоль линии распространяются электромагнитные волны. Так как при этом прямой ток каждой волны проходит по проводам, а обратный – по земле, распространение волн по линии при ударе молнии определяется параметрами нулевой последовательности. Дойдя до подстанции, набегающие волны с линии создают напряжение на изоляции оборудования, для определения которого необходимо уметь рассчитывать деформацию волны при ее пробеге вдоль линии, и ее преломление на ошиновке и оборудовании подстанции. Модели электроустановок подстанций, описывающие процессы, происходящие в их изоляции при воздействии набегающих волн перенапряжений, весьма сложны. Однако для понимания физики процесса и приближенной оценки его характеристик можно использовать простейшие схемы, состоящие из активных сопротивлений, емкостей и индуктивностей. В качестве расчетного импульса можно применять прямоугольный импульс или импульс с косоугольным фронтом в зависимости от характера решаемой задачи.

При движении электромагнитной волны вдоль проводов воздушной линии без потерь скорость распространения волны равна скорости света:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu\varepsilon}}, \quad (1.1)$$

где c – скорость световых волн, м/с;

μ , ε - относительная магнитная и диэлектрическая проницаемость среды, окружающей провода. Для воздуха они равны единице.

Напряжение, U , и ток, I , электромагнитной волны (ЭМВ) связаны между собой волновым сопротивлением, Z , которое определяется геометрическими параметрами линии:

$$\frac{U}{I} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = Z; \quad (1.2)$$

$$Z = 60 \ln \frac{2h_{cp}}{r},$$

где L_0, C_0 – индуктивности и емкость единицы длины волны;

h_{cp} – средняя высота подвеса провода над землей, м;

r – радиус провода, м.

Среднее значение волнового сопротивления одиночного провода воздушной линии (ВЛ) варьируется в пределах от 350 до 450 Ом в зависимости от конструкции.

Переход ЭМВ с участка линии с Z_1 на участок Z_2 характеризуется перераспределением электрического и магнитного полей волны, т.к. в узловой точке происходит преломление волны. Одновременно от узловой точки по первому участку распространяется отраженная волна. Между параметрами падающей, отраженной и преломленной волн существуют следующие соотношения:

$$U_{nad} + U_{omp} = U_{np}, \quad I_{nad} + I_{omp} = I_{np}. \quad (1.3)$$

Кроме того, можно записать:

$$U_{nad} = I_{nad} Z_1, \quad U_{np} = I_{np} Z_2, \quad U_{omp} = -I_{omp} Z_1. \quad (1.4)$$

Решая совместно все эти уравнения, можно получить соотношения между напряжениями падающей, преломленной и отраженной волн:

$$U_{np} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} U_{nad}; \quad U_{omp} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} U_{nad}, \quad (1.5)$$

$$\alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}; \quad \beta = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}. \quad (1.6)$$

Здесь α, β – соответственно коэффициент преломления и коэффициент отражения.

Для разомкнутого конца провода $\alpha=2, \beta=1$, так как $Z_2=\infty$. При набегании электромагнитной волны на разомкнутый конец линии происходит удвоение напряжения в узловой точке. Для короткозамкнутого конца ВЛ $\alpha=0, \beta=-1$, так как $Z_2=0$. В узловой точке напряжение будет равно 0.

Если падающая волна по линии с волновым сопротивлением Z_1 набегаёт на узловую точку, к которой подключены ёмкости, индуктивности, активные сопротивления, то в данном случае понятие преломленной волны относится к напряжению узловой точки, а понятие преломленного тока – к суммарному току, протекающему во всех элементах, подключённых к узловой точке. Исходя из сказанного, можно записать:

$$I_{np} = I_{над} + I_{отр} = \frac{U_{над}}{Z_1} - \frac{U_{отр}}{Z_1} \quad (1.7)$$

Отсюда

$$U_{отр} = U_{над} - I_{np} Z_1 \quad (1.8)$$

Тогда

$$U_{np} = U_{над} + U_{отр} = 2U_{над} - I_{np} Z_1 \quad (1.9)$$

Данному выражению соответствует эквивалентная схема, состоящая из генератора, э.д.с. которого равна $2U_{над}$, а внутреннее сопротивление равно волновому сопротивлению линии Z_1 , по которой набегаёт электромагнитная волна. К зажимам генератора подключается набор активных сопротивлений, ёмкостей и индуктивностей. Такой простейшей эквивалентной схемой можно описать различные важные для эксплуатации случаи.

Рассмотрим несколько примеров, представляющих практический интерес для задач молниезащиты.

1.2. Практические задачи молниезащиты

Задача 1. Набегание ЭМВ на шины подстанции

Пусть электромагнитная волна перенапряжений $U_{над}$ по линии с волновым сопротивлением Z набегаёт на шины подстанции (ПС), к которым подключено n других линий также с волновым сопротивлением Z (см. рис. 1.1).

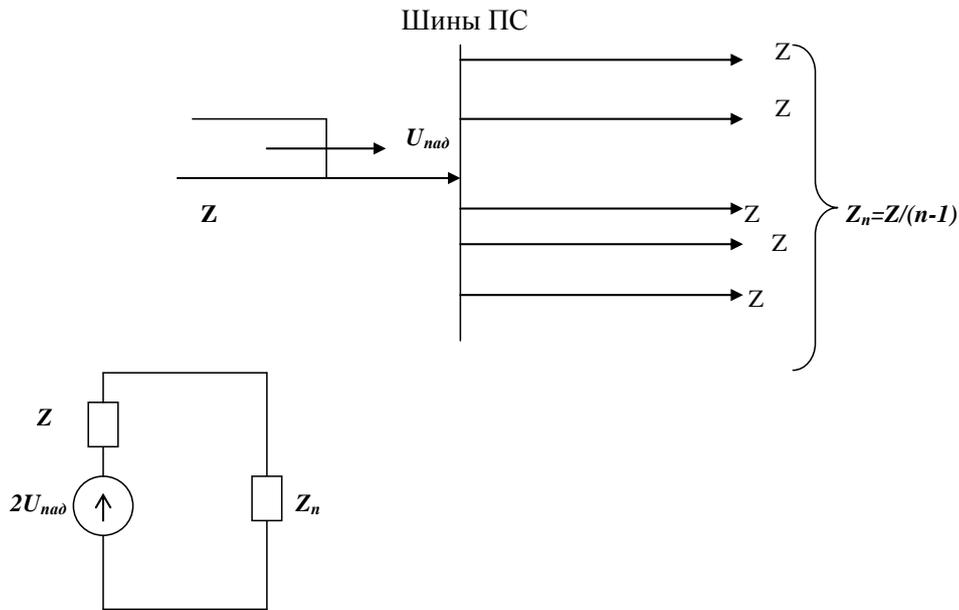


Рис. 1.1. Расчетная схема и схема замещения для практической задачи 1.

Пользуясь описанной выше эквивалентной схемой, показанной на рис. 1.1, можно определить общий ток в цепи

$$I_{np} = \frac{2U_{nad}}{Z + \frac{Z}{n-1}} \quad (1.10)$$

и напряжение в узловой точке (U_{np}), т.е. на шинах ПС, а также напряжение отраженной волны:

$$U_{np} = \frac{2U_{nad}}{n}; \quad U_{отр} = \frac{U_{nad}(2-n)}{n} \quad (1.11)$$

Анализ полученных выражений показывает: при $n=2$ преломления волны на шинах подстанции не происходит; при $n=1$ на шинах ПС происходит удвоение напряжения падающей волны; при $n \geq 3$ напряжение преломленной волны всегда меньше напряжения падающей волны. Отсюда наиболее тяжелая ситуация наблюдается при набегании по ВЛ волны грозových перенапряжений на шины тупиковой подстанции, питаемой одной линией ($n=1$), когда напряжение на шинах ПС, а, следовательно, и на всем оборудовании удваивается.

Задача 2. Прохождение ЭМВ через индуктивность

Пусть электромагнитная волна перенапряжений U_{nad} с прямоугольным фронтом и бесконечной длиной по линии с волновым сопротивлением Z_l набегает на шины подстанции. Линия присоединена к шинам ПС через индук-

тивность L . К шинам ПС также присоединено еще несколько воздушных линий с эквивалентным сопротивлением Z_2 (см. рис.1.2).

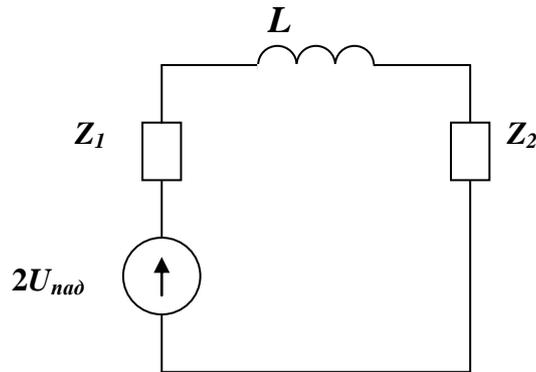


Рис. 1.2. Схема замещения для практической задачи 2

Пользуясь эквивалентной схемой, приведенной на рис. 2, запишем для нее первый закон Кирхгофа:

$$2U_{nad} = i_{np}Z_1 + i_{np}Z_2 + L \frac{di_{np}}{dt}. \quad (1.12)$$

Решая полученное дифференциальное уравнение, определим ток преломленной волны, а по нему – напряжение преломленной волны, т.е. напряжение на шинах ПС:

$$U_{np} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} U_{nad} (1 - e^{-t/T_L}). \quad (1.13)$$

Как видно из полученного выражения, напряжение на шинах ПС меняется по экспоненциальному закону. В первый момент времени за индуктивностью напряжение волны равно 0, а затем достигает максимума при $t \rightarrow \infty$:

$$U_{np \max} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} U_{nad}. \quad (1.14)$$

Отсюда следует, что индуктивность приводит к сглаживанию фронта волны и не влияет на ее амплитуду при бесконечной длине падающей волны.

Напряжение отраженной волны равно

$$U_{omp} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} U_{nad} + \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} U_{nad} e^{-t/T_L}. \quad (1.15)$$

Здесь T_L - постоянная времени схемы замещения, равная

$$T_L = \frac{L}{Z_1 + Z_2}. \quad (1.16)$$

Анализ приведенного выражения показывает, что перед индуктивностью происходит удвоение падающей волны в первый момент времени ($t=0$), т.к.

$$U_{omp} = U_{nad}$$

Задача 3. Прохождение ЭМВ мимо емкости

Пусть электромагнитная волна перенапряжения U_{nad} бесконечной длины по линии с волновым сопротивлением Z_1 набегаем на шины подстанции, к которым подключена сосредоточенная емкость. К шинам ПС также присоединено еще несколько воздушных линий с эквивалентным сопротивлением Z_2 (см. рис.1.3).

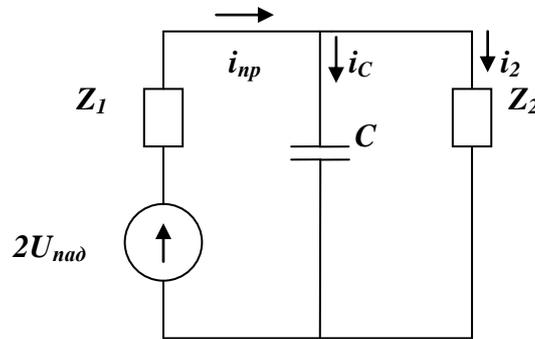


Рис. 1.3. Схема замещения для практической задачи 3

По схеме замещения (рис. 3), пользуясь законами Кирхгофа, запишем систему уравнений:

$$\begin{cases} 2U_{nad} = i_{np}Z_1 + i_2Z_2 \\ \frac{1}{C} \int i_c dt = i_2Z_2 \\ i_{np} = i_c + i_2 \end{cases} \quad (1.17)$$

Решая ее, можно определить выражения, определяющие напряжение на шинах ПС (U_{np}), и напряжение отраженной волны на питающей ВЛ (U_{omp}):

$$\begin{aligned} U_{np} &= \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} U_{nad} (1 - e^{-t/T_C}) \\ U_{omp} &= \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} U_{nad} - \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} U_{nad} e^{-t/T_C} \end{aligned} \quad (1.18)$$

Здесь T_C - постоянная времени схемы замещения, равная

$$T_c = \frac{cZ_1Z_2}{Z_1 + Z_2}. \quad (1.19)$$

Анализ приведенных выражений показывает, что в первый момент времени, $t=0$, напряжение на шинах ПС равно нулю, $U_{np}=0$, напряжение отраженной волны равно напряжению падающей волны с обратным знаком, $U_{omp} = -U_{nad}$. В установившемся режиме, при $t=\infty$

$$U_{np} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} U_{nad}; \quad U_{omp} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} U_{nad}. \quad (1.20)$$

Из трех рассмотренных случаев это самый благоприятный режим. Емкости используются в схемах молниезащиты для сглаживания фронта набегающих волн и защиты межвитковой изоляции силовых трансформаторов и электрических машин. Чем меньше крутизна фронта волны, тем ниже будут разности потенциалов между витками при прохождении вдоль обмотки фронта волны.

Можно определить величину емкости, необходимую для снижения крутизны фронта волны до заданной величины. Из выражения для напряжения на шинах подстанции, т.е. напряжения преломленной волны, скорость изменения напряжения на фронте волны равна:

$$\frac{dU_{np}}{dt} = \frac{2U_{nad}}{CZ_1} e^{-t/T_c}. \quad (1.21)$$

Наибольшее значение крутизны фронта волны имеет при $t=0$

$$\left(\frac{dU_{np}}{dt}\right)_{max} = \frac{2U_{nad}}{CZ_1}, \quad (1.22)$$

откуда

$$C = \frac{2U_{nad}}{Z_1 \left(\frac{dU_{np}}{dt}\right)_{max}}. \quad (1.23)$$

Пример. Электромагнитная волна напряжением 20 кВ набегаёт по линии с волновым сопротивлением 400 Ом на шины подстанции, для оборудования которой допустимая крутизна фронта волны составляет 1 кВ/мкс. Определить ве-

личину емкости, обеспечивающую сглаживание фронта набегающей волны до допустимого значения.

Подставляя числовые значения, указанные в примере, определим требуемую величину емкости

$$C = \frac{2U_{nad}}{Z_1 \left(\frac{dU_{np}}{dt} \right)_{max}} = \frac{2 \cdot 20}{400 \cdot 1} = 0,1 \text{ мкф.}$$

Прохождение мимо емкости ЭМВ конечной длины

Мы рассмотрели случай набега на шины ПС волны перенапряжения бесконечной длины, однако для практики также интересен случай набега волны конечной длины. Представим конечную электромагнитную волну в виде двух волн: положительной и отрицательной, сдвинутых по времени на величину τ , равную

$$\tau = \frac{l_0}{v}, \quad (1.24)$$

где l_0 – длина волны;

v – скорость распространения волны.

До момента времени $t < \tau$ в узловой точке действует положительная волна, а при $t \geq \tau$ также и отрицательная волна, т.е. преломленная волна представляет собой сумму двух составляющих:

$$U_{np} = U_{np}' + U_{np}'', \quad (1.25)$$

где

$$\begin{aligned} U_{np}' &= \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} U_{nad} (1 - e^{-t/T_c}) \quad \text{для } t < \tau, \\ U_{np}'' &= -\frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} U_{nad} (1 - e^{-((t-\tau)/T_c)}) \quad \text{для } t \geq \tau. \end{aligned} \quad (1.26)$$

Максимум напряжения в узловой точке (шины ПС) наступает при $t = \tau$

$$U_{np \max} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} U_{nad} (1 - e^{-\tau/T_c}), \quad \text{где } T_c = \frac{CZ_1Z_2}{Z_1 + Z_2}. \quad (1.27)$$

Отсюда видно, что в данном случае амплитуда преломленной волны зависит от величины емкости. Чем больше значение емкости, тем ниже максималь-

ное значение напряжения на шинах ПС, т.е. преломленной волны, и чем короче набегающая волна, тем меньше напряжение преломленной волны в узловой точке.

Определим величину емкости, необходимой для заданного снижения амплитуды набегающей волны. Введем обозначения:

$$\frac{U_{np\ max}}{U_{над}} = m; \quad \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = \alpha \quad (1.28)$$

Тогда выражение для максимального значения напряжения на шинах ПС можно записать так:

$$m = \alpha - \alpha e^{-\tau/T_c}, \quad (1.29)$$

откуда

$$T_c = \frac{\tau}{\ln \frac{\alpha}{\alpha - m}}. \quad (1.30)$$

Пользуясь выражением для постоянной времени схемы замещения, определим емкость

$$C = \frac{2\tau}{\alpha Z_1 \ln \frac{\alpha}{\alpha - m}}. \quad (1.31)$$

Пример. На шины тупиковой ПС ($\alpha=2$) по воздушной линии с волновым сопротивлением 400 Ом набегающая электромагнитная волна длиной 40 мкс. Определить емкость, обеспечивающую снижение амплитуды набегающей волны вдвое.

Подставляя числовые значения примера в последнее выражение, определим требуемое значение емкости

$$C = \frac{2\tau}{\alpha Z_1 \ln \frac{\alpha}{\alpha - m}} = \frac{2 \cdot 40}{2 \cdot 400 \ln \frac{2}{2 - 0,5}} = 0,3 \text{ мкф.}$$

Максимальная крутизна фронта волны определяется также как для волны бесконечной длины.

1.3. Прохождение ЭМВ вдоль провода, расположенного вблизи другого изолированного провода

Обычно электромагнитные волны, возникающие при грозовых поражениях ВЛ, распространяются не по одиночному проводу, а в системе проводов и грозозащитных тросов, которые оказывают взаимное влияние в рассматриваемом волновом процессе. Анализ волновых процессов в многопроводной системе осуществляется с помощью системы уравнений Максвелла:

$$\begin{cases} u_1 = Z_{11}i_1 + Z_{12}i_2 + \dots + Z_{1n}i_n \\ u_2 = Z_{21}i_1 + Z_{22}i_2 + \dots + Z_{2n}i_n \\ u_n = Z_{n1}i_1 + Z_{n2}i_2 + \dots + Z_{nn}i_n \end{cases} \quad (1.32)$$

где Z_{nn} – собственные волновые сопротивления проводов, они связывают величины тока и напряжения волны на n -ом проводе;

Z_{ij} – взаимные волновые сопротивления проводов, они связывают величину напряжения волны на i -том проводе с величиной тока в j -том проводе.

Для воздушных линий они равны

$$Z_{nn} = 60 \ln \frac{2h_{n\text{cp}}}{r_n}; \quad Z_{ij} = 60 \ln \frac{d'_{ij}}{d_{ij}}, \quad (1.33)$$

где $h_{n\text{cp}}$ – средняя высота подвеса n -го провода;

r_n – радиус n -го провода;

d_{ij} – расстояние между двумя проводами i и j ;

d'_{ij} – расстояние между i -тым проводом и зеркальным отражением j -того провода (см. рис. 1.4).

Для случая прохождения ЭМВ вдоль провода, расположенного вблизи другого изолированного провода система уравнений Максвелла примет вид:

$$\begin{cases} u_1 = Z_{11}i_1 + Z_{12}i_2 \\ u_2 = Z_{21}i_1 + Z_{22}i_2 \end{cases} \quad (1.34)$$

т.к. второй провод изолирован, то ток в нем равен 0, т.е. $i_2=0$, тогда

$$u_1 = Z_{11}i_1 \quad u_2 = Z_{21}i_1, \quad (1.35)$$

откуда

$$u_2 = \frac{Z_{21}}{Z_{11}} u_1 = K_{\Gamma} u_1;$$

$$K_{\Gamma} = \frac{Z_{21}}{Z_{11}} = \frac{\ln \frac{d'_{21}}{d_{21}}}{\ln \frac{2h_1}{r_1}} \quad (1.36)$$

Полученное выражение показывает, что на проводе, находящемся в поле ЭМВ, движущейся по другому проводу, наводится напряжение, составляющее часть напряжения основной волны. Эту часть определяют с помощью геометрического коэффициента связи K_{Γ} , равного отношению индуктированного (наведенного) напряжения, u_2 к индуктирующему (наводящему) напряжению u_1 . Его значение определяют по геометрическим параметрам линии (см. рис. 1.4, а).

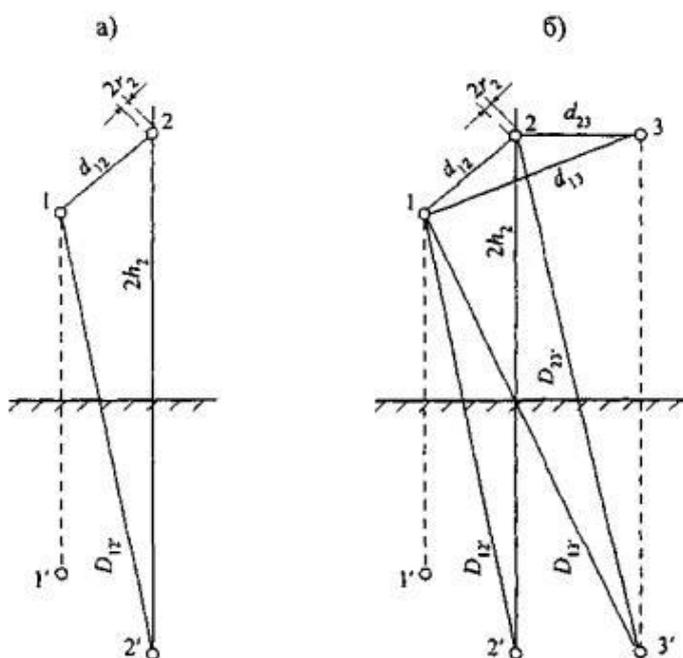


Рис. 1.4. К расчету волновых сопротивлений и коэффициентов связи проводов и тросов

а) ВЛ с одним тросом; б) ВЛ с двумя тросами одинакового радиуса и расположенных на одной высоте

Рассмотренный случай позволяет определять геометрический коэффициент связи между проводом и грозозащитным тросом, а также индуктированное напряжение на проводе при ударе молнии в грозозащитный трос.

1.4. Прохождение ЭМВ по двум соединенным между собой одинаковым и подвешенным на одной высоте проводам вблизи третьего изолированного провода

Для рассматриваемого случая система уравнений Максвелла примет вид:

$$\begin{cases} u_1 = Z_{11}i_1 + Z_{12}i_2 + Z_{13}i_3 \\ u_2 = Z_{21}i_1 + Z_{22}i_2 + Z_{23}i_3 \\ u_3 = Z_{31}i_1 + Z_{32}i_2 + Z_{33}i_3 \end{cases} \quad (1.37)$$

Так как первый провод изолирован, то $i_1 = 0$, кроме того $u_2 = u_3 = u$; $i_2 = i_3 = i$. Тогда систему уравнений можно переписать в виде:

$$\begin{cases} u_1 = Z_{12}i + Z_{13}i \\ u = Z_{22}i + Z_{23}i \\ u = Z_{32}i + Z_{33}i \end{cases} \quad (1.38)$$

Отсюда

$$u_1 = u \frac{Z_{12} + Z_{13}}{Z_{22} + Z_{23}} = u \frac{Z_{12} + Z_{13}}{Z_{32} + Z_{33}}. \quad (1.39)$$

Здесь коэффициенты возле напряжений являются геометрическими коэффициентами связи между изолированным первым проводом и соединенными между собой вторым и третьим проводами. Так как провода 2 и 3 одинаковы, то $Z_{22} = Z_{33}$ и

$$\frac{Z_{12} + Z_{13}}{Z_{22} + Z_{23}} = \frac{Z_{12} + Z_{13}}{Z_{32} + Z_{33}}. \quad (1.40)$$

Отсюда можно получить выражение для определения геометрического коэффициента связи

$$K_r = \frac{\ln \frac{d'_{12} d'_{13}}{d_{12} d_{13}}}{\ln \frac{2h_2 d'_{23}}{r_2 d_{23}}}. \quad (1.41)$$

Данное выражение используется для расчета геометрического коэффициента связи между двумя грозозащитными тросами и линейными проводами (см. рис. 1.4, б).

1.5. Распространение ЭМВ с одинаковым напряжением по нескольким проводам одновременно

При двух одинаковых, подвешенных на одной высоте проводах токи в них будут равны, тогда

$$\begin{cases} u = Z_{11}i + Z_{12}i \\ u = Z_{21}i + Z_{22}i \end{cases} \quad (1.42)$$

Отсюда

$$i = \frac{u}{Z_{11} + Z_{12}} = \frac{u}{Z_{21} + Z_{22}} = \frac{u}{Z'_{\text{экв}}}, \quad (1.43)$$

где эквивалентное волновое сопротивление одного провода в систем из двух проводов равно:

$$Z'_{\text{экв}} = Z_{11} + Z_{12} = Z_{22} + Z_{21}. \quad (1.44)$$

Отсюда эквивалентное сопротивление двух проводов равно

$$Z_{\text{экв}} = \frac{Z'_{\text{экв}}}{2} = \frac{Z_{11} + Z_{12}}{2}, \quad (1.45)$$

а для системы из трех проводов

$$Z_{\text{экв}} = \frac{Z'_{\text{экв}}}{3} = \frac{Z_{11} + Z_{12} + Z_{13}}{3}. \quad (1.46)$$

Полученные выражения используются при анализе молниезащиты воздушных линий и позволяют перейти от системы из нескольких проводов к одному эквивалентному проводу.

1.6. Влияние импульсной короны на волновой процесс

Существенное влияние на волновой процесс оказывает импульсная корона, возникающая на проводах при высоких напряжениях импульсной волны. Импульсная корона имеет стримерную структуру и состоит из множества радиально направленных светящихся нитей – стримеров. Каналы стримеров являются проводящими, благодаря чему часть зарядов стекает к головкам стриме-

ров. Вследствие сосредоточения значительного заряда в чехле импульсной короны емкость провода увеличивается. Ее увеличение приводит к снижению скорости распространения волны вдоль проводов и снижению волнового сопротивления провода. Для коронирующей линии применяют понятие динамической емкости. Пользуясь понятиями геометрической и динамической емкости линии, можно определить скорость движения электромагнитной волны вдоль коронирующей линии:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC_D}} = \frac{1}{\sqrt{LC_D \frac{C_r}{C_r}}} = \frac{c}{\sqrt{\frac{C_D}{C_r}}} = c\beta, \quad (1.47)$$

где β – коэффициент, характеризующий влияние импульсной короны на волновой процесс.

Приближенно его можно определить по одной из эмпирических формул:

$$\beta = 1,16 \sqrt{\frac{\ln \frac{1,5h_{cp} E_{cp}}{u}}{\ln \frac{2h_{cp}}{r_{np}}}}, \quad (1.48)$$

где h_{cp} – средняя высота подвеса провода;

E_{cp} – средняя напряженность поля на границе коронного чехла: для положительной полярности $E_{cp}^+ = 9 \text{ кВ/см}$, для отрицательной полярности $E_{cp}^- = 21 \text{ кВ/см}$;

u – амплитуда напряжения на коронирующем проводе;

r_{np} – радиус провода.

Импульсная корона оказывает влияние также на величину волнового сопротивления провода, приводя к его снижению:

$$Z_k = \sqrt{\frac{L}{C_D}} = Z_r \frac{1}{\sqrt{\frac{C_D}{C_r}}} = \beta Z_r \quad (1.49)$$

и на величину геометрического коэффициента связи, приводя к его увеличению

$$K = \frac{K_r}{\beta}. \quad (1.50)$$

Затухание импульсной волны вследствие потерь энергии на импульсную корону характеризуется зависимостью:

$$-\frac{du}{dt} = ku^2, \quad (1.51)$$

где u – амплитуда напряжения электромагнитной волны;

k – коэффициент затухания, для положительной волны равный $0,3 \cdot 10^{-3}$, для отрицательной волны он равен $0,2 \cdot 10^{-3}$.

Решая приведенное выше уравнение можно найти амплитуду напряжения волны, прошедшей путь l :

$$u = \frac{u_0}{1 + klu_0}, \quad (1.52)$$

где u_0 – напряжение волны в месте ее возникновения, например, в месте удара молнии в линию.

Пример. Определить напряжение отрицательной волны с амплитудой в точке удара равной 1600 кВ при пробеге пути длиной в 2 км.

Подставляя числовые значения примера в последнее выражение, определим напряжение волны после ее пробега пути в 2 км, например, защищенного подхода к подстанции

$$u = \frac{u_0}{1 + klu_0} = \frac{1600}{1 + 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1600 \cdot 2} = 975,6 \text{ кВ}$$

Как видно из примера, затухание и деформация электромагнитной волны вследствие импульсной короны являются благоприятным фактором, облегчающими условия работы электрооборудования.

2. ГРОЗОВЫЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

Причинами грозových перенапряжений являются разряды молнии в токоведущие части электрооборудования, удар молнии в заземленные элементы конструкции, а также близкие удары в землю, вызывающие индуктированные (наведенные) перенапряжения на токоведущих частях электроустановки. Наиболее часто поражаются молнией воздушные линии в виду своей значительной протяженности. Длительность единичных воздействий при грозových перенапряжениях лежит в микросекундном диапазоне. На изоляцию оборудования подстанций воздействуют волны грозových перенапряжений, приходящие с ВЛ при их поражениях молниями, и перенапряжения при прямых ударах молний в оборудование и конструкции подстанций. Для РУ 6-10 кВ опасными являются также перенапряжения, индуктированные на токоведущих частях при ударах молнии в землю или другие объекты вблизи подстанции.

Грозových перенапряжения представляют собой повышение потенциалов и их разностей в электроустановках, вызванные разрядами атмосферного электричества – молниями. Молния – это электрический разряд между облаком и землей или между облаками.

2.1. Развитие молнии

Разряд грозového облака может быть как в виде *линейной*, так и в виде *шаговой* молнии. Линейная молния подобна электрическому разряду в длинном промежутке со ступенчатым или непрерывным лидером. Этот вид разряда представляет наибольшую опасность для электрооборудования. Грозového облако характеризуется скоплением большого количества заряда в ограниченном объеме. Измерения напряженности поля у земной поверхности, а также при зондировании облаков показывают, что распределение заряда по высоте облака является неравномерным: в верхней части облака в большинстве случаев преобладают положительные, а в нижней части – отрицательные заряды. Рассмотрим, как происходит развитие молнии.

Замерзание капель воды и их электризация. Процесс разделения и накопления электрических зарядов в грозových облаках происходит в результате воз-

никновения в облаках мощных восходящих потоков и интенсивной конденсации в них водяных паров. Грозовое облако является носителем электрических зарядов, сосредоточенных на водяных каплях. Капли воды, достигая области отрицательных температур, замерзают, начиная с поверхности, которая покрывается корочкой льда. Выделяющееся при этом тепло поддерживает внутри капли температуру около нуля градусов. Имеющиеся в капле положительные ионы под действием разности температур перемещаются к поверхностному слою капли, заряжая его положительно, в то время как жидкой сердцевине капли сообщается избыточный отрицательный заряд. При замерзании сердцевины капли, она расширяется и ранее замерзший поверхностный слой лопается, а его положительно заряженные осколки уносятся потоком воздуха в верхние части облака, тогда как отрицательно заряженные падают вниз облака (рис. 2.1). Капли воды также могут электризоваться при их разрушении под действием аэродинамических сил или их избирательном столкновении, однако главную роль играют процессы замерзания капель. Таким образом, нижняя часть грозового облака становится заряженной отрицательно, верхняя положительно (рис. 2.2)

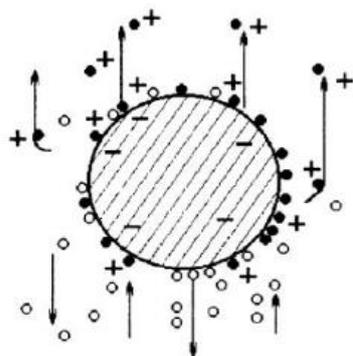


Рис. 2.1. Процесс разделения зарядов при электризации замерзающих капель воды

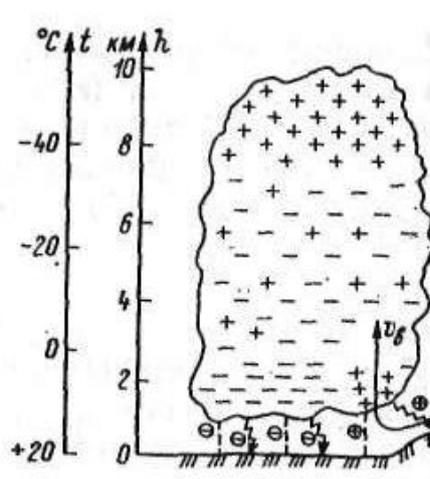


Рис. 2.2. Типичное распределение зарядов внутри грозового облака

Ионизация воздуха. Из-за турбулентных потоков воздуха в средней части облака области с положительным и отрицательным зарядом могут сближаться, благодаря чему возникают области с повышенной напряженностью электриче-

ского поля, что приводит к ионизации воздуха. Этим можно объяснить возникновение отдельных ячеек в нижней части облака с избыточным положительным зарядом. По мере созревания облака и накопления в его верхней части положительных зарядов интенсивность поляризации облака увеличивается. Концентрация в нижней части облака отрицательных зарядов приводит к повышению напряженности электрического поля, и когда она достигает критического значения, происходит ионизация воздуха, и в сторону земли начинает развиваться разряд. Так образуется линейная молния – газовый разряд при очень большой длине искры. Общая длина канала молнии достигает нескольких километров, причем значительная часть канала молнии находится внутри грозового облака. Это один из основных процессов электризации грозовых облаков.

Стадии молнии. Развитие молнии начинается в области высокой плотности избыточных зарядов в ограниченном объеме части грозового облака, где повышение максимальной напряженности электрического поля достигает 100 – 500 кВ/м, а в отдельных точках местная напряженность может быть намного выше. При этом возникают условия для развития лавин электронов, приводящих к дальнейшему развитию ионизационных процессов и формированию стримерных каналов. Высокая неоднородность электрического поля в структуре облака приводит к тому, что токи отдельных стримеров, сливаясь, образуют канал лидера молнии, разогревая его до высокой температуры, при этом проводимость канала резко увеличивается за счет термической ионизации газа. Зародившийся в отрицательно заряженной части грозового облака лидер состоит из канала, головки и стримерной зоны. Через проводящий канал лидера, имеющий погонное сопротивление около 50 Ом/м и среднюю продольную напряженность электрического поля порядка 10 кВ/м, потенциал облака передается головке стримерных разрядов (рис. 2.3). Стримеры, в свою очередь, выносят заряд, создавая вокруг канала лидера молнии объемный биполярный заряд с преобладанием отрицательных ионов. Согласно измерениям суммарный заряд на единицу длины лидера лежит в диапазоне 0,2...1,0 мКл/м, а радиус внешней границы

стримерной зоны лидера составляет порядка 100 м. Потенциал канала относительно поверхности земли составляет $10^7 - 10^8$ В.



Рис. 2.3. Схема развития лидера молнии

Таким образом, формирование каждой *отдельной ступени* нисходящего лидера включает следующие стадии:

- ✓ стадию начальной вспышки стримерной короны от головки лидера;
- ✓ образование зародышей лидера на границе вспышки;
- ✓ проращение пространственного лидера до соединения его с головкой отрицательного лидера.

По данным полевых наблюдений проращение канала лидера молнии сопровождается световой вспышкой молнии длительностью около 200 мс. Вспышка состоит из нескольких импульсов примерно по 10 мс с интервалом в 40 мс, что говорит о ступенчатом развитии лидерного канала. Распространение канала лидера молнии к объекту, можно разделить на несколько стадий. Первоначальная стадия начинается с местных неоднородностей в структуре облака и включает в себя вспышки стримерной короны на достаточном расстоянии от объекта и проращение лидера. В первом приближении можно принять, что заряды, образованные вокруг головки нисходящего лидера, создают радиально-симметричное поле. Направление распространения лидера в таком поле принимается равновероятным (рис.2.4).

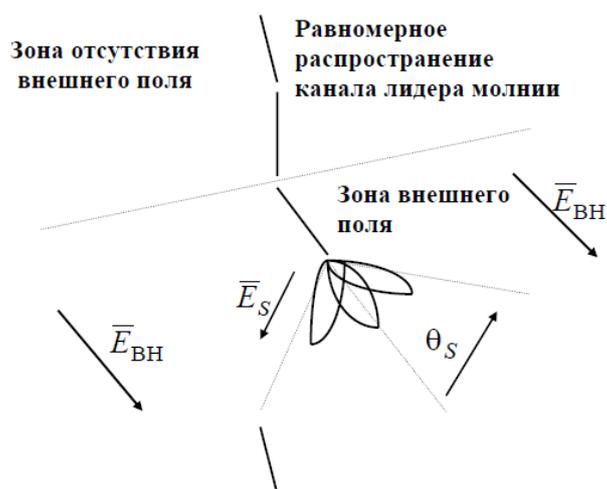


Рис. 2.4. Формирование отдельной ступени нисходящего канала лидера молнии от зоны равномерного поля к зоне учета внешних полей;

E_s - напряженность в стримерной зоне; $E_{ВН}$ - внешняя суммарная напряженность поля

Ток в лидерной стадии молнии имеет сотни ампер. Заряды облака и лидера индуцируют на поверхности земли и на расположенных на ней объектах заряды другого знака. По мере приближения лидера к земле индуцированный заряд и напряженность электрического поля на вершинах возвышающихся объектов возрастают и с них могут начать развиваться встречные лидеры, имеющие противоположный по знаку заряду лидера заряд. Последующие стадии развития канала лидера, начиная с момента появления электростатического влияния на направление распространения лидера, включают стадии ориентировки канала. Влияние наземных объектов начинает сказываться при достижении канала лидера так называемой высоты ориентации $H = (5 \pm 10)h_0$, $h_0 < 100 \dots 200$ м, высота наземных объектов, м. Амплитуда тока молнии, протекающего через пораженный объект, так же как и высота ориентировки, зависит от заряда лидера. Это дает возможность установить связь между током молнии и высотой ориентировки, которая изменяется от 200 и более метров – для ударов с токами выше кА, и до 20 - 30 м - для ударов с токами 15 - 20 кА. В присутствии внешней напряженности поля ($E_{ВН}$) распределение результирующей напряженности (E_s) поля на границе вспышки становится асимметричным. В перераспределении напряженности поля большую роль играют встречные разряды, развивающиеся

с объектов на земле. Развитие встречных разрядов вызывает усиление напряженности поля. Наличие сильного внешнего поля, обусловленного также развитием встречных разрядов, определяет траекторию нисходящего канала лидера молнии, который прорастает в сторону наибольшего усиления напряженности поля, т.е. в сторону наибольшего встречного разряда. Длина канала встречного лидера достигает 30...60% высоты объекта. Лидерная стадия развития молнии завершается соединением каналов нисходящего и встречного лидеров, в результате чего образуется непрерывный проводящий канал от облака к земле (объекту). До соединения нисходящего канала лидера молнии и встречного разряда с наземного объекта напряжение на головке лидера лишь немногим меньше напряжения у начала ствола лидера в грозовой ячейке облака. В момент соприкосновения нисходящего лидера с объектом (встречным разрядом с объекта) напряжение на конце лидера снижается на 1-2 порядка. Снижение потенциала в канале приводит к резкому возрастанию радиальной напряженности электрического поля между окружающими лидер объемными зарядами и каналом лидера и к формированию стримеров «возвратного разряда», благодаря которому объемный заряд начинает стекать по каналу в землю. Этот ток разогревает канал до $(2-3) \cdot 10^4$ К, его диаметр значительно возрастает, а эквивалентное сопротивление снижается на 2 и более порядков, что приводит к росту тока канала до десятков, а иногда и сотен кА. От земли вверх к облаку развивается главный разряд со скоростью, близкой к скорости света. По данным Р. Лундхольма скорость распространения главного разряда достаточно сильно зависит от тока молнии. При изменении тока с 2 до 200 кА скорость распространения по отношению к скорости света возрастает с 0,05 до 0,43. По данным А. В. Корсунцева величина скорости волны нейтрализации по отношению к скорости света лежит в диапазоне от 0,1 до 0,5, что фактически соответствует данным Лундхольма. Яркое свечение канала лидера молнии за счет протекающего тока воспринимается как вспышка молнии, а быстрое объемное расширение и сжатие воздуха порождает акустическую волну – гром. Импульс тока главного разряда обычно длится несколько десятков микросекунд – пока не ослабеет интен-

сивность процесса нейтрализации объемных зарядов вокруг канала. Фронтальная часть импульса полностью определяется током нейтрализации объемных зарядов вокруг канала лидера, а спад импульса – также и перераспределением зарядов внутри грозового облака.

Протекание тока канала лидера молнии приводит к дальнейшей нейтрализации объемных зарядов вокруг канала лидера и к частичной нейтрализации заряда облака. Финальная стадия разряда сопровождается протеканием длительно несколько десятков миллисекунд по охлаждающемуся каналу молнии тока порядка десятков и единиц ампер.

Таким образом, стадий развития молнии четыре: стримерная, лидерная, главный разряд, финальная.

Развитие внутриоблачных разрядов может привести к формированию последующих импульсов тока молнии, которые в большинстве случаев развиваются в виде непрерывного (стреловидного) лидера. Основными отличительными чертами повторных разрядов являются более крутой фронт по сравнению с первым разрядом и меньшая амплитуда и длительность волны тока молнии. Стреловидный лидер повторного разряда движется со скоростью, превышающей скорость лидера первого разряда, поскольку он развивается по уже образованному каналу. Эквивалентное сопротивление лидера молнии зависит от протекающего тока в канале: на начальных стадиях эквивалентное сопротивление молнии достаточно велико, с увеличением тока молнии в процессе перехода от лидера к главному разряду канал молнии разогревается и расширяется, что приводит к снижению сопротивления канала.

Яркие вспышки канала при повторных разрядах воспринимаются как мерцание молнии. В большинстве случаев молния состоит из 2-3 отдельных разрядов. Большая часть ударов молнии имеет длительность не более 0,3 с.

Описанный процесс является типичным для удара молнии в невысокие (до 30 м) наземные объекты на равнинной местности. В равнинной местности в большинстве случаев (примерно 90%) разряды молнии имеют отрицательную полярность и несут на землю отрицательные заряды. При ударах молнии в вы-

сокие объекты (свыше 100 м), а также в горной местности наблюдаются разряды, в которых развитие молнии начинается с поражаемого объекта вверх по направлению к грозовой туче (молния с восходящим лидером). На равнинной местности доля таких молний при высоте объекта 100 м составляет 7%, при высоте 200 м – 25% и при высоте 360 м – 96%. В горной местности число молний с восходящим лидером, поражающих даже невысокие объекты, составляет около 75% от общего числа ударов молний в эти объекты, а количество разрядов молнии с отрицательной полярностью составляет около 50%. Разряды с восходящими лидерами имеют большую длительность токов главного разряда (до 0,1 с) и сравнительно малую амплитуду импульсов тока (несколько кА). При развитии повторного разряда у них стреловидный лидер начинает развиваться от облака к земле, также как и в молниях с нисходящим лидером первого разряда.

Было замечено, что на проводах и тросах ВЛ, одновременно иницируются несколько каналов встречных разрядов. В реальных условиях длина встречных разрядов может достигать несколько десятков метров, причем большая их часть останавливается в своем развитии и далее развивается только 1...3 канала. Перекрытие происходит всегда только по одному из каналов.

На ориентировку канала лидера молнии влияет класс напряжения электроустановки, конструктивные параметры опор ВЛ: высота подвеса провода и троса и их взаимное расположение на опоре. При горизонтальном расположении проводов одноцепных ВЛ, в основном, поражаются крайние фазы. Нижние фазы одноцепных и двухцепных ВЛ с вертикальным расположением фаз практически не поражаются молнией, так как они экранированы верхними проводами.

2.2. Количественные характеристики разряда молнии

Для расчета молниезащиты воздушных линий и подстанций необходимо знать не только процесс развития молнии, но и ряд параметров и их количественных характеристик, описывающих разряд. Характерные осциллограммы импульсов тока первой (1) и последующих (2) составляющих многократного разряда показаны на рис. 2.5. Форма импульса первой составляющей имеет следующие особенности: ток в начальной стадии нарастает относительно мед-

ленно; фронт импульса имеет вогнутую форму; наибольшая крутизна фронта наблюдается вблизи максимума тока. Изломы и колебания кривой тока вблизи максимума объясняются искривлениями канала молнии и наличием в нем ответвлений. После нейтрализации канала лидера в стадии главного разряда ток молнии через пораженный объект в течение 100 - 200 мкс падает до небольшого или до нулевого значения (см. рис. 2.5, кривая 1).

