

**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО ОТКРЫТОГО ТИПА ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ
СЕТЕВЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

АООТ РОСЭП

**РУКОВОДЯЩИЕ
МАТЕРИАЛЫ
ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
СЕЛЬСКОГО
ХОЗЯЙСТВА**

Июнь

Москва 2001

СОДЕРЖАНИЕ

стр.

06. Низковольтные линии электропередачи

ИММ № 06.02-2001 от 28.02.2001

Письмо РАО ЕЭС России о применении ж.б. опор ВЛИ
0,4 кВ с самонесущими изолированными проводами.....3

02. Нормативные материалы общего назначения

ИММ № 02.02.-2001 от 16.03.2001

“Руководство по защите эл. сетей 6-1150 кВ
от грозовых и внутренних перенапряжений”.
(Разделы для сетей 6-35 кВ).....6

04. Подстанции напряжением 10(6) кВ и сетевые пункты

ИММ № 04.05-2001 от 16.03.2001

О закрытых ТП 10/0,4 кВ типа ЗТП.С.10 Люберецкого ЭМЗ.....75

**Акционерное общество открытого типа по проектированию
сетевых и энергетических объектов**

АООТ РОСЭП

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

**по проектированию, строительству и эксплуатации сельских
электрических сетей**

28.02.2001

06.02-2001

N

Москва

/Письмо РАО ЕЭС РФ о применении
ж.б.опор ВЛИ 0,4 кВ с самонесущими
изолированными проводами/

Публикуем письмо Департамента электрических сетей РАО "ЕЭС
России" от 14.02.2001 г. № 11-021-83 о применении железобетонных опор
ВЛИ 0,4 кВ с самонесущими изолированными проводами.

В письме приведен перечень проектов железобетонных опор для
ВЛИ 0,4 кВ с самонесущими изолированными проводами, разработанных
АООТ "РОСЭП" (институт "Сельэнергопроект"), рекомендуемых к
применению при техническом перевооружении и строительстве новых
ВЛ 0,4 кВ.

Приложение: упомянутое.

Первый заместитель Генерального директора
АООТ РОСЭП

А.С.Лисковец

Российское акционерное общество
энергетики и электрификации
РАО «ЕЭС России»

.*-
**ДЕПАРТАМЕНТ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ**

103074, Москва, Китайгородский пр., 7
тел. 220-41-15

от 14.02.20012 № 11-02/83

на № _____ от _____

Представительствам по
управлению АО,
дочерним АО энергетики и
электрификации
РАО «ЕЭС России»,
АО энергетики и электрификации,
проектным организациям
(по спискам рассылки)

О применении железобетонных
опор ВЛИ 0,4кВ с самонесущими
изолированными проводами.

По техническому заданию Департамента электрических сетей
АООТ «РОСЭП» разработало в дополнение к проектам одноцепных и
двухцепных железобетонных опор с подкосами для ВЛИ 0,4кВ (арх.
№ЛЭП98.08 и ЛЭП98.10) следующие проекты железобетонных опор
ВЛ 0,4кВ с самонесущими изолированными проводами для применения в
I-V ветровых районах, в I-IV и особом районах по гололеду:

- «Одноцепные железобетонные опоры ВЛИ 0,4кВ с самонесущими
изолированными проводами с анкерными опорами с оттяжками»
(арх.ЛЭП98.12).
 - «Двухцепные железобетонные опоры ВЛИ 0,4кВ с самонесущими
изолированными проводами с анкерными опорами с оттяжками»
(арх.№19.0022).
 - «Железобетонные опоры с оттяжками для совместной подвески
самонесущих изолированных проводов ВЛИ 0,4 кВ и СИП для
освещения» (арх.№ЛЭП00.14).
 - «Железобетонные подкосные опоры для совместной подвески
самонесущих изолированных проводов ВЛИ 0,4 кВ и СИП для
освещения» (арх.№ЛЭП00.12).
- Опоры вышеперечисленных проектов выполнены на базе
железобетонных стоек СВ95-3 и СВ95-2с(3с).
- «Переходные железобетонные опоры ВЛИ 0,4 кВ с самонесущими
изолированными проводами» (арх.№19.0022.1).
 - «Переходные железобетонные опоры для совместной подвески
самонесущих изолированных проводов ВЛИ 0,4кВ и СИП для
освещения» (арх.№20.0096).

Повышенные опоры выполнены на базе железобетонных стоек
СВ105-3,6(5) и СВ110-3,6(5).

Для всех вышеперечисленных проектов:

- промежуточные опоры разработаны одностоечной конструкции;
- на всех типах опор предусмотрена возможность ответвления к вводам в здания в одну и в две разные стороны от оси ВЛ двух, четырех и 2х2 проводов;
- для всех типов опор приведены спецификации на кронштейны и линейную арматуру для подвески самонесущих изолированных проводов, изготавливаемых в России (СИП), Франции ("Торсада") и Финляндии ("Амка");
- стойки, на базе которых разработаны опоры в вышеперечисленных проектах, изготавливаются по ТУ 5863-007-00113557-94 "Стойки железобетонные вибрированные для опор ВЛ 0,4...10 кВ", разработанным АООТ "РОСЭП".

Департамент электрических сетей рекомендует указанные проекты к применению при техническом перевооружении и строительстве новых ВЛ 0,4кВ.

С запросами по проектам арх.№ЛЭП98.12, арх.№19.0022, арх.№ЛЭП00.14, арх.№ЛЭП00.12, арх.№19.0022.1, арх.№20.0096 рекомендуем обращаться в АООТ "РОСЭП" (институт "Сельэнергопроект").

111395, Москва, Аллея Первой Маёвки, 15.

Главный инженер проекта Ударов В.М. тел. 374-66-01,
факс 374-66-08.

Первый заместитель начальника  Ю.А. Дементьев.

Рассылается по спискам 4.1, 5.1, 8, 6 (АО-энергопроект)

Слоев, 220-41-38.

АООТ РОСЭП

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

по проектированию, строительству и эксплуатации сельских
электрических сетей

16.03.2001

02.02-2001

N

Москва

/“Руководство по защите эл. сетей
6-1150 кВ от грозовых и
внутренних перенапряжений
(Разделы для сетей 6-35 кВ)/

Шлеппер ПК: 20-70

Сообщаем, что РАО “ЕЭС России” 12.07.1999 г. введено в действие “Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений”, РД 153-34.3-35.125-99, издание второе.

В подготовке “Руководства” принимали участие АО НИИПТ (головная организация) и АО ВНИИЭ. Кроме них, к разработке отдельных вопросов привлекались: АО ЭНИН, АО “Институт “Севзап-энергосетьпроект” и другие организации.

С введением в действие “Руководства” утрачивают силу “Руководящие указания по защите электростанций и подстанций 3-500 кВ от прямых ударов молнии и грозовых волн, набегающих с линий электропередачи” (ОРГРЭС, 1975).

В приложении к данному ИММ публикуем разделы из “Руководства”, касающиеся электрических сетей напряжением 6-35 кВ, а также оглавление (полное содержание) “Руководства”.

Вопросы по приобретению и использованию “Руководства” в практической работе следует направлять в АО НИИПТ (194223; Санкт-Петербург, ул.Курчатова, 1/39; факс: 812 + 5554931).

Приложение: упомянутое.

Первый заместитель Генерального директора
АООТ РОСЭП

А.С.Лисковец

**РУКОВОДСТВО ПО ЗАЩИТЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
СЕТЕЙ 6-1150 кВ ОТ ГРОЗОВЫХ И
ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ**

РД 153-34.3-35.125-99
Издание второе
(разделы для сетей 6-35 кВ)

Шурф №: 20-70

**Часть 2
ЗАЩИТА ОТ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6-35 кВ**

	стр. (РД)	стр. (РУМ)
Раздел 5. Защита от внутренних перенапряжений сетей 6-35 кВ		
5.1. Исходные положения.....	110	9
5.2. Компенсация емкостного тока на землю.....	112	11
5.3. Защита от дуговых перенапряжений в сетях 6-35 кВ.....	112	11
5.4. Система защиты от однофазных замыканий и перенапряжений в сети собственных нужд с резистивным заземлением нейтрали идвумя типами ОПН.....	113	11
5.5. Защита от повреждений трансформаторов напряжения 6-35 кВ контроля изоляции.....	115	14
5.6. Защита от перенапряжений установок с вакуумными выключателями.....	115	14
5.7. Защита неиспользуемых обмоток трансформаторов.....	117	16

**ПРИЛОЖЕНИЕ К ЧАСТИ 2
ЗАЩИТА ОТ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6-35 кВ**

ПРИЛОЖЕНИЕ 10. Допустимые кратности внутренних перенапряжений.....	120	19
ПРИЛОЖЕНИЕ 11. Антирезонансные трансформаторы напряжения.....	121	20
ПРИЛОЖЕНИЕ 12. Пример выбора параметров RC-цепочки.....	122	21

**ЧАСТЬ 3
ГРОЗОЗАЩИТА ЛИНИЙ ПОДСТАНЦИЙ 6-1150 кВ**

Список обозначений части 3.....	124	23
---------------------------------	-----	----

**Раздел 6. Основные характеристики разряда молнии
в расчетах грозозащиты**

6.1. Краткие сведения о механизме разряда молнии.....	131	30
6.2. Количественные характеристики разряда молнии.....	133	32
6.3. Интенсивность грозовой деятельности.....	139	38
6.4. Грозопоражаемость воздушных линий.....	144	43

Раздел 7. Показатели грозоупорности и средств грозозащиты воздушных линий

7.1. Влияние конструктивных параметров ВЛ на показатели ее грозоупорности.....	145	44
7.2. Влияние природно-климатических условий и особенностей трассы на показатели грозоупорности ВЛ.....	147	46
7.3. Эксплуатационные показатели грозоупорности ВЛ 110-750 кВ.....	148	47
7.4. Средства грозозащиты воздушных линий.....	148	47

Раздел 8. Выбор средств грозозащиты ВЛ 110 кВ и выше

8.1. Оценка грозоупорности ВЛ 110-750 кВ по справочным кривым.....	151	50
8.2. Критерии выбора средств грозозащиты ВЛ 110 кВ и выше.....	154	53
8.3. Допустимое число грозовых отключений ВЛ и выбор средств грозозащиты по критерию коммутационного ресурса линейных выключателей.....	155	54
8.4. Определение области рационального использования унифицированных и типовых опор для ВЛ 110-330 кВ различных категорий по грозозащите.....	157	56

Раздел 9. Защита станций и подстанций 6-1150 кВ от грозовых перенапряжений

9.1. Общие положения.....	159	58
9.2. Защита станций и подстанций от прямых ударов молнии.....	159	58
9.3. Защита станций и подстанций от набегающих грозовых волн.....	162	61
9.4. Средства защиты РУ от набегающих грозовых волн.....	163	62
9.5. Координация импульсной прочности и изоляции подстанционного оборудования с защитными характеристиками ОПН.....	164	63
9.6. Определение максимальной длины защитного подхода (опасной зоны).....	167	66
9.7. Показатели надежности грозозащиты РУ станций и подстанций от набегающих волн.....	168	67
Оглавление. (Полного содержания Руководства).....	348	69

РАЗДЕЛ 5. ЗАЩИТА ОТ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ СЕТЕЙ 6–35 кВ

5.1. Исходные положения

Работающие с незаземленной эффективно нейтралью сети напряжением 6–35 кВ должны иметь изолированную, резонансно заземленную либо резистивно заземленную нейтраль.

Основным защитным мероприятием в сетях 6–35 кВ является компенсация емкостных токов замыкания на землю с помощью дугогасящего реактора (ДГР). Установка ДГР служит, в первую очередь, для защиты от действия заземляющей дуги (от термического повреждения оборудования и перехода дуги на другие фазы), но одновременно снижает перенапряжения дуговых замыканий на землю.

В воздушных и смешанных сетях с компенсацией емкостных токов должны быть выполнены мероприятия против резонансного повышения напряжения при появлении в сети емкостной несимметрии и при неполнофазных коммутациях.

В сетях 6–35 кВ с изолированной или резонансно заземленной нейтралью внутренние перенапряжения обычно не опасны для изоляции, поэтому в применении специальных защитных мероприятий, за редким исключением, нет необходимости, но отказ от защиты должен быть обоснован. Вместе с тем, нельзя исключить ухудшения (например, старения) изоляции в периоды между очередными эксплуатационными профилактическими испытаниями, поэтому для повышения надежности работы изоляции сетей, прежде всего, состаренной в процессе многолетней эксплуатации, целесообразно в конкретных условиях эксплуатации предусматривать дополнительные средства ограничения внутренних перенапряжений (установка ОПН, демпфирующих *RC*-цепочек, резисторов в нейтрали и др.).

Обязательной является защита от перенапряжений, возникающих при коммутации малых индуктивных токов вакуумными выключателями.

В сетях 6–35 кВ должны быть приняты меры по предотвращению или снижению вероятности опасных резонансных и феррорезонансных колебаний.

Осциллограммы, иллюстрирующие феррорезонансные колебания, показаны на рис. 5.1. Этот режим возник в действующей сети 35 кВ после отключения однофазного металлического замыкания на землю. Показанные на рис. 5.1 колебания относятся к классу так называемых почтипериодических режимов.

Амплитуды перенапряжений, возникающих в режимах почтипериодических колебаний, обычно опасности для изоляции ТН не представляют. Однако, как показала расшифровка осциллограмм, приведенных на рис. 5.1, зачастую они сопровождаются большими многократно повторяющимися и длительно (в течение нескольких секунд) действующими бросками тока в обмотках, поэтому такие режимы могут стать причиной термического повреждения ТН.

Так, в процессе феррорезонансных почти периодических колебаний, приведенных на рис. 5.1, амплитуды этих бросков достигали 300–500 мА, что в 5–8,5 раз превышает допустимые по нагреву токи.

Почтипериодичность этих режимов связана с наличием в потокосцеплении ТН апериодической составляющей, происхождение которой, по-видимому, вызвано повторными пробоями промежутка после отключения к.з.

Всегда требуется защита неиспользуемых обмоток трансформаторов от электростатических и электромагнитных влияний.

Допустимые кратности перенапряжений на электрооборудовании сетей 6–35 кВ указаны в Приложении 10.

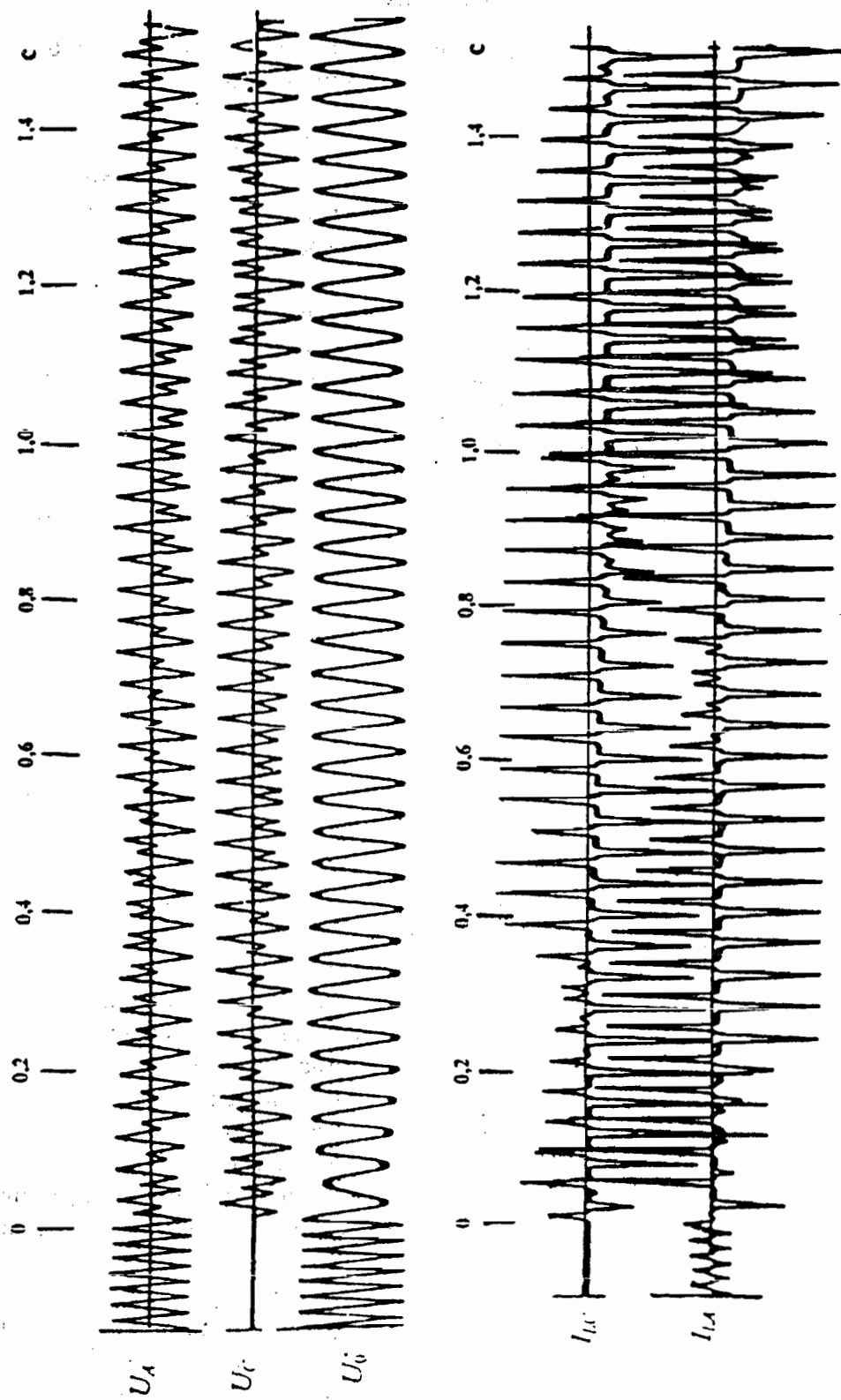


Рис. 5.1. Осциллограмма феррорезонансных почтипериодических колебаний.
 Действующая сеть 35 кВ. Длина ВЛ 25 км: два ЗНОМ-35

5.2. Компенсация емкостного тока на землю

Вопрос о необходимости применения ДГР и о его мощности решается на основе расчета или измерения величины емкостного тока замыкания на землю. Дугогасящие аппараты для компенсации емкостного тока замыкания на землю должны устанавливаться, если его величина превышает следующие значения:

Номинальное напряжение сети, кВ	6	10	15–20	35
Емкостной ток замыкания на землю, А	30	20	15	10

В сетях 6–35 кВ с ВЛ на железобетонных или металлических опорах дугогасящие аппараты должны устанавливаться при емкостном токе замыкания на землю более 10 А. В сетях 6–35 кВ с повышенными требованиями к электробезопасности (сети открытых горных и торфяных разработок, шахтных и т. п.) компенсация требуется при емкостном токе 5 А и более.

Как правило, ДГР должны иметь автоматическую настройку компенсации, чтобы в нормальном режиме напряжение несимметрии не превышало 0,75 % фазного напряжения.

При отсутствии в сети замыкания на землю допускается напряжение не выше 15 % фазного напряжения длительно и не выше 30 % в течение 1 ч. Если напряжения несимметрии и смещения нейтрали превышают указанные значения, то снижение их должно быть осуществлено выравниванием емкостей фаз относительно земли, например, транспонированием линий на шинах подстанций. Запрещаются пофазные включения и отключения воздушных и кабельных линий, если это может привести к напряжению смещения нейтрали, превышающему указанные значения.

ДГР и нейтраль трансформатора, к которой подключен реактор, должны быть защищены ОПН от перенапряжений, обусловленных срезом тока в ДГР при отключении двухфазных коротких замыканий на землю, когда на шинах трансформатора остается маленькая емкость.

ОПН устанавливается также, если наибольший ток ДГР $I_r \geq 30 I_c$, где I_c — емкостный ток замыкания на землю на шинах после отключения к.з.; при этом перенапряжения не превзойдут $3 U_\phi$.

Отключение и включение холостого трансформатора, к нейтрали которого подключен ДГР, можно производить только после отключения реактора, так как неодновременность размыкания или замыкания контактов выключателя (разъединителя) может привести к появлению опасных перенапряжений, возникающих вследствие пофазной компенсации емкостей сети.

5.3. Защита от дуговых перенапряжений в сетях 6–35 кВ

5.3.1. Релейная защита целесообразна для уменьшения длительности замыкания на землю и исключения поиска "земли" методом поочередного отключения и включения элементов сети, связанным с дополнительными воздействиями перенапряжений. Рекомендуется оснащение всех присоединений устройствами релейной защиты от однофазных замыканий, удовлетворяющими следующим основным требованиям:

- устройства должны реагировать на устойчивые повреждения и повреждения, сопровождающиеся перемежающейся дугой;
- устройства должны селективно определять направление до места однофазного замыкания;
- работа устройства не должна зависеть от эксплуатационных режимов сети.

При этом устройства защиты могут действовать на отключение без выдержки времени, на отключение с выдержкой времени (по условиям селективности, технологии и др.) или на сигнал; либо устройство защиты, отключающее элемент с однофазным замыканием, должно действовать с минимальной выдержкой времени в установках, где отключение "земли" необходимо по требованиям техники безопасности.

5.3.2. В сетях 6–35 кВ с изолированной нейтралью дуговые перенапряжения для нормальной изоляции опасности не представляют, однако для повышения надежности работы изоляции, ослабленной по разным причинам (старение и др.) могут использоваться ОПН. Особенно эффективно их применение совместно с резистором в нейтрали, при этом необходимо исходить из следующих условий:

- защитные характеристики ОПН должны быть скоординированы с уровнем изоляции защищаемого объекта (трансформатора, двигателя, кабеля, КРУ);
- допустимые напряжения частотой 50 Гц для ОПН по величине и длительности должны соответствовать возможным повышением напряжения в сети;
- пропускная способность ОПН должна соответствовать всем возможным в сети токовым воздействиям с учетом их длительности. Оптимальный выбор параметров и место его установки могут быть сделаны только с помощью расчетов перенапряжений и токовых воздействий на ОПН.

5.3.3. Когда отрицательные последствия от внезапного аварийного отключения поврежденного элемента с однофазным замыканием менее тяжелы, чем последствия от длительного протекания тока замыкания или перехода в междуфазное короткое замыкание, по местным условиям может оказаться целесообразно заземлить нейтраль через резистор и отключать присоединение с "землей" с минимальной выдержкой времени. Такая ситуация может иметь место в тех распределительных или промышленных сетях, а также в тех сетях собственных нужд электростанций, где наблюдаются частые переходы однофазных замыканий в междуфазные и двойные, возникают трудности с компенсацией емкостных токов из-за значительного остаточного тока высших гармоник, где отключение поврежденного элемента не наносит ущерба при наличии резерва.

В сети с высокоомным резистивным заземлением предполагается включение в нейтраль резистора, сопротивление которого одного порядка с емкостным сопротивлением всех фаз сети на землю, при этом существенно снижаются дуговые и феррорезонансные перенапряжения.

5.4. Система защиты от однофазных замыканий и перенапряжений в сети собственных нужд с резистивным заземлением нейтрали и двумя типами ОПН

Для сетей с резистивным заземлением нейтрали, в которых допускается аварийное отключение поврежденного присоединения с однофазным замыканием, может быть использована схема с двумя ограничителями ОПН₁ и ОПН₂, имеющими различные уровни защиты. Схема такой защиты применительно к сети собственных нужд 6 кВ приведена на рис. 5.2. В систему защиты, кроме резистора, входит селективная защита от замыкания на землю, действующая на отключение, и два комплекта ограничителей перенапряжений с разными уровнями защиты. Активный ток замыкания на землю создается резистором $R_N \approx 100$ Ом. На всех присоединениях секции собственных нужд 6 кВ устанавливается токовая ненаправленная защита от

замыканий на землю, действующая на отключение без выдержки времени. Селективность ее определяется тем, что активный ток протекает только через поврежденное присоединение. Через остальные присоединения протекает лишь собственный емкостной ток нулевой последовательности, от которого защита отстраивается.

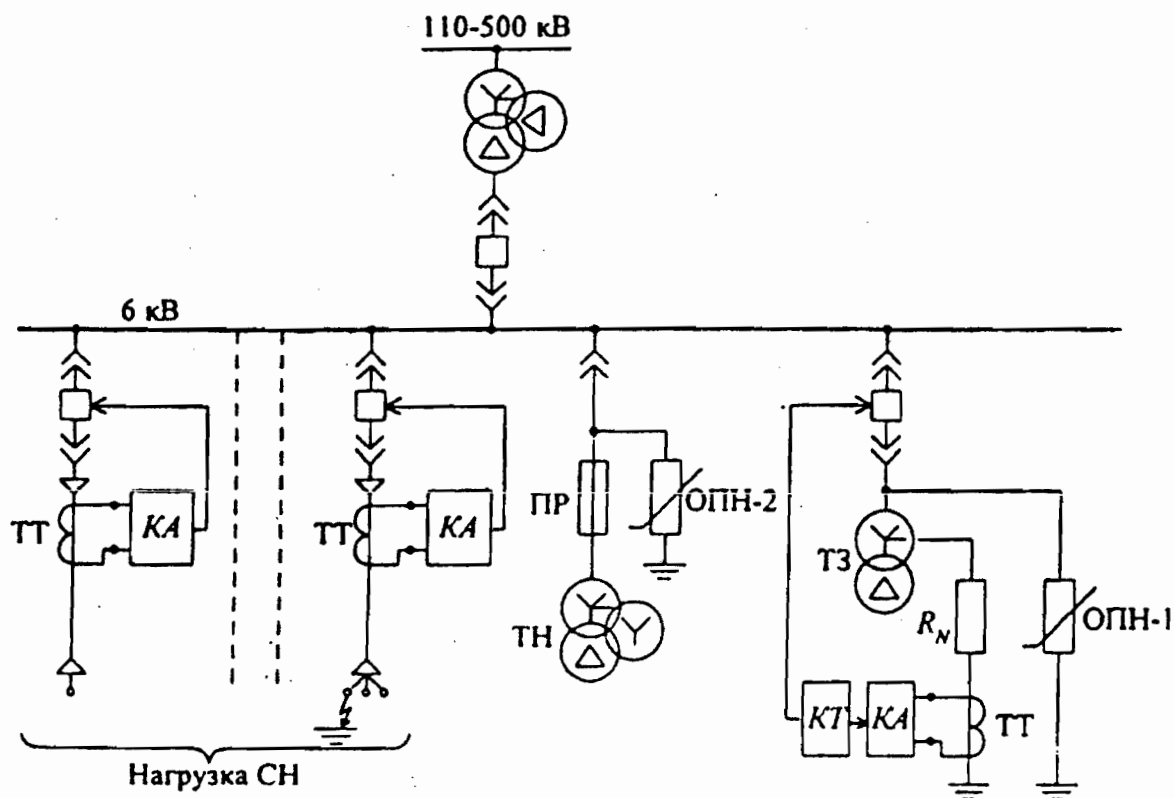


Рис. 5.2. Система защиты от перенапряжений в сети СН с резисторным заземлением нейтрали и двумя типами ОПН.

