

Глава пятая

ТИПОВЫЕ СХЕМЫ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И РАЗМЕЩЕНИЕ В НИХ ЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ

5.1. СХЕМЫ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НИХ

Типовые схемы сетей электроснабжения. Схемы сетей электроснабжения различаются заземлением источника питания и электрического устройства. Обычно применяют следующие типовые схемы: $TN-C$; $TN-C-S$; $TN-S$; TT ; IT .

Буквы означают следующее:

1-я буква — режим нейтрали источника тока:

T - непосредственное заземление нейтрали;

I - изолированная нейтраль;

2-я буква — состояние доступных проводящих частей относительно земли:

T - корпус электрического устройства непосредственно заземлен;

N - корпус электрического устройства соединен с глухозаземленной нейтралью источника тока;

3-я буква — отношение между проводом нейтрали рабочего заземления N и проводом защитного заземления PE (только для TN - сети);

C-N-провод и *PE*-провод прокладывается как *PEN*-провод (провод рабочего заземления, совмещенный с защитным проводом) от источника тока до электрического устройства;

S-N-провод и *PE*-провод прокладываются отдельно от источника тока до корпуса электрического устройства.

При $TN-C-S$ системе провода *N* и *PE* сначала прокладывают как единый *PEN*-провод от источника тока до электрического устройства и затем делят и прокладывают отдельно. После разделения прокладка обоих проводов вместе не разрешается. На рис. 5.1—5.4 представлены различные схемы сети электроснабжения.

В зависимости от схемы сети по-разному решаются проблемы электромагнитной совместимости. В табл. 5.1 приведены различные схемы сетей с учетом электромагнитной совместимости.

Схему сети необходимо принимать во внимание при выборе и установке ограничителей перенапряжения и разрядников, уравнивающих потенциалы. В трехфазной сети в зависимости от схемы необходимы

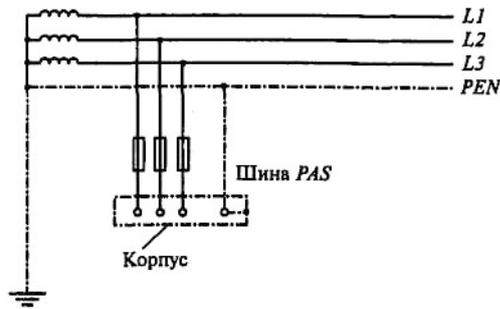


Рис. 5.1. $TN-C$ -сеть: функции нейтрального (N) и защитного (PE) проводников выполняет один PEN -провод

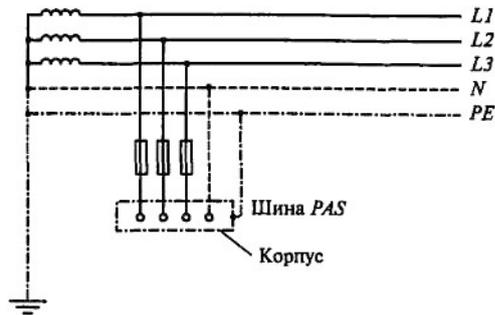


Рис. 5.2. $TN-C$ -сеть: нейтральный (N) и защитный (PE) провода разделены в общей сети

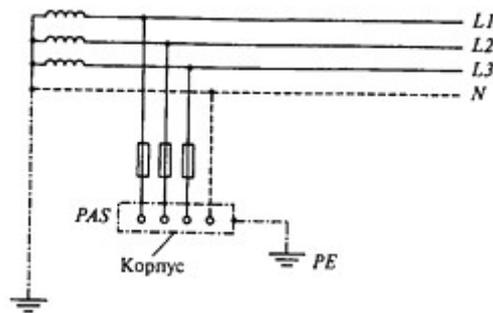


Рис. 5.3. TT -сеть: одна точка заземлена непосредственно (рабочее заземление), корпус электрического устройства соединен с заземлителем отдельно от рабочего заземления

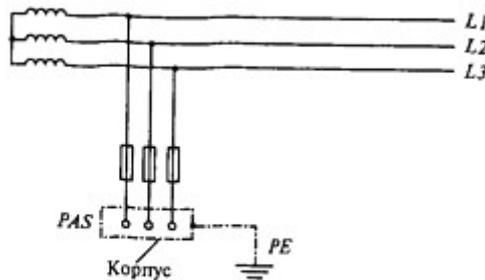


Рис. 5.3. IT-сеть: непосредственная связь между активными проводами отсутствует, корпус электрического устройства заземлен

три или четыре провода для ограничения продольных напряжений в главной части и в следующей части распределительной сети. В двухпроводной системе при питании переменным током два активных провода позволяют двумя или одним разрядником защитить сеть от продольных перенапряжений. Из-за принципиально одинакового

Таблица 5.1. Различные схемы сетей электроснабжения с учетом электромагнитной совместимости

№ п/п	Схема распределительной сети, питающей здание	Схема сети в здании	Рекомендации по обеспечению ЭМС
1	$TN-S$	$TN-S$	Наиболее благоприятная сеть для обеспечения ЭМС
2	$TN-C$	$TN-S$	Рекомендуется сохранить в здании $TN-S$ -сеть. Рекомендуется сохранить $TN-S$ -сеть между этажами и на этажах
3	$TN-C$	$TN-C$	Не рекомендуется сохранять в здании $TN-C$ -сеть из-за большой несимметрии токов
4	$TN-C$	$TN-C-S$	Не рекомендуется $TN-C-S$ -сеть из-за большой несимметрии токов
5	$TN-C$	$TN-C$	Рекомендуется сохранить $TN-C$ -сеть в подвале
6	TT	TT	Рекомендуется учитывать ЭМС информационно-технических устройств в пределах одного здания, не рекомендуется учитывать ЭМС в соединениях между зданиями с информационно-техническими устройствами. Требуется разгрузочный провод
7	TT	Разделительный трансформатор для создания $TN-S$ -сети	Благоприятное решение для ЭМС
8	IT	IT	В России схема обычно не применяется. В настоящее время используется в Норвегии. Справедливы замечания, относящиеся к п.7.
9	IT	Разделительный трансформатор для создания $TN-S$ -сети	Благоприятное решение для ЭМС

подхода к защите двухпроводных линий далее рассматриваются защитные схемы только для трехфазной сети.

Сети электроснабжения разделяют на характерные участки с разными электромагнитными условиями (рис. 5.5):

участок до выводов ВН трансформатора, например, от ВЛ. На этом участке возможны прямые удары молнии. Этот участок принято обозначать *зоной 0*;

участок от выводов НН трансформатора до вводного устройства (панели), называемый *главной распределительной сетью*. На этом участке реализуются электромагнитные условия, соответствующие *зоне 1*;

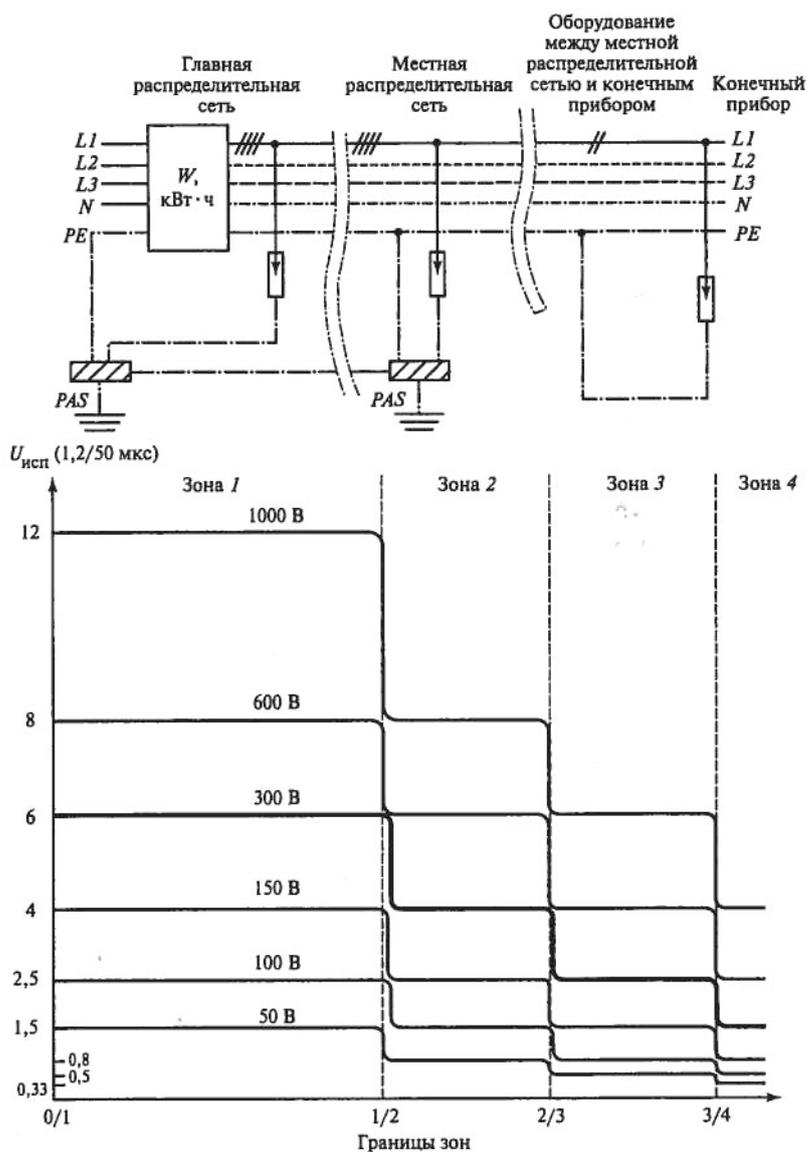


Рис. 5.5. Испытательные импульсные напряжения (1,2/50 мкс) оборудования, расположенного в защитных зонах 1-4 сети электроснабжения

участки от вводного устройства до распределительных панелей. Эти участки принято называть *местной распределительной сетью*. Местная

распределительная сеть имеет электромагнитные условия, характерные для зоны 2;

участки от распределительных панелей до щитков электропитания, устанавливаемых в помещениях здания (зона 3);

участки от щитков электропитания до конечных приборов (зона 4).

На границах зон устанавливаются защитные устройства. Защитные устройства со сложными схемами могут иметь различные входные и выходные характеристики. Таким образом, электромагнитные условия на границе зон могут различаться. Иногда на границах зон специально выделяют ступени защиты. Степень защиты, устанавливаемую на границе зон 0/1, обозначают степенью IV, на границе зон 1/2, - степенью III, на границе зон 2/3, - степенью II, на границе зон 3/4, - степенью I.

Таким образом, сеть электроснабжения может содержать четыре ступени ограничения перенапряжений. Все оборудование, расположенное в зонах между степенями защиты, может подвергаться различным электромагнитным воздействиям.

Остановимся на воздействиях импульсных грозовых напряжений. Электрическая прочность изоляции и нормальное функционирование оборудования, установленного в зонах, должны быть обеспечены при уровнях воздействий, меньших, чем испытательные напряжения.

На рис. 5.5. приведены зависимости испытательных напряжений от зоны и от номинального напряжения оборудования, установленные МЭК, применительно к сетям электроснабжения разных классов напряжения в диапазоне от 50 В до 1 кВ (классы напряжений указаны в столбце «Зона 1»). Для сети 220 В (максимальное напряжение составляет примерно 300 В), кривая на рис. 5.5 выделена жирной линией. Испытательное напряжение для оборудования, установленного в зоне 1, составляет 6 кВ, в зоне 2 – 4 кВ, в зоне 3 – 2,5 кВ и в зоне 4 – 1,5 кВ.

Схема защиты от перенапряжений в $TN-C$ -сети. При $TN-C$ -схеме в главной и местной частях трехфазной сети для продольной защиты от перенапряжений требуются три разрядника. Эти разрядники устанавливаются между фазными проводами и заземленной системой уравнивания потенциалов. При таком включении разрядников требуется также прямое соединение PEN -провода и системы уравнивания потенциалов.

Разрядники на напряжение 230/400 В, применяемые для защиты приборов от поперечных и продольных перенапряжений, по своим характеристикам такие же, как разрядники, применяемые в $TN-S$ -сети. Провод PEN присоединяется к зажиму N .

На рис. 5.6 представлено включение разрядников в $TN-C$ -сети.

Схема защиты от перенапряжений в $TN-S$ -сети. В $TN-S$ -сети провода N и PE прокладываются отдельно, поэтому возможно появление высокой разности потенциалов между этими проводами.

Следовательно, включать разрядники необходимо как между L -проводами и PE -проводом, так и между N и PE -проводами, при этом N -

провод следует рассматривать как активный провод. При питании переменным током в $TN-S$ -сети в качестве продольной защиты от перенапряжений как в главной, так и местной распределительных сетях необходимы четыре разрядника.

В $TN-C-S$ -сети выполняют однократный контакт между PEN -проводом и системой уравнивания потенциалов здания непосредственно в месте установки разрядника главной распределительной сети, т.е. в точке питания здания. В этом случае требуется только три разрядника.

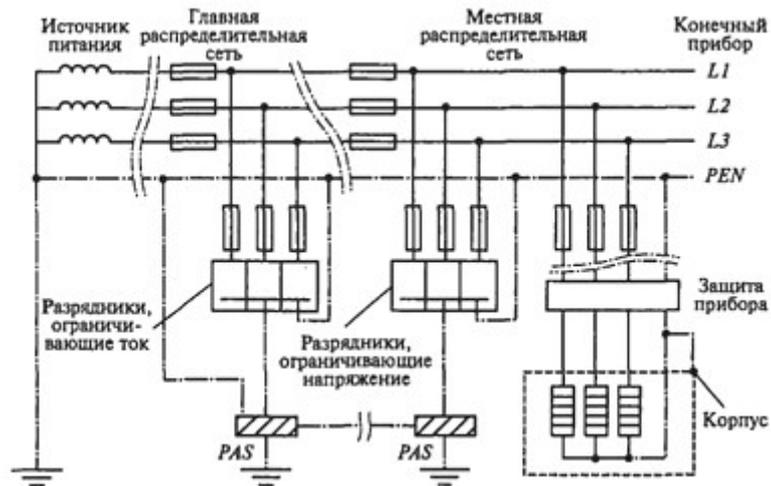


Рис. 5.6. Установка разрядников в $TN-C$ - сети

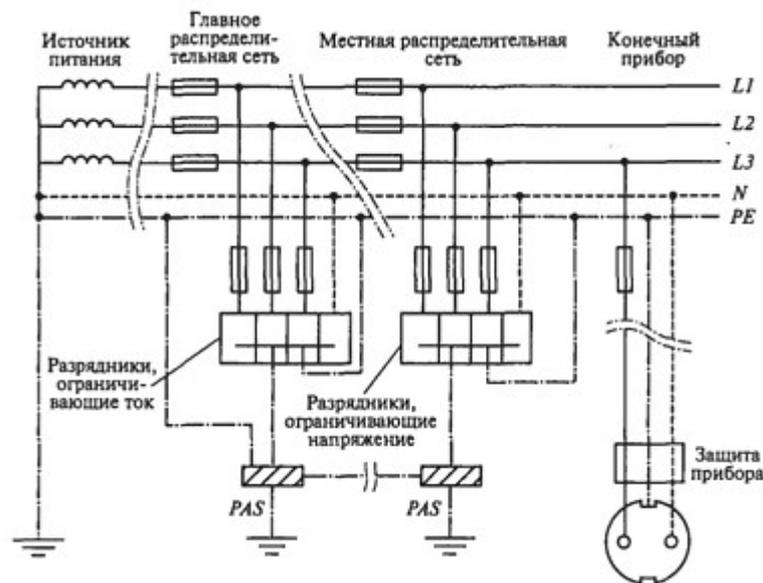


Рис. 5.7. Установка разрядников в $TN-S$ - сети

Защита прибора от поперечных напряжений и, с несколько меньшими возможностями, от продольных перенапряжений показан на рис. 5.23.

Схема установки разрядников в $TN-S$ -сети приведена на рис. 5.7.

Схема защиты от перенапряжений в TT -сети. В TT -сети в распоряжении потребителя находятся четыре провода: $L1, L2, L3$ и N без дополнительного PE -провода. В такой сети обычно устанавливают устройство защиты от тока утечки на землю

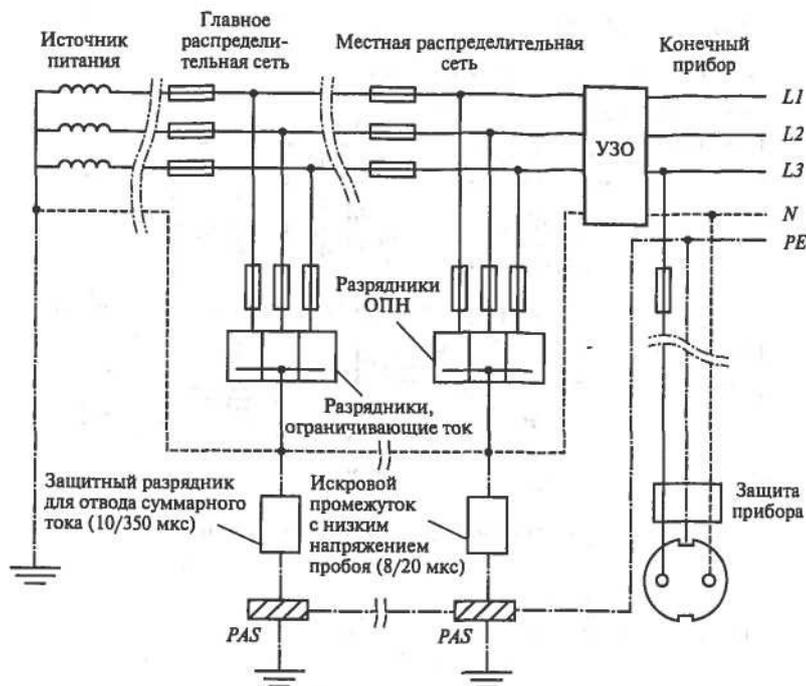


Рис. 5.8. TT -сеть с защитным устройством УЗО

(УЗО) для предотвращения опасных напряжений прикосновения (рис. 5.8). Для предотвращения повреждения или залипания контактов выключателя УЗО, а также для защиты от срабатывания при перегрузке на вводе питающих проводов в здания необходимо устанавливать плавкие вставки (предохранители).

В сетях электроснабжения низкого напряжения в качестве ограничителя перенапряжений используют нелинейные металлооксидные варисторы в виде таблеток. От ОПН высокого напряжения варисторы отличаются простотой выполнения, малыми размерами, дешевизной, удобствами монтажа.

Вследствие старения варисторов и увеличения ожидаемых токов утечки с активных проводов на землю для предотвращения опасных напряжений прикосновения достаточно искрового разрядника. В схеме сети с варистором потребовалось бы применение разделительного выключателя. Известно, что такие выключатели в состоянии пропускать токи 8/20 мкс, но не импульсы тока молнии.

Очень высокие напряжения прикосновения появились бы и при возникновении искрового разряда между проводом L и PE при коротком замыкании. Энергия, которая разрушает разрядник, работающий по принципу искрового разряда, много больше той, которая может повредить изоляцию

кабеля. В настоящее время разрабатываются защитные схемы с повышенной надежностью защиты от опасных напряжений прикосновения.

Обсуждается предложение включить разрядник не между входящими в здание проводами и системой уравнивания потенциалов здания, а между тремя проводами L и нейтральным проводом N (см. рис. 5.8). В этом случае между N -проводом и системой уравнивания потенциалов устанавливается мощный искровой разрядник, способный пропустить суммарный импульсный ток.

В местной сети между L -проводами и нейтральным проводом N должны быть включены варисторы; между проводом N и системой уравнивания потенциалов PAS требуется включение искрового разрядника.

Вследствие незначительной электрической прочности подключенных приборов и устройств это разрядник должен иметь напряжение пробоя меньше, чем грозовой разрядник, установленный в сети питания. В сети 230 В оно должно быть равно 1,5-2 кВ. В этом случае УЗО функционально защищает установку от опасных напряжений прикосновения.

Схема защиты от перенапряжений в IT -сети. Защита от опасных напряжений прикосновения может быть использована и в IT -сети. В этом случае потребитель имеет в распоряжении три провода: $L1, L2, L3$. Сам источник питания не связан непосредственно с потенциалом земли, т.е. изолирован. С помощью устройства контроля изоляции потребитель может непрерывно контролировать изоляцию трех активных проводов и устройства в целом относительно земли.

Токовые разрядники и ОПН могут устанавливаться как в главной распределительной сети, например, питающей здание, так и в местных распределительных сетях. Они включаются между активными проводами $L1, L2$ и $L3$ и заземленной системой уравнивания потенциалов здания. Для защиты от перенапряжений в IT -сети устанавливается также дополнительная защита входных цепей приборов. Схема этой защиты приведена на рис. 5.9, разрядники подключаются к активным проводам и к PE -проводу.

При выборе разрядника необходимо учитывать возможные в будущем присоединения к заземлению в системе. Чтобы предотвратить термические перегрузки при таких присоединениях варисторов, разрядники необходимо рассчитывать на статические разрядные напряжения, возникающие при однофазных замыканиях на землю. Так, в трехфазной IT -сети 380 В нужно использовать разрядник с номинальным напряжением 500 В.

Различные производители в своих каталогах предлагают ограничители перенапряжений специально для IT -сетей.

Устройство защитного отключения при соответствующей установке разрядника, ограничивающего перенапряжения, должно быть отрегулировано на такое значение тока утечки, чтобы не реагировать на физически обусловленные токи утечки варистора.

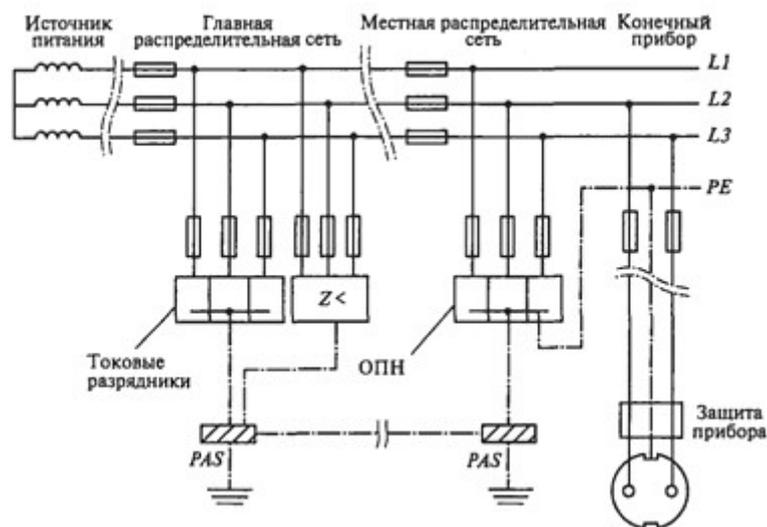


Рис. 5.9. Установка разрядников в ИТ-сети

Совместная работа с УЗО. Чтобы предотвратить возникновение опасного напряжения прикосновения, в сетях различной конфигурации устанавливается разный ток утечки, на который реагирует УЗО. В местной распределительной сети необходима настройка УЗО по току утечки разрядников, ограничивающих перенапряжения. Благодаря тому, что импульсный ток перед УЗО стекает на землю через систему уравнивания потенциалов, УЗО защищено от воздействия импульсного тока. Дефекты, такие как сваривание контактов, в УЗО не возникают. Кроме того, чувствительное УЗО не подвергается воздействию импульсного тока и не срабатывает, т.е. не отключает питание. Этим достигается высокая работоспособность устройства.

Установка УЗО перед варистором в местной распределительной сети целесообразна потому, что УЗО контролирует токи утечки, протекающие через варистор и систему уравнивания потенциалов. Обычно в цепи варистора устанавливается предохранитель. Вследствие токов утечки варистор может нагреваться. Если варистор слишком нагрет, то он отделяется от сети с помощью специального теплового расцепителя. Дополнительный контроль с помощью УЗО не требуется. Однако ни в коем случае контроль токов утечки в варисторе не следует возлагать только на УЗО.

Современные УЗО устойчивы к току. Существуют УЗО, которые не срабатывают при токе во многие сотни ампер, и даже несколько килоампер (8/20 мкс). В схемах с ОПН должны использоваться УЗО, стойкие к воздействиям токов.

На рис. 5.10 представлена схема электропитания, с варисторами и УЗО. Три провода $L1, L2$ и $L3$, нейтральный провод и четыре варистора объединяются в мостовую схему, с одной стороны связанную с землей. К заземленной точке подходит провод уравнивания потенциалов. Четырехзвенный мост образует источник питания варисторов и четырехполюсного УЗО, которое включено после варисторов.

Заземление разрядников и защищаемого устройства. Изготовители разрядников дают технические параметры варисторов для распределительных сетей, а также значения остающихся напряжений на варисторах при установленных токовых воздействиях. Было бы желательно, чтобы эти токи совпадали с номинальным током варистора.

В действительности ожидаемое остающееся напряжение зависит не только от типа варистора, но и от места его установки в электрической сети, а также от выполнения заземления защищаемого объема (защищаемого устройства) и варистора. Токвый разрядник и варистор включаются обычно в распределительной сети электроснабжения между активным проводом L или нейтральным проводом N и заземленной системой уравнивания потенциалов.