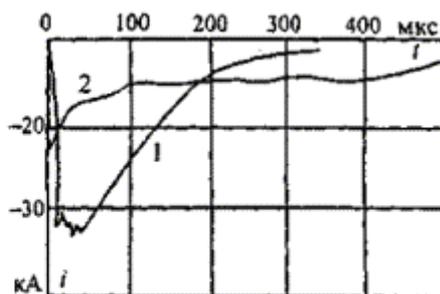


Рис. 2.5. Типичные осциллограммы импульса тока первой (1) и последующих (2) составляющих многократного разряда молнии отрицательной полярности

Импульс тока молнии, протекающего через пораженный объект при повторных разрядах, отличается более коротким фронтом и длительностью и, как правило, меньшей амплитудой при большей крутизне тока на фронте. По форме он ближе к стандартному грозовому импульсу с параметрами 1,2/50 мкс. Типичная форма импульса тока в пораженном молнией объекте (осциллограмма тока молнии) приведена на рис. 2.6.

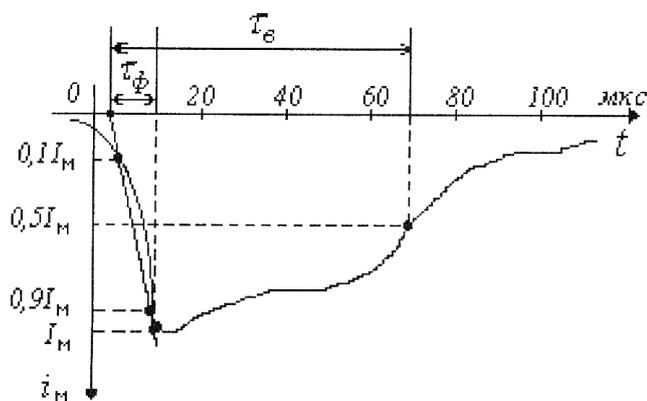


Рис. 2.6. Типичная форма импульса тока в пораженном молнией объекте

τ_b — время полуспада или длительность импульса — интервал времени от условного начала импульса до того момента, когда тока импульса при его снижении станет равным половине его амплитуды

Положительные удары молнии, составляющие в среднем 10 %, бывают, как правило, однократные. Они могут иметь значительную амплитуду тока, однако обычно для них характерен пологий фронт. В редких случаях (около 4 %) наблюдаются колебательные разряды. В настоящее время эти два типа разрядов молнии не учитываются в расчетах молниезащиты ВЛ и ПС.

Грозоупорность ВЛ, как правило, рассчитывается только для первого импульса разряда молнии, так как вероятность перекрытия изоляции при воздействии последующих импульсов на порядок и более меньше, чем при воздействии первого импульса. Учет последующих импульсов в оценке грозоупорности оправдан только в некоторых специальных случаях при большой индуктивности опор (многоцепные ВЛ на одностоечных опорах, большие переходы ВЛ через водные преграды и т.д.). При многократном разряде молнии перенапряжения на изоляции ВЛ возникают как на первом, так и при последующих импульсах тока, однако при обычном времени действия защит и АПВ (не менее 1 с) все возможные при многократном разряде молнии перекрытия линейной изоляции укладываются в интервал одного отключения ВЛ.

Молниезащита ПС должна рассчитываться с обязательным учетом первых и последующих импульсов многократного разряда молнии.

Форма фронта импульса тока имеет принципиальное значение в расчетах грозоупорности ВЛ 110 кВ и выше при ударе молнии в опору: в этом случае обратное перекрытие изоляции наиболее вероятно на фронте волны. Фронт импульса, имеющий достаточно сложную форму и непостоянную крутизну. В расчетах он заменяется косоугольным с постоянной крутизной с учетом следующих обстоятельств. Обратное перекрытие изоляции при ударе молнии в опору происходит на фронте импульса при достижении значений тока молнии около 30 кА и выше. Для подавляющего большинства импульсов при среднем значении амплитуды тока молнии (20 - 30) кА этот момент наступает на участке фронта выше $0,5 I$, т.е. форма начального участка фронта не имеет существенного значения для расчета грозоупорности ВЛ 110 - 1150 кВ.

Таким образом, в расчетах молниезащиты принимается косоугольная форма импульса, количественными характеристиками которого являются длительность фронта импульса, τ_{ϕ} , длительность импульса, τ_u , амплитуда тока молнии, I_{max} . Длительность фронта импульса для первого разряда молнии колеблется в пределах от 2 до 10 мкс при средней величине 5 мкс, для повторных разрядов она в среднем равна 0,6 мкс. Длительность первого импульса составляет от 20 до 200 мкс при средней величине 75 мкс. У повторных импульсов она в среднем равна 32 мкс. Скорость распространения главного разряда принимается равной 0,3 скорости света, $v = 0,3 c$.

Для оценки надежности молниезащиты линий и подстанций практическое значение имеют амплитуда, I_{max} , и крутизна расчетного тока молнии, a_{cp} , среднее значение которой определяется по формуле:

$$a = \frac{I_{max}}{\tau_{\phi}}. \quad (2.1)$$

В приближенных расчетах их статистическое распределение можно аппроксимировать с помощью экспоненциальных функций:

$$p(I_{max}) = e^{-0,04I_{max}}, \quad p(a) = e^{-0,08a}, \quad (2.2)$$

где $p(I_{max})$ или $p(a)$ – вероятности того, что амплитуда или крутизна тока молнии при ее одном ударе превысит соответственно I_{max} (кА) или a (кА/мкс)

В расчетах молниезащиты амплитуда и крутизна тока молнии приняты взаимонезависимыми для первых и последующих импульсов.

Еще одной важной характеристикой разряда молнии является волновое сопротивление канала молнии. Сопротивление канала молнии на стадии главного разряда не остается постоянным, уменьшаясь по мере возрастания протекающего тока. Этот параметр характеризуется эквивалентным значением, Z_m , и зависит от амплитуды тока молнии (рис. 2.7).

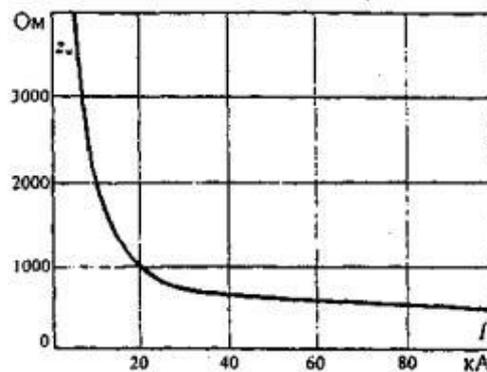


Рис. 2.7. Зависимость эквивалентного сопротивления канала от тока молнии

В большинстве расчетных случаев грозоупорности ВЛ z_m принимается равным бесконечности, т.е. канал молнии рассматривается как источник заданного тока. Это дает небольшой запас при расчете числа грозовых отключений от прорывов молнии на провода. Уточнение значения Z_m в соответствии с рис. 2.6 следует делать для расчета критического значения тока при ударе молнии в провода ВЛ напряжением 500 кВ и выше, для которых прорывы молнии являются основной причиной грозовых отключений.

2.3. Характеристика грозовой деятельности

Одновременно на земном шаре существует около **200** грозовых очагов, из которых ежесекундно происходит около **100** ударов молнии.

Наиболее информативной для расчета грозопоражаемости энергетических объектов характеристикой является плотность разрядов молнии на землю p_0 . Ее определяют косвенно через продолжительность грозовой деятельности в часах за год.

Для территорий России плотность разрядов молнии на землю может быть оценена по формуле:

$$p_0 = 0,067 N_{г.ч.}, \quad (2.3)$$

где p_0 - плотность разрядов молний на 1 км² поверхности земли за год;

$N_{г.ч.}$ – количество грозовых часов за год.

Количество грозовых часов в год определяется по карте годовой продолжительности гроз в часах (рис. 2.8).

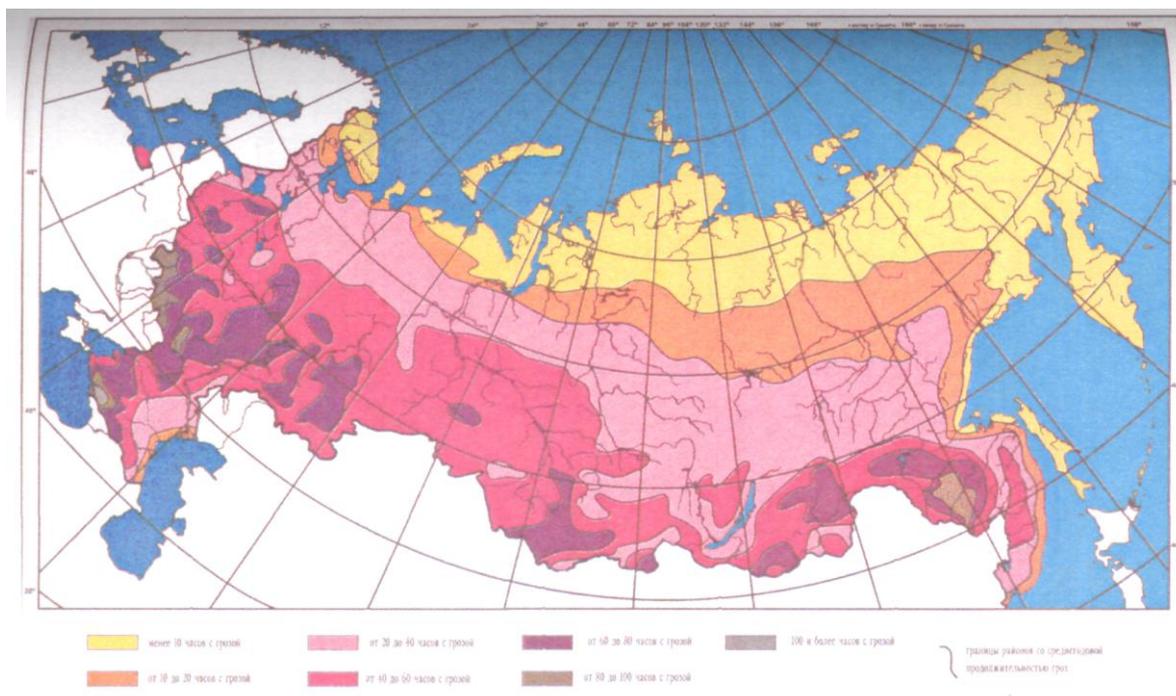


Рис. 2.8. Карта районирования территории РФ по среднегодовой продолжительности гроз в часах

При проектировании и сопоставлении расчетных и эксплуатационных показателей грозоупорности ВЛ и ПС рекомендуется использовать данные наблюдений за грозой гидрометеостанций, наиболее близко расположенных к трассе ВЛ или территории ПС. В первом случае используется среднеегодовое число гроз в часах не менее чем за 30 лет, а во втором - фактическое число гроз в часах за каждый анализируемый год. При отсутствии этих данных пользуются картой, приведенной на рис. 2.8.

3. ГРОЗОУПОРНОСТЬ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

3.1. Грозопоражаемость воздушных линий

Под грозопоражаемостью ВЛ понимают число ударов молнии в линию. Возвышаясь над окружающей местностью, ВЛ поражается разрядами, развивающимися непосредственно над ней, и «стягивает» боковые разряды.

Число «прямых» ударов в линию N_{II} зависит от плотности разрядов молнии на землю p_0 , расстояния между тросами (или проводами на ВЛ без троса) $d_{тр-тр}$ и длины линии L :

$$N_{II} = p_0 L d_{тр-тр}. \quad (3.1)$$

Число боковых ударов молнии зависит от амплитуды тока молнии и высоты подвеса проводов и тросов. Чем больше амплитуда тока молнии и высота ВЛ, тем с большего расстояния разряд молнии ориентируется на ВЛ. Для определения числа боковых ударов молнии используется понятие «эквивалентная ширина полосы стягивания», которая пропорциональна средней высоте подвеса троса или провода. Число боковых ударов определяется по формуле:

$$N_B = 2p_0 L R_{экр} = 2p_0 L k_h h_{ср}, \quad (3.2)$$

где $k_h = R_{экр}/h$ – отношение ширины полосы, с которой ВЛ собирает боковые разряды молний с одной стороны от ВЛ, $R_{экр}$, к высоте опор, h .

С увеличением высоты поражаемого объекта значение k_h уменьшается. На рис. 3.1 показана зависимость k_h от h , полученная по результатам обобщения данных по поражаемости объектов (ВЛ и молниеотводов) различной высоты.

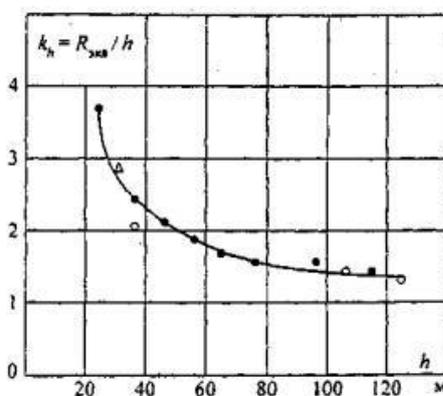


Рис. 3.1. Зависимость отношения ширины полосы, с которой ВЛ собирает боковые разряды молний с одной стороны от ВЛ ($R_{экр}$), к высоте опор

Число ударов молнии на 100 км длины ВЛ рассчитывается по формулам:

при $h_{cp} \leq 30$ м

$$N = 0,2 p_0 \left(\frac{d_{mp-mp}}{2} + 5h_{cp} - \frac{2h_{cp}^2}{30} \right); \quad (3.3)$$

при $h_{cp} > 30$ м

$$N = 0,15 p_0 \left(\frac{d_{mp-mp}}{2} + h_{cp} + 90 \right), \quad (3.4)$$

где d_{mp-mp} - расстояние между тросами (или проводами на бестросовой линии), м. Для ВЛ с одним тросом $d_{mp-mp} = 0$;

h_{cp} - средняя высота подвеса троса или провода, м, определяемая как:

$$h_{cp} = h_{mp(np)} - \frac{2}{3} f_{mp(np)}, \quad (3.5)$$

где $h_{mp(np)}$ – высота подвеса троса (провода) на опоре;

$f_{mp(np)}$ – стрела провеса.

Если стрела провеса троса (провода) неизвестна, то она вычисляется через нормированные ПУЭ расстояния по вертикали между тросом и верхним проводом в середине пролета длиной $l_{прол}$ (см. рис. 3.2) и наименьшее допустимое расстояние между нижним проводом и землей h_{Γ} , м (см. табл. 3.1):

при $h_{mp-np} > h_{mp} - h_{np}^B$

$$f_{mp} = h_{mp} - h_{\Gamma} - (h_{np}^B - h_{np}^H) - h_{mp-np}, \quad (3.6)$$

$$f_{np} = h_{np}^H - h_{\Gamma},$$

при $h_{mp-np} \leq h_{mp} - h_{np}^B$

$$f_{mp(np)} = h_{np}^H - h_{\Gamma}, \quad (3.7)$$

где h_{np}^B и h_{np}^H – высота подвеса верхнего и нижнего проводов на опоре;

h_{mp-np} – расстояние по вертикали между тросом и верхним проводом в середине пролета, определяется по рис. 3.2.

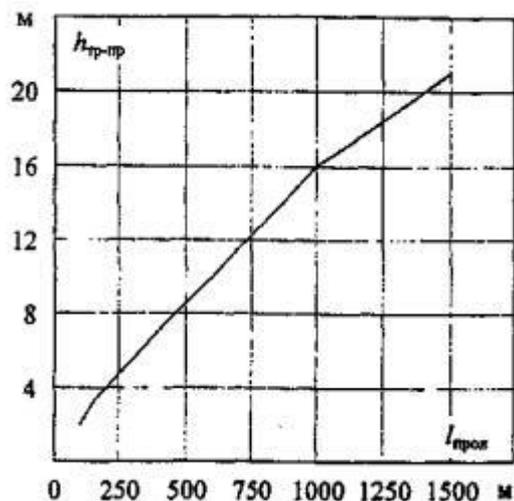


Рис. 3.2. Наименьшее расстояние между тросом и проводом в середине пролета в зависимости от его длины [16]

Таблица 3.1. - Наименьшее допустимое расстояние между нижним проводом и землей h_G

$U_{ном},$ кВ	110	150	220	330	500	750	1150
$h_G,$ м	6	6,5	7	7,5	8	10,25	16

3.2. Определение грозоупорности воздушных линий

Под грозоупорностью ВЛ понимают устойчивость линии к воздействию грозových перенапряжений. Показателем грозоупорности ВЛ является число ее грозových отключений в год. В проектной и эксплуатационной практике, в зависимости от рассматриваемой задачи, могут использоваться:

- удельное число грозových отключений n_G , рассчитанное на 100 км и 100 грозových часов в год. Этот показатель обычно используется для сравнения расчетных или эксплуатационных показателей грозоупорности ВЛ, различающихся по конструктивному выполнению и классу номинального напряжения;

- удельное число грозových отключений на 100 км и один год эксплуатации n'_G . Этот показатель удобен, например, для сопоставления грозоупорности ВЛ в одной энергосистеме;

- абсолютное число грозových отключений N_G , рассчитанное на фактическую длину ВЛ (L) и фактическую интенсивность грозовой деятельности, т.е. число грозových отключений за анализируемый период, отнесенное к продол-

жительности этого периода в годах. Этот показатель необходим, например, при выборе средств грозозащиты или при сопоставлении расчетных и эксплуатационных показателей грозоупорности.

Для сравнения эффективности различных мероприятий по молниезащите воздушных линий применяют критерий, называемый уровнем грозоупорности.

Уровень грозоупорности. Под уровнем грозоупорности понимают тот наибольший расчетный ток в хорошо заземленном объекте, возникающий вследствие прямого удара молнии типичной формы (косоугольный импульс с длительностью фронта 2 мкс), при котором еще не перекрывается изоляция

3.2.1. Грозоупорность ВЛ 110 кВ и выше с тросами

Эффективность молниезащиты воздушных линий определяют отдельно для следующих расчетных случаев (см. рис. 3.3):

- Удар молнии в провод с последующим перекрытием изоляции между проводом и опорой или между проводами (фазами);
- Удар молнии в вершину опоры с последующим обратным перекрытием изоляции с заземленной опоры на провод;
- Удар молнии в трос в средней части пролета с последующим перекрытием изоляции с троса на провод или на землю;
- Удар молнии вблизи воздушной линии, сопровождающийся появлением перекрытий изоляции вследствие индуктированных перенапряжений.

При ударе молнии в опору, включая удары в прилегающие участки троса к опоре, возникают обратные перекрытия линейной изоляции из-за перенапряжений, возникающих при протекании тока молнии по опоре. При ударе молнии в трос в средней части пролета возникают перенапряжения на воздушном промежутке «трос-провод», и после пробега электромагнитной волны по пролету и стекании тока молнии по опоре, на линейной изоляции. Наиболее вероятным на практике является случай перекрытия линейной изоляции на ближайшей опоре. При ударе молнии в провод после пробега электромагнитной волны возникают перенапряжения на линейной изоляции, приводящие к ее перекрытию. При ударе молнии вблизи ВЛ на ее проводах индуцируется напряжение, которое по-

сле пробега по проводу до ближайшей опоры может привести к перекрытию линейной изоляции.

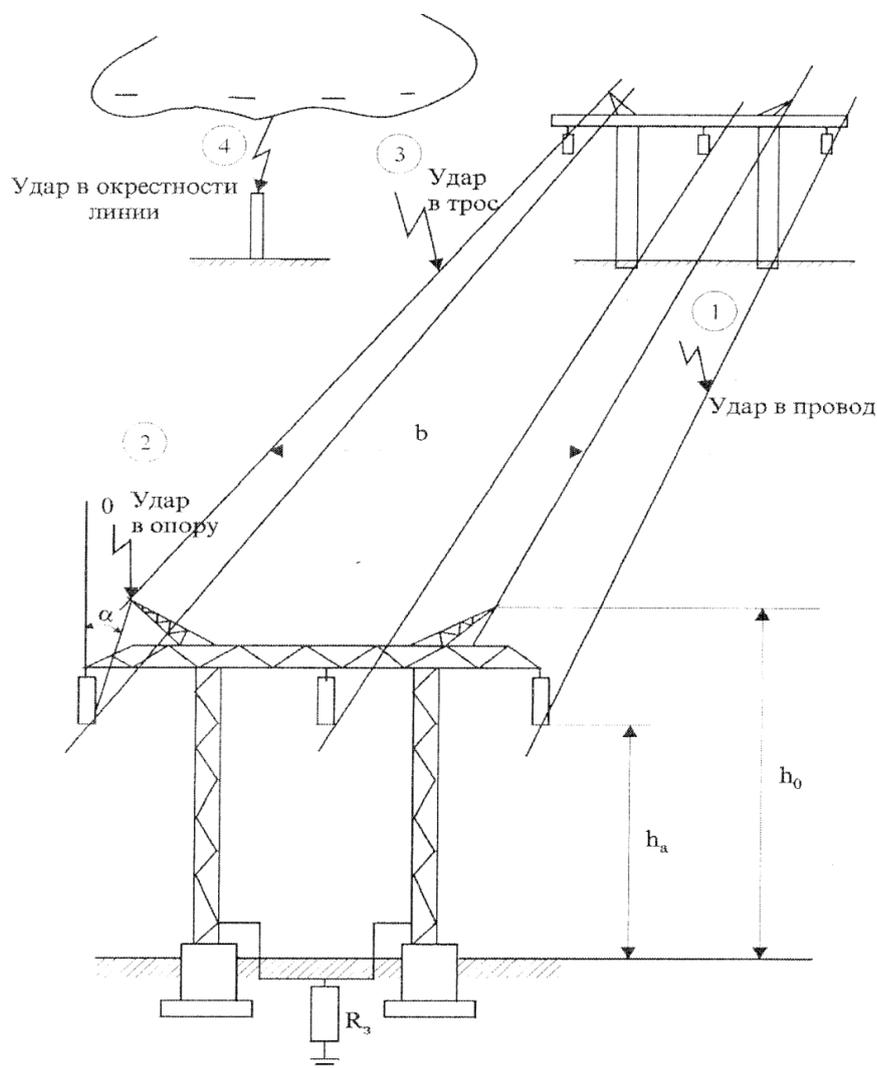


Рис. 3.3. Расчетные случаи грозового поражения линии с тросами

Логика развития аварий при грозовых поражениях ВЛ хорошо прослеживается на рис. 3.4. Здесь приняты следующие условные обозначения: $p_{пр}$, $p_{оп}$, $p_{тр}$, $p_{инд}$ – соответственно вероятность удара молнии в провод, в опору, в трос в средней части пролета, вблизи ВЛ; p_I – вероятность импульсного перекрытия изоляции; p_D – вероятность перехода импульсного перекрытия изоляции в дугу тока промышленной частоты; $p_{АПВ}$ – вероятность успешного АПВ; n_{Σ} , $n_{пр}$, $n_{оп}$, $n_{тр}$, $n_{инд}$ – соответственно суммарное число грозовых отключений линии, число грозовых отключений линии при ударе в провод, опору, трос, при возникновении индуктированных перенапряжений.

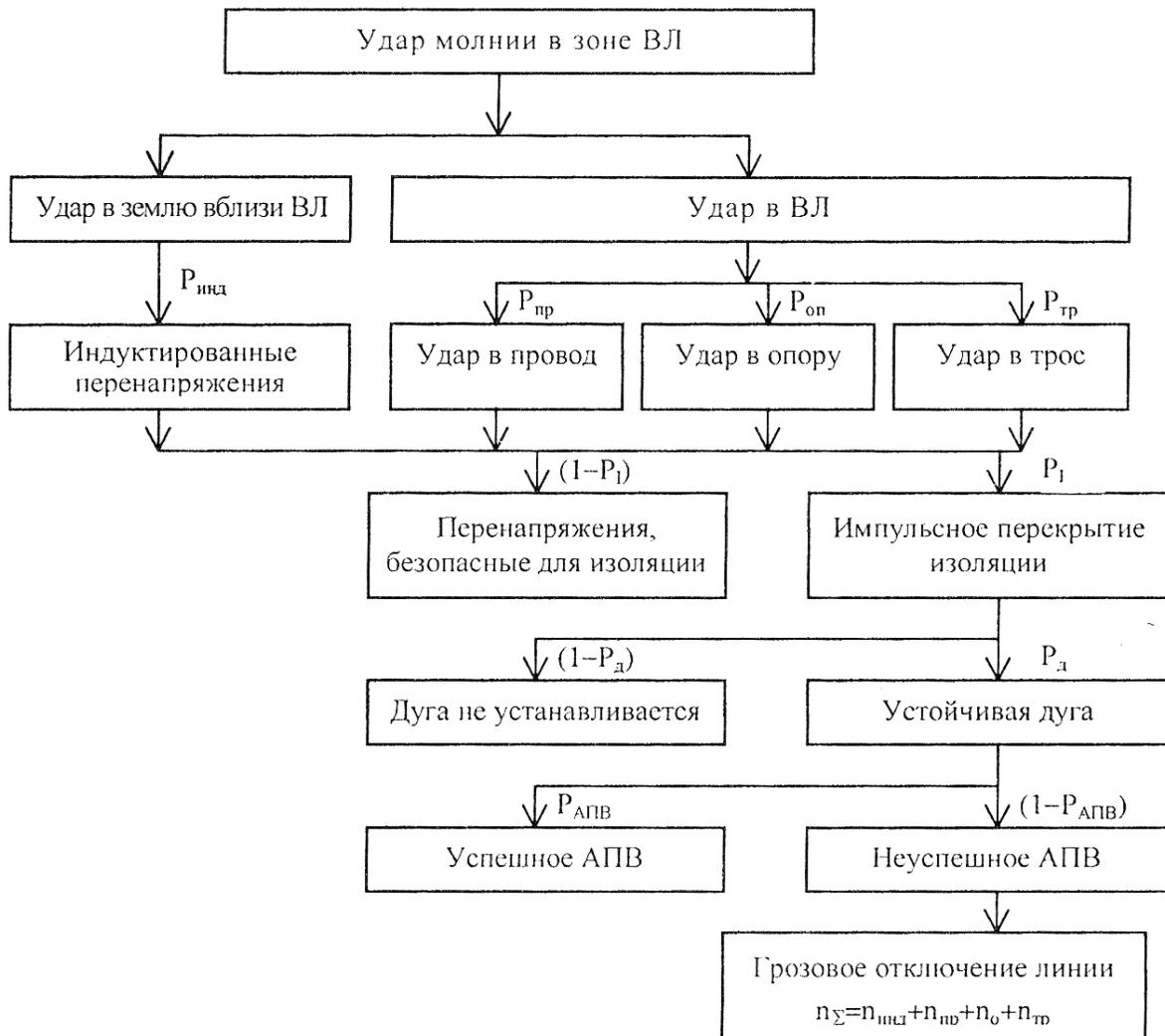


Рис. 3.4. Логическая схема развития грозовых аварий ВЛ напряжением 110 кВ и выше

Удар молнии в опору и обратное перекрытие линейной изоляции.

При попадании молнии в вершину опоры или в трос вблизи опоры первоначально почти весь ток молнии проходит через тело опоры и ее заземление. Это приводит к возникновению потенциала на опоре, максимальное значение которого обусловлено сосредоточенной индуктивностью тела опоры и импульсным сопротивлением ее заземления. Напряжение на линейной изоляции равно разности потенциалов на опоре и на проводе. Когда напряжение на изоляции достигнет или превысит ее импульсную прочность, т.е. импульсного разрядного напряжения, при длительности воздействия равной длительности фронта тока молнии, произойдет обратное перекрытие изоляции. В обе стороны от удара молнии по грозозащитному тросу распространяются волны, напряжение кото-

рых равно напряжению на вершине опоры, достигая соседних опор. С течением времени соседние опоры начинают участвовать в отводе тока молнии в землю, что приводит к снижению потенциала на пораженной опоре. По образовавшемуся каналу в результате импульсного перекрытия изоляции пораженной опоры начинает протекать ток промышленной частоты. Импульсное перекрытие переходит в дуговое, т.е. силовую дугу короткого замыкания. Происходит отключение линии релейной защитой. Срабатывает АПВ, при неуспешном АПВ линия отключается повторно. Последовательность событий, приводящая к аварийному отключению линии при попадании молнии в опору, определяет алгоритм расчета числа грозовых отключений рассматриваемого случая.

1. Определяется число ударов молнии в опору:

$$N_{on} = 4N \frac{h_{mp}}{l_{прол}}, \quad (3.8)$$

где N - число ударов молнии на 100 км длины ВЛ за 100 грозовых часов, определяемое по выражениям (3.3), (3.4);

h_{mp} – высота подвеса троса;

$l_{прол}$ – длина пролета.

2. Определяется вероятность перекрытия линейной изоляции при ударе молнии в вершину опоры [20]:

$$p_{on} = \exp(-aI_{m\ мин} - 2\sqrt{abA})\sqrt{1 + \pi\sqrt{abA}}, \quad (3.9)$$

где $a=0.04$ 1/кА; $b=0,08$ мкс/кА – параметры экспоненциальной аппроксимации статистического закона распределения тока молнии и крутизны фронта тока молнии без учета их корреляции;

$I_{m\ мин}$ – наименьшее значение амплитуды тока молнии, при которой еще возможны перекрытия изоляции;

A – постоянная величина

$$I_{m\ мин} = \frac{I_{m1}a_{m1} - I_{m2}a_{m2}}{a_{m1} - a_{m2}}, \quad (3.10)$$

$$A = \frac{I_{м2} - I_{м1}}{a_{м1} - a_{м2}} a_{м1} \cdot a_{м2}, \quad (3.11)$$

Здесь параметры тока молнии $I_{м1}$, $a_{м1}$ определяются по кривой опасных токов при ударе молнии в опору (рис. 3.5) при $\tau_{\phi 1}=2$ мкс, а параметры $I_{м2}$, $a_{м2}$ – при $\tau_{\phi 2}=10$ мкс по формуле:

$$I_{кр\ on} = \frac{U_{\tau\phi} - U_{раб\ max} - E_{cp} h_{np\ cp} (1 - K)}{(1 - K) (\kappa_{оме} R_u + (\kappa_{оме}^2 L_0 h_{он}) / \tau_{\phi} + (M_0 h_{он}) / \tau_{\phi})}, \quad (3.12)$$

где $U_{\tau\phi}$ – напряжение перекрытия линейной изоляции при предразрядном времени, равном длительности фронта импульса тока молнии;

$U_{раб\ max}$ – наибольшее рабочее напряжение на проводе (фазное);

E_{cp} – средняя напряженность электрического поля в промежутке канал лидера молнии – земля перед ударом молнии в трос, $E_{cp} = 10$ кВ/м;

$h_{np\ cp}$ – средняя высота подвеса провода;

K – коэффициент электромагнитной связи между тросом и проводом или проводом и двумя коронирующими тросами;

$\kappa_{оме}$ – коэффициент ответвления тока в опору, обычно составляет 0,8-0,95;

R_u – импульсное сопротивление заземления опоры;

L_0 – индуктивность на единицу высоты опоры, определяется по [РУ], усредненная индуктивность на единицу высоты опоры $L_0=0,5 - 0,7$ мкГн/м;

$h_{он}$ – высота опоры;

M_0 – коэффициент взаимной индукции между каналом молнии и телом опоры на единицу высоты опоры, $M_0=0,2$ мкГн/м

Напряжение перекрытия линейной изоляции при предразрядном времени, равном длительности фронта импульса тока молнии определяется по вольт-секундной характеристике линейной изоляции для разрядов на косоугольном фронте импульса [17]:

$$U_{разр}(t) = 340 k_{кон} k_E I_{разр} \left(1 + \frac{15}{t + 9,5} \right), \quad (3.13)$$

где $k_{кон}$ – коэффициент, учитывающий различие в конструкции изоляторов

$$k_{кон} = \frac{L_y}{H_{из}},$$

L_y – длина пути тока утечки;

$H_{из}$ – строительная высота изолятора;

k_E – коэффициент, учитывающий снижение градиента разрядного напряжения с увеличением длины гирлянды $l_{разр}$, м:

$$l_{разр} = n_{из} H_{из},$$

$n_{из}$ – количество изоляторов в гирлянде;

t – время, принимаемое равным, соответственно $\tau_{\phi 1}=2$ мкс и $\tau_{\phi 2}=10$ мкс.

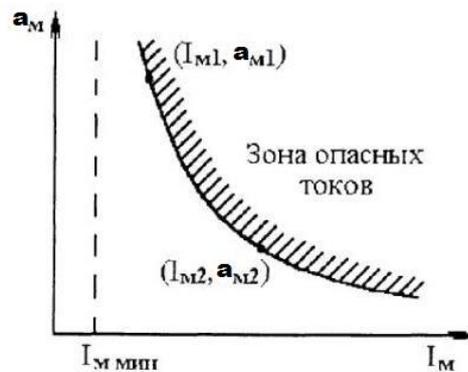


Рис. 3.5. Кривая опасных токов при ударе в вершину опоры

3. Определяется вероятность перехода импульсного перекрытия в дугу тока промышленной частоты:

$$\eta = (0,92 \frac{U}{l_{разр}} - 6) \cdot 10^{-2}, \quad (3.14)$$

где U – наибольшее длительно допустимое рабочее линейное напряжение, кВ.

Если найденное значение η окажется больше 0,9, его принимают равным 0,9.

4. Определяется удельное число грозовых отключений линии за 100 грозовых часов на 100 км от обратных перекрытий линейной изоляции при ударах молнии в опору:

$$n_{он} = N_{он} p_{он} \eta_{он} (1 - p_{АПВ}), \quad (3.15)$$

где $p_{АПВ}$ – вероятность успешной работы АПВ, принимается равной по данным эксплуатации или по таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Вероятность успешной работы АПВ

$U_{ном}, \text{кВ}$	3 – 10	20 – 35	110	220 – 500
$p_{АПВ}$	0,5	0,7	0,75	0,8

Удар молнии в провод при прорыве сквозь тросовую защиту и перекрытие линейной изоляции

При прорыве молнии сквозь тросовую защиту на провода от места удара молнии в провод в обе стороны по проводам распространяются волны перенапряжений практически со скоростью света. Достигнув опор, волна перенапряжений воздействует на линейную изоляцию. Ее величина такова, что на ближайшей к месту удара молнии изоляции (гирлянда изоляторов либо полимерный изолятор) возникает перенапряжение, превышающее ее импульсную прочность. Влияние рабочего напряжения линии в данном случае можно пренебречь. Возникает импульсное перекрытие изоляции, которое может перейти в дугу тока промышленной частоты, т.е. в короткое замыкание. Короткое замыкание отключается релейной защитой, затем срабатывает АПВ. При неуспешном АПВ происходит грозовое аварийное отключение линии. Таким образом, чтобы произошло аварийное отключение линии необходимо, с некоторой вероятностью удар молнии в провод, минуя грозозащитный трос и опоры, превышение волны перенапряжения над импульсной прочностью линейной изоляции и переход импульсного перекрытия в дугу тока промышленной частоты, а также неуспешной АПВ. Эта цепь событий алгоритмически описывается следующим образом.

1. Определяется вероятность прорыва молнии на провода, минуя тросы

$$p_{\alpha} = e^{\frac{1}{D} \left(\frac{0,55}{\Delta h} \sqrt{ah_{мп}\Delta s} - \frac{9}{D} \right)}, \quad (3.16)$$

где

$$D = 1 + U_{ном} \frac{h_{мп}}{\Delta h} \left(\frac{117U_{ном}^2}{\Delta h \Delta s \ln \frac{2h_{мп}}{r_{мп}}} \right)^3$$

α – угол тросовой защиты, в градусах;

Δh – превышение троса над проводом;

$h_{тр}$ и $h_{пр}$ – высота подвеса троса и провода;

Δs – горизонтальное смещение троса относительно провода;

$U_{ном}$ – номинальное напряжение на линии в мегавольтах;

$r_{пр}$ – радиус провода.

2. Определяется число прорывов молнии на провода сквозь тросовую защиту:

$$N_{пр} = Np_{\alpha}, \quad (3.17)$$

3. Определяется уровень грозоупорности для перекрытия линейной изоляции, т.е. критический ток молнии, приводящий к ее импульсному перекрытию.

Для линий напряжением до 330 кВ включительно

$$I_{кр пр} = \frac{2U_{50\%}}{Z_{пр.кор.}}, \quad (3.18)$$

где $U_{50\%}$ - 50%-ное разрядное напряжение изоляции для импульсов отрицательной полярности с косоугольным фронтом, определяемое по выражению

$$U_{50\%} = U_{50}^- (0,92 - 0,012 I_{разр}^{(0,74-0,06 I_{разр})} (I_{разр}^{-3})), \quad (3.19)$$

U_{50} – 50%-ное разрядное напряжение для стандартного импульса отрицательной полярности, определяемое по рис. 3.6.

$Z_{пр.кор.}$ – волновое сопротивление коронирующего провода

$$Z_{пр.кор.} = \beta Z = 0,9Z, \quad (3.20)$$

Z – волновое сопротивление провода, определяемое по формуле

$$Z_{пр} = 60 \ln \frac{2h_{сп}}{r}. \quad (3.21)$$

Для ВЛ напряжением 500 кВ и выше критическое значение тока молнии рассчитывается в два этапа: по формуле (3.18) определяется критическое значение тока молнии, для которого по рис. 2.7 находится сопротивление канала молнии, $Z_{м}$. Затем определяется уточненное значение критического тока молнии:

$$I_{кр. пр. ут.} = I_{кр} \frac{Z_M}{Z_M + Z_{пр. кор.} / 2} \quad (3.22)$$

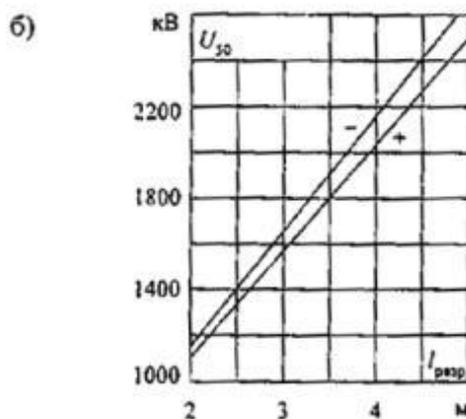
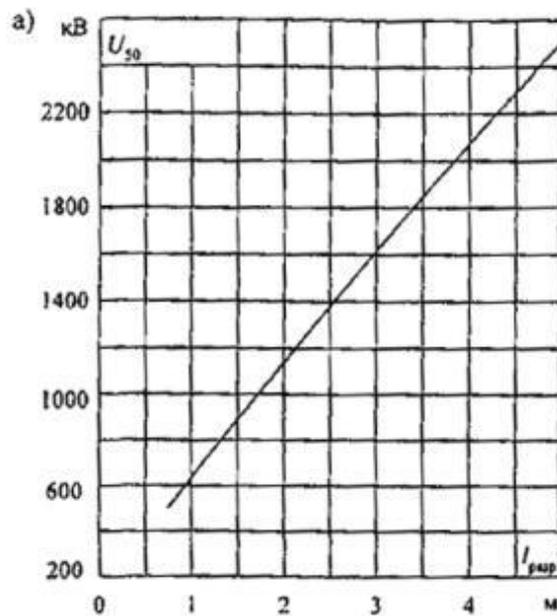


Рис. 3.6. Зависимость 50 %-ного импульсного разрядного напряжения от длины разрядного пути по гирлянде изоляторов:

а) без защитной арматуры; б) с защитной арматурой

3. Определяется вероятность обратного перекрытия линейной изоляции при ударе молнии в провод, т.е. вероятность того, что ток молнии будет больше, чем уровень грозоупорности линии при ударе в провод:

$$p_{пр} = e^{-0,04I_{кр. пр.}} \quad (3.23)$$

4. Определяется удельное число отключений ВЛ за 100 грозовых часов на 100 км при ударе молнии в провод при прорыве сквозь тросовую защиту:

$$n_{пр} = N_{пр} p_{пр} \eta (1 - p_{АПВ}), \quad (3.24)$$

где η определяется по формуле (3.14), а $p_{АПВ}$ – по табл. 3.2.

Удар молнии в трос в середине пролета и обратное перекрытие линейной изоляции

По мере удаления точки удара молнии в трос от опоры вероятность перекрытия линейной изоляции на опоре снижается, а вероятность перекрытия воздушного промежутка вблизи точки удара возрастает. В точке удара молнии в трос происходит подъем напряжения, который можно определить по эквивалентной схеме на рис. 3.7. До прихода импульсов, отраженных от сопротивления заземления соседних опор, напряжение на тросе равно:

$$U_{mp}(t) = \frac{atZ_{mp}}{2} \quad (3.25)$$

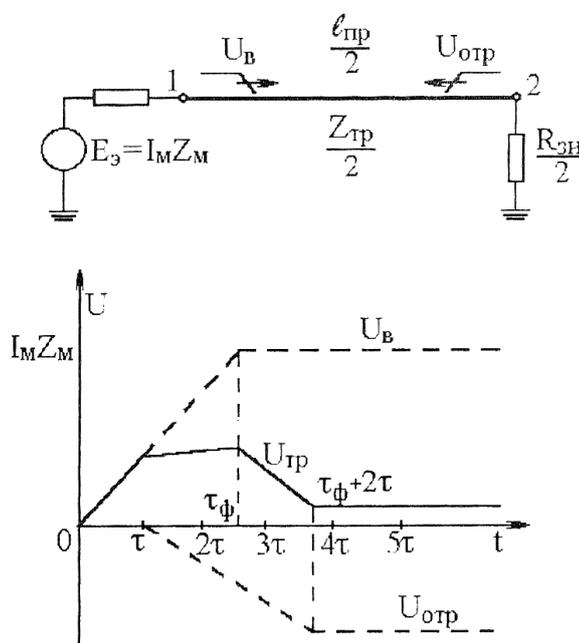


Рис. 3.7. Упрощенная эквивалентная схема (а) и график напряжения на тросе (б) при ударе молнии в трос в середине пролета

Через интервал времени $\tau = \frac{l_{прол}}{v}$ ($l_{прол}$ – длина пролета, v – скорость распространения волны перенапряжений) к месту удара с двух сторон одновременно подойдут импульсы, отраженные с переменной знака от сопротивления заземления ближайших опор и рост напряжения прекратится. Поскольку импульсное сопротивление намного меньше волнового сопротивления троса, отраженные волны имеют противоположный знак знаку падающей волны, а амплитуда и крутизна тока фронта волн по абсолютной величине близки к амплитуде и кру-

тизне фронта падающей волны, поэтому с момента прихода отраженных волн рост напряжения в точке удара резко замедляется (рис. 3.7,б). Тогда максимальное напряжение на тросе будет

$$U_{mp\ max} = \frac{aZ_{mp}l_{прол}}{2v}. \quad (3.26)$$

Таким образом, максимальное напряжение на тросе в основном зависит не от амплитуды, а от крутизны фронта тока молнии.

На проводе (система трос-провод) индуцируется напряжение

$$U_{np}^{инд} = KU_{mp} \quad (3.27)$$

Тогда напряжение между тросом и проводом будет:

$$U_{mp-np} = U_{mp} - U_{np}^{инд} = (1 - K) \frac{aZ_{mp}l_{прол}}{2v}. \quad (3.28)$$

Принципиально возможны следующие случаи повреждения линейной изоляции:

- перекрытие воздушного промежутка трос-провод-земля в месте удара молнии;
- перекрытие промежутка трос-земля мимо провода;
- обратное перекрытие изоляции (гирлянда или полимерный изолятор) на ближайшей опоре.

Анализ показывает, что наиболее вероятным на практике является третий случай, т.е. перекрытие гирлянды изоляторов или полимерного изолятора на ближайшей опоре, т.к. согласно [16] $\Delta h = 0,02l_{прол}$.

Исходя из вышесказанного, на практике рассчитывают только третий случай.

1. Определяется число ударов молнии в трос в середине пролета:

$$N_{mp} = N - N_{он} - N_{np}. \quad (3.29)$$

2. Из условия перекрытия линейной изоляции на ближайшей опоре при ударе молнии в трос в середине пролета определяется критическое значение тока молнии, приводящее к этой ситуации:

$$I_{кр.мп} = \frac{2(U_{50\%}^+ - U_{раб})}{R_u(1 - K)}, \quad (3.30)$$

где $U_{50\%}^+$ - 50%-ное разрядное напряжение для импульса положительной полярности.

3. Определяется вероятность обратного перекрытия линейной изоляции при ударе молнии в трос в середине пролета

$$p_{мп} = e^{-0,04I_{кр.мп}}. \quad (3.31)$$

4. Определяется удельное число отключений ВЛ за 100 грозовых часов на 100 км при ударе молнии в трос в середине пролета:

$$n_{мп} = N_{мп} p_{мп} \eta (1 - p_{АПВ}). \quad (3.32)$$

Удар молнии вблизи линии

При ударах молнии вблизи воздушной линии на фазных проводах возникают индуктированные напряжения, которые могут привести к аварийному отключению линии. Максимальное значение возникающего напряжения на линейной изоляции зависит от максимального значения тока молнии, высоты подвеса провода над землей и расстояния от места удара молнии до провода.