$R_N = 100$ Ом – резистор; ТТ – трансформатор тока нулевой последовательности; КА – токовое реле; КТ – реле времени; ОПН – ограничители перенапряжений; ТН – трансформатор напряжения; ПР – предохранитель; ТЗ – трансформатор заземляющий

При отказе токовых защит присоединений или при однофазных замыканиях на шинах действует защита, подключенная к трансформатору тока в цепи резистора R_N . Эта защита с временем 0,5 с действует на отключение заземляющего трансформатора вместе с резистором и ОПН₁, поэтому в схеме исключено длительное существование большинства однофазных замыканий, что благоприятно сказывается на работе оборудования, а также исключено длительное воздействие линейного напряжения на ОПН₁, установленный у заземляющего трансформатора. Кроме того, перенапряжения от заземляющих дуг ограничены резистором в нейтрали до уровня ниже $2,4 U_\phi$. Все это создает достаточно легкие условия работы ОПН₁, который должен длительно выдерживать только фазное напряжение сети, поэтому его защитные характеристики могут быть выбраны приблизительно на уровне $2,0 U_\phi$.

В редких случаях отказа токовых защит присоединений или возникновения однофазного замыкания на шинах сеть переходит в режим работы с изолированной нейтралью и остается под защитой ОПН₂, который должен быть рассчитан на длительное воздействие линейного напряжения; поэтому этот ограничитель имеет защитные характеристики $(2,9-3,0)U_\phi$, худшие по сравнению с ОПН₁. В подавляю-

шем большинстве случаев при нормальной работе защиты удается обеспечить уровень ограничения перенапряжений примерно до $(2,1-2,3)U_{\phi}$. При отказе токовых защит присоединений, когда ограничение перенапряжений осуществляется ОПН₂, воздействующие на оборудование перенапряжения увеличиваются примерно до $(2,6-3,0)U_{\phi}$. Описанная система защиты, помимо собственных нужд электрических станций, может быть применена и в других сетях 6–10 кВ.

5.5. Защита от повреждений трансформаторов напряжения 6–35 кВ контроля изоляции

Радикальным мероприятием, исключающим повреждения трансформаторов напряжения контроля изоляции, является использование “антирезонансных” трансформаторов напряжения (НАМИ-6, НАМИ-10 и НАМИ-35). Эти трехфазные трансформаторы имеют особую схему соединения обмоток и пониженную номинальную индукцию. Описание и схема соединения обмоток “антирезонансных” трансформаторов напряжения типа НАМИ даны в Приложении 11.

При использовании трансформаторов напряжения других типов (НТМИ-6, НТМИ-10, 3×ЗНОМ-35) для предотвращения их повреждений от феррорезонансных колебаний и от дуговых замыканий на землю рекомендуются следующие мероприятия:

- заземление нейтрали сети через ДГР или резистор, обеспечивающий разряд емкостей сети за 0,01 с;
- уменьшение в сети числа трансформаторов напряжения с заземленными нейтральными высоковольтных обмоток. Где есть возможность, следует ограничиться измерением междуфазных напряжений, используя для этого трансформаторы (типа НОМ), соединенные по схеме открытого треугольника;
- в сетях 35 кВ применение вместо трехфазной группы ЗНОМ-35 двух трансформаторов НОМ-35 для измерения междуфазных напряжений и одного ЗНОМ-35, включенного в нейтраль питающего трансформатора, для контроля изоляции сети;
- в сетях 6–10 кВ использование резисторов порядка 10 кОм, постоянно включенных в нейтральный провод трансформаторов напряжения. При этом изоляция нейтрали должна выдерживать перенапряжения примерно $1,3 U_{\phi}$;
- включение резистора 25 Ом, 400 Вт во вторичную обмотку ТН, соединенную по схеме разомкнутого треугольника. Защитный резистор устанавливается без предохранителя непосредственно у ТН и остается постоянно включенным.

Такой резистор, однако, не всегда эффективен, поэтому в схеме, где замечены феррорезонансные колебания, целесообразность его использования следует проверить экспериментально.

5.6. Защита от перенапряжений установок с вакуумными выключателями

При применении вакуумных выключателей на присоединениях с электродвигателями и трансформаторами следует предусматривать средства защиты от перенапряжений. В качестве таковых должны применяться ОПН и демпфирующие RC-цепочки, как наиболее эффективные средства по сравнению с другими мероприятиями (задержка в отключении двух фаз, управление моментом коммутации и др.).

5.6.1. ОПН должны подключаться между фазой и землей со стороны коммутируемого присоединения или параллельно контактам выключателя. ОПН, установленные на шинах, не защищают присоединение при его отключении вакуумным выключателем. Устанавливаемые между фазой и землей ОПН должны располагаться непосредственно у защищаемого объекта или в начале кабеля, в ячейке КРУ у выключателя, если длина кабеля не больше 50 м.

ОПН, подключаемый непосредственно на зажимах защищаемого объекта (электродвигателя), обеспечивает ограничение перенапряжений до необходимого уровня (см. Приложение 10) и, вместе с тем, оказывается неуязвимым в режиме с перемежающейся дугой. Последнее обусловлено тем, что при перенапряжениях, вызванных перемежающейся дугой, ток через ОПН имеет безопасные значения, поэтому такие ОПН могут применяться в схемах с любым значением емкостного тока замыкания на землю. Этим свойствам отвечают ОПН с параметрами, приведенными во втором столбце табл. 5.1.

Если длина кабеля менее 50 м, а емкостной ток замыкания на землю не превышает 10 А, то ОПН может устанавливаться между фазой и землей в ячейки КРУ у выключателя со стороны кабеля, питающего электродвигатель. Его параметры должны быть не хуже указанных в третьем столбце табл. 5.1.

При включении ОПН параллельно контактам выключателя обеспечивается более глубокое ограничение перенапряжений, а сам ОПН подвергается менее тяжелым воздействиям. Параметры этих ОПН, независимо от режима заземления нейтрали, величины емкостного тока замыкаемого на землю и длины коммутируемого кабеля, должны быть не хуже приведенных в четвертом столбце табл. 5.1.

Таблица 5.1

Основные параметры ОПН для защиты сетей 6 кВ с электродвигателями

Параметры ОПН	ОПН между фазой и землей на зажимах электродвигателя	ОПН между фазой и землей на питающем конце кабеля	ОПН между контактами выключателя
Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение, кВ, не менее	6	6	5,5
Напряжение частотой 50 Гц на ограничителе: а) допустимое неограниченное время, кВ, не менее	6,6	—	—
б) допустимое в течение 2 часов, кВ, не менее	—	6,6*	6,6**
Напряжение на ограничителе при импульсе тока 30/60 мкс с амплитудой 500 А, кВ, не более	18,5	14,8	13,5
Пропускная способность при двенадцати прямоугольных импульсах тока 2000 мкс с амплитудой, А	400	400	150

* - с предварительно поглощенной энергией 17 кДж;

** - без предварительно поглощенной энергии.

5.6.2. Демпфирующая RC-цепочка должна применяться для защиты наиболее ответственных электродвигателей, при этом установка RC-цепочек на нескольких присоединениях не должна приводить к установке в сети дополнительных дугогасящих реакторов. RC-цепочку рекомендуется устанавливать непосредственно у защищаемого объекта. Допускается установка RC-цепочки в начале кабеля в ячейки КРУ у выключателя, если расчетом показано, что обеспечивается требуемый уровень ограничения перенапряжения на защищаемом объекте.

Емкость C защитной RC-цепочки выбирается в 5 раз больше емкости отключаемого присоединения (емкость кабеля по прямой последовательности плюс емкость защищаемого объекта). Сопротивление R защитной RC-цепочки определяется по формуле:

$$R = 1,75\sqrt{L/C}, \text{ Ом,}$$

где $L = L_{\text{ш}} + L_{\text{к}}$, $L_{\text{ш}}$ – индуктивность ошиновки, принимаемая равной $25 \cdot 10^{-6}$ Гн; $L_{\text{к}}$ – индуктивность кабеля 6 кВ на высоких частотах (в зависимости от поперечного сечения токоведущей жилы S):

$S, \text{ мм}^2$	35	50	70	95	120	150	185	240
$L_{\text{к}}, \text{ мГн/км}$	0,14	0,12	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,055

Эквивалентная емкость двигателя $C_{\text{д}}$, мкФ, при отсутствии конкретных данных может быть определена по формуле

$$C_{\text{д}} = 4 \cdot 10^{-4} \sqrt{P_{\text{н}}}, \text{ мкФ,}$$

где $P_{\text{н}}$ – номинальная мощность двигателя, кВт.

Для RC-цепочек можно применить бумажно-масляные конденсаторы на напряжение 6–10 кВ (например, применяемые для компенсации реактивной мощности); резистор R должен быть рассчитан на длительную мощность 100 Вт (например, типа ТВО).

Защита от перенапряжений, вызванных вакуумными выключателями, не требуется в следующих случаях:

- при установке вакуумного выключателя на присоединении электродвигателя, пусковой ток которого более 1800 А (действующее значение);
- при установке вакуумного выключателя на присоединение с трансформатором, если суммарная емкость на землю превышает 0,2 мкФ;
- если трансформаторы защищены ОПН или вентильными разрядниками по условию грозозащиты;
- в распределительных сетях при применении вакуумных выключателей на головных участках ВЛ 6–35 кВ, имеющих отпаечные трансформаторы;
- для изоляции аппаратов – разъединителей, трансформаторов тока, трансформаторов напряжения и др.

5.7. Защита неиспользуемых обмоток трансформаторов

Неиспользуемой считается обмотка, не имеющая присоединения или длительно отключенная от него (при монтаже, в пусковой период электроустановки, при выводе в ремонт присоединения, при наличии АВР на данном напряжении).

Длительная эксплуатация трансформаторов и автотрансформаторов не допускается, если их неиспользуемые обмотки низшего (среднего) напряжения не со-

единены в звезду или треугольник и не защищены от перенапряжений. Защита неиспользуемых обмоток низшего напряжения, расположенных между обмотками более высокого напряжения, должна быть осуществлена вентильными разрядниками или ограничителями перенапряжений, присоединенными к выводу каждой фазы. Защита неиспользуемых обмоток низшего и среднего напряжения, расположенных у магнитопровода, осуществляется заземлением одной фазы или нейтрали, либо установкой одного вентильного разрядника или ОПН на одной фазе или нейтрали.

Защита не требуется во всех случаях, если к обмотке низшего напряжения постоянно подключена кабельная линия длиной не менее 30 м, имеющая заземленную оболочку или броню.

ПРИЛОЖЕНИЯ

К ЧАСТИ 2

**ЗАЩИТА ОТ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6–35 кВ**

ДОПУСТИМЫЕ КРАТНОСТИ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Допустимая (выдерживаемая) кратность внутренних перенапряжений для изоляции электрооборудования сетей 6–35 кВ по отношению к наибольшему рабочему фазному напряжению определяется выражением

$$k_{\text{доп}} = \frac{U_{\text{доп}}}{U_{\text{нр}} / \sqrt{3}} = \frac{k_{\text{н}} \cdot k_{\text{к}} \cdot U_{\text{исп}}}{U_{\text{нр}} / \sqrt{3}},$$

где $U_{\text{исп}}$ – нормированное одноминутное заводское испытательное напряжение (действующее значение) главной изоляции электрооборудования; $k_{\text{н}} = 1,3$ – коэффициент импульса при внутренних перенапряжениях для главной изоляции трансформаторов 6–35 кВ; $k_{\text{к}} = 0,9$ – коэффициент кумулятивности.

Для электродвигателей коэффициент импульса и кумулятивности принимаются равными единице, а значение испытательного напряжения задается выражением

$$U_{\text{исп}} = 2 U_{\text{ном}} + 1.$$

Значения $k_{\text{доп}}$ приведены в табл. П10.1.

Для аппаратов и внешней изоляции допустимые кратности внутренних перенапряжений на 10–15 % выше.

Указанные в табл. П10.1 значения допустимой кратности для электродвигателей приведены для современной терморезистивной изоляции. Вместе с тем, в эксплуатации находится еще большая доля двигателей с микалентной изоляцией. Такая изоляция подвержена сравнительно быстрому старению, а срок наработки электродвигателей с микалентной изоляцией достигает 10 лет и более, поэтому выбор защиты такой изоляции требует особого внимания. В частности, уровень допустимых для микалентной изоляции кратностей перенапряжений, по-видимому, следует выбирать не по заводским испытательным нормам, а по нормам профилактики испытаний в эксплуатации.

Таблица П10.1

Допустимая кратность внутренних перенапряжений $k_{\text{доп}}$
для электрооборудования 6–35 кВ

$U_{\text{н}}, \text{кВ}$	6	10	15	20	35
Нормальная изоляция	7,0	5,9	5,2	4,9	4,3
Облегченная изоляция	4,5	4,1	4,3	4,4	-
Изоляция электродвигателей	3,4	3,3	-	-	-

АНТИРЕЗОНАНСНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

Мероприятием, исключающим повреждения трансформаторов напряжения в сетях 6–35 кВ, является применение "антирезонансных" трансформаторов напряжения типов НАМИ-6, НАМИ-10 и НАМИ-35.

Антирезонансный трансформатор НАМИ не вступает в резонанс с емкостью ненагруженных шин и линий любой протяженности, а также выдерживает без ограничения длительности как любые виды однофазных замыканий в сети, в том числе через перемежающуюся дугу, так и повышения напряжения, вызванные феррорезонансом емкости сети с другими трансформаторами (силовыми или напряжения).

Трансформаторы НАМИ имеют специальную схему соединения обмоток и пониженную номинальную индукцию (см. рис. П11.1).

В баке антирезонансного трансформатора размещаются два трансформатора (трехфазный и однофазный), имеющие отдельные магнитопроводы. В нейтраль высоковольтной обмотки трехфазного трансформатора, имеющего вторичную (компенсационную) обмотку, соединенную треугольником, включен однофазный трансформатор, который измеряет напряжение нулевой последовательности. Предотвращению феррорезонанса способствует то, что в контур нулевой последовательности входит только одна индуктивность намагничивания однофазного трансформатора, и этот феррорезонансный контур лишен источника э.д.с.

Все антирезонансные свойства трансформаторов НАМИ экспериментально проверены в действующих сетях.

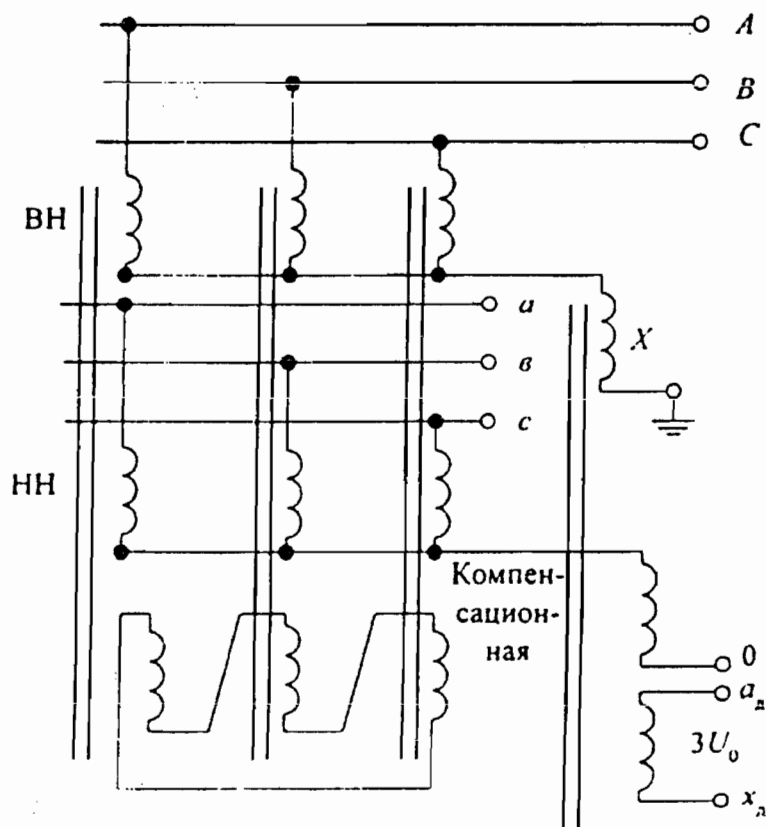


Рис. П11.1. Схема соединения обмоток трансформатора напряжения НАМИ

ПРИМЕР ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ RC-ЦЕПОЧКИ

Требуется защитить электродвигатель 6 кВ мощностью 400кВт с помощью RC-цепочки у его зажимов. Длина соединительного кабеля $l_k = 100$ м, сечение 70 мм^2 .

1. Емкость фазы двигателя

$$C_d = 4 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{P_H} = 4 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{400} = 0,008 \text{ мкФ.}$$

2. Эквивалентная емкость коммутируемого присоединения

$$C_3 = C_{к.пог} \cdot l_k + C_d = 0,39 \cdot 0,1 + 0,008 = 0,047 \text{ мкФ,}$$

где $C_{к.пог} = 0,39 \text{ мкФ/км}$ – погонная емкость кабеля по прямой последовательности.

3. Емкость RC-цепочки

$$C = 5 C_3 = 5 \cdot 0,047 = 0,23 \text{ мкФ.}$$

4. Индуктивность схемы

$$L = L_{ш} + L_{к.пог} \cdot l_k = 25 \cdot 10^{-6} + 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 = 35 \cdot 10^{-6} \text{ Гн,}$$

где $L_{ш} = 25 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}$ – индуктивность ошиновки, $L_{к.пог} = 0,1 \text{ мГн/км}$ – погонная индуктивность кабеля при высоких частотах (см. п.5.6.2).

5. Сопротивление защитной RC-цепочки

$$R = 1,75 \cdot \sqrt{L/C} = 1,75 \sqrt{35 \cdot 10^{-6} / 0,23 \cdot 10^{-6}} = 22 \text{ Ом.}$$

Таким образом, оптимальные параметры защитной RC-цепочки будут $C = 0,23 \text{ мкФ}$ и $R = 22 \text{ Ом}$.

ЧАСТЬ 3

ГРОЗОЗАЩИТА ЛИНИЙ И ПОДСТАНЦИЙ 6-1150 КВ

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ ЧАСТИ 3

- A – крутизна тока молнии на фронте импульса с косоугольным фронтом, кА/мкс;
- \bar{A}_1, \bar{A}_2 – математическое ожидание крутизны тока на фронте, соответственно, первого и последующих импульсов многократного разряда молнии, кА/мкс;
- $A_{кр}$ – критическое значение крутизны тока на фронте импульса при ударе молнии в опору и трос, кА/мкс;
- A_p – расчетная крутизна фронта волны тока, деформированной после пробега по коронирующему тросу от середины пролета до опоры, кА/мкс;
- E_d – градиент разрядного напряжения по дереву, кВ/м;
- $E_{кр}$ – критическое значение напряженности электрического поля в земле при пробое грунта, кВ/см;
- $E_{пр}$ – пробивная напряженность грунта в однородном поле, кВ/см;
- $E_{ср}$ – средняя напряженность на границе коронного чехла при отрицательной полярности, кВ/см;
- I – амплитуда импульса тока молнии, кА;
- \bar{I} – математическое ожидание амплитуды импульса тока молнии, кА;
- $I_{иск}$ – критическое значение импульсного тока через заземлитель, при котором происходит пробой грунта, кА;
- $I_{к.з.}$ – ток к.з., кА;
- $I_{кр}$ – критическое значение амплитуды тока молнии для линейной изоляции при прорыве молнии на провода, кА;
- I_l – ток к.з. при удалении точки удара молнии на расстояние l от шин ПС, кА;
- I_o – нормируемый ГОСТ 687-78 ток отключения к.з. выключателем, кА;
- $I_{об}$ – амплитуда тока молнии, протекающего через объект с ненулевым сопротивлением заземления, кА;
- $I_{к-о}$ – амплитуда тока молнии, протекающего через хорошо заземленный объект, кА;
- L – длина ВЛ, км;
- $L_{м-м}$ – расстояние между молниеотводами, м;
- $L_{оп}^{пр}$ – индуктивность участка опоры от основания до уровня точки подвеса провода, мкГн;
- $L_{оп}^{тр}$ – индуктивность опоры от основания до точки подвеса троса (на ВЛ с тросом) или до вершины опоры (для ВЛ без троса), мкГн;
- $L_{тр}$ – индуктивность тросов, мкГн;
- L_y – длина пути тока утечки изолятора, м;
- $M^{пр}(t)$ – взаимная индуктивность между каналом молнии и петлей провод-земля, мкГн;
- $M^{тр}(t)$ – взаимная индуктивность между каналом молнии и петлей трос-земля, мкГн;
- N – число ударов молнии на 100 км длины ВЛ в год, удары;

- N_B – число “боковых” ударов молнии в ВЛ (из пространства слева и справа от оси опоры или вертикальных плоскостей, проходящих через тросы), удары;
- N_r – абсолютное число грозových отключений ВЛ в год, шт.;
- $N_{г.д}$ – число грозových дней в году, дни;
- $N_{г.ч}$ – число грозových часов в году, ч;
- $N_{доп}$ – допустимое число автоматических отключений ВЛ длиной L по всем причинам, шт;
- $N_{доп.г}$ – допустимое число грозových отключений ВЛ длиной L при фактическом $N_{г.ч}$, шт;
- N_n – число индуктированных перенапряжений с амплитудой равной и более 25 кВ, шт;
- $N_{н.в}$ – число опасных перенапряжений, возникающих на оборудовании ПС от набегающих грозových волн в год, шт.;
- N_o – допустимое без ремонта выключателя количество отключений тока к.з., шт.;
- $N_{оп}$ – число ударов молнии в опоры на 100 км, удары;
- N_p – число “прямых” ударов молнии в ВЛ (в полосу шириной, равной расстоянию между тросами или проводами на бес-тросовых линиях), удары;
- $N_{пр}$ – число прорывов молнии на провод на 100 км, шт.;
- $N_{п.у}$ – число случаев перекрытия изоляции на ПС в год при прямых ударах молнии, шт.;
- $N_{тр}$ – число ударов молнии в трос в пролете на 100 км, удары;
- P_{A_1} – вероятность значений крутизны тока молнии больше A_1 , отн.ед.;
- P_{I_1} – вероятность значений амплитуды тока молнии больше I_1 , отн.ед.;
- $P_{I_{кр}}$ – вероятность значений тока молнии, превышающих критическое для удара молнии в провод, отн.ед.;
- $P_{оп}$ – вероятность обратного перекрытия линейной изоляции при ударе молнии в опору, отн.ед.;
- $P_{тр}$ – вероятность перекрытия линейной изоляции при ударе молнии в трос в пролете, отн. ед.;
- P_{U_n} – вероятность индуктированных перенапряжений, превышающих значение U_n , отн. ед.;
- P_α, P'_α – вероятность прорыва молнии на провода, отн. ед.;
- R, R_3 – сопротивление заземления, Ом;
- R_n – сопротивление заземления при стекании импульсного тока, Ом;
- R_k – радиус расщепления коронирующего провода, м;
- R_p – радиус расщепления фазы, м;
- $R_{экв}$ – эквивалентная ширина полосы стягивания “боковых” разрядов (см. N_B) с одной стороны от оси ВЛ, м;
- R_Σ – сопротивление заземления комбинированного заземлителя, Ом;
- $R_$ – сопротивление заземления на переменном токе промышленной частоты, Ом;
- S – характеристический размер заземлителя, м;
- T – число грозových дней в году (изокераунический уровень), дни;

- $T_{н.в}$ – повторяемость опасных перенапряжений на изоляции оборудования ПС от набегающих с ВЛ грозовых волн, годы;
- $T_{п.р}$ – средний период планового ремонта выключателей, годы;
- $T_{п.у}$ – то же, что $T_{н.в}$, но от прямых ударов в ОРУ, годы;
- U – наибольшее длительно допустимое рабочее (линейное) напряжение, кВ;
- U_{50} – 50%-ное разрядное напряжение изоляции при стандартном грозовом импульсе по обобщенной для различных типов гирлянд зависимости U_{50} от $I_{разр}$, кВ;
- U_{50}^* – 50%-ное разрядное напряжение гирлянды, используемой на ВЛ, при стандартном грозовом импульсе, кВ;
- $U_{50}^*(1,2), U_{50}(1,2)$ – 50%-ное разрядное напряжение изоляции для стандартного импульса, соответственно, положительной и отрицательной полярности, кВ;
- $U_{50}(I_{разр})$ – 50%-ное разрядное напряжение гирлянды для отрицательного импульса с усредненными параметрами ($\tau_{\phi} = 4+5$ мкс) в зависимости от длины гирлянды.
- $U_{50}^*(\tau_{\phi})$ – 50 %-ное разрядное напряжение изоляции для импульса положительной полярности с длительностью фронта более длительности фронта стандартного импульса, кВ;
- U_a – амплитудное значение грозового импульса, кВ;
- U'_a – крутизна грозового импульса на фронте, кВ/мкс;
- $U_{доп}$ – напряжение, допустимое для изоляции оборудования ПС, кВ;
- $U_{ин}$ – индуктированное напряжение на ВЛ 6–35 кВ, кВ;
- $U_{н1,2}, U_{н1,2,3}$ – значение индуктированного напряжения, вызывающего двух и трехфазное перекрытие изоляции на ВЛ 6–35 кВ, кВ;
- $U_{из}(t)$ – суммарное (импульсное и рабочее) напряжение на линейной изоляции при ударе молнии в опору и трос, кВ;
- $U_{имп}(t)$ – импульсное напряжение на линейной изоляции, кВ;
- $U_{ин м}(t)$ – составляющая индуктированного напряжения, создаваемая током в опоре и током в канале молнии, кВ;
- $U_{ин.тр}(t)$ – напряжение, индуктированное на проводе током в тросе, кВ;
- $U_{ин з}(t)$ – электрическая составляющая индуктированного напряжения, кВ;
- U_{ϕ} – напряжение начала короны на проводе или тросе, кВ;
- ΔU_x – координационный интервал по напряжению, кВ;
- $U_{к.п}$ – напряжение докоронного порога, кВ;
- $U_{мин}$ – минимальное разрядное напряжение линейной изоляции, кВ;
- $U_{н}$ – номинальное напряжение ВЛ, кВ;
- $U_{ост}$ – остающееся напряжение на защитном аппарате, кВ;
- $U_{п.в}$ – амплитуда испытательного напряжения полной волной, кВ;
- $U_{тп}$ – напряжение на проводе в точке удара молнии, кВ;
- U_p – фазное рабочее напряжение ВЛ, кВ;
- $U_{разр}(t)$ – вольт-секундная характеристика гирлянды изоляторов для разрядов на косоугольном фронте импульса, кВ;
- $U_{р.в}$ – амплитуда расчетного грозового импульса, кВ;
- $U_R(t)$ – составляющая импульсного напряжения на изоляции, вызванная падением напряжения на сопротивлении заземлении опоры, кВ;