Провод L , по которому протекают токи переходных процессов, подсоединен к проводу, идущему к варистору (рис. 5.11). Второй провод идет от разрядника к шине уравнивания потенциалов PAS . Эти провода имеют индуктивные сопротивления L_{a1} и L_{a2} . При протекании тока при переходном процессе в цепи создается дополнительное напряжение

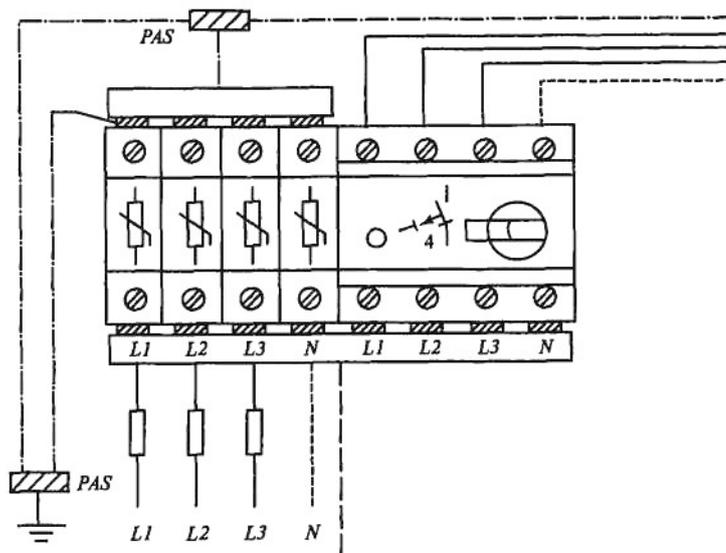


Рис. 5.10. Мостовая схема с четырьмя варисторами и УЗО

$$U_{Z1} = L_{a1} \frac{di}{dt} + R_{a1} I_{\max}$$

В цепи со вторым проводом возникает напряжение

$$U_{Z2} = L_{a2} \frac{di}{dt} + R_{a2} I_{\max}$$

При сложении этих напряжений определяется указываемое изготовителем остающееся напряжение

$$U_{ост} = U_a + U_{Z1} + U_{Z2}.$$

Для варистора с номинальным током (8/20 мкс), равным 15 кА, вместе с двумя соединительными проводами из меди длиной по 1 м общее напряжение $U_{ост}$ составило бы 5,5 кВ при $U_a \leq 1,5$ кВ.

При таком рассмотрении вклад активного сопротивления проводов в остающееся напряжение пренебрежимо мал.

Расчет возникающего при установке разрядника остающегося напряжения еще раз подчеркивает высказанную ранее

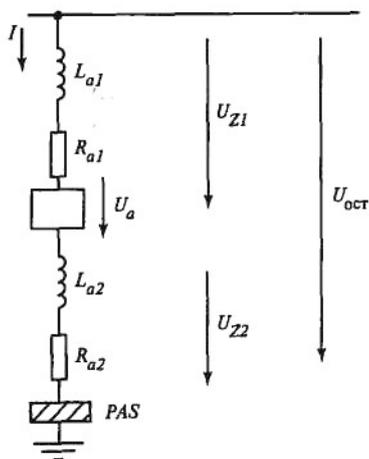


Рис. 5.11. Возникновение дополнительного напряжения

мысль, что токовый разрядник, вследствие большой амплитуды тока молнии имеет недостаток — большое остающееся напряжений. Поэтому защита от перенапряжений при больших амплитудах отводимого через разрядник тока и малых временах фронта всегда должна быть, по крайней мере, двухступенчатой.

Снижение дополнительного напряжения можно достигнуть расщеплением провода, идущего к разряднику (рис. 5.12). При таком выполнении подключения при пренебрежении активными сопротивлениями проводов в остающееся напряжение вносит вклад индуктивность L_{a2} и возникает дополнительное напряжение U_{Z2} .

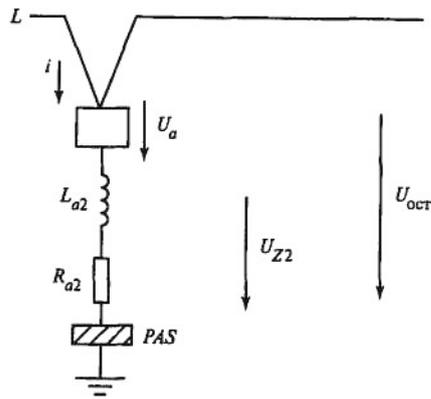


Рис. 5.12. Возникновение дополнительного напряжения U_{Z2}

Дополнительное напряжение также возникает, если ОПН соединяется с заземленной точкой системы уравнивания потенциалов защищаемого объекта (электронного прибора). Так как переходный ток ограничителя через заземляющий провод проходит сначала через шину PE электронного прибора и затем уходит в землю, то перенапряжение между активными проводами и PE -потенциалом электронного прибора прямо зависит от расстояния между разрядником и защищаемым объектом (рис. 5.13). С каждым удвоением этого расстояния также удваивается значение перенапряжения. Защитное действие варистора становится частичным или совсем утрачивается.

Дополнительное напряжение также возникает, если разрядник и защищаемый электронный прибор отдельно, как показано на рис. 5.14, заземлены с общей точкой заземления. Перенапряжение между тремя активными проводами и PE -потенциалом электронного прибора зависит в этом случае от расстояния между опорной точкой разрядника и общей точкой.

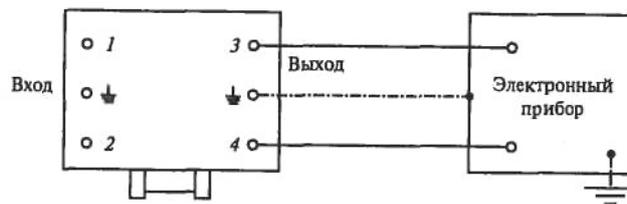


Рис. 5.13. Неверно выполненное заземление защиты от перенапряжений и защищаемого электронного прибора

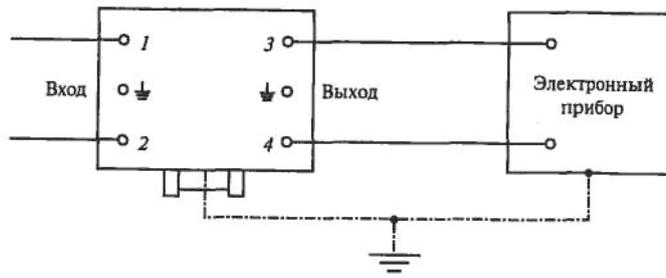


Рис. 5.14. Неправильное заземление ограничителя перенапряжений и защищаемого электронного прибора

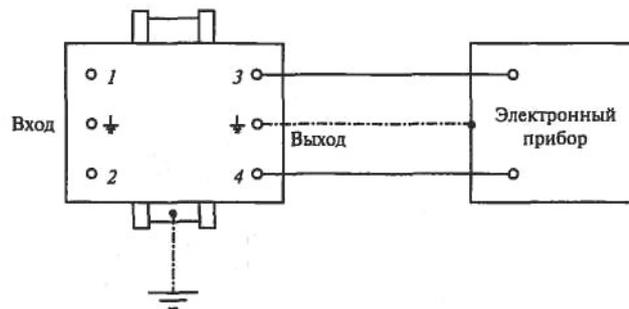


Рис. 5.15. Правильное заземление ограничителя перенапряжений и защищаемого электронного прибора

Здесь также удвоение длины проводов между опорной точкой разрядника и общей точкой дает примерно удвоение перенапряжения. Потенциал, возникающий на разряднике за счет переходных токов, протекающих по проводу до точки заземления, согласно закону индукции равен

$$U = L \frac{di}{dt} \quad (5.1)$$

Ток по второму проводу возвращается в общую точку. Потенциал шины PE электронного прибора равен индуктированному напряжению. Как уже отмечалось в первом примере (см. рис. 5.12), действие ограничителя перенапряжений ослабляется или теряется полностью.

По-другому работает схема, представленная на рис. 5.15. Защищаемый электронный прибор связан с потенциалом земли не непосредственно, а через опорную точку ОПН. Разность потенциалов между шиной PE электронного прибора и активными проводами соответствует разности потенциалов между землей и активными проводами. Высокая разность потенциалов между опорной точкой ОПН и шиной уравнивания потенциалов не оказывает влияния на электронный прибор. Увеличение расстояния между ОПН и защищаемым объектом не изменяет перенапряжения на электронном приборе, так как через

провод заземления переходный ток на изолированный электронный прибор не попадает.

В то время как система уравнивания потенциалов, описанная ранее, должна выполняться по возможности сеточной, чтобы уменьшить разность потенциалов между двумя любыми точками, защищаемые объекты к этой системе должны присоединяться звездообразно расположенными проводами. Перед центральной точкой звезды располагаются, прежде всего, ОПН, а затем на одном из лучей звезды - защищаемые электронные приборы. Для снижения стоимости, экономии места и эффективного расположения необходимо предусмотреть последовательную установку ОПН, используя, по крайней мере, два зажима *PE*. На рис. 5.16 показана звездообразная схема соединения электронных приборов, защищенных варисторами, работающая совместно с сеточной системой уравнивания потенциалов.

Импульсы испытательных токов и напряжений. Импульс испытательного тока при коммутациях регламентирован нормами МЭК-60-1. На рис. 5.17, а представлен импульс испытательного тока 8/20 мкс. Этот импульс в некоторых нормативных документах обозначается как импульс 6,4/16 мкс. При этом длительностью фронта считается интервал времени между значениями тока 0,1 и 0,9, а за длительность импульса принимается интервал времени между значениями тока 0,5 максимального, расположенными на восходящей и нисходящей частях кривой импульса (рис. 5.17, б).

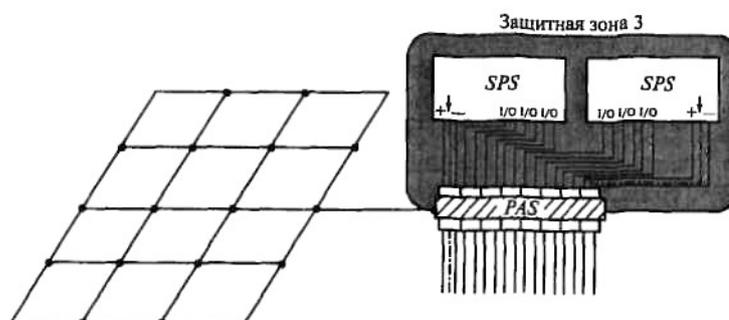


Рис. 5.16. Соединение электронных приборов, снабженных ограничителями перенапряжения с системой уравнивания потенциалов

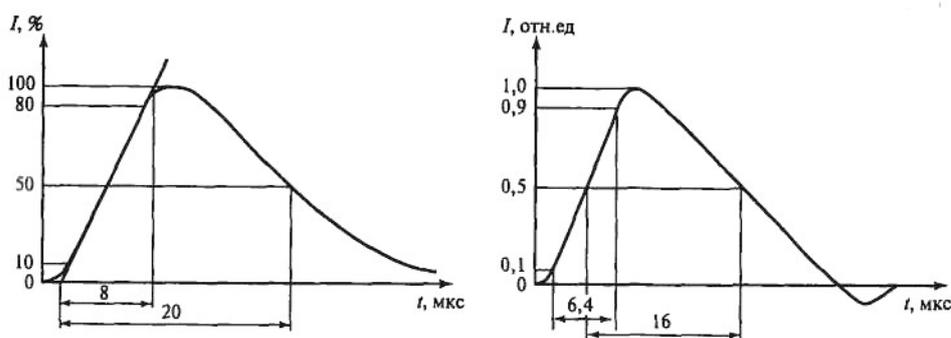


Рис. 5.17. Импульсы испытательных токов:

a - 8/20 мкс; *б* - 6,4/16 мкс

Длительность фронта импульса 8/20 мкс определяется с помощью вспомогательной прямой, проведенной по точкам, соответствующим 10 и 90 % максимального значения тока. Разница во временах при пересечении этой прямой с осью абсцисс и горизонтальной прямой, проведенной через точку максимума, должна составлять 8 мкс. Допуск на длительность фронта составляет $\pm 10\%$ ($\pm 0,8$ мкс). Длительность импульса определяется как время от условного начала импульса до момента уменьшения импульса до 50 % максимального значения. Длительность стандартного испытательного импульса составляет 20 ± 2 мкс. Аналогично характеризуются и другие импульсы испытательных токов, например импульсы 8/80; 10/350; 0,25/100 мкс.

Импульс 8/20 мкс непосредственно не связан с током молнии. Он появляется при перекрытии изоляции в результате грозových перенапряжений или срабатывания разрядников, нелинейных ОПН. Его фронт и длительность формируются переходными процессами.

Импульсный ток принято выражать в процентах максимального значения. С помощью стандартного импульса 8/20 мкс определенной амплитуды характеризуют способность разрядников выдерживать токовые нагрузки. Выдерживаемый обычно указывается изготовителем в паспорте разрядника.

Нормированные грозовые импульсы испытательных токов различаются при разных полярностях заряда грозового облака. При отрицательном заряде немецкими индустриальными нормами DIN 48810 установлен импульс тока первой вспышки 8/80 мкс. Импульс тока повторной вспышки при отрицательно заряженном облаке 0,25/100 мкс. Импульс тока молнии, развивающейся с положительно заряженного облака, установленный нормами МЭК, имеет длительность фронта 10 мкс и время спада до 50 % максимального значения — 350 мкс. Этот импульс обозначается 10/350 мкс.

На рис. 5.18 дано сравнение типичных испытательных импульсов тока (амплитуда 50 кА — импульс 10/350 мкс и импульс 8/80 мкс, а также импульс 8/20 мкс амплитудой 15 кА). Различные площади, ограниченные кривыми, наглядно демонстрируют различие в требованиях, предъявляемых к разрядникам при положительной и отрицательной полярностях. Заряд при импульсе 10/350 мкс примерно в 20 раз превышает заряд при импульсе 8/20 мкс. Поэтому важно сравнивать не только амплитуды, но и учитывать форму импульсов. Например, варистор не способен выдерживать токи 50 кА 10/350 или 8/80 мкс, но выдержит такой ток при импульсе 8/20 мкс.

Разрядники могут выдерживать токи, несущие большую энергию.

Важной характеристикой защитных элементов является падение напряжения на них. Если речь идет о разряднике, то это падение напряжения в приэлектродных зонах и на канале разряда. Для варистора важным является

остающееся напряжение во много раз больше, чем падение напряжения на разряднике при соизмеримых токах.

При испытаниях изоляции на электрическую прочность принят импульс перенапряжений 1,2/50 мкс (МЭК-60-1). Этот импульс показан на рис. 5.19, а. Длительность фронта определяется так же, как и на рис. 5.17, а, однако используются точки 30 и 90 %. Длительность импульса принимается как время спада напряжения до 50 % максимального значения. Обычно напряжение определяется в процентах максимального значения. Этот импульс обозначается 1/50 мкс, если интервалы времени обозначить как на рис. 5.17, б.

При сравнении разрядников остающееся напряжение определяется при одном и том же токе.

Во многих публикациях при рассмотрении переходных токов и напряжений используются упомянутые выше нормированные формы импульсов. Эти формы импульсов очень важны как для расчетов возникающих перенапряжений, так и для определения рассеиваемой энергии в разрабатываемых разрядниках и ОПН.

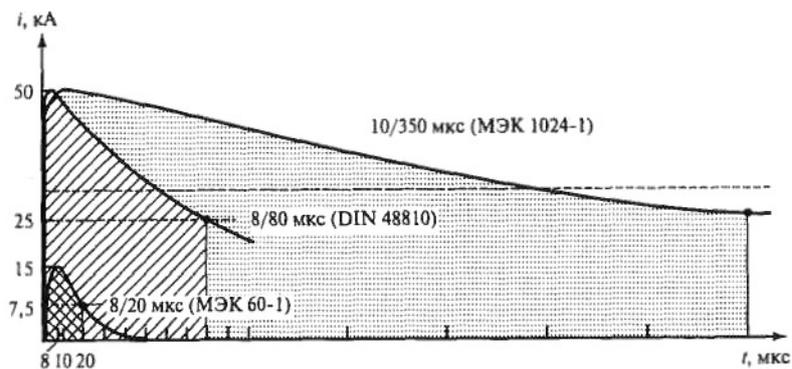


Рис. 5.18. Формы импульсов испытательных токов

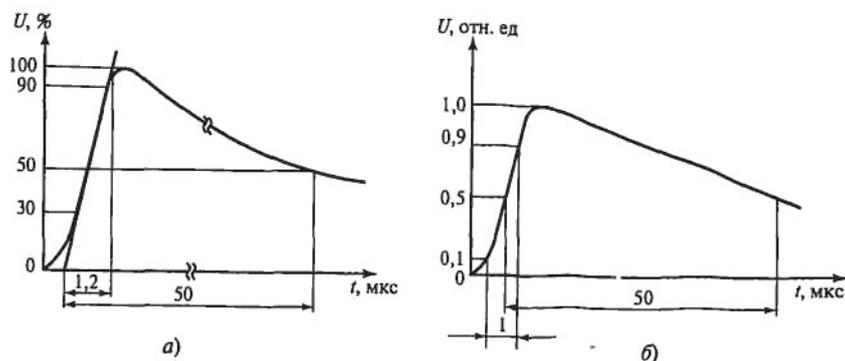


Рис. 5.19. Формы импульсов перенапряжений:
а - 1,2/50 мкс; б - 1/50 мкс

Кроме того, на их основе определяются остающиеся напряжения в зависимости от времени срабатывания разрядника. По времени нарастания амплитуды импульса тока можно определить крутизну di/dt .

Если известны индуктивность проводов и схема их прокладки или элементы, обтекаемые током, то по закону индукции напряжение на проводе с индуктивностью L можно определить по формуле (5.1).

Речь идет о динамическом процессе, который должен отображать формы импульсов тока.

Для характеристики мощности ОПН решающим является не только максимальный протекаемый ток, но и время, в течение которого ток протекает через ограничитель. На характеристике ток - время, которую можно представить графически, площадь представляет собой заряд

Для сравнительных рассмотрений применяется другая характеристика - интеграл

Эту энергию предпочтительно использовать для оценки нагрева защищаемого устройства или прибора при известном активном сопротивлении цепи, по которой протекает ток.

5.2. СХЕМЫ ЗАЩИТ СЕТЕЙ ОТ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Варисторы и ограничительные диоды имеют относительно высокую емкость. Они образуют совместно с индуктивностями проводов и развязывающими индуктивностями фильтр низких частот (рис. 5.20). При частотах полезного сигнала примерно до 30 кГц применение обычных ограничителей не вызывает трудностей. При более высоких частотах демпфирующее действие ОПН становится большим и наступает искажение полезного сигнала или даже его подавление.

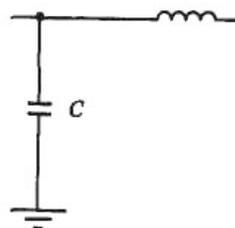


Рис. 5.20. Фильтр низких частот

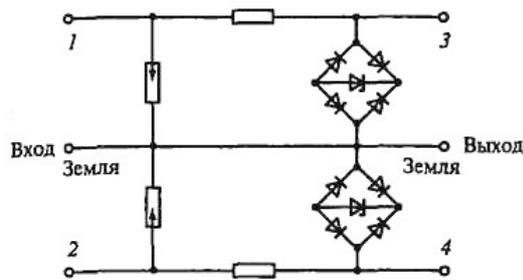


Рис. 5.21. Мостовая схема с малой емкостью

Устройства для передачи сигналов с большими частотами выполняются без варисторов. Кроме того, оказывает влияние демпфирование в цепях, в которых вместо развязывающей индуктивности использовано активное сопротивление. Такие устройства можно использовать при передаваемых частотах от нескольких сотен килогерц до нескольких мегагерц.

Если передаваемая частота превышает указанный предел, то возможно применение двухступенчатого ограничителя, имеющего мостовую схему (рис. 5.21). В зависимости от механической конструкции эту схему можно заключить в корпус. При этом можно достичь частоты до 200 МГц при затухании 3 дБ. При использовании одноступенчатого газонаполненного разрядника возможна передача сигналов частотой выше 1 ГГц.

Защитный уровень такого разрядника зависит от статического разрядного напряжения и от вольт-секундной характеристики. Все защищаемые элементы на входе (антенна, интерфейс данных) в этом случае должны иметь электрическую прочность при импульсе 1,2/50 мкс выше 1 кВ.

В более полной концепции защиты от перенапряжений стремятся к трехступенчатой системе с индуктивными развязывающими элементами. Лишь при наличии высокочастотных ответвлений переходят к двухступенчатой схеме с активными развязывающими элементами или к одноступенчатому разряднику.

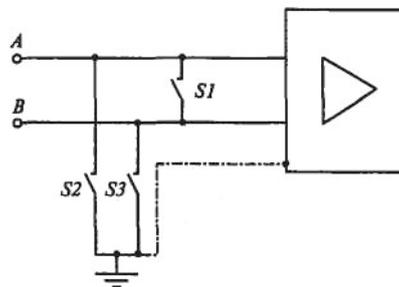


Рис. 5.22. Короткозамыкатели в электронном устройстве

Любой разрядник в соответствии с принципом работы требует времени для срабатывания. Переходные процессы с крутым нарастанием напряжения приводят к возрастанию напряжения срабатывания разрядника. Остающееся

напряжение является важнейшим параметром при выборе разрядника. Для сравнения разрядников используется импульс напряжения крутизной 1 кВ/мкс или импульс 1,2/50 мкс.

Чтобы защитить электрические и электронные приборы от разрушения из-за перенапряжений и предотвратить этим самые сильные переходные токи, необходимо использовать защитные схемы, способные быстро реагировать на сильные токи и дополнительно создавать низкий уровень остающихся напряжений. Так как переходные перенапряжения имеют малое время нарастания в микросекундном и наносекундном диапазоне, то необходимы элементы с очень малым временем срабатывания, чтобы осуществить защитные мероприятия уже на фронте и тем самым снизить остающееся напряжение. С помощью таких элементов можно быстро осуществить уравнивание потенциалов, т.е. организовать короткое замыкание активных проводов друг с другом или на землю.

На рис. 5.22 схематически показано электронное устройство с симметричной схемой электропитания, корпус которого соединен с системой уравнивания потенциалов, имеющей потенциал земли.

Между каждым активным проводом и землей, а также между обоими активными проводами находятся короткозамыкатели S . Если, например, на провод A воздействует перенапряжение, то возникает разность потенциалов как между проводами A и B , предназначенными для рабочего напряжения, так и между проводом A и землей. При замыкании выключателя $S1$ происходит выравнивание потенциалов между проводами A и B . Возникающее при этом короткое замыкание приводит к исчезновению напряжения между ними. Электронное устройство, таким образом, не чувствует перенапряжения после замыкания.

После замыкания выключателя $S2$ создается короткое замыкание между проводом A и землей. Переходные токи, протекающие по этому пути, отводятся в землю, и через электронное устройство не протекает кратковременный ток. Одновременно замыкается выключатель $S3$, включенный между проводом B и землей. Возможно протекание части тока после срабатывания выключателя $S1$ из проводника A в проводник B , а также в землю.

Эффективная защита от перенапряжений требует установки разрядников, согласованных по мощности и с параметрами системы. Эта установка должна производиться квалифицированно. Разрядник, как таковой, не в состоянии обеспечить требуемый уровень защиты. После того, как подходящий разрядник выбран, правильно установлен при соблюдении важнейших указаний по установке, задачи можно считать выполненными. Указания по установке разрядников рассматриваются ниже. Кроме того, необходимо соблюдать указания изготовителя.

Для сетей электропитания выпускаются разрядники от двух- до четырехфазного исполнения как выполненные в одном корпусе, так и модульного одноканального исполнения. Они должны устанавливаться с

предохранителями на случаи перегрузки током молнии или током КЗ трансформатора.

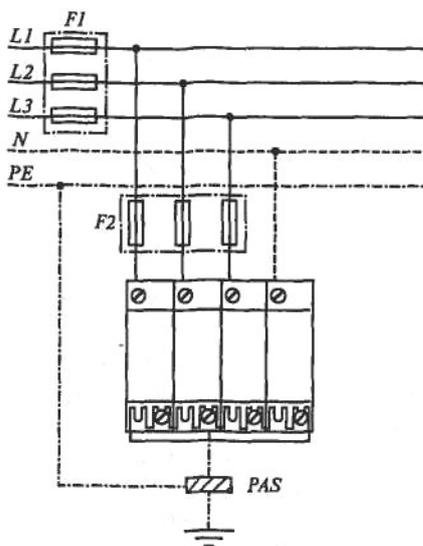


Рис. 5.23. Схема с предохранителями $F2$, включенными последовательно с разрядниками

Предохранитель требуется и на случай КЗ при токах, больших, чем токи, которые разрядник способен отключить самостоятельно из-за износа электродов при частых срабатываниях или при выделении в нем большой энергии. Предохранители $F2$ в схеме на рис. 5.23 требуются лишь тогда, когда превышаются данные изготовителя для максимального тока предохранителя $F1$. Рекомендуется выбирать предохранители $F1$ и $F2$ учетом селективности. Это значит, что отношение токов для них должно быть 1:1,6, т.е. $F1$ должен иметь ток срабатывания на две ступени выше, чем $F2$. Если $F2$ сработает из-за большого тока КЗ трансформатора, то установка остается в работе благодаря не сработавшему $F1$.