Число отключений линии 110 кВ и выше из-за перекрытий линейной изоляции вследствие воздействия индуктированных перенапряжений определяются по формуле:

$$n_{инд} = N_{инд} \eta (1 - p_{АПВ}), \quad (3.33)$$

где $N_{инд}$ – ожидаемое количество опасных индуктированных перенапряжений с амплитудой, превышающей импульсную прочность линейной изоляции

$$N_{инд} = \frac{9,36 N_{г.ч} h_{пр}}{U_{инд}} e^{(-U_{инд}/260)}, \quad (3.34)$$

$U_{инд}$ – индуктированное на проводах перенапряжение, $U_{инд} = U_{50\%}^+$.

Расчеты показывают, что для линий напряжением 220 кВ и выше индуктированные перенапряжения практически не представляют опасности и могут не учитываться при расчете грозоупорности ВЛ. Для линий 110 кВ на металличе-

ских опорах опасные индуктированные перенапряжения составляют менее 1 раза в год.

Число грозových отключений ВЛ с тросами

Вначале определяется суммарное удельное число грозových отключений линии за 100 грозových часов на 100 км

$$n_{г} = n_{он} + n_{пр} + n_{пр} \cdot \quad (3.35)$$

Затем рассчитывается грозоупорность ВЛ, т.е. число грозových отключений линии в год

$$N_{г} = n_{г} \frac{N_{г.ч.}}{100} \frac{l}{100} + n_{инд} \frac{l}{100}, \quad (3.36)$$

где l – длина линии, км.

3.2.2. Грозоупорность ВЛ напряжением 110 кВ и выше без тросов

Воздушные линии напряжением 110-500 кВ могут сооружаться без тросов в следующих случаях:

- ВЛ 110 кВ, выполненные на деревянных опорах;
- в районах с числом грозových часов в году менее 20;
- на отдельных участках ВЛ с удельным электрическим сопротивлением $\rho > 10^3$ Ом·м;
- на участках трассы с расчетной стенкой гололеда более 20 мм.

ВЛ на металлических и железобетонных опорах

ВЛ на металлических и железобетонных опорах без тросов могут поражаться молнией при ее ударе в опоры и провода в пролете. При этом разряды молнии распределяются примерно поровну между опорами и проводами в пролете. Алгоритм расчета грозоупорности таких ВЛ следующий.

1. Определяется число ударов молнии в провод или опору:

$$N_{пр} = N_{он} = 0,5N. \quad (3.37)$$

2. Определяется удельное число грозových отключений ВЛ из-за обратных перекрытий линейной изоляции при ударе молнии в опору

$$n_{он} = 0,5N_{пр}\eta. \quad (3.38)$$

Здесь вероятность импульсного перекрытия изоляции при ударе молнии в опору, p_{on} определяется так же как и для ВЛ с тросами. Разница состоит лишь в определении критического тока молнии, приводящего к импульсному перекрытию изоляции при ударе молнии в опору. Этот ток определяется следующим образом:

$$I_{кр\ on} = \frac{U_{\tau\phi} - U_{раб\ max}}{R_u + (L_0 + M_0)h_{on} / \tau_{\phi}}. \quad (3.39)$$

3. Определяется удельное число грозовых отключений ВЛ при ударе молнии в провод

$$n_{np} = 0,5 N p_{np} \eta. \quad (3.40)$$

Здесь вероятность импульсного перекрытия линейной изоляции при ударе молнии в провод рассчитывается также как и для ВЛ с тросами.

4. Определяется суммарное удельное число грозовых отключений ВЛ без тросов

$$n_{г} = n_{on} + n_{np} \quad (3.41)$$

и грозоупорность ВЛ по выражению (3.36).

ВЛ на деревянных опорах

На ВЛ без троса на деревянных опорах из-за небольшой длины пролетов и стрел провеса можно пренебречь вероятностью поражения молнией опоры по сравнению с вероятностью поражения провода, тогда

$$N_{np} = N. \quad (3.42)$$

Линии на деревянных опорах обычно имеют на трассе опоры с пониженным по сравнению с основной трассой уровнем изоляции. На ВЛ с неоднородной изоляцией по трассе грозовые отключения происходят по двум причинам: на участках с полным использованием изоляции дерева - от перекрытий изоляции на опорах, ограничивающих пораженный пролет; на опорах с ослабленной изоляцией - от волн, набегающих с прилегающих участков, имеющих более высокий уровень изоляции.

Перекрытие изоляции на ВЛ с деревянными опорами при полном использовании изолирующих свойств дерева происходит, как правило, между прово-

дами соседних фаз, по деревянной траверсе и двум гирляндам. Напряжение, приложенное к этой изоляции, должно определяться с учетом коэффициента связи между здоровым и пораженным проводами.

Критическое значение тока молнии (уровень грозоупорности) рассчитывается по формуле

$$I_{кр} = \frac{2U_{50\%}^-}{(1-K)Z_{np\ кор}}. \quad (3.43)$$

Для волнового сопротивления провода ($Z_{np\ кор}$) и коэффициента связи двух проводов с учетом короны (K) при напряжении на пораженном проводе, равном 50 %-ному разрядному напряжению комбинированной изоляции, принимаются значения из табл. 3.3.

Таблица 3.3. – Исходные данные для расчета критического значения тока молнии, приводящего к перекрытию изоляции на ВЛ с деревянными опорами

$U_{ном}$, кВ	$U_{50\%}^-$, кВ	$Z_{np\ кор}$, Ом	K
110	1330	365	0,155
150	1740	335	0,155
220	2540	300	0,160

Далее определяется вероятность импульсного перекрытия изоляции по формуле (3.23) и удельное число грозовых отключений ВЛ:

$$n_{np} = N_{np} p_{np} \eta (1 - p_{АПВ}), \quad (3.44)$$

где коэффициент перехода импульсного перекрытия в дугу тока промышленной частоты для междуфазного перекрытия определяется по формуле:

$$\eta = \left(\frac{1,6U_{л}}{I_{разр}} - 6 \right) \cdot 10^{-2}. \quad (3.45)$$

Вероятность перекрытия на опоре с ослабленной изоляцией от набегающих волн зависит от уровня изоляции на этой опоре, от параметров волны в месте удара молнии и от удаленности точки удара, так как при распространении по проводам набегающие волны затухают за счет потерь в земле и на импульсную корону. Для ВЛ 110 - 220 кВ основной причиной затухания волны является импульсная корона. Алгоритм расчета числа грозовых отключений ВЛ на деревянных опорах с ослабленной изоляцией приведен в [17].

3.2.3. Влияние конструктивных параметров ВЛ, природно-климатических условий и особенностей трассы на показатели ее грозоупорности

Показатели грозоупорности ВЛ 110 – 750 кВ для различного конструктивного исполнения ВЛ приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4. – Характеристики молниезащиты ВЛ 110 – 750 кВ

Номинальное напряжение кВ	110	110	220	220	330	500	750
Материал опор	Ж/бетон	Металл	Металл	Металл	Металл	Металл	Металл
Марка проводов	АС-120	АС-150	АСО-330	АСО-330	2АСО-400	3АСО-400	4АСУ-400
Количество и тип изоляторов на опоре	8ПС6-Б	8ПС6-Б	14ПС6-Б	14ПС6-Б	22ПС6-Б	28ПС12-А	2×41ПС12-А
Защитный угол троса α , град.	31,2	20,7	29,0	24,2	22,6	22,7	24,7
Импульсное сопротивление заземления опор $R_{зз}$, Ом	20	15	15	10	10	10	10
Удельное число прямых ударов молнии в год при $T_v=100$ ч и длине линии $\ell=100$ км – $N_{пум}$, уд/100 км 100 ч	100	165	182	227	153	174	207
Удельное число отключений линии в год 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 в год при ударе в опору n_o , 1/год	0,81	1,73	0,41	0,45	0,002	<0,001	<0,001
Удельное число отключений линии в год 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 в год вследствие индуцированных перенапряжений $n_{инд}$, 1/год	0,25	0,38	0,03	0,04	0,003	<0,001	<0,001
Удельное число грозовых отключений линии в год n_{Σ} , 1/год	1,55	3,06	0,80	0,68	0,23	0,11	0,066

Взаимосвязь показателей грозоупорности и конструкции ВЛ наиболее ярко проявляется у ВЛ напряжением 110 кВ и выше, выполненных на металлических и железобетонных опорах и защищенных тросом. Рассмотрим ее.

Критические значения тока молнии, приводящие к перекрытию линейной изоляции, при прорывах молнии на провода невелики: изоляция ВЛ 110 - 330 кВ перекрывается при амплитуде тока молнии от 3 до 10 кА и выше, для изоляции ВЛ 500 - 1150 кВ опасен ток молнии от 15 до 35 кА. Практически каждый удар молнии в провод ВЛ 110 кВ вызывает перекрытие изоляции. Опасными при прорывах молнии на провода ВЛ 1150 кВ являются 30 - 40 % разрядов молнии. Таким образом, высокая импульсная прочность линейной изоляции ВЛ 500 - 1150 кВ не обеспечивает их грозоупорности при прорывах молнии на провода.

Обратные перекрытия линейной изоляции при ударе молнии в опору возникают при значительно большей амплитуде тока молнии. Например, изоляция ВЛ 110 кВ перекрывается при ударах молнии в опору с током, достигающим нескольких десятков килоампер. При удалении точки удара молнии от опоры к середине пролета вероятность обратного перекрытия изоляции уменьшается из-за распределения тока молнии между двумя опорами, снижения крутизны тока за счет потерь на импульсную корону при пробеге по тросу и удаленности канала молнии.

Вероятность прорыва молнии на провода сквозь тросовую защиту зависит от числа и расположения тросов относительно проводов, а именно, угла защиты α , превышения троса над проводом Δh и высоты опоры h_{on} . Эффективность тросовой защиты от прорывов возрастает с уменьшением h_{on} и α и увеличением Δh . На ВЛ 500 - 1150 кВ вероятность прорыва молнии на провода может возрасти под влиянием рабочего напряжения проводов, способствующего возникновению и прорастанию встречного лидера.

Распределение ударов молнии между опорой и тросом в пролете зависит от соотношения высоты опоры и длины пролета. При увеличении длины пролета уменьшается доля ударов молнии в опоры, т.е. ударов с повышенной вероятностью обратного перекрытия.

На вероятность обратного перекрытия изоляции влияют следующие конструктивные параметры ВЛ:

- импульсная прочность линейной изоляции, зависящая от класса номинального напряжения ВЛ. Эта зависимость выражена значительно сильнее, чем при прорывах молнии на провода, так как с ростом импульсной прочности значения опасных для изоляции амплитуд тока молнии изменяются от десятков килоампер для ВЛ 110 кВ, имеющих вероятность появления в пределах 0,3 - 0,4, до сотен килоампер для ВЛ 500 кВ и выше – с вероятностью появления 0,05 и менее;

- тип и размеры опоры. С увеличением высоты опоры возрастает поражаемость ВЛ разрядами молнии и увеличивается индуктивность опоры. При

этом одностоечные железобетонные и стальные опоры имеют большую индуктивность, чем порталные или опоры с оттяжками. Наибольшую индуктивность на единицу длины имеют одностоечные железобетонные опоры, но такие опоры обычно имеют меньшую высоту;

➤ тросовая защита. Подвеска троса за счет электростатического экранирования снижает разность потенциалов на линейной изоляции и уменьшает долю тока молнии, стекающего по опоре, что способствует снижению падения напряжения на индуктивности и сопротивлении заземления опоры. Эффективность тросов возрастает при увеличении числа тросов, разнесении их на большее расстояние по горизонтали и приближении к проводам по вертикали;

➤ сопротивление заземления опоры. Уменьшение значений сопротивления заземления R_3 приводит к снижению перенапряжений на изоляции ВЛ. Меньшие значения R_3 необходимо обеспечить на ВЛ, выполненных на одностоечных опорах, имеющих более высокую поражаемость разрядами молнии и большую индуктивность опор. Наиболее жесткие требования следует предъявлять к R_3 для ВЛ 110 кВ, выполняемых в настоящее время исключительно на одностоечных опорах и имеющих сравнительно невысокую импульсную прочность линейной изоляции.

Соотношение числа отключений из-за обратных перекрытий изоляции при ударе молнии в опору или трос и прорывов молнии на провода сквозь тросовую защиту зависит от класса номинального напряжения и конструкции ВЛ: типа опоры, числа и расположения тросов, сопротивления заземления. С ростом номинального напряжения и повышением импульсной прочности линейной изоляции повышается общая грозоупорность ВЛ и снижается доля отключений от обратных перекрытий изоляции.

Основными природно-климатическими характеристиками, влияющими на показатели грозоупорности ВЛ, являются интенсивность грозовой деятельности, статистическое распределение амплитуды тока молнии и электрофизические характеристики грунтов в районе прохождения трассы ВЛ, такие как

удельное сопротивление, диэлектрическая проницаемость и пробивная электрическая прочность грунта.

На показатели грозоупорности влияют также особенности трассы ВЛ, в частности прохождение ВЛ в одном коридоре с другими ВЛ, в том числе и на более высоких опорах, или экранировка ВЛ городской застройкой и лесным массивом. Во всех указанных случаях поражаемость ВЛ разрядами молнии уменьшается по сравнению с ВЛ, проходящей по открытой местности. Поражаемость разрядами молнии каждой из двух одинаковых ВЛ, идущих в одном коридоре, составляет около половины поражаемости отдельно идущей ВЛ.

Показатели грозоупорности экранируемых ВЛ улучшаются за счет более благоприятного статистического распределения амплитуды тока молнии разрядов, поражающих ВЛ. Опасные для линейной изоляции разряды молнии с большими значениями токов, ориентирующиеся на наземные объекты с больших высот, поражают преимущественно близко расположенные к ВЛ высокие объекты: здания городской застройки или лесной массив. По данным обработки опыта эксплуатации отношение числа грозových отключений ВЛ 110 - 220 кВ, экранируемых лесом и идущих по открытой местности, характеризуется значениями, приведенными в табл. 3.5.

Таблица 3.5. – Соотношение числа грозových отключений экранированных лесом ВЛ и ВЛ, идущих по открытой местности

Опора	ВЛ с тросом	ВЛ без троса
портальная	0,5	0,4
одностоечная одноцепная	0,7	0,6
одностоечная двухцепная	0,75	0,7

3.3. Грозových отключения ВЛ напряжением 6 – 35 кВ

В отличие от линий напряжением 110 кВ и выше, линии 6 – 35 кВ на металлических опорах часто отключаются вследствие индуктированных перенапряжений, способных вызвать перекрытие линейной изоляции. Это хорошо видно из рис. 3.8. Индуктированные перенапряжения часто превышают импульсную прочность изоляции линий 6 – 10 кВ (20-30 раз в год). На линиях 35

кВ опасные индуктированные перенапряжения возникают 4-5 раз в год. На линиях 110 кВ – менее 1 раза в год. Для линий 220 кВ и выше индуктированные перенапряжения не опасны. Причиной этого является низкая импульсная прочность изоляции ВЛ 6 – 35 кВ.

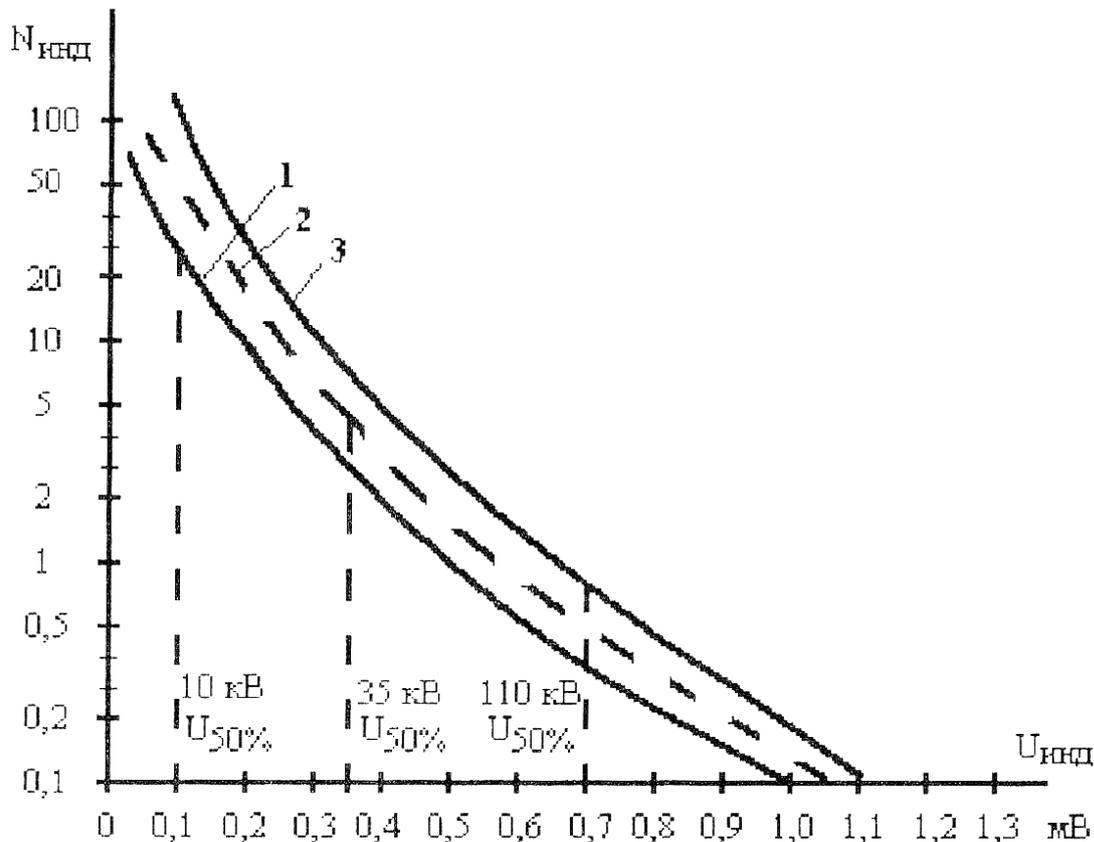


Рис. 3.8. Удельное годовое число индуктированных перенапряжений на 100 км длины ЛЭП и 100 грозовых часов

1 – $h_{пр} = 10$ м, 2 – $h_{пр} = 15$ м, 3 – $h_{пр} = 20$ м

Для линий 6 – 35 кВ суммарное удельное число грозовых отключений в год на 100 км длины за 100 грозовых часов равно

$$n_{Г} = n_{п.у} + n_{инд}, \quad (3.46)$$

где $n_{п.у}$ и $n_{инд}$ – соответственно удельное число грозовых отключений от прямых ударов молнии и от индуктированных перенапряжений.

1. Определение удельного числа грозовых отключений ВЛ 6-35 кВ от прямых ударов молнии

Грозное отключение линий будет происходить при двух- или трехфазном перекрытии изоляции ВЛ:

$$n_{п.у} = N(p_3 \eta_3 + (p_2 - p_3) \eta)(1 - p_{АПВ}), \quad (3.47)$$

где p_3 – вероятность трехфазного перекрытия изоляции ВЛ;

p_2 – вероятность двухфазного перекрытия изоляции ВЛ;

$p_{АПВ}$ – вероятность успешного АПВ, для линий 6-10 кВ – 0,54; для линий 35 кВ – 0,7.

$$p_2 = e^{-0,04 \frac{U_{\phi 50\%}^+}{Z_{\phi 2}(1-k_{12})}}, \quad (3.48)$$

$$p_3 = e^{-0,04 \frac{U_{\phi 50\%}^+}{Z_{\phi 3}(1-k_{12-3})}}, \quad (3.49)$$

где $U_{\phi 50\%}^+$ - импульсное 50%-ное разрядное напряжение фазной изоляции на опоре положительной полярности.

Эквивалентное сопротивление в точке удара при перекрытии одной фазы определяется по условию параллельного сложения:

$$Z_{\phi 2} = Z_M // 0,5 Z_{нр.кор} // R_u. \quad (3.50)$$

Аналогично определяется эквивалентное сопротивление в точке удара при перекрытии двух фаз:

$$Z_{\phi 3} = Z_M // R_u // (Z_{нр.кор}(1+k_{12}) / 4). \quad (3.51)$$

Здесь k_{12} – коэффициент связи между пораженной фазой и наиболее удаленной от нее соседней фазой;

k_{12-3} - коэффициент связи между двумя ранее перекрытыми фазами, соединенными параллельно, и третьей фазой.

Случаи двухфазного и трехфазного перекрытия характеризуются различными вероятностями перехода импульсного перекрытия изоляции в короткое замыкание.

Коэффициент перехода импульсного перекрытия в дугу тока промышленной частоты для двухфазного перекрытия определяется по формуле:

$$\eta = \frac{1,6U_{раб}}{I_{раз}} - 6 \cdot 10^{-2}. \quad (3.52)$$

При трехфазном перекрытии вероятность установления хотя бы одной дуги приближенно можно оценить по формуле

$$\eta_3 = \eta(2 - \eta) \quad (3.53)$$

Вслед за установлением дуги приходит в действие АПВ, которое либо успешно ликвидирует последствия грозового перекрытия, либо происходит аварийное грозовое отключение ВЛ.

2. Определение удельного числа грозовых отключений ВЛ 6-35 кВ от индуктированных перенапряжений

Удельное число грозовых отключений ВЛ вследствие индуктированных перенапряжений можно определить по формуле

$$n_{инд} = (N_{инд3}\eta_3 + (N_{инд2} - N_{инд3})\eta)(1 - p_{АПВ}). \quad (3.54)$$

Здесь удельные числа двухфазных и трехфазных перекрытий определяются следующим образом:

$$N_{инд2} = \frac{936h_{cp}}{U_{инд2}} e^{-\frac{U_{инд2}}{260}}; \quad N_{инд3} = \frac{936h_{cp}}{U_{инд3}} e^{-\frac{U_{инд3}}{260}}. \quad (3.55)$$

Индуктированные перенапряжения при двухфазных и трехфазных перекрытиях соответственно равны:

$$U_{инд2} = U_{50\%}^+ \frac{R_u + 0,5Z_{np.kop}}{(1 - k_{12})0,5Z_{np.kop}}; \quad (3.56)$$

$$U_{инд3} = U_{50\%}^- \frac{R_u + Z_{np.kop} \frac{1 + k_{12}}{4}}{(1 - k_{12-3})Z_{np.kop} \frac{1 + k_{12}}{4}}. \quad (3.57)$$

Пример. Определить удельное число грозовых отключений двухцепной линии 35 кВ на металлических опорах типа П35-2. Исходные данные для расчета (определяются конструктивным исполнением опоры): высота опоры – $h_{он} = 23$ м, высота подвеса верхнего провода на опоре $h_{np} = 19,3$ м, расчетная длина пролета $l_{np} = 250$ м, провод марки АС-120 с радиусом $r_{np} = 0,0076$ м, расчетная стрела провеса провода $f_{np} = 3$ м, индуктивность опоры $L_{он} = 13,8$ мкГн, взаимная индуктивность канала молнии и опоры $M_0 = 4,6$ мкГн, импульсное сопротивление заземления опоры $R_u = 20$ Ом.

Определяем среднюю высоту верхнего провода:

$$h_{cp} = h_{np} - \frac{2}{3} f = 19,3 - \frac{2}{3} 3 = 17,3 \text{ м.}$$

Для ВЛ 35 кВ на промежуточных опорах П-35-2 с тремя изоляторами типа ПС 6-Б волновое сопротивление коронирующего провода $Z_{np} = 450$ Ом, коэффициент связи первого и второго проводов $k_{12} = 0,29$, а ранее перекрытых двух фаз с третьей фазой $k_{12-3} = 0,33$. 50%-ное разрядное напряжение фазной и междуфазной изоляции при положительной и отрицательной полярности равно соответственно $U_{50\%}^+ = 425$ кВ, $U_{мф50\%}^+ = 740$ кВ, $U_{мф50\%}^- = 850$ кВ.

Определим эквивалентное сопротивление в точке удара молнии при перекрытии одной и двух фаз:

$$Z_{32} = Z_M // 0,5 Z_{np} // R_u = 300 // 0,5 \cdot 450 // 20 = 17,3 \text{ Ом};$$

$$Z_{33} = Z_M // R_u // Z_{np}(1+k_{12})/4 = 300 // 20 // 450 (1+0,29)/4 = 16,6 \text{ Ом.}$$

Вероятности двукратного и трехкратного перекрытий изоляции ВЛ равны:

$$p_2 = e^{-0,04 \frac{U_{ф50\%}^+}{Z_{32}(1-k_{12})}} = e^{-0,04 \frac{425}{17,3(1-0,29)}} = 0,256;$$

$$p_3 = e^{-0,04 \frac{U_{ф50\%}^+}{Z_{33}(1-k_{12-3})}} = e^{-0,04 \frac{425}{16,6(1-0,33)}} = 0,219.$$

Вероятность перехода импульсного перекрытия изоляции в короткое замыкание будет равным

$$\eta = \frac{1,6U_{л}}{I_{разр}} - 6 \cdot 10^{-2} = 1,6 \frac{35}{\sqrt{3} \cdot 51} - 0,06 = 0,57$$

Коэффициент неуспешности АПВ равен $1 - p_{АПВ} = 1 - 0,7 = 0,3$

Удельное число ударов молнии в год на 100 км при 100 грозовых часах можно определить по формуле (3.3), а можно приближенно в соответствии с [20] по выражению

$$N = (4 \dots 6) h_{cp} = 6 \cdot 17,3 = 103,8.$$

Определим удельное число грозовых отключений ВЛ от прямых ударов молнии

$$\begin{aligned} n_{п.г} &= N (p_3 \eta_3 + (p_2 - p_3) \eta) (1 - p_{АПВ}) = \\ &= 103,8 (0,219 \cdot 0,815 + (0,256 - 0,219)) \cdot 0,3 = 6,7 \text{ откл / год.} \end{aligned}$$

Определим индуцированные перенапряжения

$$U_{инд2} = U_{мф50\%}^+ \frac{R_u + 0,5Z_{пр.кор}}{(1 - k_{12})0,5Z_{пр.кор}} = \frac{425(20 + 0,5 \cdot 450)}{(1 - 0,29) \cdot 0,5 \cdot 450} = 651 \text{ кВ},$$

$$U_{инд3} = U_{мф50\%}^- \frac{R_u + Z_{пр.кор} \frac{1 + k_{12}}{4}}{(1 - k_{12-3})Z_{пр.кор} \frac{1 + k_{12}}{4}} = 740 \frac{20 + 450 \frac{1 + 0,29}{4}}{(1 - 0,33) \cdot 450 \frac{1 + 0,29}{4}} = 1257 \text{ кВ}.$$

Удельные числа двухфазных и трехфазных перекрытий будут равны

$$N_{инд2} = \frac{936h_{ср}}{U_{инд2}} e^{-\frac{U_{инд2}}{260}} = \frac{936 \cdot 17,3}{651} e^{-\frac{651}{260}} = 2,28;$$

$$N_{инд3} = \frac{936h_{ср}}{U_{инд3}} e^{-\frac{U_{инд3}}{260}} = \frac{936 \cdot 17,3}{1257} e^{-\frac{1257}{260}} = 0,12.$$

Удельное число грозových отключений ВЛ вследствие индуктированных перенапряжений равно

$$n_{инд} = (N_{инд3}\eta_3 + (N_{инд2} - N_{инд3})\eta)(1 - p_{АПВ}) = \\ = (0,12 \cdot 0,815 + (2,28 - 0,12) \cdot 0,57) \cdot 0,3 = 0,4 \text{ откл / год}.$$

Тогда суммарное удельное число грозových отключений рассматриваемой ВЛ будет равным

$$n_{Г} = n_{П.У} + n_{инд} = 6,7 + 0,4 = 7,1 \text{ откл / год}.$$

Суммарное удельное число грозových отключений в год в соответствии с приведенной методикой будет находиться в пределах:

- ВЛ 6 – 10 кВ на деревянных опорах – от 2 до 6;
- ВЛ 6 – 10 кВ на железобетонных опорах – от 10 до 30;
- ВЛ 20-35 кВ на деревянных опорах – от 5 до 15.

3.4. Грозоупорность ВЛ с композитными опорами

Композитные опоры для воздушных линий появились сравнительно недавно. Применение изоляционного материала в основе конструкции композитных опор приводит к появлению особенностей молниезащиты ВЛ высокого напряжения с этими опорами.

Основная часть конструкции композитной опоры — стойка, которая, как правило, выполняется из стеклопластика. Технология производства обеспечи-

вадет опоре необходимую прочность и стойкость к внешним воздействиям. Особое внимание приковано к опорам RStandard™, производимым в Канаде компанией RS Technologies inc. Стойки этих опор выполняются из конических стеклопластиковых модулей, насаживаемых друг на друга по телескопическому принципу. Такая конструкция определяет простоту монтажа, хранения и транспортировки опор. Эти опоры послужили прототипом российских разработок, выполненных ЗАО «Феникс-88» в 2012 году для ВЛ 110–220 кВ. Модули RStandard™ использованы в опорах 110–500 кВ, разработанных для России в 2011 году. Важно отметить, что предложенные конструктивные решения отличаются от принципов использования композитных опор за рубежом.

Преимущественно зарубежные решения связаны с заменой деревянных опор композитными, которые обладают более хорошими эксплуатационными и экологическими характеристиками. Конструкции композитных опор идентичны конструкциям опор деревянных. Как правило, ВЛ высокого напряжения выполняются одноцепными с горизонтальным расположением проводов. Типовые российские деревянные опоры 35–220 кВ имеют аналогичное исполнение. Высота деревянных опор не превышает 15–20 м, импульсная прочность изоляции увеличена за счет деревянных траверс. Это позволяет ВЛ иметь приемлемую грозоупорность при высокой индуктивности, характерной для заземляющего спуска деревянной опоры. Воздушные ЛЭП без грозозащитных тросов с деревянными опорами имеют значительную грозоупорность по сравнению с аналогичными ЛЭП на железобетонных и металлических опорах, которые, как известно, электропроводящие. Очевидно, что электрические параметры композитных и деревянных опор при их одинаковой конструкции идентичны — в основе используется диэлектрик.

Опоры, созданные для России на основе модулей RStandard™, получили название ПРС и ППРС; они разработаны на классы напряжения 110–500 кВ. Конструкции идентичны типовым железобетонным опорам. Траверсы этих опор – металлические, а грозозащитные тросы заземляются спусками из проводников. Высота некоторых опор превышает 30 м.

Анализ грозоупорности ВЛ на композитных опорах в сравнении с ВЛ на опорах традиционного типа показал, что из-за высокой индуктивности тела композитной опоры при стандартной импульсной прочности изоляции и значительной грозопоражаемости ВЛ с опорами типа RS могут отключаться в 2–3 раза чаще аналогичных ВЛ с традиционными опорами. Зависимость числа отключений ВЛ 110–330 кВ на композитных опорах в сравнении с ВЛ на традиционных опорах приведена на рис. 3.9.

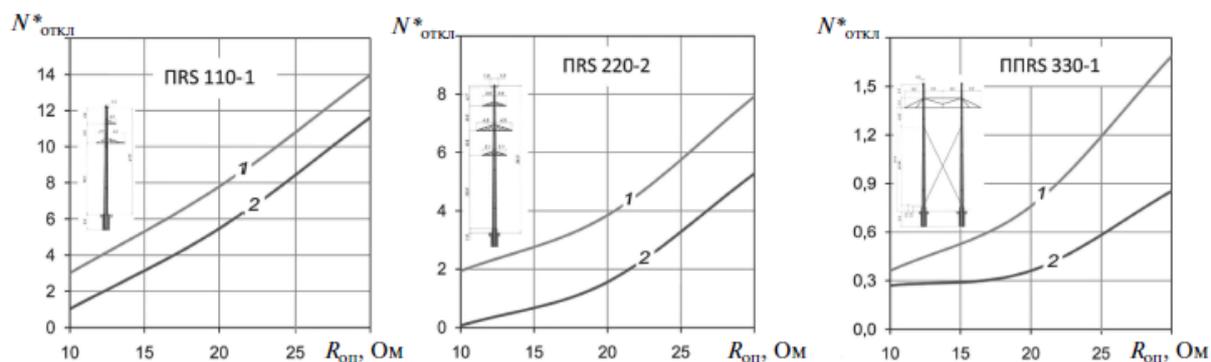


Рис. 3.9. Зависимость числа отключений ВЛ от сопротивления заземления опор

1 – композитные опоры ПРС и ППРС; 2 – аналогичные по конструкции опоры унифицированной серии

Стеклопластиковые опоры 110–220 кВ, разработанные ЗАО «Феникс-88», получили название ПК. Это двухцепные и одноцепные промежуточные опоры 110–220 кВ, которые отличаются принципиально от опор ПРС только наличием консольных изоляционных траверс вместо стандартных металлических траверс с гирляндами изоляторов. Еще при изучении опор ПРС было определено, что для повышения грозоупорности одноцепных ВЛ достаточно использовать изоляционную подвеску следующего по уровню класса напряжения, что проблематично по конструктивным соображениям. В опорах серии ПК это условие отчасти выполняется. Строительная длина изоляционной траверсы соответствует длине стандартной подвески следующего по уровню класса напряжения. Изоляционная длина такой траверсы несколько меньше, а при защите поверхности полимерной части разрядными рогами она снижается еще больше. Несмотря на преимущества по изоляции, значительная высота опор ПК может привести к

недостаточной молниезащите ВЛ. Оптимизация конструкций, направленная на увеличение импульсной прочности фазной изоляции за счет изоляционных свойств материала опоры, может решить эти проблемы.

Повышение грозоупорности ВЛ 110 кВ при использовании изоляционных свойств опоры и особой конструкции заземляющего спуска исследовано в [24]. Предложено использовать заземляющий спуск троса, смонтированный на удалении от тела опоры (рис. 3.10). В конструкциях опор типа ПК и ПРС этот спуск монтируется непосредственно на поверхности стойки и ее изоляционные преимущества не используются. При удалении заземляющего спуска от опоры импульсная прочность изоляции ВЛ определяется промежутком «провод — спуск» по воздуху, а не значительно более низкими разрядными характеристиками полимерных траверс и гирлянд изоляторов. Грозоупорность ВЛ с композитными опорами рассмотренной конструкции на 58 % выше грозоупорности ВЛ с аналогичными стальными опорами.

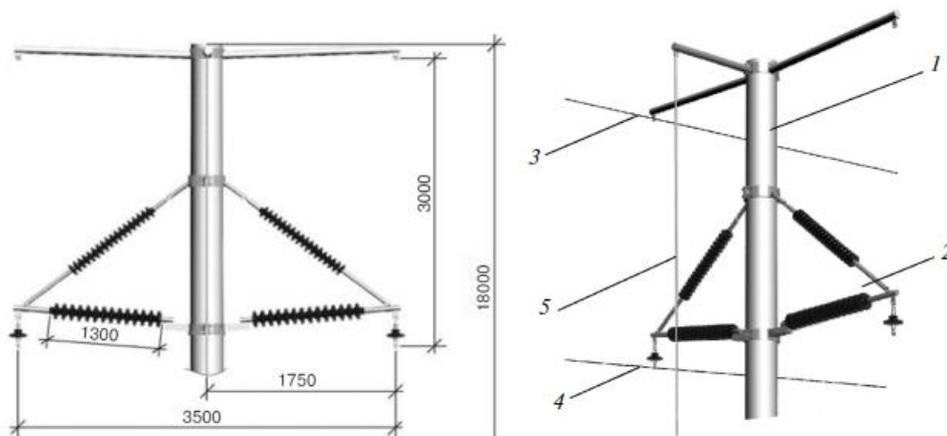


Рис. 3.10. Композитная опора с особой конструкцией заземляющего спуска:

1 — композитная изоляционная стойка; 2 — изоляционная консольная траверса; 3 — грозозащитный трос; 4 — фазный провод; 5 — заземляющий спуск троса

Таким образом, конструктивные особенности композитных опор оказывают влияние на грозоупорность ВЛ. При исполнении композитных опор по аналогии с традиционными металлическими и железобетонными следует ожидать снижения грозоупорности в среднем в два раза. Чтобы повысить их грозоупорность, следует применять изоляционные траверсы консольного типа, а также изучить возможность создания конструкций опор с изоляционными стойками.

4. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ, ВЛ ОТ ПРЯМЫХ УДАРОВ МОЛНИИ

4.1. Задачи и критерии молниезащиты. Основные определения

Надежность защиты электрических станций и подстанций от грозовых перенапряжений должна быть значительно выше надежности молниезащиты линий электропередачи. Это определяется значительно большим ущербом от грозовых перенапряжений на подстанциях, чем на линиях.

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 молниезащиты 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_{ny} . Считается, что если расчетное значение T_{ny} оценивается 500 - 3000 годами соответственно для ПС 35 - 1150 кВ, то молниезащита оборудования, подвесной и воз-

душной изоляции ПС надежно защищена от обратных перекрытий и прорывов на территории РУ.

Защита ПС от набегающих с ВЛ волн грозových перенапряжений основана на выборе соответствующих защитных аппаратов (ОПН, разрядников), числа и места их установки на ПС с тем, чтобы обеспечить такое снижение воздействующих волн грозových 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 молниезащиты ПС 35 - 1150 кВ от набегающих волн перенапряжений $T_{нв}$ должен быть соответственно не менее 200 - 1500 лет.

Таким образом, молниезащита подстанций включает в себя защиту от прямых ударов молнии и защиту от набегающих волн перенапряжений.

К основным определениям, используемым в данном разделе, относятся следующие.

Молниеотвод – возвышающееся над защищаемым объектом устройство, через которое ток молнии, минуя защищаемый объект, отводится в землю.

Молниеприемник - часть молниеотвода, предназначенная для перехвата молний.

Токоотвод (спуск) - часть молниеотвода, предназначенная для отвода тока молнии от молниеприемника к заземлителю.

Заземляющее устройство - совокупность заземлителя и заземляющих проводников.

Заземлитель - проводящая часть или совокупность соединенных между собой проводящих частей, находящихся в электрическом контакте с землей непосредственно или через проводящую среду.

Заземляющий контур - заземляющий проводник в виде замкнутой петли вокруг здания в земле или на ее поверхности.

Сопротивление заземляющего устройства - отношение напряжения на заземляющем устройстве к току, стекающего с заземлителя в землю.

Напряжение на заземляющем устройстве - напряжение, возникающее при стекании тока с заземлителя в землю между точкой ввода тока в заземлитель и зоной нулевого потенциала.

Опасное искрение - недопустимый электрический разряд внутри защищаемого объекта, вызванный ударом молнии.

Безопасное расстояние - минимальное расстояние между двумя проводящими элементами вне или внутри защищаемого объекта, при котором между ними не может произойти опасного искрения.

Отдельно стоящий молниеотвод - молниеотвод, молниеприемники и токоотводы которого расположены таким образом, чтобы путь тока молнии не имел контакта с защищаемым объектом.

Молниеотвод, установленный на защищаемом объекте - молниеотвод, молниеприемники и токоотводы которого расположены таким образом, чтобы часть тока молнии могла растекаться через защищаемый объект или его заземлитель.

Зона защиты молниеотвода - пространство в окрестности молниеотвода заданной геометрии, отличающееся тем, что вероятность удара молнии в объект, целиком размещенный в его объеме, не превышает заданной величины.

Допустимая вероятность прорыва молнии - предельно допустимая вероятность, p , удара молнии в объект, защищаемый молниеотводами.

Надежность молниезащиты определяется как $1 - p$.

4.2. Принцип действия молниеотводов

Для защиты стационарного и подстанционного оборудования от прямых ударов молнии используется система молниеотводов. Назначение молниеотвода – принять на себя подавляющее число ударов молнии в пределах защищаемой территории и отвести ток молнии в землю. Молниеотвод состоит из молниеприемника, непосредственно воспринимающего удар молнии на себя, токоотвода и заземлителя. Молниеприемник представляет собой металлический

электрод, масса и проводимость которого обеспечивают протекание импульсного тока молнии без разрушения этого электрода. Тем же требованиям должен удовлетворять токоотвод – проводник, соединяющий молниеприемник с заземлителем. Заземлитель молниеотвода выполняется из вертикальных и (или) горизонтальных стальных электродов, погруженных в землю на глубину, обеспечивающую постоянное увлажнение их поверхности для лучшего контакта с землей.

Защитное действие молниеотвода основано на том, что во время лидерной стадии молнии на вершине молниеотвода скапливаются заряды, и наибольшая напряженность электрического поля создается на пути между развивающимся лидером и вершиной молниеотвода. При приближении лидера молнии напряженность электрического поля возле молниеотвода возрастает сильнее, чем возле защищаемого объекта. Возникновение и развитие встречного лидера с молниеотвода еще более усиливает напряженность электрического поля на этом пути и ослабляет поле между лидером и защищаемым объектом, тормозя развитие встречного лидера с объекта, что и приводит к удару молнии в молниеотвод. Вокруг молниеотвода образуется зона защиты – пространство, вероятность попадания молнии в которое является достаточно малой. При этом высота над поверхностью земли, при которой лидер начинает ориентироваться по направлению к наиболее высокому наземному объекту, называется высота ориентировки молнии. Если головка лидера на высоте ориентировки молнии находится в точке, расположенной над молниеотводом, то разряд молнии поразит молниеотвод. По мере удаления точки ориентировки молнии от молниеотвода увеличивается вероятность удара молнии в землю, а при достаточном удалении разряды молнии будут поражать в основном землю.

Если вблизи молниеотвода поместить более низкий защищаемый объект, то при определенном расстоянии между молниеотводом и объектом разрядное напряжение промежутка лидер – объект будет всегда больше разрядного промежутка лидер – молниеотвод и лидер – земля. Тем самым объект будет всегда защищен от прямого удара молнии.

Защитное действие молниеотвода характеризуется его зоной защиты, т.е. той частью пространства около молниеотвода, в которой число попаданий молнии в защищаемый объект снижается не менее чем в 20 или 200 раз. Это означает, что вероятность прорыва молнии в защищаемый объект не превосходит 0,05 или 0,005 относительно вероятности попадания молнии в случае отсутствия молниеотвода. Вероятность прорыва определяется как отношение числа разрядов молнии в объект к полному числу разрядов молнии в систему объект – земля – молниеотвод при наиболее неблагоприятном расположении канала молнии по отношению к объекту. Допустимая вероятность прорыва молнии для неответственных объектов составляет не более 0,05. Для ответственных объектов, поражение которых грозит гибелью людей или большими материальными потерями, допустимая вероятность прорыва составляет не более 0,005. Поскольку число разрядов молнии в непротяженные объекты высотой до 30 м, обычно составляет не более одного раза в 10 лет, то при вероятности прорыва молнии равной 0,05 объект будет поражаться молнией не чаще, чем раз в 200 лет, а при вероятности 0,005 – не чаще, чем раз в 2000 лет. Исходя из этих соображений, и определяют уровни защиты.

Для объектов электроэнергетики нормируется два типа зон: зона защиты типа *А* обладает надежностью не ниже 0,995 (вероятность прорыва молнии не выше 0,005) для заземленных объектов, на всех элементах которых отсутствует напряжение относительно земли; зона защиты типа *Б* имеет надежность не ниже 0,95 (вероятность прорыва молнии не выше 0,05). Рабочее напряжение 750 кВ и 1150 кВ на ошиновке распределительного устройства заметно снижает надежность защиты. Элементы токопроводов и аппаратов защищаются молниеотводами с зоной типа *А*, но если рабочее напряжение 750 кВ и выше, надежность их защиты отождествляется с гарантированной зоной типа *Б*.

Наибольшая надежность молниезащиты 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 ацетилено-генераторной станции; угледро-

билке, вагонопрокидывателям, 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.

Конструктивно молниеотводы разделяются на стержневые, тросовые, а также молниезащитные сетки и металлические кровли. Стержневые молниеотводы выполняются в виде вертикально установленных стержней (мачт) на заземленных конструкциях сооружения или рядом с ним, надежно соединенных с заземлителем. Стержневые молниеотводы бывают одиночными, двойными и многократными. Тросовые молниеотводы имеют молниеприемник в виде горизонтально подвешенных проводников – тросов, соединенных с заземлителем через токоотводы, проложенные по поддерживающим трос опорам. Тросовые молниеотводы в виде грозозащитных тросов применяют для защиты протяженных объектов, например, ВЛ (рис. 4.1), перемычек между трансформаторами, установленными на плотине ГЭС, и распределительными устройствами. Тросовые молниеотводы бывают одиночными и двойными. Их натягивают над защищаемыми проводами на достаточной высоте и заземляют на опорах для свободного стекания тока молнии в землю.