- $U_r(t)$ — напряжение на трансформаторе, кВ;
 $U_{\text{экс}}$ — среднее эксплуатационное линейное рабочее напряжение, кВ;
 a — крутизна тока молнии, кА/мкс;
 c — скорость света, м/мкс;
 c_0 — геометрическая емкость провода на единицу длины, пФ/м;
 c_d — динамическая емкость провода на единицу длины, пФ/м;
 $c_{\text{ш}}$ — удельная емкость ошиновки, пФ/м;
 d — шаг расщепления, м;
 Δd — расстояние между тросом и проводом по горизонтали, м;
 $d_{\text{тр-тр}}$ — расстояние по горизонтали между тросами или верхними проводами (для бестросовых ВЛ), м;
 $f_{\text{пр}}$ — стрела провеса провода, м;
 $f_{\text{тр}}$ — стрела провеса троса, м;
 h — высота стержневого или протяженного молниеотвода, м;
 Δh — разность высот подвеса троса и провода на опоре, м;
 $h_{\text{зф}}$ — наибольшая высота зоны защиты молниеотвода, м;
 h_c — наименьшее допустимое расстояние от провода до земли в середине пролета, м;
 $h_{c,r}$ — наименьшая высота границы внутренней зоны защиты совместно действующих молниеотводов, м;
 $h_{\text{оп}}$ — высота опоры, м;
 $h_{\text{пр}}$ — высота подвеса провода на опоре, м;
 $h_{\text{ср}}$ — средняя высота подвеса троса (провода), м;
 $h_{\text{ср,пр}}$ — средняя высота подвеса провода, м;
 $h_{\text{ср,тр}}$ — средняя высота подвеса троса, м;
 $h_{\text{тр}}$ — высота подвеса троса на опоре, м;
 $h_{\text{тр-пр}}$ — расстояние по вертикали между тросом и проводом в середине пролета, м;
 i_m — ток молнии, кА;
 $i_{\text{оп}}$ — ток, протекающий по опоре, кА;
 $i_{\text{тр}}$ — ток, ответвляющийся в тросы, кА;
 j — плотность тока, кА/м²;
 $k_{\text{АПВ}}$ — коэффициент успешности автоматического повторного включения (АПВ), отн.ед.;
 k_0 — коэффициент, учитывающий условия эксплуатации линейного выключателя, отн.ед.;
 k_r — геометрический коэффициент связи провода и троса (нескольких тросов), находящихся под напряжением, отн.ед.;
 k_E — коэффициент, учитывающий снижение градиента разрядного напряжения с увеличением длины гирлянды, отн.ед.;
 k_f — коэффициент формы для расчета сопротивления заземления, отн.ед.;
 k_h — отношение эквивалентной полосы стягивания “боковых” разрядов к средней высоте подвеса троса (провода на бестросовых ВЛ) — $R_{\text{экв}}/h_{\text{ср}}$, отн.ед.;
 k_k — коэффициент связи провода с коронирующим тросом (тросами), отн.ед.;
 $k_{\text{кон}}$ — коэффициент, учитывающий различие в конструкции изоляторов (отношение длины пути тока утечки L_y к строительной высоте изолятора $H_{\text{и1}}$), отн.ед.;

- $k_{\text{под}}$ – коэффициент подобия при расчете сопротивления заземления лучевого заземлителя, отн.ед.;
 k_3 – коэффициент экранирования трассы ВЛ от разрядов молнии, отн. ед.;
 l – расстояние между точкой к.з. на ВЛ и шинами ПС, км;
 $l_{\text{арм}}$ – длина строительной арматуры, м;
 l_r – длина гирлянды для подвески провода (со строительной арматурой), м;
 $l_{r.тр}$ – длина гирлянды для подвески троса (со строительной арматурой), м;
 $l_{\text{габ}}$ – габаритный пролет, м;
 l_d – длина изоляции по дереву, м;
 $l_{o.z}$ – длина опасной зоны на подходе к ПС, км;
 $l_{\text{прол}}$ – длина пролета, м;
 l_{p-a} – расстояние между разрядником и автотрансформатором, м;
 l_{p-p} – расстояние между разрядником и реактором, м;
 $l_{\text{разр}}$ – длина разрядного пути по гирлянде изоляторов, м;
 n – число составляющих проводов расщепленной фазы, шт.;
 $n_{6.y}$ – удельное число грозовых отключений ВЛ 6–35 кВ на 100 км и 100 грозовых часов от близких ударов молнии в землю, шт.;
 $n_{\text{вл}}$ – число отходящих от подстанций ВЛ, шт.;
 n_r – удельное число грозовых отключений ВЛ, рассчитанное на 100 км и 100 грозовых часов, шт.;
 n'_r – удельное число грозовых отключений на 100 км и один год эксплуатации, шт.;
 $n_{r.1u}$ – удельное число грозовых отключений одной цепи ВЛ на двухцепных опорах на 100 км и 100 грозовых часов, шт.;
 $n_{r.2u}$ – удельное число грозовых отключений одновременно двух цепей ВЛ на общей опоре на 100 км и 100 грозовых часов, шт.;
 $n_{\text{пред}}$ – предельное значение удельного числа грозовых отключений ВЛ по критерию коммутационного ресурса выключателя на 100 км и 100 грозовых часов, шт.;
 $n'_{1.пред}$ – предельное значение удельного числа грозовых отключений одной цепи на двухцепных опорах по критерию коммутационного ресурса выключателя на 100 км и 100 грозовых часов, шт.;
 $n_{\text{из}}$ – число изоляторов в гирлянде, шт.;
 $n_{\text{п.у}}$ – удельное число грозовых отключений ВЛ 6-35 кВ на 100 км и 100 грозовых часов от прямых ударов молнии в линию, шт.;
 $n_{\text{общ}}$ – общее число автоматических отключений ВЛ по всем причинам, рассчитанное на 100 км и один год эксплуатации, шт.;
 $n_{\text{обп}}$ – удельное число грозовых отключений от обратных перекрытий от ударов в опору, рассчитанное на 100 км и 100 грозовых часов, шт.;
 $n'_{\text{пред}}$ – предельное значение удельного числа грозовых отключений от обратных перекрытий по критерию коммутационного ресурса выключателя на 100 км и 100 грозовых часов, шт.;

- $(n_{оп} + n_{тр})_{прел}^0$ – то же самое, что и $(n_{оп} + n_{тр})_{прел}$, но для двух цепей на двух-цепных опорах и только от первых перекрытий, т.е. без учета перекрытий после перекрытия изоляции соседней цепи, шт.;
- $n_{пр}, n'_{пр}$ – удельное число грозовых отключений от прорывов молнии на провода, рассчитанное на 100 км и 100 грозовых часов, шт.;
- n_z – удельное число грозовых отключений от перекрытий воздушного промежутка трос-провод от ударов молнии в среднюю часть пролета, рассчитанное на 100 км и 100 грозовых часов, шт.;
- $n_{тр}$ – удельное число грозовых отключений от обратных перекрытий от ударов в середину пролета, рассчитанное на 100 км и 100 грозовых часов, шт.;
- $n_{экс}$ – удельное число грозовых отключений ВЛ по опыту эксплуатации на 100 км и 100 грозовых часов, шт.;
- ρ_0 – плотность разрядов молнии на 1 км^2 поверхности земли за год;
- r_0 – граница зоны защиты стержневого молниеотвода на уровне земли, м;
- r_k – радиус чехла короны провода или составляющего провода расщепленной фазы, м;
- $r_{пр}$ – радиус провода или составляющей расщепленной фазы, м;
- $r_{с.о}$ – граница внутренней зоны защиты совместно действующих молниеотводов на уровне земли, м;
- r_z – эквивалентный радиус фазы, м;
- $r_{тр}$ – радиус троса, м;
- $r_{zк}$ – эквивалентный радиус расщепленной коронирующей фазы, м;
- t – время, мкс;
- $t_{кр}$ – момент перекрытия линейной изоляции при ударе молнии в опору, мкс;
- t_{max}, t_{min} – максимальная и минимальная длительность фронта расчетного импульса тока молний, мкс;
- $t_{прол 2}$ – время пробега волны половины пролета, мкс;
- u – импульсное напряжение на проводе (тросе), кВ;
- $u_p(\varphi)$ – рабочее напряжение в момент разряда молнии в ВЛ, кВ;
- $u_{тр}$ – напряжение на тросе, кВ;
- v – скорость распространения главного разряда молнии, м/мкс;
- z – волновое сопротивление, Ом;
- z_r – геометрическое (без учета короны) волновое сопротивление троса или провода, Ом;
- $z_{r пр}$ – геометрическое волновое сопротивление провода, Ом;
- $z_{к пр}$ – волновое сопротивление коронирующего провода, Ом;
- $z_{к тр}$ – волновое сопротивление тросов с учетом короны, Ом;
- z_m – сопротивление канала молнии, Ом;
- $z_{тр}$ – волновое сопротивление тросов, Ом;
- $z_{зкв}$ – волновое сопротивление нескольких параллельных тросов или проводов, Ом;
- α – угол защиты троса, град;
- β – относительная скорость обратного разряда молнии, отн.ед.;

- β_r — доля грозových в общем числе автоматических отключений ВЛ, отн. ед.;
 $\delta_{оп}$ — доля ударов в опоры и прилегающие участки троса от общего числа ударов молнии в пролет ВЛ, отн. ед.;
 ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость грунта, отн. ед.;
 ϵ_0 — диэлектрическая постоянная, равна 8,85 пФ/м;
 η — коэффициент перехода импульсного перекрытия в дугу тока промышленной частоты, отн. ед.;
 ρ — удельное сопротивление грунта, Ом·м;
 $\sigma_{lg A_1}, \sigma_{lg A_2}$ — коэффициент изменчивости крутизны тока на фронте, соответственно, первого и последующих импульсов многократного разряда молнии для логарифмически нормального распределения, где A_1 и A_2 в кА/мкс;
 $\sigma_{lg I}$ — коэффициент изменчивости амплитуды тока молнии для логарифмически нормального распределения, где I в кА;
 τ_n — длительность спада импульса тока до значения 0,5 I , мкс;
 τ_ϕ — длительность фронта импульса, мкс;
 $\psi_{пр}, \psi_{оп}$ — доли опасных для изоляции ПС импульсов, соответственно, при прорыве молнии на провода и при обратных перекрытиях изоляции ВЛ, отн. ед.;
 Π_1, Π_2 — координаты критериальной зависимости для расчета импульсного сопротивления заземления, отн. ед.;
 Π_1^0, Π_2^0 — координаты критериальной зависимости для расчета импульсного сопротивления заземления, но соответствующие стационарному сопротивлению заземления, отн. ед.

РАЗДЕЛ 6. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗРЯДА МОЛНИИ В РАСЧЕТАХ ГРОЗОЗАЩИТЫ

6.1. Краткие сведения о механизме разряда молнии

Грозовое облако является носителем электрических зарядов, сосредоточенных на водяных каплях. Их движение и распределение в облаке зависят не только от сил электростатического взаимодействия, но также от силы тяжести капель, скорости и направления воздушных потоков. Вследствие совместного действия этих сил в облаке могут длительно существовать зоны положительной и отрицательной полярности с различной плотностью зарядов. Неравномерность распределения зарядов приводит к возникновению сильного электрического поля внутри облака между зонами различной полярности и между облаком и землей. Условия для возникновения молнии создаются, когда в каком-либо месте облака напряженность электрического поля превысит электрическую прочность воздуха.

Разряд молнии прорастает в виде лидера, направленного: в основном по силовым линиям электрического поля. Как показывают результаты инструментальных исследований, разряды молнии в землю с вероятностью 0,9 возникают из отрицательной по отношению к земле зоны облака (такие разряды принято называть отрицательными). Образование и дальнейшее развитие лидера молнии представляет собой сложный физический процесс, многие детали которого до сих пор недостаточно исследованы, поэтому для инженерных расчетов неизбежно использование упрощенной модели разряда молнии, в которой лидер отрицательного разряда рассматривается как канал, заполненный отрицательными зарядами.

Время прорастания лидера от облака до поверхности земли составляет несколько миллисекунд. Как показывают фотографические наблюдения (фоторазвертки), лидер прорастает не равномерно, а скачками или ступенями. Средняя скорость прорастания лидера оценивается значениями, близкими к 0,0005 скорости света, а во время скачка к земле направление прорастания лидера определяется картиной электрического поля вблизи его головки, в частности, скоплениями объемных зарядов, создаваемых заряженными водяными каплями в пространстве между облаком и землей, поэтому лидер молнии обычно прорастает по искривленному пути, имеющему многочисленные изломы и разветвления. По мере того, как отрицательно заряженный канал лидера приближается к поверхности земли, напряженность электрического поля между ним и землей растет. На земле и наземных объектах накапливаются заряды противоположной (положительной) полярности, индуктированные зарядом лидера, и напряженность электрического поля на отдельных точках поверхности земли, в особенности на возвышающихся объектах, достигает критического значения, при этом на наземных объектах (на опорах, тросах и проводах ВЛ) возникают положительные стримеры, а затем развивается и встречный лидер.

В заключительной фазе разряда молнии происходит перекрытие промежутка между нисходящим и встречным лидерами. Таким образом, при определенной высоте лидера над землей проявляется ориентация разряда молнии на тот или иной наземный объект. Предполагается, что ориентировка лидера происходит, когда средняя напряженность в промежутке между головкой лидера и наземными объектами достигнет 500 кВ/м.

Перекрытие воздушного промежутка между головкой лидера и наземным объектом является переходом от первой (лидерной) стадии к главной стадии разряда молнии, в которой происходит компенсация отрицательного заряда лидера положительными зарядами, притекающими из земли, при этом через пораженный

молнией объект протекает ток, который и представляет собой “ток молнии”. Процесс нейтрализации отрицательного заряда распространяется вверх по лидеру, образуя ярко светящийся канал главного разряда, прорастающий от земли к облаку со скоростью порядка десятых долей скорости света. 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 свыше 200 кА, и до 20–30 м — для ударов с токами 15–20 кА.

При отрицательном ударе молнии вслед за главным разрядом обычно наблюдаются повторные разряды по тому же каналу. Повторные разряды вызваны тем, что нейтрализация зарядов канала приводит к разрядам соседних заряженных областей облака на канал и через него в землю. Типичная осциллограмма многократного разряда изображена на рис. 6.1. В отдельных случаях наблюдалось до тридцати и более повторных разрядов в одном ударе молнии, однако 50% ударов содержит не более двух-трех импульсов. На рис. 6.2 показано распределение числа составляющих N_n в многократном разряде. Общая продолжительность многократного разряда может достигать 1 с, как на рис. 6.1, но такие затяжные удары являются редким явлением. Большая часть ударов имеет длительность не более 0,3 с.

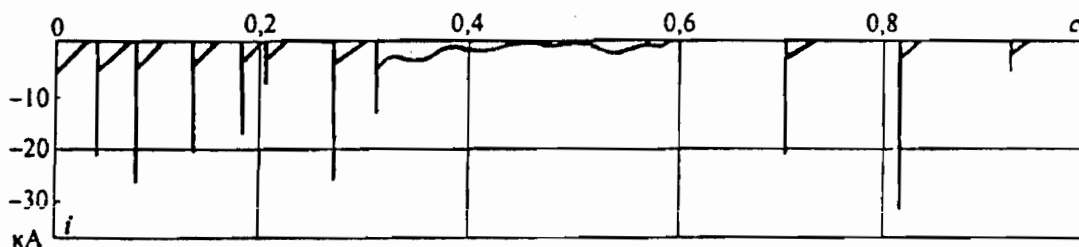


Рис. 6.1. Типичная осциллограмма тока многократного разряда молнии отрицательной полярности (медленная развертка)

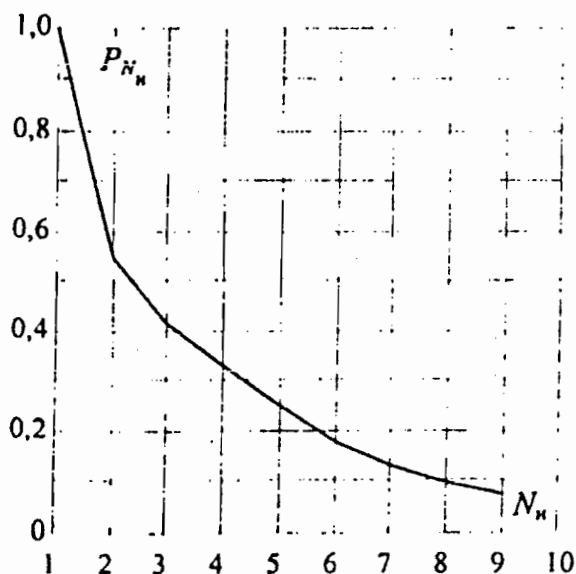


Рис. 6.2. Распределение числа импульсов в многократном разряде молнии (6000 регистраций)

Характерные осциллограммы импульсов тока первой (1) и последующих (2) составляющих многократного разряда показаны на рис. 6.3 в двух масштабах времени. Форма импульса первой составляющей имеет следующие особенности: ток в начальной стадии нарастает относительно медленно; 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. 6.3,б, кривая 1).

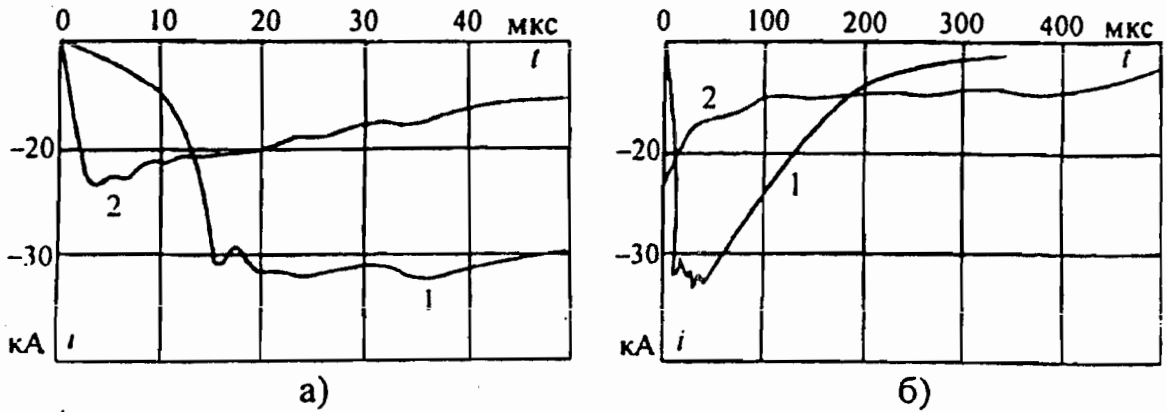


Рис. 6.3. Типичные осциллограммы импульса тока первой (1) и последующих (2) составляющих многократного разряда молнии отрицательной полярности в разных масштабах времени (а, б)

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.

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 грозозащиты ВЛ и ПС.

6.2. Количественные характеристики разряда молнии

6.2.1. Параметры разряда молнии, используемые в расчетах грозозащиты ВЛ и ПС, и информация об их количественных характеристиках дана в табл. 6.1.

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.

Параметры разряда молнии, используемые в расчетах грозозащиты ВЛ и ПС

Параметр		Количественные характеристики
Полярность разряда		С вероятностью 0,9 отрицательная
Многокомпонентность		Статистическое распределение числа импульсов в разрядах по рис. 6.2
Для первой и последующих составляющих	Форма импульсов	Обобщенная форма импульсов дана на рис. 6.4, расчетная (п. 6.2.3)
	Длительность импульса и длительность фронта	Статистические распределения (п. 6.2.2)
	Амплитуда и крутизна тока	
	Корреляция между амплитудой и крутизной тока	В расчетах грозозащиты амплитуда и крутизна тока приняты взаимонезависимыми (п. 6.2.4)
Скорость распространения главного разряда		Принята 0,3 скорости света (п. 6.2.5)
Эквивалентное сопротивление канала молнии		Учитывается зависимость от амплитуды тока молнии (п. 6.2.6)

Грозозащита ПС должна рассчитываться с обязательным учетом первых и последующих импульсов многократного разряд молнии.

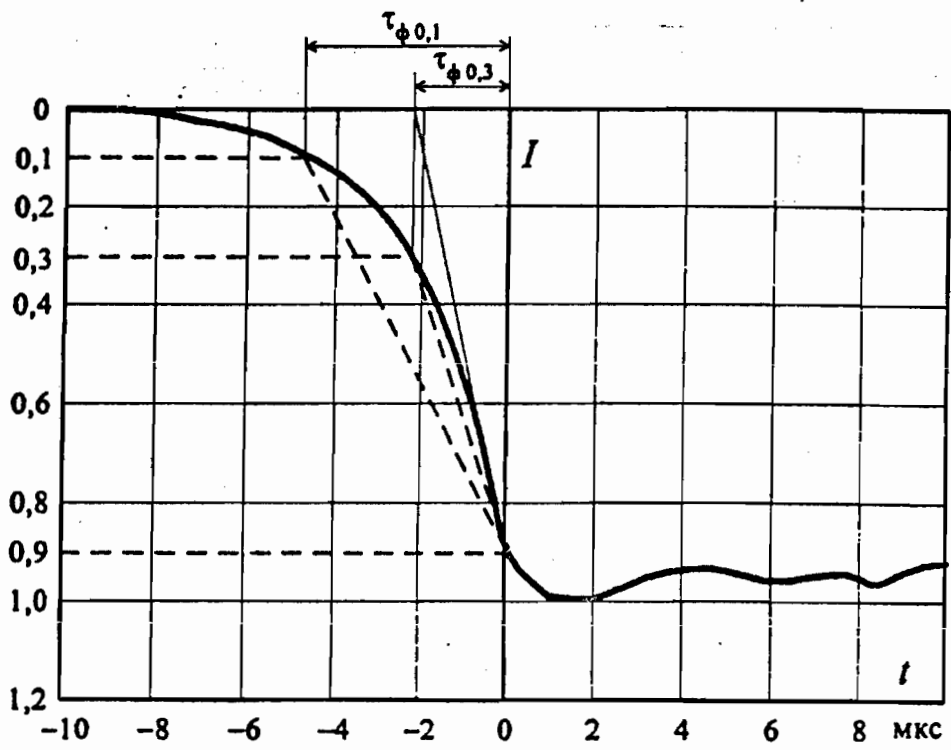
6.2.2. В результате обработки осциллограмм, многократного разряда молнии получены статистические распределения, описанные логарифмически нормальным законом, для следующих параметров первого и последующих импульсов:

- амплитуда тока I ;
- крутизна тока на фронте: на участке $(0,1-0,9)I$ — $A_{0,1}$;
на участке $(0,3-0,9)I$ — $A_{0,3}$;
максимальная — A_{max} ;
- длительность спада импульса тока до значения $0,5I$ — τ_n ;
- длительность фронта: на участке $(0,1-0,9)I$ — $\tau_{\Phi 0,1}$;
на участке $(0,3-0,9)I$ — $\tau_{\Phi 0,3}$.

Характеристики логарифмически нормальных распределений параметров разряда молнии (математическое ожидание I и коэффициент изменчивости σ_{lgI}), значения параметров, превышение которых возможно с вероятностью 0,95; 0,5 и 0,05, а также наибольшие зарегистрированные их значения приведены в табл. 6.2.

Для амплитуды тока первых импульсов приведены три варианта распределений (рис. 6.5), полученные по результатам полевых исследований в разных странах:

- рекомендация Исследовательского комитета № 33 СИГРЭ – обобщенное распределение по результатам измерений преимущественно на башнях;
- два распределения, обобщающие измерения токов на воздушных линиях, разница высот которых составляет примерно 20 м.



б)

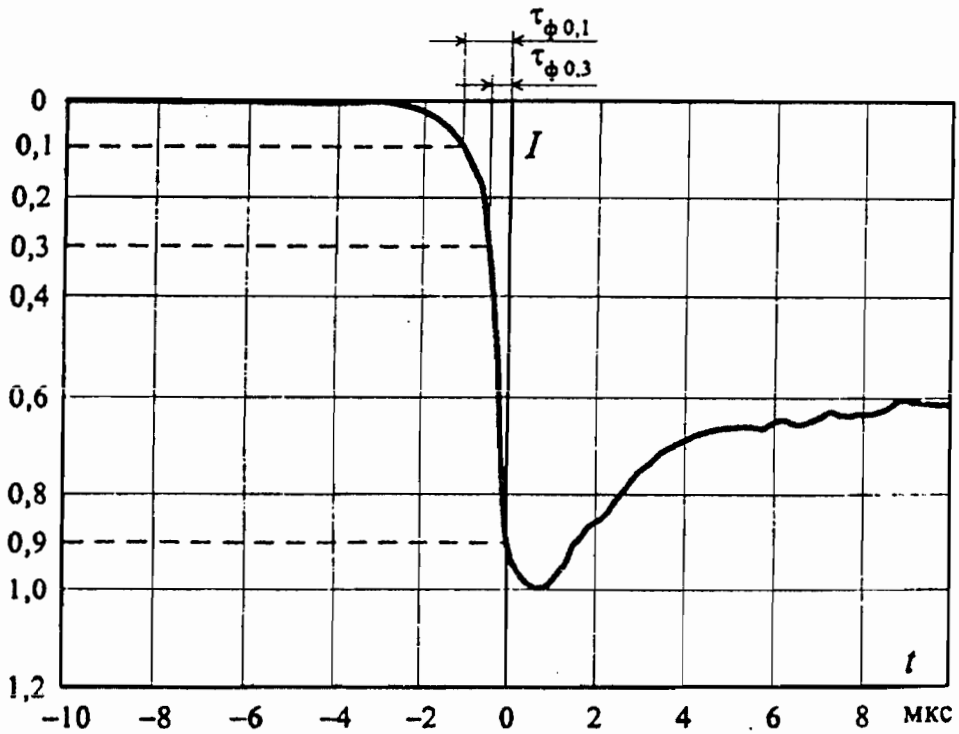


Рис. 6.4. Среднестатистическая форма импульсов многократного разряда молнии:
 а) первый импульс;
 б) последующие импульсы

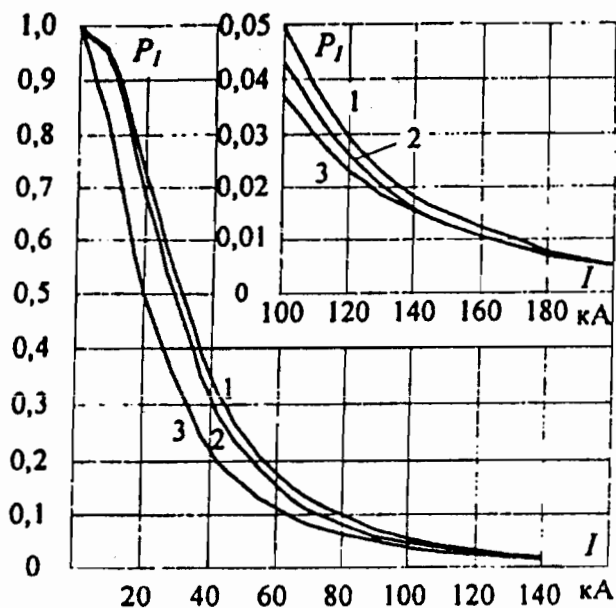


Рис. 6.5. Распределение амплитуды тока первых импульсов многократного разряда молнии:

- 1 – обобщенное распределение по результатам измерений преимущественно на башнях (рекомендация Исследовательского комитета № 33 СИГРЭ);
- 2 – по измерениям на ВЛ ($h_{\text{оп}}$ до 45 м);
- 3 – по измерениям на ВЛ ($h_{\text{оп}}$ до 20 м)

Для расчета грозоупорности ВЛ предпочтительнее использовать распределения токов молнии, полученные по регистрациям на ВЛ. Параметры логарифмически нормального закона в зависимости от высоты опор $h_{\text{оп}}$ выбираются следующим образом:

$$\text{при } h_{\text{оп}} \leq 20 \text{ м} \quad \bar{I} = 20 \text{ кА}, \quad (6.1)$$

$$\sigma_{\lg I} = 0,39, \quad (6.2)$$

$$\text{при } h_{\text{оп}} > 20 \text{ м} \quad \bar{I} = 20 + 0,32(h_{\text{оп}} - 20) \text{ кА}, \quad (6.3)$$

$$\sigma_{\lg I} = 0,39 - 0,0028(h_{\text{оп}} - 20). \quad (6.4)$$

Вероятность амплитуды тока молнии, превышающей I_i , рассчитывается с использованием полученных параметров по формуле:

$$P_{I_i} = 1 - \frac{\lg e}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\lg I}} \int_{I_{\min}}^{I_i} \frac{1}{I} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\lg I - \lg \bar{I}}{\sigma_{\lg I}} \right)^2 \right] dI, \quad (6.5)$$

где \bar{I} – значение амплитуды тока молнии, вероятность превышения которой равна 0,5.