Для обеспечения селективности срабатывания $F2$ необходимо оценить, какой ток КЗ ожидается при срабатывании разрядника. Это можно сделать с помощью табл. 5.2. Она дает ответ на вопрос, какие предохранители следует выбрать при срабатывании разрядника в соответствии с током КЗ (какой из предохранителей должен сработать, а какой не должен).

Таблица 5.2. Ток КЗ и минимальная уставка предохранителей при использовании разрядников с выдуванием дуги на пластину

Ожидаемый ток КЗ, кА	Реальный эффективный ток КЗ, кА, при номинальном напряжении		Минимальная уставка предохранителей, А, при номинальном напряжении	
	400 В	230 В	400 В	230 В
4,0	-	2,0	-	125
3,5	2,4	1,8	125	100

3,0	2,0	1,5	125	100
2,5	1,7	1,3	100	80
2,0	1,4	1,0	80	63

При этом становится ясным, реализуется ли селективность срабатывания предохранителей $F1$ и $F2$.

Пример. При определенной конструкции разрядника ожидаемый ток КЗ составляет 3,5 кА (2-я строка) в сети 400 В, реальный ток КЗ — 2,4 кА, а в сети 230 В — 1,8 кА. Наименьшее значение — результат влияния на ток КЗ установленного оборудования и разрядника. Реальные токи КЗ требуют применения для разрядника указанного типа в сети 400 В предохранителя на 125 А, а в сети 230 В — на 100 А.

На рис. 5.24 можно видеть, что ток 3,5 кА через разрядник спустя 8,1 мс самостоятельно гасится, включенный предохранитель на 125 А не срабатывает. По восстанавливающемуся напряжению синусоидальной формы после гашения дуги в разряднике видно, что предохранитель не сработал.

Если разрядник не в состоянии самостоятельно отключить сопровождающий ток и одновременно предохранитель имеет слишком высокую уставку, то гашение дуги сопровождающего тока происходит слишком поздно, и разрядник разрушается. Этот процесс показан на рис. 5.25 в опыте с разрядниками устаревших конструкций.

Самостоятельное гашение дуги сопровождающего тока в разряднике без срабатывания предохранителя позволяет обеспечить высокую надежность электроснабжения приборов и устройств. Само собой разумеется, что предохранитель при высоких токах молнии, например, при 30 кА и импульсе 10/350 мкс будет разрушен.

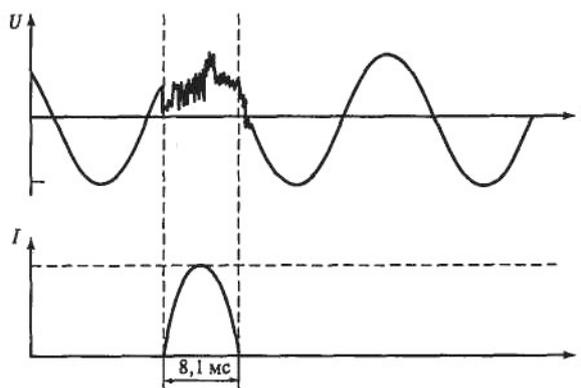


Рис. 5.24. Разрядник отключает ток КЗ самостоятельно

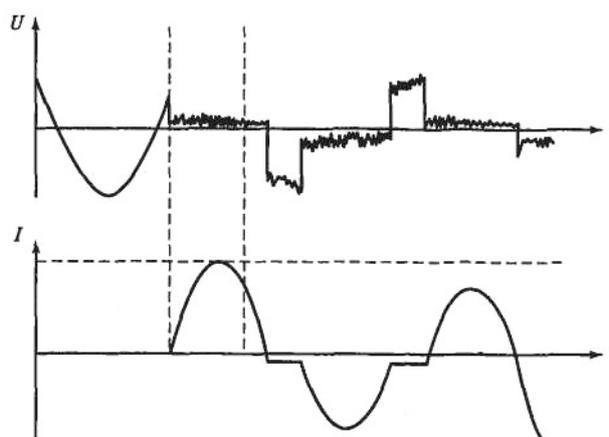


Рис. 5.25. Разрядник не гасит дугу сопровождающего тока

Во время разрушения образуется дуга. Более короткие импульсы (например, 8/80 мкс) или меньшие по амплитуде импульсы 10/350 мкс не разрушают предохранители в питающей сети или в цепи разрядников. В этом случае энергии грозового импульса тока недостаточно, и для разрушения предохранителей необходима энергия источника питания (энергия короткого замыкания трансформатора). Дугогасительная возможность разрядника и устойчивость предохранителя и провода, идущего к системе уравнивания потенциалов, очень важны. Максимальное сечение плавного предохранителя, включаемого последовательно с разрядником, указывается изготовителем. В соответствии с рекомендациями МЭК медный провод, идущий от разрядника к системе уравнивания потенциалов, должен иметь площадь сечения не менее 16 мм².

При срабатывании разрядника, функционирующего на принципе зажигания разряда между электродами, возникают выбросы горячего газа. Это явление не слишком опасно, но его необходимо учитывать. Существуют некоторые рекомендации отдельных изготовителей по устранению влияния выбросов газа на части, находящиеся под напряжением или на горючие материалы. На рис. 5.26 показано размещение модульных разрядников в трехфазной системе с безопасным выбросом, при котором разрядники P располагаются так, чтобы в зоне выброса отсутствовало оборудование, для которого опасны эти выбросы (зона выброса расположена ниже разрядников P).

Ограничители перенапряжений для защиты от продольных напряжений в распределительной сети на базе варисторов монтируются на шине с присоединением активных проводников и проводов системы уравнивания потенциалов. Если изготовитель задает максимально допустимое значение тока предохранителя ограничителя перенапряжений, превышающее значение тока через F^1 (см. рис. 5.23), то в провод, идущий к ограничителю, включается дополнительный предохранитель F^2 с большим допустимым током.

Комбинированные защитные устройства содержат, как правило, ступени тонкой (ограничительный диод или варистор) и грубой (разрядник) защиты. Часто применяются трехступенчатые защитные устройства со схемой, показан на рис. 5.27.

Отдельные ограничивающие элементы отделяются друг от друга полными сопротивлениями Z_1 и Z_2 . В информационно-измерительной сети Z_1 и Z_2 - активные сопротивления порядка 10 Ом. В сети электроснабжения это либо катушки индуктивности (примерно 10 мкГн), либо провода длиной от 5 до 15 м.

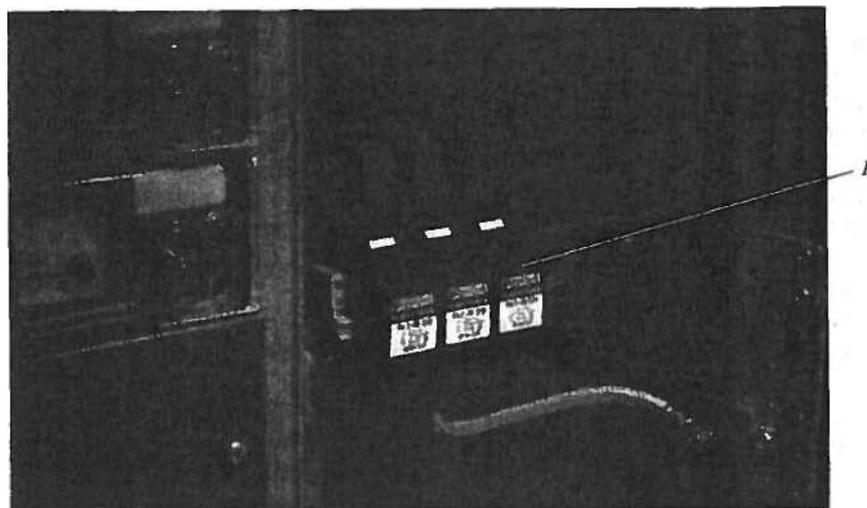


Рис. 5.26. Установка разрядника с газовым выбросом в распределительном

При воздействии импульса перенапряжения на такое устройство первой срабатывает тонкая защита (диод D). Так как ограничительный диод не способен пропускать большой импульсный ток, при возрастании падения напряжения на сопротивлении Z_2 ток начинает протекать через варистор B . Увеличение напряжения на сопротивлениях Z_1 и Z_2 приводит к срабатыванию грубой защиты — разрядника P . В комбинированном устройстве решается проблема рассеиваемой в нем энергии при воздействии импульса перенапряжения. Только незначительная часть импульсного тока протекает через тонкую ступень защиты.

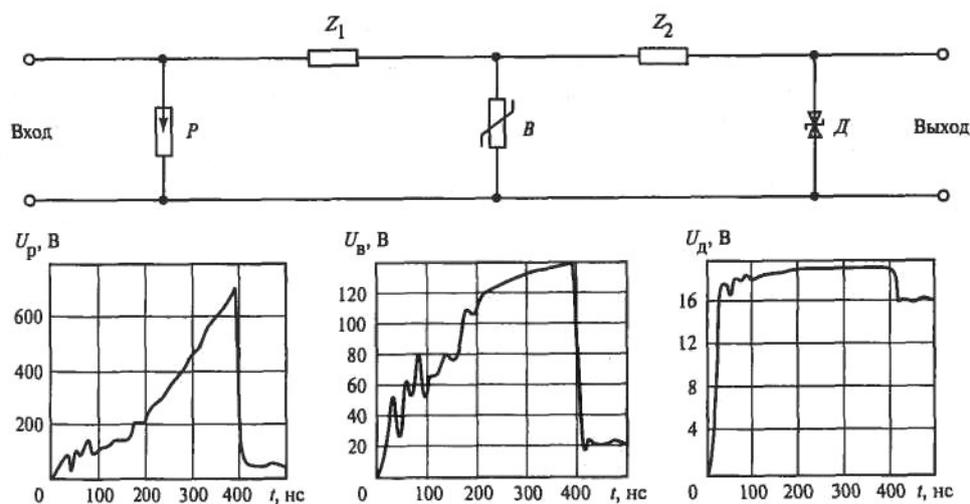


Рис. 5.25. Трехступенчатое защитное устройство и характерные напряжения на его элементах

Работа варистора B облегчается при срабатывании разрядника из-за малого значения его остающегося напряжения.

В комбинированном устройстве реализуется существенное снижение перенапряжения или кондуктивной помехи. Напряжение на выходе такого устройства может быть снижено примерно до 10-20 В при входном импульсном напряжении порядка 1 кВ, что наглядно продемонстрировано на рис. 5.27.

Как уже отмечалось, провода, идущие к разряднику и от разрядника к системе уравнивания потенциалов, выбираются в соответствии с указаниями изготовителя. Они не должны иметь сечение медного провода менее 16 мм². Если речь идет о проводе уравнивания потенциалов, который не используется для уравнивания потенциалов при токе молнии, то допускается минимальное сечение медного провода 6 мм².

Разрядник, встроенный в прибор, подключается к проводам системы электропитания на некотором расстоянии от входных элементов прибора. При этом соблюдается следующий принцип: элементы, ограничивающие продольное напряжение, должны ограничивать и поперечное напряжение. При установке этого разрядника необходимо обращать внимание на максимально допустимые номинальные токи, так как рабочий ток проходит через защитное устройство. Схема защиты прибора приведена на рис. 5.28.

Координация параметров разрядников в сети низкого напряжения.

В описанной ранее схеме функционирования многоступенчатой защиты с разрядником элементы не должны быть связаны друг с другом. Для развязки можно использовать резисторы или катушки индуктивности. Таким же образом должны быть развязаны элементы и в сети низкого напряжения, т.е. требуется координация параметров разрядников. Катушки индуктивности пригодны для развязки лишь в редких случаях, так как для передачи большого длительного тока катушки должны иметь большое сечение провода.

Лишь при длительных токах до 60 А в сети питания можно использовать развязывающие элементы серийного изготовления. При выборе катушек нужно иметь в виду, что при слишком большой индуктивности высокое падение напряжения на развязывающей катушке приведет к частым повторным пробоям разрядника. Для развязки следует использовать только воздушные катушки, так как катушки с железом при больших токах насыщаются, в результате чего снижается их индуктивность. Поэтому использование индуктивности для развязки ограничено. Катушка, включаемая как показано на рис. 5.29, должна иметь индуктивность от 7-15 мкГн.

В большинстве случаев в качестве развязывающих элементов используются провода электроснабжения главной распределительной сети, местной распределительной сети или провода между местной сетью и конечным прибором.

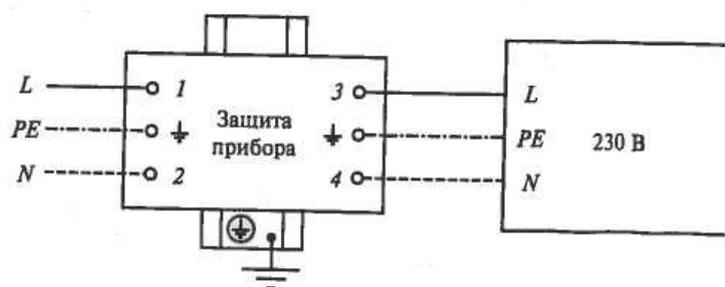


Рис. 5.28. Защита от перенапряжений при однофазном питании

Длины проводов должны быть такими, чтобы в нормальном режиме ожидаемая крутизна тока di/dt переходных процессов обеспечивала достаточное падение напряжения. Перегрузка защитного элемента должна быть такой, чтобы при переходных процессах в наиболее прочном элементе выделялась допустимая энергия. Расчеты и эксперименты показали, что между грозвым разрядником и ОПН длина проводов должна составлять примерно 10 м, а между ОПН в сети и защитой прибора — не менее 5 м. Любой металлический провод имеет собственную индуктивность, которая играет роль индуктивности развязки, вместо катушки индуктивности в предыдущем случае. Для подтверждения этого можно сравнить рис. 5.29 и 5.30.

Функция защитной схемы — координация параметров ее элементов. Например, ограничительный диод бессмысленно координировать с разрядником. Вторая ступень защиты за разрядником может реализоваться мощным варистором, выдерживающим ток не менее 10 кА (8/20 мкс). Третья ступень, если она требуется, должна располагаться от защищаемого прибора не менее чем в 5 м от сети питания.

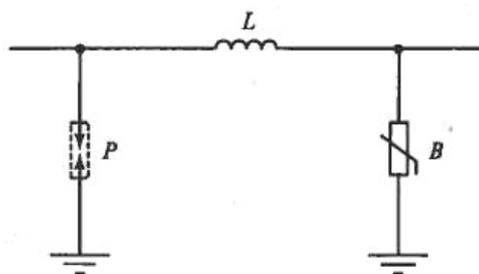


Рис. 5.29. Развязка между разрядником и варистором

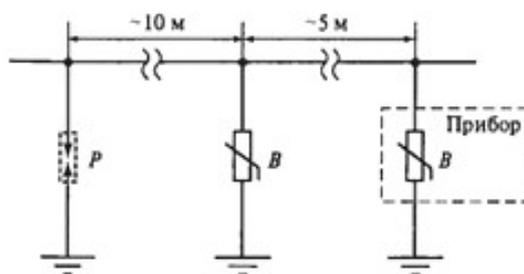


Рис. 5.30. Использование провода в качестве развязывающего элемента

Если в поперечном ответвлении требуется ограничение напряжения, то должны использоваться элементы, способные пропустить ток не менее 1,5 кА (8/20 мкс), Нельзя использовать разрядник со случайными свойствами без координации его параметров с остальными элементами.

5.3. ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ УРАВНИВАНИЯ ПОТЕНЦИАЛОВ И ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Отключение длительного КЗ выключателями в схеме на рис. 5.22 было бы лучшей защитой от перенапряжений, но работа электроники при КЗ была бы невозможна. Поэтому вместо выключателей необходимы элементы, которые контролировали бы напряжение между обоими проводами и выключались бы после исчезновения напряжения. Эти элементы из-за известного времени нарастания переходных процессов должны срабатывать за наносекунды.

Электромеханические устройства работают слишком медленно. Ниже рассмотрим элементы, пригодные для защиты от перенапряжений, а также отметим их преимущества и недостатки.

Газонаполненные разрядники. Специально для телекоммуникационных устройств уже десятки лет изготавливаются газонаполненные разрядники. Эти разрядники, несмотря на малые размеры, имеют очень большие мощности. Газонаполненные разрядники, показанные на рис. 5.31, способны пропускать токи переходных процессов в десятки

килоампер (импульс 8/20 мкс). Разрядник состоит из малой стеклянной или керамической трубочки, по обоим концам которой расположены металлические электроды. Герметичное газоразрядное пространство между этими электродами заполнено благородным газом, преимущественно аргоном или неоном.



Рис. 5.31. Газонаполненные разрядники

Электроды в разрядном пространстве покрыты активирующей массой. Специальные газонаполненные разрядники имеют вспомогательный электрод для зажигания (рис. 5.32). Чтобы гарантировать малый разброс разрядного постоянного напряжения, газонаполненные разрядники имеют внутри слабое радиоактивное покрытие. В зависимости от типа и изготовителя достижимы токи до 40 кА (импульс 8/20 мкс). В ступени грубой защиты для измерительной, управляющей и регулировочной техники, а также в устройствах обработки данных требуются разрядники на 2,5; 5 и 10 кА (импульс 8/20 мкс).

Если между электродами приложить напряжение, которое равно или больше напряжения зажигания U_3 (рис. 5.33), то разрядник зажигается. Если этот элемент используется как коммутатор, то говорят о его «жестком» режиме.

После зажигания напряжение между электродами падает сначала до напряжения тлеющего разряда, а потом при возрастании тока в газонаполненном разряднике — до напряжения горения дуги. Напряжение горения дуги составляет обычно 10-20 В. Газонаполненные разрядники очень быстро срабатывают (характерные времена срабатывания лежат в микросекундной области).

Недостатки газонаполненных разрядников связаны с характеристиками зажигания и с гашением сопровождающего тока. На рис. 5.33 показано напряжение зажигания в зависимости от нарастания переходного напряжения. Медленно нарастающее напряжение с крутизной примерно 100 В/с пересекает характеристику зажигания в момент t_{32} , в области электрической прочности при постоянном напряжении. Напряжение пробоя обозначено через U_{32} . При более быстрых переходных процессах в микросекундной области имеет место пересечение характеристики зажигания при существенно большем напряжении. На рис. 5.33 точка пересечения обозначена координатами t_{31} и U_{31} .

. Это напряжение может превышать электрическую прочность разрядника при постоянном напряжении во много раз. Таким образом, газонаполненный разрядник имеет зависящую от времени характеристику зажигания. Это означает, что защитный уровень при защите от переходных перенапряжений нельзя точно сформулировать. Этот эффект объясняется тем, что для ионизации благородного газа требуется время.

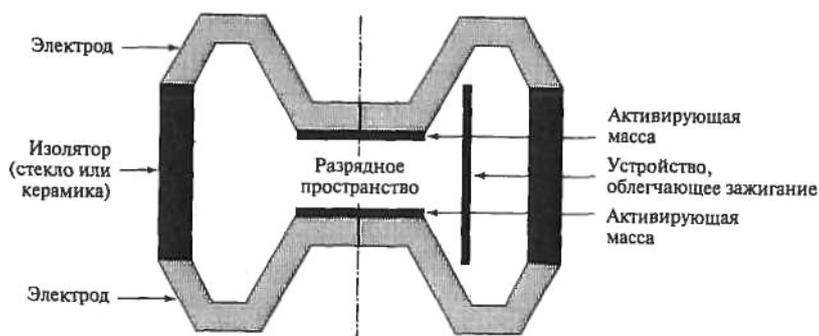


Рис. 5.32. Разрядник с устройством, облегчающим зажигание

Если газонаполненный разрядник зажегся, то он должен выдержать сопровождающий ток КЗ соответствующего контура, особенно при малом полном сопротивлении сети. Это является побочным эффектом, так как газонаполненный разрядник после окончания переходных процессов должен отключить этот ток. Газонаполненный разрядник не в состоянии долгое время пропускать сетевой ток, и поэтому либо разрушается спустя некоторое время, либо переключается.

На рис. 5.34 обозначен сопровождающий ток из сети, протекающий через газонаполненный разрядник P после его срабатывания. В сети с малым полным сопротивлением из-за большого тока дуга не гаснет при переходах тока через ноль. В этом случае следует использовать вспомогательное средство гашения - включенный последовательно с разрядником предохранитель Pr . В сети с высоким полным сопротивлением даже при номинальном напряжении и при постоянном напряжении проблем с гашением дуги не возникает. В цепях постоянного тока с номинальным напряжением, меньшим падения напряжения на дуге, газонаполненный разрядник гасит дугу самостоятельно.

Варисторы. Варистор - элемент с «мягкой» характеристикой. Он получил название от английского «variable resistor», состоит из большого числа последовательно и параллельно соединенных диодов. В то время как раньше использовались только варисторы из карбида кремния, в последние годы применяются, как правило, оксидно-цинковые варисторы (ZnO). Часто эти варисторы обозначаются MOVС (metal oxide varistor).

Главное применение оксидно-цинковых варисторов - защита от перенапряжений - вытекает из вольт-амперной характеристики. На рис. 5.35

для сравнения приведены вольт-амперные характеристики оксидно-цинкового и кремний-карбидного варисторов.

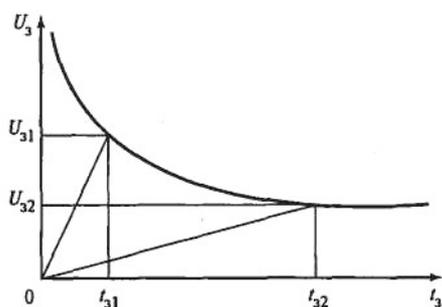


Рис. 5.33. Характеристика зажигания газонаполненного разрядника

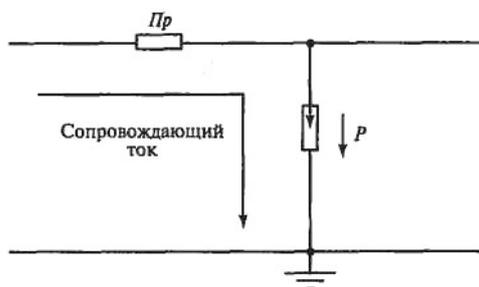


Рис. 5.34. Сопровождающий ток, протекающий через газонаполненный разрядник

Оксидно-цинковый варистор даже в килоамперной области имеет более низкий уровень остающегося напряжения.

Спеченный материал для оксидно-цинкового варистора состоит на 90 % из оксида цинка и на 10 % из оксидов других металлов. Эффект варистора возникает на границе зерен оксида цинка (рис. 5.36). Большое число микроваристоров образуют варистор, который при увеличении площади приобретает способность пропускать большие токи. С увеличением толщины варисторной шайбы повышается защитный уровень, так как число включенных последовательно микроваристоров (падение напряжения на каждом из них составляет несколько вольт) возрастает. Из рис. 5.35 и 5.36 можно сделать выводы о возможностях варистора и об ограничении остающегося напряжения.

Варистор имеет симметричную вольт-амперную характеристику, с увеличением напряжения сопротивление падает, и, следовательно, при импульсном воздействии потенциал может быть ограничен. Поэтому варистор является хорошим элементом для защиты от перенапряжений.

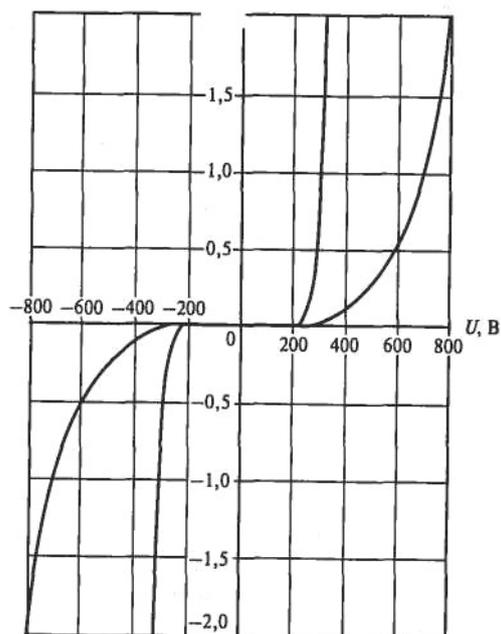


Рис. 5.35. Типичные вольт-амперные характеристики оксидно-цинкового *A* и кремний-карбидного *B* варисторов

Он реагирует на появление напряжений за наносекунды; т.е. существенно быстрее, чем описанные газонаполненные разрядники.

Недостатками варисторов при их использовании для защиты от перенапряжений являются средняя способность поглощать энергию, старение, сравнительно высокая емкость, а также меньшие, по сравнению с разрядниками, токи.

В сетях низкого напряжения применяются варисторы при токах в несколько десятков килоампер (импульс 8/20 мкс). В принципе этого достаточно для ограничения перенапряжений в электрических устройствах. Применяемые варисторы способны пропустить токи (импульсы 10/350 мкс) только до нескольких килоампер.