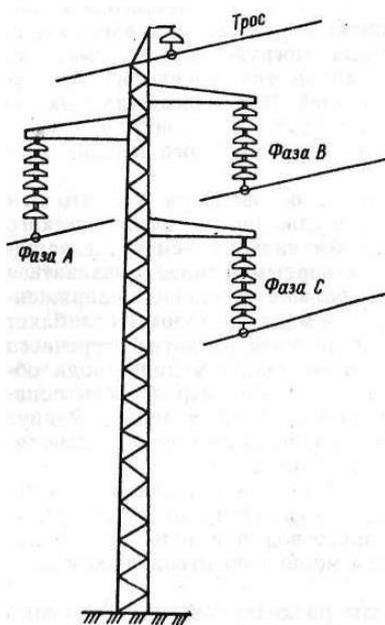


Рис. 4.1. Расположение грозозащитного троса на опоре ВЛ высокого напряжения

4.3. Определение зон защиты молниеотводов

4.3.1. Одиночный стержневой молниеотвод

Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода представляет собой круговой конус с вершиной, расположенной на высоте $h_0 < h$, где h – высота молниеотвода. На уровне земли зона защиты образует круг радиусом r_0 . Горизонтальное сечение зоны защиты на высоте защищаемого объекта h_x также представляет собой круг, но радиусом r_x . Параметры зоны защиты зависят от степени надежности защиты (см. рис. 4.2). Зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода на уровне земли и на высоте защищаемого объекта приведены на рис. 4.3.

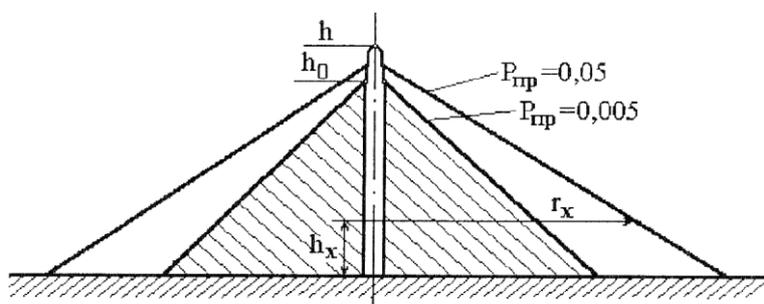


Рис. 4.2. Пояснение зон молниезащиты при разной степени надежности защиты

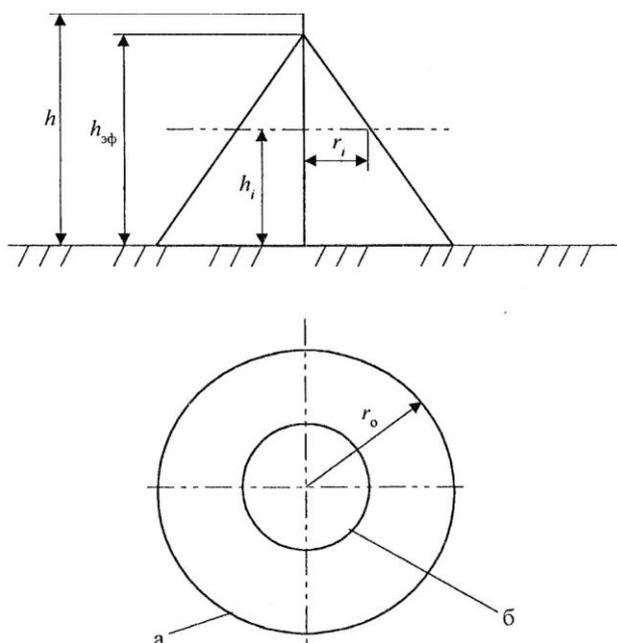


Рис. 4.3. Зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода:

а) на уровне земли; б) на высоте защищаемого объекта

К параметрам зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода относятся:

- эффективная высота молниеотвода $h_{эф}$,
- радиус зоны защиты на уровне земли r_0 ,
- радиус зоны защиты на высоте защищаемого объекта r_x .

Они определяются в зависимости от зоны защиты и высоты молниеотвода.

Зона А ($p \leq 0,005$)

Эффективная высота молниеотвода $h_{эф}$ и радиус зоны защиты на уровне земли r_0 определяются в зависимости от высоты молниеотвода по разным выражениям.

При высоте молниеотвода $h \leq 150$ м

$$\begin{aligned} h_{эф} &= 0,85h; \\ r_0 &= (1,1 - 0,002h)h. \end{aligned} \quad (4.1)$$

При высоте молниеотвода $h > 150$ м

$$\begin{aligned} h_{эф} &= (0,85 - 1,7 \cdot 10^{-3}(h - 150))h; \\ r_0 &= (0,8 - 1,8 \cdot 10^{-3}(h - 150))h. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Независимо от высоты молниеотвода определяется радиус зоны защиты на высоте защищаемого объекта r_x

$$r_x = r_0 \left(1 - \frac{h_x}{h_{эф}}\right). \quad (4.3)$$

Зона В ($p \leq 0,05$)

При высоте молниеотвода $h \leq 150$ м

$$\begin{aligned} h_{эф} &= 0,92h \\ r_0 &= 1,5h \end{aligned} \quad (4.4)$$

При высоте молниеотвода $h > 150$ м

$$\begin{aligned} h_{эф} &= (0,92 - 0,8 \cdot 10^{-3}(h - 150))h \\ r_0 &= 2,25h \end{aligned} \quad (4.5)$$

Радиус зоны защиты на высоте защищаемого объекта r_x определяется также как и для зоны А, т.е. по формуле (4.3).

4.3.2. Двойной стержневой молниеотвод

Два молниеотвода рассматриваются как совместно действующие, если расстояние между ними, L_{M-M} не превышает четырех высот наименьшего по высоте молниеотвода для зоны *A* и шести высот – для зоны *B*:

$$\text{Зона } A - L_{M-M} \leq 4h_{\min}, \quad \text{зона } B - L_{M-M} \leq 6h_{\min}.$$

Эти молниеотводы и являются двойными стержневыми, у них зона защиты увеличивается по сравнению с суммой зон защиты каждого из них. Если высоты молниеотводов одинаковые, то они являются равновеликими, если их высоты не одинаковы, то молниеотводы разновеликие.

Равновеликие молниеотводы

Зоны защиты двойного стержневого равновеликого молниеотвода высотой до 150 м на уровне земли и на высоте защищаемых объектов показаны на рис. 4.4.

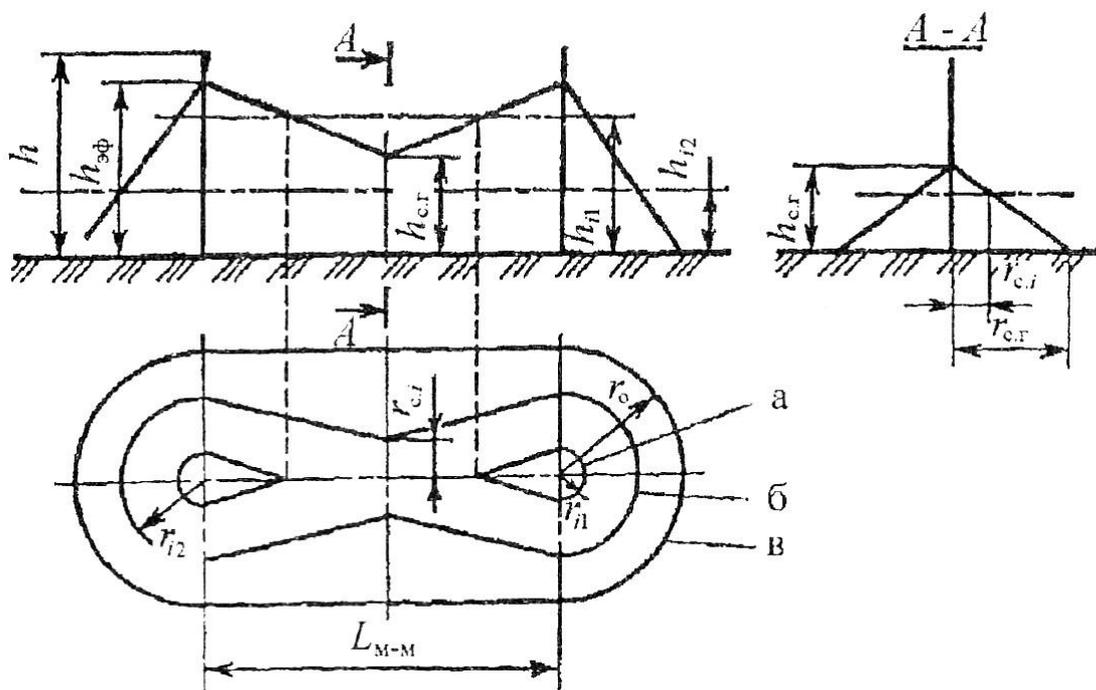


Рис. 4.4. Зоны защиты двойного стержневого молниеотвода:

- а) на уровне защищаемого объекта h_{i1} ;
- б) на высоте защищаемого объекта h_{i2} ;
- в) на уровне земли

У двойных молниеотводов различают внешнюю и внутреннюю зоны защиты. К параметрам внешней зоны защиты относятся:

- эффективная высота молниеотвода $h_{эф}$,
- радиус зоны защиты на уровне земли r_0 ,
- радиус зоны защиты на высоте защищаемого объекта r_x .

Эти параметры определяются также как для одиночного стержневого молниеотвода.

К параметрам внутренней зоны защиты относятся:

- наименьшая высота внутренней зоны h_{cx} ,
- половина ширины внутренней зоны на уровне земли r_{c0} ,
- половина ширины внутренней зоны на уровне высоты защищаемого объекта r_{cx} .

Эти параметры определяются в зависимости от типа зоны и расстояния между молниеотводами.

Зона А ($p \leq 0,005$)

Если расстояние между молниеотводами находится в пределах $h < L_{M-M} \leq 2h$, то наименьшая высота внутренней зоны h_{cx} , и половина ширины внутренней зоны на уровне земли r_{c0} определяются по выражениям:

$$\begin{aligned} h_{cx} &= h_{эф} - (0,17 + 3 \cdot 10^{-4} h)(L_{M-M} - h) \\ r_{c0} &= r_0 \end{aligned} \quad (4.6)$$

Если $2h < L_{M-M} \leq 4h$, то

$$\begin{aligned} h_{cx} &= h_{эф} - (0,17 + 3 \cdot 10^{-4} h)(L_{M-M} - h) \\ r_{c0} &= r_0 \left(1 - \frac{0,2(L_{M-M} - 2h)}{h} \right) \end{aligned} \quad (4.7)$$

Зона В ($p \leq 0,05$)

Наименьшая высота внутренней зоны h_{cx} , и половина ширины внутренней зоны на уровне земли r_{c0} независимо от высоты молниеотводов определяются по выражениям:

$$\begin{aligned} h_{cx} &= h_{эф} - 0,14(L_{M-M} - h) \\ r_{c0} &= r_0 \end{aligned} \quad (4.8)$$

Для обеих зон половина ширины внутренней зоны на уровне высоты защищаемого объекта r_{cx} определяется по формуле:

$$r_{cx} = r_{c0} \frac{h_{cx} - h_x}{h_{cx}} \quad (4.9)$$

Разновеликие молниеотводы

Зоны защиты двойного стержневого разновеликого молниеотвода высотой до 150 м показаны на рис. 4.5.

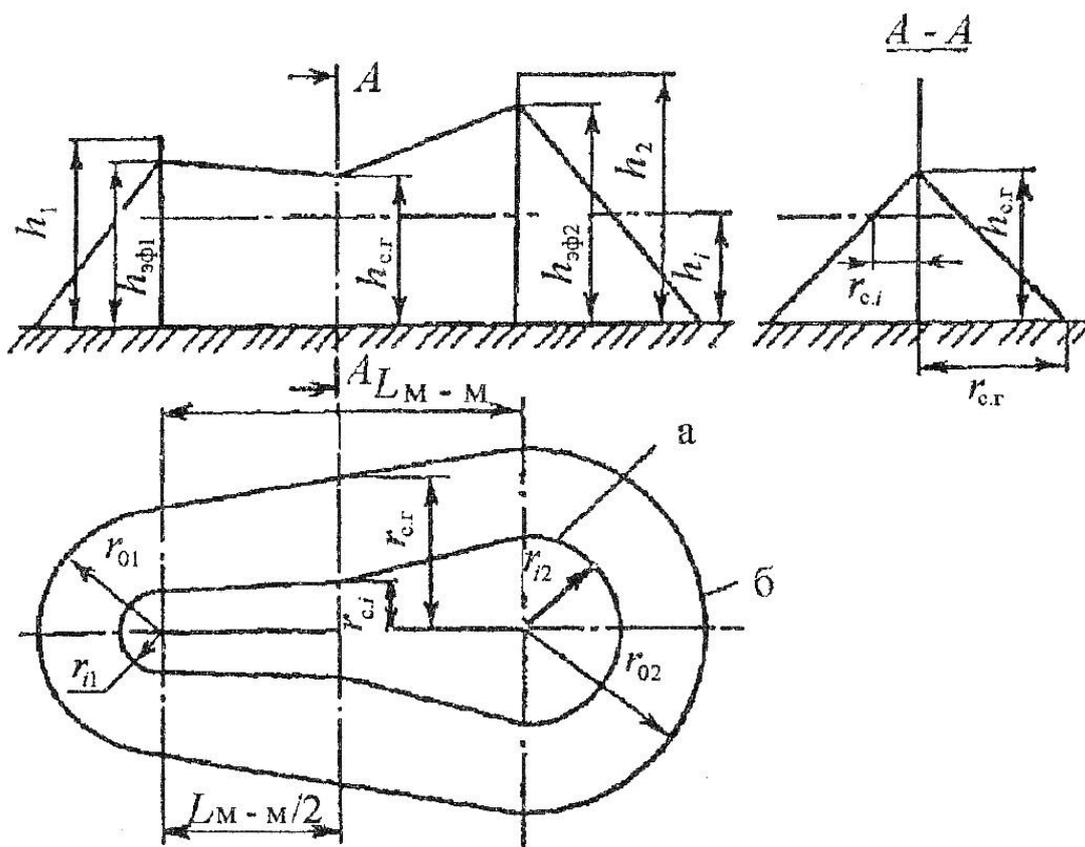


Рис. 4.5. Зоны защиты двойного стержневого разновеликого молниеотвода
а) на уровне защищаемого объекта h_x ; б) на уровне земли

Параметры внешней зоны определяются также как и для одиночного молниеотвода отдельно для каждого из них.

Параметры внутренней зоны определяются так. Вначале оба молниеотвода рассматриваются как равновеликие с высотой первого молниеотвода h_1 и определяются параметры внешней зоны h_{cx1} и r_{cx1} . Затем оба молниеотвода рассматриваются как равновеликие с высотой второго молниеотвода h_2 и определяются параметры внешней зоны h_{cx2} и r_{cx2} . Значения наименьшей высоты внутренней

зоны h_{cx} и радиуса зоны защиты на высоте защищаемого объекта r_x разновеликого молниеотвода определяются как средние между соответствующими параметрами для равновеликих стержневых молниеотводов высотой h_1 и h_2 :

$$h_{cx} = \frac{h_{cx1} + h_{cx2}}{2} \quad (4.10)$$

$$r_{cx} = \frac{r_{cx1} + r_{cx2}}{2}$$

4.3.3. Многократный стержневой молниеотвод

Зона защиты стержневых молниеотводов с числом более двух определяется объединением зон защиты попарно взятых соседних молниеотводов высотой $h \leq 150$ м (рис. 4.6). Такие молниеотводы называются многократными, и их суммарная зона защиты определяется попарными зонами защиты ближайших молниеотводов, если для всех соседних пар $r_{ci} > 0$. В противном случае молниеотводы рассматриваются как двойные или одиночные.

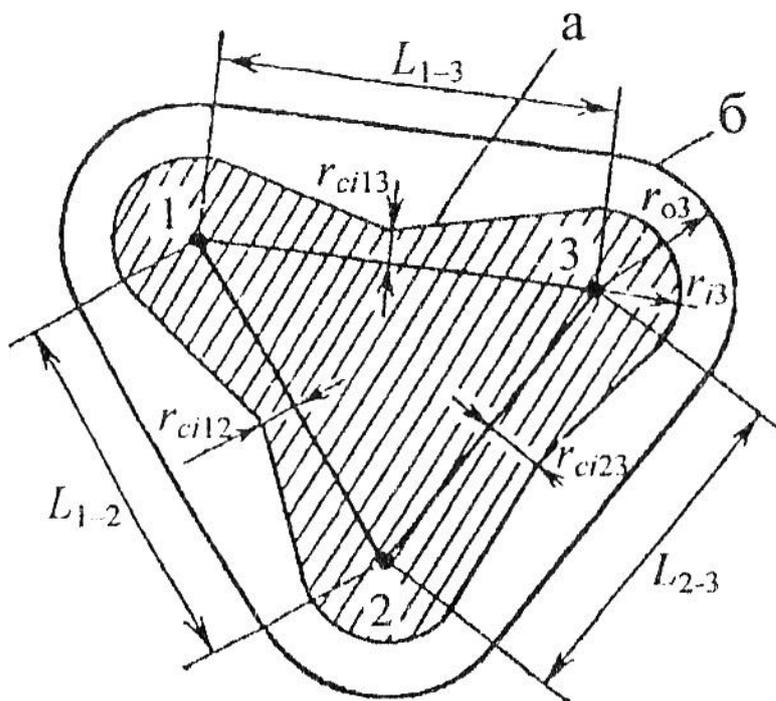


Рис. 4.6. Зоны защиты многократного стержневого молниеотвода:

а) на уровне высоты защищаемого объекта h_x ; б) на уровне земли

Параметры зоны защиты определяются попарно, рассматривая по два молниеотвода как двойные стержневые молниеотводы по формулам, приведенным выше.

4.3.4. Одиночный тросовый молниеотвод

Зона защиты одиночного тросового молниеотвода (рис. 4.7) определяется по высоте его подвеса h в середине пролета длиной $l_{\text{прол}}$.

Для троса сечением 35-50 мм² расчетная высота подвеса равна:

при $120 < l_{\text{прол}} \leq 150$ м $h = h_{\text{оп}} - 3$ (м),

при $l_{\text{прол}} \leq 120$ м $h = h_{\text{оп}} - 2$ (м),

где $h_{\text{оп}}$ - высота подвеса троса на опоре.

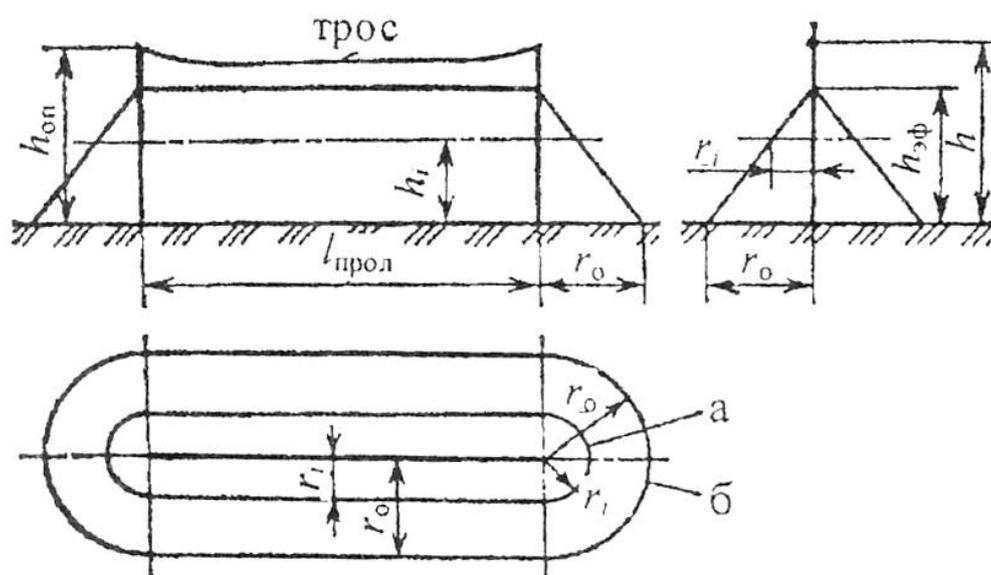


Рис. 4.7. Зоны защиты одиночного тросового молниеотвода

а) на уровне высоты защищаемого объекта h_i ; б) на уровне земли

Параметры зоны защиты одиночного тросового молниеотвода (обозначения те же, что и у стрелевого молниеотвода) определяются в зависимости от зоны защиты.

Зона А ($p \leq 0,005$)

$$h_{\text{эф}} = 0,85h$$

$$r_x = (1,35 - 0,0025h) \left(h - \frac{h_x}{0,85} \right) \quad (4.11)$$

Зона Б ($p \leq 0,05$)

$$h_{\text{эф}} = 0,95h$$

$$r_x = 1,7 \left(h - \frac{h_x}{0,95} \right) \quad (4.12)$$

4.3.5. Два тросовых молниеотвода

Тросовые молниеотводы могут быть подвешены на одной высоте или на разных высотах. Зона защиты тросовых молниеотводов одинаковой высоты ($h \leq 150$ м) с расстоянием L_{M-M} друг от друга, приведена на рис. 4.8.

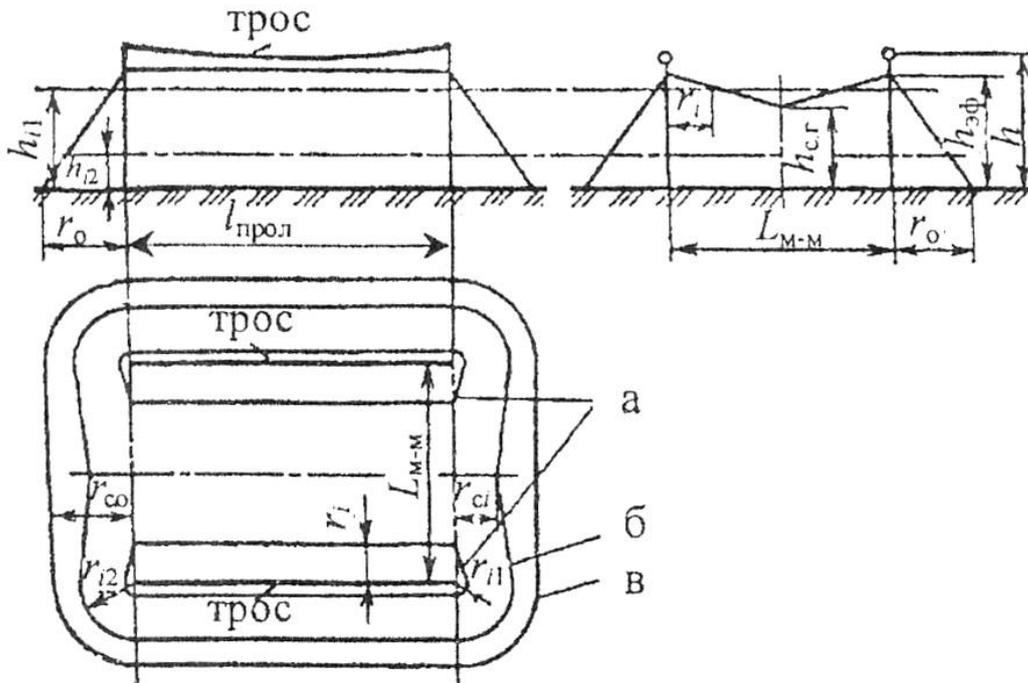


Рис. 4.8. Зоны защиты системы из двух тросовых молниеотводов одинаковой высоты:

- а) на уровне защищаемого объекта h_{i1} , верхний провод;
- б) на высоте защищаемого объекта h_{i2} , нижний провод;
- в) на уровне земли

Параметры зоны защиты системы из двух тросовых молниеотводов одной высоты зависят от типа зоны защиты, расстояния между молниеотводами. Параметры внешней зоны защиты определяются как для одного тросового молниеотвода.

При расстоянии между молниеотводами $L_{M-M} < h$ для зон *А* и *Б* наименьшая высота внутренней зоны посередине между ними, h_{cx} равна эффективной высоте молниеотвода:

$$h_{cx} = h_{эф} \quad (4.13)$$

Зона *А* ($p \leq 0,005$)

При расстоянии между молниеотводами $h < L_{M-M} \leq 4h$

$$h_{cx} = h_{эф} - (0,14 + 5 \cdot 10^{-4} h)(L_{M-M} - h). \quad (4.14)$$

Зона Б ($p \leq 0,05$)

При расстоянии между молниеотводами $h < L_{M-M} \leq 6h$

$$h_{cx} = h_{эф} - 0,12(L_{M-M} - h). \quad (4.15)$$

Радиус зоны защиты на высоте защищаемого объекта r_x для зоны А и Б определяется по формуле:

$$r_{cx} = \frac{L_{M-M}}{2} \left(\frac{h_{эф} - h_x}{h_{эф} - h_{cx}} \right) \quad (4.16)$$

Зона защиты двух тросов разной высоты показана на рис. 4.9.

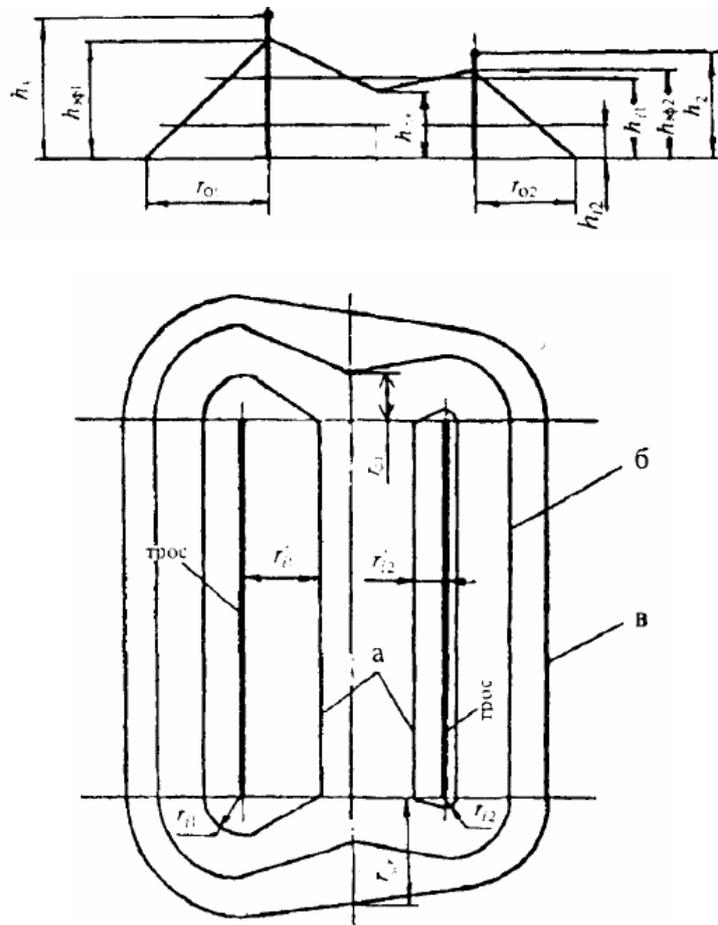


Рис.4.9. Зоны защиты системы из двух тросовых молниеотводов разной высоты:

- а) на уровне защищаемого объекта h_{i1} ;
- б) на высоте защищаемого объекта h_{i2} ;
- в) на уровне земли.

Параметры внешней и внутренней зон защиты определяются также как и для стержневых молниеотводов разной высоты, но по формулам для системы из двух тросовых молниеотводов одинаковой высоты.

4.4. Конструктивное исполнение молниеотводов

Наиболее простым и дешевым решением для электрических станций и подстанций является расположение молниеотводов на металлических конструкциях ОРУ и других высоких объектах: порталах, прожекторных мачтах и крышах зданий. 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. Необходимо помнить, что молниеотводы на трансформаторных порталах не устанавливаются из-за низкого импульсного разрядного напряжения вводов 6 – 10 кВ. Для снижения вероятности повреждения изоляции силовых трансформаторов, их корпуса должны быть заземлены на расстоянии не менее 15 м вдоль полосы заземлителя от точки присоединения к заземлителю молниеотводов. Можно выполнять молниеотводы отдельно стоящими. Для отдельно стоящих молниеотводов в качестве несущих элементов используются железобетонные стойки при высоте до 20 м и стальные решетчатые конструкции при высоте более 20 м. Рекомендуется молниеотводы выполнять в виде свободно стоящих конструкций без растяжек.

Если при установке молниеотводов на конструкциях ОРУ необходимая грозоупорность не может быть достигнута или порталы не рассчитаны на установку молниеотводов, молниезащиту 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.

Для подстанций, расположенных в местности с высоким удельным электрическим сопротивлением грунта, целесообразна установка отдельно стоящих молниеотводов, имеющих отдельные заземлители, электрически не связанные с заземляющим контуром подстанции. При их установке должны быть соблюдены безопасные расстояния по воздуху и в земле от молниеотводов и их заземлителей до элементов распределительного устройства.

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 щепление бетона. Этот способ молниезащиты зданий не рекомендуется в сильногрозовых районах.

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_c определяется по формуле:

$$N_c = p_o (a_c + 2R_{\text{экв}})(b_c + 2 R_{\text{экв}}) \cdot 10^{-6}, \quad (4.17)$$

где 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:

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

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

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

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:

$$L_T \geq 0,6R_z \text{ и } L_T \geq 10 \text{ м.} \quad (4.18)$$

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.

Рассмотрим конструкцию элементов молниеотвода: молниеприемников, токоотводов и заземлителей.

Молниеприемники могут быть специально установленными, в том числе на объекте, либо их функции выполняют конструктивные элементы защищаемого объекта; в последнем случае они называются естественными молниеприемниками. Молниеприемники могут состоять из произвольной комбинации следу-

ющих элементов: стержней, натянутых проводов (тросов), сетчатых проводников (сеток).

Молниеприемники должны выдерживать термические и электрические воздействия тока молнии, поэтому рекомендуется применять стальные молниеприемники сечением $50 - 100 \text{ мм}^2$ для стержневых и однопроволочных тросовых молниеприемников. Поперечное сечение стальных многопроволочных тросов должно быть не менее 35 мм^2 .

Естественными молниеприемниками могут быть следующие конструктивные элементы зданий и сооружений: металлические кровли защищаемых объектов; металлические конструкции крыши (фермы, соединенная между собой стальная арматура); металлические элементы типа водосточных труб, украшений, ограждений по краю крыши и т.п., если их сечение не меньше значений, выбираемых для обычных молниеприемников; технологические металлические трубы и резервуары, если они выполнены из металла толщиной не менее $2,5 \text{ мм}$ и проплавление или прожог этого металла не приведет к опасным или недопустимым последствиям; металлические трубы и резервуары, если они выполнены из металла толщиной не менее значения, приведенного в табл. 4.1, и если повышение температуры с внутренней стороны объекта в точке удара молнии не представляет опасности.

Металлические кровли защищаемых объектов могут быть естественными молниеприемниками при выполнении следующих условий:

- электрическая непрерывность между разными частями обеспечена на долгий срок;
- толщина металла кровли составляет не менее величины t , приведенной в табл. 4.1, если необходимо предохранить кровлю от повреждения или прожога;
- толщина металла кровли составляет не менее $0,5 \text{ мм}$, если ее необязательно защищать от повреждений и нет опасности воспламенения находящихся под кровлей горючих материалов;

➤ кровля не имеет изоляционного покрытия. При этом небольшой слой антикоррозионной краски или слой 0,5 мм асфальтового покрытия, или слой 1 мм пластикового покрытия не считается изоляцией;

➤ неметаллические покрытия на/или под металлической кровлей не выходят за пределы защищаемого объекта;

Таблица 4.1. – Толщина кровли, трубы или корпуса резервуара, выполняющих функции естественного молниеприемника

Материал	Железо	Медь	Алюминий
Толщина, не менее, мм	4	5	7

Токоотводы. В качестве токоотводов на подстанциях и электрических станциях могут использоваться порталы, предназначенные для подвески ошиновки, на которых установлены молниеприемники, либо другие металлические конструкции.

В целях снижения вероятности возникновения опасного искрения токоотводы должны располагаться таким образом, чтобы между точкой поражения и землей ток растекался по нескольким параллельным путям, и длина этих путей была ограничена до минимума.

Если молниеприемник состоит из стержней, установленных на отдельно стоящих опорах (или одной опоре), на каждую опору должен быть предусмотрен минимум один токоотвод.

Если молниеприемник состоит из отдельно стоящих горизонтальных проводов (тросов) или из одного провода (троса), на каждый конец троса требуется минимум по одному токоотводу.

Если молниеприемник представляет собой сетчатую конструкцию, подвешенную над защищаемым объектом, на каждую ее опору требуется не менее одного токоотвода. Общее количество токоотводов должно быть не менее двух.

Желательно, чтобы токоотводы равномерно располагались по периметру защищаемого объекта. По возможности они прокладываются вблизи углов зданий.

Не изолированные от защищаемого объекта токоотводы прокладываются следующим образом:

- если стена выполнена из негорючего материала, токоотводы могут быть закреплены на поверхности стены или проходить в стене;

- если стена выполнена из горючего материала, токоотводы могут быть закреплены непосредственно на поверхности стены, так чтобы повышение температуры при протекании тока молнии не представляло опасности для материала стены;

- если стена выполнена из горючего материала и повышение температуры токоотводов представляет для него опасность, токоотводы должны располагаться таким образом, чтобы расстояние между ними и защищаемым объектом всегда превышало 0,1 м. Металлические скобы для крепления токоотводов могут быть в контакте со стеной.

Токоотводы прокладываются по прямым и вертикальным линиям, так чтобы путь до земли был по возможности кратчайшим. Не рекомендуется прокладка токоотводов в виде петель.

Следующие конструктивные элементы зданий могут считаться естественными токоотводами:

а) металлические конструкции при условии, что:

- электрическая непрерывность между разными элементами является долговечной;

- они имеют не меньшие размеры, чем требуются для специально предусмотренных токоотводов;

- металлические конструкции могут иметь изоляционное покрытие;

б) металлический каркас здания или сооружения;

в) соединенная между собой стальная арматура здания или сооружения;

г) части фасада, профилированные элементы и опорные металлические конструкции фасада при условии, что:

- их размеры соответствуют указаниям, относящимся к токоотводам, а их толщина составляет не менее 0,5 мм.

Металлическая арматура железобетонных строений считается обеспечивающей электрическую непрерывность, если она удовлетворяет следующим условиям:

- примерно 50% соединений вертикальных и горизонтальных стержней выполнены сваркой или имеют жесткую связь (болтовое крепление, вязка проволокой);
- электрическая непрерывность обеспечена между стальной арматурой различных заранее заготовленных бетонных блоков и арматурой бетонных блоков, подготовленных на месте.

В прокладке горизонтальных поясов нет необходимости, если металлические каркасы здания или стальная арматура железобетона используются как токоотводы.

Заземлители.

Для устройства заземлений применяются вертикальные и горизонтальные электроды – заземлители. Для горизонтальных заземлителей используется полосовая сталь шириной 20 – 40 мм и толщиной не менее 4 мм, а также сталь круглого сечения диаметром не менее 6 мм. В качестве вертикальных заземлителей применяются стальные трубы, стержни и профильная сталь. Применяют также кольцевые и комбинированные заземлители. На подстанциях заземлитель представляет собой сложную систему, состоящую из горизонтальных полос, объединяющих вертикальные электроды и образующих сетку на площади, занимаемой подстанцией или станцией. На воздушных линиях электропередачи в качестве заземлителя опор могут использоваться фундаменты.

Целесообразно использовать следующие типы заземлителей: один или несколько контуров, вертикальные (или наклонные) электроды, радиально расходящиеся электроды или заземляющий контур, уложенный на дне котлована, заземляющие сетки. На рис. 4.10 приведены конструкции заземлителей.

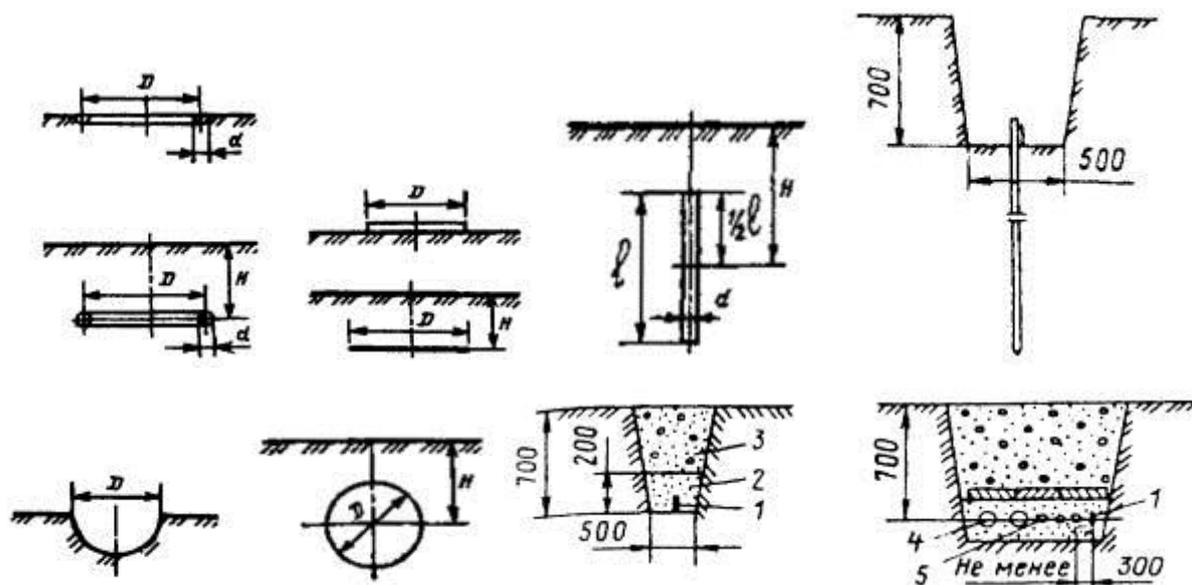


Рис. 4.10. Конструкции заземлителей

Во всех случаях, за исключением использования отдельно стоящего молниеотвода, заземлитель молниезащиты следует совместить с заземлителями электроустановок и средств связи. Если эти заземлители должны быть разделены по каким-либо технологическим соображениям, их следует объединить в общую систему с помощью системы уравнивания потенциалов.

Сильно заглубленные заземлители оказываются эффективными, если удельное сопротивление грунта уменьшается с глубиной и на большой глубине оказывается существенно меньше, чем на уровне обычного расположения.

Заземлитель в виде наружного контура предпочтительно прокладывать на глубине не менее 0,5 м от поверхности земли и на расстоянии не менее 1 м от стен. Заземляющие электроды должны располагаться на глубине не менее 0,5 м за пределами защищаемого объекта и быть как можно более равномерно распределенными; при этом надо стремиться свести к минимуму их взаимное экранирование.

Глубина закладки и тип заземляющих электродов выбираются из условия обеспечения минимальной коррозии, а также возможно меньшей сезонной вариации сопротивления заземления в результате высыхания и промерзания грунта.

В качестве естественных заземляющих электродов может использоваться соединенная между собой арматура железобетона или иные подземные метал-

лические конструкции, отвечающие требованиям по толщине. Если арматура железобетона используется как заземляющие электроды, повышенные требования предъявляются к местам ее соединений, чтобы исключить механическое разрушение бетона. Если используется преднапряженный бетон, следует учесть возможные последствия протекания тока молнии, который может вызвать недопустимые механические нагрузки.

Молниеприемники и токоотводы жестко закрепляются так, чтобы исключить любой разрыв или ослабление крепления проводников под действием электродинамических сил или случайных механических воздействий (например, от порыва ветра или падения снежного пласта).

Количество соединений проводника сводится к минимальному. Соединения выполняются сваркой, пайкой, допускается также вставка в зажимной наконечник или болтовое крепление.

Во всех случаях система защиты от прямых ударов молнии выбирается так, чтобы максимально использовались естественные молниеотводы, а если обеспечиваемая ими защищенность недостаточна - в комбинации со специально установленными молниеотводами.

При прочих равных условиях высоту молниеотводов можно снизить, если вместо стержневых конструкций применять тросовые, особенно при их подвеске по внешнему периметру объекта.

4.5. Заземление молниезащиты

Заземление молниезащиты служит для отвода тока молнии в землю от молниеотводов или других конструкций, в которые произошел удар молнии, от защитных аппаратов.

Заземлитель характеризуется сопротивлением, которое окружающая земля оказывает стекающему с него току. Сопротивление заземлителя при стекании с него тока промышленной частоты называется стационарным, **R**.

При больших импульсных токах - токах молнии напряженность электрического поля вблизи поверхности заземлителя превышает пробивную напряженность грунта. В земле возникают искровые процессы вокруг электродов, увели-

чивающие их эффективные размеры и снижающие сопротивление заземления (см. рис. 4.11).

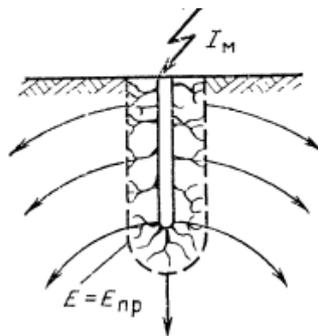


Рис. 4.11. Искровая зона вокруг вертикального электрода

Быстрое нарастание тока молнии на фронте импульса создает падение напряжения на горизонтальном заземлителе. Если заземлитель достаточно длинный, то с удаленных его участков, вследствие влияния индуктивности стекает ток меньший, чем в стационарном режиме. Из-за этого эффективная длина заземлителя уменьшается, а сопротивление увеличивается. В результате сопротивление заземлителя в импульсном режиме отличается от его стационарного сопротивления.

Импульсным сопротивлением заземлителя называют отношение импульсного падения напряжения на заземлителе к протекающему через него импульсному току:

$$R_u = U_u / I_u .$$

Сопротивление заземлителя при стекании с него тока молнии является импульсным, а отношение импульсного сопротивления заземлителя к стационарному называется импульсным коэффициентом, α_u

$$\alpha = R_u / R . \quad (4.19)$$

Заземлитель небольшой длины, у которого индуктивность практически не играет роли, называется сосредоточенным. У него импульсный коэффициент меньше единицы из-за влияния искровых процессов. Сосредоточенные заземлители имеют тем меньшее импульсное сопротивление, чем больше ток молнии, проходящий через заземлитель, и чем выше удельное сопротивление грунта.

Длинный заземлитель, у которого заметно влияние индуктивности, называется протяженным. Импульсный коэффициент протяженного заземлителя больше единицы, и чем больше его длина и меньше длительность фронта импульса тока молнии, тем выше его значение. При значениях импульсного коэффициента намного выше единицы использование протяженных заземлителей становится нерациональным. В табл. 4.2 приведены предельно рациональные длины протяженных заземлителей в грунтах с различным удельным электрическим сопротивлением при амплитуде тока молнии 40 кА и длине фронта импульса 3 – 6 мкс. Следует иметь в виду, что у поверхности протяженного заземлителя имеют место искровые процессы, но они ослабевают по мере удаления от начала заземлителя, поскольку уменьшаются его потенциал и плотность стекающего тока молнии.

Таблица 4.2 – Предельные длины протяженных заземлителей

ρ , Ом·м	500	1000	2000	4000
$l_{пред}$, м	35 – 40	40 – 50	60 – 80	80 – 100

4.5.1. Определение стационарного сопротивления заземлителей разной конструкции

1. Вертикальный электрод круглого сечения

Верхний конец электрода лежит на поверхности грунта

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}. \quad (4.20)$$

Верхний конец не доходит до поверхности грунта, а середина электрода находится на глубине заложения h_z от поверхности земли

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + 0,5 \ln \frac{4h_z + l}{4h_z - l} \right). \quad (4.21)$$

2. Вертикальная труба

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l(2t + l)}{d(4t + l)}. \quad (4.22)$$

3. Горизонтальный лучевой заземлитель круглого сечения, расположенный на глубине h_z

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l^2}{h_3 d}. \quad (4.23)$$

4. Кольцевой заземлитель

$$D \gg 2h_3$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \ln \frac{4\pi D^2}{h_3 d} \quad (4.24)$$

$$h_3 > 0,5D$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left(\ln \frac{8D}{d} + \frac{\pi D}{2h_3} \right)$$

5. Круглая пластина

$$R = \frac{\rho}{4D} \left(1 + \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{D}{\sqrt{16h_3 + D}} \right). \quad (4.25)$$

6. Симметрично размещенные наклонные электроды

Верхние концы электродов лежат на поверхности грунта, наклон 45°

$$R = \frac{\rho}{2\pi n l} \ln \left(\frac{2l}{d} + A_n \right),$$

$$\text{где при } n = 2 \quad A_n = 2,45 \quad (4.26)$$

$$n = 3 \quad A_n = 4,27$$

$$n = 4 \quad A_n = 6,18$$

Здесь ρ – удельное электрическое сопротивление грунта;

l – длина электрода;

d – диаметр электрода;

D – диаметр кольца (пластины);

h_3 – глубина заложения;

n – число электродов.