6.2.3. 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 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. Расчетный импульс должен быть близок

Таблица 6.2

Характеристики логарифмически нормальных распределений параметров многократного разряда молнии

Наименование параметра	Характеристики распределения		Значение параметра, превышение которого возможно с вероятностью		Наибольшее зарегистрированное значение
	\bar{T}	$\sigma_{lg I}$	0,95	0,5	
Амплитуда тока молнии, кА (по данным обработки измерений на объектах разных типов)	СИГРЭ (башни)	0,32	8,9	30,0	250
	ВНИИЭ (ВЛ, $h_{оп} = 25 - 45$ м)	0,32	8,3	28,0	250
Длительность импульса τ_n , мкс	НИИИПТ (ВЛ, $h_{оп} = 13 - 20$ м)	0,39	4,6	20,0	250
	$A_{0,1}$	0,25	30,0	75,0	250
	$A_{0,3}$	0,28	1,7	5,0	15,0
Крутизна тока, кА/мкс	A_{max}	0,27	2,6	7,2	18,0
	$\tau_{\Phi_{0,1}}$	0,26	9,1	24,3	72,0
Длительность фронта, мкс	$\tau_{\Phi_{0,1}}$	0,25	1,8	4,5	30,0
	$\tau_{\Phi_{0,3}}$	0,24	0,9	2,3	9,0
Амплитуда тока молнии I, кА		0,23	4,9	11,8	35,0
	Длительность импульса τ_n , мкс	0,40	6,5	32,0	170
Крутизна тока, кА/мкс	$A_{0,1}$	0,41	3,3	15,4	300
	$A_{0,3}$	0,42	4,1	20,1	300
	A_{max}	0,37	9,9	39,9	300
Длительность фронта, мкс	$\tau_{\Phi_{0,1}}$	0,40	0,1	0,6	5,2
	$\tau_{\Phi_{0,3}}$	0,44	0,1	0,4	3,8

Первый импульс

Последующие импульсы

к реальному на участке выше 0,5 I. Этому условию удовлетворяет импульс с косугольным фронтом, проходящим через значение 0,9 I и абсциссу, соответствующую значению 0,3 I (см. рис. 6.4). Параметры логарифмически нормального распределения крутизны тока молнии принятого расчетного импульса оцениваются следующими значениями:

$$\text{для первого импульса} \quad \bar{A}_1 = 10,8 \text{ кА/мкс}; \quad \sigma_{lg A_1} = 0,265; \quad (6.6)$$

$$\text{для последующих импульсов} \quad \bar{A}_2 = 30,2 \text{ кА/мкс}; \quad \sigma_{lg A_2} = 0,4. \quad (6.7)$$

Для этого вида воздействия на основании обработки разрядных характеристик изоляции на нестандартных волнах получены необходимые для расчета и соответствующие типу импульсного воздействия вольт-секундные характеристики изоляции для случаев перекрытия на фронте импульса с τ_ϕ до 10 мкс.

6.2.4. Связь между амплитудой и крутизной тока молнии характеризуется значениями коэффициентов корреляции, приведенными в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Коэффициенты корреляции между амплитудой I и различными значениями крутизны A на фронте волны тока молнии

Коррелируемые параметры	Крутизна тока на фронте		
	$A_{0,1}$	$A_{0,3}$	A_{max}
Амплитуда тока I: первого импульса	0,30	0,19	0,43
последующих импульсов	0,31	0,23	0,56

На рис.6.6 представлено корреляционное поле амплитуды и максимальной крутизны A_{max} для первой составляющей разряда. Для амплитуды и крутизны $A_{0,1}$ (при меньшем коэффициенте корреляции) корреляционное поле характеризуется еще большим разбросом точек, поэтому в расчетах грозозащиты амплитуда и крутизна тока молнии для первых и последующих импульсов приняты взаимно независимыми.

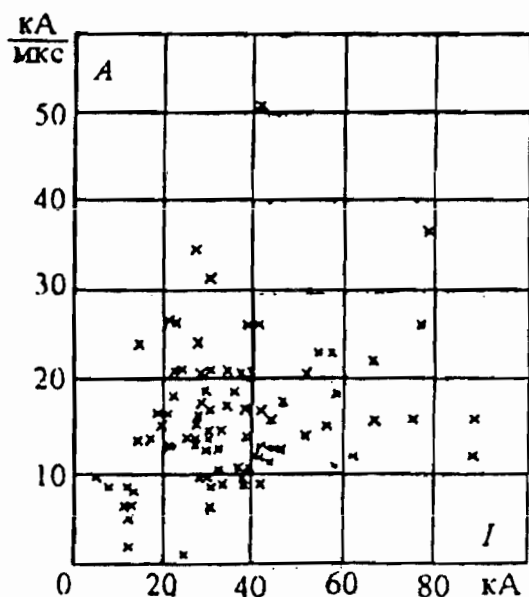
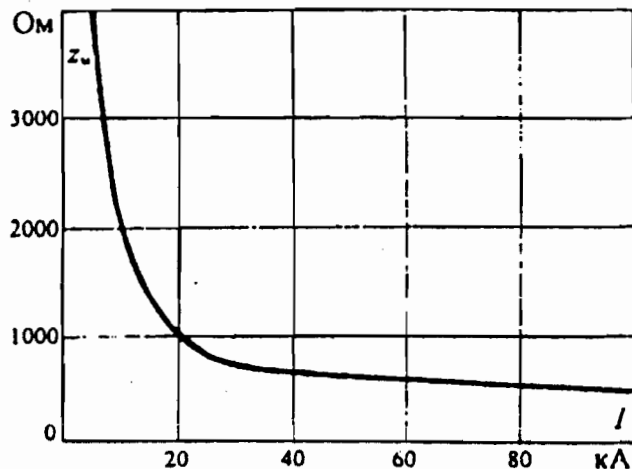


Рис. 6.6. Корреляционное поле амплитуды и максимальной крутизны фронта тока для первой составляющей разряда молнии

6.2.5. Скорость распространения главного разряда молнии v зависит от амплитуды тока и изменяется во времени по мере развития канала. Значение v лежит в пределах (0,1–0,5) c , где c – скорость света. При одинаковой амплитуде тока молнии скорость распространения главного разряда последующих импульсов больше, чем первого импульса. С учетом того, что амплитуда последующих импульсов обычно меньше, для всех импульсов многократного разряда принимается одинаковое расчетное значение $v = 0,3 c$.

6.2.6. Сопротивление канала молнии на стадии главного разряда не остается постоянным, уменьшаясь по мере возрастания протекающего тока. Этот параметр характеризуется некоторым эквивалентным значением z_m и зависит от амплитуды тока молнии (рис. 6.7).

Рис. 6.7. Зависимость эквивалентного сопротивления канала от тока молнии



Расчетное значение сопротивления канала молнии влияет на амплитуду тока, протекающего через пораженный объект $I_{об}$. Расчет $I_{об}$ выполняют по следующей формуле:

$$I_{об} = I_{R=0} \cdot \frac{z_m}{z_m + z_{кв}} \quad (6.8)$$

где $I_{R=0}$ – амплитуда тока молнии, протекающего через хорошо заземленный объект; $z_{кв}$ – эквивалентное сопротивление пораженного объекта. Например, при ударе молнии в провод $z_{кв} = z_{пр}/2$.

В большинстве расчетных случаев z_m принимается равным бесконечности, при этом $I_{об} = I_{R=0}$, что соответствует представлению о канале молнии как источнике заданного тока. Расчет показателей грозоупорности ВЛ при $z_m = \infty$ дает небольшой запас при расчете числа грозовых отключений от прорывов молнии на провода. Уточнение значения z_m в соответствии с рис. 6.7 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.

6.3. Интенсивность грозовой деятельности

6.3.1. Наиболее информативной для расчета грозопоражаемости энергетических объектов характеристикой является плотность разрядов молнии на землю ρ_0 , наблюдаемая с помощью счетчиков разрядов молнии в течение длительного срока. Накопленный статистический материал по инструментальным измерениям числа разрядов в большинстве случаев пока еще недостаточен для построения региональных карт плотности наземных разрядов, поэтому ρ_0 приходится оценивать косвенно через другие многолетние характеристики грозовой деятельности: число грозовых дней и продолжительность грозовой деятельности в часах за год.

6.3.2. Число грозовых дней $N_{гд}$ (в зарубежной литературе – изокераунический уровень T) – наиболее распространенный и длительно наблюдаемый во многих странах показатель грозовой активности. Имеющиеся ограниченные данные свидетельствуют о слабой корреляционной зависимости числа дней с грозой и плотности разрядов молнии на землю. При отсутствии других данных для равнинных территорий бывшего СССР ρ_0 может быть оценено через $N_{гд}$ по формуле

$$\rho_0 = 0,036 N_{гд}^{1,3} \quad (6.9)$$

где ρ_0 – плотность разрядов молний на 1 км² поверхности земли за год.

6.3.3. Продолжительность грозовой деятельности в часах наблюдается в ряде стран (30 лет и дольше), в том числе и на территории бывшего СССР. Отмечена корреляция ρ_0 и $N_{г.ч}$, описываемая для равнинных районов зависимостью

$$\rho_0 = 0,05 N_{г.ч}. \quad (6.10)$$

На рис. 6.8 представлена карта $N_{г.ч}$, разработанная по данным наблюдений за грозой на 1700 гидрометеостанциях (ГМС) на территории бывшего СССР. Эта карта, построенная в масштабе 1: 10 000 000, дает общее представление о распределении грозовой активности на большой территории.

В настоящее время появилась возможность для разработки более детальных региональных карт $N_{г.ч}$. На рис. 6.9,а в качестве примера представлена региональная карта $N_{г.ч}$ с интервалом между изолиниями 5 часов для Ленинградской области, разработанная в отделе прикладной климатологии Главной геофизической обсерватории (ГГО). Карта построена в масштабе 1 : 500 000 с привлечением данных наблюдений за грозой за 40–50-летний период по 140 гидрометеорологическим станциям и постам, расположенным на территории Ленинградской области и в пограничных районах. Для сравнения на рис. 6.9,б изображен фрагмент карты $N_{г.ч}$ по территории бывшего СССР для Ленинградской области.

6.3.4. В тех случаях, когда имеются данные только о числе дней с грозой $N_{г.д}$ (например, при сопоставлении опыта эксплуатации зарубежных и отечественных ВЛ), пересчет к числу грозовых часов производится по формуле

$$N_{г.ч} = 0,72 N_{г.д}^{1,3}. \quad (6.11)$$

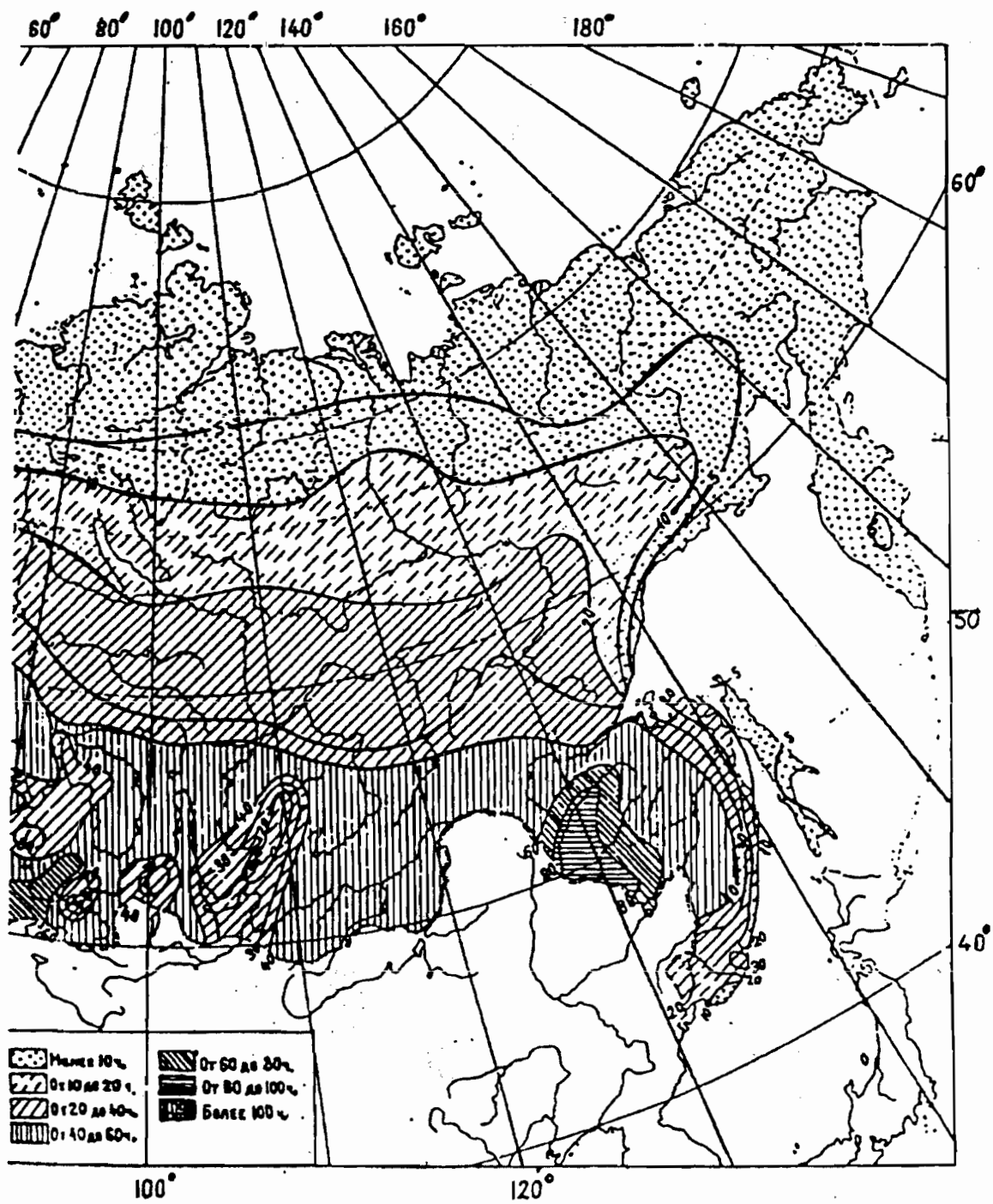
6.3.5. При проектировании и сопоставлении расчетных и эксплуатационных показателей грозоупорности ВЛ и ПС рекомендуется использовать данные наблюдений за грозой гидрометеостанций, наиболее близко расположенных к трассе ВЛ или территории ПС. В первом случае используется среднееголетнее число грозовых часов не менее чем за 30 лет, а во втором – фактическое число грозовых часов за каждый анализируемый год.

6.3.6. При оценке продолжительности гроз вдоль трассы ВЛ приходится считаться с неоднородностью сети ГМС и удаленностью отдельных ГМС от трассы на расстояние, превышающее радиус обнаружения грозы (порядка 15 км), т.е. условно относить отдельные участки трассы к зоне “охвата” ближайшей ГМС (см. Приложение 13, рис. П13.1).

В пределах практических зон “охвата” ГМС могут быть отдельные области, в которых интенсивность грозовой деятельности в силу местных условий заметно отличается от показателей, фиксируемых ближайшей ГМС. Правильная оценка интенсивности грозовой деятельности в таких случаях возможна только на основе специального анализа, учитывающего географические и климатические особенности местности, наличие крупных водоемов и рек. Такой анализ может оказаться полезным для выявления причин пониженной грозоупорности ВЛ.



Рис. 6.8. Карта годовой продолжительности гроз в часах для территории бывшего СССР



Продолжение рис. 6.8

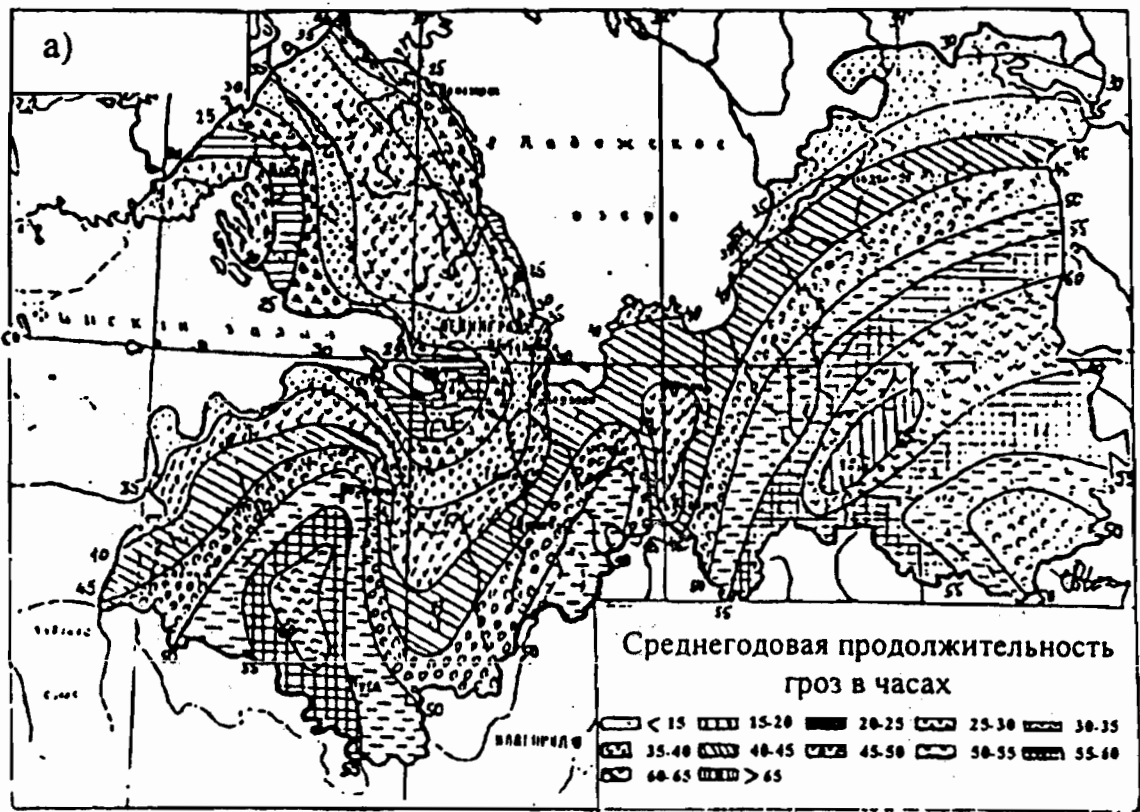


Рис. 6.9. Среднегодовая продолжительность гроз в часах ($N_{г}$) на территории Ленинградской области:
 а) региональная карта (разработана ГГО в масштабе 1:500 000);
 б) фрагмент карты из ПУЭ-1998 (разработана ВНИИЭ в масштабе 1:10 000 000)

6.4. Грозопоражаемость воздушных линий

6.4.1. Возвышаясь над окружающей местностью, ВЛ поражается разрядами, развивающимися непосредственно над ней, и "стягивает" боковые разряды.

Число "прямых" ударов в линию N_n 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 следующим образом:

$$N_n = p_0 L d_{тр-тр}, \quad (6.12)$$

где p_0 – плотность разрядов молнии на землю; L – длина линии; $d_{тр-тр}$ – расстояние между тросами (или проводами для бестросовой линии).

Вероятность поражения ВЛ боковым разрядом зависит от амплитуды тока молнии I , и высоты подвеса тросов и проводов. Чем больше I , и высота ВЛ, тем с большего расстояния разряд молнии ориентируется на ВЛ. В расчетах числа боковых ударов молнии N_b используется эквивалентная ширина полосы стягивания $R_{эк}$, пропорциональная средней высоте подвеса троса h_{cp} и вычисляемая по формуле:

$$N_b = 2 p_0 L R_{эк} = 2 p_0 L k_h h_{cp}. \quad (6.13)$$

С увеличением высоты поражаемого объекта значение $k_h = R_{эк} / h$ уменьшается. На рис. 6.10 показана зависимость k_h от h , полученная по результатам обобщения данных по поражаемости объектов (ВЛ и молниеотводов) различной высоты.

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

$$\text{при } h_{cp} \leq 30 \text{ м} \quad N = 0,2 p_0 \left(\frac{d_{тр-тр}}{2} + 5h_{cp} - \frac{2h_{cp}^2}{30} \right); \quad (6.14)$$

$$\text{при } h_{cp} > 30 \text{ м} \quad N = 0,15 p_0 \left(\frac{d_{тр-тр}}{2} + h_{cp} + 90 \right), \quad (6.15)$$

где p_0 – плотность разрядов молнии на землю определяется по рекомендациям подраздела 6.3; $d_{тр-тр}$ – расстояние между тросами (или проводами на бестросовой линии), м. Для ВЛ с одним тросом $d_{тр-тр} = 0$; h_{cp} – средняя высота подвеса троса или провода, м; рассчитывается по рекомендациям Приложения 16 (п. 16.2).

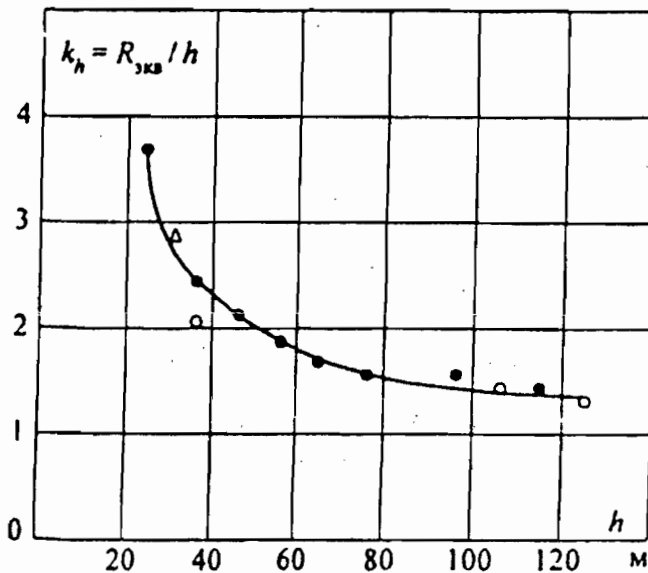


Рис. 6.10. Зависимость отношения ширины полосы, с которой ВЛ собирает боковые разряды молний с одной стороны от ВЛ ($R_{эк}$), к высоте опор по данным полских исследований:
 • бывшая Чехословакия;
 о Польша;
 Δ Украина

РАЗДЕЛ 7. ПОКАЗАТЕЛИ ГРОЗОУПОРНОСТИ И СРЕДСТВА ГРОЗОЗАЩИТЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

Показателем грозоупорности ВЛ является число ее грозовых отключений. В проектной и эксплуатационной практике, в зависимости от рассматриваемой задачи, могут использоваться:

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

- абсолютное число грозовых отключений N_r , рассчитанное на фактическую длину ВЛ (L) и фактическую интенсивность грозовой деятельности, т.е. число грозовых отключений за анализируемый период, отнесенное к продолжительности этого периода в годах. Этот показатель необходим, например, при выборе средств грозозащиты или при сопоставлении расчетных и эксплуатационных показателей грозоупорности.

7.1. Влияние конструктивных параметров ВЛ на показатели ее грозоупорности

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

7.1.1. На ВЛ, защищенной тросом, возможны грозовые отключения от ударов в опору ($n_{он}$), трос ($n_{тр}$) и прорыва молнии на провода ($n_{пр}$). При ударе в опору возникают обратные перекрытия линейной изоляции из-за перенапряжений, возникающих при протекании тока молнии по опоре. По последствиям для изоляции к этой категории относятся и удары в прилегающие к опоре участки троса. При ударе молнии в трос в средней части пролета возникают перенапряжения на воздушном промежутке трос-провод и, после пробега по пролету и стекании тока молнии по опоре, на линейной изоляции. Расстояние между тросом и проводом в середине пролета по вертикали нормируется ПУЭ по условиям грозозащиты в зависимости от длины пролета (п.2.5.66): до и после прихода в точку удара волны перенапряжений, отраженной от опоры с противоположным знаком, напряжение на воздушном промежутке не должно достигать его пробивного значения, поэтому число грозовых отключений от ударов молнии в средней части пролета ($n_{тр}$) рассчитывается, как правило, по вероятности обратного перекрытия линейной изоляции на опоре. Оценка числа грозовых отключений от перекрытий воздушного промежутка при ударах в трос (n_s) может оказаться необходимой в некоторых специальных случаях: при отступлении от требований ПУЭ, при разработке новых конструкций опор и т.д. Алгоритм расчета n_s дан в Приложении 20 применительно к переходному пролету ВЛ. Методика расчета отдельных составляющих общего числа грозовых отключений ($n_{он}$, $n_{тр}$ и $n_{пр}$) приведена в Приложении 17.

7.1.2. 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 (15–35) 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.