Переход от запертой области в открытую, который представлен коленом на рис. 5.35, происходит не скачком, однако очень быстро, в течение сотен пикосекунд. Преимущества варисторов — короткое время срабатывания, ограничение напряжения при возникновении разности потенциалов примерно 1,8 номинального. Характеристики варисторов высокого напряжения (ОПН) приведены в [30].

Ограничительные диоды — кремниевые полупроводниковые устройства, служащие для одностороннего или двустороннего ограничения импульсов напряжения, обусловленных переходными процессами, разрядами статического электричества или наведенными электромагнитными импульсами.

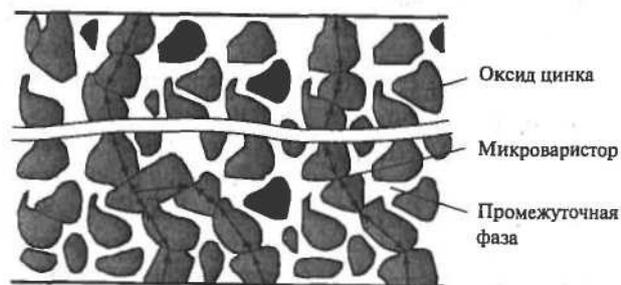


Рис. 5.36. Микроструктура оксидно-цинкового варистора

Время срабатывания ограничительных диодов - единицы пикосекунд на I обратной ветви вольт-амперной характеристики, единицы наносекунд - на прямой ветви. Импульсные токи диодов - до сотен ампер, входная емкость - до сотен пикофард. Напряжение ограничения - вольты, десятки и сотни вольт.

Разрядники для уравнивания потенциалов в сетях электроснабжения. Если при перенапряжениях, вызванных коммутациями, разрядами статического электричества и т.д., кратковременное КЗ, т.е. уравнивание потенциалов, осуществляется с помощью варистора, газонаполненных разрядников, ограничительных диодов, то при грозовом разряде эту функцию может выполнить специальный разрядник. Грозовой разряд несет большую энергию, которую способен поглотить только искровой разрядник.

Большая энергия получается не только из-за высоких амплитуд тока, но и за счет большой длительности. В 80 % случаев речь идет о разрядах с отрицательно заряженного облака. При этом длительность импульса тока составляет 80—100 мкс. Молния, развивающаяся с положительно заряженного облака, имеет длительность импульса тока несколько сотен микросекунд. В стандарте МЭК указывается, что импульс с наибольшим энергосодержанием — 10/350 мкс. Так как неизвестно, будет ли молния развиваться с положительно или отрицательно заряженного облака, в нормах МЭК приняты наиболее жесткие параметры тока — импульс 10/350 мкс.

Разрядники для уравнивания потенциалов, через которые может протекать часть тока молнии (импульс 10/350 мкс) и сопровождающий ток КЗ (в течение полупериода промышленной частоты), выполняются со специальными электродами и дугогасительными решетками.

На рис. 5.37 показан разрядник с выдуванием дуги в области рогообразных электродов, с перемещением дуги на промежуточный электрод - пластину и с переводом раздвоенной дуги на внешние поверхности электродов.

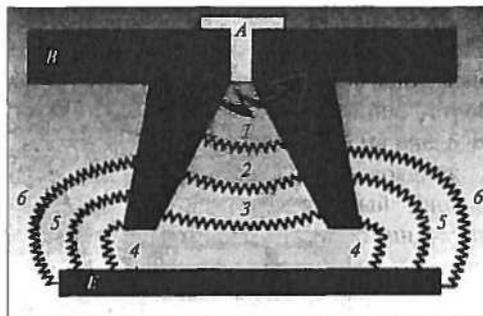


Рис. 5.37. Разрядник для выравнивания потенциалов в сети электроснабжения

После срабатывания разрядника (пробоя по поверхности диэлектрической вставки *A*) дуга перемещается по электродам *B* (положения *1-3* на рис. 5.37), затем дуга переходит на пластину *E*, раздваиваясь (положение *4*). Далее происходит удлинение дуг (положения *5* и *6*), в результате чего возрастает напряжение на разряднике и облегчается гашение дуги.

Еще большей дугогасительной способностью отличается разрядник для уравнивания потенциалов, показанный на рис. 5.38. В нем, как и в разряднике на рис. 5.37, разряд зажигается при пробое поверхности диэлектрической вставки *A* между электродами *B*, затем канал разряда, переходящий в дуговую стадию, перемещается между электродами *B* (положения *1-4*), перебрасывается на пластину *E* (положение *5*) и затем поступает в дугогасительные камеры со вспомогательным электродом *C* и металлическими пластинами *D* (положения *7* и *8*).

В таком разряднике напряжение при сопровождающем токе КЗ возрастает не только за счет увеличения длины дуги, но и за счет дополнительных падений напряжения приэлектродных зон в дугогасительной решетке (примерно по 20 В на каждом зазоре).

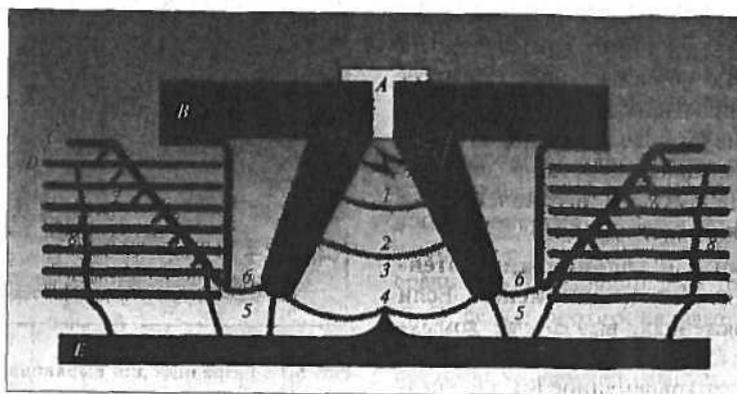


Рис. 5.38. Разрядник с повышенными дугогасительными свойствами

Разрядники, показанные на рис. 5.37 и 5.38, как правило, имеют отверстия для выхлопа плазмы, что необходимо учитывать при их

размещении во вводных и распределительных панелях. Эти разрядники должны быть рассчитаны на пропускание импульсных токов (10/350 мкс), амплитуда которых определяется местом их установки, характеристиками электрических и других металлических коммуникаций.

Разрядники с поверхностным разрядом. До 1993 г. для уравнивания потенциалов при протекании в сети импульсных токов с амплитудой до 100 кА/(8/80 мкс) использовались только коаксиальные разрядники с поверхностным разрядом. Такой разрядник состоит из двух кольцевых электродов из металлокерамики медь-вольфрам, разделенных тонкой фторопластовой пластинкой. При достижении пробивного напряжения на разряднике происходит пробой по поверхности, возникает дуга между электродами. Такой разрядник при напряжении до 28 В самостоятельно отключает гораздо меньшие сопровождающие токи, чем разрядники, показанные на рис. 5.37 и 5.38. Поэтому для гашения дуги в сети электроснабжения требуется дополнительное отключающее устройство. Обычно это предохранитель, включенный последовательно с разрядником. Выдерживаемые импульсные токи 10/350 мкс таких разрядников составляют 20—25 кА.

Тандемные разрядники. Новым типом разрядников для импульсов 10/350 мкс амплитудой до 75 кА являются коаксиальные тандемные разрядники. В них два коаксиальных искровых промежутка соединены последовательно. Их емкости не одинаковы, и поступающий импульс напряжения распределяется по ним неравномерно, тем самым облегчая пробой разрядника. Как и разрядники с поверхностным разрядом, тандемные разрядники способны самостоятельно гасить дуги с малыми сопровождающими токами КЗ в сети электроснабжения при напряжениях до 255 В. При больших напряжениях их следует включать последовательно с предохранителями. Если разрядники, показанные на рис. 5.37 и 5.38, способны срабатывать многократно, то разрядники с поверхностным разрядом и тандемные разрядники, снабженные предохранителями, отключают сопровождающий ток однократно, и требуется замена предохранителя. Для облегчения обслуживания разрядники снабжаются дистанционной сигнализацией срабатывания.

В настоящее время широкое распространение получают **многоазорные, газонаполненные разрядники закрытого исполнения.** Они самостоятельно гасят дугу сопровождающего тока благодаря большому падению напряжения на последовательно соединенных электродах (в основном это сумма приэлектродных падений напряжения), поэтому токи, поступающие в них из сети, сильно ограничиваются. Общим недостатком ограничителей перенапряжения - варисторов в сетях электроснабжения 0,4 кВ является сравнительно высокое остающееся напряжение, лежащее в диапазоне от 2,5 до 4 кВ. Поэтому часто требуется дальнейшее ограничение напряжений, например, с помощью второй ступени ограничения перенапряжений. При этом происходит трансформация импульса тока. Импульс 10/350 мкс или 8/80 мкс может преобразоваться в импульс 8/20 мкс.

Соответственно преобразуются и импульсы испытательных токов. Этот процесс наглядно продемонстрирован на рис. 5.39.

Многоступенчатые ограничители перенапряжений. Ранее описанные элементы (газонаполненные разрядники, варисторы и ограничительные диоды) могут быть объединены в единое защитное устройство, в котором используются полезные свойства и снижается влияние недостатков отдельно взятых элементов. При объединении элементов следует соблюдать определенные условия.

На рис. 5.27 была приведена схема трехступенчатого устройства для ограничения перенапряжений с развязывающими полными сопротивлениями Z_1 и Z_2 .

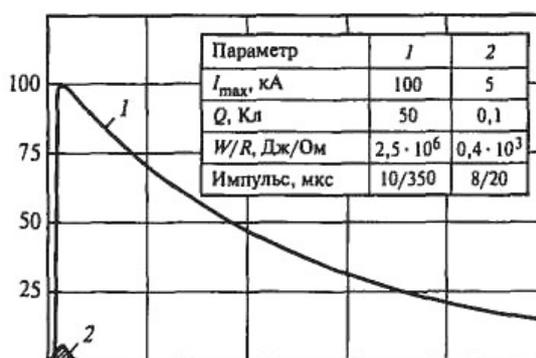


Рис. 5.39. Испытательные токи 10/350 мкс и 8/20 мкс

Поясим еще раз принцип действия комбинированного устройства, применяемого в цепях измерения, управления и регулирования. Устройство, схема которого приведена на рис. 5.40, содержит газонаполненный разрядник P , варистор B и ограничительный диод D . Между ними включены катушки индуктивности L_1 и L_2 . Для упрощения понимания принципа действия предположим, что устройство подключено к фазному проводу и к земле.

Газонаполненный разрядник P выбран потому, что он рассчитан на импульсные токи примерно 10 кА (8/20 мкс). Ограничительный диод D обеспечивает высокое быстродействие устройства и на нем ограничивается напряжение, примерно вдвое превышающее номинальное напряжение сети, в которую включено защитное устройство. С помощью варистора B исключается частое срабатывание разрядника P и предохранителя, включенного в фазный провод линии. Варистор B способен пропускать ток 2,5 кА (8/20 мкс). Ограничительный диод D способен пропускать ток 0,6 кА (8/20 мкс).

При воздействии импульса напряжения на устройство первым срабатывает ограничительный диод, отводя часть тока в землю и уменьшая ток через электронный прибор, включенный на выходе защитного устройства. На входе прибора напряжение ограничивается диодом в соответствии с его вольт-амперной характеристикой.

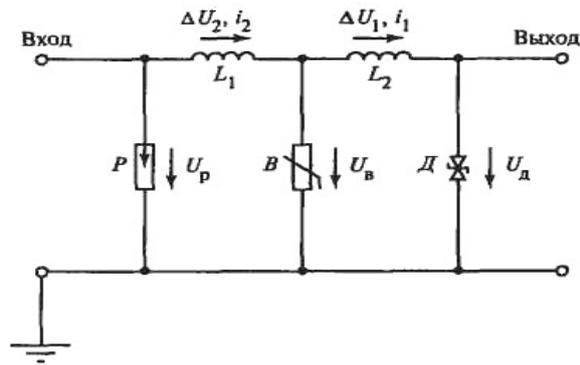


Рис. 5.40. Трехступенчатое защитное устройство

На индуктивности L_1 , содержащейся в защитном устройстве, возникает напряжение

$$\Delta U_1 = -L_1 \frac{di}{dt}.$$

К варистору B приложено напряжение

$$U_B = U_D + \Delta U_1.$$

В соответствии с вольт-амперной характеристикой варистора через него протекает ток. На индуктивности L_2 возникает напряжение

$$\Delta U_2 = -L_2 \frac{di_2}{dt}.$$

К разряднику P приложено напряжение

$$U_P = U_B + \Delta U_2.$$

Если это напряжение достигает напряжения пробоя разрядника, он срабатывает, и в землю отводится дополнительный ток.

Таким образом, устройство на рис. 5.40 содержит ступени грубой защиты (разрядник P) и тонкой защиты (диод D). Варистор B защищает диод D от разрушения, а разрядник P ограничивает выделение энергии в варисторе B .

Так как невозможно предсказать, при какой полярности заряда облака произойдет грозовой разряд, при расчетах перенапряжений и токов, протекающих через разрядники, принимаются максимальные параметры тока молнии. Это относится и к максимальной амплитуде тока молнии. Согласно международным нормам считается, что 99 % атмосферных разрядов

происходят при токах с амплитудой 200 кА и менее. Как уже отмечалось ранее, при ударах молнии в отдельно стоящие здания с ожидаемым током 200 кА считается, что 50 % этого тока (100 кА, импульс 10/350 мкс) уходит через заземлитель, а остальной ток протекает по электропроводным коммуникациям (провода электроснабжения, водопровод, телефонный кабель и т.д.), что схематично показано на рис. 5.41.

При этом предполагается, что каждый провод берет на себя соответствующую часть тока. Если есть, например, пять проводов, то в каждом проводе протекает 10 % тока молнии. При наличии водопровода, кабеля электроснабжения и телекоммуникационного кабеля по каждому из них может протекать ток 33 кА. В каждой из этих систем ток распределяется по отдельным проводам равномерно. Например, в трехфазной системе с нейтральным проводом ожидаемый ток в каждом проводе составляет 8,5 кА (импульс 10/350 мкс). В проводах однофазной линии электроснабжения, состоящей из фазного и заземленного проводов, ток в каждом из них может достигать 50 кА (при отсутствии заземления, например, при ударе молнии в здание, расположенное в горной местности).

Вторым важным фактором для выбора разрядника является его способность отключать сопровождающий ток КЗ. Если разрядник сработал в результате удара молнии, то через искровой промежуток протекает ток КЗ, который необходимо отключать.

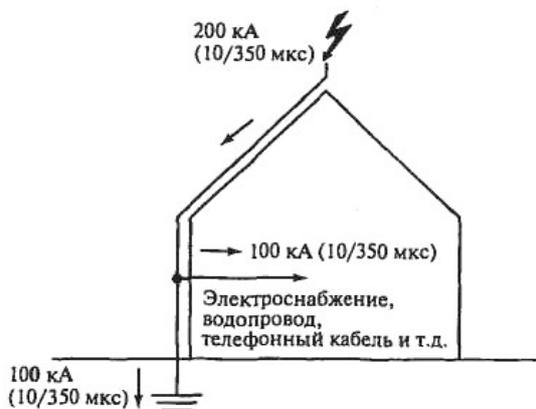


Рис. 5.41. Распределение тока молнии

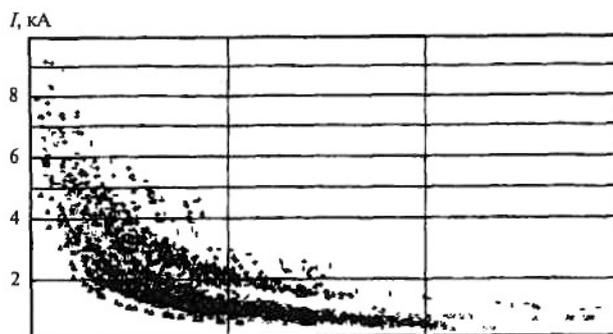


Рис. 5.42. Токи КЗ в реальных сетях в зависимости от удаления l места КЗ от трансформатора

Ожидаемый ток КЗ зависит от параметров сети и места установки разрядников.

На рис. 5.42 приведены данные о токах трехфазного КЗ в сетях электропитания 380 В в зависимости от расстояния до трансформатора по данным [31]. При этом данные на рис. 5.42 получены для 29 местных сетей в 2323 точках.

Разрядники, показанные на рис. 5.37 и 5.38, способны отключать токи КЗ, приведенные на рис. 5.42.

Глава шестая

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ НА ОБЪЕКТАХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ

6.1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭМС

Как следует из приведенного материала, вопрос об электромагнитной совместимости на объектах электроэнергетики является достаточно сложным. Он охватывает проблемы разнообразных электромагнитных явлений, путей распространения кондуктивных и полевых помех, электромагнитной устойчивости различных технических средств и т.д.

Многочисленные инциденты, связанные с несоблюдением ЭМС на электрических станциях, свидетельствуют об актуальности этой проблемы. Особое значение она приобретает для объектов ядерной энергетики.

Несмотря на сложность проблемы обеспечения ЭМС можно сформулировать некоторые общие рекомендации и технические предложения, способствующие организации необходимой электромагнитной обстановки (ЭМО) и обеспечению ЭМС на объектах ядерной энергетики.

Решение проблемы обеспечения ЭМС должно начинаться с проектирования объекта. На этой стадии определяются общие вопросы принципиальной схемы объекта, его конструктивные особенности, схемы и устройства управления, регулирования параметров, обеспечения безопасности и многое другое. От исполнения строительных конструкций, первичной и вторичной схем, системы молниезащиты и заземления и многих других обстоятельств зависит электромагнитная обстановка и соблюдение электромагнитной совместимости. Поэтому необходима экспертиза принятых

проектных решений на предмет проработки в них обеспечения ЭМС. Такая экспертиза может быть проведена только специалистами в области ЭМС.

Следует отметить, что такая экспертиза проектов объектов электроэнергетики, выполняемых зарубежными фирмами, проводится в обязательном порядке.

При проектировании следует использовать зонную концепцию ограничения перенапряжений, подробно рассмотренную в гл. 4. В строительной части выделяются зоны, в которых могут быть разные электромагнитные воздействия. Например, такими зонами могут быть наружное окружение здания, само здание, отдельные помещения, шкафы управления, конкретные приборы и т.д. Аналогично на зоны могут быть разбиты системы электроснабжения, цепи оперативного тока и т.д.

На границах зон должны быть предусмотрены технические мероприятия, ограничивающие перенапряжения и помехи до допустимых уровней. В соответствии с этими условиями при проектировании необходимо выбирать технические средства и группы их исполнения.

Для того чтобы успешно использовать зонную концепцию, необходимо разработать методику. Однако уже сейчас можно сформулировать следующие рекомендации:

1. Необходимо четко выделить и при проектировании обеспечить наиболее важную границу зон 0_{B-1} . Это — стены здания, в котором располагается релейная защита, пульты управления и т.д. Стены образуют первый экран с отверстиями, через который по проводам поступают кондуктивные помехи, а через отверстия — полевые помехи, обусловленные внешними источниками (например, каналом молнии).

Следует стремиться к экрану с максимальным затуханием. Для этого все металлические детали (арматура, металлические коробки окон, дверей, элементы инженерных коммуникаций, трубы, вентиляционные короба и т.д.) должны быть многократно электрически соединены друг с другом и с контуром заземления. Никаких металлических, не соединенных с экраном элементов, входящих в здание извне, не должно быть, так как такие элементы могут как антенны излучать электромагнитную энергию во внутрь помещения. Протяженных отверстий в экране также не должно быть, так как они могут работать как щелевые антенны. Следует проанализировать положение всех электрических коммуникаций, входящих в здание, и оценить, какие помехи могут поступать по ним. Для снижения помех коммуникации следует выполнять экранированными кабелями с обязательным соединением экрана кабелей и экрана здания кратчайшим путем. С экраном здания должны быть соединены металлические кабельные каналы, лотки, эстакады и т.д.

Особое внимание должно быть уделено связям с измерительными трансформаторами, расположенными на ОРУ. Эти связи необходимо также осуществлять экранированными кабелями и прокладывать отдельно от других кабелей, по которым могут протекать большие коммутационные токи или токи, связанные с ударами молний или короткими замыканиями.

На этой границе может потребоваться установка защитных элементов — разрядников для уравнивания потенциалов или варисторов для снижения перенапряжений.

2. Разрядники необходимо устанавливать непосредственно у входов кабелей в здание, если на шинах кабелей возможно появление напряжений, превышающих допустимые напряжения для зоны 1. Причинами таких напряжений могут быть удары молнии в молниеотводы, в подходящие линии высокого напряжения, коммутации на подстанции, короткие замыкания, отключение индуктивных нагрузок в цепях оперативного тока, обратные перекрытия и т.д.

Следует также предусматривать защитные мероприятия и на границах других зон. Для снижения перенапряжений на этих границах пригодны варисторы, фильтры, комбинированные устройства, рассмотренные в гл. 5. Выбор таких устройств, координация их параметров и способов установки — вопросы, подлежащие исследованию на каждом объекте.

3. В соответствии с инструкциями (руководящими указаниями [15, 17]) следует спроектировать и реализовать на объекте систему молниезащиты, предусмотреть требуемые пути протекания тока молнии и его частей. Вблизи проводов, соединяющих молниеприемники с заземлителем, не должны находиться незамкнутые металлические контура и контура с ненадежными электрическими соединениями (неплотными контактами). Так, если внутри здания на расстоянии 5 м от провода, по которому протекает, например, одна четвертая часть тока молнии, находится вертикально расположенный контур площадью 1 м^2 , то в нем при повторном ударе молнии может навестись ЭДС до 2 кВ. Если контур имеет неплотный контакт или зазор порядка 10^{-1} мм, то возникает искра, и сам контур будет действовать как мощный источник электромагнитного высокочастотного воздействия на технические средства, расположенные внутри помещения. Приведенный пример указывает на то, что все металлоконструкции и электрические коммуникации должны быть выполнены тщательно.

Релейные и другие щиты, расположенные в помещении, не должны размещаться вблизи спусков и элементов, по которым возможно протекание тока молнии или его части.

4. Заземлитель электроэнергетического объекта предназначен для обеспечения безопасности обслуживания (снижения напряжения прикосновения и шагового напряжения до безопасных уровней). Однако он играет важную роль и в формировании электромагнитной обстановки. На нем при ударах молнии, коммутациях на стороне высокого напряжения, коротких замыканиях возможно возникновение высоких потенциалов, обратных перекрытий кабелей вторичных цепей, проложенных непосредственно по заземлителю. В связи с этим возможны иные рекомендации по выполнению заземлителя, чем предписанные инструкциями, руководящими документами (например, сокращение расстояний между полосами заземлителя в местах прокладки кабелей вторичных цепей на территории ОРУ).

5. Экспериментальное исследование электромагнитной обстановки на РЩ ОРУ 750 кВ действующего энергоблока АС показывает, что в целом ЭМО на РЩ ОРУ может характеризоваться по ГОСТ Р 50746-2000 как обстановка средней степени жесткости.

По результатам исследований снижения уровня помех с целью получения некоторого запаса устойчивости оборудования релейного щита к действию помех можно дать следующие рекомендации:

- снизить уровень промышленных радиопомех в цепях питания, тока и напряжения микропроцессорной релейной защиты путем, например, установки ферритовых фильтров на кабельных связях или прокладки дополнительных экранированных кабелей в помещении релейного щита при заземлении их с одного конца;

- провести усиление заземляющего устройства, к которому подходят кабели терминалов микропроцессорной релейной защиты, для снижения импульсного сопротивления до 3 Ом;

- провести обследование состояния заземляющих устройств ОРУ, релейного щита, АТ и трансформаторов в полном объеме;

- соблюдать периодичность контроля состояния контура заземления ОРУ.

Для снижения потенциала статического электричества на теле обслуживающего персонала:

- не применять синтетическую одежду при обслуживании электротехнического оборудования в помещении релейного щита, где установлены устройства микропроцессорной релейной защиты;

- осуществлять контроль заземления всего металлического и проводящего неметаллического оборудования;

- заземлять по отдельным ответвлениям машины, аппараты и элементы технологического оборудования, являющиеся источниками генерации зарядов статического электричества;

- выполнять напольное покрытие в местах обслуживания микропроцессорной релейной защиты из антистатических материалов.