Если электрод имеет не круглое сечение, то необходимо для него определить эквивалентный диаметр d по следующим формулам:

1. Прямоугольник со сторонами A и B

$$d = 0,64(A + B); \quad (4.27)$$

2. Полоса шириной b , уложенная:

плашмя

$$d = 0,5b; \quad (4.28)$$

на ребро

$$d = b.$$

3. Прямоугольная пластина со сторонами A и B

$$d = 1,13\sqrt{AB}. \quad (4.29)$$

Для воздушных линий и молниеотводов применяют также сложные заземлители, т.е. заземлители, состоящие из n вертикальных электродов и соединительной полосы, например, четырехстержневые, состоящие из одной полосы и четырех стержней.

Стационарное сопротивление сложного заземлителя определяется по формуле:

$$R_{cl} = \frac{R_B R_{II}}{R_B \eta_{II} + R_{II} n \eta_B}, \quad (4.30)$$

где R_B, R_{II} – стационарные сопротивления единичного вертикального электрода и соединительной полосы;

η_B, η_{II} – их коэффициенты использования.

4.5.2. Определение импульсного сопротивления заземлителя

Импульсное сопротивление одиночного заземлителя определяется через импульсный коэффициент:

$$R_u = \alpha_u R_c. \quad (4.31)$$

Импульсное сопротивление сложного заземлителя, состоящего из n вертикальных стержней, соединенных полосой, длиной l , определяется по формуле:

$$R_{u\,cl} = \frac{R_{uB} R_{uII}}{R_{uB} + n R_{uII}} \frac{l}{\eta_u}, \quad (4.32)$$

где R_{uB}, R_{uII} – импульсное сопротивление одиночных вертикального и полосового заземлителей;

η_u – импульсный коэффициент использования сложного заземлителя, учитывающий взаимное расположение поблизости друг от друга одиночных заземлителей.

Импульсные коэффициенты заземлителей и коэффициенты использования заземлителей приведены в [23].

Согласно [16] допустимые (нормируемые) значения сопротивлений заземлений отдельно стоящего молниеотвода не должны превышать 25 Ом. Наибольшие сопротивления заземляющих устройств опор ВЛ, нормируемые ПУЭ, зависят от удельного эквивалентного сопротивления грунта и приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3. – Наибольшие сопротивления заземляющих устройств опор ВЛ

Удельное эквивалентное сопротивление грунта, ρ , Ом·м	Наибольшее сопротивление заземляющего устройства, Ом
$\rho < 100$	10
$100 \leq \rho \leq 500$	15
$500 \leq \rho \leq 1000$	20
$1000 \leq \rho \leq 5000$	30
$\rho > 5000$	$6 \cdot 10^{-3} \rho$

4.5.3. Заземление молниезащиты подстанций

В установках высокого напряжения различают три вида заземлений: рабочее, защитное и заземление молниезащиты. К рабочему заземлению относятся заземления нейтралей силовых трансформаторов, генераторов, измерительных и испытательных трансформаторов, дугогасящих реакторов и т.д. Защитное заземление служит для обеспечения безопасности обслуживающего персонала. Заземление молниезащиты предназначено для отвода токов молнии в землю от защитных аппаратов, таких как ОПН, разрядники, молниеотводов и других конструкций, в которые произошел удар молнии. Все указанные виды заземлений выполняются в виде одного заземляющего устройства. Заземляющее устройство состоит из заземлителя и заземляющих проводников. Заземлителем называется металлический электрод или группа электродов. Заземляющими проводниками называют проводники, соединяющие заземляемые части электроустановок с заземлителем.

Наиболее тяжелые нормы в отношении сопротивления предъявляются защитному заземлению, поэтому заземляющие устройства электроустановок рассчитываются и проектируются как защитные, а затем рассматривается работа

заземляющего устройства в импульсном режиме, т.е. при стекании с него тока молнии в землю.

Наибольшие допустимые, установленные ПУЭ, значения сопротивлений заземлений: для электроустановок напряжением 110 кВ и выше составляют не больше 0,5 Ом; для электроустановок напряжением 3 – 35 кВ определяются в зависимости от тока замыкания на землю по формуле $R \leq \frac{250}{I_3}$, но не должны превышать 10 Ом. Если заземляющее устройство используется одновременно для электроустановок напряжением 3 – 35 кВ и до 1000 В, то $R \leq 125/I_3$, но не более 10 Ом.

В качестве расчетного тока I_3 в электроустановках 110 кВ и выше принимается наибольшее значение установившегося тока однофазного замыкания на землю, протекающего через заземляющее устройство.

В установках напряжением 3 – 35 кВ с малыми токами замыкания на землю без компенсации емкостных токов расчетным является полный ток замыкания на землю, а в установках с компенсацией емкостных токов – для заземляющих устройств, к которым присоединены компенсирующие аппараты, - ток, равный 125% номинального тока наиболее мощного из этих аппаратов; для заземляющих устройств, к которым не присоединены компенсирующие аппараты, - ток замыкания на землю, проходящий в данной сети при отключении наиболее мощного из компенсирующих аппаратов.

Молниеотводы, защищающие подстанции, чаще всего устанавливаются на конструкциях открытых распределительных устройств (ОРУ) и оказываются, таким образом, присоединенными к защитному заземлению. При этом необходимо, чтобы растекание тока молнии от стоек конструкции ОРУ с молниеотводами происходило в нескольких направлениях. Кроме того, для уменьшения импульсного сопротивления контура заземления возле таких стоек должны быть установлены дополнительно 2 – 3 вертикальных заземлителя длиной по 3 – 5 м.

Если защита ОРУ осуществляется отдельно стоящими молниеотводами, последние должны иметь обособленные заземлители, электрически не связанные с заземляющим контуром подстанции.

Заземление подстанций выполняется искусственными и естественными заземлителями. Искусственные заземлители электроустановок представляют собой контур, образованный вертикальными электродами и полосами, их соединяющими. Для выравнивания напряжения на территории ОРУ и присоединения частей оборудования, подлежащих заземлению, по площади контура прокладывают соединительные полосы, образующие сетку (рис. 4.12)

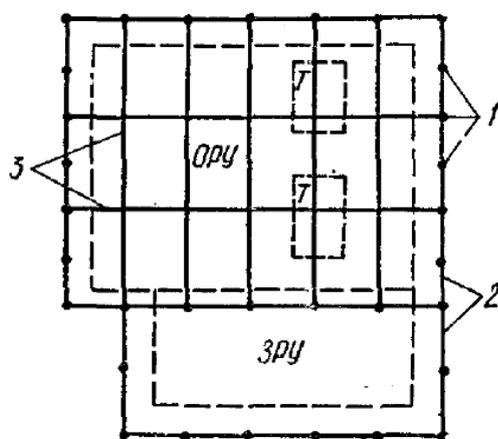


Рис. 4.12. Схема выполнения заземляющего контура подстанции. Пунктиром показаны границы РУ.

1 – вертикальные электроды; 2 – горизонтальные полосы, соединяющие вертикальные электроды; 3 – соединительные полосы

Продольные заземлители должны быть проложены вдоль осей электрооборудования со стороны обслуживания на глубине 0,5-0,7 м от поверхности земли и на расстоянии 0,8-1,0 м от фундаментов или оснований оборудования. Допускается увеличение расстояний от фундаментов или оснований оборудования до 1,5 м с прокладкой одного заземлителя для двух рядов оборудования, если стороны обслуживания обращены друг к другу, а расстояние между основаниями или фундаментами двух рядов не превышает 3,0 м.

Поперечные заземлители следует прокладывать в удобных местах между оборудованием на глубине 0,5-0,7 м от поверхности земли. Расстояние между ними рекомендуется принимать увеличивающимся от периферии к центру за-

земляющей сетки. При этом первое и последующие расстояния, начиная от периферии, не должны превышать соответственно 4,0; 5,0; 6,0; 7,5; 9,0; 11,0; 13,5; 16,0; 20,0 м. Размеры ячеек заземляющей сетки, примыкающих к местам присоединения нейтралей силовых трансформаторов и короткозамыкателей к заземляющему устройству, не должны превышать 6 x 6 м.

Горизонтальные заземлители следует прокладывать по краю территории, занимаемой заземляющим устройством так, чтобы они в совокупности образовывали замкнутый контур.

Если контур заземляющего устройства располагается в пределах внешнего ограждения электроустановки, то у входов и въездов на ее территорию следует выравнивать потенциал путем установки двух вертикальных заземлителей, присоединенных к внешнему горизонтальному заземлителю напротив входов и въездов. Вертикальные заземлители должны быть длиной 3-5 м, а расстояние между ними должно быть равно ширине входа или въезда.

Внешнюю ограду электроустановок не рекомендуется присоединять к заземляющему устройству.

Если от электроустановки отходят ВЛ 110 кВ и выше, то ограду следует заземлить с помощью вертикальных заземлителей длиной 2-3 м, установленных у стоек ограды по всему ее периметру через 20-50 м. Установка таких заземлителей не требуется для ограды с металлическими стойками и с теми стойками из железобетона, арматура которых электрически соединена с металлическими звеньями ограды.

Определение импульсного сопротивления заземляющего устройства подстанции или ОРУ станции осуществляется по следующему алгоритму.

1. Определяется площадь, используемая под заземляющее устройство подстанции. Например, для подстанции прямоугольной формы

$$S = (a + 2 \cdot 1,5)(b + 2 \cdot 1,5), \quad (4.33)$$

где a – ширина ПС;

b – длина ПС.

Контур заземляющей сетки расположен с выходом за границы оборудования на 1,5 м, для того, чтобы человек при прикосновении к оборудованию находился в пределах заземлителя.

2. Выбирается диаметр горизонтального луча (заземляющих проводов) в сетке, D_{np} , по механической прочности. Для электроустановок 10 кВ и выше необходима их проверка на термическую стойкость:

$$F \geq I_z \sqrt{t} / c, \quad (4.34)$$

где F – требуемое сечение заземляющего проводника, мм²;

I_z – ток замыкания на землю, А;

t – длительность замыкания на землю, с;

c – коэффициент, равный 74 для стали и 195 для меди.

При этом принято, что начальная температура провода 20 °С, конечная – 400 °С. Если заземляющие провода имеют сечение не менее 4х40 мм и ток замыкания на землю не превышает 10 кА, то они удовлетворяют термической стойкости и проверке не подлежат.

3. Выбранное сечение заземляющего проводника проверяется на коррозионную стойкость

$$F \geq 3,14 S_{cp} (D_{np} + S_{cp}) \quad (4.35)$$

$$S_{cp} = a_k \ln^3 T + b_k \ln^2 T + c_k \ln T + \alpha_k,$$

где a_k, b_k, c_k, α_k – коэффициенты, зависящие от грунта, определяются по справочным данным [11];

T – время использования заземляющего устройства, мес.

4. Выбирается вертикальный электрод и его глубина залегания для рассматриваемой климатической зоны (с учетом сезонных изменений грунта). Длину вертикальных электродов l_e рекомендуется брать в пределах 3–10 м.

5. Принимается шаг сетки контура заземления k и определяется суммарная длина горизонтальных полос

$$L = (a + 3) \frac{(b + 3)}{k} + (b + 3) \frac{(a + 3)}{k}. \quad (4.36)$$

Шаг сетки контура заземления рекомендуется принимать в пределах 5 – 10 м.

6. Уточняется суммарная длина всех горизонтальных электродов (полос) при представлении площади ПС квадратичной моделью со стороной \sqrt{S}

$$L_y = 2\sqrt{S}(m + 1), \quad (4.37)$$

где S – площадь, занятая заземлителем;

m – число ячеек

$$m = \frac{L_z}{2\sqrt{S}}.$$

7. Определяется количество вертикальных электродов

$$n_e = \frac{4\sqrt{S}}{p}, \quad (4.38)$$

где p – расстояние между вертикальными электродами

8. Определяется стационарное сопротивление заземлителя

$$R = \rho \left(\frac{A}{\sqrt{S}} + \frac{I}{L_y + nl_e} \right), \quad (4.39)$$

где A – коэффициент, зависящий от отношения $\frac{l_e}{\sqrt{S}}$, его значения приведены в табл. 4.4.

Таблица 4.4. –Значения коэффициента A

$\frac{l_e}{\sqrt{S}}$	0	0,02	0,05	0,10	0,20	0,50
A	0,44	0,43	0,40	0,37	0,33	0,26

9. Определяется импульсный коэффициент ($\sqrt{S} > 10$ м)

$$\alpha_u = \sqrt{\frac{1500\sqrt{S}}{(\rho + 320)(I_M + 45)}}. \quad (4.40)$$

10. Определяется импульсное сопротивление заземлителя сетки

$$R_u = \alpha_u R. \quad (4.41)$$

4.5.4. Определение эквивалентного удельного сопротивления неоднородного грунта

Методика определения эквивалентного удельного сопротивления неоднородного грунта приведена в соответствии с [17].

Если заземляющее устройство проложено в неоднородном грунте, то в приведенных выше формулах вместо удельного электрического сопротивления грунта подставляется эквивалентное удельное электрическое сопротивление грунта.

Расчет заземлителей, размещенных в неоднородном грунте, проводится после приведения реальной многослойной структуры к эквивалентной двухслойной модели. Способы приведения зависят от типа заземляющего устройства и характера электрической структуры грунта.

В общем случае эквивалентное удельное сопротивление верхнего слоя двухслойной модели ($\rho_{1э}$) определяется путем усреднения проводимостей слоев, расположенных по высоте $h_{1э}$, по формуле

$$\rho_{1э} = \frac{h_{1э}}{\sum_{i=1}^{i=n_{c1}} \rho_i h_i}, \quad (4.42)$$

В которой ρ_i и h_i – удельное электрическое сопротивление и толщина i -того из n_{c1} слоев, составляющих первый эквивалентный слой двухслойной модели грунта.

Для вертикального электрода

$$h_{1э} = l_{в} + h_{з},$$

где $l_{в}$ - длина вертикального электрода;

$h_{з}$ - глубина заложения заземлителя.

Для протяженных заземлителей, $h_{1э}$, равна глубине их заложения и состоит из одного слоя с $\rho_{1э} = \rho_1$. Толщина второго слоя эквивалентной двухслойной модели определяется расчетной глубиной $H_{расч}$, равной:

(1,3-1,4) $l_г$ для вертикального заземлителя;

(0,1-0,2) $n_{л}l_{л} \leq 10$ м для горизонтального, где $n_{л}$ и $l_{л}$ - число и длина лучей.

Если в пределах $H_{расч}$ имеется один слой, то его удельное сопротивление принимается за $\rho_{2з}$. Если слоев два и более, то $\rho_{2з}$ определяется путем усреднения в зависимости от характера изменения удельного сопротивления слоев по глубине:

при уменьшении удельного сопротивления слоев по глубине

$$\rho_{2з} = \frac{\sum_{i=n_{c1}+1}^{i=n_c} \rho_i h_i}{H_{расч} - h_{1з}}, \quad (4.43)$$

при увеличении удельного сопротивления слоев по глубине

$$\rho_{2з} = \frac{H_{расч} - h_{1з}}{\sum_{i=n_{c1}+1}^{i=n} \frac{h_i}{\rho_i}}, \quad (4.44)$$

где ρ_i и h_i - удельное сопротивление и толщина i -го из $(n_c - n_{c1})$ слоев, составляющих второй эквивалентный слой, соответственно;

$h_{1з}$ - граница разделения слоев двухслойной модели.

При составлении двухслойной модели следует учитывать, что в пределах верхних слоев грунта имеют место сезонные изменения температуры и влажности и, следовательно, удельного сопротивления грунта. Общая толщина этих слоев составляет (1,5-1,8) глубины промерзания и оценивается значениями 2,4; 2,0 и 1,2 м соответственно для I, II и III климатических зон, относящихся условно к северным, средним и южным районам России.

Двухслойная модель приводится к однослойной с эквивалентным удельным сопротивлением $\rho_{э}$, в которой заземлитель будет иметь такое же значение сопротивления, как в двухслойной модели грунта.

На рис. 4.13 представлены графики, позволяющие определить значение удельного сопротивления для вертикального электрода (рис. а), заземляющего устройства с n_l горизонтальными лучами (рис. б) и для комбинированного заземлителя, состоящего из n_l лучей с вертикальными электродами (рис. в).

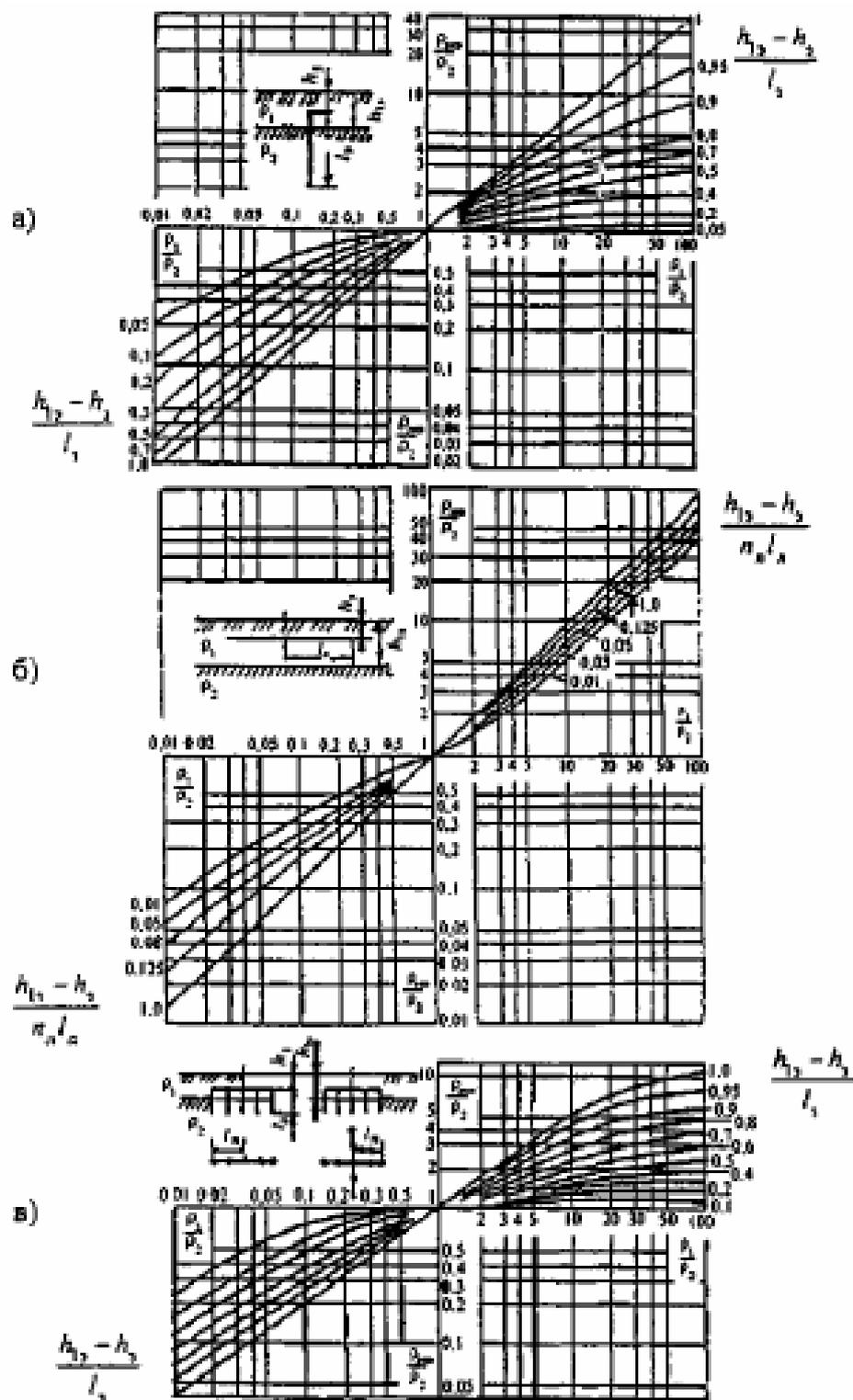


Рис. 4.13. Определение эквивалентного удельного сопротивления двух-слойного грунта для заземлителей разных конструкций:

- а) вертикальный электрод длиной l_3 ;
- б) заземляющее устройство с n_n горизонтальными лучами длиной l_3 ;
- в) комбинированный заземлитель, состоящий из n_n лучей с вертикальными электродами

4.6. Условия безопасного прохождения тока молнии по молниеотводу

При прохождении тока молнии по молниеотводу создается падение напряжения на сопротивлении заземлителя молниеотвода и на индуктивности токоотвода. При косоугольной форме импульса тока молнии и крутизне фронта a максимальный потенциал в точке молниеотвода, расположенной на расстоянии l (высота до точки возможного перекрытия над уровнем земли) от заземлителя наступает в момент максимума тока молнии и определяется по формуле:

$$U_l = I_M R_u + L \frac{di_M}{dt} = I_M R_u + a L_0 l, \quad (4.45)$$

где L_0 – индуктивность единицы длины токоотвода. Для металлических молниеотводов решетчатой конструкции и для отдельно проложенных токоотводов $L_0 = 1,7$ мкГн/м.

Принимая в качестве расчетных значений параметры тока молнии равными $I_M = 60$ кА, $a = 30$ кА/мкс и допустимое значение напряженности электрического поля в воздухе $E_B = 500$ кВ/м, определяют расстояние по воздуху l_B от отдельно стоящего молниеотвода с обособленным заземлителем до токоведущих частей ОРУ, а также до ЗРУ, зданий и сооружений:

$$l_B = \frac{60 R_{II} + 30 \cdot 1,7 l}{500} = 0,12 R_{II} + 0,1 l.$$

При этом расстояние по воздуху должно быть $l_B \geq 5$ м.

Расстояние в земле между заземлителем отдельно стоящего молниеотвода и ближайшей к нему точкой защищаемого устройства в земле при допустимом значении напряженности электрического поля в земле $E_3 = 300$ кВ/м определяется по выражению:

$$l_3 = \frac{60 R_{II}}{300} = 0,2 R_{II},$$

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

При этом расстояние в земле $l_3 \geq 3$ м.

Последнее условие особенно важно соблюдать в грунтах с низкой проводимостью для предотвращения выноса высокого потенциала. Необходимо пом-

нить, что в этом случае соединение заземлителя отдельно стоящего молниеотвода с контуром подстанции не допускается. При этом тросовая защита ВЛ не должна соединяться с порталами ОРУ: последний пролет ВЛ следует защищать отдельно стоящими молниеотводами.

5. ЗАЩИТНЫЕ АППАРАТЫ И УСТРОЙСТВА

Применение молниеотводов полностью не исключает поражения молнией электроустановок, особенно линий электропередачи. Волны перенапряжений, возникающие на линиях, распространяются по ним от точки удара молнии в обе стороны и доходят до подстанций. Эти волны называют набегающими, и они могут представлять опасность для изоляции установленного на подстанции оборудования.

Для защиты линий и оборудования подстанций от набегающих волн перенапряжений используют защитные аппараты и устройства:

- искровые промежутки,
- разрядники,
- нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН).

Принцип действия защитного аппарата заключается в предотвращении появления на электроустановке импульсов перенапряжений, опасных для изоляции, и не препятствовать ее работе при рабочих напряжениях

Первоначально роль защитного аппарата выполнял простой искровой промежуток, с пробивным напряжением ниже, чем уровень изоляции защищаемого оборудования. Но его пробой требовал отключения короткого замыкания. Затем появились защитные разрядники – устройства, обеспечивающие не только защиту изоляции от перенапряжений, но и гашение дуги сопровождающего тока в течение времени, меньшего, чем время действия релейной защиты. Существует два основных принципа гашения дуги: интенсивное продольное дутье, реализовано в трубчатых разрядниках, и снижение значения сопровождающего тока с помощью нелинейного сопротивления, включенного последовательно с искровым промежутком, реализовано в вентильных разрядниках. Следующий этап развития защитных аппаратов – появление нелинейных ограничителей перенапряжения. ОПН представляют собой последовательно соединенные металлооксидные варисторы (нелинейные резисторы) без искровых промежутков, заключенные в фарфоровый или полимерный корпус.

5.1. Искровые промежутки и роговые разрядники

Искровые промежутки являются самым простым и дешевым устройством защиты от перенапряжений, в настоящее время применяется редко. В сетях напряжением 3 – 35 кВ они могут выполняться в виде рогов, способствующих растягиванию и гашению дуги из-за электродинамических сил и тепловых потоков.

Искровой промежуток включается параллельно изоляционной конструкции (рис. 5.1). Для предупреждения перекрытия или пробоя изоляции вольт-секундная характеристика (ВСХ) искрового промежутка должна лежать ниже вольт-секундной характеристики защищаемой изоляции (рис. 5.2). При выполнении этого требования появление опасных для изоляции перенапряжений невозможно, так как при набегании импульса перенапряжения $U_{над}$ происходит пробой искрового промежутка с последующим срезом (резким падением) напряжения.

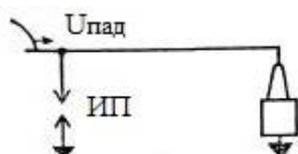


Рис. 5.1. Схема включения искрового промежутка

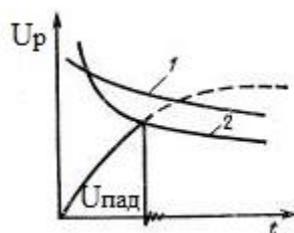


Рис. 5.2. Согласование ВСХ защищаемой изоляции (1) и искрового промежутка (2)

Вслед за импульсным током через искровой промежуток устремляется ток промышленной частоты – сопровождающий ток. Если электроустановка работает в сети с глухозаземленной нейтралью или пробой произошел в двух или трех фазах, то дуга сопровождающего тока может не погаснуть. Тогда импульсный пробой перейдет в короткое замыкание, которое приведет к аварийному отключению электроустановки.

Конструктивно искровые промежутки выполняются в виде стержневых электродов, создающих резконеоднородное поле. Для них характерно значительное возрастание разрядного напряжения при малых временах, что не всегда

позволяет осуществлять координацию ВСХ изоляции и искровых промежутков, при малых предразрядных временах изоляция оказывается незащищенной (рис. 5.2).

В сетях до 35 кВ длина защитного промежутка мала, и для предотвращения замыкания промежутка птицами в заземляющих спусках создаются дополнительные искровые промежутки.

Электроды искровых промежутков в установках до 35 кВ выполняются в виде рогов, так как под действием электродинамических сил тепловых потоков воздуха дуга растягивается и гаснет. Такие искровые промежутки называют роговыми разрядниками, они выполняются либо с одним искровым промежутком, либо с двумя искровыми промежутками (рис. 5.3). Роговые разрядники нашли широкое применение в контактной сети электрифицированного железнодорожного транспорта. Способность гашения дуги роговым разрядником сильно зависит от скорости и направления ветра. Дуга гаснет быстрее при направлении ветра перпендикулярно плоскости разрядника.

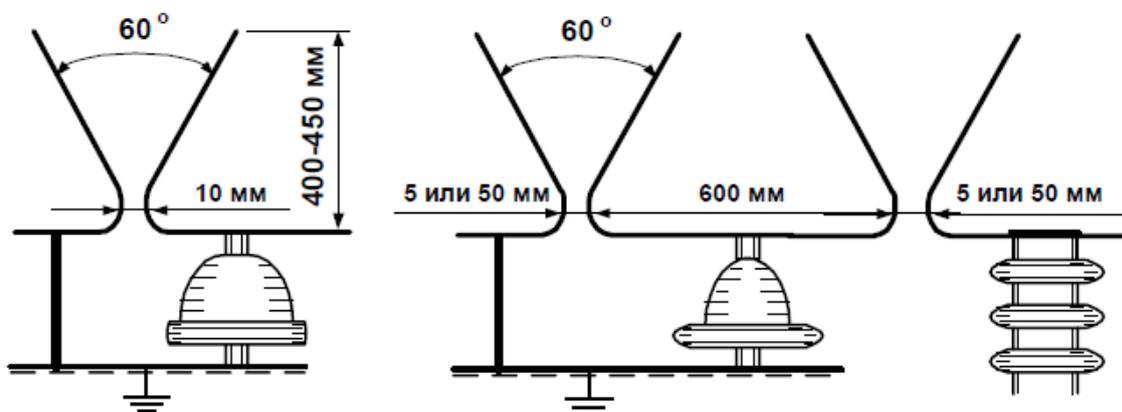


Рис. 5.3. Роговые разрядники

Искровые промежутки обладают целым рядом недостатков, основные из которых следующие:

➤ срабатывание искровых промежутков приводит к короткому замыканию, которое должно отключаться выключателями; при переходном процессе среза напряжения могут возникнуть перенапряжения на продольной изоляции трансформаторов, реакторов и электрических машин;

- большой статистический разброс пробивных напряжений затрудняет координацию изоляции;
- вольт-секундная характеристика искрового промежутка из-за резкой неоднородности поля имеет подъем в области малых времен, соответствующих грозovým перенапряжениям, и защищаемая изоляция может остаться незащищенной.

5.2. Трубчатые разрядники

Трубчатые разрядники служат для защиты от атмосферных перенапряжений изоляции ВЛ и совместно с другими средствами защиты - для защиты изоляции электрооборудования станций и подстанций напряжением от 3 кВ до 110 кВ, ослабленных мест на линиях электропередачи и на подходах к подстанциям. Подключение трубчатых разрядников к токоведущим частям линий электропередачи производится через внешний искровой промежуток.

Трубчатые разрядники (рис. 5.4) представляют собой разновидность искровых промежутков, дополненных приспособлением для принудительного гашения дуги, которое выполнено в виде трубки из газогенерирующего материала 1. Один конец трубки закрыт металлической крышкой, на которой креплен внутренний стержневой электрод 2. На открытом конце трубки расположен другой электрод 3, выполненный в виде кольца. Промежуток S_1 между стержневым и кольцевым электродами является дугогасящим. Трубка отделяется от провода фазы внешним искровым промежутком S_2 .

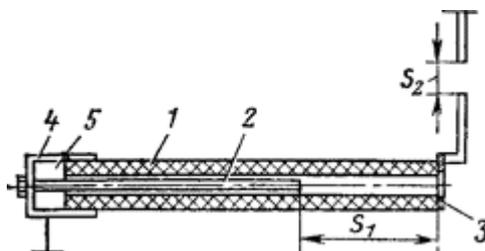


Рис. 5.4. Конструкция трубчатого разрядника

Трубчатый разрядник при нормальной работе установки отделен от линии воздушным промежутком S_2 . При появлении перенапряжения пробиваются промежутки S_1 и S_2 , и импульсный ток отводится в землю. После прохождения импульсного тока по разряднику течет сопровождающий ток промышленной

частоты. В узком канале обоймы (трубки) 1 из газогенерирующего материала (винипласта или фибры) в промежутке S_I между электродами 2 и 3 загорается дуга. Внутри обоймы поднимается давление. Образующиеся газы могут выходить через отверстие в кольцевом электроде 3. При прохождении тока через нуль происходит гашение дуги под действием охлаждения промежутка S_I газами, выходящими из разрядника. В заземленном электроде 4 имеется буферный объем 5, где накапливается потенциальная энергия сжатого газа. При проходе тока через нуль создается газовое дутье из буферного объема, что способствует эффективному гашению дуги. Работа трубчатого разрядника сопровождается сильным звуковым эффектом и выбросом газов. Так, зона выброса газов разрядника РТВ-110 имеет вид конуса с диаметром 3,5 и высотой 2,2 м. При размещении разрядников необходимо, чтобы в эту зону не попадали элементы, находящиеся под высоким потенциалом.

Защитная функция трубчатым разрядником выполняется так же, как и простым искровым промежутком, с теми же недостатками. Отключение дуги сопровождающего тока короткого замыкания производится из-за интенсивного газовыделения трубкой при повышенной температуре горения дуги. Специфическим недостатком трубчатого разрядника является наличие зоны выхлопа разрядника.

Предельный отключаемый ток промышленной частоты определяется механической прочностью обоймы и составляет 10 кА для фибробакелитовой обоймы и 20 кА для винипластовой, упрочненной стеклотканью на эпоксидной смоле.

Защитная характеристика разрядника в значительной степени зависит от вольт-секундной характеристики искрового промежутка. Вольт-секундные характеристики трубчатого разрядника также как у искрового промежутка являются резконеоднородными (рис. 5.5).

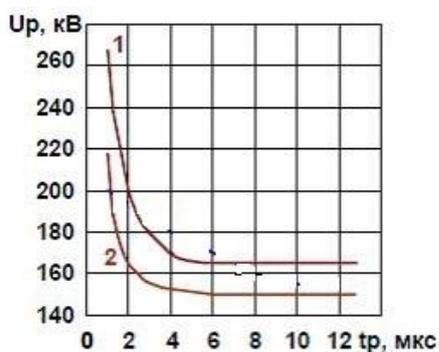


Рис. 5.5. Вольт-секундные характеристики разрядника при $l_2=60$ мм (1), $l_2=40$ мм (2)

В соответствии с выполняемыми функциями трубчатый разрядник характеризуется *двумя группами параметров*. К первой группе относится номинальное напряжение, пробивное напряжение промышленной частоты, импульсное пробивное напряжение и вольт-секундная характеристика. Ко второй группе относятся нижний и верхний пределы отключаемых токов.

Сопровождающий ток частотой 50 Гц определяется местом расположения разрядника и меняется в довольно широком диапазоне в зависимости от режима работы энергосистемы. Поэтому должны быть известны минимальные и максимальные значения тока короткого замыкания (КЗ) в месте установки разрядника.

Минимальный ток разрядника определяется гасящей способностью трубки. Чем меньше диаметр выхлопного канала, чем больше его длина, тем меньше нижний предел отключаемого тока. Однако при больших токах в трубке возникает высокое давление. При недостаточной механической прочности трубки может произойти разрушение разрядника. Выпускаются винипластовые разрядники высокой прочности с наибольшим отключаемым током до 20 кА.

Выбор трубчатых разрядников производится по номинальному напряжению сети и пределам токов короткого замыкания сети в точке установки РТ. При выборе трубчатого разрядника необходимо рассчитать возможный минимальный и максимальный ток КЗ в месте установки и по этим токам выбрать соответствующий разрядник, проверяя соответствие токов замыкания в установке диапазону отключаемых разрядником токов:

$$\begin{aligned} I_{\max \text{кз}}^{(3)(1)} &< I_{PT \max}; \\ I_{\min \text{кз}}^{(1)(2)} &< I_{PT \min}, \end{aligned} \quad (5.1)$$

где $I_{\max \text{кз}}^{(3)(1)}$ - наибольший возможный ток трехфазного или однофазного короткого замыкания в сети;

$I_{\min \text{кз}}^{(1)(2)}$ - наименьший возможный ток однофазного или двухфазного короткого замыкания в сети;

$I_{PT \max}$, $I_{PT \min}$ - соответственно верхний и нижний пределы отключаемых разрядником токов.

Принято следующее обозначение типа трубчатых разрядников: Р - разрядник; Т - трубчатый; В или Ф - винипластовый или фибробакелитовый материал газогенерирующей трубки; У - усиленный; цифровое обозначение: в знаменателе - номинальное напряжение, в числителе - верхний и нижний предел отключаемых токов, кА. Например: РТВ - разрядник трубчатый, винипластовый, напряжение 35 кВ, предельно отключаемые токи 2-10 кА.

В трубчатом разряднике РТФ газ генерируется фибровой трубкой. Вследствие малой механической прочности фибры она заключается в толстую трубку из бакелизированной бумаги, которая для уменьшения ее гигроскопичности покрывается влагостойким лаком (обычно перхлорвиниловой эмалью), хорошо выдерживающим атмосферные воздействия летнего и зимнего периодов. Особенностью разрядников РТФ является наличие камеры у закрытого конца трубки, которая усиливает продольное дутье при прохождении тока через нулевое значение и способствует тем самым гашению дуги. В разрядниках РТВ газ генерируется трубкой из винипласта, который обладает более высокой газогенерирующей способностью и изолирующими свойствами, хорошо сохраняющимися даже при работе на открытом воздухе при любой погоде. Разрядники РТВ имеют более простую конструкцию (у них нет внутренней камеры, не требуют лакировки) и более высокие верхние пределы отключаемых токов (15 кА вместо 7—10 кА для разрядников РТФ). Для работы в сетях с очень большими отключаемыми токами (до 30 кА) выпускаются усиленные разрядники типа

РТВУ, повышенная механическая прочность которых достигается путем обмотки винипластовой трубки слоями стеклоленты, пропитанной атмосферостойким эпоксидным компаундом.

Импульсная пропускная способность трубчатых разрядников, которые пропускают через себя практически весь ток молнии при ударе ее в линию, достаточно высока и составляет 30—70 кА.

Трубчатые разрядники, как правило, обеспечивают 7-8 успешных срабатываний, после чего газогенерирующая трубка не обеспечивает требуемого давления и дугогасящей способности. Винипластовая газогенерирующая трубка выгорает быстрее фибробакелитовой. Для подсчета числа срабатываний разрядники снабжаются однократными или многократными указателями срабатывания.

Основными недостатками трубчатых разрядников являются наличие зоны выхлопа, крутой срез волны перенапряжения, замыкание (кратковременное) линий на землю и особенно крутая вольт-секундная характеристика, исключающая возможность широкого применения трубчатых разрядников в качестве аппарата защиты подстанционного оборудования. Недостатком трубчатых разрядников является также наличие предельных отключаемых токов, что осложняет их производство и эксплуатацию.

Благодаря своей простоте и низкой стоимости трубчатые разрядники применяются в качестве вспомогательных средств защиты подстанций, для защиты маломощных и малоответственных подстанций, а также отдельных участков линий. В настоящее время трубчатые разрядники постепенно заменяются нелинейными ограничителями перенапряжений и длинноискровыми разрядниками.

5.3. Вентильные разрядники

5.3.1. Устройство и принцип действия вентильных разрядников

Защитные аппараты, обеспечивающие не только защиту изоляции от коммутационных и атмосферных перенапряжений, но и гашение дуги сопровождающего тока в течение времени меньшего, чем время действия релейной защиты, называются вентильными разрядниками. Они получили название вен-

тивных, потому что при импульсных токах их сопротивление резко падает, что дает возможность пропустить большой ток при относительно небольшом падении напряжения.

Основными элементами вентильного разрядника являются искровой промежуток и нелинейный последовательный резистор, которые включаются последовательно между токоведущим проводом и землей параллельно защищаемой изоляции (рис. 5.6).

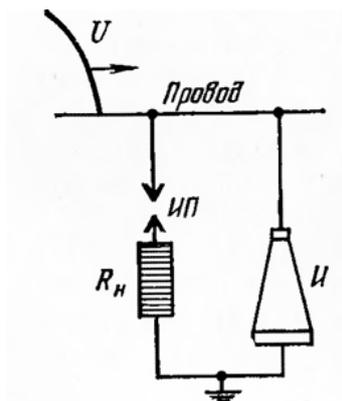


Рис. 5.6. Схема включения вентильных разрядников.

ИП — искровой промежуток, R_n — сопротивление нелинейного последовательного резистора, U — импульс грозового перенапряжения, И — изоляция защищаемого объекта.

Защитное действие разрядника обуславливается тем, что при появлении опасного для изоляции перенапряжения происходит пробой искрового промежутка разрядника, а протекающий через разрядник импульсный ток, вследствие нелинейности рабочего сопротивления не создает опасного для изоляции повышения напряжения.

При воздействии на разрядник импульса грозового перенапряжения его искровой промежуток пробивается и через разрядник проходит ток. Разрядник, таким образом, вводится в работу. Напряжение, при котором пробиваются искровые промежутки, называется *пробивным напряжением разрядника* $U_{пр}$. После пробоя искрового промежутка напряжение на разряднике, а значит, и на защищаемой им изоляции снижается до величины, равной произведению импульсного тока I_u на сопротивление последовательного резистора R_n . Это напряжение называется *остающим напряжением* $U_{ост}$. Его величина изменя-

ется вместе с изменением величины импульсного тока I_u , проходящего через разрядник (рис. 5.7). Таким образом, остающееся напряжение представляет собой падение напряжения на сопротивлении нелинейного резистора при определенном импульсном токе (5 - 14 кА), который называется *током координации* искрового промежутка вентильного разрядника.

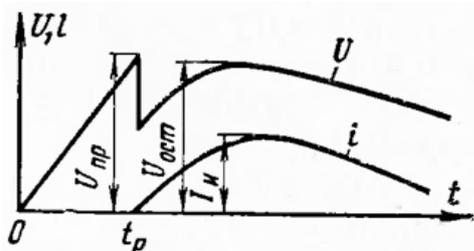


Рис. 5.7. Форма импульса напряжения до и после срабатывания вентильного разрядника.

t_p — время срабатывания разрядника (время разряда), I_u — импульсный ток разрядника

Остающееся напряжение и импульсное пробивное напряжение должны быть на 20...25% ниже разрядного U_p или пробивного напряжения защищаемой изоляции (координационный интервал).

Напряжение пробоя искровых промежутков вентильного разрядника при воздействии атмосферных перенапряжений определяются его вольт-секундной характеристикой (рис. 5.8), т. е. зависимостью времени разряда от амплитуды импульса перенапряжения. Время разряда - это время от начала воздействия импульса перенапряжения до пробоя искрового промежутка разрядника. Для эффективной защиты изоляции вольт-секундная характеристика ее (1) должна лежать выше вольт-секундной характеристики разрядника (2). Сдвиг вольт-секундных характеристик необходим для того, чтобы сохранить надежность защиты при случайном ослаблении изоляции в эксплуатации, а также из-за наличия зон разброса разрядных напряжений как у самого разрядника, так и у защищаемой изоляции. Вольт-секундная характеристика разрядника должна иметь пологую форму. Если она будет крутой, как это показано на рис. 5.8 пунктиром, то это приведет к тому, что разрядник потеряет универсальность,

так как для каждого вида оборудования, обладающего индивидуальной вольт-секундной характеристикой, потребуется свой специальный разрядник.

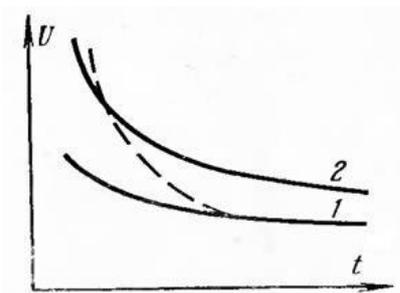


Рис. 5.8. Вольт-секундные характеристики вентиляльных разрядников и защищаемой ими изоляции.

После прекращения протекания импульсного тока через разрядник продолжает проходить ток, обусловленный напряжением промышленной частоты. Этот ток называется сопровождающим. Сопротивление нелинейного резистора при воздействии рабочего напряжения $U_{раб}$ резко возрастает, и сопровождающий ток ограничивается, а затем гаснет. Искровые промежутки разрядника должны обеспечить надежное гашение дуги сопровождающего тока при первом прохождении его через нуль.

Надежность гашения дуги искровым промежутком зависит от величины напряжения промышленной частоты на разряднике в момент гашения сопровождающего тока. Максимальная величина напряжения, при которой искровые промежутки разрядников надежно разрывают сопровождающий ток, называется *напряжением гашения* $U_{гаш}$, а сопровождающий ток — *током гашения* $I_{гаш}$.

Гашение сопровождающего тока осуществляется в условиях однофазного замыкания на землю. Поэтому в качестве $U_{гаш}$ принимается значение напряжения на неповрежденных фазах при однофазном замыкании на землю:

$$U_{гаш} = k_3 \cdot U_{ном} , \quad (5.2)$$

где k_3 — коэффициент, зависящий от способа заземления нейтрали;

$U_{ном}$ — номинальное линейное напряжение.

Коэффициент k_3 для установок с заземленной нейтралью равен 0,8, а для установок с изолированной нейтралью 1,1.

Дугогасящее действие искрового промежутка характеризуется коэффициентом гашения:

$$k_{гаш} = U_{пр} / U_{гаш}, \quad (5.3)$$

где $U_{пр}$ – пробивное напряжение искрового промежутка при $f = 50 \text{ Гц}$.

Защитное действие нелинейного резистора характеризуется коэффициентом защиты (защитным отношением).

$$k_{защ} = U_{ост} / \sqrt{2} \cdot U_{гаш}. \quad (5.4)$$

Значение $k_{защ}$ определяется свойствами нелинейного резистора и конструкцией искрового промежутка.

Работа вентильного разрядника начинается с пробоя искрового промежутка и заканчивается гашением дуги сопровождающего тока в искровом промежутке. Для успешной защиты изоляции вольт-амперная характеристика (ВАХ) разрядника должна быть пологой (рис. 5.9).

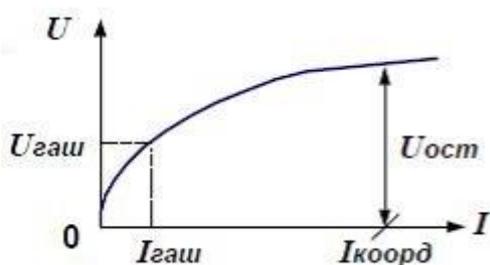


Рис. 5.9. Вольтамперная характеристика резистора вентильного разрядника

Итак, группа характеристик вентильного разрядника, определяющая его защитную функцию, включает:

- номинальное напряжение;
- наибольшее допустимое длительное напряжение на разряднике;
- пробивное напряжение на частоте 50 Гц (обычно действующее значение);
- остающееся напряжение на сопротивлении резистора при токе координации.