7.1.3. Обратные перекрытия 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.

7.1.4. Вероятность прорыва молнии на провода зависит от числа и расположения тросов относительно проводов (угла защиты α и превышения троса над проводом Δh) и высоты опоры $h_{оп}$. Эффективность тросовой защиты от прорывов возрастает с уменьшением $h_{оп}$ и α и увеличением Δh . На ВЛ 500–1150 кВ вероятность прорыва молнии на провода может возрастать под влиянием рабочего напряжения проводов, способствующего возникновению и прорастанию встречного лидера.

7.1.5. 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.

7.1.6. 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 (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; 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).

7.1.7. Соотношение числа отключений из-за обратных перекрытий ($n_{он} + n_{тр}$) и прорывов $n_{пр}$ зависит от класса номинального напряжения U_n и конструкции ВЛ (типа опоры, числа и расположения тросов, сопротивления заземления). С ростом U_n и повышением импульсной прочности линейной изоляции повышается общая грозоупорность ВЛ и снижается доля отключений от обратных перекрытий.

7.2. Влияние природно-климатических условий и особенностей трассы на показатели грозоупорности ВЛ

7.2.1. 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 (удельное сопротивление, диэлектрическая проницаемость и пробивная электрическая прочность грунта).

В настоящее время объем накопленных регистраций амплитуд тока молнии I недостаточен для построения статистических распределений I для регионов с различными природно-климатическими условиями, поэтому в практических методиках расчета учтена только зависимость статистического распределения от высоты опор ВЛ. Учет региональных особенностей грунтов обычно производится на стадии проектирования ВЛ по материалам вертикального электродондирования.

7.2.2. На показатели грозоупорности могут влиять такие особенности трассы ВЛ, как 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 также за счет более благоприятного статистического распределения амплитуды тока молнии разрядов, поражающих ВЛ: опасные для линейной изоляции разряды с большими значениями I , ориентирующиеся на наземные объекты с больших высот, поражают преимущественно близко расположенные к ВЛ высокие объекты (здания городской застройки или лесной массив). Указанные обстоятельства могут быть причиной значительного расхождения расчетных и эксплуатационных показателей грозоупорности из-за невозможности учета в существующих методиках таких особенностей трассы ВЛ.

Например, по данным обработки опыта эксплуатации отношение числа грозовых отключений ВЛ 110–220 кВ, экранируемых лесом и идущих по открытой местности, характеризуется следующими значениями:

Опора:	ВЛ с тросом	ВЛ без троса
портальная	0,50	0,40
одностоечная одноцепная	0,70	0,60
одностоечная двухцепная	0,75	0,70

7.3. Эксплуатационные показатели грозоупорности ВЛ 110–750 кВ

В настоящее время опыт эксплуатации ВЛ 110–750 кВ характеризуется следующими удельными показателями по числу отключений (табл. 7.1): $n_{\text{общ}}$ – число отключений по всем причинам; n'_g – число грозовых отключений. Большой разброс эксплуатационных показателей грозоупорности ВЛ 110–330 кВ по регионам является следствием местных условий по уровню грозовой деятельности и характеристикам грунта, а также различий в конструкции опор.

Таблица 7.1

Эксплуатационные показатели ВЛ 110–750 кВ по отключениям
(на 100 км и 1 год эксплуатации)

Ур. кВ	Число отключений на 100 км и 1 год эксплуатации				Доля грозовых отключений, %	
	$n_{\text{общ}}$		n'_g		Пределы изменения	Средняя
	Пределы изменения	Среднее	Пределы изменения	Среднее		
110	3,5–14,4	9,0	0,33–2,3	1,0	4,5–22,5	12
220	1,3–5,8	3,0	0,03–1,2	0,45	1,2–30,0	15
330	0,4–3,0	2,0	0,10–0,66	0,20	4,3–51,1	10
500		0,6		0,08		15
750		0,24		0,07		30

7.4. Средства грозозащиты воздушных линий

В качестве основных средств грозозащиты ВЛ используются:

- подвеска заземленных тросов,
- снижение сопротивления заземления опор,
- повышение импульсной прочности линейной изоляции,
- защита отдельных опор и участков с ослабленной изоляцией,
- ограничители перенапряжений (ОПН).

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

7.4.1. Подвеска заземленных тросов позволяет уменьшить в сотни раз число ударов молнии непосредственно в провода, представляющих наибольшую опасность для изоляции ВЛ: в этом случае гирлянды ВЛ 110–1150 кВ перекрываются при небольших токах молнии (от нескольких килоампер до 30 кА).

Расположение тросов относительно проводов должно обеспечить наибольшую эффективность тросовой защиты при преобладающем для данной ВЛ типе

* За исключением некоторых ВЛ 330 кВ, опыт эксплуатации относится к ВЛ, проходящим в районах с хорошими грунтами.

грозовых отключений (прорывы или обратные перекрытия, см. п.7.1.7). В первом случае снижение вероятности прорыва достигается уменьшением угла защиты троса (тросов), в том числе подвеской тросов с отрицательным углом защиты, и увеличением расстояния между тросом и проводом по вертикали. Во втором случае вероятность обратного перекрытия уменьшается при увеличении числа тросов, разнесении их на большее расстояние, в том числе при подвеске части тросов под проводами. Перечисленные мероприятия способствуют уменьшению импульсного тока через опору и усиливают электростатическое экранирование проводов тросами.

7.4.2. 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 (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 только комбинированные деревянные опоры (с грозозащитным тросом – одним или двумя, стальными траверсами, железобетонными фундаментами и стальным заземляющим спуском – разработка НИИПТ); у ВЛ с такими опорами грозоупорность и надежность примерно те же, что у ВЛ со стальными и железобетонными опорами.

7.4.3. 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.

7.4.4. Для снижения потерь энергии от индуцированных 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.

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

7.4.6. 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.

7.4.7. 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.

7.4.8. 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.

грозовых отключений (прорывы или обратные перекрытия, см. п.7.1.7). В первом случае снижение вероятности прорыва достигается уменьшением угла защиты троса (тросов), в том числе подвеской тросов с отрицательным углом защиты, и увеличением расстояния между тросом и проводом по вертикали. Во втором случае вероятность обратного перекрытия уменьшается при увеличении числа тросов, разнесении их на большее расстояние, в том числе при подвеске части тросов под проводами. Перечисленные мероприятия способствуют уменьшению импульсного тока через опору и усиливают электростатическое экранирование проводов тросами.

7.4.2. 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 (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 только комбинированные деревянные опоры (с грозозащитным тросом – одним или двумя, стальными траверсами, железобетонными фундаментами и стальным заземляющим спуском – разработка НИИПТ); у ВЛ с такими опорами грозоупорность и надежность примерно те же, что у ВЛ со стальными и железобетонными опорами.

7.4.3. 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.

7.4.4. 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.

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

7.4.6. 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.

7.4.7. 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.

7.4.8. В обычных грунтах с удельным сопротивлением не более 100–300 Ом·м выполнение заземлений опор с достаточно низким сопротивлением не вызывает больших трудностей и их стоимость невысока. В сухих песчаных и скальных грунтах для этого приходится применять глубинные вертикальные заземлители, достигающие хорошо проводящих слоев грунта, или горизонтальные (лучевые) заземлители длиной до 60 м. Применение сплошных противовесов, проложенных в земле от опоры к опоре, часто неэкономично, так как даже в грунтах высокого удельного сопротивления большая часть импульсного тока стекает с противовеса в землю на участке 60–100 м от опоры. Прокладка параллельных лучей нецелесообразна из-за снижения коэффициента их использования вследствие взаимного экранирования. При применении двух лучей их следует направлять в противоположные стороны вдоль оси ВЛ. Электромагнитная связь между проводами ВЛ и лучами в земле не оказывает существенного влияния на эффективность заземлителя.

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

7.4.9. 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.

7.4.10. 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.

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

7.4.12. 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.

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

7.4.13. Грозозащита пересечений ВЛ между собой и с линиями электрифицированного транспорта и связи обеспечивается соблюдением нормированных расстояний по воздуху. Кроме того, на ВЛ с деревянными опорами и АПВ для ограничения амплитуды перенапряжений применялись разрядники или искровые промежутки, установленные на опорах, ограничивающих пролет пересечения. В настоящее время более удобны ОПН (см. п. 7.4.14).

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

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

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

РАЗДЕЛ 8. ВЫБОР СРЕДСТВ ГРОЗОЗАЩИТЫ ВЛ 110 КВ И ВЫШЕ

8.1. Оценка грозоупорности ВЛ 110–750 кВ по справочным кривым

8.1.1. В Приложении 23 представлены справочные кривые, построенные по результатам расчета на ЭВМ грозоупорности ВЛ 110–750 кВ на металлических и железобетонных опорах, вошедших в унификацию опор, разработанную Институтом “Энергосетьпроект” в течение 1968–1984 г.г., а также для типовых опор, разработанных после появления этой унификации и выпускаемых заводами. Схемы опор и необходимая для пользования справочными кривыми информация даны в табл. 8.1, в которой указаны: шифр опоры, выбранной в качестве расчетного варианта для данной конструкции опор (промежуточная без подставки); расчетная длина пролета $l_{пр,р}$, равная 0,89 среднего значения габаритного пролета; номер таблицы с информацией для расчета сопротивления заземления опор; номер рисунка с результатами расчета удельного числа грозовых отключений ВЛ на 100 км и 100 грозовых часов n_g . Расчеты выполнены по методике, изложенной в Приложениях 17 и 18, соответственно, для ВЛ с тросом и без троса.

8.1.2. Зависимости n_g от сопротивления заземления R_z (от 1 до 100 Ом) даны для трех конструкций изоляционных подвесок с длиной разрядного пути по гирлянде изоляторов $l_{разр}$ в пределах:

U_n , кВ	110	150	220	330	500	750
$l_{разр}$, м	1,0–1,3	1,3–1,5	1,8–2,2	2,7–3,2	3,2–4,7	5,1–7,0

В качестве базовых использованы изоляторы нормального исполнения типа ПС70Е и ПС120Б со строительной высотой $H_{ст} = 0,127$ м. Варианты $l_{разр} = n_{из} H_{ст}$, где $n_{из}$ – число изоляторов в гирлянде, выбраны по следующим условиям:

- 1) наименьшего допустимого ПУЭ-98 (п.2.5.14, табл. 2.5.19) изоляционного расстояния по воздуху от токоведущих до заземленных частей опоры;
- 2) по рекомендациям “Инструкции по выбору изоляции электроустановок” РД 34 51.101 для районов с I и II степенью загрязненности атмосферы;
- 3) после введения в гирлянды дополнительных изоляторов для обеспечения 25-летнего безремонтного периода эксплуатации линейной изоляции.

8.1.3. Удельное число грозовых отключений для ВЛ с тросом разделено на составляющие: от обратных перекрытий при ударе в опору и в трос $n_{об} + n_{тр}$; от прорывов на провод $n_{пр}$. В последнем случае расчетные зависимости представляют горизонтальные прямые.















Для ВЛ без троса приведены зависимости общего удельного числа грозовых отключений n_g от R_z и составляющей от прорывов молнии на провода $n_{пр}$.

Для ВЛ на двухцепных опорах кроме удельного числа грозовых отключений на две цепи приведено удельное число грозовых отключений одновременно двух цепей $n_{2ч}$ (без деления на составляющие).

В случаях совпадения $l_{разр}$ по этим условиям для получения серии кривых n_g длина $l_{разр}$ выбиралась по дополнительным соображениям (см. Приложение 23).

Расчеты $n_{об} + n_{пр}$ для справочных кривых выполнены при фиксированных значениях R_z , т.е. без учета влияния искробразования на значение сопротивления заземления и конечный результат расчета грозоупорности (n_g). Влияние этого фактора на показатели грозоупорности ВЛ 110–330 кВ различного конструктивного исполнения анализируется в Приложении 25.

Состав исходных данных для расчета показателей грозоупорности ВЛ 110–750 кВ на унифицированных и типовых опорах: шифр опоры (расчетная длина пролета), номер таблицы к расчету сопротивления типового заземлителя, номер рисунка справочных кривых удельного числа грозовых отключений

Класс напряжения, кВ	Стальные опоры						
							
110	П 110-5В (235 м) табл. П115.6, рис П123.1	-	П 110-2В (300 м) табл. П115.6, рис П123.2	-	-	-	-
150	П 150-1В (300 м) табл. П115.6, рис П123.5	-	П 150-2В (300 м) табл. П115.6, рис П123.6	-	-	-	-
220	П 220-3 (400 м) табл. П115.6, рис П123.10	П 220-3Г (400 м) табл. П115.6, рис П123.11	П 220-2 (365 м) табл. П115.6, рис П123.12	П 220-2Т (365 м) табл. П115.6, рис П123.13	П 220-5 (400 м) табл. П115.6, рис П123.14	-	-
330	П 330-3 (415 м) табл. П115.6, рис П123.19	П 330-3Т (415 м) табл. П115.6, рис П123.20	П 330-2 (345 м) табл. П115.6, рис П123.21	П 330-2Т (345 м) табл. П115.6, рис П123.22	-	П 330-9 (380 м) табл. П115.7, рис П123.23	-
500	-	-	-	-	-	ПБ-1 (395 м) табл. П115.7, рис П123.26	Р1 (360 м) табл. П115.8, рис П123.27
750	-	-	-	-	-	П11 750-1 (385 м) табл. П115.7, рис П123.21	-
Класс напряжения, кВ	Железобетонные опоры						
	Одноствоечные		Портальные				
			Одноцветные		Двухцветные		
							
110	ПБ 110-1 (255 м) табл. П115.9, рис П123.3	ПБ 110-2 (220 м) табл. П115.9, рис П123.4	-	-	-	-	-
150	ПБ 150-1 (205 м) табл. П115.9, рис П123.7	ПБ 150-2 (190 м) табл. П115.9, рис П123.8	ПСБ 150-1 (275 м) табл. П115.10, рис П123.9	-	-	-	-
220	ПБ 220-1 (235 м) табл. П115.9, рис П123.15	-	ПСБ 220-1 (275 м) табл. П115.10, рис П123.16	-	ПБ 220-4 (275 м) табл. П115.10, рис П123.17	ПБ 220-12 (345 м) табл. П115.10, рис П123.18	-
330	-	-	ПБ 330-7 (350 м) табл. П115.10, рис П123.24	-	-	-	ПБ 330-4 (230 м) табл. П115.10, рис П123.25
500	-	-	ПБ 500-5И (340 м) табл. П115.10, рис П123.28	ПБ 500-1 (300 м) табл. П115.11, рис П123.29	-	-	-
				ПБ 500-3 (365 м) табл. П115.11, рис П123.30	-	-	-
750	-	-	ПБ 750-3 (385 м) табл. П115.10, рис П123.32	-	-	-	-

8.1.4. Абсолютное число грозовых отключений ВЛ N_r , имеющей по трассе одинаковые конструктивные параметры (тип промежуточной опоры, число тросов, изоляцию), оценивается через удельное число грозовых отключений n_r по соответствующему типу опоры и классу напряжения рисунку справочных кривых с учетом фактической интенсивности грозовой деятельности ($N_{г,ч}$, см. Приложение 13) и длины ВЛ L по формуле

$$N_r = n_r \frac{N_{г,ч}}{100} \frac{L}{100}. \quad (8.1)$$

В качестве R_3 принимается среднее из измеренных (рассчитанных) значений сопротивления заземления опор на промышленной частоте на трассе.

Если среди гирлянд, используемых при разработке справочных кривых, нет гирлянды с $I_{разр.}$ равной длине разрядного пути гирлянд на анализируемой ВЛ, необходимо по трем значениям n_r для конкретного R_3 построить дополнительную зависимость n_r от $I_{разр.}$ по которой определить необходимое для формулы (8.1) значение n_r . Для быстрой оценки n_r возможна интерполяция внутри исходных справочных кривых.

8.1.5. Абсолютное число грозовых отключений неоднородной по трассе ВЛ (например, идущей участками на одноцепных и двухцепных опорах или имеющей участки без тросовой защиты и т.д.) определяется с привлечением удельных чисел отключений по нескольким рисункам справочных кривых через сумму абсолютных чисел грозовых отключений на отдельных участках ВЛ по формуле

$$N_r = 10^{-4} \sum_{i=1}^m n_{r,i} L_i N_{г,ч,i}, \quad (8.2)$$

8.1.6. Удельное число грозовых отключений одной цепи двухцепной ВЛ, необходимое для подстановки в формулу (8.1) или (8.2), вычисляются по формуле

$$n_{r,1ч} = n_r / 2 + n_{r,2ч}. \quad (8.3)$$

где n_r и $n_{r,2ч}$ — удельное число грозовых отключений двухцепной ВЛ и одновременно двух цепей соответственно.

8.1.7. При существенном различии в расположении тросов относительно проводов на опорах анализируемой ВЛ и соответствующего варианта справочных кривых (по углу защиты α и смещению троса относительно провода по вертикали и горизонтали) и особенно в случаях, когда число отключений от прорывов $n_{пр}$ близко или превышает число отключений от обратных перекрытий, следует рассчитать вероятность прорыва молнии на провода для двух вариантов взаимного расположения троса и провода. После этого удельное число отключений от прорыва молнии на провода анализируемой ВЛ определяется по формуле

$$n'_{пр} = n_{пр} \frac{P'_a}{P_a} \quad (8.4)$$

где $n_{пр}$ — удельное число грозовых отключений от прорывов молнии на провода по справочным кривым; P_a и P'_a — вероятность прорыва молнии на провода для ВЛ, используемой при разработке справочных кривых, и для анализируемой ВЛ, по формуле (П17.35).

Общее удельное число грозových отключений анализируемой ВЛ для подставки в формулу (8.1) или (8.2) вычисляются по формуле

$$n_r = (n_{он} + n_{тр}) + n'_{пр}. \quad (8.5)$$

8.1.8. При оценке числа отключений N_r действующих ВЛ учитываются особенности их трассы (например, прохождение ВЛ в одном коридоре с другими ВЛ или по лесному массиву). В этом случае полученное по формуле (8.1) значение N_r следует умножить на коэффициенты, рекомендованные в п.7.2.2.

8.2. Критерии выбора средств грозозащиты ВЛ 110 кВ и выше

8.2.1. Опыт эксплуатации (табл. 7.1) показывает, что грозových отключения ВЛ в среднем составляют 10–20% от общего числа автоматических отключений по всем причинам. С ростом класса номинального напряжения число грозových отключений уменьшается, но возрастает на фоне повышения общей надежности ВЛ доля грозových отключений.

8.2.2. При выборе комплекса средств грозозащиты необходимо учитывать их эффективность для повышения надежности ВЛ в целом в конкретных природно-климатических условиях (например, подвеска троса на сильно гололедных участках может приводить к снижению надежности ВЛ) и возможности технической реализации предлагаемых мероприятий (например, устройство заземлителей в скальных грунтах).

8.2.3. По совокупности природно-климатических условий, влияющих на грозоупорность ВЛ, и их ответственности, ВЛ разделяются на следующие категории.

А. ВЛ, проходящие в районах с умеренной грозовой деятельностью ($N_{г,ч} \leq 40$ грозových часов) и удовлетворительными характеристиками грунтов ($\rho \leq 1000$ Ом·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.

Б. ВЛ, проходящие в районах с повышенной грозовой активностью ($N_{г,ч} > 40$ грозových часов) или с высокими удельными сопротивлениями грунтов ($\rho > 1000$ Ом·м).

В. Особо ответственные ВЛ: межсистемные связи; незарезервированные источники питания; двухцепные ВЛ, используемые в качестве независимых источников питания; ВЛ, отходящие от АЭС, практически все ВЛ 500 и 750 кВ и т.д.

8.2.4. Общим ориентиром для выбора средств грозозащиты может быть учет эксплуатационных показателей надежности ВЛ, достигнутых в конкретном регионе: общего удельного числа автоматических отключений $n_{общ}$; доли грозových отключений β_r ; коэффициента успешности $k_{АПВ}$.

8.2.5. Практическим критерием для определения допустимого числа грозových отключений $N_{допг}$ и выбора средств грозозащиты ВЛ 110–330 кВ категорий А и Б является обеспечение готовности оборудования энергосистемы, а именно, соблюдение нормированной периодичности ремонта линейных выключателей. Методика расчета $N_{допг}$ по этому критерию дана ниже (подраздел 8.3).

8.2.6. Удельное число отключений ВЛ 110–330 кВ категории В должно быть, по крайней мере, вдвое меньше, чем других ВЛ в данном регионе. При отсутствии эксплуатационных показателей надежности по конкретному региону следует ориентироваться на усредненные значения общего числа автоматических отключений в табл. 7.1, введя в допустимое число отключений коэффициент запаса 0,5.

На ВЛ 110–330 кВ категории В должны быть реализованы все возможности по повышению их надежности и грозоупорности, в том числе и нетрадиционные (увеличение числа тросов, подвеска одного из них под проводами, усиление изоляции, установка ограничителей перенапряжений). Следует преимущественно

использовать опоры с двумя тросами. Выбор комплекса средств грозозащиты таких ВЛ должен проводиться, как правило, индивидуально путем многовариантных расчетов с применением справочных кривых (Приложение 23) или использованием программы расчета грозоупорности ВЛ для ЭВМ.

8.2.7. При выборе средств грозозащиты вновь сооружаемых ВЛ 500 и 750 кВ следует ориентироваться на достигнутые эксплуатационные показатели по удельному числу грозовых отключений (n'_r , в табл. 7.1) без введения коэффициента запаса: в используемых в настоящее время опорах для этих ВЛ реализованы практически все возможности по созданию ВЛ повышенной грозоупорности (что подтверждает и опыт эксплуатации). Дополнительные возможности повышения грозоупорности ВЛ 500 и 750 кВ могут появиться только при освоении опор с отрицательным углом защиты троса.

8.2.8. Улучшение тросовой защиты актуально и для ВЛ 1150 кВ. Ожидаемое число грозовых отключений ВЛ 1150 кВ в Северном Казахстане оценивается значением 0,4 на 100 км в год при работе на номинальном напряжении (при работе на пониженном до 500 кВ напряжении ВЛ 1150 кВ не должны отключаться). Объем опыта эксплуатации ВЛ 1150 кВ (с 1986 г. до 1995 г. включительно) составил 16,7 тыс.км·лет, в том числе при работе на номинальном напряжении 3 тыс.км·лет. За весь период эксплуатации ВЛ 1150 кВ отключались от грозы 21 раз. Основная причина отключений — прорывы молнии на провода в области анкерно-угловых опор. Повышение грозоупорности ВЛ 1150 кВ может быть обеспечено за счет использования промежуточных и анкерно-угловых опор с отрицательными углами защиты троса.

8.3. Допустимое число грозовых отключений ВЛ и выбор средств грозозащиты по критерию коммутационного ресурса линейных выключателей

8.3.1. Абсолютное допустимое число грозовых отключений ВЛ по условию полного исчерпания коммутационного ресурса выключателя в межремонтный период рассчитывается по формуле

$$N_{\text{доп } r} = N_0 \beta_r \frac{1}{T_{\text{п.р.}} (2 - k_{\text{АПВ}})} k_B. \quad (8.6)$$

где N_0 — допустимое без ремонта выключателя количество отключений номинального тока к.з. (по ГОСТ 687-78 с изменениями № 2, табл. 4); $T_{\text{п.р.}}$ — средний период планового ремонта выключателей, годы. При отсутствии уточняющих местных инструкций принимаются в соответствии с ПТЭ следующие значения $T_{\text{п.р.}}$ для разных типов выключателей: масляных 6–8, воздушных 4–6, элегазовых 12 лет; β_r — отношение числа грозовых отключений к общему числу автоматических отключений. При отсутствии соответствующих данных по опыту эксплуатации ВЛ в рассматриваемом регионе используются следующие усредненные показатели:

U_n , кВ	110	150	220	330	500
β_r	0,10	0,11	0,13	0,15	0,25

$k_{\text{АПВ}}$ — коэффициент успешности АПВ при грозовых отключениях (по опыту эксплуатации ВЛ 110–550 кВ $k_{\text{АПВ}} = (0,6 \div 0,8)$); k_B — коэффициент, учитывающий условия эксплуатации выключателя: длину ВЛ, значение тока к.з. в ближайшей к шинам подстанции точке ВЛ и изменение коммутационного ресурса выключателя при удалении точки к.з. от шин подстанции. Значения коэффициента для трех типов выключателей ВЛ 110–500 кВ, двух совокупностей значений токов к.з. в ближайшей к шинам подстанции точке на ВЛ — $I_{\text{к.з.}}$, равному нормируемому

ГОСТ 687-78 току отключения к.з. – I_0 (15; 20; 31.5; 40; 50; 63 кА), а также для $I_{кз} = 0.5 I_0$ представлены в Приложении 28 сериями зависимостей коэффициента k_B от длины ВЛ (рис. П28.1–П28.4).

8.3.2. Практически выбор комплекса средств грозозащиты, обеспечивающий допустимое по коммутационному ресурсу выключателя число грозовых отключений, определенное по формуле (8.6), для ВЛ длиной L , проходящей в районе с интенсивностью грозовой деятельности $N_{г,ч}$, сводится к определению предельно допустимого значения сопротивления заземления R_3 , так как в большинстве случаев конструкция опоры и, следовательно, количество и расположение тросов выбираются по другим соображениям.

Значение R_3 может быть определено с использованием справочных кривых Приложения 23 после перехода от абсолютного допустимого числа грозовых отключений $N_{доп,г}$ к предельному значению удельного числа грозовых отключений^{*)} $n_{г,пред}$ (на 100 км и 100 грозовых часов) по формуле

$$n_{г,пред} = N_{доп,г} \frac{10^4}{N_{г,ч} L} \quad (8.7)$$

В Приложении 26 описана процедура определения предельного допустимого значения R_3 применительно к ВЛ на одноцепных и двухцепных опорах.

8.3.3. Результаты определения R_3 для унифицированных и типовых опор ВЛ 110–330 кВ (в соответствии с номенклатурой табл. 8.1) приведены в Приложении 24. В расчетах варьировались следующие природно-климатические, конструктивные и эксплуатационные характеристики ВЛ:

- тип выключателя: воздушный ($I_0 = 31,5$ кА, $T_{нр} = 6$, $N_0 = 8$);
масляный ($I_0 = 20,0$ кА, $T_{нр} = 8$, $N_0 = 5$);
- ток к.з. в ближайшей к подстанции точке ВЛ: $I_{кз} = I_0$ и $I_{кз} = 0,5 I_0$;
- длина ВЛ – три значения в пределах длины, характерных для ВЛ 110–330 кВ:

U_n , кВ	L , км (расчетные значения)
110	20; 50; 100
150	20; 100; 160
220	40; 100; 200
330	60; 100; 300

- интенсивность грозовой деятельности: $N_{г,ч} = 20$; 40 и 80 грозовых часов;
- число изоляторов в гирлянде: по рекомендациям “Инструкции по выбору изоляции электроустановок” РД 34.51.101 для районов с I и II степенью загрязнения; с увеличенным числом изоляторов.