В связи с тем, что при коммутациях на ОРУ-750, а также при грозовых разрядах или КЗ на землю амплитудные значения импульсных помех могут превышать значения, установленные для III группы исполнения по ГОСТ Р 50746-2000, применительно к оборудованию систем, важных для безопасности АС, рекомендуется перед установкой микропроцессорной релейной защиты:

- выполнить анализ сопроводительной технической документации, сертификатов и протоколов испытаний микропроцессорной релейной защиты по требованиям ЭМС;

при несоответствии или неполном соответствии микропроцессорной релейной защиты требованиям III группы исполнения по ГОСТ Р 50746-2000 провести с учетом реальной электромагнитной обстановки испытания микропроцессорной релейной защиты на соответствие приведенным выше требованиям ЭМС в специализированном испытательном центре; проектной

и монтажной организациям рекомендуется использовать полученные результаты с учетом указанных выше мероприятий при проектировании и монтаже терминалов микропроцессорной релейной защиты на АС, т.е.:

- применять в проектных решениях только оборудование, имеющее сертификаты соответствия по ЭМС или протоколы результатов испытаний в специализированных испытательных центрах по ЭМС на соответствие требованиям ГОСТ Р 50746-2000 по всем видам воздействий; при проектировании электрической части АС следует по возможности учитывать требования по разнесению трасс прокладки контрольных, силовых и высокочастотных кабелей;

- применять защитные устройства с более частой заземляющей сеткой;

- выполнить разработку с целью введения в отрасли руководящего документа, регламентирующего требования ЭМС при проектировании и реконструкции устройств релейной защиты и противоаварийной автоматики электрической части энергоблоков АС.

Далее, базируясь в основном на [19-23], рассмотрим подробнее нормированную электромагнитную обстановку в зонах и вопросы молниезащиты.

6.2. НОРМИРОВАННАЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ОБСТАНОВКА В ЗДАНИЯХ И СООРУЖЕНИЯХ И ЕЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

В дополнение к изложенному материалу в гл. 4 приведем рис. 6.1, где условно показаны зоны и параметры электромагнитной обстановки U_n и I_n в зонах.

Напряжение U_0 и ток I_0 поступают в зону I через границу между зонами 0_A или 0_B и I . При этом имеется в виду, что эта граница может быть между зонами 0_A и I (при отсутствии молниеотводов защитной зоны) либо между зонами 0_B и I при наличии специальных молниеотводов или металлических конструкций, выполняющих функцию молниеотводов.

В зоне 0_A возможны следующие токовые воздействия молнии:

- импульс 10/350 мкс амплитудой 200; 150 или 100 кА для соответствующих уровней защиты I, II, III—IV;

- импульс 0,25/100 мкс амплитудой 50; 37,5 и 25 кА для уровней защиты I, II, III—IV.

В зоне 0_B возможны токовые импульсы с такими же временными параметрами, но с меньшими амплитудами в зависимости от здания или по приходящим в зону электрическим коммуникациям.

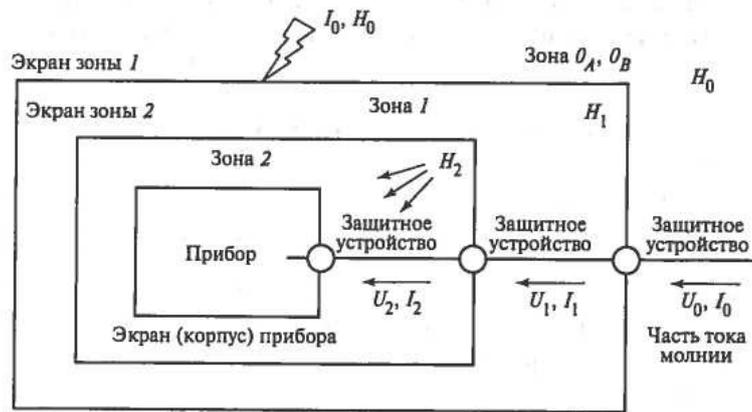


Рис. 6.1. Электромагнитная обстановка в защитных зонах при грозовом разряде

Напряженность магнитного поля H_0 в зонах 0_A и 0_B определяется по закону полного тока при известном токе и расстоянии от точки наблюдения до проводника с полным током молнии или его частью.

Что касается напряжения в зонах 0_A и 0_B , то оно определяется произведением тока на активное сопротивление участка цепи, или $L di_0/dt$, где L - индуктивность участка цепи с полным током молнии, или его частью, находящейся в зоне 0_B . Значение U_0 может достигать многих сотен киловольт.

Нормативные документы [19-23] идентифицируют уровни защиты, категории применяемых в зонах приборов, классы жесткости испытаний.

Так, в зонах 0_A и 0_B должен быть реализован уровень защиты I, необходимо устанавливать приборы категории I, испытанные воздействием класса жесткости I.

Некоторые параметры электромагнитной обстановки в последующих зонах приведены в табл. 6.1.

Как уже отмечалось, границей зон 0_A , 0_B и I являются стены зданий, сооружений. Они, кроме выполнения своих основных функций, играют немаловажную роль и в обеспечении ЭМС электрооборудования, установленного внутри зданий, сооружений.

Стены, металлоконструкции, арматура железобетонных конструкций, элементы системы молниезащиты и т.д. создают экран, ослабляющий полевые помехи, приходящие извне. Присоединение оболочек кабелей к экрану и защитные устройства, установленные на вводах электрических коммуникаций в здания, ослабляют кондуктивные помехи. Поэтому важным является такое выполнение конструкции зданий, стен и инженерных коммуникаций, чтобы они образовывали экран с предельно возможным затуханием как полевых, так и кондуктивных помех на их пути проникновения в здание.

В дополнение к материалу, изложенному ранее, приведем рис. 6.2 [22].

Экран образован из электрически связанных между собой металлоконструкций здания, арматурой железобетонных элементов, заземлителем, системой уравнивания потенциалов. Рассмотрим подробнее элементы экрана и связи между ними.

Металлические элементы каркасов зданий соединяются сваркой. Они образуют хорошо проводящую пространственную конфигурацию и служат основой экрана.

Железобетонные панели, элементы стен объединяются между собой. Пример соединений железобетонных панелей между собой приведен на рис. 6.3. Если необходимо, панели электрически объединяются друг с другом гибкой связью (рис. 6.4). Для снижения полного сопротивления всей конструкции в целом и улучшения экранирующих свойств сооружения, точки соединения плит друг с другом должны быть на расстояниях не более 1 м как по горизонтали, так и по вертикали.

Таблица 6.1. **Нормированная электромагнитная обстановка в зонах**

Вид воздействия на прибор	Зоны			
	1	2	3	4
Импульс напряжения 1,2/50 мкс, кВ	4	2	1	0,5
Импульс тока 8/20 мкс, кА	2	1	0,5	0,25
Напряженность магнитного поля при токе 8/20 мкс, А/м	1000	300	100	-
Напряженность магнитного поля при затухающих колебаниях частоты 1 МГц, А/м	100	30	10	-
Воздействия импульса напряжения 1,2/50 мкс на приборы в сети электроснабжения, кВ	6	4	2,5	1,5

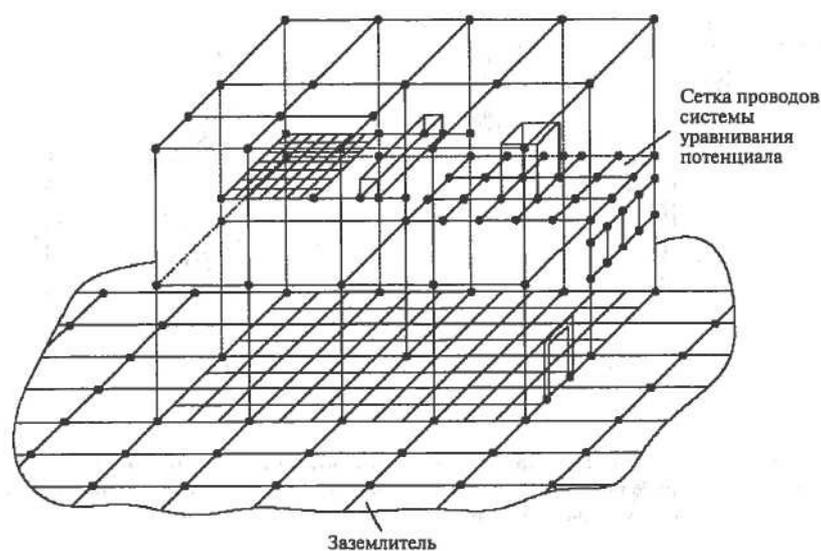


Рис. 6.2. Использование арматуры здания, проводников уравнивания потенциала и заземлителя для создания экрана

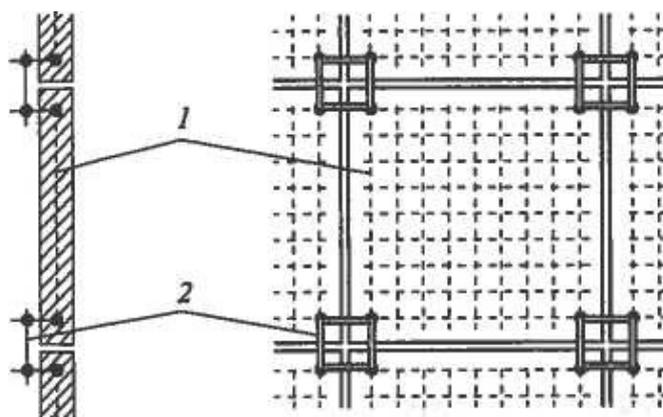


Рис. 6.3. Монтаж соединительных проводов на плитах из предварительно напряженного железобетона с помощью сварки или болтовых соединений:

1 — арматура предварительно напряженного железобетона; *2* — соединительные провода

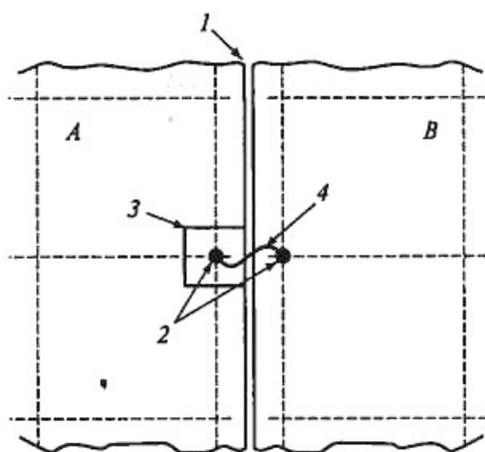


Рис. 6.4. Конструкция гибкой связи между железобетонными плитами:

1 — зазор между плитами; *2* — сварные или болтовые соединения; *3* — пластина на обратной стороне плиты; *4* — гибкий или изогнутый соединительный проводник (минимальной длины); *A, B* — железобетонные плиты

Примеры использования сварных соединений арматуры (если сварка допускается в процессе строительства) приведены на рис. 6.5. Длина сварочного соединения должна быть не менее 30 мм при диаметре стержней арматуры примерно 10 мм.

Болтовые соединения показаны на рис. 6.6. На рис. 6.6, *a* показано соединение стержневых проводов, которое применяется в случаях, когда

сварка не допускается или требуется соединить проводники из разных материалов, например из стали и алюминия.

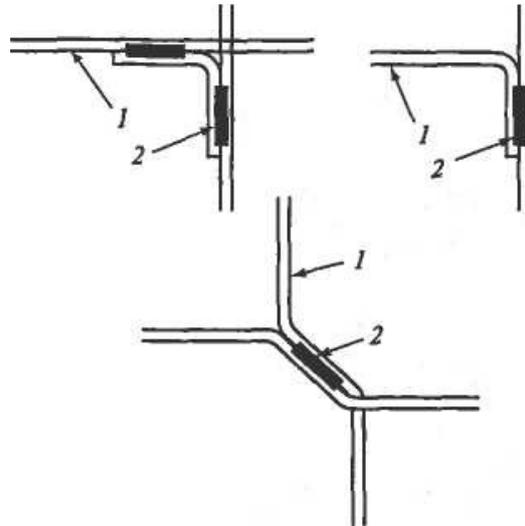


Рис. 6.5. Выполнение сварных соединений арматуры железобетонных конструкций:

1 — арматура; 2 — сварные швы не менее 30 мм длиной

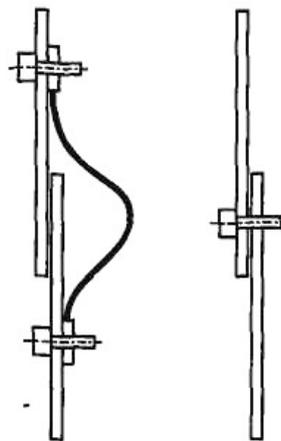


Рис. 6.7. Соединение металлических частей фасада здания гибким проводом (а) или болтом (б)

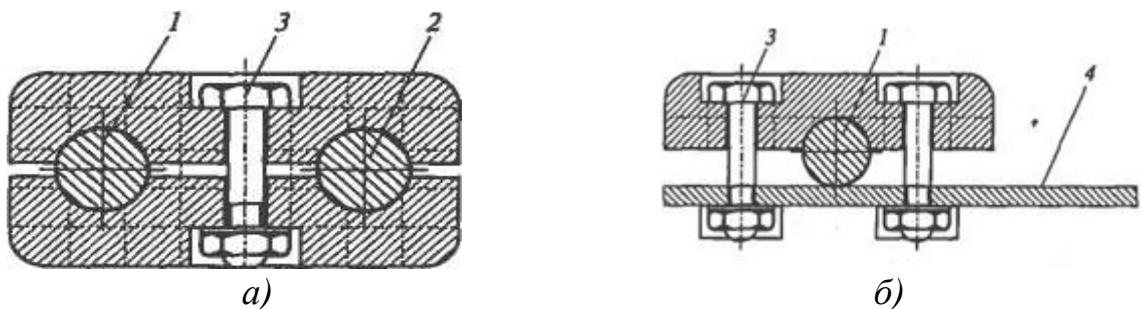


Рис. 6.6. Примеры выполнения соединений между стержнем арматуры и проводом:

1 — стержень арматуры; 2 — проводник круглого сечения; 3 — болт; 4 — плоский проводник (шина)

На рис. 6.6, б показано болтовое соединение круглого провода с пластиной с использованием металлической накладки. Для улучшения контакта накладка может иметь канавку по форме провода.

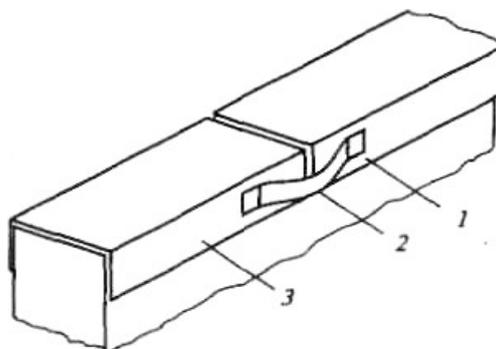


Рис. 6.8. Типовое соединение элементов металлической крыши (парапета):

1 — коррозионно-стойкое соединение; 2 — гибкий проводник минимальной длины; 3 — металлическое покрытие парапета

Гибкими проводами могут соединяться между собой металлические части фасада (рис. 6.7, а). Допускается и жесткое соединение с использованием болтов (рис. 6.7, б).

Типовое соединение элементов парапета металлической крыши с помощью гибкого проводника минимальной длины показано на рис. 6.8. При этом особое внимание следует обращать на выбор материала и конструкции присоединений, обеспечивающих их коррозионную стойкость.

Составной частью экрана является заземлитель. Заземлитель включает в себя фундаментные конструкции, выполняемые, как правило, в виде сетки из арматуры, а также сетки из арматуры или полос в грунте, связанные с глубинными заземляющими электродами. В общем виде сетки заземлителя предприятия могут выглядеть, как показано на рис. 6.9. Существенно может улучшить экранирующие свойства здания металлический фасад, если он предусмотрен в проекте и -правильно выполнены электрические соединения его элементов.

На рис. 6.10 приведен пример таких соединений, а также присоединения элементов фасада с арматурой железобетонных панелей, с контуром заземления, с шиной уравнивания потенциалов и парапетом крыши.

Следует обратить внимание на соединение полос оконного проема с металлическим покрытием фасада. Рекомендуемые соединения показаны на рис. 6.11.

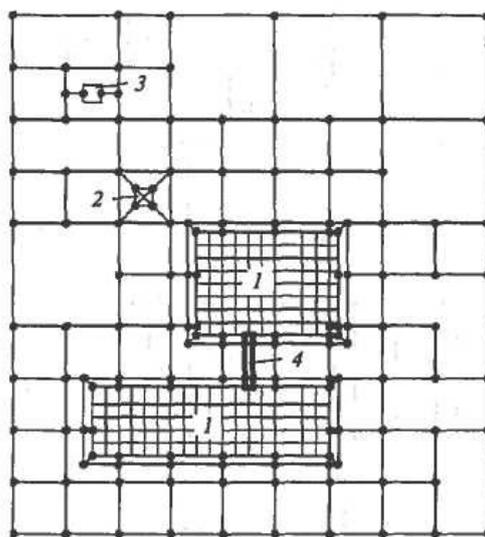


Рис. 6.9. Сетка заземлителя предприятия:

1 — сетка из арматуры железобетонных конструкций здания; *2* — башня на территории предприятия; *3* — отдельно стоящее оборудование; *4* — кабельный канал

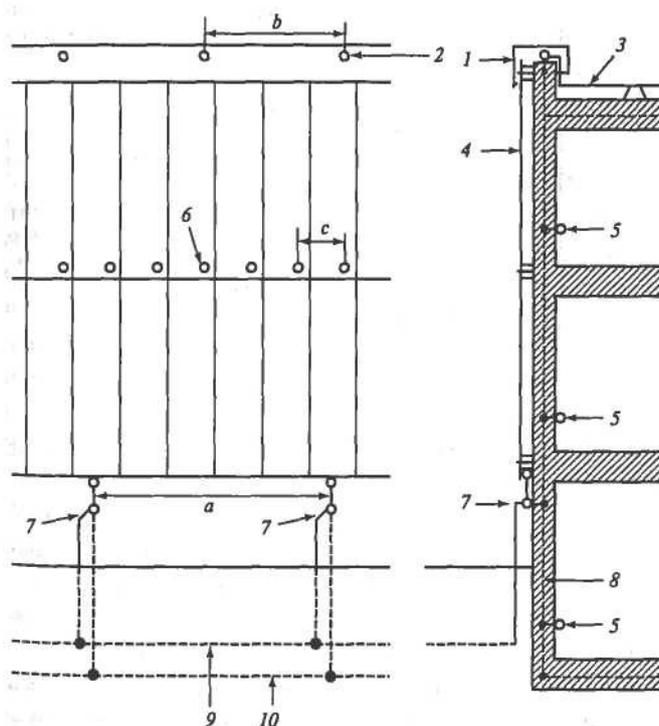


Рис. 6.10. Использование металлического покрытия фасада в качестве естественной системы отвода тока молнии в железобетонном сооружении:

1 — металлическое покрытие парапета крыши; *2* — соединение покрытия фасада и парапета (молниеприемника); *3* — горизонтальный провод молниеприемника; *4* — элемент металлического покрытия фасада; *5* — шина уравнивания потенциалов системы молниезащиты; *6* — места креплений покрытия фасада; *7* — контрольные точки; *8* — арматура железобетонных

конструкций; 9 — кольцевой заземляющий электрод типа В; 10 — заземляющий электрод в фундаменте.

Рекомендуемые размеры $a = 5$ м, $b = 3$ м, $c = 1$ м.

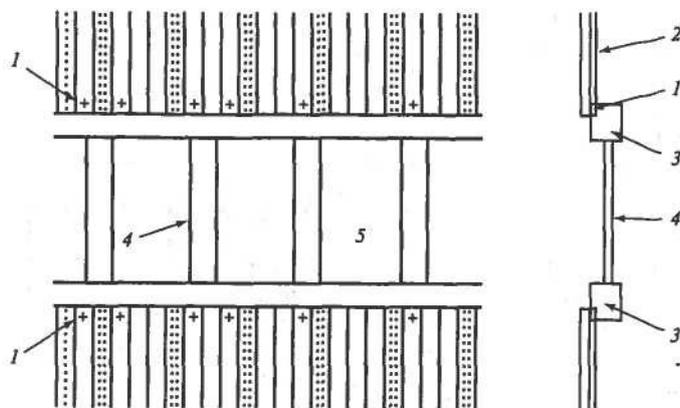


Рис. 6.11. Соединение полос оконного проема с металлическим покрытием фасада:

1 — соединение пластины элемента фасада с металлической полосой; 2 — металлическая пластина фасада; 3 — горизонтальная металлическая полоса; 4 — вертикальная металлическая полоса; 5 — окно

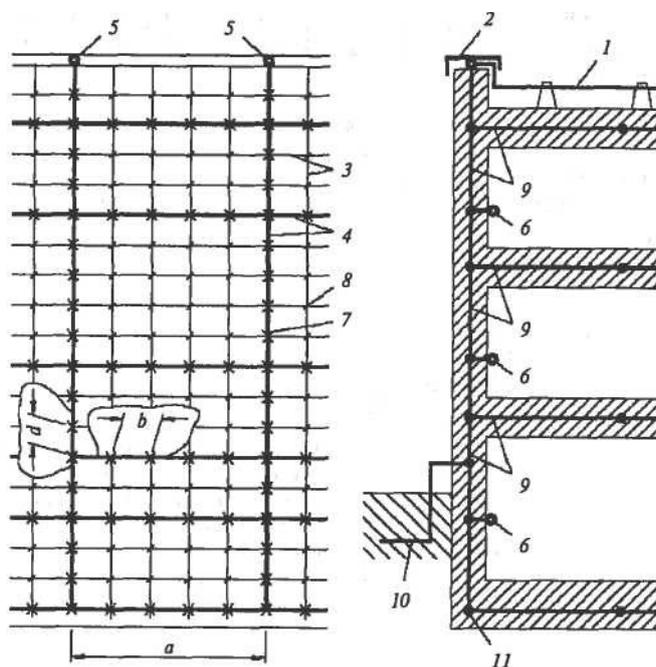


Рис. 6.12. Использование арматуры для уравнивания потенциалов:

1 — молниеприемник; 2 — металлическое покрытие парапета крыши; 3 — арматура; 4 — сетка, уложенная на конструкцию из железобетона; 5 — точки соединения сетки с железобетонными конструкциями; 6 — точки соединения с внутренней шиной уравнивания потенциала; 7 — соединения сваркой или зажимом; 8 — соединения любого типа; 9 — арматура железобетона с

сеткой; 10 — контур заземления (если имеется); 11 — заземлитель фундамента; $a = 5$ м — размер ячейки сетки; $b = 1$ м — расстояние между точками присоединения сетки к арматуре железобетона

Каркас здания и арматура железобетонных элементов используются не только для экранирования, но и для уравнивания потенциалов. Для этого они многократно соединяются с шинами PE . Для усиления связи системы уравнивания потенциалов с экраном рекомендуется использовать сетки, накладываемые на стенки из железобетона и многократно соединять их как с арматурой, так и с системой уравнивания потенциалов (рис. 6.12).

Пример комбинированной системы уравнивания потенциалов и многократных соединений корпусов оборудования, инженерных коммуникаций с экраном и заземлителем представлен на рис. 6.13.

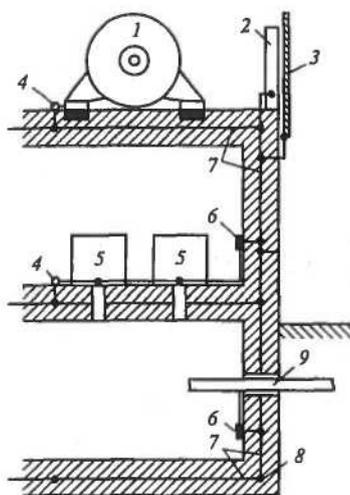


Рис. 6.13. Уравнивание потенциалов в железобетонном сооружении:

1 — силовое электрическое оборудование; 2 — металлическое ограждение; 3 — металлическое покрытие фасада; 4 — место присоединения; 5 — электрическое или электронное оборудование; 6 — шина заземления; 7 — арматура железобетонных конструкций (со встроенной сеткой из проводников); 8 — элементы заземляющего устройства в фундаменте сооружения; 9 — коммуникационный ввод в здание

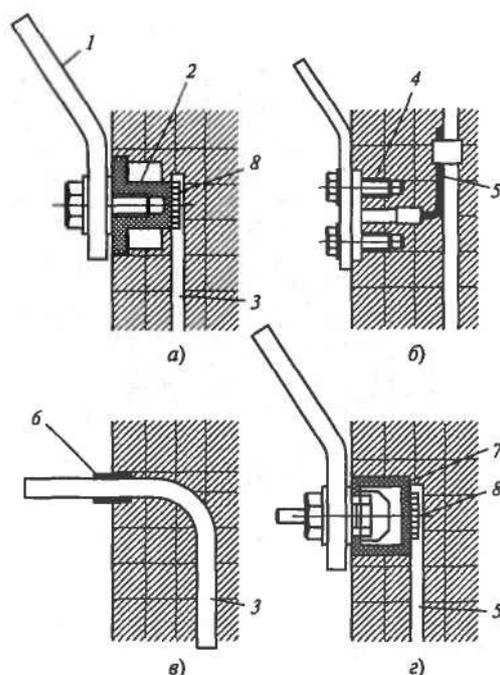


Рис. 6.14. Примеры присоединения к арматуре железобетонных стен:

1 — соединительный проводник — шина; 2 — втулка, приваренная к арматуре стены; 3 — круглый соединительный проводник; 4 — отверстие в немагнитном материале для присоединения проводников; 5 — многожильный медный соединительный проводник; 6 — антикоррозионное покрытие; 7 — стальная втулка; 8 — сварка

Сами соединения выполняются разными способами. Некоторые из них показаны на рис. 6.14. Конструкция, показанная на рис. 6.14, в не является практичной при реализации.