Функция отключения характеризуется напряжением гашения и током гашения.

Еще одной характеристикой разрядника является его пропускная способность, то есть минимальное количество нормированных импульсов тока, кото-

рый разрядник должен выдержать без существенного изменения его свойств. Это количество обычно равно 20.

Таким образом, и защитная функция, и отключение короткого замыкания определяются как искровым промежутком, так и нелинейным резистором.

5.3.2. Искровые промежутки вентильных разрядников

Искровые промежутки вентильных разрядников должны удовлетворять следующим требованиям: иметь стабильное пробивное напряжение при минимальных разбросах, иметь пологую вольт-секундную характеристику, не изменять свое пробивное напряжение после многократных срабатываний, гасить дугу сопровождающего тока при первом переходе его через нулевое значение.

Искровые промежутки должны подключать нелинейный резистор при перенапряжениях и отключать его при прохождении сопровождающего тока.

В вентильных разрядниках используется три вида искровых промежутков: простейший искровой промежуток с неподвижной дугой, искровой промежуток с вращающейся дугой, токоограничивающий искровой промежуток.

Простейший единичный искровой промежуток с неподвижной дугой вентильного разрядника показан на рис. 5.10. Промежуток состоит из двух латунных электродов, разделенных миканитовой шайбой.

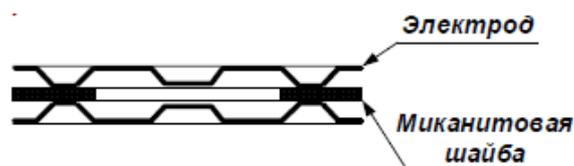


Рис. 5.10. Единичный искровой промежуток с неподвижной дугой

Форма электродов обеспечивает равномерное электрическое поле, что позволяет получить пологую вольт-секундную характеристику. Возникновение заряда в закрытом объеме разрядника при малой длительности импульса тока затруднено. Для облегчения ионизации искрового промежутка между электродами служит миканитовая прокладка. Так как диэлектрическая проницаемость воздуха значительно меньше, чем у входящей в состав миканита слюды, то в приэлектродном объеме воздуха возникают высокие градиенты электрического

поля, вызывающие его начальную ионизацию. Образующиеся электроны приводят к быстрому формированию разряда в центре искрового промежутка.

В вентильных разрядниках единичные промежутки включаются последовательно друг с другом для улучшения гашения дуги, которая нестабильна в небольшом промежутке с холодными электродами. У многократного искрового промежутка, однако, происходит неравномерное распределение напряжения на отдельных промежутках, аналогично гирлянде изоляторов, что приводит к снижению пробивного напряжения при малых временах порядка 2-4 мкс.

Искровые промежутки последовательно соединяются, образуя блок (рис. 5.11). Обычно разрядник имеет несколько таких блоков. Результирующая вольт-секундная характеристика последовательно соединенных промежутков достаточно пологая (рис 5.11).

Одиночный искровой промежуток способен отключить сопровождающий ток с амплитудой 80—100 А при действующем значении напряжения 1—1,5 кВ. Число единичных промежутков выбирается исходя из этого напряжения.

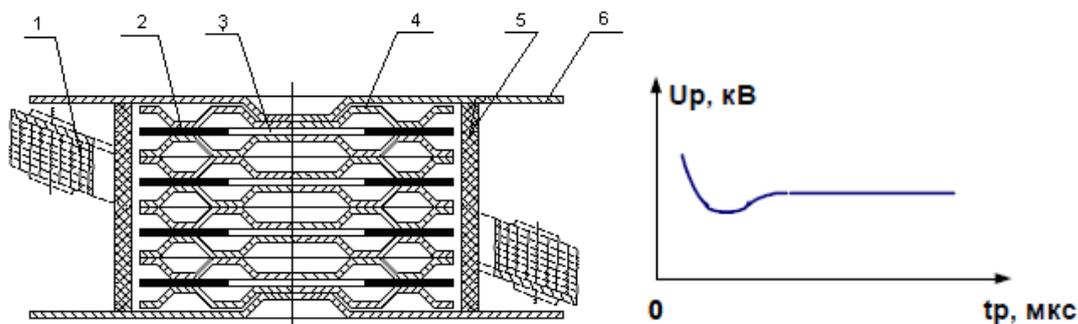


Рис. 5.11. Блок, состоящий из единичных искровых промежутков и результирующая ВСХ

Искровые промежутки 3 (рис. 5.11) образованы латунными дисками специальной формы (4) и расположены в фарфоровом изоляционном корпусе (5). Крышки (6) несут функцию электродов одного комплекта. Количество искровых промежутков (ИП) в разряднике устанавливается из расчета один ИП на 1 кВ фазного напряжения разрядника. Искровой промежуток (3) имеет практически однородное электрическое поле. Его величина (1 мм) рассчитана на напряжение, равное 1 кВ. Специальные калиброванные миканитовые прокладки (2) обеспечивают необходимый зазор. В местах сопряжения

прокладок с электродами (4) возникает корона, облучающая искровой промежутком (3) и улучшающая форму его вольт-секундной характеристики (ВСХ).

Искровой промежуток с вращающейся дугой. Конструктивное исполнение искрового промежутка показано на рис. 5.12.

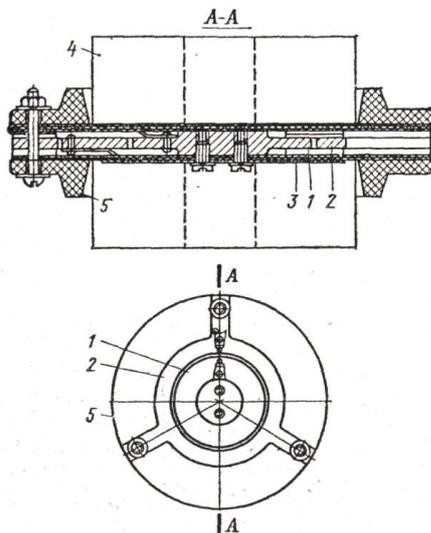


Рис. 5.12. Искровой промежуток с дугой, вращающейся в магнитном поле

1 – внутренний электрод; 2 – внешний электрод; 3 – изоляционные прокладки;
4 – постоянные магниты; 5 – кольцо из пластмассы

Единичный искровой промежуток образован двумя концентрически расположенными электродами (1) и (2). Длина промежутка около 2 мм. Электроды единичных промежутков помещены между изолирующими прокладками из электрокартона и миканита (3). Искровые промежутки расположены в магнитном поле постоянного магнита (4).

Принцип действия искровых промежутков с магнитным гашением хорошо виден из рис. 5.13. Электрическая дуга D горит между концентрически расположенными электродами: кольцевым (1) и дисковым (2), которые образуют единичный искровой промежуток. Сопровождающий ток проходит через постоянный магнит (3) на электрод единичного промежутка (1), затем через дугу D на электрод (2) и постоянный магнит (4). В результате взаимодействия магнитного поля сопровождающего тока с магнитным полем постоянных магнитов дуга вращается по кольцевому промежутку между электродами. За один полупериод промышленной частоты дуга совершает несколько десятков оборотов и

во время своего движения интенсивно охлаждается и гаснет. Направление механической силы, которая приводит во вращение дугу, определяется по известному правилу «Левой руки». Если расположить левую руку так, чтобы в ладонь руки входили магнитные силовые линии H постоянных магнитов, а вытянутые четыре пальца показывали направление тока I в дуге D , то отогнутый на 90° большой палец покажет направление действия силы F .

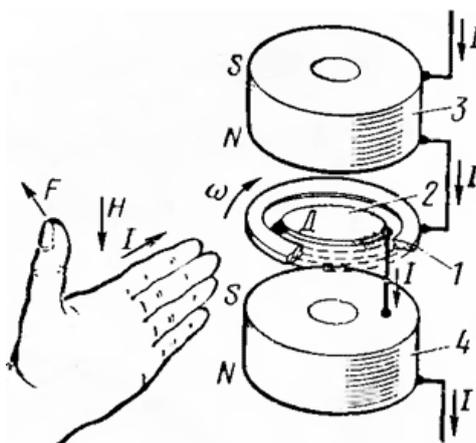


Рис. 5.13. Схема работы искрового промежутка с вращающейся дугой

Токоограничивающий искровой промежуток. Токоограничивающий искровой промежуток иначе называют искровым промежутком с растягивающейся дугой, принцип действия которого показан на рис. 5.14.

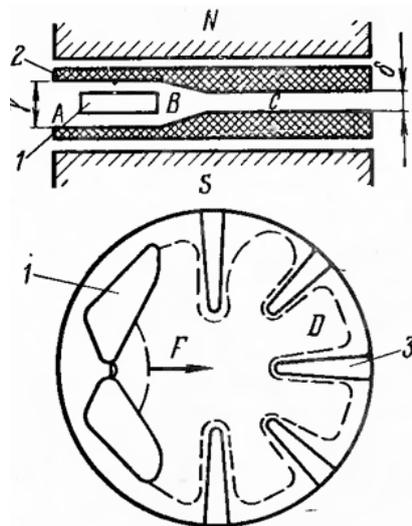


Рис. 5.14. Искровой промежуток с растягивающейся дугой

Два электрода (1) располагаются между стенками дугогасительной камеры (2) в магнитном поле SN , созданном согласно включенными катушками. В таком поле на дугу действует сила F , направление которой определяется прави-

лом «левой руки». Под действием этой силы дуга перемещается и растягивается между перегородками (3), стремясь занять конечное положение *D*, охлаждается и гаснет. В процессе перемещения дуга проходит три зоны: зону *A* с относительно большими расстояниями у между стенками камеры (эта зона получила название зоны предварительного растягивания дуги), зону *B* – переходную между зонами *A* и *C* и зону «узкой щели» *C* с расстоянием между стенками камеры *b*. Стенки камеры изготавливаются из дугостойкой керамики.

При протекании сопровождающего тока промышленной частоты дуга вводится в «узкую щель», растягивается, ее сопротивление увеличивается и величина сопровождающего тока определяется не только сопротивлением последовательного резистора разрядника, но и сопротивлением дуги. Это обстоятельство позволяет уменьшить величину сопротивления последовательного резистора, что приводит к снижению остающегося напряжения при импульсном токе и, следовательно, к улучшению характеристики разрядника.

Анализ показал, что у разрядников с простейшим искровым промежутком с неподвижной дугой защитное отношение равно 2,6, у разрядников с магнитным гашением дуги- 2,2, у разрядников с токограничивающими промежутками – 1,7.

5.3.3. Нелинейные резисторы вентильных разрядников

К нелинейному резистору предъявляются два противоположных требования: в тот момент, когда через него проходит ток молнии, его сопротивление должно уменьшаться; тогда же когда через него проходит сопровождающий ток промышленной частоты, оно должно, наоборот, увеличиваться. Таким требованиям удовлетворяет карборундовое сопротивление, которое изменяется в зависимости от приложенного к нему напряжения: чем выше приложенное напряжение, тем ниже его сопротивление и, наоборот, чем ниже приложенное напряжение, тем больше его сопротивление. Кроме того, последовательно включенное карборундовое сопротивление, являясь активным сопротивлением, уменьшает сдвиг по фазе между сопровождающим током и напряжением, а при одновременном переходе их через нулевое значение гашение дуги облегчается.

Основу нелинейного резистора составляют зерна карборунда SiC с удельным сопротивлением около 10^{-2} Ом·м. На поверхности карборундовых зерен создается пленка оксида кремния SiO_2 толщиной 10^{-7} м, сопротивление которой зависит от приложенного к ней напряжения. При небольших напряжениях удельное сопротивление пленки (запорного слоя) составляет 10^4 — 10^6 Ом·м. При увеличении приложенного напряжения сопротивление пленки резко уменьшается, сопротивление определяется в основном зернами карборунда и падение напряжения ограничивается. С повышением напряжения величина сопротивления запорных слоев падает, что обеспечивает прохождение больших токов при относительно небольших падениях напряжения.

Нелинейные резисторы изготавливаются в виде дисков диаметром 0,1—0,15 м и высотой (20-60) · 10^{-3} м. С помощью жидкого стекла зерна карборунда прочно связываются между собой. В зависимости от технологии изготовления получают диски из вилита или тервита. Вилитовые диски спекаются при температуре около 300^0 С, а тервитовые при изготовлении обжигаются при температуре более 1000^0 С, что приводит к разрушению части запорных слоев оксида кремния. При этом увеличивается пропускная способность резистора (300А у вилита, до 1500 А – у тервита), но снижается степень нелинейности материала.

Вилит очень гигроскопичен. Для защиты от влаги цилиндрическая поверхность дисков покрывается изолирующей обмазкой. Торцевые поверхности являются контактными и металлизуются. Обычно несколько нелинейных резисторов в виде дисков соединяются последовательно. Для уменьшения остающегося напряжения число дисков n должно быть как можно меньше. При прохождении тока температура дисков повышается. При протекании импульса тока большой амплитуды, но малой длительности (десятки микросекунд) резисторы не успевают нагреваться до высокой температуры. При длительном протекании даже небольших токов промышленной частоты (один полупериод равен 10 мс) температура может превысить допустимое значение, диски теряют свои вентильные свойства, и разрядник выходит из строя.

Предельно допустимая амплитуда импульса тока для диска диаметром 100 мм равна 10 кА при длительности импульса 40 мкс. Допустимая амплитуда прямоугольного импульса с длительностью 2000 мкс не превышает 150 А. Такие токи диск без повреждения пропускает 20-30 раз. После прохождения импульсного тока через разрядник начинает протекать сопровождающий ток, представляющий собой ток промышленной частоты. По мере приближения тока к нулевому значению сопротивление вилита резко увеличивается, что ведет к искажению синусоидальной формы тока.

Зависимость напряжения на разряднике от величины проходящего через него тока (вольт-амперная характеристика) приближенно выражается уравнением:

$$U=CI^{\alpha}, \quad (5.5)$$

где U – напряжение на сопротивлении нелинейного резистора вентильного разрядника,

I – ток, проходящий через нелинейный резистор,

C — постоянная, численно равная сопротивлению при токе 1 А,

α — коэффициент вентильности.

Чем меньше коэффициент α , тем меньше изменяется напряжение на нелинейном резисторе при изменении проходящего через него тока и тем меньше остающееся напряжение на вентильном разряднике.

Каждый импульс тока оставляет в последовательном резисторе след разрушения - происходит пробой запорного слоя отдельных зерен карборунда. Многократное прохождение импульсов тока приводит к полному пробое резистора и разрушению разрядника. Полный пробой резистора наступает тем скорее, чем больше амплитуда и длина импульса тока. Поэтому пропускная способность вентильного разрядника ограничена. Резисторы должны выдерживать без повреждения 20 импульсов тока длительностью 20/40 мкс с амплитудой, зависящей от типа разрядника.

Для повышения защитных свойств вентильного разрядника нужно снижать остающееся напряжение, чего можно достичь уменьшением коэффициента вен-

тельности α последовательного нелинейного резистора при одновременном повышении дугогасящих свойств искровых промежутков.

Повышение дугогасящих свойств искровых промежутков дает возможность увеличить сопровождающий ток, обрываемый ими, а, следовательно, позволяет уменьшить сопротивление последовательного резистора.

5.3.4. Группы вентильных разрядников

Приняты следующие буквенные обозначения типов разрядников: Р - разрядник; В - вентильный; О - облегченный; С - стационарный; М - магнитный или модернизированный; Т - с токоограничивающими искровыми промежутками или тропического исполнения (если Т стоит после цифры); П - повышенное напряжение гашения; Г - грозовой; РД - с растягивающейся дугой; У - для работы в районах с умеренным климатом; число после дефиса номинальное напряжение, кВ; цифра 1 - для работы на открытом воздухе.

Например, РВМГ-110МТ1 разрядник вентильный, с магнитным гашением, грозовой, на напряжение 110 кВ, модернизированный, с токоограничивающими искровыми промежутками, для работы на открытом воздухе.

Вентильные разрядники делятся на 4 группы:

- I группа – разрядники серий РВТ, РВРД;
- II группа – разрядники серий РВМ, РВС, РВМГ;
- III группа – разрядники серий РВС;
- IV группа – разрядники серий РВП, РВО.

Наилучшими свойствами обладают разрядники I группы, т.к. она имеет наименьшие значения остающегося напряжения, $U_{ост}$. Далее следуют разрядники II, III и IV групп.

К IV группе относятся разрядники серий РВП – разрядники подстанционные и РВО – разрядники облегченные на напряжение 3 – 10 кВ. Облегченные разрядники применяются для защиты сельских сетей. Нелинейные резисторы этих разрядников комплектуются из вилитовых дисков, искровой промежуток набирается из единичных искровых промежутков с неподвижной дугой.

Разрядники серии РВС (III группа) применяются для защиты электрооборудования напряжением 15 – 220 кВ. На высшие классы напряжения они комплектуются из стандартных элементов. Например, стандартный элемент на 35 кВ (РВС–35), содержит 32 единичных искровых промежутка с неподвижной дугой и 11 вилитовых дисков диаметром $d = 100$ мм и высотой $H = 60$ мм. Контакт между дисками осуществляется металлизацией их поверхностей. Комплект ИП и вилитовых дисков помещается в герметизированный фарфоровый корпус.

Магнито-вентильные разрядники серии РВМ выпускаются на напряжение 3 – 35 кВ, а серии РВМГ – на напряжение 110 – 500 кВ (II группа). В них применяют искровые промежутки с магнитным гашением дуги и вилитовые диски диаметром 150 мм, что увеличивает их пропускную способность.

Вентильные разрядники серии РВТ и РВРД (I группа) разработаны на все номинальные напряжения. Их характеристики лучшие, чем у разрядников, выпускаемых до сих пор.

В качестве примера рассмотрим электрическую схему разрядников РВТ-10 (рис. 5.15). Магнитное поле в *ИП* с магнитным гашением растягивающейся дуги создается катушками магнитного дутья *КМ*, которые включены последовательно с искровыми промежутками. При пробое *ИП* через катушки протекает ток и на зажимах катушек могут возникнуть опасные повышения напряжения. Для защиты изоляции катушек от перенапряжений параллельно им включаются обходные искровые промежутки *ОИП*. Искровые промежутки и катушки помещаются в бакелитовый цилиндр, на внешней поверхности которого располагаются шунтирующие резисторы *ШР*, которые предназначаются для равномерного распределения напряжения промышленной частоты по искровым промежуткам. Высоковольтные керамические конденсаторы *К* служат для создания резко неравномерного распределения импульсного напряжения по искровым промежуткам, что снижает импульсное пробивное напряжение, а стало быть, и коэффициент импульса. После прекращения импульсного тока дуга сопровождающего тока промышленной частоты в *ОИП* гаснет, и сопровождающий ток течет через катушку *КМ*, возбуждая магнитное поле, под действием которого

дуга искрового промежутка *ИП* растягивается и вводится в «узкую щель» между стенками дугогасительной камеры. В камере, изготовленной из дугостойкой керамики, дуга гаснет. За время протекания импульсного тока через разрядник дуга не успевает существенно растянуться, так как дутье отсутствует. Сопротивление дуги вследствие этого мало и падение напряжения на *ИП* невелико. Остающееся напряжение определяется при этом только падением напряжения на нелинейном последовательном резисторе разрядника.

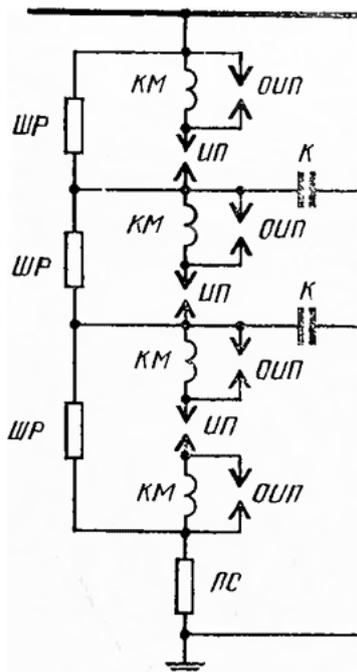


Рис. 5.15. Принципиальная электрическая схема разрядника РВТ-10

Все детали искровых промежутков и последовательных резисторов помещаются в фарфоровую покрывку, которая герметизируется озоностойкой резиновой прокладкой.

Разрядники РВТ в днище имеют противовзрывное устройство, которое при повышении давления внутри разрядника до опасных значений открывается и тем самым предохраняет покрывку от взрыва. Разрядники серии РВТ имеют меньшие габариты и почти в 2 раза легче, чем соответствующие разрядники серии РВМ.

Вентильные разрядники серии РВТ разработаны и на напряжения 110—500 кВ. Они комплектуются из типовых элементов, имеющих одинаковое конструктивное выполнение. Каждый элемент имеет девять блоков (этажей). В

блоке содержатся такие же искровые промежутки с растягивающейся дугой, как и в разрядниках РВТ на напряжения 3—10 кВ, и тервитовые последовательные резисторы. Для уменьшения высоты элемента искровые промежутки и тервитовые диски в блоках расположены в три колонки, как у разрядников РВО-35. Такое размещение искровых промежутков и тервитовых дисков в блоках позволило уменьшить высоту.

Защитный коэффициент разрядников РВТ на 110—500 кВ при токе 10000 А не больше 1,7.

Разрядники серии РВРД (с растягивающейся дугой) аналогичны разрядникам РВТ, однако конструктивно разрядники этих двух серий несколько различаются. У разрядников серии РВРД магнитное поле, действующее на дугу, создается ферритами вместо катушек, примененных у разрядников серии РВТ. Дугогасящие камеры разрядников РВРД изготавливаются из более пористой керамики. Искровые промежутки и последовательные резисторы элемента разделены на 18 этажей. Каждый этаж состоит из двух сдвоенных искровых промежутков и двух тервитовых дисков диаметром 70 и высотой 30 мм каждый. Искровые промежутки имеют поджигающий промежуток и шунтированы тремя резисторами. В разрядниках РВРД меньше применяются пластики по сравнению с разрядниками РВТ.

Следует отметить, что в схеме любого вентильного разрядника важное значение имеет заземляющее устройство. При отсутствии заземления разрядник работать не может. Заземления вентильного разрядника и защищаемого им оборудования объединяются. В тех случаях, когда вентильный разрядник по каким-либо причинам имеет отдельное от защищаемого оборудования заземление, величина его нормируется в зависимости от уровня изоляции оборудования.

Комбинированные вентильные разрядники

Комбинированные вентильные разрядники (серия РВМК) предназначены для ограничения как грозовых, так и внутренних перенапряжений в электроустановках 330 – 500 кВ. Нелинейные резисторы разрядников РВМК изготов-

ливаются из тервита. Тервитовый резистор обеспечивают защиту от внутренних перенапряжений при проходящих через него токах до $1,5 \text{ кА}$, но при грозовых перенапряжениях, когда токи достигают 10 кА и более, вследствие высокого коэффициента нелинейности, он не может обеспечить защиту изоляции. Это обстоятельство привело к созданию комбинированных разрядников (рис. 5.16).

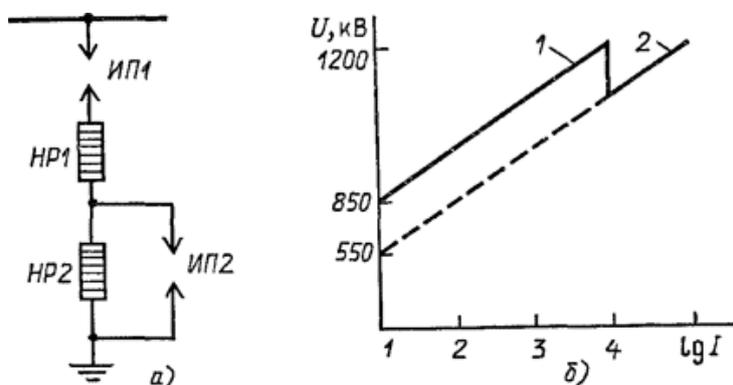


Рис. 5.16. Схема комбинированного разрядника и его ВАХ:

1 – при внутренних перенапряжениях; 2 – при грозовых перенапряжениях

Часть тервитового резистора (около 40%), зашунтированного дополнительным искровым промежутком ИП2, при внутренних перенапряжениях не пробивается (работают оба нелинейных резистора НР1 и НР2), и напряжение на разряднике соответствует характеристике 1 (рис. 5.16, б). При атмосферных перенапряжениях из-за большого тока (больше $1,5 \text{ кА}$) напряжение на ИП2 становится больше его пробивного напряжения, пробивается промежуток ИП2 и часть резистора НР2 закорачивается. При этом напряжение на разряднике следует характеристике 2 и остается в допустимых пределах.

В результате комбинированные магнитно-вентильные разрядники позволяют ограничивать как внутренние, так и атмосферные перенапряжения.

5.4. Нелинейные ограничители перенапряжений

5.4.1. Сравнительная характеристика ОПН и разрядников

Нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) отличаются от разрядников отсутствием искровых промежутков и высокой нелинейностью рабочих резисторов (варисторов). Энергия, которая поглощается ограничителем при коммутациях, грозовых и иных воздействиях в различных режимах (повышение напряжения в рабочих режимах, квазиустановившиеся и резонансные перена-

пряжения), не должна превосходить нормируемую для него величину. В противном случае наступает нарушение термической устойчивости и повреждение аппарата.

В распределительных устройствах подстанций и на переходных пунктах осуществляется замена морально и физически устаревших вентильных разрядников (РВ) 6-220 кВ на нелинейные ограничители перенапряжений, взрывобезопасные, с фарфоровой или полимерной (силиконовой) изоляцией, обладающей повышенной гидрофобностью, не требующие обслуживания и профилактических испытаний в течение всего срока эксплуатации (не менее 30 лет).

Общие недостатки разрядников:

- большой износ контактов (ограниченное число срабатываний);
- высокое минимальное напряжение возникновения разряда;
- значительное время срабатывания (1 ... 2 мс – процесс ионизации газа происходит лавинообразно и требует времени);
- кратковременный ток разрядника (срабатывание разрядника) может составлять значительную величину (10 ... 100 кА) – сопровождающий ток после прохождения волны перенапряжения;
- защищаемая цепь шунтируется после прохождения импульса перенапряжения (инерционность выключения доходит до 0,5 с);
- при работе на постоянном напряжении мощные разрядники могут иметь инерционность возврата в исходное состояние – 30 с;
- при изготовлении дается большой допуск на напряжение пробоя;
- большое значение остаточного напряжения, что не позволяет их использовать для защиты низковольтных электронных компонентов;
- параметры сильно зависят от окружающей среды (t °С, атмосферного давления, влажности);
- малый срок службы и низкая надежность межэлектродного пространства.

Характерные дефекты вентильных разрядников:

- неравномерное распределение напряжения по элементам (для многоэлементных разрядников);

- обрыв шунтирующего сопротивления;
- увлажнение внутренней части в результате разгерметизации;
- неправильная комплектация элементов.

У многоэлементных разрядников чаще всего из строя выходят верхние элементы из-за неравномерного распределения напряжения, которое может зависеть от высоты установки разрядника, от правильности установки элементов, конструктивного исполнения разрядника (в одну или в две колонки), размера экрана. Во многих случаях экран для вентильных разрядников 110-220 кВ не соответствует необходимым размерам, кроме того он должен быть изготовлен из трубы для уменьшения коронирования, а не из металлической полосы.

При наличии в фазе разрядника элемента, имеющего обрыв шунтирующего резистора, наблюдается более интенсивный нагрев других элементов этой фазы разрядника, а сам нерабочий элемент имеет более низкую температуру.

Обследования разрядников необходимо проводить не реже 1 раза в год (желательно летом), т.к. время развития дефектов, характерных для разрядников, составляет примерно 12 мес. Большинство вентильных разрядников, находящихся в эксплуатации энергосистем, выработали свой ресурс и уже не могут обеспечить эффективную защиту электрооборудования от перенапряжений. Поэтому количество выявляемых дефектных разрядников с каждым годом увеличивается. В связи с этим на первый план выходит проблема замены их на более надёжные и простые в эксплуатации нелинейные ограничители перенапряжений (ОПН), которые выпускаются как в фарфоровых, так и в полимерных корпусах. Контроль за ОПН, так же как и за разрядниками, необходимо осуществлять 1 раз в год. Оценка их состояния, производится пофазным сравнением температур нагрева ограничителей одного присоединения. Исправный ОПН по всей высоте не должен иметь локальных нагревов, а температуры между фазами не должны отличаться друг от друга. На практике, пока не было выявлено ни одного дефектного ограничителя.

Преимущества ОПН по сравнению с разрядниками:

- глубокий уровень ограничений для всех видов волн перенапряжений;

- отсутствие сопровождающего тока после затухания волны перенапряжения;
- простота конструкции и высокая надежность в эксплуатации;
- стабильность характеристик и устойчивость к старению;
- способность к рассеиванию больших энергий;
- непрерывное подключение к защищаемой сети;
- стойкость к атмосферным перенапряжениям;
- малые габариты и вес.

5.4.2. Принцип действия и конструктивное исполнение ОПН

Нелинейные ограничители перенапряжений, также как и вентильные разрядники, предназначены для защиты оборудования электрических сетей и электрических станций от коммутационных и грозовых перенапряжений. Для защиты электрооборудования от грозовых или коммутационных перенапряжений ОПН включается параллельно оборудованию (рис. 5.17).

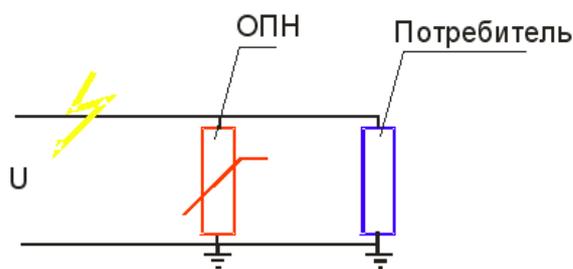


Рис.5.17. Включение ОПН

Основным элементом ОПН является нелинейный резистор – варистор. Основное отличие материала нелинейных резисторов ОПН от материала резисторов вентильных разрядников состоит в резко нелинейной вольт-амперной характеристики (ВАХ) и повышенной пропускной способности. Применение в ОПН высоконелинейных резисторов позволило исключить из конструкции аппарата искровые промежутки, что устраняет целый ряд недостатков, присущих вентильным разрядникам.

Основной компонент материала резисторов ОПН – оксид (окись) цинка ZnO. Оксид цинка смешивают с оксидами других металлов: закисью и окисью кобальта, окисью висмута и др. Технология изготовления оксидно-

цинковых резисторов весьма сложна и трудоёмка и близка к требованиям при производстве полупроводников: применение химически чистого исходного материала, выполнение требований по чистоте и т. д. К основным операциям при их изготовлении относятся перемешивание и измельчение компонентов, формовка (прессование) и обжиг. Микроструктура варисторов включает в себя кристаллы оксида цинка (полупроводник n – типа) и междукристаллической прослойки (полупроводник p – типа). Таким образом, варисторы на основе оксида цинка ZnO являются системой последовательно – параллельно включённых p – n переходов. Эти p – n переходы и определяют нелинейные свойства варисторов, то есть нелинейную зависимость величины тока, протекающего через варистор, от приложенного к нему напряжения.

В настоящее время варисторы для ОПН изготавливаются как цилиндрические диски диаметром 28 – 150 мм, высотой 5 – 60 мм (рис 5.18). На торцевой части дисков методом металлизации наносятся алюминиевые электроды толщиной 0,05 - 0,30 мм. Боковые поверхности диска покрывают глифталевой эмалью, что повышает пропускную способность при импульсах тока с крутым фронтом.

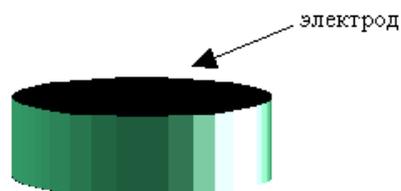


Рис. 5.18. Варистор

Диаметр варистора (точнее - площадь поперечного сечения) определяет пропускную способность варистора по току, а его высота - параметры по напряжению.

При изготовлении ОПН то или иное количество варисторов соединяют последовательно в так называемую колонку. В зависимости от требуемых характеристик ОПН и его конструкции и имеющихся на предприятии варисторов ограничитель может состоять из одной колонки (состоящей даже из одного варистора) или из ряда колонок, соединённых между собой последовательно/параллельно.

Защитные свойства ОПН объясняются вольт–амперной характеристикой варистора. Вольт – амперная характеристика конкретного варистора зависит от многих факторов, в том числе от технологии изготовления, рода напряжения - постоянного или переменного, частоты переменного напряжения, параметров импульсов тока, температуры и др.

В качестве примера типовая вольт-амперная характеристика варистора с наибольшим длительно допустимым напряжением 0,4 кВ в линейном масштабе приведена на рис. 5.19.

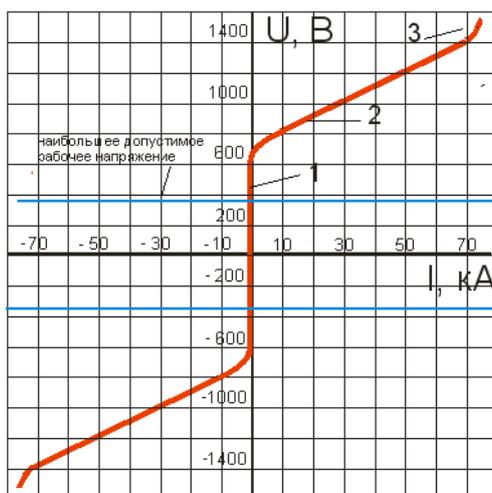


Рис. 5.19. Вольт – амперная характеристика варистора

На вольт-амперной характеристике варистора можно выделить три характерных участка: 1) область малых токов; 2) средних токов и 3) больших токов. Область малых токов – это работа варистора под рабочим напряжением, не превышающим наибольшее допустимое рабочее напряжение. В данной области сопротивление варистора весьма значительно. В силу неидеальности варистора сопротивление хотя и велико, но не бесконечно, поэтому через варистор протекает ток, называемый током проводимости. Этот ток мал и составляет десятые доли миллиампера.

При возникновении грозových или коммутационных импульсов перенапряжений в сети варистор переходит в режим средних токов. На границе первой и второй областей происходит перегиб вольт-амперной характеристики, при этом сопротивление варистора резко уменьшается (до долей Ома). Через варистор кратковременно протекает импульс тока, который может достигать десятков

тысяч ампер. Варистор поглощает энергию импульса перенапряжения, выделяя затем её в виде тепла, рассеивая в окружающее пространство. Импульс перенапряжения сети «срезается» (рис. 5.20).

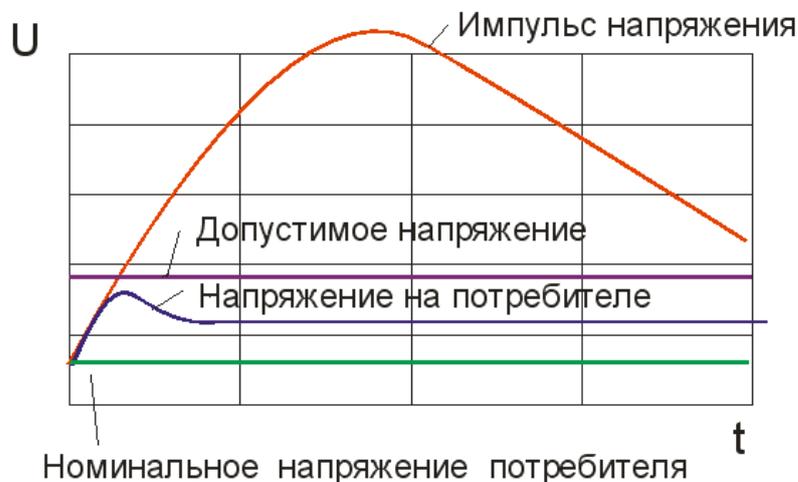


Рис. 5.20. Ограничение перенапряжения варистором

В третьей области (больших токов) сопротивление варистора снова резко увеличивается. Эта область для варистора является аварийной.

Колонки варисторов при воздействии напряжения ведут себя подобно конденсаторам. В нормальном рабочем режиме ток через ограничитель носит емкостной характер и составляет десятые доли миллиампера. При возникновении волн перенапряжений варисторы ОПН переходят в проводящее состояние и ограничивают дальнейшее нарастание напряжения на выводах. Когда перенапряжение снижается, ОПН возвращается в непроводящее состояние. Благодаря своей высокой нелинейности ОПН обеспечивают более глубокое ограничение перенапряжений по сравнению с вентильными разрядниками и выдерживают без ограничения времени рабочее напряжение сети. Отсутствие искрового промежутка обеспечивает постоянное подключение ОПН к защищаемому оборудованию.

Поскольку ОПН не имеет искрового промежутка, то через него протекает ток не только в рабочем режиме, но и при временном повышении напряжения промышленной частоты. Это приводит к тому, что у варисторов ОПН есть пределы поглощающей энергетической способности, которые определяют его пропускную способность. Допустимая величина этой энергии называется *энерго-*

емкостью ОПН. Так как ОПН выпускаются на различные классы напряжения сети, а энергоемкость является характеристикой варисторов, то ограничители характеризуются *удельной энергоемкостью* (отношение энергоемкости к наибольшему рабочему напряжению).

Пропускная способность варисторов и характер повреждения зависят от амплитуды и длительности тока, протекающего через них. Для грозовых перенапряжений она приведена в табл. 5.1.

Таблица 5.1. – Пропускная способность оксидно-цинковых варисторов при воздействии импульсов грозовых перенапряжений

Оксидно-цинковые варисторы (ВР)	Пропускная способность на импульсах тока 8/20 мкс, кА
ВР диаметром 28 мм	1,2 – 1,5
ВР диаметром 28 мм (боковая поверхность покрыта глифтальевым лаком)	2,2 – 2,5
ВР диаметром 28 мм (залитые полимерным компаундом с наполнителем)	≥ 5
ВР диаметром 60 мм	≥ 10
ВР диаметром 60 мм (залитые полимерным компаундом с наполнителем)	≥ 25

При коммутационных перенапряжениях, характеризующихся импульсами тока большой длительности, происходит существенный нагрев варисторов. Повреждение варисторов наблюдается при токах 80 – 120 А и характеризуется проплавлением в варисторах сквозных отверстий или их разрушением. При дальнейшем увеличении тока идет перекрытие по боковой поверхности.

Конструктивное исполнение ОПН

Основными составляющими ОПН являются:

металлооксидный варистор - единичный комплектующий элемент ОПН, имеющий нелинейную вольтамперную характеристику;

➤ элемент ОПН - полностью заключенная в корпус часть ОПН, которая может быть соединена последовательно и/или параллельно с другими элементами ОПН для выполнения конструкции ОПН на более высокое наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение и/или ток;

➤ экранное кольцо ОПН - часть ОПН, предназначенная для изменения распределения напряженности электрического поля в определенной части пространства;

➤ устройство для сброса давления (противовзрывное устройство) - устройство, обеспечивающее снижение внутреннего давления в ограничителе при возникновении в нем внутреннего повреждения и предотвращающее взрывное разрушение корпуса ОПН или его разрушение с разлетом осколков за нормируемую зону;

➤ корпус – внешняя часть ОПН, являющаяся внешней изоляцией.

Активная часть ОПН состоит из колонки варисторов. Количество варисторов в колонке зависит от наибольшего рабочего напряжения ОПН ($U_{нр}$). ОПН выпускаются как в многоколонковом, так и одноколонковом исполнении (рис. 5.22). Варисторы размещаются в фарфоровом или полимерном корпусе. В ОПН с фарфоровым корпусом колонки варисторов располагаются внутри стеклопластиковой трубы. Внутренняя полость между колонками и фарфоровой крышкой заполнена воздухом или газом или кварцевым песком. При этом песком заполняется только часть объема (рис. 5.21), остальная часть заполнена воздухом. Воздушный зазор обеспечивает необходимые условия взрывобезопасности при внутренних коротких замыканиях.

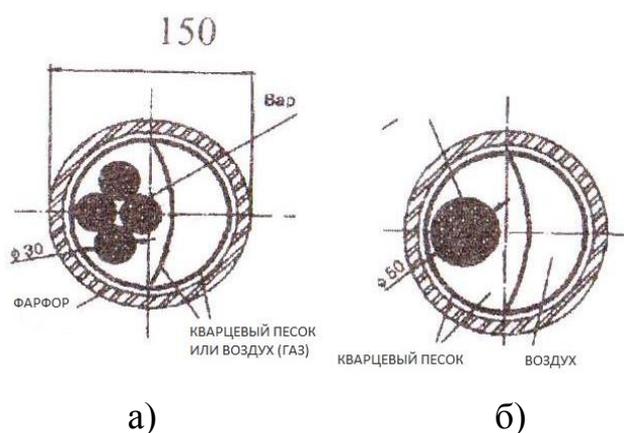


Рис. 5.21. Поперечное исполнение ОПН 220 кВ:

а) многоколонковый ОПН; б) одноколонковый ОПН

Возможны и другие способы обеспечения взрывобезопасности, например, устройство сброса давления (противовзрывное устройство), которое обеспечи-

вадет снижение внутреннего давления в ОПН при прохождении по нему токов короткого замыкания, и предотвращает взрывное разрушение корпуса ОПН (рис. 5.22, а).

Новая конструкция ОПН гарантирует 100% взрывобезопасность за счет наличия перфорации в стеклопластиковом цилиндре (5.22, б).

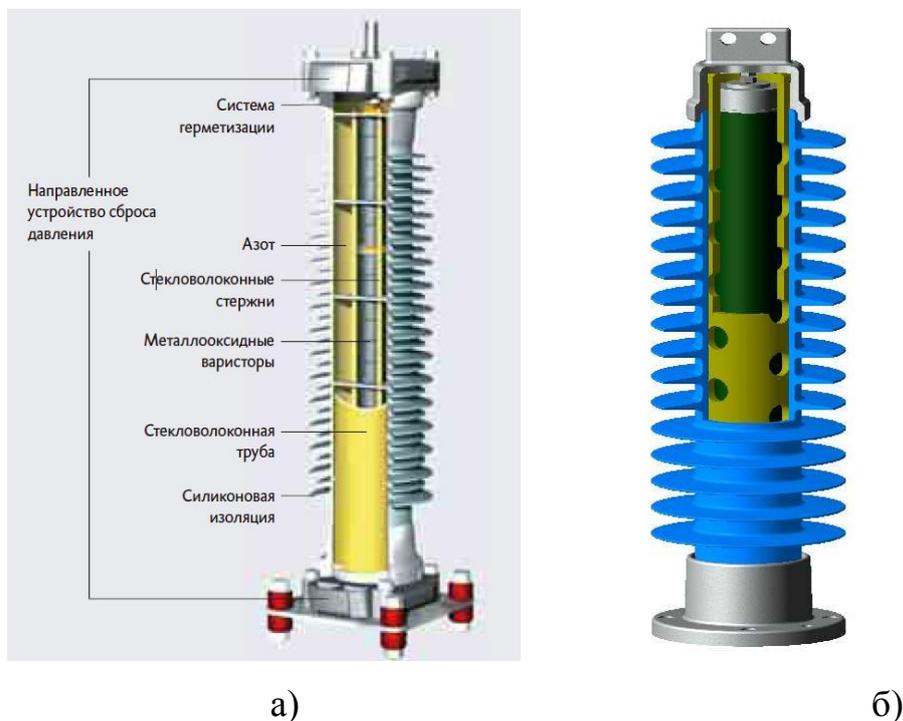


Рис. 5.22. Конструкции ОПН с направленным устройством сброса давления в полимерном корпусе (а) и с перфорированным стеклопластиковым цилиндром (б)

Варисторы опрессовываются в оболочку из полимерных материалов, которая обеспечивает заданную механическую прочность и изоляционные характеристики. Полимерный корпус обеспечивает надежную защиту от всех внешних воздействий на протяжении всего срока службы. Эта конструкция отлично зарекомендовала себя во всех условиях эксплуатации, включая районы с высоким уровнем атмосферных загрязнений.

Паразитная емкость переменных сопротивлений по отношению к земле приводит к неравномерному распределению напряжения по высоте ОПН. С целью выравнивания потенциала вдоль оси и компенсации неблагоприятного влияния паразитной емкости в высоковольтных ОПН применяются выравнива-

ющие кольца. В ОПН 6-35 кВ высота конструкции невелика, поэтому применение выравнивающих экранов не требуется.