Коэффициент успешности АПВ принят одинаковым, $k_{АПВ} = 0,8$.

Предельное значение R_3 меняется в зависимости от $N_{доп,г}$ и уровня грозовой деятельности. Требования к R_3 ужесточаются при использовании выключателей, допускающих меньшее число отключений токов к.з., при больших токах к.з. на шинах ПС, для ВЛ на металлических башенных опорах, в том числе с одним тросом, с ростом $N_{г,ч}$ и увеличением длины ВЛ. Однако существует много вариантов сочетаний природно-климатических и эксплуатационных условий, допускающих значения R_3 большие, чем регламентируемые в настоящее время ПУЭ^{**}. Усиление изоляции позволяет ослабить требования к R_3 , что может быть использовано как альтернативное средство грозозащиты на ВЛ 110–150 кВ и при трудностях устройства заземлителей.

* Справочные кривые построены для удельного числа грозовых отключений на 100 км и 100 грозовых часов.

** В ПУЭ-1998 (п. 2.5.75) требования к R_3 определяются удельным сопротивлением грунта.

8.4. Определение области рационального использования унифицированных и типовых опор для ВЛ 110-330 кВ различных категорий по грозозащите

Различие в числе грозовых отключений ВЛ 110-330 кВ, выполненных на опорах различной конструкции, но имеющих одинаковое сопротивление заземления в пределах (10-30) Ом, характеризуется следующими значениями кратностей по отношению к наименьшему n , в каждом классе номинального напряжения ВЛ (Приложение 24):

U_n , кВ	110	150	220	330
Различие в n , кратность, число раз	1,5-2	2-3	3,5-6	3-4

Для каждой конструкции опор ВЛ 110-330 кВ существуют сочетания природно-климатических и эксплуатационных условий, при которых требуемые показатели грозоупорности могут быть обеспечены с наименьшими затратами на сооружение заземляющих устройств.

При определении границ рационального использования опор при сооружении ВЛ 110-330 кВ различных категорий по грозозащите необходимо исходить из следующего:

- опора может использоваться для сооружения ВЛ 110-330 кВ категории А ($N_{гч} \leq 40$ грозовых часов и обычные грунты), если предельное значение $R_3 \geq 9$ Ом;
- ВЛ категории Б разделяются на две или три группы: умеренная грозовая деятельность и плохие грунты; повышенная грозовая активность и обычные грунты; повышенная грозовая активность и плохие грунты. В количественных показателях это выражается следующим образом:

Номер группы	$N_{гч}$, ч	Предельное значение R_3 , Ом
1	≤ 40	≥ 30
2	> 40	≥ 9
3	> 40	≥ 30

- во всех случаях предельное значение R_3 представляет среднее значение сопротивления заземления опор на трассе ВЛ.

В Приложении 27 по материалам табл. П26.1-П26.4 Приложения 26 представлены области применения унифицированных и типовых опор (табл. 8.1) для ВЛ 110-330 кВ категорий А и Б по грозозащите. Варианты по природно-климатическим, конструктивным и эксплуатационным характеристикам ВЛ те же, что в п.8.3.3. Границы областей даны значениями $N_{гч}$, наибольшей возможной длиной ВЛ в конкретных условиях и допустимыми значениями R_3 для наименьшей рассматриваемой и наибольшей возможной длины ВЛ.

Например, одноцепную башенную опору ВЛ 220 кВ с одним тросом рекомендуется использовать в следующих случаях (табл. П27.2).

Линейная изоляция 15ИIC70E**

Л и н е й н ы й в ы к л ю ч а т е л ь - в о з д у ш н ы й

$I_{кз} - I_0$.

При $N_{гч} \leq 20$ ч башенная опора с одним тросом может использоваться для сооружения ВЛ категории А во всем диапазоне длин от 40 до 200 км: на ВЛ длиной до 40 км можно допускать $R_3 \leq 13$ Ом; при $L = 200$ км только $R_3 \leq 9$ Ом.

* В зарубежной практике нормировано значение $R_3 = 8$ Ом.

** В соответствии с "Инструкцией по выбору изоляции электроустановок РД 34.51.101".

$$I_{кз} = 0,5 I_0.$$

При $N_{г,ч} \leq 20$ ч допустимы большие значения сопротивления заземления ($R_3 \leq 30$ Ом) и появляется возможность использовать опору при $20 \text{ ч} < N_{г,ч} \leq 40$ ч, если длина ее не превышает 75 км. В этом случае: при $L = 40$ км $R_3 \leq 14$ Ом, при $L = 75$ км $R_3 \leq 9$ Ом.

Л и н е й н ы й в ы к л ю ч а т е л ь - м а с л я н ы й

Опора может использоваться только при $I_{кз} = 0,5 I_0$ и при невысокой грозовой активности ($N_{г,ч} \leq 20$ ч) для ВЛ длиной до 50 км с $R_3 \leq 9$ Ом.

Линейная изоляция 17ПС70Е

Л и н е й н ы й в ы к л ю ч а т е л ь - в о з д у ш н ы й

$$I_{кз} = I_0.$$

Усиление изоляции позволяет повысить пределы по R_3 до (17-13) Ом при $N_{г,ч} \leq 20$ ч; появляется возможность использовать опору на коротких ВЛ (до 40 км) при $20 \text{ ч} < N_{г,ч} \leq 40$ ч;

$$I_{кз} = 0,5 I_0.$$

Допускается повышение R_3 до (36-20) Ом при $N_{г,ч} \leq 20$ ч, расширяется допустимая длина ВЛ до наибольшей (200 км) при $20 \text{ ч} < N_{г,ч} \leq 40$ ч при одновременном повышении предельных значений R_3 . Появляется область использования опор в районах с повышенной грозовой активностью и обычными грунтами (категория Б, группа 1): при $N_{г,ч} = 40$ ч L до 200 км, при $N_{г,ч} = 80$ ч L до 50 км, при R_3 , соответственно, (19-10) Ом и (10-9) Ом.

Л и н е й н ы й в ы к л ю ч а т е л ь - м а с л я н ы й

По-прежнему возможно использование башенной опоры с одним тросом только при $I_{кз} = 0,5 I_0$ и $N_{г,ч} \leq 20$ ч, но допустимая длина ВЛ увеличивается от 50 м до 130 м при одновременном повышении предельных значений R_3 от (10-9) Ом до (14-9) Ом

При подвеске двух тросов на одноцепной башенной опоре область ее применения значительно расширяется, в том числе и для ВЛ категории Б. При добавлении двух изоляторов в гирлянды опора с двумя тросами может использоваться в районах с плохими грунтами: при $N_{г,ч} \leq 20$ ч и длине ВЛ от 40 до 200 км среднее значение R_3 на линии может быть от 50 до 30 Ом.

Сооружение ВЛ в соответствии с рекомендациями Приложения 27 обеспечивает показатели грозоупорности ВЛ 110-330 кВ на уровне достигнутых в эксплуатации, так как допустимое число грозových отключений по критерию коммутационного ресурса выключателей $N_{допг}$, рассчитанное по формуле (8.6) для $L = 100$ км и реальных условий эксплуатации по типу и характеристикам выключателей, достаточно хорошо согласуется с удельным числом грозových отключений по опыту эксплуатации при фактической грозовой деятельности ($n'_г$), а именно:

U_n , кВ	110	220	330
$N_{допг}$ (по формуле (8.6))	0,39-1,64	0,34-1,44	0,21-1,17

$n'_г$ по опыту эксплуатации,

среднее (пределы изменения) 1,0 (0,33-2,3) 0,45 (0,03-1,2) 0,2 (0,10-0,66)

Предельные значения R_3 в Приложениях 26 и 27 не являются заниженными, так как они определялись из справочных кривых удельного числа грозových отключений n , (Приложение 28), рассчитанных без учета уменьшения сопротивления заземления за счет искрообразования в грунте при стекании тока молнии.

В перспективе, при широком внедрении элегазовых выключателей и накоплении опыта их эксплуатации может потребоваться пересмотр критериев выбора комплекса средств грозозащиты. При более высоком коммутационном ресурсе элегазовых выключателей надежность электроснабжения будет определяться готовностью других видов подстанционного оборудования, чувствительных к воздействию грозových перенапряжений и токов к.з. от них (например, силовых трансформаторов).

РАЗДЕЛ 9. ЗАЩИТА СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ 6-1150 КВ ОТ ГРОВОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

9.1. Общие положения

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

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

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

Защита ПС от набегающих с ВЛ волн 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_{nv} не будут превышены допустимые значения перенапряжений для наиболее ответственного и дорогостоящего оборудования (трансформаторов, автотрансформаторов, шунтирующих реакторов и т.д.). Показатель надежности грозозащиты ПС 35-1150 кВ от набегающих волн T_{nv} должен быть соответственно не менее 200-1500 лет.

9.2. Защита станций и подстанций от прямых ударов молнии

9.2.1. Для защиты подстанционного оборудования от прямых ударов молнии используется система молниеотводов. Требуемое количество и высота молниеотводов выбирается в соответствии с рекомендациями Приложения 29. При этом должны быть приняты меры по предотвращению обратных перекрытий с молниеотводов на токоведущие части РУ по воздуху и выноса высокого потенциала по земле.

Расчетное значение надежности защиты станций и ПС от прямых ударов молнии выбирают в зависимости от степени ответственности защищаемого объекта, от тяжести ущербов, возникающих при его поражении, интенсивности грозовой деятельности и пр. Наибольшая надежность грозозащиты должна обеспечиваться следующим объектам: ОРУ вместе с его шинными мостами и гибкими связями; зданиям машинного зала и ЗРУ; зданиям трансформаторной башни, масло-

хозяйства, нефтехозяйства, электролизной и ацетилено-генераторной станции; угледробилке, 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.

9.2.2. 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 грозозащиты 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

$$N_c = p_0 (a_c + 2 R_{\text{экв}}) (b_c + 2 R_{\text{экв}}) \cdot 10^{-6}, \quad (9.1)$$

где p_0 – плотность разрядов молнии на 1 км² земной поверхности (принимается по рекомендациям подраздела 6.3 (Часть 3); a_c , b_c , h_c – длина, ширина и высота сооружения, м; $R_{\text{экв}}$ – эквивалентная ширина, с которой сооружение собирает боковые разряды молнии, м:

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

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

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

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

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

9.2.4. Надежность защиты ОРУ станций и подстанций от прямых ударов молнии характеризуется числом случаев перекрытия изоляции при прорывах молнии через зону защиты молниеотводов и обратных перекрытий при ударах молнии в молниеотводы (для ОРУ 35–150 кВ) в год. Это число может быть определено по формуле

$$N_{п.у} = p_0 (a_T + 2 R_{зкв}) (b_T + 2 R_{зкв}) (\eta_{гр} P_\alpha P_{пр} + \eta_{оп} P_{оп}) \cdot 10^{-6}, \quad (9.2)$$

где a_T, b_T – длина и ширина территории ОРУ, м; $R_{зкв}$ и p_0 – как в формуле (9.1); $\eta_{гр}$, $\eta_{оп}$ – вероятность перехода импульсного перекрытия изоляции в силовую дугу, соответственно, при разрядах молнии в ОРУ, минуя молниеотводы, и при обратных перекрытиях (в расчетах принимается равной 0,9); P_α – вероятность грозового поражения ошиновки ОРУ, минуя молниеотводы (при использовании для выбора системы молниезащиты рекомендаций Приложения 29 указанная вероятность имеет значение 0,05 или 0,005); $P_{оп}$ – вероятность обратного перекрытия (может быть определена с помощью методов расчета обратных перекрытий, используемых для ВЛ); $P_{пр}$ – доля опасных грозовых перенапряжений, возникающих при непосредственном грозовом разряде в ошиновку ОРУ, минуя молниеотводы (определяется с использованием методики Приложения 17 (формула (П17.30))).

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

$$T_{п.у} = \frac{1}{N_{п.у}}, \quad (9.3)$$

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

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

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

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

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

$$L_B \geq (0,12 R_3 + 0,1 H_i); \text{ и } L_B \geq 5 \text{ м}, \quad (9.4)$$

где H_i – высота до точки возможного перекрытия над уровнем земли, м.

9.2.5. В грунтах с низкой проводимостью соединение заземлителя отдельно стоящего молниеотвода с контуром подстанции не допускается. Для предотвращения выноса высокого потенциала расстояние L_3 между обособленным заземлителем отдельно стоящего молниеотвода и ближайшей к нему точкой заземляющего контура подстанции, ЗРУ, зданий и сооружений следует определять из условий:

$$L_3 \geq 0,2 R_3 \text{ и } L_3 \geq 3 \text{ м}, \quad (9.5)$$

где R_3 – сопротивление заземления отдельно стоящего молниеотвода, значение которого должно быть не более 40 Ом.

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

9.2.6. 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:

$$L_T \geq 0,6 R_3 \text{ и } L_T \geq 10 \text{ м.} \quad (9.6)$$

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.

9.3. Защита станций и подстанций от набегающих грозовых волн

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

При воздействии набегающих с ВЛ волн атмосферных перенапряжений схема РУ ведет себя, как сложный колебательный контур, в котором подстанционное оборудование участвует своими входными емкостями, а ошиновка - отрезками длинной линии с распределенными параметрами. Значения входных емкостей подстанционного оборудования и рекомендации по составлению расчетной схемы замещения распределительного устройства приведены в Приложении 30. 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. Пред-

ставление силового трансформатора входной емкостью несколько увеличивает расчетные грозовые перенапряжения на нем. При анализе схем грозозащиты мощных силовых трансформаторов должны быть учтены волновые свойства обмотки путем использования частотно-зависимых характеристик обмоток, предварительно полученных расчетным или экспериментальным путем.

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

Старые методики и рекомендации по выбору типа, количества и места установки защитных аппаратов, а также длины защищенного подхода основывались на понятии "опасной зоны". Длина "опасной зоны" соответствовала предельной длине участка ВЛ на подходе к ПС, после пробега которого полная волна с отвесным фронтом максимальной возможной амплитуды в результате деформации из-за потерь энергии на импульсную корону становилась безопасной для изоляции подстанционного оборудования. Описание этого метода дано в подразделе 9.6.

Современные методы расчета грозозащиты ПС основаны на учете статистических распределений параметров импульсов атмосферных перенапряжений в точке их возникновения и вероятности поражения разрядами молнии отдельных участков ВЛ на подходе к ПС. Критерием выбора схемы грозозащиты ПС является повторяемость опасных перенапряжений в точках присоединения наиболее ответственного оборудования ПС (трансформаторов, автотрансформаторов и шунтирующих реакторов). (См. подраздел 9.7).

9.4. Средства защиты РУ от набегающих грозовых волн

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

Комплекс средств грозозащиты ВЛ на подходе к ПС в зависимости от класса номинального напряжения должен выбираться с учетом рекомендаций подраздела 7.1 в части влияния конструктивных параметров ВЛ 110-750 кВ на показатели их грозоупорности и с использованием справочных кривых по удельному числу грозовых отключений ВЛ 110-750 кВ на унифицированных опорах (Приложение 23), а для ВЛ 6-35 кВ с учетом рекомендаций Приложения 22.

9.4.2. Основным средством снижения перенапряжений на изоляции электрооборудования РУ являются ОПН. Защитные характеристики ОПН, выпускаемых различными фирмами, даны в Приложении 4. Необходимое количество и схема расстановки ОПН определяются на основании расчета грозозащиты ПС. Примеры расчета грозозащиты ПС даны в Приложениях 32 и 33.

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

9.5. Координация импульсной прочности изоляции подстанционного оборудования с защитными характеристиками ОПН

9.5.1. На оборудовании, установленном между ВЛ и защитным аппаратом по ходу волны (по ошиновке), форма импульсного перенапряжения в первый момент повторяет форму исходного грозового импульса (рис. 9.1,а). После прихода волны, отраженной от вступившего в работу защитного аппарата, перенапряжение быстро снижается, приближаясь к значению, равному сумме остающегося напряжения на защитном аппарате и падению напряжения на индуктивности ошиновки. Такое воздействие на изоляцию менее опасно, чем воздействие полного стандартного грозового импульса той же амплитуды. Перенапряжение в точках подстанции, расположенных по движению волны за защитным аппаратом, имеет вид импульса униполярной формы (рис. 9.1,б); период затухающих колебаний, наложенных на остающееся напряжение защитного аппарата, зависит от параметров схемы подстанции.

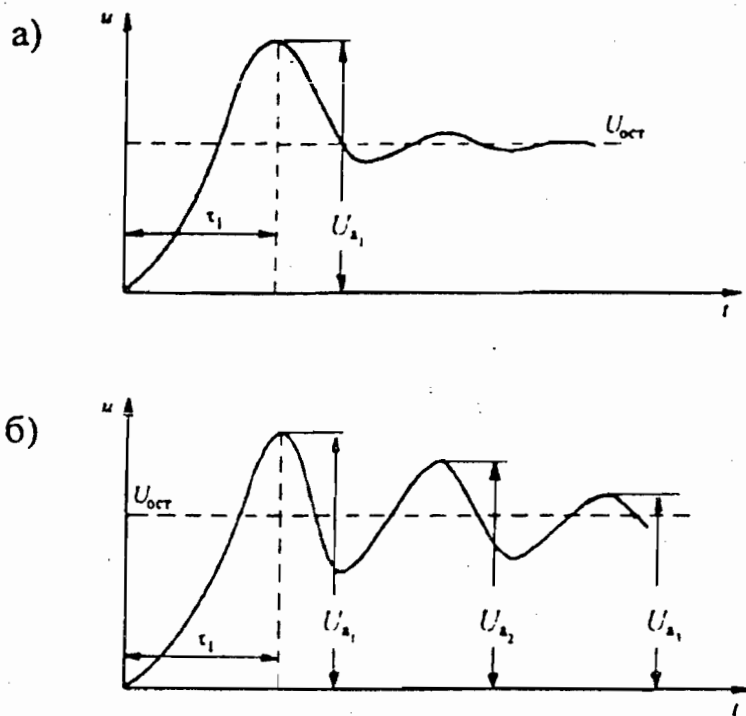


Рис. 9.1. Характерная форма грозовых перенапряжений на подстанционном оборудовании:

а) на входных элементах схемы подстанции (линейный выключатель, разъединитель, конденсатор связи и пр.);

б) на силовом трансформаторе, шунтирующем реакторе;

U_{a1}, U_{a2}, U_{a3} – амплитуды последовательных максимумов

грозового перенапряжения;

τ_1 – время наступления первого максимума U_{a1} ;

$U_{ост}$ – остающееся напряжение защитных аппаратов

9.5.2. Шкала допустимых воздействий ($U_{доп}$) для различных расчетных условий для силовых трансформаторов, автотрансформаторов и шунтирующих реакторов приведена в табл. 9.1.

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

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

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

9.5.3. Одним из условий обеспечения надежной грозозащиты ПС является следующая координация прочности изоляции подстанционного оборудования и характеристик защитных аппаратов:

$$U_{\text{дон}} = U_{\text{ост}} + \Delta U_{\text{к}}, \quad (9.7)$$

где $U_{\text{ост}}$ – остающееся напряжение на защитном аппарате при нормированном импульсном токе (токе координации), кВ; $\Delta U_{\text{к}}$ – координационный интервал, кВ.

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

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

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

$$I_{3\Lambda} = \frac{2U_a - U_{\text{ост}}}{z}, \quad (9.8)$$

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

Для выполнения условия (9.7) I_{3A} должен быть меньше нормированного тока координации.

Графическое построение для определения тока I_{3A} и соответствующего ему $U_{ост}$ приведено на рис. 9.2. При наличии в РУ нескольких защитных аппаратов должна использоваться обобщающая вольт-амперная характеристика, полученная в результате параллельного сложения вольт-амперных характеристик всех защитных аппаратов и волновых сопротивлений отходящих линий. Получение обобщающих характеристик пояснено на рис. 9.3.

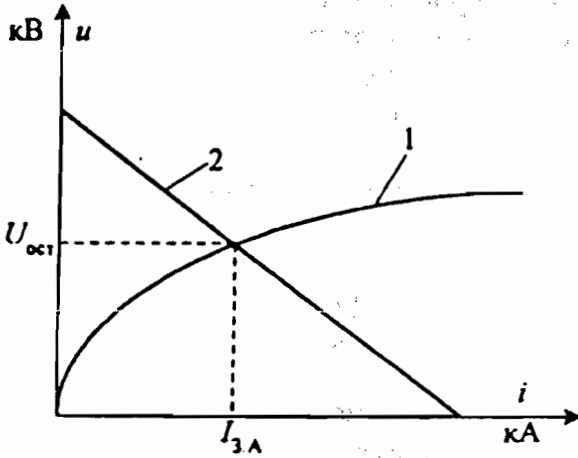


Рис. 9.2. Графическое определение тока через защитный аппарат.

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

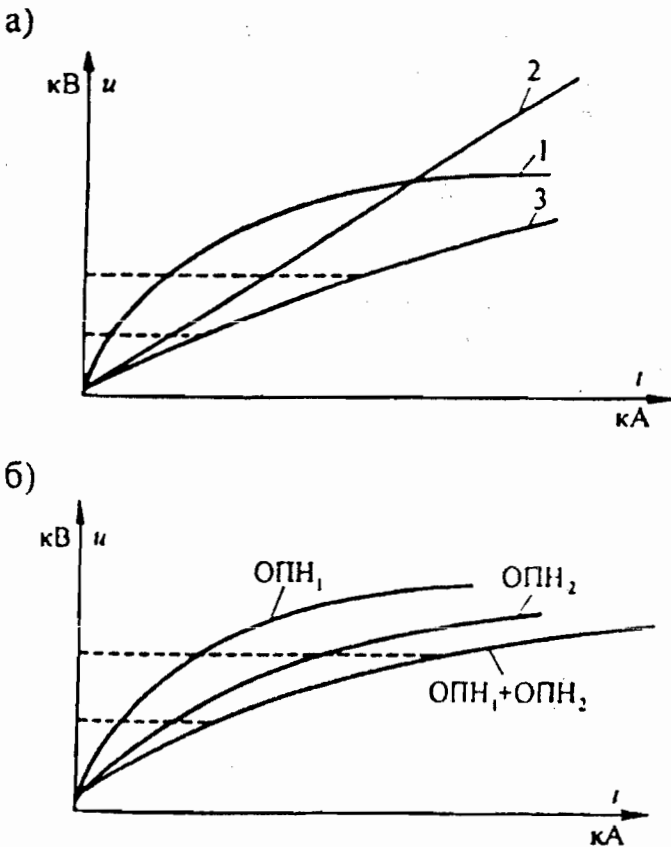


Рис. 9.3. Построение обобщающей вольт-амперной характеристики:

- а) сложение вольт-амперных характеристик защитного аппарата и волнового сопротивления отходящей линии;
 - 1 – вольт-амперная характеристика защитного аппарата (ОПН₁);
 - 2 – вольт-амперная характеристика волнового сопротивления отходящей линии;
 - 3 – обобщающая вольт-амперная характеристика.
- б) сложение вольт-амперных характеристик нескольких защитных аппаратов, установленных в РУ

9.6. Определение максимальной длины защитного подхода (опасной зоны)

9.6.1. Амплитуда атмосферных перенапряжений в различных точках ПС с выбранной компоновкой и характеристиками подстанционного оборудования и защитных аппаратов зависят от амплитуды и формы грозового импульса на входе ПС. Параметры этого импульса определяются параметрами разряда молнии в точке удара, импульсным уровнем изоляции ВЛ и показателями грозоупорности ВЛ на подходе, расстоянием от места удара до ПС и характеристиками деформации грозового импульса при распространении его по проводам. При известных характеристиках защитных аппаратов и допустимой амплитуде грозовых волн для подстанционного оборудования (табл. 9.1), амплитуде, крутизне и длине импульса в точке удара, для фиксированного расстояния между разрядником и защищаемым объектом может быть определена максимальная длина участка ВЛ на подходе (опасная зона $l_{0,1}$), после пробега которого амплитуда атмосферного перенапряжения на защищаемом оборудовании не превысит допустимого.

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

При определении длины опасной зоны параметры грозового импульса в точке удара принимаются фиксированными: фронт импульса - вертикальный, длина импульса до 100–200 мкс; амплитуда равна U_{50} - 50%-ному импульсному разрядному напряжению линейной изоляции. Грозовые импульсы с большими амплитудами будут срезаны при малых предразрядных временах и деформируются под действием импульсной короны. Колебательная составляющая грозового перенапряжения (рис. 9.1) при таких воздействиях не успевает дорасти до максимального значения.

9.6.3. Деформация грозового импульса под действием короны рассчитывается с учетом докоронного порога и влияния рабочего напряжения U_p по формуле (П19.1) при $u = U_{доп}$ (Приложение 31). Учитывается также, что рабочее напряжение на ошиновке подстанции оказывает влияние на время вступления в работу защитных аппаратов.

В качестве исходного принимается наиболее неблагоприятный случай: грозовой импульс совпадает с максимальным значением U_p противоположной полярности. При этом амплитуда расчетного грозового импульса (см. рис. П31.2 и 9.4):

$$U_{p,в} = U_{50} + U_p, \quad (9.9)$$

а значение докоронного порога

$$U_{кн} = U_k + U_p, \quad (9.10)$$

где U_k - напряжение начала короны.

Расчет длины опасной зоны не позволяет оценить надежность грозозащиты ПС. Однако такой метод позволяет выбрать схему, защитные аппараты и их размещение на ПС в соответствии с требованиями ПУЭ по длине опасной зоны. В этом случае показатели надежности грозозащиты ПС с ОПН будут того же порядка или лучше, чем по рекомендациям ПУЭ, которые проверены многолетним опытом эксплуатации.

При использовании в качестве защитных аппаратов вентильных разрядников, на применение которых были ориентированы рекомендации ПУЭ.

$\delta_{он}$ – доля грозových ударов в опоры и прилегающие участки троса, отн.ед.; $P_{он}$ – вероятность обратного перекрытия линейной изоляции; $\psi_{пр}$, $\psi_{он}$ – 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.

При определении $\psi_{пр}$ и $\psi_{он}$ необходимо учитывать более 10 статистически изменяющихся параметров, что может быть реализовано при использовании ЭВМ. В настоящее время разработано и апробировано несколько версий программ расчета вероятности возникновения опасных перенапряжений на оборудовании ПС. Две из них представлены в Приложениях: программа ВНИИЭ, использующая метод статистических испытаний Монте-Карло (Приложение 32), и программа СПбГТУ, основанная на построении и интегрировании объема опасных волн с координатами - амплитуда, крутизна тока молнии и удаленность точки удара от шин ПС (Приложение 33).