Соединения между элементами каркаса фасада проиллюстрированы рис. 6.15. Соединительные проводники 3 должны иметь минимальную длину. Аналогичным образом может быть создан экран в помещении внутри здания, т.е. образованы зоны 2,3 и др. Тем самым создается пространство для размещения оборудования внутри зоны и. Однако оборудование необходимо размещать на некоторых расстояниях от экрана, как показано на рис. 6.16. Эти расстояния $d_{s/1}$ или $d_{s/2}$ от экрана до границ пространства V_s зависят от токов, протекающих по экрану, а также от чувствительности размещаемого электронного оборудования к помехам

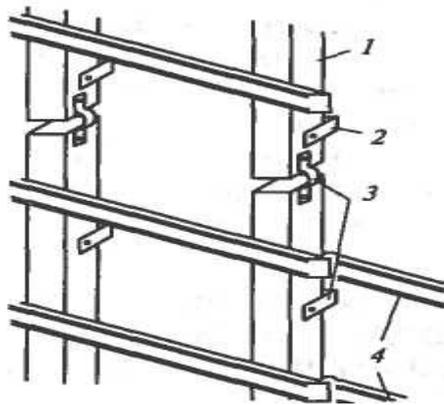


Рис. 6.15. Соединения между элементами каркаса фасада:
 1 — вертикальные элементы каркаса; 2 — крепление к стене; 3 — соединительные проводники (минимальной длины); 4 — горизонтальные элементы каркаса

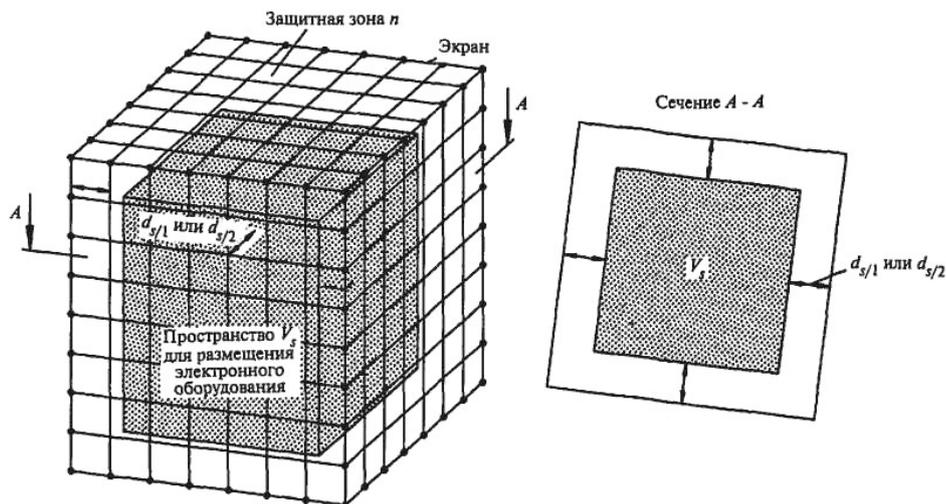


Рис. 6.16. Пространство V_s для размещения электротехнического и электронного оборудования в защитной зоне n

Для того, чтобы созданный с учетом приведенных рекомендаций экран здания был эффективным, необходимо соблюдать следующие требования.

В экране здания, сооружения не должно быть больших проемов, щелей, через которые могли бы проникать недопустимые полевые помехи.

В здание, помещение не должны входить металлические конструкции, провода, электрически не связанные с экраном. Связи должны быть выполнены предельно короткими проводниками с обеспечением хороших контактов, реализованными либо сваркой, либо болтовыми соединениями.

6.3. РАЗМЕЩЕНИЕ ПРИБОРОВ И КООРДИНАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ

Пример расположения приборов, оборудования в неэкранированной зоне 1 приведен на рис. 6.17, а при организованной зоне 2 - на рис. 6.18. Экран зоны 2 может

быть частичным. Локальные и небольшие зоны 2 условно показаны на рис. 6.19, а несколько зон 2 - на рис. 6.20.

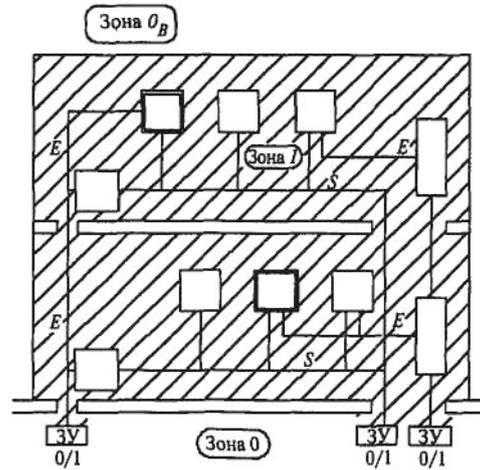


Рис. 6.17. Неэкранированная защитная зона 1 для электронных устройств, устойчивых к помехам:
E — заземление; *ЗУ* — защитное устройство; *S* — сигнальные линии

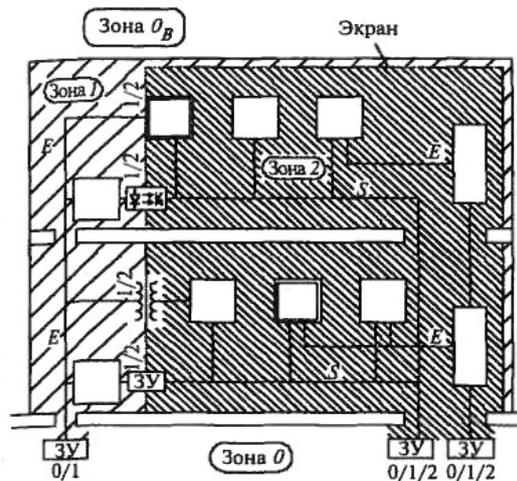


Рис. 6.18. Защитная зона 2 для чувствительных к помехам электронных устройств (обозначения по рис. 6.17)

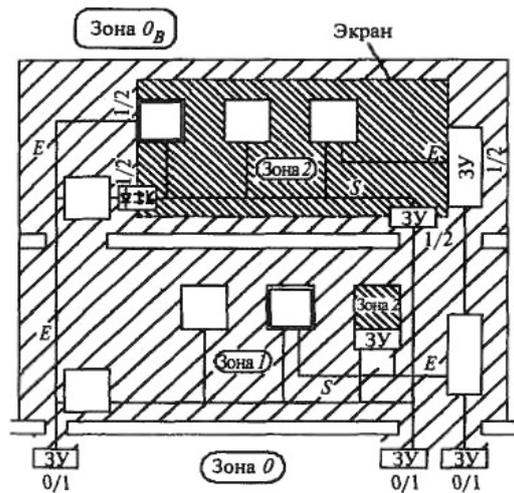


Рис. 6.19. Локальные и небольшие защитные зоны 2 для размещения чувствительных электронных устройств (обозначения по рис. 6.17)

На рис. 6.21 показана общая картина обеспечения молниезащиты и ЭМС административного здания, а на рис. 6.22 — зоны и защитные устройства в сети электропитания.

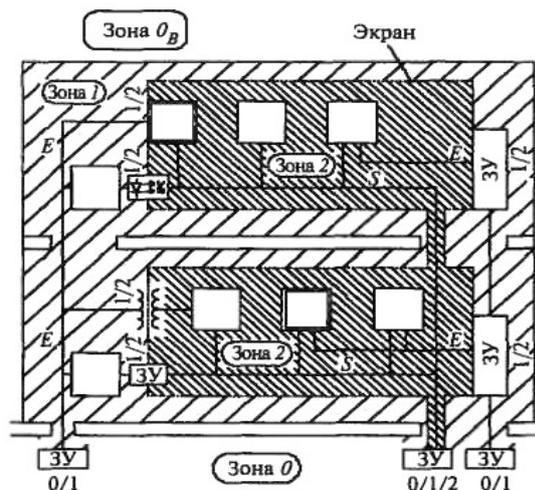


Рис. 6.20. Расположение нескольких защитных зон 2 для чувствительных электронных устройств (обозначение по рис. 6.17)

На границах зон располагаются защитные устройства, обзор которых был приведен ранее. Напомним схему замещения комбинированного защитного устройства, которую будем использовать при рассмотрении вопросов координации параметров элементов комбинированного защитного устройства (рис. 6.23).

Защитными устройствами ЗУ1 или ЗУ2 могут быть варисторы или разрядник и варистор. На рис. 6.24 приведена схема с двумя нелинейными ограничителями перенапряжений (ОПН1 и ОПН2) и разделительной катушкой индуктивности L . Зависимости выделившейся в ОПН энергии от тока

импульса показаны на рис. 6.25, вольт-амперные характеристики с указанием максимальных импульсных токов — на рис. 6.26, а на рис. 6.27 — напряжения и токи, протекающие через ОПН1 и ОПН2. На рис. 6.28 показаны аналогичные характеристики при использовании в качестве ЗУ1 разрядника и ЗУ2 — варистора (схема — рис. 6.29) в случае, когда разрядник не срабатывает, а на рис. 6.30 — в случае, когда разрядник срабатывает. Зависимости энергии, выделившейся

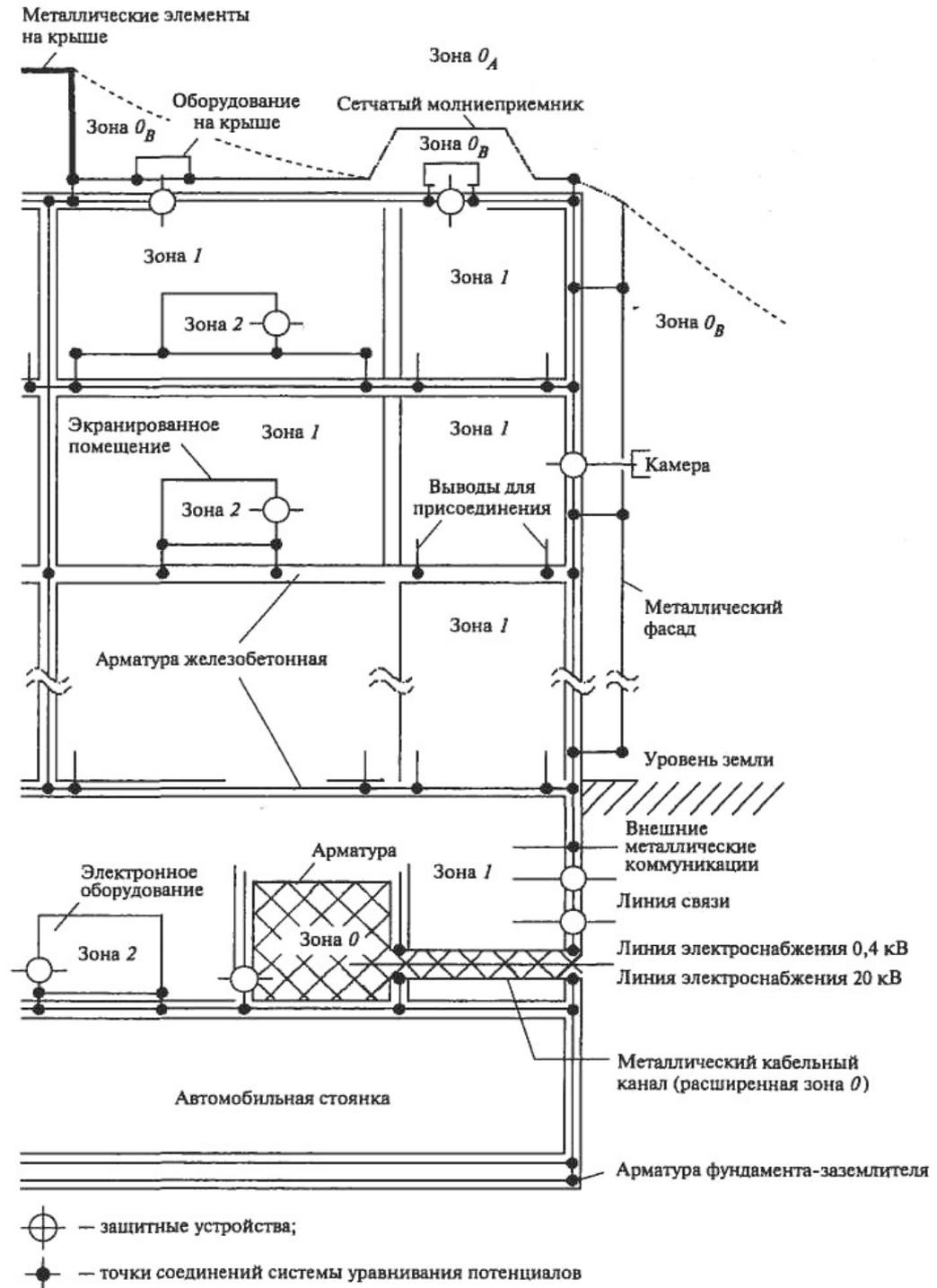


Рис. 6.21. Мероприятия по обеспечению молниезащиты административного здания

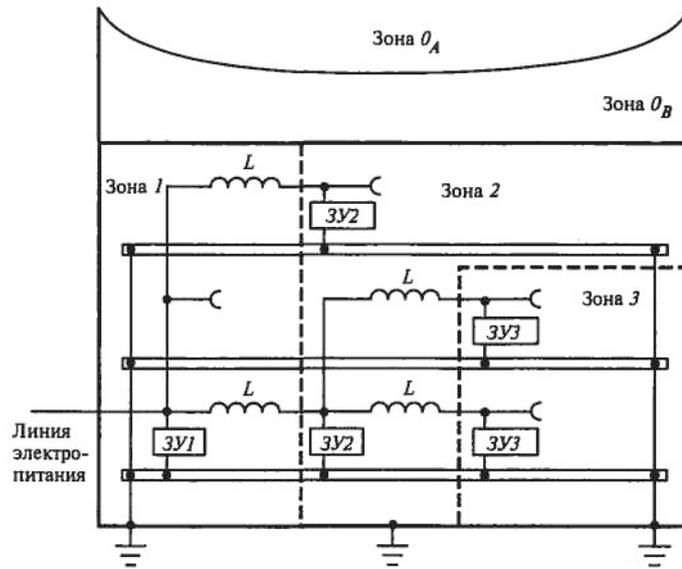


Рис. 6.22. Пример использования защитных устройств в сетях электропитания:

ЗУ1 – ЗУ3 - защитное устройство соответствующего класса.

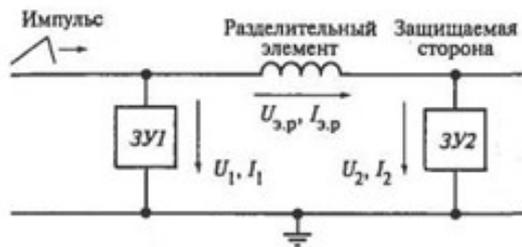


Рис. 6.23. К координации параметров защитных устройств *ЗУ1* и *ЗУ2*

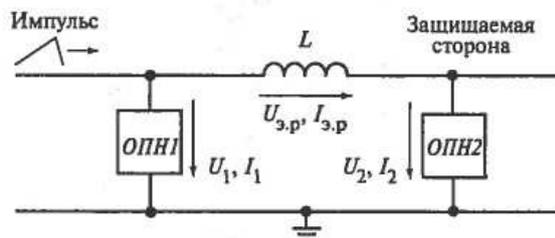
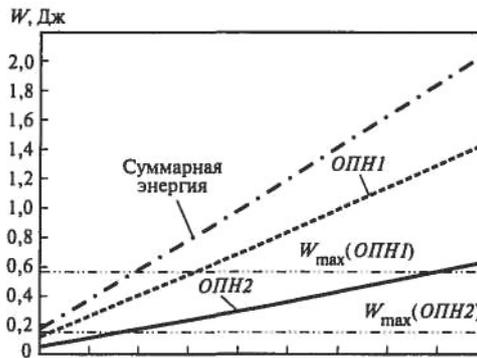


Рис. 6.24. Цепь с устройствами защиты типа ОПН: *ОПН1, ОПН2* - варисторы



6.25. Зависимости выделяемой в варисторах энергия W от тока импульса I

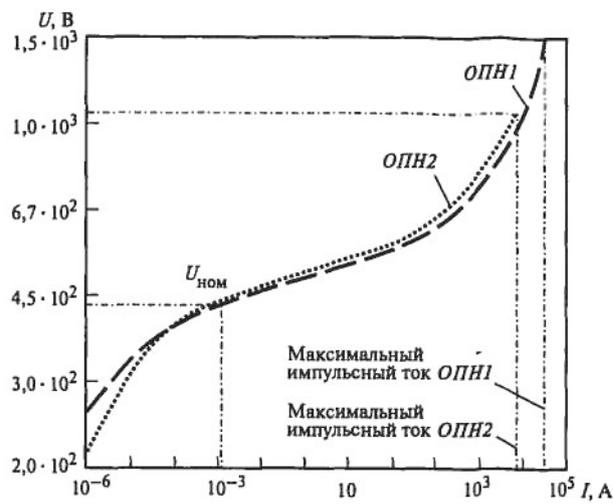


Рис. 6.26. Пример вольт-амперных характеристик ограничителей напряжения OPH1 и OPH2

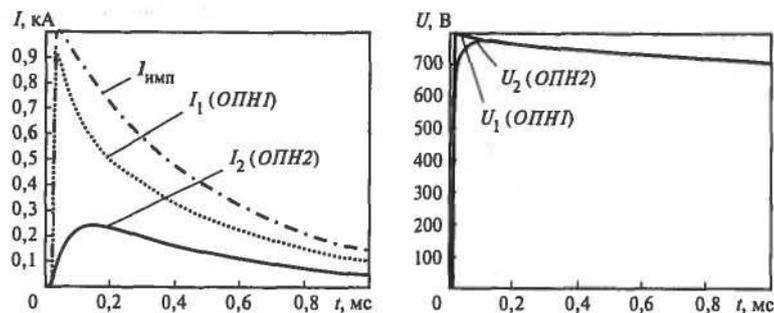


Рис. 6.27. Импульсные характеристики OPH1 и OPH2 при импульсе тока 10/350 мкс

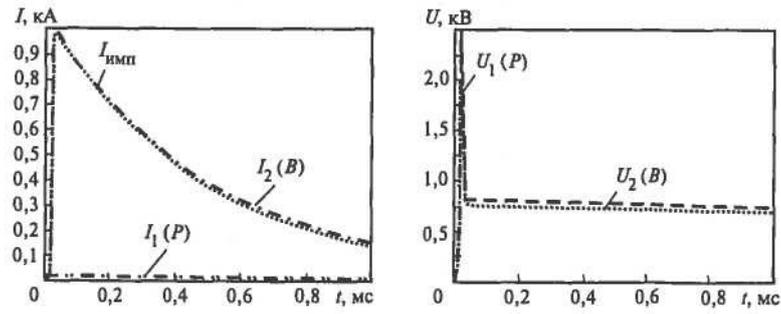


Рис. 6.28. Характеристики защитного устройства с разрядником P и варистором B (разрядник не срабатывает)

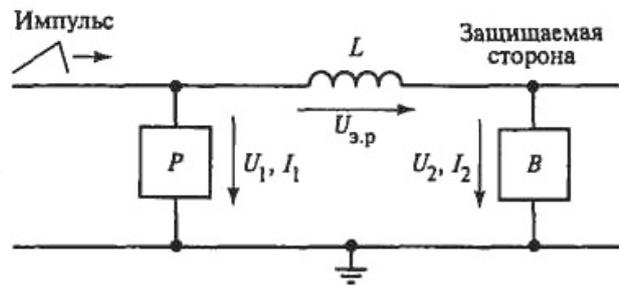


Рис. 6.29. Цепь с разрядником P и варистором B

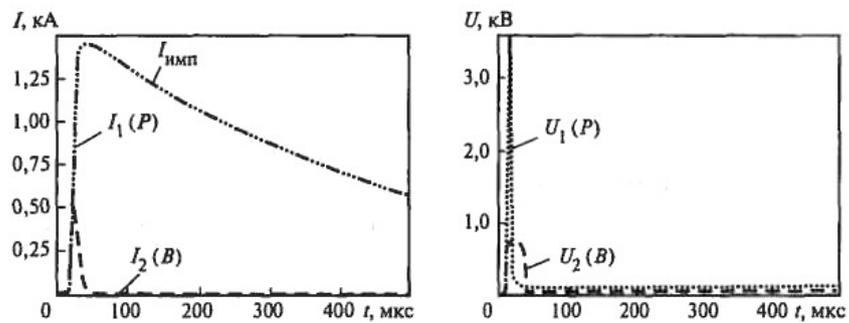


Рис. 6.30. Характеристики защитного устройства с разрядником P и варистором B (разрядник срабатывает)

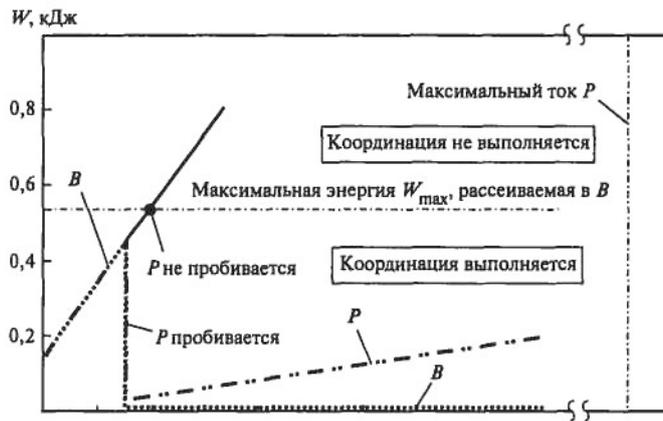


Рис. 6.31. Зависимости выделяемой энергии от импульсного тока $I_{имп}$

в разряднике P и варисторе B от тока в обоих случаях показаны на рис. 6.31. Предъявляются определенные требования и к разделительному элементу. Рассмотрим эти требования. При выполнении удовлетворительной координации срабатывание разрядника происходит при допустимой рассеиваемой энергии в ОПН. Напряжение

$$U_1 = U_2 + U_{э.р.} = L di/dt$$

Обозначим напряжение срабатывания разрядника $U_{нр}$, тогда индуктивность элемента развязки

$$L_{э.р.} = (U_{нр} - U_2) / di/dt$$

Следует выбирать большую индуктивность разделительного элемента из двух рассчитанных случаев (для тока 10/350 мкс и с крутизной di/dt).

На рис. 6.32 показан примерный вид вольт-амперных и вольт-секундных характеристик защитных элементов.

На рис. 6.33—6.36 приведены энергетические характеристики защитного устройства в случаях несрабатывания и срабатывания разрядника при разных $L_{э.р.}$.

На рис. 6.37—6.39 показаны схемы защитных устройств с большим количеством защитных элементов, в которых сопротивления и индуктивности должны быть скоординированы аналогичным образом с характеристиками защитных элементов.

Схема защитного устройства ЗУ с разделительным элементом RL приведена на рис. 6.40. Последовательно включенный резистор R или катушка индуктивности L может отсутствовать, если координация осуществляется по выделившейся в ЗУ энергии другими средствами,

например, с использованием вольт-секундных характеристик или управляемым включением ступени грубой защиты (разрядника).

Координация в соответствии с энергетическим методом поясняется на рис. 6.41.