В настоящее время ОПН в одноколонковом исполнении выпускаются на все классы номинального напряжения. Технология производства стеклопластиковых корпусов и нанесения на них защитного ребристого покрытия позволяет выпускать ОПН в полимерном корпусе (ОПНп) в одноэлементном исполнении до 1-2 м. При большей высоте ОПН составляются из двух или нескольких модулей. Такая конструкция обеспечивает минимальную металлоемкость и высоту ОПНп и существенно повышает надежность их работы при увлажнении загрязненной поверхности аппарата. По сравнению с ОПН в фарфоровых корпусах и многоколонковыми ОПН, одноколонковые ОПН в полимерных корпусах имеют следующие преимущества:

- глубокое ограничение перенапряжений и соответственно существенно более высокую надежность работы высоковольтного оборудования и более высокое качество параметров электрических сетей;
- уменьшение веса в 10 - 20 раз, что позволяет устанавливать их непосредственно на выводах трансформаторов и электродвигателей в ячейках КРУ, а также между фазами для глубокого ограничения междуфазных перенапряжений;
- существенное увеличение допустимой плотности тока через варисторы (до 25...30 А/см) при коммутационных импульсах. Такие характеристики ОЦВ при высокой степени нелинейности их вольтамперной характеристики обеспечивают значительное уменьшение размеров и массы ОПН;
- высокая механическая прочность и малая масса ОПНп, что позволяет устанавливать их не только на подстанциях, но и на линиях электропередачи без усиления конструкции опор;
- эффективное применение ОПН на подходах к подстанциям для ограничения грозовых перенапряжений;

- обеспечение практически одинакового ограничения коммутационных перенапряжений вдоль линии электропередачи любой длины путем применения подвесных ОПН;
- снижение уровней междуфазных перенапряжений до уровня перенапряжения относительно земли;
- применение ОПНп для вновь создаваемых ЛЭП позволит существенно уменьшить высоту опор, снизить их габариты и металлоемкость.

Для защиты высоковольтной изоляции ВЛ напряжением 35-220 кВ используются подвесные (линейные) ОПН, в том числе и в качестве альтернативы тросовому молниеотводу. Примеры таких ОПН показаны на рис. 5.23.

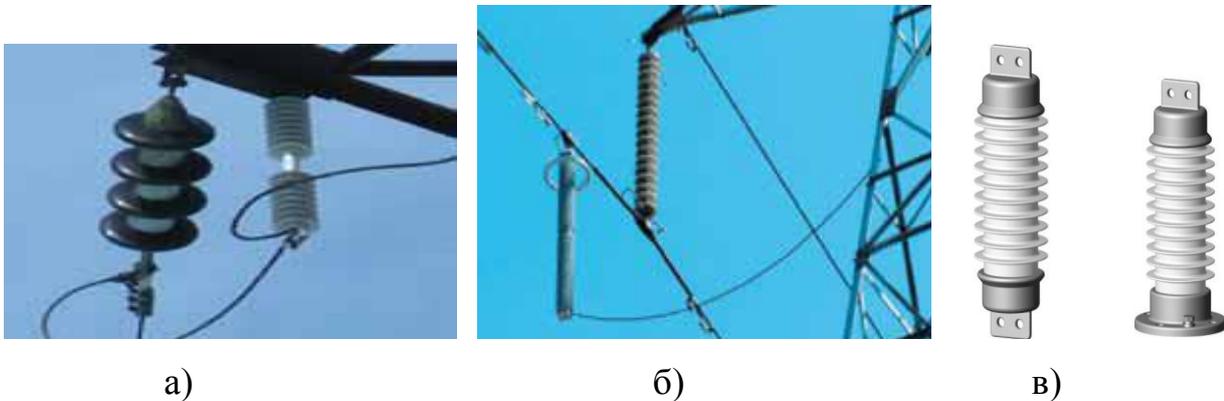


Рис. 5.23. Подвесные ОПН с полимерной изоляцией:

- а) Подвесной ОПН 35 кВ;
- б) Подвесной ОПН 220 кВ;
- в) подвесной ОПН 10 кВ (ОПН-П-10-УХЛ1)

Подвесные ОПН должны удовлетворять следующим характеристикам:

- взрывобезопасность на токи не менее 65 кА – на класс напряжения 110-220 кВ, не менее 20 кА на класс напряжения 35 кВ;
- внешняя изоляция должна быть из полимерного материала (силикона);
- линейные ОПН должны оснащаться самоосвобождающейся контактной частью, обеспечивающей возможность включения ВЛ в работу после их повреждения.

5.4.3. Основные параметры и характеристики ОПН и их маркировка

Основными параметрами ограничителя являются:

- номинальное напряжение;
- наибольшее длительно допустимое напряжение;
- номинальный разрядный ток;
- остающееся напряжение при нормированных токах;
- удельная энергоемкость, определяющая класс энергоемкости;
- ток пропускной способности.

Номинальное напряжение ОПН, $U_{ном}$ – действующее значение напряжения промышленной частоты, которое ограничитель может выдерживать в течение 10 с в процессе рабочих испытаний. Номинальное напряжение должно быть не менее 1,25 наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения.

Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение ОПН, $U_{нр}$ – это установленное максимально допустимое действующее значение напряжение промышленной частоты, которое может быть приложено непрерывно между выводами ОПН и не приводит к повреждению при нормированных воздействиях.

Номинальный разрядный ток ОПН, I_p – максимальное значение грозового импульса тока 8/20 мкс, используемое для классификации ОПН.

Остающееся напряжение ОПН, $U_{ост}$ – амплитудное значение напряжение на выводах ОПН во время прохождения разрядного грозового или коммутационного тока с амплитудой I .

Удельная энергоемкость – это отношение выделившейся в ОПН энергии при прямоугольном импульсе тока 8/20 к наибольшему рабочему напряжению.

Ток пропускной способности ОПН – это способность выдержать 18 раз прямоугольный импульс тока длительностью 2000 мкс.

Остающиеся напряжения на ОПН должны быть указаны изготовителем в технических документах на конкретные типы ограничителей при импульсах токов 30/60 мкс, 8/20 мкс и 1/10 мкс с максимальными значениями импульсов, указанными в таблице 5.2.

Таблица 5.2. - Нормируемые максимальные значения импульсов токов через ОПН

Класс ОПН по пропускной способности	Номинальный разрядный ток, А	Максимальные значения токов, А, при импульсах, мкс		
		30/60	8/20	1/10
1	5000	125,250,500	2500,5000, 10000	5000
	10000	125,250,500	5000, 10000,20000	10000
2	10000	250,500, 1000	5000, 10000,20000	10000
3	10000	500,1000, 2000	5000, 10000,20000	10000
4	10000	500,1000,2000	5000,10000,20000	10000
	20000	500,1000,2000	10000,20000,40000	20000
5	20000	500,1000,2000	10000,20000,40000	20000

Нормируемая форма волны тока в России и по стандарту МЭК - 8/20 мкс, нормируемые амплитуды - 3, 5, 7, 10, 15 и 20 кА в зависимости от класса напряжения ОПН.

Энергоемкость ОПН является характеристикой, отражающей совокупность воздействий на него в различных режимах при напряжениях выше $U_{нр}$. Под *энергоемкостью* ОПН понимают значение энергии, поглощаемой ограничителем в переходном процессе. Она определяется по одному нормируемому испытательному импульсу тока.

Класс энергоемкости ОПН характеризуется величиной удельной поглощаемой энергии кДж на 1 кВ наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения ОПН, $U_{нр}$ или номинального напряжения, $U_{ном}$.

Еще одной из важных характеристик ОПН является ток срабатывания противовзрывного устройства, под которым понимают значение тока однофазного или трехфазного (большого из них) короткого замыкания, $I_{кз}$, при котором не происходит взрывного разрушения покрышки ограничителя. Если покрышка ограничителя все же будет повреждена, то ее элементы должны находиться внутри нормируемой зоны.

Характеристика «напряжение промышленной частоты в зависимости от времени» или «напряжение-время» [5] (способность выдерживать воздействие кратковременных перенапряжений) показывает выдерживаемое напряжение промышленной частоты в зависимости от времени его приложения к ОПН, т.е. максимальный промежуток времени, в течение которого к ОПН может быть

приложено напряжение промышленной частоты, превышающее U_{np} , не вызывая повреждения или термической неустойчивости. Пример таких характеристик для разных типов ОПН приведен на рис. 5.21. Чем выше величина T , тем больше мощность, выделяющаяся в ОПН. Поскольку температура ОПН не должна превысить определенную величину по причинам стабильности, энергия, переданная ему, также ограничена. По этой причине допустимая продолжительность нагрузки ОПН уменьшается с увеличением T , а следовательно, и с повышением напряжения промышленной частоты.

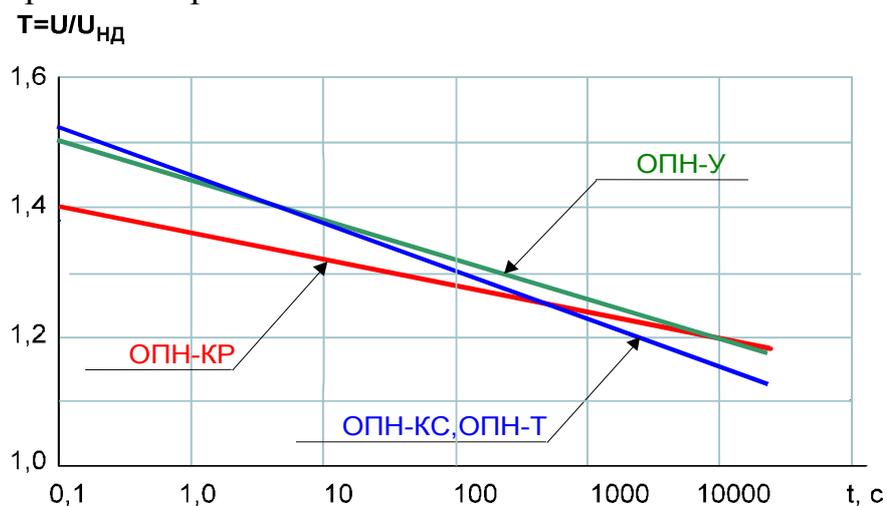


Рис. 5.21. Характеристика «напряжение промышленной частоты в зависимости от времени»

Кривая $T(t)$ снимается при предварительном нагреве образцов до 60°C для случаев с и без нагрузки энергией соответствующей двум импульсам пропускной способности. Характеристика «напряжение - время» является определяющей при выборе ОПН по условию надежной его работы.

Характеристика «напряжение - время» должна быть определена для случаев до и после предварительного воздействия на ОПН энергии, соответствующей:

- для ограничителей класса пропускной способности 1 - одному импульсу большого тока с амплитудой 65000 A ;
- для ограничителей классов пропускной способности 2 и выше - двум импульсам нормированного тока пропускной способности.

Для ограничителей, работающих в сети с эффективно или глухо заземленной нейтралью, эта зависимость должна быть определена для диапазона времени от 0,1 до 1200 с. Для ограничителей, работающих в сети с изолированной или компенсированной нейтралью, она должна быть определена для диапазона времени от 0,1 с до 6 ч.

К характеристикам ОПН также относятся защитные уровни.

Защитный уровень ОПН при грозовом импульсе представляет собой максимальное остающееся напряжение при номинальном разрядном токе. Его применяют при защите оборудования от перенапряжений с крутым фронтом.

Защитный уровень при коммутационном импульсе представляет собой максимальное остающееся напряжение при установленных токах коммутационного импульса. Его применяют при защите оборудования от перенапряжений с пологим фронтом.

Все многообразие ОПН подразделяется на группы:

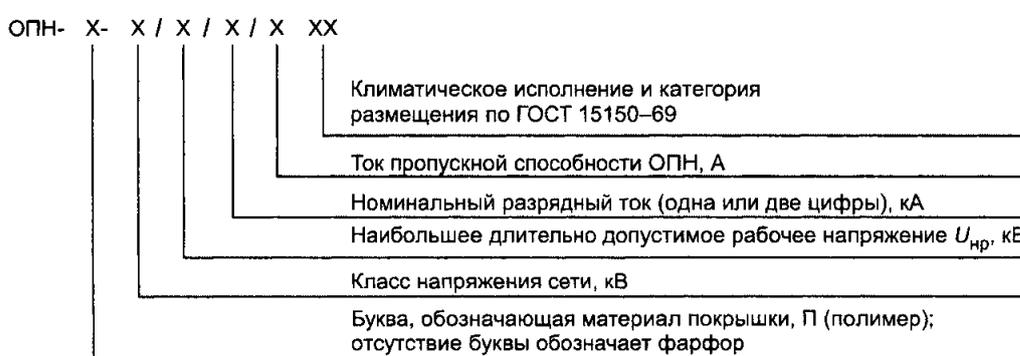
- по наибольшему допустимому напряжению;
- по пропускной способности;
- по величине номинального разрядного тока (5, 10, 20 кА).

Класс пропускной способности - число, связанное со способностью ОПН с номинальным разрядным током 10 и 20 кА поглощать энергию разряда длинных линий. Существуют пять классов, причем возрастание номера указывает на возрастающую способность поглощения энергии. Для ОПН с классом пропускной способности ≥ 2 получающийся разрядный ток используют в рабочих испытаниях для проверки термической стабильности после поглощения энергии. Процессы в сети, вызывающие токи в ОПН с различными формами, могут быть оценены путем сравнения с энергией и током эквивалентного разряда линии. Классы по пропускной способности и удельные энергии приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3 - Классы пропускной способности (энергоемкости) ОПН и соответствующая им удельная энергия

Класс пропускной способности	Пропускная способность, А	Удельная энергия, кДж/кВ, не менее
1	От 250 до 400 включительно	1,0
2	От 401 до 750 включительно	2,0
3	От 751 до 1100 включительно	3,2
4	От 1101 до 1600 включительно	4,5
5	Свыше 1601	7,1

Рекомендуемая в соответствии с [5] структура условного обозначения ОПН имеет вид:



Пример условного обозначения ограничителя приведен ниже:

ОПН-П-220/146/10/550 УХЛ 1

Категории размещения указываются в соответствии с ГОСТ 15150, а воздействие климатических факторов - ГОСТ 15150 и ГОСТ 15543.1.

В настоящий момент в России применяются ОПН различных фирм, производящих их как на основе собственных конструкторских решений, так и по лицензиям международных электротехнических концернов. Комплектация ОПН осуществляется варисторами различных производителей, с отличающимися коэффициентами нелинейности. Поэтому ОПН разных производителей, предназначенные для применения в одном классе напряжения, имеют характеристики, несколько отличающиеся друг от друга. При этом ряд фирм имеет в своей номенклатуре по несколько типов и модификаций ОПН в одном классе напряжения. В соответствии с вышесказанным, на каждом ОПН должны быть указаны:

- товарный знак предприятия-изготовителя;
- условное обозначение ОПН;

- порядковый номер по системе нумерации предприятия-изготовителя;
- номинальная частота в герцах;
- масса (кг) для ОПН массой 10 кг и более;
- год выпуска.

Каждый элемент многоэлементного ограничителя должен иметь маркировку в виде таблички с данными соответствующего элемента (для напряжения 35 кВ и выше). На ОПН напряжением до 35 кВ допускается наносить маркировку непосредственно на изделие.

В качестве примера в табл. 5.4 приведены типы ОПН, применяемые в электроэнергетике РФ.

Таблица 5.4 – Примеры типов ОПН, применяемых в России

Производитель	Типы ОПН
Таврида Электрик	ОПН-КР ОПН-КС ОПН/TEL ОПН-КР ОПН-Т ОПН-У
ООО «Севзапротм»	ОПН-П-10/10,5/5/400 УХЛ1 УХЛ2 ОПН-Пп-35/40,5/10/550 УХЛ1
SIEMENS	3EQ1 3EQ4 3EQ3
ЗАО «Завод электротехнического оборудования»	ОПН-П1-35/40,5/10/2 УХЛ1
ABB	PEXLIM R, класс разряда линии 2 по МЭК PEXLIM Q, класс разряда линии 3 по МЭК PEXLIM P, класс разряда линии 4 по МЭК HS PEXLIM P-T, класс разряда линии 4 по МЭК HS PEXLIM T-T, класс разряда линии 5 по МЭК EXLIM R Exlim R 072-CN 123

5.4.3. Выбор ОПН

Выбор ОПН напряжением от 3 до 750 кВ осуществляется в соответствии [4].

Порядок выбора

1. Выбор наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения ОПН.
2. Выбор номинального напряжения ОПН по условиям работы в квазиустановившихся режимах.
3. Выбор класса пропускной способности ОПН.

4. Выбор ОПН по условиям обеспечения взрывобезопасности.
5. Определение защитного уровня ОПН при коммутационных перенапряжениях.
6. Определение защитного уровня ОПН при грозовых перенапряжениях.

Выбор наибольшего длительно допустимого рабочего напряжения ОПН

Для повышения надежности выбирают ОПН с наибольшим длительно допустимым рабочим напряжением (U_{np}) выше наибольшего значения рабочего напряжения (фазного) сети в точке его установки ($U_{нс}$) по условию:

$$U_{np} \geq 1,05U_{нс}. \quad (5.6)$$

Здесь 1,05 – коэффициент запаса, учитывающий увеличение максимального напряжения сети из-за гармоник.

Как правило, наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение должно быть:

- в сетях с автоматическим устранением замыкания на землю — не менее чем максимальное значение наибольшего рабочего напряжения фаза — земля, деленное на $\sqrt{2}$;

- в сетях с резонансно заземленными или изолированными нейтральными без автоматического устранения замыкания на землю — не менее чем наибольшее рабочее напряжение.

Если наибольшее рабочее напряжение в месте установки ОПН точно не известно, оно должно быть заменено наибольшим напряжением сети или наибольшим рабочим напряжением оборудования.

Выбор номинального напряжения

Номинальное напряжение ОПН выбирают в зависимости от квазистационарных перенапряжений в сети в месте установки ОПН, учитывая их амплитуды и продолжительность. Основное требование заключается в том, что характеристика ОПН «напряжение промышленной частоты в зависимости от времени» должна быть выше, чем характеристика сети «амплитуда квазистационарного перенапряжения в зависимости от продолжительности».

Рассматривают следующие причины квазистационарных перенапряжений:

- перенапряжения при замыканиях на землю. Продолжительность перенапряжения зависит от продолжительности замыкания. В сетях с заземленной нейтралью она, как правило, меньше чем 1 с. В сетях с резонансно заземленной нейтралью с автоматическим устранением замыкания она, как правило, меньше чем 10 с. В сетях без автоматического устранения замыкания на землю продолжительность может составлять несколько часов;

- сбросы нагрузки. После отключения нагрузок возрастает напряжение на сработавшем силовом выключателе со стороны источника питания. Амплитуда перенапряжения зависит от отключенной нагрузки и от мощности короткого замыкания питающей подстанции. Квазистационарные перенапряжения имеют особенно высокие амплитуды после полного сброса нагрузки на генераторных трансформаторах в зависимости от условий намагничивания и превышения нормальной скорости. Амплитуда перенапряжений, вызванных сбросом нагрузки, как правило, изменяется в течение их периода действия.

В качестве руководства могут быть использованы следующие типичные значения:

- в небольших по протяженности сетях полный сброс нагрузки может вызвать подъем перенапряжений фаза — земля с амплитудой, как правило, ниже 1,2 отн. ед. Продолжительность перенапряжения зависит от срабатывания аппаратуры, регулирующей напряжение, и может достигать нескольких минут;

- в протяженных сетях после полного сброса нагрузки амплитуда перенапряжений фаза — земля может достигать 1,5 отн. ед. или даже более в случае появления эффекта Ферранти или резонанса. Продолжительность перенапряжений может составлять несколько секунд;

- при сбросе нагрузки генераторных трансформаторов амплитуды квазистационарных перенапряжений могут достигать 1,4 отн. ед. для турбогенераторов и 1,5 отн. ед. для гидрогенераторов. Продолжительность перенапряжений приблизительно 3 с.

Номинальное напряжение ОПН должно быть не менее наибольшего эквивалентного квазистационарного перенапряжения, определяемого по формуле:

$$U_{\text{экв}} = U_{\text{к}} \left(\frac{T_{\text{к}}}{10} \right)^m, \quad (5.7)$$

где $U_{\text{к}}$ - амплитуда квазистационарного перенапряжения;

$T_{\text{к}}$ - продолжительность квазистационарного перенапряжения в секундах;

$U_{\text{экв}}$ - амплитуда эквивалентного 10-секундного квазистационарного перенапряжения;

m - показатель степени, описывающей характеристику ОПН «напряжение промышленной частоты в зависимости от времени». В качестве усредненного значения может принять $m = 0,02$.

Выбор номинального разрядного тока и класса пропускной способности

Способность ОПН поглощать энергию связана с номинальным разрядным током. Поглощение энергии ОПН, обусловленное воздействием переходного перенапряжения сети, зависит от характеристики ОПН «остающееся напряжение – ток» и от номинального разрядного тока.

Номинальный разрядный ток выбирают в соответствии с грозовым разрядным током через ОПН, от которого требуется защитить оборудование.

Как правило, в зависимости от ожидаемого грозового разрядного тока приемлемы следующие значения:

Сети напряжением от 1 до 220 кВ: 5 или 10 кА

В сетях диапазонов I и II по ГОСТ 1516.3, где линейные расстояния между ОПН небольшие (менее 5 км), ОПН на распределительных трансформаторах с номинальным разрядным током 5 кА достаточно надежны, даже когда трансформаторы подсоединены к линиям на деревянных опорах с незаземленными траверсами.

В сетях классов напряжения 35 кВ и ниже ОПН с номинальным разрядным током 5 кА могут быть достаточными для районов с низкой плотностью ударов в землю и эффективно защищенными отходящими воздушными линиями с низ-

кими сопротивлениями фундаментов опор. ОПН с номинальным разрядным током 10 кА могут быть предпочтительными для важных установок (необходимых для наилучшей защиты) особенно в районах с высокой плотностью ударов в землю или высокими сопротивлениями земли.

В сетях классов напряжения 110 кВ и выше, как правило, рекомендуются ОПН с номинальным разрядным током 10 кА.

Сети напряжением от 330 до 750 кВ: 10 или 20 кА

Для сетей класса напряжения 330 кВ, как правило, достаточны ОПН с номинальным разрядным током 10 кА.

Для сетей классов напряжения выше 330 кВ могут потребоваться ОПН с номинальным разрядным током 20 кА.

ОПН должны быть способны поглощать энергию, обусловленную кратковременными перенапряжениями в сети. Считаются опасными кратковременные перенапряжения, которые возникают вследствие:

- включения или повторного включения длинных линий;
- отключения батарей конденсаторов или кабелей силовыми выключателями, допускающими повторные зажигания дуги;
- ударов молнии в провода воздушной линии с высоким уровнем изоляции или обратных перекрытий, близких к месту установки ОПН.

При известных уровнях защиты ОПН энергия, поглощаемая ОПН, определяется следующим образом.

Включение или повторное включение линий:

$$W = 2U_{зк} (U_{п} - U_{зк}) \frac{T_B}{Z} \quad (5.8)$$

где W - поглощенная ОПН энергия;

$U_{зк}$ - защитный уровень ОПН при коммутационном импульсе;

$U_{п}$ - амплитуда перенапряжения;

Z - волновое сопротивление линии;

T_B - время распространения волны вдоль линии, равное длине линии, деленной на скорость распространения волны;

Ориентировочно амплитуду перенапряжения U_n можно принять по таблицам 5.5 и 5.6. Все приведенные в них значения относятся к перенапряжениям на открытом конце линии (принимающий конец). Перенапряжения на питающем конце могут быть значительно ниже.

Таблица 5.5 - Диапазоны 2%-ных перенапряжений с пологим фронтом на приемном конце при включении линии

Наличие выключателей с одноступенчатым шунтирующим резистором		Да				Нет			
		Комплексная		Индуктивная		Комплексная		Индуктивная	
Характеристика питающей сети		> 50	< 50	> 50	< 50	> 50	< 50	> 50	< 50
Степень параллельной компенсации, %		> 50	< 50	> 50	< 50	> 50	< 50	> 50	< 50
Амплитуда перенапряжения, отн.ед.	Максимальная	1,28	2,00	1,89	2,22	2,11	2,59	2,78	2,89
	Минимальная	1,05	1,28	1,33	1,39	1,61	1,39	1,78	1,67

Таблица 5.6 - Диапазоны 2%-ных перенапряжений с пологим фронтом на приемном конце при повторном включении линии

Наличие выключателей с одноступенчатым шунтирующим резистором		Да				Нет			
		Комплексная		Индуктивная		Комплексная		Индуктивная	
Характеристика питающей сети		> 50	< 50	> 50	< 50	> 50	< 50	> 50	< 50
Степень параллельной компенсации, %		> 50	< 50	> 50	< 50	> 50	< 50	> 50	< 50
Амплитуда перенапряжения, отн.ед.	Максимальная	1,94	1,78	2,17	2,11	2,44	3,44	3,5	3,67
	Минимальная	1,57	1,22	1,30	1,33	1,50	1,50	2,89	2,17

В таблицах 5.5 и 5.6 приведены диапазоны 2%-ных значений (т. е. вероятность превышения которых равна 2 %) перенапряжений (в относительных единицах от $\sqrt{2} U_{НС} / \sqrt{3}$, где $U_{НС}$ — наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение в электрической сети), которые могут быть ожидаемы между фазой и землей без ограничения с помощью ОПН.

Коммутация конденсатора или кабеля:

$$W = \frac{1}{2} C ((3U_0)^2 - (\sqrt{2}U_H)^2) \quad (5.9)$$

где C - емкость одной фазы батареи или кабеля;

U_0 - максимальное значение рабочего напряжения фаза - земля;

U_H - номинальное напряжение ОПН (действующее значение).

Энергия может быть распределена между несколькими ОПН, установленными на одной и той же фазе, при этом должно быть определено соотношение в распределении энергии.

Молния:

$$W = [2U_H - NU_{зг} (1 + \ln \frac{2U_H}{U_{зг}})] \frac{U_{зг} T_{г}}{Z}, \quad (5.10)$$

где U_H - напряжение перекрытия линейной изоляции при отрицательной полярности;

$U_{зг}$ - уровень защиты ОПН при грозовом импульсе;

Z - волновое сопротивление линии;

N - число линий, подключенных к ОПН;

$T_{г}$ - эквивалентная продолжительность тока грозового разряда, включая первый и последующие удары. Типичное значение $3 \cdot 10^{-4}$ с.

Если расстояния между подстанциями в распределительной сети небольшие, энергия может быть уменьшена из-за распределения тока.

По найденной энергии, поглощаемой ОПН, рассчитывается удельная энергоемкость, кДж/кВ:

$$W_{уд} = W/U_{нр} \quad (5.11)$$

По ее найденному значению в соответствии с табл. 5.3 определяется класс пропускной способности.

Выбор ОПН по условиям обеспечения взрывобезопасности

Под током взрывобезопасности ОПН, $I_{вз.без}$ понимают максимальное действующее значение установившегося большого тока короткого замыкания, при котором он еще сохраняет свою взрывобезопасность.

В случае внутреннего повреждения ОПН протекающий через него аварийный ток не должен вызывать взрывного разрушения покрышки. Следовательно, ОПН должен выдерживать аварийный ток, равный или больший, чем наибольший аварийный ток через ОПН в точке его установки.

Исходя из вышесказанного, наибольший ток короткого замыкания сети в точке установки ОПН должен быть меньше его тока взрывобезопасности, который указывается заводом-изготовителем.

$$I_{кз} < I_{вз.без} \quad (5.12)$$

Для ОПН нормируется величина тока срабатывания противовзрывного устройства, при которой не происходит взрывного разрушения покрышки ОПН при его внутреннем повреждении.

Значения токов срабатывания этих устройств у разных производителей отличаются в несколько раз. Испытания противовзрывного устройства предусматривают его срабатывание при максимальных значениях токов за несколько сотых долей секунды, при минимальных токах (порядка 0,5 кА) за время до 0,5 с. При этом, если КЗ не отключено и дуга горит вдоль поверхности ограничителя между соплами, до 1,0 с это не вызывает ее нарушения. При горении дуги от 1,0 до 8,0 с под дугой происходит отрыв ребер от покрышки и их осыпание в полукруге с радиусом, равным высоте ограничителя.

При выборе ограничителей с токами срабатывания противовзрывного устройства до 40 кА, его значение должно быть на 15-20% больше значения тока (однофазного или трехфазного) КЗ, определенного для данного РУ.

Для ОПН с токами срабатывания противовзрывного устройства свыше 40 кА при горении дуги вдоль поверхности покрышки (если она замкнута по поверхности), введение коэффициента запаса не требуется.

Определение защитного уровня ОПН при коммутационных перенапряжениях.

Выбранный выше тип ОПН проверяется на обеспечение им требуемого защитного уровня коммутационных перенапряжений.

Величина коммутационных перенапряжений определяет значение остающегося напряжения ОПН, которое должно быть при расчетном токе не менее чем на 15-20% ниже испытательного напряжения $U_{ки}$ коммутационным импульсом защищаемого электрооборудования:

$$U_{ост\ к} \leq U_{ки} / (1,15-1,2). \quad (5.13)$$

Для оборудования со сроком эксплуатации свыше 10 лет рекомендуется увеличить эту разницу до 30-40%.

Выдерживаемый уровень коммутационных перенапряжений можно определить по формуле:

$$U_{ки} = 1,41 \cdot 1,35 \cdot 0,9 U_{исп50}, \quad (5.14)$$

где $U_{исп50}$ – 50 %-ное испытательное напряжение электрооборудования на коммутационном импульсе

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 ОПН недостаточно, то учитывают все ОПН рассматриваемого РУ данного класса напряжения, на которые воздействует данное перенапряжение, с пропорциональным снижением тока через один ОПН.

ОПН должен обеспечить защитный координационный интервал по внутренним перенапряжениям, $A_{вн}$:

$$A_{вн} = (U_{дон} - U_{ост\ к}) / U_{дон} > (0,15-0,25), \quad (5.15)$$

где $U_{дон}$ – допустимый уровень внутренних перенапряжений;

$U_{ост\ к}$ – остающееся напряжение на ОПН при коммутационном импульсе.

Определение защитного уровня ОПН при грозовых перенапряжениях

ОПН должен обеспечить необходимый защитный координационный интервал по грозовым воздействиям, $A_{гр}$:

$$A_{гр} = (U_{исп} - U_{ост}) / U_{исп} > (0,2-0,25), \quad (5.16)$$

где $U_{исп}$ – значение грозового испытательного импульса;

$U_{ост}$ – остающееся напряжение на ОПН при номинальном разрядном токе;

(0,2-0,25) – координационный интервал.

ОПН, выбранный по всем указанным условиям, соответствующим его применению, обеспечит надежную защиту электроустановок.

5.5. Длинно-искровые разрядники

Длинно-искровые разрядники (РДИ) являются российской разработкой и по своим конструктивным параметрам, техническим характеристикам и функциональным возможностям представляют особый класс устройств молниезащиты, не имеющих мировых аналогов. Принцип действия всех видов РДИ заключается в ограничении грозовых перенапряжений на ВЛ за счет искрового перекрытия по поверхности изоляционного тела разрядника с длиной канала разряда, в несколько раз превосходящей строительную высоту защищаемой изоляции, и гашении сопровождающих токов промышленной частоты за счет обеспеченного таким образом снижения величины среднего градиента рабочего напряжения вдоль канала грозового перекрытия.

Главным отличительным достоинством класса длинно-искровых разрядников является их неподверженность разрушениям и повреждениям грозовыми и дуговыми токами, поскольку они протекают вне аппаратов, по воздуху вдоль их поверхности. Их применяют в качестве эффективного и надежного средства защиты воздушных линий с любыми видами опор и изоляторов, как защищенными так и неизолированными проводами от грозовых перенапряжений и их последствий.

Длинно-искровые разрядники выпускаются на напряжение 10 кВ трех типов: петлевые (РДИП-10-IV-УХЛ1), шлейфовые (РДИШ-10-IV-УХЛ1) и модульные (РДИМ-10-К-II-УХЛ1).

Рассмотрим конструкцию и принцип действия разрядника типа РДИП.

Разрядник длинно-искровой петлевой

Разрядник РДИП состоит из согнутого в виде петли металлического стержня, покрытого слоем изоляции из полиэтилена высокого давления. Концы

изолированной петли закреплены в зажиме крепления, с помощью которого разрядник присоединяется к штырю изолятора на опоре ВЛ (рис.5.22). В средней части петли поверх изоляции расположена металлическая трубка.

Схема установки на опоре со штыревыми изоляторами

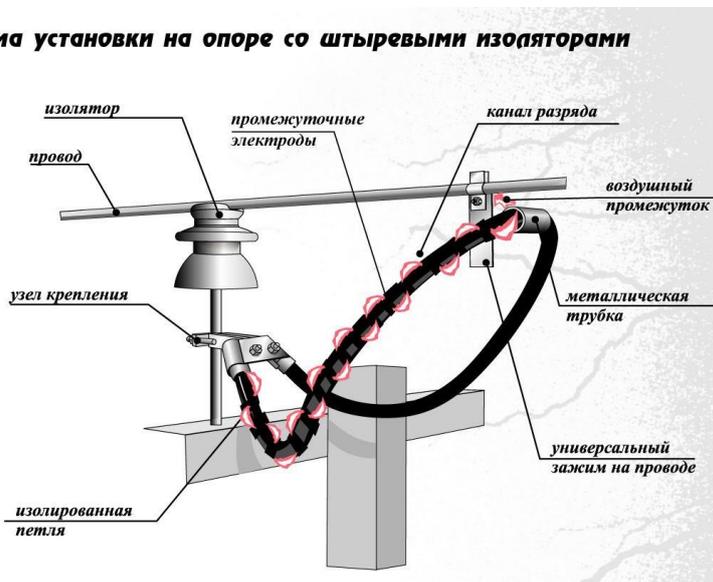


Рис. 5.22. Установка РДИП-10-IV-УХЛ1 на опоре и его внешний вид

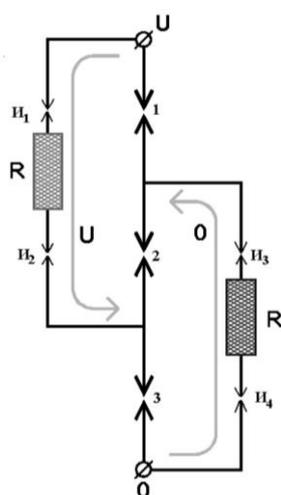
На проводе ВЛ, напротив металлической трубки разрядника, закрепляется универсальный зажим для создания необходимого воздушного искрового промежутка S . Закрепление изолированной петли разрядника на ВЛ производится с помощью зажима крепления. Зажим крепления изготовлен из стали, покрытой защитным слоем цинка. Его можно устанавливать как на неизолированные, так и на защищённые провода, зажим для которых имеет прокусывающие шипы. При возникновении на проводе ВЛ индуктированного грозового импульса искровой воздушный промежуток S между проводом ВЛ и металлической трубкой разрядника пробивается, и напряжение прикладывается к изоляции между металлической трубкой и металлическим стержнем петли, имеющим потенциал опоры. Под воздействием приложенного импульсного напряжения вдоль поверхности изоляции петли от металлической трубки к зажиму крепления разрядника (по одному, или по обоим плечам петли) развивается скользящий разряд. Вследствие эффекта скользящего разряда вольт-секундная характеристика разрядника расположена ниже, чем вольт-секундная характеристика изолятора, то есть при воздействии грозового перенапряжения разрядник перекрывается, а изолятор нет. После прохождения импульсного тока молнии разряд гаснет, не

перехода в силовую дугу, что предотвращает возникновение короткого замыкания, повреждение провода и отключение ВЛ.

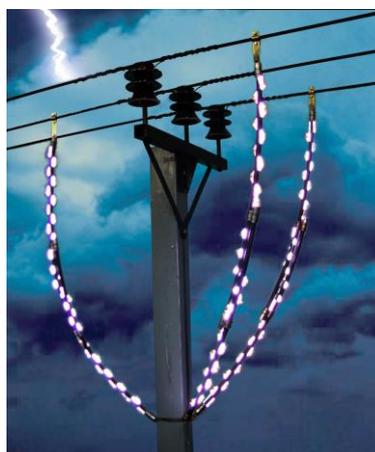
Таким образом, принцип действия РДИ основан на использовании эффекта скользящего разряда, который обеспечивает большую длину импульсного перекрытия по поверхности разрядника, и за счет этого предотвращения перехода искрового перекрытия в силовую дугу промышленной частоты. При этом эффективность гашения сопровождающих токов тем выше, чем меньше они по величине, а наличие сопротивлений заземления опор в контуре замыкания благоприятным образом влияет на снижение величины сопровождающих токов.

Разрядник длинно-искровой модульный (РДИМ)

РДИМ предназначен для защиты от прямых ударов молнии и индуктированных грозовых перенапряжений воздушных линий электропередачи (ВЛ) и подходов к подстанциям напряжением 6, 10 кВ трехфазного переменного тока с неизолированными и защищенными проводами. РДИМ обладает наилучшими вольт-секундными характеристиками, именно поэтому его целесообразно применять для защиты участков линии, подверженных прямым ударам молнии, а также для защиты подходов к подстанциям ВЛ. Разрядник состоит из двух отрезков кабеля с корделем, выполненный из резистивного материала. Отрезки кабеля сложены между собой так, что образуются три разрядных модуля 1, 2, 3 (см. рис. 5.23, а).



а)



б)

Рис. 5.23. Схема (а) и работа РДИМ (б)

Отрезки резистивного корделя подсоединяются к металлическим оконцевателям через внутренние искровые промежутки *И1, И2, И3, И4*. При воздействии импульса грозового перенапряжения они перекрываются и резистивный кордель верхнего отрезка кабеля, имеющий сопротивление *R*, выносит высокий потенциал *U* на поверхность нижнего отрезка кабеля в его средней части. Аналогично, резистивный кордель нижнего отрезка кабеля, имеющий также сопротивление *R*, выносит низкий потенциал *0* на поверхность верхнего отрезка кабеля в его средней части. Таким образом, к каждому разрядному модулю одновременно приложено полное напряжение *U*, и для всех трёх разрядных модулей 1, 2, 3 созданы условия для одновременного начала развития скользящих разрядов, которые, при перекрытии соответствующих модулей, создают единый, длинный канал перекрытия.

Структура условного обозначения показана на примере разрядника РДИМ-10-1,5-IV УХЛ1

Р - разрядник

ДИ - длинно-искровой

М - модульного типа

10 - класс напряжения сети, кВ

1,5 - длина перекрытия по поверхности

IV - категория длины пути утечки

УХЛ - климатическое исполнение по ГОСТ 15150-69

1 - категория размещения по ГОСТ 15150-69

Для остальных разрядников этого вида условное обозначение то же, только вместо буквы *М* используется буква *П* для петлевых разрядников, *Ш* – для шлейфовых.

Установка РДИ

Разрядники петлевые РДИП-10-IV-УХЛ1 можно устанавливать на любые виды опор, с чередованием фаз. Разрядники шлейфовые РДИШ-10-IV-УХЛ1 целесообразно использовать в местах двойного крепления провода. Разрядники модульные РДИМ-10-К-П-УХЛ1 предназначены для защиты ВЛ только с ком-

пактным размещением проводов, расстояние между которыми не превышает 50 см, и с изоляторами ШФ-20 в районах с не более, чем второй степенью загрязнённости атмосферы. Эти разрядники устанавливаются только на среднюю фазу. На двухцепных ВЛ разрядники должны устанавливаться на обе цепи таким образом, чтобы на каждой из опор защищалась только одна пара одноименных фаз, с тем же принципом чередования, что и для одноцепных ВЛ. Нарушение этого требования создает возможность короткого междуфазного замыкания и отключения линии при индуцированном грозом перенапряжении. При схеме установки разрядников с последовательным чередованием фаз тока промышленной частоты, сопровождающие многофазные замыкания, обусловленные грозовыми перенапряжениями, протекают по контурам, включающим в себя сопротивления заземления опор.

Для защиты ВЛ от прямых ударов молнии необходимо устанавливать на каждую опору защищаемого участка ВЛ по три разрядника модульного типа РДИМ-10- 1,5-IV-УХЛ1, на все фазы. При этом необходимо обеспечить низкое (желательно не более 10 Ом) сопротивление заземления лишь на ближайших нескольких опорах подхода ВЛ к подстанции. Остальные опоры по условиям молниезащиты специально заземлять не требуется.

Для защиты подхода к подстанции от набегающих волн грозовых перенапряжений устанавливается комплект их трех разрядников РДИМ на каждую из четырех ближайших опор к подстанции. Тогда оборудование ближайших к подстанции опор исключает повреждение оборудования подстанции при любых последствиях удара молнии

Длинно-искровые разрядники антенного типа (РДИА)

Основная идея РДИА состоит в том, что благодаря антенне, подключенной к разряднику, происходит его перекрытие еще до непосредственного контакта лидера молнии с ВЛ. На стадии продвижения лидера молнии от грозового облака к ВЛ на антенне наводится высокий потенциал, под действием которого формируется и развивается скользящий разряд. Скользящий разряд перекрыва-

ет разрядник еще до того, как лидер молнии достигает линии. РДИА применяют для защиты защищенных проводов ВЛ 35 кВ.

Конструктивное исполнение РДИА, основным элементом которого является провод ВЛ 35 кВ, показано на рис. 5.24.

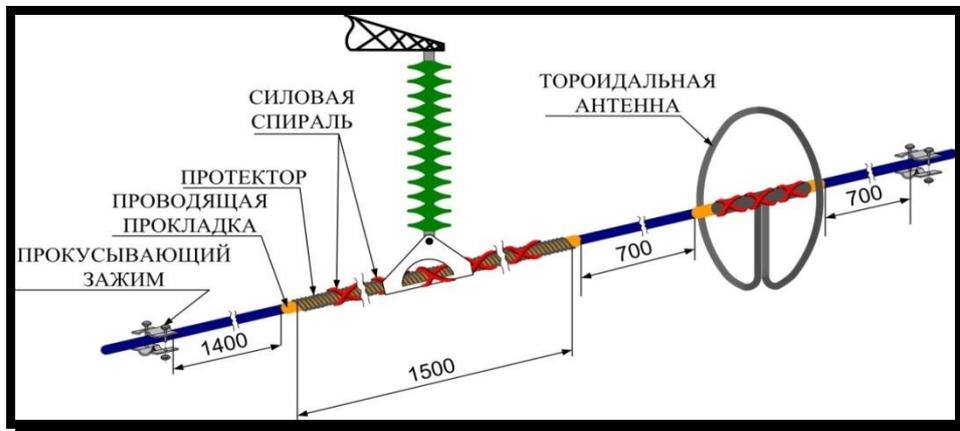


Рис. 5.24. Конструктивное исполнение верхней фазы ВЛ

Экран в виде тороида установлен на поверхности провода на расстоянии 0,7 м от узла крепления провода, с другой стороны экрана на расстоянии 0,7 м установлен зажим. Наличие антенны на поверхности защищенного провода обеспечивает перекрытие его участка между прокусывающим зажимом и протектором по его поверхности при плавном нарастании напряжения, не опасном для изоляции защищенного провода.

Внешний вид РДИА показан на рис. 5.25.



Рис. 5.25. внешний вид РДИА-А-35-IV-ХЛ1 (полный комплект поставки)

Иллюстрация молниезащиты с помощью РДИА показана на рис. 5.26.

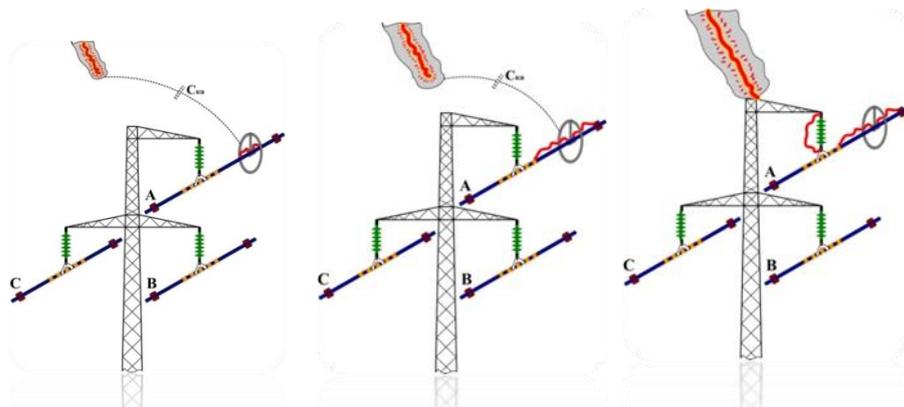


Рис. 5.25. Иллюстрация молниезащиты ВЛЗ 35 кВ:

- а) начало развития каналов разряда с узла крепления антенны;
- б) полное перекрытие участка защищенного провода от лодочки до прокусывающего зажима;
- в) удар молнии в линию, перекрытие изолятора.

6. МОЛНИЕЗАЩИТА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

В соответствии с требованиями ПУЭ [16] воздушные линии 110 - 750 кВ с металлическими и железобетонными опорами должны быть защищены от прямых ударов молнии тросами по всей длине.