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

$$T_{н.в} = \frac{1}{N_{н.в}} \quad (9.12)$$

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

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

Оглавление

ЧАСТЬ I

ЗАЩИТА ОТ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 110-1150 кВ

РАЗДЕЛ 1. Общая характеристика внутренних перенапряжений в электрических сетях 110–1150 кВ

1.1. Введение. Основные определения.....	7
1.2. Резонансные перенапряжения	8
1.3. Коммутационные перенапряжения	11
1.4. Статистическая природа резонансных и коммутационных перенапряжений.....	12
1.5. Учет статистических распределений внутренних перенапряжений при защите изоляции сетей напряжением 110–1150 кВ.....	13

РАЗДЕЛ 2. Резонансные перенапряжения

2.1. Исходные положения	14
2.2. Параметры схем замещения и количественные оценки основных факторов, влияющих на резонансные перенапряжения.....	15
2.3. Вынужденное напряжение переходного процесса перенапряжений частоты 50 Гц в симметричном режиме	17
2.4. Вынужденное напряжение частоты 50 Гц в несимметричном режиме при однополюсном к.з.	18
2.5. Вынужденное напряжение частоты 50 Гц в несимметричном режиме при успешном ОАПВ.....	18
2.6. Защита от перенапряжений в паузе успешного ОАПВ на электропередачах 500 кВ, 750 кВ, 1150 кВ.....	18
2.7. Перенапряжения на частоте 50 Гц в неполнофазных режимах.....	20
2.8. Параметрическое самовозбуждение генераторов, работающих на ненагруженную линию.....	20
2.9. Перенапряжения на четных, частоты $2k\omega$, и нечетных, частоты $(2k+1)\omega$, ультрагармониках при явлениях переходного феррорезонанса.....	22
2.10. Защита от феррорезонансных перенапряжений на частоте 50 Гц, возникающих в электропередачах 220–500 кВ после включения холостых шин с электромагнитными трансформаторами напряжения	24
2.11. Автопараметрическое самовозбуждение ультрагармоник четной кратности частоты 100 Гц и 200 Гц.....	26

РАЗДЕЛ 3. Защита подстанций 110–750 кв с элегазовыми комплектными распределительными устройствами от резонансных, высоко- и низкочастотных коммутационных и грозовых перенапряжений

3.1. Основные подходы	27
3.2. Возможное снижение электрической прочности элегазовой изоляции КРУЭ в процессе его эксплуатации	31
3.3. Технические средства для защиты изоляции КРУЭ и оборудования ПС от перенапряжений	31
3.4. Защита КРУЭ от резонансных перенапряжений.....	32
3.5. Защита КРУЭ от низкочастотных коммутационных перенапряжений.....	33
3.6. Грозозащита оборудования ПС и КРУЭ.....	33
3.7. Защита КРУЭ от высокочастотных коммутационных перенапряжений....	34

РАЗДЕЛ 4. Защита продольно- и поперечнокомпенсированных электропередач от коммутационных и грозовых перенапряжений

4.1. Исходные положения	35
4.2. Особенности коммутационных и резонансных при делении частоты, перенапряжений в продольно- и поперечнокомпенсированных электропередачах ...	35
4.3. Защита продольно- и поперечнокомпенсированных электропередач от коммутационных и резонансных перенапряжений	38

ПРИЛОЖЕНИЯ К ЧАСТИ I

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Оценка числа воздействий коммутационных перенапряжений на изоляцию электропередачи и токовых нагрузок на резисторы ОПН за год	42
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Методика расчета величины резонансных перенапряжений и оценки эффективности мер защиты от них	45
2.1. Вынужденное напряжение переходного процесса перенапряжений частоты 50 Гц в симметричном режиме.....	45
2.2. Вынужденное напряжение частоты 50 Гц в несимметричном режиме однополюсного к.з.	50
2.3. Вынужденное напряжение частоты 50 Гц в несимметричном режиме при успешном ОАПВ.....	52
2.4. Защита от перенапряжений, возникающих в неполнофазных режимах.....	56
2.5. Методы оценки предельной величины перенапряжений при явлениях переходного феррорезонанса и способы защиты от них	61
2.6. Автопараметрическое самовозбуждение ультрагармоник четной кратности частоты 100 и 200 Гц	63
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Номограмма для определения наименьшей из частот собственных колебаний коммутируемой электропередачи.....	65

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Основные характеристики ОПН, выпускаемых	
	НПО «ЭЛЕКТРОКЕРАМИКА» (табл. П4.1.1 – П4.1.4),
	«АВВ – УЭТМ» (табл. П4.2.1 – П4.2.5),
	«ФЕНИКС – 88» (табл. П4.3.1 – П4.3.3),
	«ТАВРИДА – ЭЛЕКТРИК» (табл. П4.1).....
4.1.	Электрические характеристики ОПН, выпускаемых НПО «ЭЛЕКТРОКЕРАМИКА» в фарфоровых покрышках.....
4.2.	Электрические характеристики ОПН 110-750 кВ, выпускаемых «АВВ-УЭТМ» в фарфоровых покрышках.....
4.3.	Электрические характеристики ОПН 110-500 кВ, выпускаемых фирмой «ФЕНИКС-88» в полимерных покрышках.....
4.4.	Электрические характеристики ограничителей серии ОПН-У 110-220 кВ, выпускаемых фирмой «ТАВРИДА – ЭЛЕКТРИК» в полимерных покрышках ...
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Наименьшие допустимые расстояния в свету от токопроводящих частей до различных элементов ОРУ 110–750 кВ и ЗРУ 110–330 кВ, защищенных ОПН с защитным уровнем фаза-земля 1,8.....	
ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Методика расчета ожидаемого срока службы ОПН 110–1150 кВ.....	
6.1.	Исходные положения.....
6.2.	Статистические распределения неограниченных перенапряжений в точке установки ОПН.....
6.3.	Расчет статистического распределения ресурса, расходуемого резистором ОПН в течение одного года.....
6.4.	Определение ожидаемого срока службы ОПН.....
6.5.	Программа расчета ожидаемого срока службы ограничителей 110-1150 кВ ...
ПРИЛОЖЕНИЕ 7. Пример выбора системы грозозащиты изоляции питающих КРУЭ блочных трансформаторов (автотрансформаторов)...	
ПРИЛОЖЕНИЕ 8. Пример расчета ожидаемого срока службы ОПН.....	
8.1.	Расчет вынужденного напряжения переходного процесса перенапряжений частоты 50 Гц.....
8.1.1.	Исходные данные:.....
8.1.2.	Расчет вынужденного напряжения переходного процесса в симметричном режиме.....
8.1.3.	Расчет вынужденного напряжения переходного процесса в несимметричном режиме.....
8.1.4.	Расчет вынужденного напряжения частоты 50 Гц в несимметричном режиме при успешном ОАПВ.....
8.2.	Расчет ожидаемого срока службы ОПН 750 кВ.....
8.2.1.	Расчет статистического распределения амплитуд неограниченных перенапряжений в точке установки ограничителя.....
8.2.2.	Расчет статистического распределения ресурса, расходуемого резистором ОПН в течение одного года.....

Ч А С Т Ь 2

ЗАЩИТА ОТ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6–35 кВ

РАЗДЕЛ 5. Защита от внутренних перенапряжений сетей 6–35 кВ

5.1. Исходные положения	110
5.2. Компенсация емкостного тока на землю	112
5.3. Защита от дуговых перенапряжений в сетях 6–35 кВ	112
5.4. Система защиты от однофазных замыканий и перенапряжений в сети собственных нужд с резистивным заземлением нейтрали и двумя типами ОПН	113
5.5. Защита от повреждений трансформаторов напряжения 6–35 кВ контроля изоляции	115
5.6. Защита от перенапряжений установок с вакуумными выключателями ...	115
5.7. Защита неиспользуемых обмоток трансформаторов	117

ПРИЛОЖЕНИЯ К ЧАСТИ 2

ПРИЛОЖЕНИЕ 10. Допустимые кратности внутренних перенапряжений ...	120
ПРИЛОЖЕНИЕ 11. Антирезонансные трансформаторы напряжения	121
ПРИЛОЖЕНИЕ 12. Пример выбора параметров RC-цепочки	122

*) <

Ч А С Т Ь 3

ГРОЗОЗАЩИТА ЛИНИЙ И ПОДСТАНЦИЙ 6–1150 кВ

Раздел 6. Основные характеристики разряда молнии в расчетах грозозащиты

6.1. Краткие сведения о механизме разряда молнии	131
6.2. Количественные характеристики разряда молнии	133
6.3. Интенсивность грозовой деятельности	139
6.4. Грозопоражаемость воздушных линий	144

Раздел 7. Показатели грозоупорности и средства грозозащиты воздушных линий

7.1. Влияние конструктивных параметров ВЛ на показатели ее грозоупорности	145
7.2. Влияние природно-климатических условий и особенностей трассы на показатели грозоупорности ВЛ	147
7.3. Эксплуатационные показатели грозоупорности ВЛ 110–750 кВ	148
7.4. Средства грозозащиты воздушных линий	148

Раздел 8. Выбор средств грозозащиты вл 110 кВ и выше

8.1. Оценка грозоупорности ВЛ 110–750 кВ по справочным кривым	151
---	-----

8.2. Критерии выбора средств грозозащиты ВЛ 110 кВ и выше	154
8.3. Допустимое число грозových отключений ВЛ и выбор средств грозозащиты по критерию коммутационного ресурса линейных выключателей	155
8.4. Определение области рационального использования унифицированных и типовых опор для ВЛ 110-330 кВ различных категорий по грозозащите....	157

Раздел 9. Защита станций и подстанций 6-1150 кВ от грозových перенапряжений

9.1. Общие положения.....	159
9.2. Защита станций и подстанций от прямых ударов молнии.....	159
9.3. Защита станций и подстанций от набегающих грозových волн.....	162
9.4. Средства защиты РУ от набегающих грозových волн	163
9.5. Координация импульсной прочности изоляции подстанционного оборудования с защитными характеристиками ОПН	164
9.6. Определение максимальной длины защитного подхода (опасной зоны)..	167
9.7. Показатели надежности грозозащиты РУ станций и подстанций от набегающих волн.....	168

ПРИЛОЖЕНИЯ К ЧАСТИ 3

ПРИЛОЖЕНИЕ 13. Исходные данные для расчета грозоупорности ВЛ 110 кВ и выше	171
ПРИЛОЖЕНИЕ 14. Разрядные характеристики линейной изоляции.....	174
ПРИЛОЖЕНИЕ 15. Расчет стационарного и импульсного сопротивления заземления опор ВЛ.....	177
15.1. Электрофизические характеристики грунта.....	177
15.2. Определение эквивалентного удельного сопротивления неоднородного грунта.....	179
15.3. Стационарное сопротивление заземления одиночных искусственных заземлителей в однородном грунте	180
15.4. Расчет сопротивления заземления различных конструкций заземляющих устройств опор ВЛ.....	183
15.5. Расчет импульсного сопротивления заземления опор ВЛ.....	186
15.6. Справочные данные для расчета сопротивления заземления (R и $R_{им}$) типовых заземляющих устройств унифицированных опор ВЛ 110-500 кВ.....	189
ПРИЛОЖЕНИЕ 16. Расчетные параметры воздушной линии	195
ПРИЛОЖЕНИЕ 17. Расчет числа грозových отключений ВЛ 110 кВ и более высокого напряжения с тросом	202
ПРИЛОЖЕНИЕ 18. Расчет числа грозových отключений линий без троса на металлических и железобетонных опорах	211
ПРИЛОЖЕНИЕ 19. Расчет числа грозových отключений воздушной линии без троса на деревянных опорах	212
ПРИЛОЖЕНИЕ 20. Грозозащита больших переходов	217

* Публикуется в данном приложении к ИММ.

ПРИЛОЖЕНИЕ 21. Расчет числа грозовых отключений воздушных линий, проходящих по трассе с высоким удельным сопротивлением грунта	222
ПРИЛОЖЕНИЕ 22. Грозозащита воздушных линий 6–35 кВ	224
22.1. Методика расчета числа грозовых отключений ВЛ 6–35 кВ	224
22.2. Мероприятия по повышению грозоупорности ВЛ 6–35 кВ	228
ПРИЛОЖЕНИЕ 23. Справочные кривые по ожидаемому удельному числу грозовых отключений ВЛ 110–750 кВ на унифицированных и типовых опорах	230
ПРИЛОЖЕНИЕ 24. Анализ показателей грозоупорности и средств грозозащиты ВЛ 110–750 кВ различного конструктивного исполнения	263
ПРИЛОЖЕНИЕ 25. Влияние искрообразования в грунте при стекании тока молнии на показатели грозоупорности ВЛ 110–330 кВ ...	273
ПРИЛОЖЕНИЕ 26. Справочные таблицы: допустимое число грозовых отключений ВЛ 110–330 кВ и предельное значение сопротивления заземления опор (по критерию коммутационного ресурса линейных выключателей)	277
ПРИЛОЖЕНИЕ 27. Справочные таблицы: области рационального использования унифицированных и типовых опор для ВЛ 110–330 кВ категорий А и Б по грозозащите	286
ПРИЛОЖЕНИЕ 28. Учет реальных условий эксплуатации при оценке допустимого по коммутационному ресурсу выключателя числа отключений тока короткого замыкания	296
ПРИЛОЖЕНИЕ 29. Зоны защиты молниеотводов	303
ПРИЛОЖЕНИЕ 30. Методика и примеры составления схем замещения для расчета грозозащиты ПС 110–1150 кВ	309
ПРИЛОЖЕНИЕ 31. Деформация грозовых импульсов при распространении по проводам на подходах к РУ	322
ПРИЛОЖЕНИЕ 32. Оценка показателей надежности грозозащиты ПС с использованием метода статистических испытаний Монте-Карло	324
32.1. Исходные положения	324
32.2. Оценка импульсной прочности изоляции при реальных грозовых воздействиях	324
32.3. Алгоритм программы расчета	325
32.4. Пример расчета грозозащиты ПС	327
ПРИЛОЖЕНИЕ 33. Статистический метод анализа грозозащиты ПС совместно с ВЛ	330
33.1. Исходные положения	330
33.2. Алгоритм программы расчета	331
33.3. Пример расчета грозозащиты подстанции	336
ПРИЛОЖЕНИЕ 34. Перечень программ для ПЭВМ по расчету грозоупорности воздушных линий и подстанций	344

АООТ РОСЭП

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

по проектированию, строительству и эксплуатации сельских
электрических сетей

16.03.2001

04.05-2001

N

Москва

/О закрытых ТП 10/0,4 кВ типа
ЗТП.С.10 Люберецкого ЭМЗ/

Сообщаем для сведения, что ОАО "Люберецкий электромеханический завод" (Московская область) изготавливает электрооборудование и установочные изделия для серии закрытых трансформаторных подстанций упрощенной конструкции напряжением 6-10/0,4 кВ с мощностью трансформаторов 160, 250 и 400 кВА типа ЗТП.С-10.

Указанные подстанции имеют следующие достоинства:

ТП закрытого исполнения. Все оборудование, включая и линейные разъединители и выключатели нагрузки, размещено внутри здания, что позволяет повысить надежность работы оборудования и обеспечить удобное и безопасное обслуживание подстанции в особенно сравнительно суровых климатических условиях и при плохой погоде.

Срок службы ЗТП и размещенного в нем оборудования в несколько раз превышает срок службы КТП наружной установки в металлическом корпусе, выпускаемых в настоящее время заводами (40-50 лет вместо 5-8 лет).

Подстанцию с точки зрения безопасности и допустимого уровня шума можно располагать в густозастроенных поселках вблизи жилых домов, коттеджей, клубов, детских лагерей, садовых домиков и т.д., т.е. в центре нагрузки.

Схемы электрических соединений и компоновки оборудования ЗТП позволили выполнить РУ 10 кВ и 0,4 кВ компактными, небольших размеров, для их размещения здание ТП предусматривается малогабаритным простейшей конструкции.

Для хозяйств, которые ведут массовое сооружение построек в сельской местности сооружение такого здания не вызовет особых затруднений.

ЗТП.С-10 применяются для различных условий присоединения к сети 10 кВ (тупиковые или проходные) и степени надежности (с одно и двусторонним питанием, одно и двухтрансформаторные).

Очень важно то, что все оборудование, электротехнические устройства и строительные конструкции (двери, ворота, жалюзи, кронштейны и т.п.), изготавливаются и поставляются заводом комплектно с оборудованием.

ЗТП данной конструкции позволяет осуществлять замену оборудования (силового трансформатора, низковольтного шкафа, предохранителей и др.) на оборудование другой мощности и тока без каких-либо переустройств ТП.

Стоимость ЗТП.С в 1,5-2 раза меньше ЗТП городского типа.

По сравнению с КТП стоимость ЗТП.С несколько выше (1,2-1,3 раза). Но если учесть значительно более высокий срок службы ЗТП и эксплуатационные издержки, стоимость ее по приведенным затратам, будет ниже чем КТП в металлическом корпусе.

Публикуем промышленный каталог 03.61.45-99 (Информэлектро, 1999 г.) на указанные закрытые ТП 10/0,4 кВ производства ОАО "Люберецкий ЭМЗ".

Типовые проекты на сооружение ЗТП.С.10 Люберецкого ЭМЗ (схемы: 1Т1В, 1Т1К, 1Т2В, 1Т2К, 2Т2В и 2Т2К можно заказать в АООТ РОСЭП ("Сельэнергопроект").

Тел.: 374-71-00, 374-66-09;

Факс: 374-66-08.

Приложение: упомянутое.

Первый заместитель Генерального директора
АООТ РОСЭП

А.С.Лисковец

ЗАКРЫТЫЕ ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ПОДСТАНЦИИ серии ЗТПС-10 (сельского типа)

УДК 621.311.42
ГРНТИ 45.33.29.35

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Закрытые трансформаторные подстанции предназначены для приема и распределения электрической энергии трехфазного переменного тока частотой 50 Гц, напряжением 6 (10) кВ. Преимущественной особенностью ЗТПС является размещение оборудования в закрытом помещении, сооружаемом из подсобных материалов и конструкций, простейшего типа, что, в свою очередь, позволяет значительно увеличить срок службы размещенного в здании оборудования.

Закрытые трансформаторные подстанции выполняются на основании типового проекта ОТПС.03.61 института „Сельэнергопроект”. Люберецким электромеханическим заводом освоено производство оборудования для ЗТПС упрощенной конструкции.

Структура условного обозначения

ЗТПС-10 У1:

- З — закрытая;
- ТП — трансформаторная подстанция;
- С — сельского типа;
- 10 — номинальное напряжение, кВ;
- У1 — климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150-69.

Условия эксплуатации:

высота над уровнем моря не более 1000 м;
температура окружающего воздуха от минус 45 до 45 °С;

относительная влажность воздуха 80% при температуре 20 °С;

окружающая среда взрыво- и пожаробезопасная, не содержащая токопроводящей пыли, агрессивных газов и паров в концентрациях, разрушающих металлы и изоляцию.

Требования техники безопасности при обслуживании ЗТПС по ГОСТ 12.2.007.0-75 и ГОСТ 12.2.007.4-75.

© ИНФОРМЭЛЕКТРО, 1999



ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ПРОМЫШЛЕННЫЙ КАТАЛОГ

03.61.45-99

КЛАССИФИКАЦИЯ

Классификация ЗТПС приведена в табл. 1.

Таблица 1

Тип исполнения подстанции	Число трансформаторов	Число линий 10 кВ	Исполнение вводов 10 кВ	Размеры здания
ЗТПС-10-1Т1В	1	1	Воздушное	4600×2700×4900
ЗТПС-10-1Т1К	1	1	Кабельное	6400×2700×3200
ЗТПС-10-1Т2В	1	2	Воздушное	6400×2700×4900
ЗТПС-10-1Т2К	1	2	Кабельное	6400×2700×3200
ЗТПС-10-2Т2В	2	2	Воздушное	4600×5400×4900
ЗТПС-10-2Т2К	2	2	Кабельное	6400×5400×3200

ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

Основные технические данные подстанции приведены в табл. 2.

Таблица 2

Наименование параметров	Значение параметров при мощности трансформаторов, кВ		
	160	250	400
Номинальное напряжение на стороне высокого напряжения (ВН), кВ	10; 6	10; 6	10; 6
Наибольшее напряжение на стороне ВН, кВ	12; 7,2	12; 7,2	12; 7,2

Окончание табл. 2

Наименование параметров	Значение параметров при мощности трансформаторов, кВ		
	160	250	400
Номинальное напряжение на стороне низкого напряжения (НН), кВ	0,4	0,4	0,4
Предельный ток термической стойкости в течение 1 с на стороне ВН, кА	6,3	6,3	6,3
Ток электродинамической стойкости на стороне ВН (наибольший пик), кА	16,0	16,0	16,0
Номинальный ток плавких вставок высоковольтных предохранителей на стороне ВН, А	20,0	31,5	50,0
Номинальный ток на стороне НН, А	250	400	630
Число отходящих линий	3*(5)	4*(7)	5*(9)
Номинальный ток линии уличного освещения, А	25,0	25,0	25,0
Уровень изоляции по ГОСТ 1516.1-76	Нормальная		
Степень защиты по ГОСТ 14254-96: силового трансформатора шкафов ВН и НН	IP00 IP23	IP00 IP23	IP00 IP23
Механическая нагрузка на изоляторы в отходящих линиях, кН, не более	7,5	7,5	7,5

* Для однотрансформаторных, в скобках для двухтрансформаторных подстанций.

КОНСТРУКЦИЯ

В ЗТПС на стороне высокого напряжения силовой трансформатор присоединяется к линии через разъединитель и предохранители. В схеме ЗТПС проходящего типа в цепях линий предусматривают-

ся: разъединитель в линии основного питания и выключатель нагрузки в линии резервного питания.

Линии 0,4 кВ присоединяются к сборным шинам через автоматические выключатели. В схеме предусматриваются: защита от однофазных коротких замыканий на нулевой провод, защита от неполнофазных режимов, автоматическое управление уличным освещением.

Все оборудование подстанции размещается внутри помещений, в отсеках силового трансформатора РУ 10 и 0,4 кВ.

Выходы линий 10 и 0,4 кВ могут быть воздушными и кабельными.

ЗТПС оборудуются соответствующими блокировками, обеспечивающими безопасное обслуживание.

Здание подстанции отдельностоящее, одноэтажное, простейшей конструкции. Несущие стены из кирпича, фундаменты из стандартных бетонных блоков.

В ЗТПС данной конструкции возможна замена оборудования на оборудование другой мощности, типа и других заводов-изготовителей без каких-либо переустройств ТП.

Электрические принципиальные схемы приведены на рис. 1-6.

Габаритные, установочные и присоединительные размеры подстанций приведены на рис. 7-12.

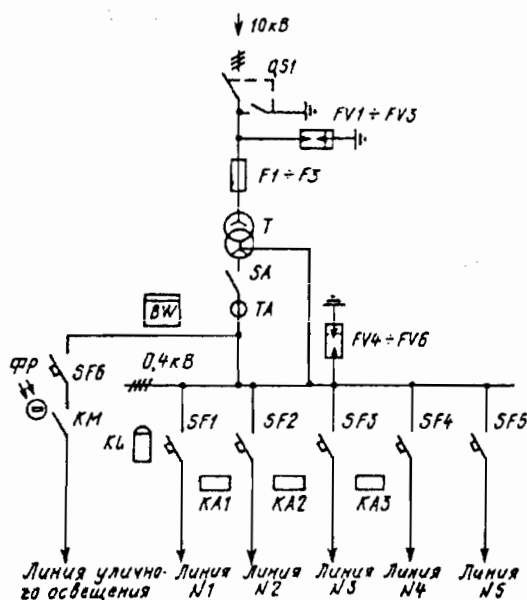


Рис. 1. Электрическая принципиальная схема подстанции ЗТПС-10-1Т1В:

QS1 - разъединитель; F1-F3 - предохранители 10 кВ; T - силовой трансформатор; SA - рубильник; SF1-SF6 - автоматические выключатели; FV1-FV6 - разрядники; КМ - контактор; ФР - фотореле; ВВ - электросчетчик активной энергии; КА1-КА3 - токовое реле; КЛ - реле защиты от неполнофазного режима; ТА - трансформатор тока

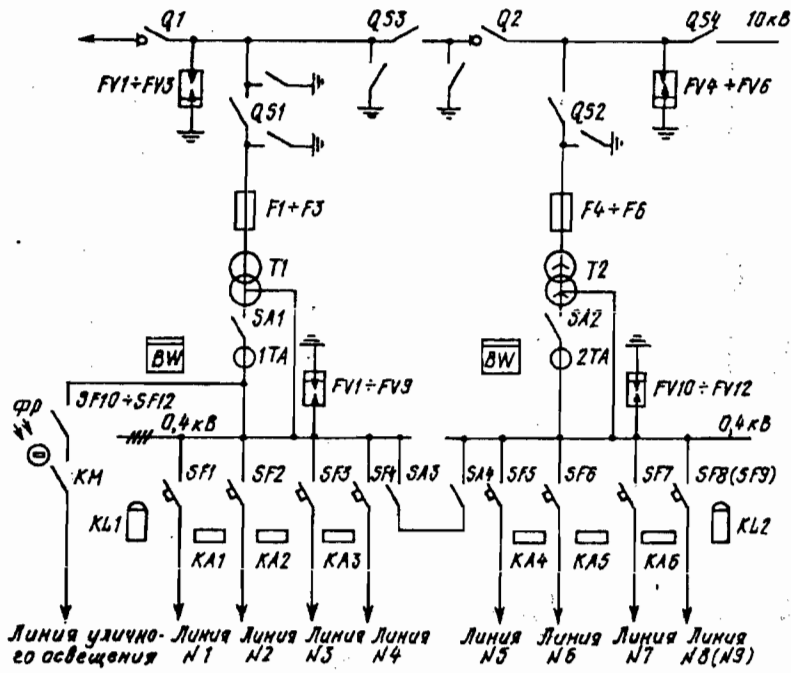


Рис. 5. Электрическая принципиальная схема подстанции ЗТПС-2Т2В:

QS1-QS4 - разъединители; Q1, Q2 - выключатель нагрузки; F1-F6 - предохранители 10 кВ; T1, T2 - силовые трансформаторы; SA1-SA4 - рубильники; SF1-SF12 - автоматические выключатели; FV1-FV12 - разрядники; KA1-KA6 - токовое реле; KM - контактор; ФР - фотореле; BW - электросчетчик активной энергии; KL1, KL2 - реле защиты от неполнофазного режима; ITA, 2TA - трансформатор тока