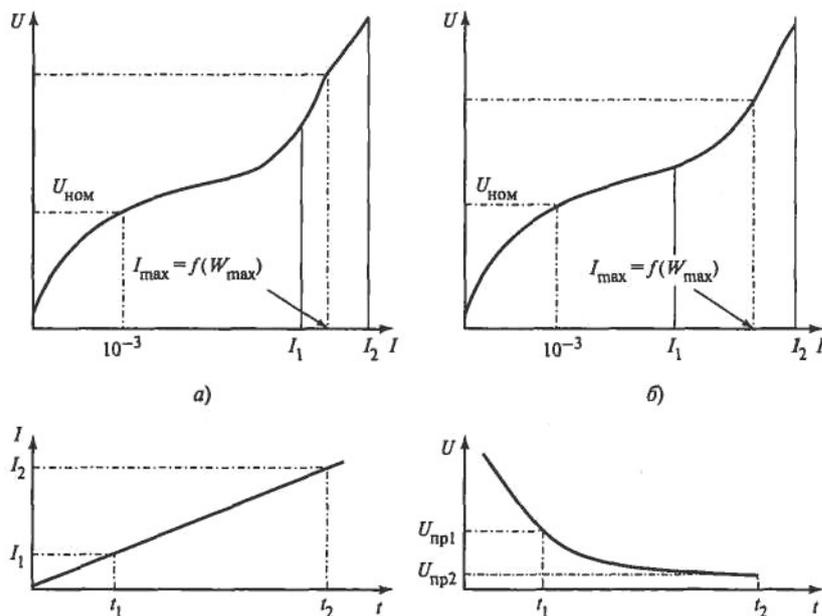


Рис. 6.32. К определению индуктивности разделительного элемента защитного устройства со схемой на рис. 6.30 при импульсе 10/350 мкс и косоугольном импульсе с крутизной 0,1 кА/мкс:

а — вольт-амперная характеристика ОПН при импульсе 10/350 мкс ($I_1 < I_{\max}$ при $L_{\text{э.р-1}} \geq L_{\text{э.р-10/350 мкс}}$; $I_2 > I_{\max}$ при $L_{\text{э.р-2}} \leq L_{\text{э.р-10/350 мкс}}$) *б* — вольт-амперная характеристика ОПН при косоугольном импульсе ($I_1 < I_{\max}$ при $L_{\text{э.р-1}} \geq L_{\text{э.р-0,1 кА/мкс}}$; $I_2 > I_{\max}$ при $L_{\text{э.р-2}} \geq L_{\text{э.р-0,1 кА/мкс}}$); *в* — зависимости тока от времени и вольт-секундная характеристика разрядника при косоугольном импульсе

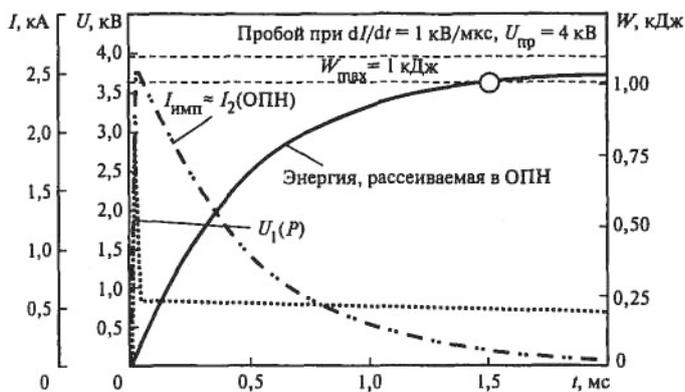


Рис. 6.33. Характеристики защитного устройства со схемой на рис. 6.30 при $L_{э.р} = 8$ мкГн и импульсе 10/350 мкс (разрядник не срабатывает)

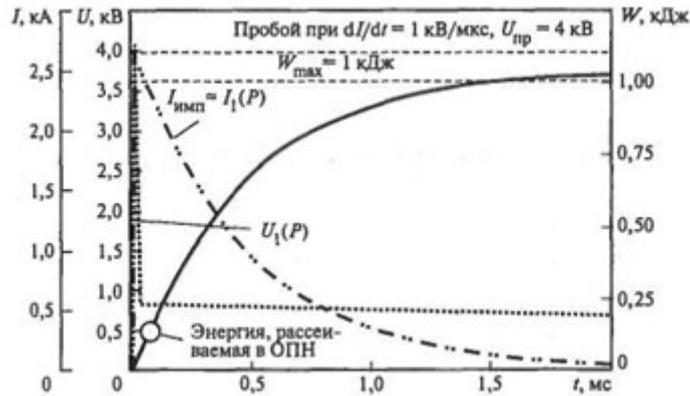


Рис. 6.34. Характеристики защитного устройства со схемой на рис. 6.30 и $L_{э.р} = 10$ мкГн и импульсе 10/350 мкс (разрядник срабатывает)



Рис. 6.35. Характеристики защитного устройства по рис. 6.30 при $L_{э.р} = 10$ мкГн и импульсе с крутизной 0,1 кА/мкс (разрядник срабатывает слишком поздно)



Рис. 6.36. Характеристики защитного устройства по рис. 6.30 при $L_{э.р} = 12$ мкГн и импульсе с крутизной 0,1 кА/мкс (разрядник срабатывает своевременно)

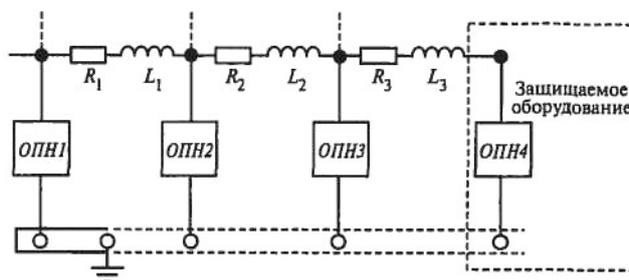


Рис. 6.37. Вариант координации характеристик защитного устройства с несколькими ОПН с одинаковым остающимся напряжением

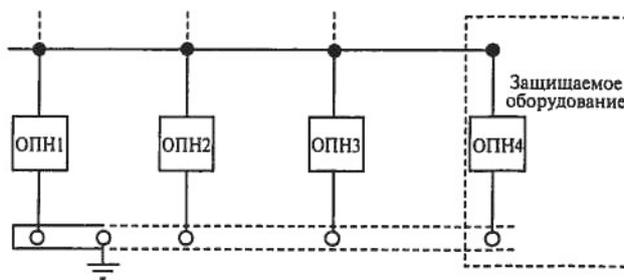


Рис. 6.38. Вариант координации нескольких ОПН с разными остающимися напряжениями ($U_{ост1} < U_{ост2} < U_{ост3}$)

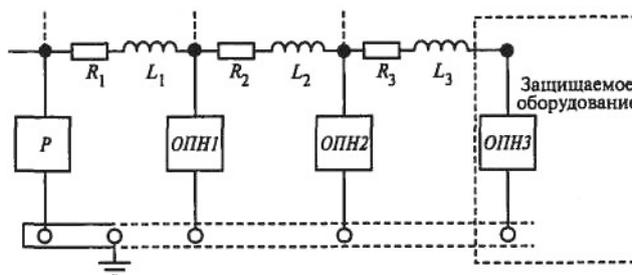


Рис. 6.39. Вариант координации разрядника и нескольких ОПН с одинаковыми остающимися напряжениями

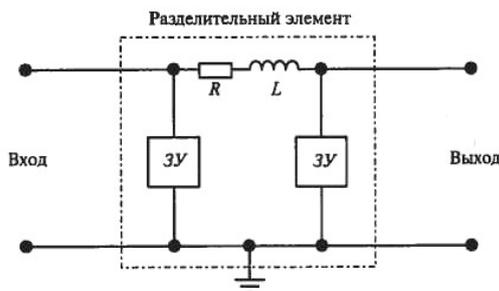


Рис. 6.40. Защитное устройство с двумя ограничителями в одном корпусе

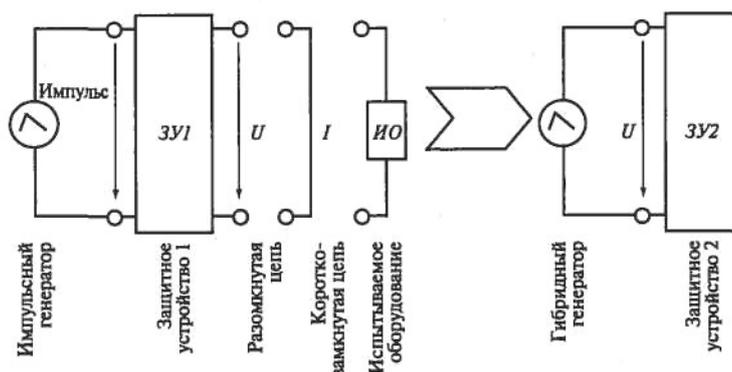


Рис. 6.41. Координация в соответствии с энергетическим методом

Преобразование импульсов напряжения холостого хода $1,2/50$ мкс в импульс тока $8/20$ мкс происходит при срабатывании ступени грубой защиты.

Выше достаточно подробно описаны защитные устройства, электромагнитные воздействия на технические средства, установленные в той или иной зоне. К таким устройствам относятся варисторы, ограничивающие перенапряжения, разрядники, уравнивающие потенциалы, диоды, фильтры, комбинированные устройства, выполняющие функции тонкой и грубой защиты.

В сетях электроснабжения при использовании разрядников традиционного исполнения возникает проблема гашения дуги КЗ. При монтаже разрядников в распределительных щитах необходимо учитывать выхлоп, выброс плазмы, и в зоне выброса не допускается нахождение шин, проводов, других защитных устройств. Фирмами Leutron (ФРГ), Nakel (Греция), а также и другими изготовителями применяются герметичные многоззорные разрядники с 12 последовательно соединенными электродами, заполненные инертным газом, что обуславливает новые свойства защитных устройств, содержащих такие разрядники. Использование варисторов, присоединенных параллельно таким разрядникам, обеспечивает следующий алгоритм работы.

При появлении импульса перенапряжения ток протекает через варистор. При достижении тока примерно 4 кА остающееся напряжение на

варисторе достигает напряжения пробоя разрядника. Разрядник пробивается, и в нем образуются 11 последовательно соединенных каналов разряда.

В каждом канале имеются приэлектродные падения напряжения величиной примерно 15 В. Таким образом, на разряднике существует падение напряжения 165 В, что ограничивает ток замыкания сети электропитания и облегчает гашение дуги с сопровождающим током.

Таким образом, использование защитных устройств с герметичным многоззорным разрядником на границах зон сети электроснабжения обеспечивает как ограничение перенапряжений, так и отключение тока замыкания сети в момент первого перехода тока через нуль, т.е. ток замыкания протекает не дольше 10 мс.

Эти же разрядники способны пропускать импульсы тока 10/350 мкс амплитудой до 100 кА, т.е. они могут использоваться для уравнивания потенциалов в зонах 0_A и 0_B .

6.4. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВАРИСТОРОВ ДЛЯ ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Остающееся напряжение на варисторе при протекании по нему импульсного тока является одним из важнейших параметров защитных устройств, ограничивающих перенапряжения при обеспечении ЭМС. Принято считать, что оно определяется вольт-амперной характеристикой варистора. Падение напряжения в цепи присоединения варистора зависит от индуктивности соединительных проводов (рис. 6.42). При этом падение напряжения на индуктивности наибольшее при высокой крутизне тока, т.е. в течение фронта импульса тока. Немногие непосредственные измерения напряжения показали, что имеет место не только индуктивная составляющая на фронте импульса остающегося напряжения, но и более существенные выбросы позднее фронта импульса тока. Поэтому были проведены измерения этих выбросов.

Исследования проводились на имитаторе тока молнии, описанном в [1]. Для проведения экспериментов был выбран импульс тока 10/350 мкс, характерный для молний, развивающихся с положительно заряженного облака и обладающий наибольшей удельной энергией *ji At.* Объект исследования — варистор Protec BR 150/320 фирмы «Искра Защита» (Словения). Импульс тока удовлетворял требованиям МЭК [19].

Измерения тока выполнялись с помощью трубчатого шунта сопротивлением 0,33 мОм. Малоискажающий активный делитель напряжения присоединялся к участку разрядного контура, содержащему исследуемый варистор. Этот участок включал в себя также шунт, соединительные провода и контактные соединения. Общая длина участка составляла около 30 см. При измерениях использовался цифровой осциллограф фирмы Le Croy LT342 с полосой пропускания 500 МГц.

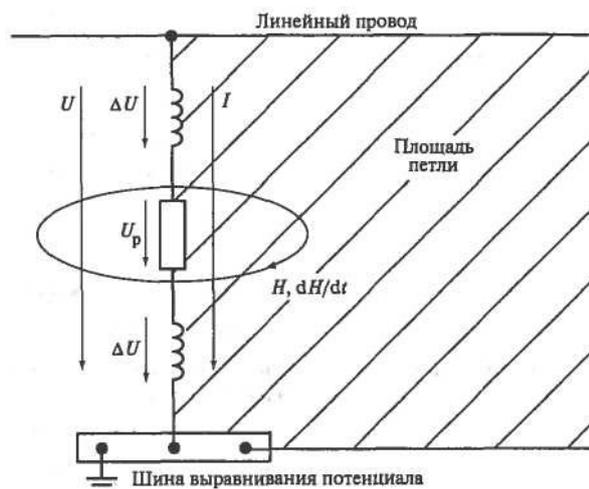


Рис. 6.42. Импульсные напряжения на участках подключения защитного устройства:

1 – часть тока молнии; U – импульсное напряжение между проводом фазы и шиной выравнивания потенциалов; U_p – напряжение на защитном устройстве; ΔU – индуктивное падение напряжения на соединительных проводах; H , dH/dt – напряженность магнитного поля и ее производная по времени

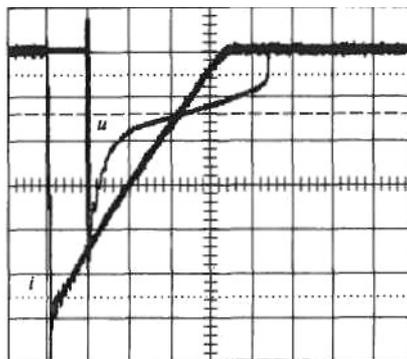


Рис. 6.43. Осциллограммы тока i и напряжения u :
 $m_i=3,7$ кА/дел.; $m_u=800$ В/дел.; $m_t=200$ мкс/дел.

Осциллограммы тока i и напряжения u приведены на рис. 6.43. Осциллограмма напряжения для удобства обработки смещена относительно осциллограммы тока на одно деление. Амплитуда тока составила 20,3 кА. Спад тока практически линейный. Напряжение на варисторе спустя 400 мкс от начала импульса напряжения равно 1050 В. Импульс напряжения имеет выброс при меньших временах.

При тех же условиях снята осциллограмма импульса напряжения с помощью зонда Tectronix P6015A, имеющего коэффициент деления 1000, входную емкость 3пФ, сопротивление 100 МОм. Зонд подключался непосредственно к зажимам варистора. Сигнал с зонда регистрировался

осциллографом Textronix TDS 3012 с полосой пропускания 100 МГц. Осциллограф с источником питания был установлен на изоляционной подставке и не имел соединения с землей за исключением соединения зонда.

Осциллограммы напряжения на варисторе приведены на рис. 6.44 и 6.45. Из рис. 6.44 видно, что напряжение на варисторе остается практически неизменным во время действия импульса тока. На рис. 6.45 заметно увеличение напряжения в течение фронта за счет взаимной индуктивности разрядного контура генератора и контура присоединения зонда к варистору. Разница в импульсах напряжения на рис. 6.43 и 6.44 связана с влиянием активного нелинейного сопротивления токовой части контура присоединения делителя. Оно уменьшается во времени, что, вероятно, связано с поверхностным

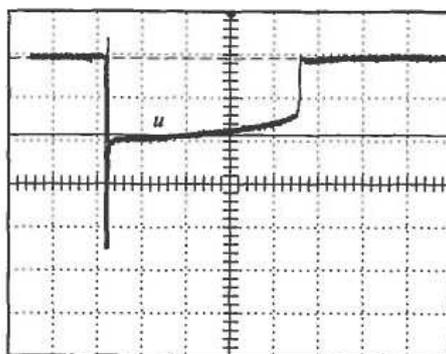


Рис. 6.44. Осциллограмма напряжения u на варисторе:

$$m_u = 800 \text{ В/дел.}; m_t = 200 \text{ мкс/дел.}$$

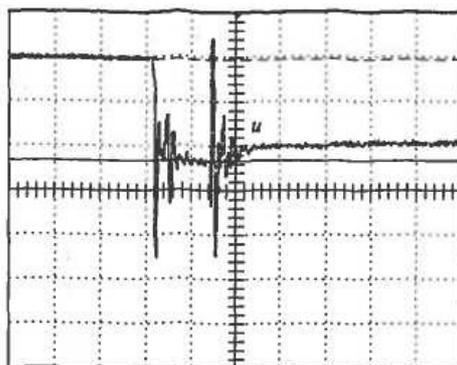


Рис. 6.46. Осциллограммы тока i и напряжения u при коротком замыкании:

$$m_u = 800 \text{ В/дел.}; m_t = \pm 10 \text{ мкс/дел.}$$

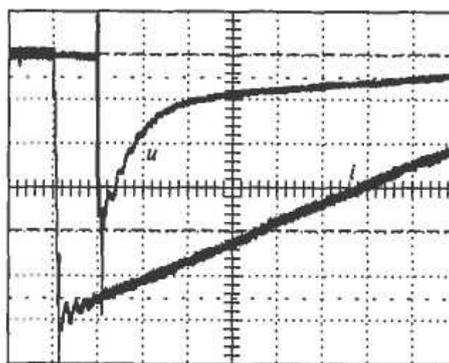


Рис. 6.45. Осциллограмма напряжения к на варисторе:
 $от_т = 3,7 \text{ кА/дел.}; от_ц = 800 \text{ В/дел.}; /я, = 10 \text{ мкс/дел}$

эффектом и проникновением электромагнитной волны в металлические элементы токовой части контура.

Для подтверждения этого на рис. 6.46 приведена осциллограмма напряжения на закоротке, представляющей собой медный многожильный провод сечением $2,5 \text{ мм}^2$ и длиной 23 см.

Таким образом, напряжение в схемах с варисторами определяется не только остающимся напряжением на варисторе, но и падениями напряжения на соединительных проводах, контактах. В некоторых случаях эти напряжения могут быть соизмеримы.

Проведенные исследования позволяют сформулировать следующую рекомендацию: присоединение защитного варистора

к линейному проводу и шине *PE* или к нейтральному проводу должно выполняться предельно короткими проводами для того, чтобы уменьшить как индуктивное падение напряжения на них, так и активное падение с учетом проникновения электромагнитного поля в соединительные провода. Это означает, что целесообразно на защитных устройствах предусматривать два контактных присоединения не только линейных проводов (как это предусмотрено некоторыми производителями защитных устройств, крепящихся на стандартной DIN-рейке в шкафах), но и для присоединения к шине *PE* или к нейтральному проводу *N*.

6.5 ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ВНУТРИ ЗОН

Для обеспечения электромагнитной совместимости внутри зон необходимо также соблюдать определенные требования. Корпуса электрических и электронных приборов должны быть объединены между собой, связаны с экраном защитной зоны. Основными конфигурациями таких соединений являются звездообразная и сеточная (рис. 6.47). В пределах одной зоны могут использоваться обе конфигурации (рис. 6.48).

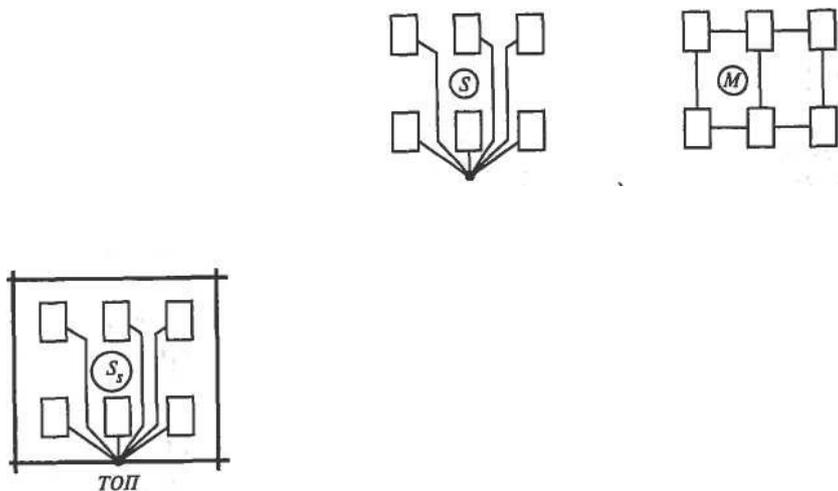
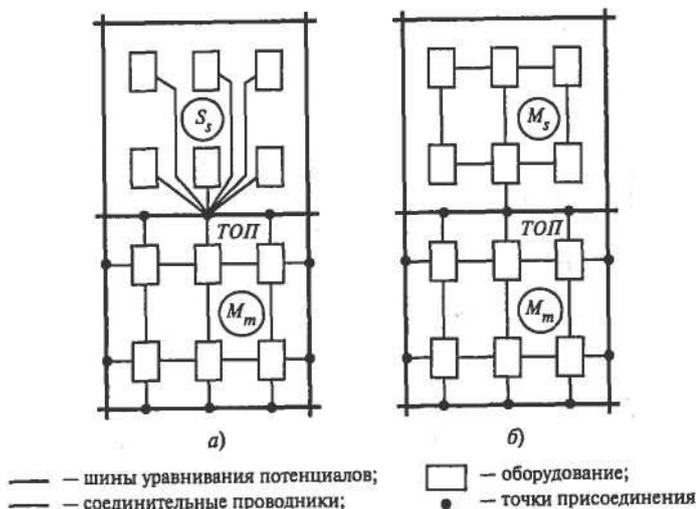


Рис. 6.47. Присоединение корпусов электронного оборудования к системе уравнивания потенциалов:

a — основные конфигурации; *б* — присоединение к системе уравнивания потенциалов; *ТОП* — общая точка присоединений; *S*, *S_s* —



звездообразные конфигурации; *M*, *M_m* — конфигурации в виде сетки

Рис. 6.48. Комбинации способов присоединения корпусов электрического и электронного оборудования к системе уравнивания потенциалов:

a — звездообразная конфигурация и конфигурация в виде сетки; *б* — конфигурации в виде сетки с присоединением к системе уравнивания потенциалов в одной точке; *ТОП* — общая точка присоединений; *S_s* — звездообразные конфигурации; *M_m* — конфигурации в виде сетки; *M_s* — конфигурация в виде сетки, объединенная с одной точкой присоединения к системе уравнивания потенциалов

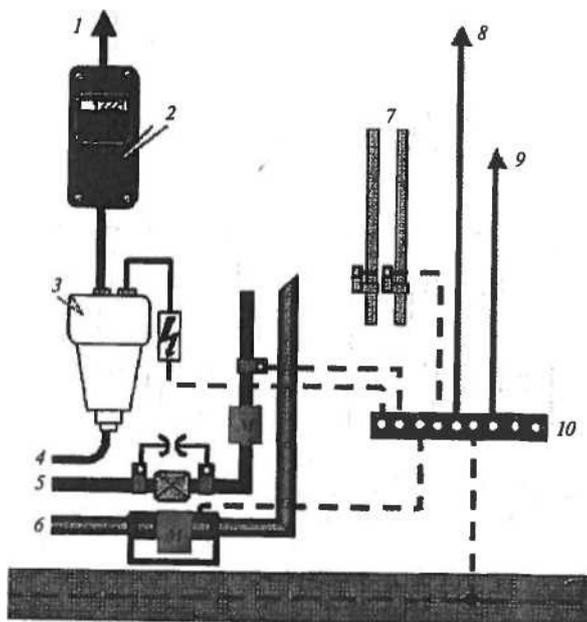


Рис. 6.49. Присоединения к шине уравнивания потенциалов в здании:

1 - присоединение потребителя; 2 - счетчик потребления энергии; 3 — щиток здания; 4 - силовой кабель; 5 — газовая труба; 6 - труба водопровода; 7 — труба центрального отопления; 8 — присоединение электронного оборудования; 9 - присоединение оболочки кабеля антенны; 10 — шина уравнивания потенциалов (PE); м — расходомеры

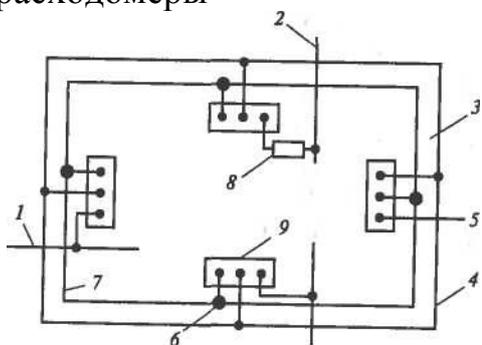


Рис. 6.50. Пример использования щитков шины уравнивания потенциалов (PE) в здании с большим числом входящих проводников и кольцевой шиной заземлителя:

1 — металлический проводник снаружи, например водопровод; 2 — кабель электроснабжения или линия связи; 3, 7 — арматура железобетона внешних стен и фундамента; 4 — кольцевая шина заземления; 5 — присоединение заземлителя; 6 — точки присоединения шины уравнивания потенциала; 8 — защитное устройство; 9 — щитки шины уравнивания потенциалов

Предпочтительным является объединение корпусов в виде звезды с общей точкой на экране зоны.

Типичный вариант присоединений к шине PE внутри здания приведен на рис. 6.49, а расположения щитков (клем-мников) шин PE — на рис.

Важным вопросом при обеспечении ЭМС является снижение наводок в петлях соединительных проводников между приборами. Некоторые способы уменьшения наводок показаны на рис. 6.53.