Сооружение ВЛ 110 - 500 кВ или их участков без тросов допускается:

1) в районах с числом грозových часов в году менее 20 и в горных районах с плотностью разрядов на землю менее 1,5 на 1 км² в год;

2) на участках ВЛ в районах с плохо проводящими грунтами ($\rho > 1000$ Ом·м);

3) на участках трассы с расчетной толщиной стенки гололеда более 25 мм;

4) для ВЛ с усиленной изоляцией провода относительно заземленных частей опоры при обеспечении расчетного числа грозových отключений линии, соответствующего расчетному числу грозových отключений ВЛ такого же напряжения с тросовой защитой.

Число грозových отключений линии для случаев, приведенных в пунктах 1 - 3, определенное расчетом с учетом опыта эксплуатации, не должно превышать без усиления изоляции **трех** в год для ВЛ 110 - 330 кВ и **одного** в год для ВЛ 500 кВ.

Воздушные линии 110 - 220 кВ, предназначенные для электроснабжения объектов добычи и транспорта нефти и газа, должны быть защищены от прямых ударов молнии тросами по всей длине независимо от интенсивности грозовой деятельности и удельного эквивалентного сопротивления земли.

Для ВЛ до 35 кВ применение грозозащитных тросов не требуется.

На ВЛЗ (СИП) 6 - 20 кВ рекомендуется устанавливать устройства защиты изоляции проводов при грозových перекрытиях.

Воздушные линии 110 кВ на деревянных опорах в районах с числом грозových часов до 40, как правило, не должны защищаться тросами, а в районах с числом грозových часов более 40 защита их тросами обязательна.

На ВЛ 6 - 20 кВ на деревянных опорах по условиям молниезащиты применение металлических траверс не рекомендуется.

Гирлянды изоляторов единичных металлических и железобетонных опор, а также крайних опор участков с такими опорами и другие места с ослабленной изоляцией на ВЛ с деревянными опорами должны защищаться защитными аппаратами, в качестве которых могут использоваться вентильные разрядники (РВ), ограничители перенапряжения нелинейные (ОПН), и искровые промежутки (ИП).

При выполнении защиты ВЛ от грозových перенапряжений тросами необходимо руководствоваться следующим:

1) одностоечные металлические и железобетонные опоры с одним тросом должны иметь угол защиты не более 30° , а опоры с двумя тросами - не более 20° ;

2) на металлических опорах с горизонтальным расположением проводов и с двумя тросами угол защиты по отношению к внешним проводам для ВЛ 110 - 330 кВ должен быть не более 20° , для ВЛ 500 кВ - не более 25° , для ВЛ 750 кВ - не более 22° . В районах по гололеду IV и более и в районах с частой и интенсивной пляской проводов для ВЛ 110 - 330 кВ допускается угол защиты до 30° ;

3) на железобетонных и деревянных опорах порталного типа допускается угол защиты по отношению к крайним проводам не более 30° ;

4) при защите ВЛ двумя тросами расстояние между ними на опоре должно быть не более 5-кратного расстояния по вертикали от тросов до проводов, а при высоте подвеса тросов на опоре более 30 м расстояние между тросами должно быть не более 5-кратного расстояния по вертикали между тросом и проводом на опоре, умноженного на коэффициент, равный $5,5 / \sqrt{h_{тр}}$, где $h_{тр}$ - высота подвеса троса на опоре.

6.1. Средства молниезащиты ВЛ

В качестве основных средств молниезащиты ВЛ используются:

- подвеска заземленных тросов,
- снижение сопротивления заземления опор,
- повышение импульсной прочности линейной изоляции,
- защита отдельных опор и участков с ослабленной изоляцией,

- применение ограничителей перенапряжений (ОПН).

Резервным средством повышения надежности и бесперебойности работы ВЛ является автоматическое повторное включение, 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 применение основных средств молниезащиты, так как короткие замыкания снижают ресурс оборудования подстанций.

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, составляющих 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 сквозь тросовую защиту или обратные перекрытия. В первом случае снижение вероятности прорыва, достигается уменьшением угла защиты троса (тросов), в том числе подвеской тросов с отрицательным углом защиты (рис. 6.1), и увеличением расстояния между тросом и проводом по вертикали. Во втором случае вероятность обратного перекрытия линейной изоляции уменьшается при увеличении числа тросов, разнесении их на большее расстояние, а также при подвеске части тросов под проводами. Перечисленные мероприятия способствуют уменьшению импульсного тока через опору и усиливают электростатическое экранирование проводов тросами. Необходимо помнить, что при положительных углах защиты, обычно применяемых в электрических сетях России, средняя фаза практически не поражается молнией. Следовательно в одноцепных ВЛ с горизонтальной подвеской фаз можно защищать от грозовых поражений лишь крайние фазы.

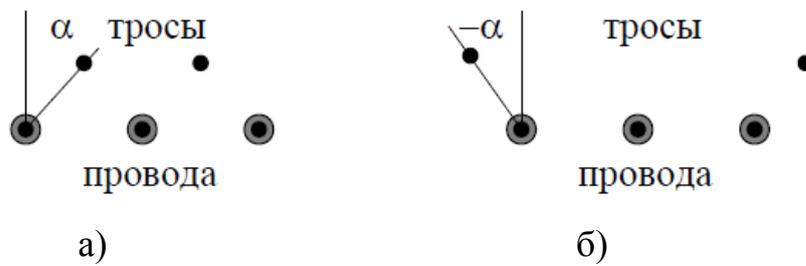


Рис. 6.1. Иллюстрация положительного (а) и отрицательного (б) угла тросовой защиты

На ВЛ, ранее выполненных на деревянных опорах, трос подвешивался только на подходах к ПС, так как грозоупорность ВЛ на деревянных опорах без троса достаточно высока. Как было показано, грозовые отключения происходят только при междуфазном перекрытии по двум гирляндам и участку траверсы. В процессе эксплуатации грозоупорность и надежность ВЛ резко снижаются из-за расщепления и загнивания стоек и траверс, что требует больших трудозатрат на ремонт ВЛ. Для нового электросетевого строительства рекомендуется применять только комбинированные деревянные опоры с грозозащитным тросом - одним или двумя, стальными траверсами, железобетонными фундаментами и стальным заземляющим спуском. У ВЛ с такими опорами грозоупорность и надежность примерно те же, что у ВЛ со стальными и железобетонными опорами.

Применение грозозащитного троса на ВЛ 6 - 35 кВ малоэффективно из-за низкой импульсной прочности линейной изоляции и, соответственно, высокой вероятности обратного перекрытия при ударе в опору и трос.

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, грозоупорность которых в значительной мере определяется индуктивностью опор, применяемых при переходах через реки и т.п. В тех случаях, когда не удастся осуществить 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, таких как 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, набегающих на нее с прилегающих участков трассы с нормальной изоляцией. Рекомендуется защиту опор с ослабленной изоляцией осуществлять с помощью нелинейных ограничителей перенапряжения (ОПН). Опоры с ослабленной изоляцией могут защищаться также специально предусмотренными искровыми промежутками.

Молниезащита 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 целесообразно применять ОПН или длинноискровые разрядники, устанавливаемые на опорах, ограничивающих пролет пересечения.

Дополнительным средством повышения грозоупорности ВЛ могут служить ОПН, устанавливаемые непосредственно на опорах ВЛ либо на всех фазах каждой опоры, либо на части опор или только на одной или двух фазах.

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.

6.2. Критерии выбора средств молниезащиты ВЛ 110 кВ и выше

Опыт эксплуатации показывает, что грозовые отключения ВЛ в среднем составляют 10 - 20 % от общего числа автоматических отключений по всем причинам. С ростом класса номинального напряжения число грозовых отключений уменьшается, но возрастает на фоне повышения общей надежности ВЛ доля грозовых отключений.

При выборе комплекса средств молниезащиты необходимо учитывать их эффективность для повышения надежности ВЛ в целом в конкретных природно-климатических условиях, например, подвеска троса на сильногололедных участках может приводить к снижению надежности ВЛ, и возможности технической реализации предлагаемых мероприятий, например, устройство заземлителей в скальных грунтах.

По совокупности природно-климатических условий, влияющих на грозоупорность ВЛ, и их ответственности, ВЛ разделяются на три категории: **А, Б, В**.

Категория А. К ней относятся ВЛ, проходящие в районах с умеренной грозовой деятельностью ($N_{г.ч.} \leq 40$ грозовых часов) и удовлетворительными

характеристиками грунтов ($\rho < 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$). К этой категории относится большинство эксплуатируемых ВЛ в крупных энергосистемах, отключение которых, в том числе и с неуспешным АПВ, не приводит к перерыву энергоснабжения потребителей.

Категория Б. К ней относятся ВЛ, проходящие в районах с повышенной грозовой активностью ($N_{г.ч.} > 40$ грозových часов) или с высокими удельными сопротивлениями грунтов ($\rho > 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$).

Категория В. К ней относятся особо ответственные ВЛ, такие как межсистемные связи; ВЛ, питающиеся от нерезервированных источников; двухцепные ВЛ, используемые в качестве независимых источников питания; ВЛ, отходящие от АЭС, практически все ВЛ 500 и 750 кВ и т.д.

Общим ориентиром для выбора средств молниезащиты может быть учет эксплуатационных показателей надежности ВЛ, достигнутых в конкретном регионе: общего удельного числа автоматических отключений $n_{общ}$; доли грозových отключений $\beta_{г}$; коэффициента успешности $k_{АПВ}$.

Практическим критерием для определения допустимого числа фазовых отключений $N_{доп.г}$ выбора средств молниезащиты ВЛ 110 - 330 кВ категорий **А** и **Б** является обеспечение готовности оборудования энергосистемы, а именно, соблюдение нормированной периодичности ремонта линейных выключателей.

Удельное число отключений ВЛ 110 - 330 кВ категории **В** должно быть, по крайней мере, вдвое меньше, чем других ВЛ в данном регионе. На ВЛ 110 - 330 кВ категории **В** должны быть реализованы все возможности по повышению их надежности грозоупорности: применение ОПН, увеличение числа тросов, подвеска одного из них под проводами, усиление изоляции. Следует преимущественно использовать опоры с двумя тросами. Выбор комплекса средств молниезащиты таких ВЛ должен проводиться, как правило, индивидуально путем многовариантных расчетов.

При выборе средств молниезащиты вновь сооружаемых ВЛ 500 и 750 кВ следует ориентироваться на достигнутые эксплуатационные показатели по удельному числу грозových отключений без введения коэффициента запаса, т.к.

в используемых в настоящее время опорах для этих ВЛ реализованы практически все возможности по созданию ВЛ повышенной грозоупорности, что подтверждает опыт эксплуатации. Дополнительные возможности повышения грозоупорности ВЛ 500 и 750 кВ могут появиться только при освоении опор с отрицательным углом защиты троса.

6.3. Мероприятия по повышению грозоупорности ВЛ 6 – 35 кВ

Показатели молниезащиты для ВЛ различного конструктивного исполнения приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1 – Характеристики молниезащиты ВЛ 6 – 35 кВ

Номинальное напряжение $U_{ном}$, кВ	6	6	35	35
Материал опор	Дерево	Ж/бетон	Дерево	Металл
Марка проводов	АС-50	АС-70	АС-95	АС-120
Количество и тип изоляторов на опоре	ШС10-А	ШС10-А	2ПС6-Б	3ПС6-Б
Импульсное сопротивление заземления опор $R_{зм}$, Ом	40	40	30	20
Удельное число прямых ударов молнии в год при $T_v=100$ ч и длине линии $l=100$ км – $N_{ПУМ}$, уд/100 км 100 ч	55	50	66	96
Удельное число отключений линии в год при прямых ударах молнии $n_{ПУМ}$, 1/год	3,6	13,0	0,55	7,9
Удельное число отключений линии в год при индуцированных перенапряжениях $n_{инд}$, 1/год	0,001	7,3	0,001	1,3
Удельное число грозовых отключений линии $n_{\Sigma}=n_{ПУМ}+n_{инд}$, 1/год	3,6	20,0	0,55	9,2

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 индуцированных перенапряжений при близких ударах молнии в землю, что было показано выше. 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 линию. Число грозových отключений этих ВЛ меньше по сравнению с ВЛ на железобетонных опорах: меньше вероятность возникновения коротких замыканий 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 них целесообразно использовать АПВ двукратного 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 короткого замыкания после импульсного перекрытия позволяет снизить число грозových 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 ПУЭ [16].

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 ПУЭ обладают большей грозоупорностью. Для повышения надежности таких ВЛ от траверсы вдоль стоек опор следует прокладывать 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.

ВЛ 6 - 35 кВ с деревянными опорами, имеющими отдельные железобетонные или металлические опоры с ослабленной изоляцией, участки, ограниченные железобетонными опорами, или участок 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 ПУЭ 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 должен устанавливаться ОПН.

Молниезащита ВЛ 6 - 20 кВ с защищенными (изолированными) проводами (СИП) должна выполняться в соответствии с рекомендациями «Правил устройства воздушных линий электропередачи напряжением 6 - 20 кВ с защищенными проводами» (ПУ ВЛЗ 6-20 кВ) [17].

7. ЗАЩИТА ПОДСТАНЦИЙ И СТАНЦИЙ ОТ НАБЕГАЮЩИХ ВОЛН ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ С ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

На подходе к ПС или электрической станции грозовые волны возникают при прорыве молнии на провода или при обратных перекрытиях линейной изоляции при ударах молнии в опоры или 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. 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 вольтамперными характеристиками (ограничителей перенапряжений или вентильных разрядников) и уменьшения числа опасных набегающих волн путем повышения грозоупорности ВЛ на подходе к ПС.

Особенностью перенапряжений на подстанции является их существенная зависимость от крутизны фронта и амплитуды набегающей волны. Остающееся напряжение на защитном аппарате зависит только от амплитуды воздействия, слабо меняясь благодаря пологой вольтамперной характеристике его нелинейных сопротивлений.

Для обеспечения молниезащиты подстанций от приходящих по линии волн грозовых перенапряжений необходимо применять следующие мероприятия:

- Выбор одного или нескольких трехфазных комплектов ОПН или разрядников, у которых пробивное и остающееся напряжение ниже допустимого уровня перенапряжений на интервал координации ΔU_k ;
- Защита подходов линий от прямых ударов молнии на определенной длине l_n , при которой обеспечивается достаточное сглаживание фронта набегающих волн и снижение тока в ОПН или разрядниках;
- Определение такого количества ОПН или разрядников и мест их установки, при которых расстояние между любым из защищаемых объектов и ближайшим к ним защитным аппаратом l_p не превышает безопасной величины, зависящей от схемы подстанции, длины защищенного подхода линии и интервала координации.

Выбор схемы молниезащиты подстанции сводится к нахождению оптимального с точки зрения критериев молниезащиты соотношения между указанными параметрами.

Опыт расчетов молниезащиты показывает, что в типовых схемах разрядник способен обеспечить молниезащиту оборудования подстанции при удалении от него не более чем на 30 – 150 м, причем меньшие значения соответствуют тупиковым подстанциям и разрядниками старых типов, а большие - проходным подстанциям и ОПН.

7.1. Защищенный подход линии

Необходимое ограничение крутизны фронта набегающей волны достигается благодаря наличию защищенного подхода линии электропередачи. Волна при движении по линии деформируется за счет импульсной короны и потерь в проводах и земле таким образом, что время фронта волны увеличивается приблизительно пропорционально длине пробега. Увеличение длительности фронта волны $\Delta\tau_\phi$ (в микросекундах) при пробеге по участку линии длиной l_n (в км) можно определить по эмпирической формуле:

$$\Delta\tau_\phi = l_n \eta^{(-)}, \quad (7.1)$$

где $\eta^{(-)}$ – коэффициент деформации фронта волны вследствие импульсной короны, показывающий, на сколько микросекунд удлиняется фронт волны при пробеге одного километра линии.

Для волн отрицательной полярности с напряжением, превышающим напряжения зажигания короны U_k , коэффициент деформации фронта волны можно найти по эмпирической формуле:

$$\eta^{(-)} = 3,33 \left(\sqrt{1 + 0,6 \left(\frac{U}{U_k} - 1 \right)^{2/3}} - 1 \right). \quad (7.2)$$

Средства молниезащиты 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 молниезащиты ВЛ на подходе к ПС в зависимости от класса номинального напряжения должен выбираться с учетом рекомендаций пункта 3.2.3 в части влияния конструктивных параметров ВЛ 110-750 кВ на по-

казатели их грозоупорности, а для ВЛ 6-35 кВ с учетом рекомендаций пункта 6.3.1.

Защита подхода линии должна включать следующие мероприятия:

- Подвеску грозозащитных тросов даже в случае их отсутствия на других участках линии с обязательным заземлением на каждой опоре;
- Снижение угла тросовой защиты до 20^0 путем подвески второго троса или изменения конструкции опоры на подходах;
- Заземление тросов на каждой опоре подхода;
- Снижение сопротивления заземления опор на подходе до 10 – 20 Ом.

Кроме этого, при расположении проводов линии на разных высотах рекомендуется на подходе перейти к опорам с горизонтальным расположением проводов, имеющим меньшую индуктивность.

Можно выбрать такую длину защищенного подхода линии, при которой удлинение фронта волны будет таким, что любая волна, возникшая вне зоны защищенного подхода, после пробега по защищенному подходу станет безопасной для подстанции. Критическая (минимальная) длина защищенного подхода, удовлетворяющая этому условию, может быть рассчитана по формуле:

$$l_{кр} = \frac{\tau_{кр}}{\eta^{(-)}}, \quad (7.3)$$

где $\tau_{кр}$ – критическое значение длительности опасных волн.

Защиту подхода нельзя сделать абсолютно надежной. Сохраняется некоторая вероятность прорыва молнии на провода линии, обратных перекрытий в зоне защищенного подхода. Часть волн не успевает за время пробега удлинить свой фронт до безопасной величины и вызывает опасные перенапряжения. Их число будет зависеть от надежности молниезащиты подхода линии и его длины.

При наибольшей критической длине защищенного подхода будет наибольшим число опасных волн, возникающих вследствие поражения линии в зоне защищенного подхода, поэтому стремятся, чтобы длина подхода $l_{кр}$ не превышала предельного значения, указанного в табл. 7.1.

Таблица 7.1 – Предельные значения длин защищенного подхода линий

Номинальное напряжение ВЛ, кВ	35	110	220	330	500
Длина подхода, км	1 – 2	1 – 3	2 – 3	2 – 4	2,5 – 3

Если величина $I_{кр}$ превышает указанное значение, целесообразно изменить число или расположение защитных аппаратов на подстанции или найти более удачный вариант схемы молниезащиты.

7.2. Средства защиты РУ от набегающих грозовых волн

Основным средством снижения перенапряжений на изоляции электрооборудования РУ являются ОПН. Необходимое количество и схема расстановки ОПН определяются на основании расчета молниезащиты ПС.

Главный фактор, определяющий расположение ОПН на подстанции, - это линейная и подстанционная защита. Как правило, защита подстанции может быть обеспечена, даже если отходящие линии не защищены. Подстанционная защита снижает вероятность высоких напряжений и крутых фронтов волн, возникающих в результате ударов молнии с большими амплитудами тока внутри подстанции. Однако следует учесть, что большинство ударов будет направлено в линии, эти удары создадут волны, бегущие по линии и достигающие подстанции. Если линии защищены, волны, приходящие на подстанцию, менее опасны, чем волны, приходящие с незащищенных линий. Соответственно, амплитуда токов ОПН будет ниже, что приводит к более низкому остающемуся напряжению ОПН и лучшей защите оборудования.

7.2.1. Рекомендации по выбору места установки ОПН в РУ

Защита электрооборудования от грозовых и коммутационных перенапряжений должна соответствовать рекомендациям ПУЭ [16].

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 грозových перенапряжений.

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

Дополнительный ОПН устанавливают на линии для ее защиты от коммутационных перенапряжений, если шунтирующий реактор или трансформаторы (автотрансформаторы) присоединены к линии через выключатели.

ОПН устанавливают 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 ОПН осуществляется присоединением к заземляющему устройству РУ. Точка присоединения ограничителя к заземляющему устройству (ЗУ) должна быть максимально удалена от точек присоединения к этому ЗУ измерительных трансформаторов. Если ОПН имеют противовзрывные клапаны с отводящими соплами, то они должны быть установлены так, чтобы сопла были расположены по продольной оси ячейки. При отсутствии противовзрывных устройств расстояние до путей обхода удваивается, и устанавливаются таблички с предупреждающими надписями.

Расстановка ОПН в РУ определяется надежностью молниезащиты электрооборудования, прежде всего трансформаторов, расчетные импульсные перекрытия изоляции которых не должны превышать один раз в 800-1000 лет.

При выборе места установки ОПН для защиты оборудования от грозových перенапряжений существуют два альтернативных подхода [4]:

➤ определяют необходимое для координации выдерживаемое напряжение грозového импульса для данного уровня защиты ОПН и отделяющего расстояния до электрооборудования. Нормированное выдерживаемое напряжение

грозового импульса затем рассчитывают умножением полученного значения на коэффициент 1,15;

➤ определяют защитную зону ОПН - максимальное отделяющее расстояние, для которого выполняются требования по координации изоляции для заданного уровня его защиты и координационного выдерживаемого напряжения. Последнее получают делением нормированного выдерживаемого напряжения грозового импульса оборудования на 1,15.

Для трансформаторов с бумажно-масляной изоляцией обе альтернативы дают приблизительно один и тот же результат. Предложенный ниже подход может быть использован для определения максимального расстояния между ОПН и трансформатором.

Защита оборудования наружной установки

Координационное выдерживаемое напряжение при грозовом импульсе может быть определено по эмпирической формуле, которая учитывает фундаментальные характеристики поведения грозового перенапряжения на подстанциях:

$$U_{кв} = U_{зз} + \frac{A}{N} \frac{L_0}{L_{0n} + L_a}, \quad (7.4)$$

где $L_a = R/r$ - длина воздушной линии перед подстанцией, которая позволяет получить норму ударов молнии, равную приемлемой норме повреждений. Правая дробь, умноженная на A/N , пропорциональна крутизне представительной падающей волны;

$U_{кв}$ - координационное выдерживаемое напряжение грозового импульса оборудования;

A - напряжение, учитывающее деформацию фронта волны из-за импульсной короны при пробеге по воздушной линии, подсоединенной к подстанции, определяется по таблице 7.2;

$U_{зз}$ - уровень защиты ОПН от грозовых импульсов;

N - число линий, подключенных к подстанции ($N = 1$ или $N = 2$);

L_0 - общая длина $d + d_1 + d_2 + d_A$, определяемая по рис. 7.1;

$L_{дп}$ - длина пролета;

L_a - секция воздушной линии с нормой простоя, равной приемлемой норме повреждений;

R_a - приемлемая норма повреждений (число повреждений в единицу времени) для защищаемого оборудования;

r - норма простоя воздушной линии (число простоев в единицу времени и на единицу длины) в год для проектирования, соответствующая первому километру перед подстанцией. Если $N = 2$, нормы необходимо складывать.

Как правило, приемлемые нормы повреждения защищенного оборудования находятся между 0,1 % в год и 0,4 % в год. Типичное значение принимается равным 0,25 % в год.

Формула (7.4) описывает падение напряжения, зависящее от поведения воздушной линии, связанной с оборудованием, при ударе молнии, от схемы подстанции и от выбранной приемлемой нормы повреждений оборудования. Она не пригодна для определения амплитуды перенапряжения для конкретного грозового случая на воздушной линии.

Для распределительных линий нормы простоя, как правило, более сравнимы с приемлемыми нормами повреждений, т.е. длина воздушной линии мала и ею можно пренебречь. Тогда формула (7.4) упрощается:

$$U_{кв} = U_{зг} + \frac{A}{N} \frac{L_o}{L_{дп}}. \quad (7.5)$$

Таблица 7.2 – Значение коэффициента A для воздушных линий

Воздушная линия	A , кВ
Распределительные линии (междуфазные перекрытия):	
- с заземленными траверсами (перекрытие на землю при низком напряжении);	900
- линии на деревянных опорах (перекрытие на землю при высоком напряжении)	2700
Линии электропередачи (однофазное перекрытие на землю):	
- одиночный провод;	4500
- <i>расщепление</i> на два провода;	7000
- <i>расщепление</i> на четыре провода;	11000
- <i>расщепление</i> на шесть или восемь проводов	17000

Напряжение A для распределительных линий ниже, чем для линии электропередачи с одиночным проводом, так как в распределительных линиях возможны междуфазные перекрытия или многократные перекрытия фаза - земля, что приводит, таким образом, к разделению токов и, в случае заземленных трансформаторов, к ограничению амплитуды набегающей волны.

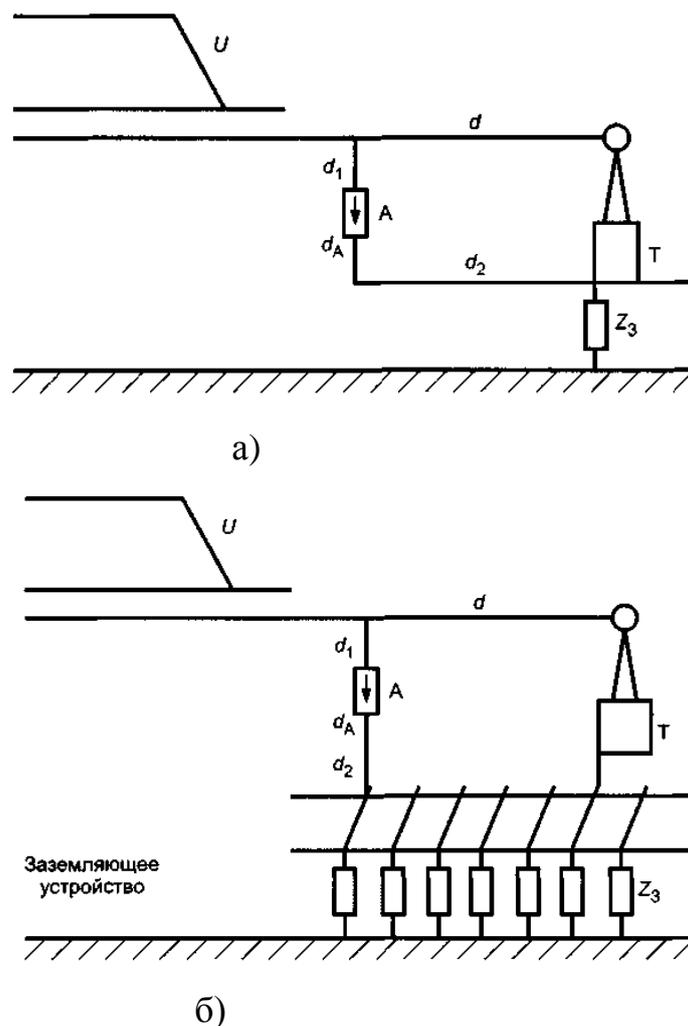


Рисунок 7.1 – Схема присоединения ОПН к защищаемому объекту:

а) установки без контура заземления (распределительные сети);

б) установки с контуром заземления (подстанции)

d - расстояние между высоковольтным выводом защищаемого оборудования и точкой подключения высоковольтного провода ОПН;

d_1 - длина высоковольтного провода ОПН;

d_2 - длина заземляющего провода ОПН;

d_A - длина ОПН;

Z_3 - сопротивление заземления;

T - защищаемый объект;

U - набегающая волна перенапряжения

Индуктированные грозовые перенапряжения необходимо рассматривать в распределительных системах, где оборудование не защищено от прямых ударов молнии в провода или от обратных перекрытий.

При выборе нормированного выдерживаемого напряжения грозового импульса защитная зона ОПН может быть оценена по формуле

$$L_3 = \left[\left(\frac{U_{нв}}{1,15} \right) - U_{3z} \right] (L_{он} + L_a), \quad (7.6)$$

где L_3 - защитная зона;

$U_{нв}$ - нормированное выдерживаемое напряжение грозового импульса.

Формула (7.6) показывает, что для данной подстанции защитная зона увеличивается:

- с увеличением разницы между нормированным выдерживаемым напряжением и уровнем защиты;
- со снижением нормы простоя воздушной линии перед подстанцией, указывая, таким образом, на влияние улучшенной защиты заземленными тросами и сниженного сопротивления фундамента опор;
- с увеличением приемлемых норм повреждений, что указывает на возможность защиты оборудования, однако с более высокой нормой повреждения.

В таблице 7.3 приведены примеры рассчитанных защитных зон при типичном значении нормы повреждения защищенного оборудования равном 0,25 % в год.

Таблица 7.3 - Примеры рассчитанных защитных зон для ОРУ

U_{max} , кВ	U_{3z} , кВ	Выдерживаемое напряжение, кВ		$L_{дп}$, м	A , кВ	Защитная зона L_3 , м						
		$U_{нв}$	$U_{кв}$			$r=0,1$		$r=0,5$		$r=2$		$r=6$
						$N=2$	$N=1$	$N=1$	$N=2$	$N=1$	$N=2$	
24	80	125	109	100	2700	-	-	-	2,4	4,8	3,0	
				200	900	-	-	-	10,4	20,8	15,5	
123	350	550	478	300	4500	160	23	46	12,0	24	-	
420	900	1425	1239	400	11000	180	28	56	16	32	-	

Примечание: r приведено в единицах (1) на 100 км и на год;

U_{max} - наибольшее напряжение оборудования

Защита подстанций с кабельным подключением

Аналогично ГРУ подстанции, подключаемые с помощью кабелей, при тех же самых размерах, защищены лучше, чем ОРУ. ОПН должны быть установлены в месте соединения воздушная линия - кабель, чтобы защитить кабельный ввод. Влияния отделяющих расстояний могут быть оценены, так же как и в случае с ОРУ. Когда во время удара молнии более чем одна линия остается подключенной к подстанции через кабели, ОПН способны защитить подстанцию. Если возможен случай, когда кабели, подключенные к подстанции, во время удара молнии разомкнуты на концах, и если длина кабелей приблизительно в пять раз превышает значение, вычисленное по формуле (7.6), рекомендуются дополнительные ОПН на разомкнутом конце. Аналогичное решение должно быть применено на разомкнутом конце кабелей, которые подсоединены к воздушной линии через подстанцию.

Если в РУ производится замена вентильного разрядника на ОПН, то переход от расстояний от вентильных разрядников (РВ) до защищаемого оборудования, нормируемых ПУЭ, к расстояниям до ОПН можно оценить по формуле:

$$L_{опн} = L_{рв} (U_{исп} - U_{опн}) / (U_{исп} - U_{рв}), \quad (7.7)$$

где $U_{исп}$ - испытательное напряжение защищаемого оборудования при полном грозовом импульсе, кВ;

$U_{опн}$, $U_{рв}$ - остающееся напряжение на ОПН и РВ, кВ при токе 10 (5) кА;

$L_{опн}$ - расстояние от защищаемого оборудования до ОПН, м;

$L_{рв}$ - расстояние от защищаемого оборудования до РВ, нормируемое ПУЭ, м.

Допускается установка ОПН на место заменяемых разрядников, если значения остающихся напряжений этих ОПН при токе 10 кА отличаются не более, чем на 1,5% от соответствующих параметров разрядника.

7.2.2. Рекомендации по установке ОПН по условиям работы в КРУЭ

Для защиты комплектных распределительных устройств с элегазовой изоляцией (КРУЭ) используют ОПН внешней и внутренней установки.

ОПН, устанавливаемый внутри КРУЭ, поставляются заводом-изготовителем КРУЭ в комплекте.

ОПН, устанавливаемый снаружи КРУЭ, размещают в местах ввода воздушных линий в КРУЭ на расстоянии до 10 м от него, с присоединением заземления ОПН к заземляющему устройству последнего.

Если присоединение ВЛ к КРУЭ производится кабелем или элегазовым токопроводом, то ОПН устанавливается в месте перехода ВЛ и его заземление присоединяется к оболочке кабеля или токопровода. При длине кабеля или токопровода более 100 м и его присоединении к шинам КРУЭ через разъединитель, перед разъединителем устанавливают дополнительный ОПН с таким же остающимся напряжением, как у первого.

На присоединениях трансформаторов к шинам КРУЭ через выключатели между разъединителями трансформаторного выключателя и трансформатором устанавливается внутренний ОПН. Для протяженных ГРУ, выполненных КРУЭ, могут потребоваться дополнительные внутренние ОПН.

ОПН, предназначенные для внутренней установки, по энергоемкости выбирают на класс выше, чем ОПН, предназначенные для внешней установки.

Улучшенная защита от перенапряжения с быстронарастающим фронтом может быть достигнута путем установки ОПН линейного подхода внутри КРУЭ, что устраняет влияния присоединений ОПН при наружной их установке.

7.2.3. Особенности установки ОПН по условиям работы в ОРУ электростанций

При установке ОПН в ОРУ электростанций, его выбор определяется с учетом действия автоматического регулирования возбуждения (АРВ) и форсировки возбуждения генераторов. Расчетным при этом является случай однофазного КЗ на шинах или вблизи от них на отходящих линиях. Под воздействием АРВ и форсировки возбуждения резко возрастает ток возбуждения ротора и, соответственно, внутренняя ЭДС генератора и напряжение на выводах трансформаторов и шин ОРУ. При этом если генератор еще не отключился от сети, то напряжение на неповрежденных фазах ошиновки трансформаторов РУ находится в

пределах $1,1-1,2U_{\phi}$, а после отключения блочного трансформатора или всех линий становится равным ЭДС. Длительность существования квазиустановившихся перенапряжений в этих режимах определяется временем отключения КЗ линейными или трансформаторными выключателями, их резервированием под действием УРОВ, а также временем гашения поля генераторов.

При установке ОПН взамен разрядников (РВС, РВМГ, РВМК) возможно применение ОПН, например серии Exlim, с повышенным уровнем остающихся напряжений и, соответственно большими допустимыми длительностями.

При наличии на станции выделяемых в ходе коммутаций или действия противоаварийной автоматики блоков, работающих на малонагруженную линию длиной 150-350 км, возможно возникновение переходного резонанса на второй или третьей гармонике. В этом случае рекомендуется применение ОПН повышенных классов энергоемкости. Аналогичная ситуация может возникнуть при резервировании линейного выключателя генераторным.

Выбор ОПН для ОРУ станций по току срабатывания противовзрывного устройства рекомендуется проводить с 10-20% запасом. Если ток противовзрывного устройства ниже значения тока КЗ в ОРУ, то следует предусмотреть ограждение ОПН.

7.3. Надежность молниезащиты электрических станций подстанций

Надежность молниезащиты электрических станций и подстанций включает надежность защиты от прямых ударов молнии и от набегающих волн перенапряжений.

7.3.1. Надежность защиты станций и подстанций от прямых ударов молнии

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 в год. Обратные перекрытия при ударах молнии в молниеотводы необходимо учитывать только для ОРУ 35-150 кВ.

Это число может быть определено по формуле:

$$N_{п.у} = p_o (a_m + 2R_{экс}) (b_m + 2R_{экс}) (\eta_{пр} p_a p_{пр} + \eta_{он} p_{он}) \cdot 10^{-6}, \quad (7.8)$$

где a_m , b_m - длина и ширина территории ОРУ, м;

$R_{экс}$ и p_o - как в формуле (4.17);

$\eta_{пр}$, $\eta_{он}$ - вероятность перехода импульсного перекрытия изоляции в силовую дугу, соответственно, при разрядах молнии в ОРУ, минуя молниеотводы, и при обратных перекрытиях, в расчетах $\eta_{пр}$, $\eta_{он}$ принимаются равными 0,9;

p_a - вероятность грозового поражения ошиновки ОРУ, минуя молниеотводы. В расчетах указанная вероятность имеет значение 0,05 или 0,005 в зависимости от зоны защиты A или B ;

$p_{он}$ - 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. Ее можно определить по формуле 3.16.

В качестве показателя надежности ПС используется средняя повторяемость (в годах) опасных перенапряжений на ПС из-за грозовых разрядов непосредственно в ЗРУ или ОРУ:

$$T_{п.у.} = \frac{1}{N_{п.у.}} \quad (7.9)$$

Система молниезащиты ПС должна обеспечить в зависимости от класса ее номинального напряжения $T_{п.у.}$ не ниже значений, указанных в таблице 7.4.

Таблица 7.4 – Нормируемая средняя повторяемость (в годах) опасных перенапряжений на ПС из-за грозовых разрядов непосредственно в ЗРУ или ОРУ

$U_{ном.}$, кВ	35	110	220	330	500	750	1150
$T_{п.у.}$	500	700	1000	1500	2000	2500	3000

7.3.2. Надежность молниезащиты РУ станций и подстанций от набегающих волн перенапряжений

Надежность молниезащиты ПС оценивается средним числом случаев появления опасных для подстанционной изоляции грозовых импульсов в год.

Опасность могут представлять только грозовые импульсы, возникающие при ударе молнии в ВЛ в пределах опасной зоны $l_{o.z}$. Часть этих импульсов небольшой амплитуды или с малой крутизной фронта и небольшой длительности не вызывают повреждения или перекрытия изоляции оборудования подстанций.

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

$$N_{H.B} = N \cdot N_{Г.ч} \cdot l_{o.z} \cdot n_{вл} (1 - k_э) (p_\alpha \psi_{np} + \delta_{on} p_{on} \psi_{on}) \cdot 10^{-4}, \quad (7.10)$$

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

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

$N_{Г.ч}$ - число грозовых часов в год;

$l_{o.z}$ - длина опасной зоны, км;

$n_{вл}$, $k_э$ - число отходящих ВЛ и коэффициент их взаимного экранирования;

Pp_α - вероятность прорыва молнии на провода;

δ_{on} - доля грозовых ударов в опоры и прилегающие участки троса, отн. ед.;

p_{on} - вероятность обратного перекрытия линейной изоляции;

ψ_{np} , ψ_{on} - доли опасных для изоляции ПС импульсов, соответственно, при прорыве молнии на провода и при обратных перекрытиях изоляции ВЛ, возникающих в пределах опасной зоны, отн. ед.

Длина опасной зоны определяется в соответствии с методикой, приведенной в [20].

В качестве показателя надежности ПС используется средняя повторяемость опасных перенапряжений, возникающих на защищаемом аппарате или на ПС в целом, (в годах):

$$T_{H.B.} = \frac{I}{N_{H.B.}} \quad (7.11)$$

Рекомендуемые показатели надежности молниезащиты наиболее дорогого и ответственного подстанционного оборудования (силовых трансформаторов, автотрансформаторов и шунтирующих реакторов) в зависимости от класса номинального напряжения ПС оцениваются значениями, приведенными в таблице 7.5.

Таблица 7.5 – Нормируемая средняя повторяемость опасных перенапряжений, возникающих на защищаемом аппарате или на ПС в целом, (в годах)

$U_{ном}$, кВ	35	110	220	330	500	750	1150
$T_{H.B.}$, годы	200-300	300-400	400-600	600-800	800-1000	1000-1200	1200-1500

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Г.Н. Молния и молниезащита [Текст] / Г. Н. Александров ; отв. ред. В. Н. Козлов. - М.: Наука, 2008. - 275 с.
2. Базуткин В.В. Техника высоких напряжений: изоляция и перенапряжения в электрических системах [Текст] : учеб.: доп. Мин. высш. и сред. спец. обр. СССР / В. В. Базуткин, В. П. Ларионов, Ю. С. Пинталь ; Под общ. ред. В. П. Ларионова. - 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Энергоатомиздат, 1986. - 464 с.
3. Бочаров, Ю.Н. Грозоупорность воздушных ЛЭП высокого напряжения с композитными опорами [Текст] / Ю.Н. Бочаров, В.В. Жук // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2013. № 1. – С. 80 – 83
4. ГОСТ Р 53735.5 — 2009 (МЭК 60099-5:2000). Разрядники вентильные и ограничители перенапряжений нелинейные для электроустановок переменного тока на напряжение от 3 до 750 кВ. Часть 5. Рекомендации по выбору и применению : Москва, Стандартинформ, 2011. – 54 с.
5. ГОСТ 52725- Р 2007. Ограничители перенапряжений нелинейные для электроустановок переменного тока напряжением от 3 до 750 кВ. Общие технические условия : Москва, Стандартинформ, 2007. – 42 с
6. Защита сетей 6-35 кВ от перенапряжений [Текст] / под ред. Ф. Х. Халилова, Г. А. Евдокунина, А. И. Таджибаева. - СПб. : Энергоатомиздат, 2002. - 272 с.
7. Изоляция и перенапряжения. Лабораторный практикум [Текст] : учеб. пособие: рек. ДВ РУМЦ / Н. В. Савина [и др.] ; АмГУ, Эн.ф. - Благовещенск : Изд-во Амур. гос. ун-та, 2008. - 204 с.
8. Изоляция и перенапряжение : учеб.-метод. комплекс для спец. 140204, 140205, 140211, 140203/ АмГУ, Эн.ф.; сост. Н. В. Савина . -Благовещенск: Изд-во Амур. гос. ун-та, 2012. -134 с.

9. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций [Текст] / инструкцию разработ. Э. М. Базелян, Н. С. Берлина, Р. К. Борисова. - М. : Изд-во Моск. энергет. ин-та, 2004. - 56 с.
10. Кадомская К.П. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них [Текст] : учеб./ К. П. Кадомская, Ю. А. Лавров, А. А. Рейхердт. - Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. техн. ун-та, 2004. - 368 с.
11. Карякин Р.Н. Заземляющие устройства электроустановок [Текст] : Справочник / Р.Н. Карякин. - М. : Энергосервис, 2000, 2002. - 376 с.
12. Колечицкий, Е.С. Основы расчета заземляющих устройств [Текст] : учеб. пособие / Е.С. Колечицкий. - М. : Изд-во МЭИ, 2001. - 48 с. : ил. - 200 экз.
13. Методические указания по защите распределительных электрических сетей напряжением 0,4-10 кВ от грозовых перенапряжений [Текст] : СТО 56947007-29.240.02.001-2008 / Открытое акционерное общество по проектированию сетевых и энергетических объектов (ОАО "РОСЭП"). - База нормативной документации: www.complexdoc.ru. - 78 с.
14. Перенапряжения в электрических системах и защита от них [Текст] : учеб./ В. В. Базуткин, К. П. Кадомская, М. В. Костенко, Ю. А. Михайлов. – СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербург. Отд-ние, 1995. - 320 с.
15. Подпоркин, Г. В. Грозозащита ВЛ 10 кВ длинно-искровыми разрядниками антенного типа [Текст] / В. Е. Пильщиков, А. Д. Сиваев, М. К. Ярмаркин // Электричество. 2004. № 8. – С. 7 – 15 .
16. Правила устройств электроустановок [Текст]. – 7-е изд. – М. : ЭНАС, 2008. – 552 с. – (Нормативная база).
17. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений [Текст] : РД 153-34.3-35.125-99 / ред. Тиходеев Н.Н. - 2-е изд. - СПб. : Изд-во Петерб. энергет. ин-та повыш. квалификации Минтопэнерго РФ, 1999. - 353с.
18. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения [Текст] : справочное издание / Ред. И.А. Баумштейн, Ред. М.В. Хомяков. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Энергоиздат, 1981. - 656 с.

19. Степанчук, К.Ф. Техника высоких напряжений [Текст] : учеб./ К.Ф. Степанчук, Н.А. Тиняков. - Минск: Высш. школа, 1982. – 367 с.
20. Техника высоких напряжений [Текст] : учеб.: / Под общ. ред. Г. С. Кучинского. - СПб.: Энергоатомиздат, 2003. - 608 с.
21. Техника и электрофизика высоких напряжений [Текст] : учеб.-справ. рук. / Е. Куффель, В. Цаенгль, Дж. Куффель. - Долгопрудный : Интеллект, 2011. - 520 с.
22. Техника высоких напряжений [Текст] : учеб.: / Под общ. ред. Д. В. Разевига. – М. : Энергия, 1976. – 488 с.
23. Электротехнический справочник [Текст] : В 4 т. / Под общ. ред. В.Г. Герасимов, Под общ. ред. А.Ф. Дьяков, Под общ. ред. Н.Ф. Ильинский, Гл. ред. А.И. Попов. Т. 3 : Производство, передача и распределение электрической энергии : справочное издание. – М.: Изд-ий дом МЭИ. - 2002. - 964 с.
24. Zhijun, L. Study on grounding design for lightning of tubular composite material towers in 110kV overhead transmission line / Zhijun Li, Han-Ming Li, Min Dai, Shi-Cong Deng, Ding-xie G, Qian-Hu Wei [Электронный ресурс] // 2010 International Conference on High Voltage Engineering and Application / New Orleans, 2010.— P. 473–475. IEEE Xplore (<http://ieeexplore.ieee.org>). DOI: 10.1109/ICHVE.2010.5640725.

УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ

Савина Наталья Викторовна,

зав. кафедрой энергетики АмГУ, доктор техн. наук, профессор

Техника высоких напряжений. Грозовые перенапряжения и защита от них.

Учебное пособие.

Издательство АмГУ. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 11,94. Тираж 100. Заказ 663
Отпечатано в типографии АмГУ