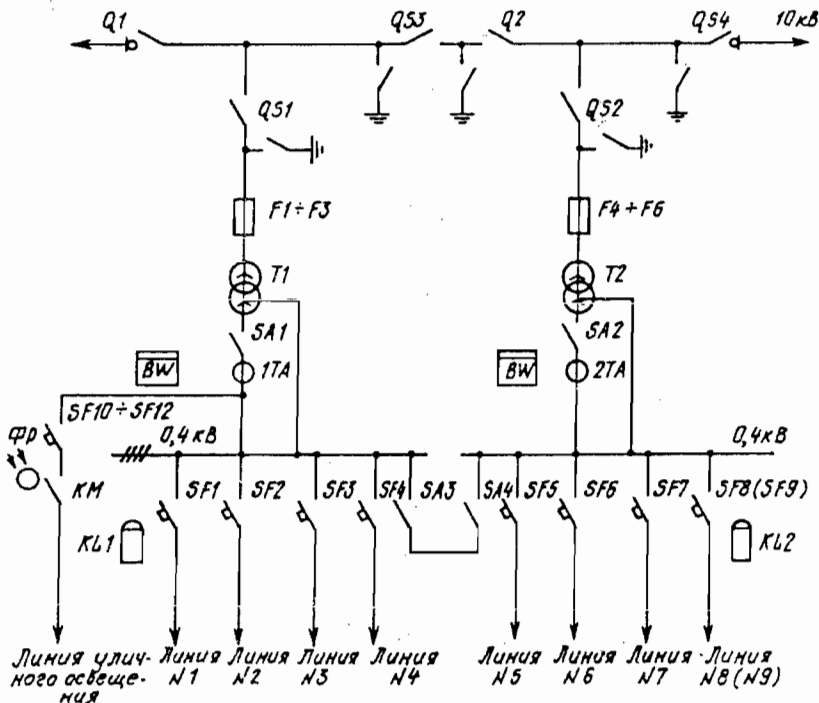


Рис. 6. Электрическая принципиальная схема подстанции ЗТПС-10-2Т2К

Расшифровка позиций - см. рис. 5

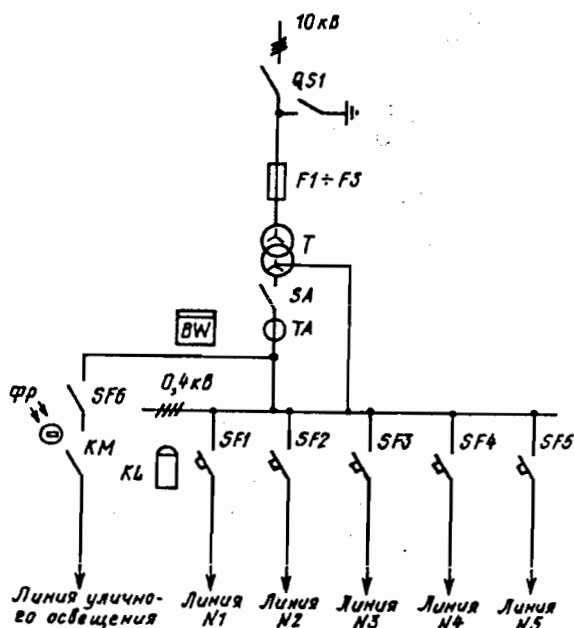


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема подстанции ЗТПС-10-1Т1К
Расшифровка позиций — см. рис. 1

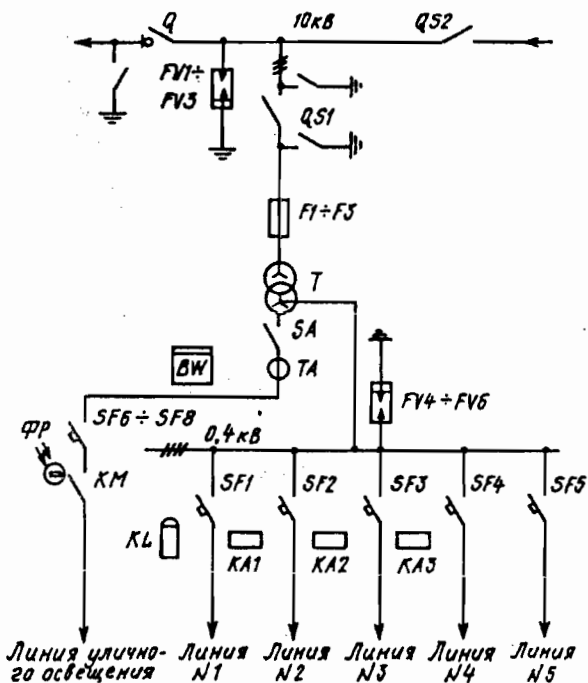


Рис. 3. Электрическая принципиальная схема подстанции ЗТПС-10-1Т2В:
Q — выключатель нагрузки (остальное — см. рис. 1)

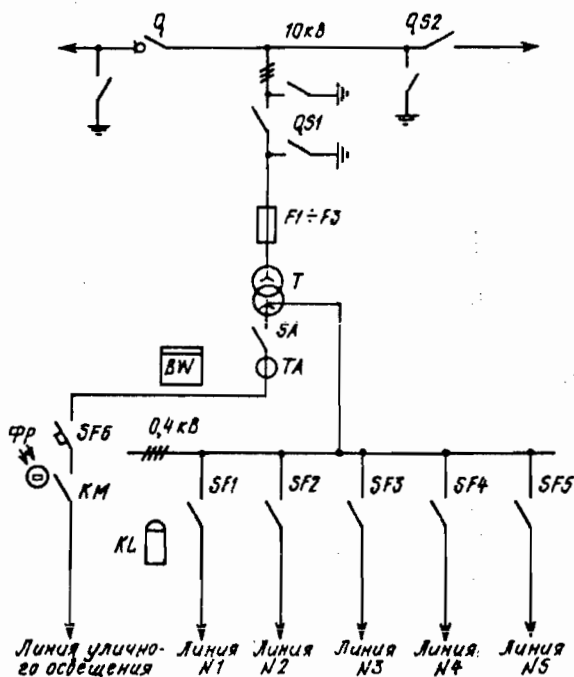


Рис. 4. Электрическая принципиальная схема подстанции ЗТПС-10-1Т2К:
Q — выключатель нагрузки (остальное — см. рис. 1)

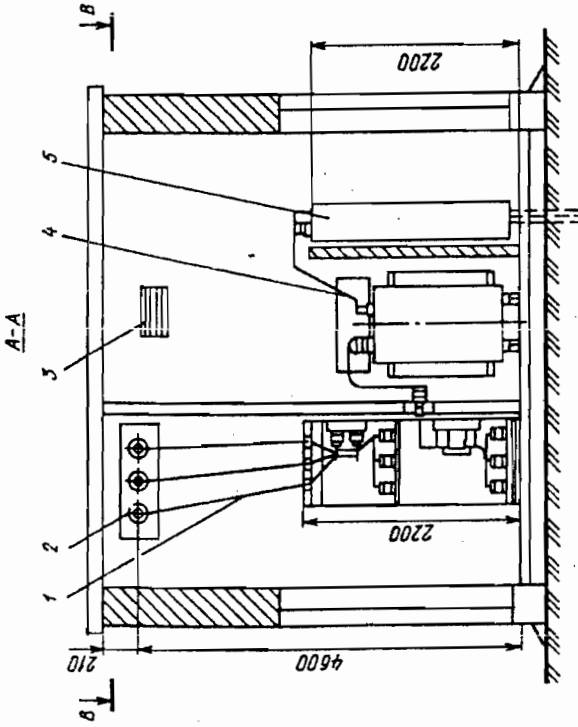


Рис. 9. Габаритные, установочные и присоединительные размеры подстанции ЗТПС-10-1Т2В:
 1 — высоковольтный ввод; 2 — плита для установки проходных изоляторов ВН; 3 — жалюзийная решетка; 4 — шинный мост ВН; 5 — низковольтный шкаф; 6, 8 — двери; 7 — кронштейн для низковольтных выводов; 9 — изолирующая подставка; 10 — металлические ворота; 11 — заградительный барьер; 12 — шит 10 кВ

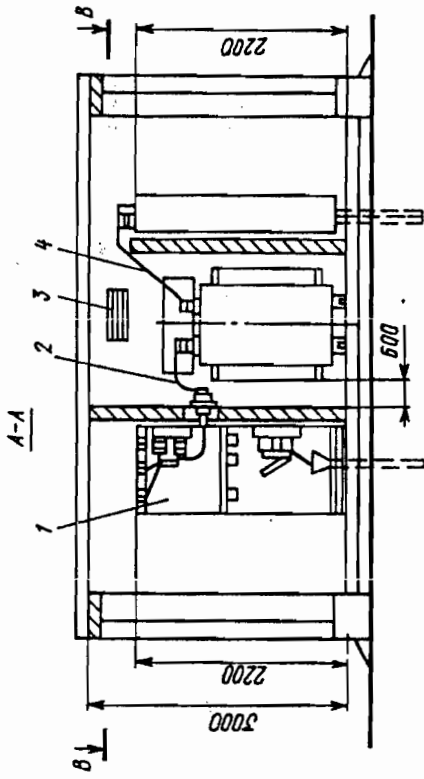


Рис. 10. Габаритные, установочные и присоединительные размеры подстанции ЗТПС-10-1Т2К:
 1, 11 — шит 10 кВ; 2 — шинный мост; 3 — жалюзийная решетка; 4 — шинный мост НН; 5, 7 — двери; 6 — низковольтный шкаф; 8 — изолирующая подставка; 9 — металлические ворота; 10 — заградительный барьер

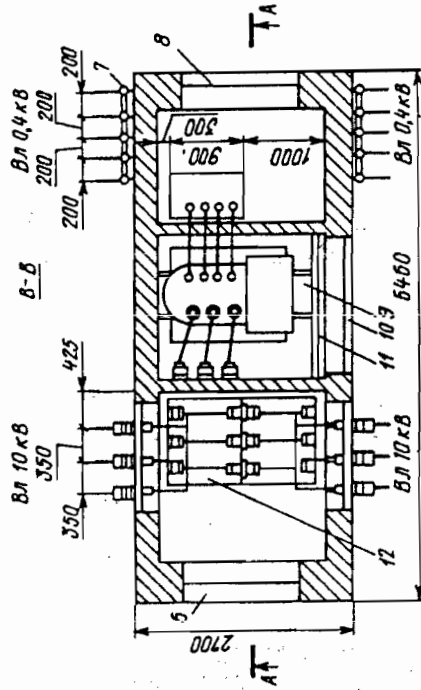
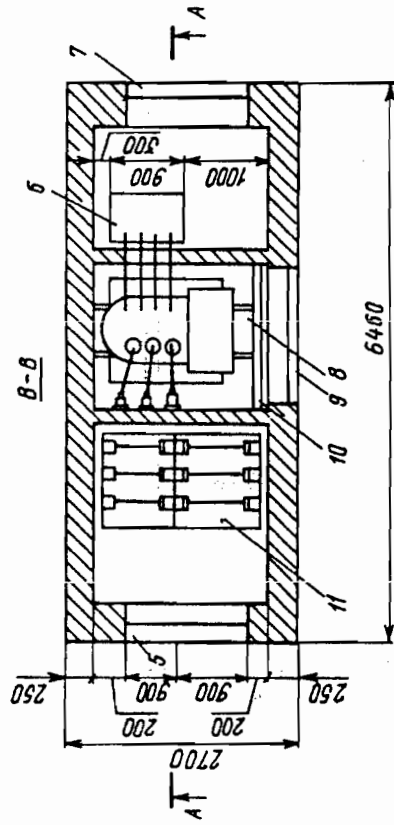


Рис. 9. Габаритные, установочные и присоединительные размеры подстанции ЗТПС-10-1Т2В:
 1 — высоковольтный ввод; 2 — плита для установки проходных изоляторов ВН; 3 — жалюзийная решетка; 4 — шинный мост НН; 5 — низковольтный шкаф; 6, 8 — двери; 7 — кронштейн для низковольтных выводов; 9 — изолирующая подставка; 10 — металлические ворота; 11 — заградительный барьер; 12 — шит 10 кВ

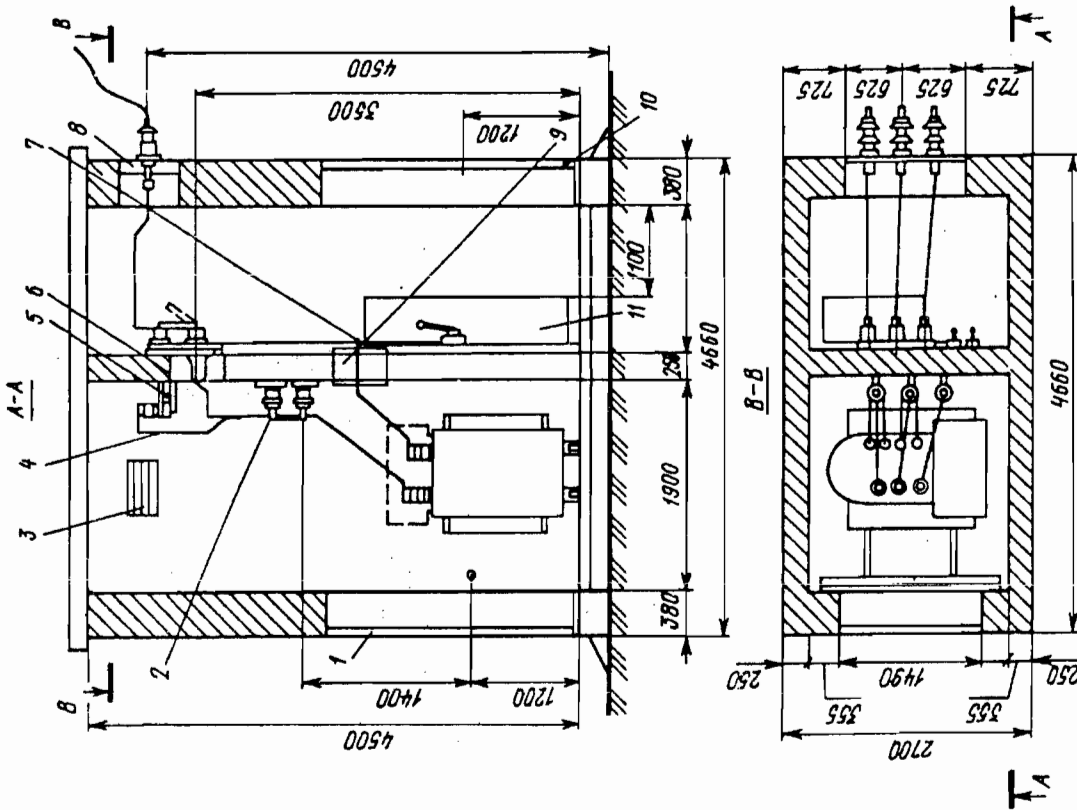


Рис. 7. Габаритные, установочные и присоединительные размеры подстанции ЗТПС-10-11Т1В:
 1 — металлические ворота; 2 — предохранители 10 кВ; 3 — жалюзийная решетка; 4 — шинный мост ВН; 5 — установка ОПИР-10 (6) кВ; 6 — установка разъединителя; 7 — шинный мост НН; 8 — плата для установки проходных изоляторов 10 кВ; 9 — плита проходная ввода 0,4 кВ; 10 — дверь; 11 — низковольтный шкаф

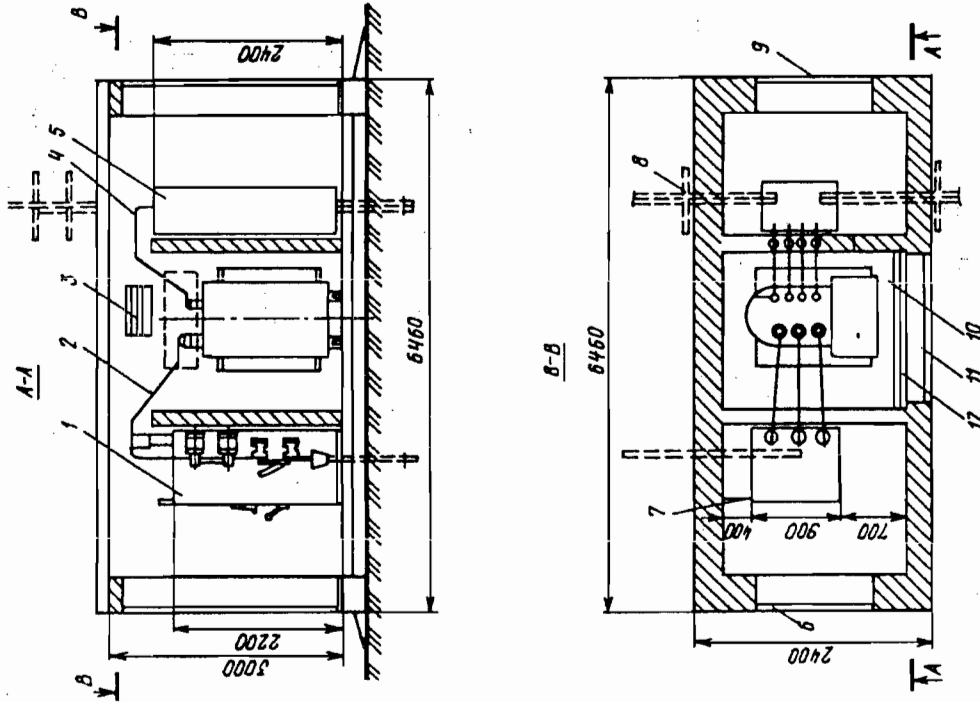


Рис. 8. Габаритные, установочные и присоединительные размеры подстанции ЗТПС-10-11Т1К:
 1 — высоковольтный шкаф 10 кВ; 2 — шинный мост ВН; 3 — жалюзийная решетка; 4 — шинный мост НН; 5 — низковольтный шкаф; 6, 9 — дверь; 7 — ограждение; 8 — кронштейн для низковольтных выводов; 10 — изолирующая подстанка; 11 — металлическое ворота; 12 — заградительный барьер

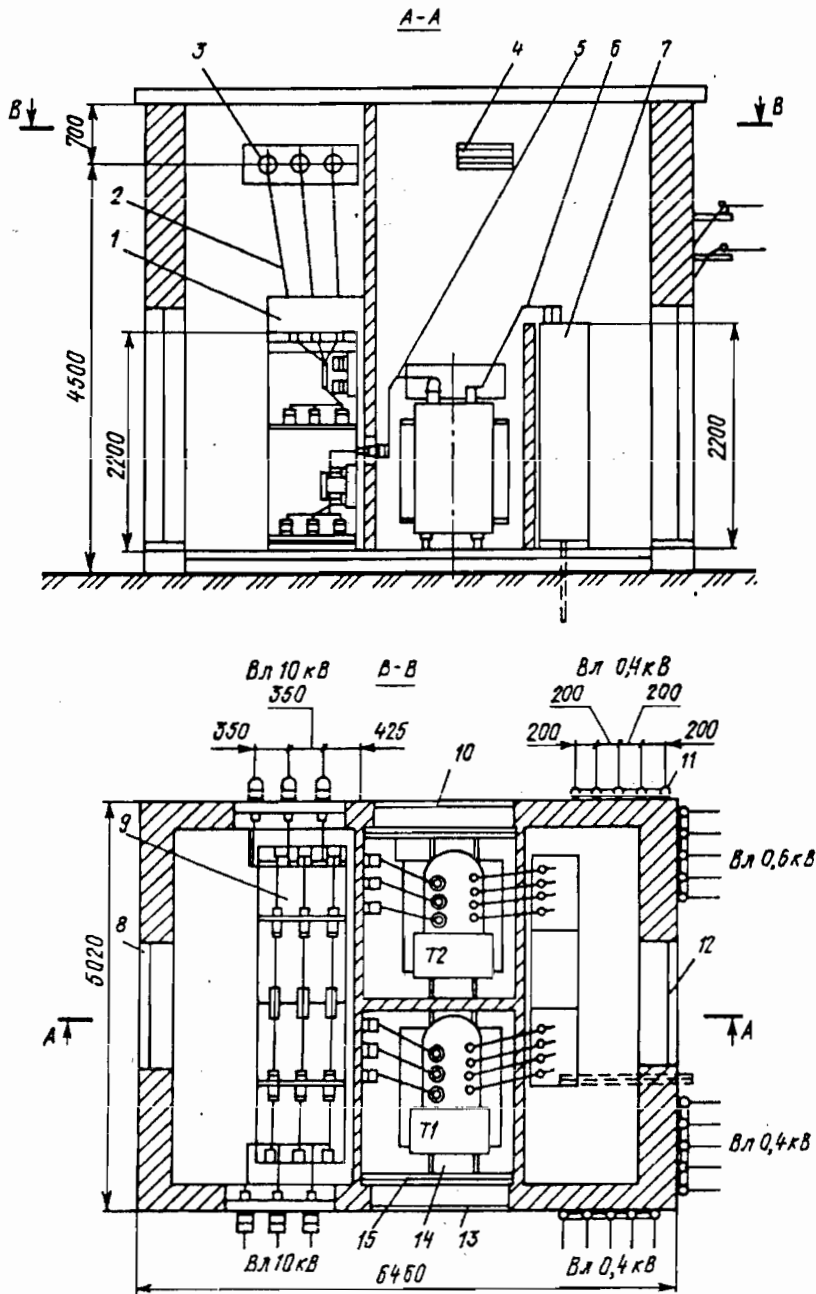


Рис. 11. Габаритные, установочные и присоединительные размеры подстанции ЗТПС-2Т2В:

1 — ограждение; 2 — высоковольтный ввод; 3 — плита для установки проходных изоляторов ВН; 4 — жалюзийная решетка; 5 — шинный мост ВН; 6 — шинный мост НН; 7 — щит низковольтных щитов; 8, 12 — дверь; 9 — щит 10 кВ; 10, 13 — металлические ворота; 11 — кронштейн для низковольтных изоляторов; 14 — подставка изолирующая; 15 — заградительный барьер

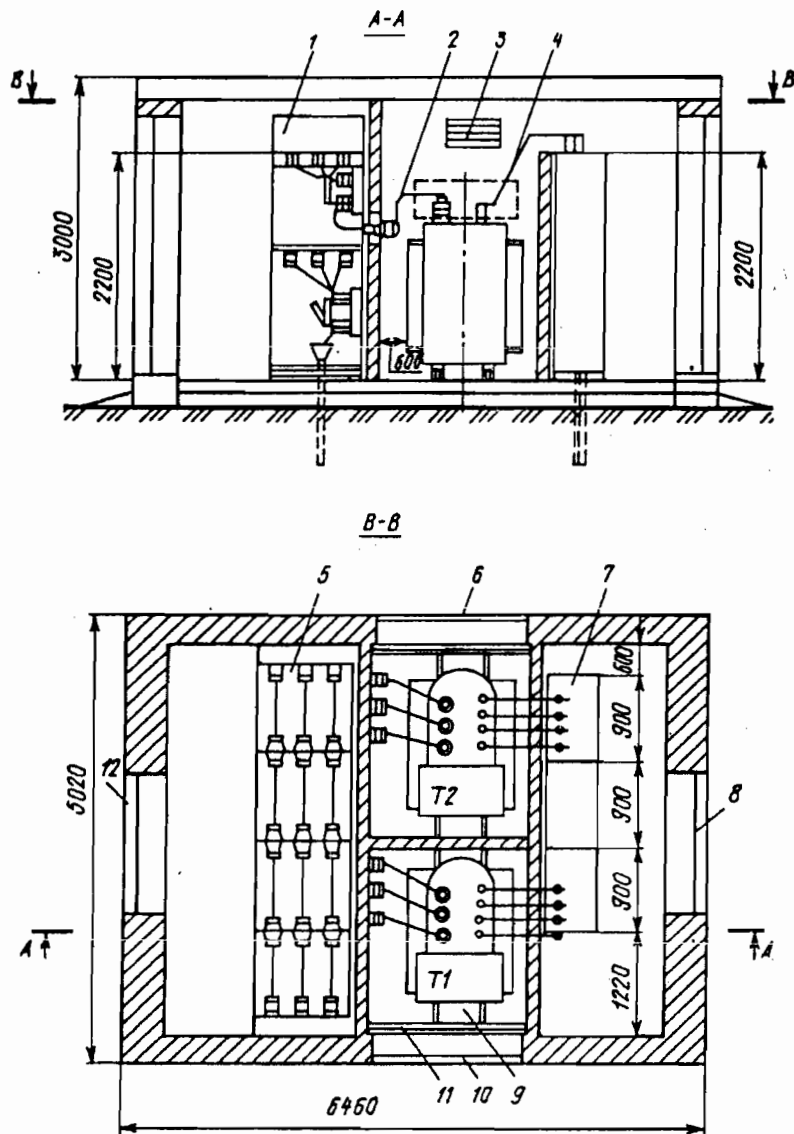


Рис. 12. Габаритные, установочные и присоединительные размеры подстанции ЗТПС-10-2Т2К:

1 – ограждение; 2 – шинный мост ВН; 3 – жалюзийная решетка; 4 – шинный мост НН; 5 – щит 10 кВ; 6, 10 – металлические ворота; 7 – щит низковольтных шкафов; 8, 12 – дверь; 11 – заградительный барьер

КОМПЛЕКТНОСТЬ ПОСТАВКИ

В комплект поставки входят: высоковольтный щит, низковольтный щит, двери, ворота, жалюзи, изоляционная подставка, заградительный барьер, силовой трансформатор (по отдельному заказу), проходные плиты.

ФОРМУЛИРОВАНИЕ ЗАКАЗА

Заказ оформляется в соответствии с опросным листом завода.

Разработчик и изготовитель

ОАО „Люберецкий электромеханический завод”
 140000, ст. Люберцы-2 Московской ж.д.
 Тел.: 558-20-49
 Факс: 554-50-00

информ
электро

Главный редактор Е.Г. Акимов
 Составитель Л.Г. Нахимович
 Технический редактор Г.П. Федорова
 Корректор Д.Б. Соловьев
 График З.В. Дмитриева
 Компьютерная верстка В.А. Ермоленко

ЛР-020744 от 18 марта 1998 г.

105037, Москва Е-37,
 Институт промышленного развития (Информэлектро)
 Телефон для справок 164-59-66.

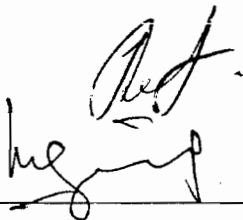
Сдано в набор 16.07.99. Подписано к печати 10.09.99.
 Формат 60x90 1/8. Печать офсетная. Усл.печ.л. 1,0.
 Усл.кр.-стт. 1,12. Уч.-изд.л. 0,82.

По вопросам информации, публикуемых в РУМ, а также их заказа
следует обращаться по телефонам: (095) 374-71-00 или 374-66-09;
по факсу: (095) 374-66-08 или 374-62-40

Подписано в печать

“4” мая 2001 г.

Первый заместитель
Генерального директора



А.С.Лисковец

Ответственный за выпуск

В.И.Шестопапов

Усл. печ.лист
Тираж 275 экз.

Формат 60x84/8
Учетн.-изд.лист 5,8
Зак. № 6

АООТ РОСЭП
111395, Москва, Аллея Первой Маевки, 15
тел 374-71-00, 374-66-09
факс 374-66-08, 374-62-40

МСЛ – 004174