В любых случаях следует использовать металлические предметы, конструкции в

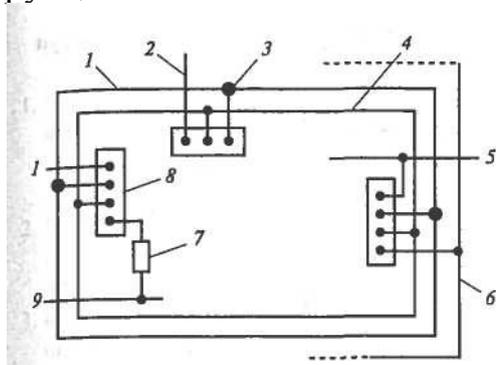


рис. 6.51. Пример присоединений к внутренней кольцевой шине уравнивания потенциалов большого числа входящих электрических и металлических коммуникаций:

1 — арматура железобетона внешних стен и фундамента; 2 — к дополнительному заземлителю; 3 — точки присоединений; 4 — внутренняя кольцевая шина; 5 — к внешним металлическим коммуникациям, например водопроводу; 6 — кольцевая шина заземлителя; 7 — защитное устройство; 8 — щитки системы уравнивания потенциалов; Р — линии связи или электроснабжения; 10 — к дополнительному заземляющему электроду

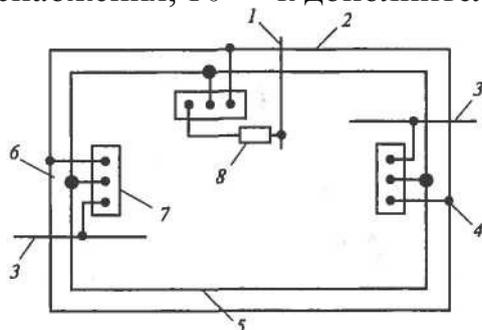


Рис. 6.52. Пример соединений с шиной уравнивания потенциалов в помещении на этаже с большим числом проводящих коммуникаций:

1 — кабель электроснабжения или связи; 2 — внешняя кольцевая горизонтальная шина (выше уровня земли); 3 — внешние подводящие коммуникации; 4 — присоединение к спуску; 5 — арматура железобетонных стен; 6 — специальные точки присоединения к арматуре; 7 — щитки шины уравнивания потенциалов; 8 — защитное устройство

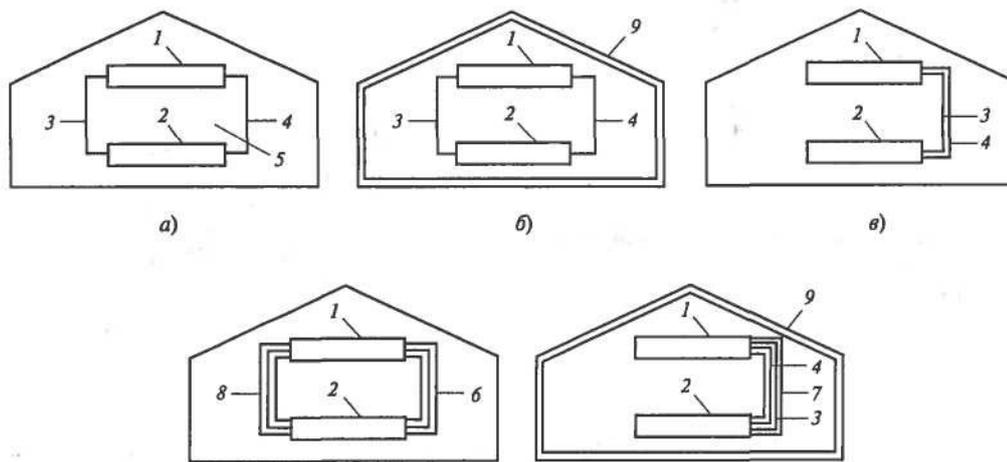


Рис. 6.53. Методы снижения наводок с помощью экранирования и прокладки проводящих элементов:

a — незащищенная система; *б* — использование внешнего экрана, например сетки молниезащитной системы, арматуры железобетонных стен, металлического фасада и т.д.; *в* — уменьшение индукционной петли; *г* — экранирование соединительных проводов; *д* — прокладка линий в металлических трубах, лотках; 1,2 — устройства с металлическими корпусами; 3 — линия электроснабжения; 4 — линия передачи данных; 5 — индукционная петля; 6 — экран линии передачи данных; 7 — металлическая труба; 8 — экран линии электроснабжения; 9 — внешняя система молниезащиты

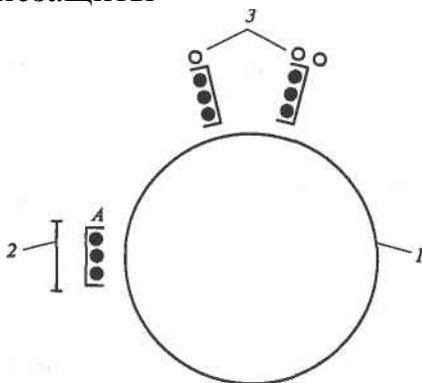


Рис. 6.54. Использование трубопроводов и лестницы в качестве естественного экрана: 1 — резервуар; 2 — вспомогательная лестница; 3 — трубопроводы

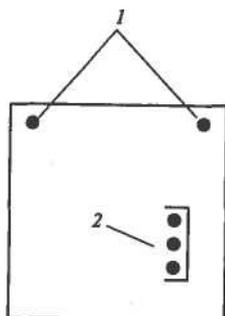


Рис. 6.55. Рациональное размещение линий в мачте (поперечное сечение):

1 — рациональное размещение кабелей в углах балок; 2 — вариант размещения кабелей в лотке внутри мачты

качестве экрана. Примеры их использования приведены на рис. 6.54 и 6.55. Иногда следует использовать в качестве экрана дополнительные металлические пластины (как показано на рис. 6.56), а соединительные кабели прокладывать в непосредственной близости к пластине. Благодаря малой площади петли индуцированное напряжение в петле невелико.

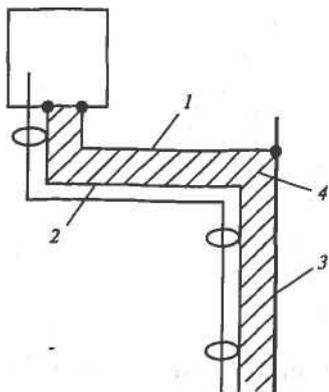
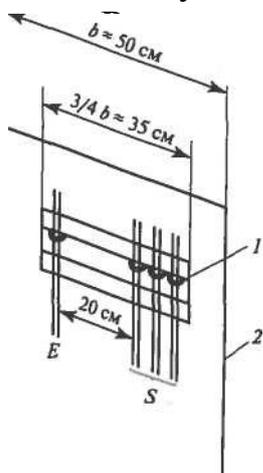


Рис. 6.56. Уменьшение площади петли при размещении кабелей на поверхности металлической пластины:

1 — PE-шхи& (только при эксплуатации оборудования класса 1); 2 — дополнительный экран кабеля, заземленный с обоих концов; 3 — металлическая пластина, используемая в качестве дополнительного экрана; 4 — петля с уменьшенной площадью



Использование металлической пластины в качестве дополнительного экрана:

1 — крепление кабеля с соединением экрана кабеля к металлической пластине или без соединения; 2 — края пластины; E — линии электропитания; S — сигнальные линии

Сигнальные линии при их размещении на пластине должны быть удалены от линий электропитания (рис. 6.57).

МОЛНИЯ И МОЛНИЕЗАЩИТА

2. Перечислите нормативные материалы по обеспечению электромагнитной обстановки на объектах электроэнергетики.

ВОПРОС 3. Изложите

9.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГРОЗОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Молния — гигантский электрический разряд в атмосфере. Молния возникает в результате накопления электрических зарядов в грозовом облаке. Она сопровождается ярким свечением причудливо искривленного канала, ударной волной, распространяющейся в окружающем воздухе, переходящей на некотором расстоянии в звуковую. Акустическое проявление молнии называют громом.

Молния представляет собой грозное природное явление, приносящее ущерб человеку и его имуществу. Этот ущерб связан с непосредственным поражением людей и животных, пожарами в жилых и производственных помещениях, взрывами опасных объектов, возникновением лесных пожаров, генерированием мощного электромагнитного импульса и т.д. Электромагнитный импульс молнии создает проблемы электромагнитной совместимости.

На Земле одновременно существуют примерно 2000—3000 грозовых очагов и каждую секунду ее поверхность поражают 100—200 ударов.

По поверхности земного шара грозы распределяются неравномерно. Частота их образования зависит от времени года, времени суток, рельефа местности. Над сушей гроз примерно в 10 раз больше, чем над океанами. В вечерние и ночные часы гроз больше, чем днем. В средних широтах северного полушария грозы в основном бывают с мая по сентябрь. Этот период называют грозовым сезоном. Зимой грозы возникают сравнительно редко.

В средних широтах землю поражают 30—40 % общего числа молний, остальные 60—70 % составляют разряды между облаками или между разноименно заряженными частями облаков. В экваториальных широтах изотерма 0 °C располагается выше, чем в средних широтах. Соответственно выше и области концентрации зарядов в облаках, поэтому разряды в землю составляют еще меньшую часть.

Интенсивность грозовой деятельности в какой-либо местности характеризуется средним числом грозовых часов в году $D_{г}$. Число грозовых часов минимально в высоких широтах и постепенно увеличивается к экватору, где повышенная влажность воздуха и высокая температура, способствующие образованию грозовых облаков, наблюдаются практически в течение всего года.

В некоторых районах (Армения, Краснодарский край, Донбасс, Карпаты) годовое число грозовых часов достигает 100 и более,

В ряде стран пользуются другой, менее удобной характеристикой грозовой деятельности: годовым числом грозовых дней $N_{д}$ (а не часов). По данным Всемирной метеорологической организации в Центральной Африке наблюдается до 180 грозовых дней в году, в Малайзии, Перу, на Мадагаскаре — до 140 дней, в Бразилии, Центральной Америке — 100—120 дней.

Для практических задач молниезащиты наземных сооружений важна удельная плотность ударов молнии в землю $n_{уд}$, т.е. годовое число ударов в 1 км² земной поверхности. В пределах годовой продолжительности гроз до $D_{г}=100$ ч удельная плотность ударов молнии в землю практически прямо пропорциональна $D_{г}$. Это дало возможность принять в России наряду с удельной плотностью ударов молнии другую характеристику грозовой деятельности: среднее число ударов молнии $n \approx 6,7$ в 1 км² поверхности земли за 100 грозовых часов.

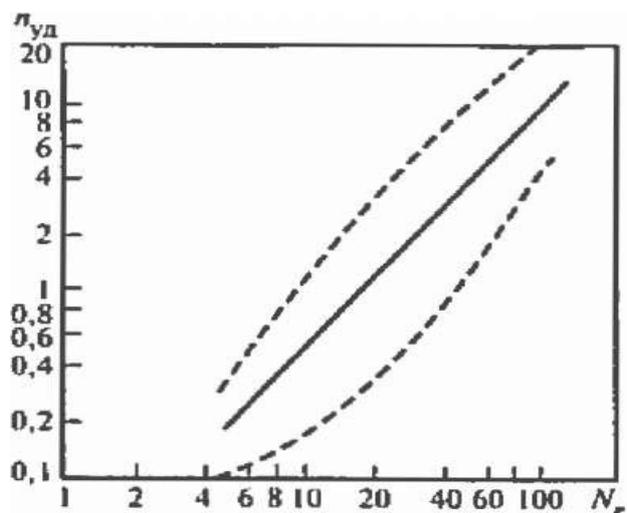


Рис. 9.1. Зависимость удельного числа $n_{уд}$ ударов молнии в 1 км² площади Земли от числа $N_{г}$ грозовых дней в году (штриховыми линиями ограничена область разбросов по данным наблюдений)

Если интенсивность грозовой деятельности выражена годовым числом грозовых дней $N_{г}$, то удельная плотность разрядов $n_{уд}$ в 1 км² поверхности за число $N_{г}$ грозовых часов в году можно оценить по рис. 9.1. Однако следует иметь в виду, что при одном и том же значении $N_{г}$ удельная плотность ударов молнии в землю подвержена значительным разбросам вследствие влияния рельефа местности и климатических условий.

Для территории нашей страны $D_{г}=(1,5 \div 2,3)N_{г}$. Чем больше число грозовых дней в году, тем продолжительнее грозы. Из этого следует, что зависимость $n_{уд}=f(N_{г})$ нелинейна, и поэтому нельзя характеризовать грозовую деятельность просто числом ударов молнии в 1 км² поверхности земли за 100 грозовых часов.

Возвышающиеся над поверхностью земли объекты вследствие развития с них встречных лидеров собирают удары молнии с площади, превышающей занимаемую территорию. Однако, приняв $n=6,7$, можно оценить число ударов молнии за 100 грозовых часов в сооружение длиной A , шириной B и высотой H (размеры в метрах) по формуле

$$n_{y\partial} = 6,7(A+6H)(B+6H) \cdot 10^{-6}$$

Число ударов молнии в 100 км ВЛ электропередачи за 100 грозовых часов

$$n_{y\partial} = 6,7 \cdot 100 \cdot 6 h_{cp} \cdot 10^{-3} \approx 4 h_{cp}$$

где $h_{cp} = (h_{on} - \frac{2}{3} f)$ - средняя высота подвеса троса или, при отсутствии тросов, верхнего провода; h_{on} — высота опоры, м; f — стрела провеса троса или провода, м.

Годовое число ударов молнии в линию длиной L км, при числе грозовых часов в году D_G , ч/год, определяется как

$$n_G = n_{y\partial} \frac{L}{100} \cdot \frac{D_G}{100}$$

9.2. НАКОПЛЕНИЕ ЗАРЯДОВ В ГРОЗОВОМ ОБЛАКЕ

Грозовые облака (кучево-дождевые) простираются на высоте до 15 км, а их основание находится на высоте 0,3-3,5 км. Грозовое облако представляет собой громадную «вытяжную трубу», в которой потоку воздуха по мере его подъема непрерывно сообщается дополнительное тепло, поэтому в зоне облака он всегда теплее, чем вне его. По мере вертикального восхождения потока воздуха в нем происходит конденсация водяных паров, при которой выделяется тепло, затем происходит замерзание капель, также сопровождающееся нагревом окружающего воздуха.

В верхней части грозовое облако может состоять из снежинок, кристаллов льда, ледяной или снежной крупы, градин. Нижняя часть, находящаяся при температуре выше 0°C, состоит обычно из крупных капель воды и поэтому выглядит очень темной.

Площадь основания грозовых облаков, образующихся в летнее время в результате нагрева земной поверхности (тепловые грозы), составляет несколько квадратных километров. Если грозовые облака возникают на границе раздела теплых и холодных воздушных масс (фронтальные грозы), то занимаемая ими площадь составляет полосу шириной до 15 км и длиной десятки и даже сотни километров.

Громадная масса воды и льда удерживается в грозовом облаке восходящими воздушными потоками, скорость которых составляет 5—30 м/с. Эти потоки увлекают нагретый у поверхности земли воздух и тем самым снабжают грозовое облако тепловой энергией, часть из которой затем преобразуется в электрическую.

Таким образом, фазе молнии предшествует процесс электризации частиц воды и льда, разделения и накопления электрических зарядов в грозовом облаке.

Имеется множество теорий электризации капель воды и кристаллов льда в грозовых облаках, в большинстве своем нашедших подтверждение в лабораторных исследованиях. В грозовом облаке могут действовать несколько механизмов электризации в зависимости от стадии развития облака и агрегатного состояния воды в нем.

Рассмотрим два механизма, характерных для нижней части грозового облака при температуре выше 0°C и для частей облака расположенных выше нулевой изотермы.



Рис. 9.2. Процесс разделения зарядов в облаке при положительных температурах воздуха



Рис. 9.3. Процесс разделения зарядов в облаке при отрицательных температурах

В основу механизма электризации, действующего при положительной температуре, положено дробление крупных дождевых капель в восходящем потоке воздуха. На границе капли воды и окружающего ее воздуха образуется так называемый двойной электрический слой, при этом поверхность капли имеет отрицательный заряд (рис. 9.2). В восходящем воздушном потоке при скорости v около 8 м/с водяная капля расплющивается, теряет устойчивость и дробится. Мелкая водяная пыль, сорванная с поверхности капли, оказывается отрицательно заряженной и уносится вверх. Крупные элементы капли остаются в нижней части облака и несут на себе положительный заряд.

Механизм электризации при отрицательных температурах связан с процессом замерзания капель воды. Замерзание начинается с поверхности

капли, которая покрывается коркой льда (рис. 9.3). Выделяющееся при этом тепло поддерживает температуру внутри капли около 0°C . Под действием разности температур между сердцевиной капли и ее поверхностью происходит диффузия ионов. Положительные ионы водорода H^+ обладают большей подвижностью, чем ионы OH^- , поэтому поверхностный слой капли заряжается положительно, в то время как сердцевина капли получает избыточный отрицательный заряд. Когда замерзает сердцевина капли, то вследствие ее расширения ранее замерзший поверхностный слой лопается, и его положительно заряженные осколки уносятся потоком воздуха в верхние части облака.

На рис. 9.4 показана усредненная модель грозовой ячейки облака. Уровни расположения зарядов близки к наблюдаемым, а значения зарядов соответствуют средним значениям напряженности электрического поля, измеряемым у поверхности земли. Сравнительно небольшой положительный заряд в нижней части облака переносится каплями дождя на землю. Предполагается также, что он может способствовать развитию разряда из отрицательно заряженной области.

Грозовое облако по структуре основных зарядов представляет собой диполь. Средний электрический момент, нейтрализуемый при разряде, составляет около $100 \text{ Кл}\cdot\text{км}$, а максимальный — примерно $500 \text{ Кл}\cdot\text{км}$. Частота разрядов при умеренных грозах — около одного в 1 мин., а при интенсивных — может достигать 5—10 в 1 мин.

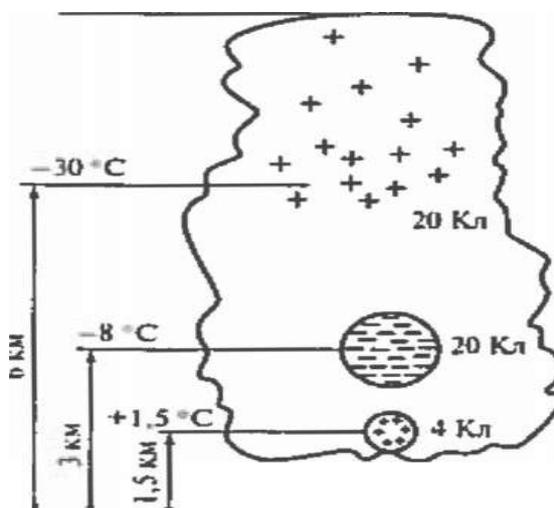


Рис. 9.4. Структура грозовой ячейки облака

Средняя плотность зарядов в облаке $3 \cdot 10^9$ — $3 \cdot 10^8 \text{ Кл}/\text{м}^3$, а скорость их накопления $3 \cdot 10^{-10}$ — $3 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}/(\text{м}^3\cdot\text{с})$. Средняя продолжительность электрической активности отдельного грозового облака 30—40 мин.

9.3. ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ МОЛНИИ

Как отмечалось, большинство ударов молнии (80—90 %) развиваются из отрицательно заряженных областей грозового облака и переносят на землю отрицательный заряд.

По мере концентрации отрицательных зарядов в облаке увеличивается напряженность электрического поля, и когда она достигает критического значения, зависящего от высоты над землей, становится возможной ионизация воздуха, и в сторону земли начинает развиваться разряд. На начальной стадии, называемой лидерной, канал разряда развивается ступенчато. Ступени следуют друг за другом с интервалами 30—50 мкс. Во время каждой ступени канал удлиняется на 5—100 м. Новая часть разрядного канала светится очень ярко, в то время как старая вспыхивает сравнительно тускло (рис 9.5). Лидерный процесс развивается со средней скоростью $(1—2) \cdot 10^5$ м/с и продолжается (в видимой с земли части) 10—30 мс.

Канал лидера окружен обширной зоной ионизации, имеющей избыточный заряд того же знака, что и облако. Радиус зоны ионизации можно оценить по формуле

$$r_{з.и.} = \frac{\sigma_l}{2\pi\epsilon_0 E_{cp}}$$

где E_{cp} — напряженность поля на границе зоны ионизации (меньше критической напряженности, может быть принята равной 10—15 кВ/см); σ_l — линейная плотность заряда (зависит от лидерного тока i_l и средней скорости развития лидера v_l может быть оценена как i_l/v_l).

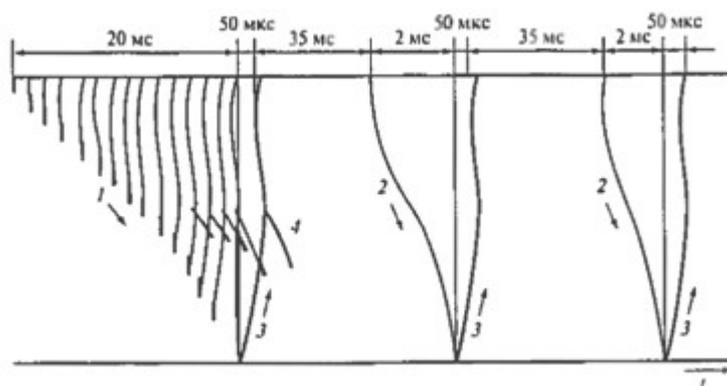


Рис. 9.5. Схема развития нисходящей молнии:

1 — ступенчатый лидер; 2 - стреловидный лидер, 3 - главный разряд; 4 — ветвь

Ток в лидерной стадии молнии имеет порядок десятков и сотен ампер. Варьируя ток, получаем значения радиуса зоны ионизации $r_{з.и.} = 2 \div 20$ м.

Заряды облака и лидера индуцируют на поверхности земли и на расположенных на ней объектах заряды другого знака. По мере приближения лидера к земле индуцированный заряд и напряженность электрического поля на вершинах возвышающихся над поверхностью земли объектов вырастают, и с них могут начать развиваться встречные лидеры.

Когда канал развивающегося от облака лидера приближается к земле или к одному из встречных лидеров на расстояние 25 - 100 м, то между ними возникает высокая напряженность электрического поля, среднее значение которой оценивается в 10 кВ/см. Промежуток между лидерами пробивается за несколько микросекунд, и в нем выделяется энергия 0,5 - 5 МДж, которая расходуется на нагрев и термоионизацию. Проводимость этой части канала разряда резко возрастает. Область высокой напряженности поля, образовавшаяся на границе контактирующего с землей хорошо проводящего канала и зоны ионизации лидера, перемещается по направлению к облаку со скоростью $1,5 \cdot 10^7$ — $1,5 \cdot 10^8$ м/с (0,05—0,5 скорости света). При этом происходит нейтрализация зарядов лидера. Ток в канале за 5 – 10 мкс достигает многих десятков кило-ампер, а затем за 25 —200 мкс понижается до половины максимального значения. Процесс этот, называемый главным разрядом, сопровождается сильным свечением канала разряда и электромагнитным излучением. Канал разряда, разогретый за очень короткое время до температуры 20000—30000 К, быстро расширяется, что вызывает распространение в окружающем воздухе ударной волны, вырождающейся в звуковую и воспринимаемой как гром.

В завершающей (финальной) стадии молнии по каналу в течение десятков миллисекунд проходит ток порядка десятков и сотен ампер. В это время нейтрализуются заряды облака.

В грозовом облаке во многих случаях образуется не одна область концентрации зарядов, а несколько. Располагаются они, как показывает анализ изменения электрического поля во время удара молнии, в основном на разной высоте. Поэтому развитие разряда из нижней заряженной области по другим направлениям, кроме земли, затруднено. Только после нейтрализации заряда нижней области становится возможным разряд из следующей по высоте концентрации зарядов (рис. 9.6).

Лидер повторного разряда развивается по ионизированному пути, проложенному первым разрядом, поэтому скорость его выше и имеет порядок 10^6 м/с. Развивается он непрерывно, без ступеней. Ярко светится только его головка, прочерчивая на фоторазвертке во времени непрерывную линию (см. рис. 9.5). Особенности развития лидера повторных разрядов дали основание называть его стреловидным.

По достижению стреловидным лидером наземного объекта или встречного лидера происходит повторный главный разряд, соп-

ровождающийся прохождением по каналу большого тока и ярким его свечением.

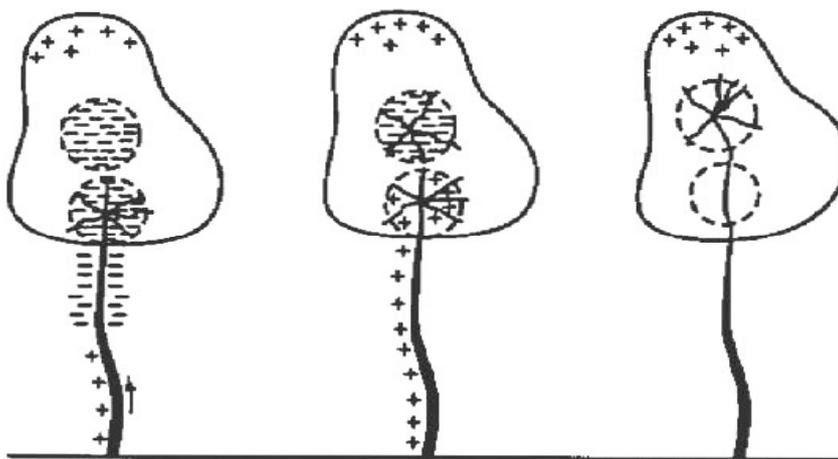


Рис. 9.6. Схема развития двухкомпонентной молнии

В большинстве случаев молния состоит из двух-трех отдельных разрядов (компонентов), однако наблюдаются молнии и с большим числом компонентов (до 20—30). На рис. 9,7 показаны вероятности возникновения молний с разным числом компонентов. Многокомпонентная молния может длиться до 1,3 с (самое большое зарегистрированное время). Чаще же всего длительность молнии не превышает 0,1 с. Следующие друг за другом яркие вспышки канала при повторных импульсах тока воспринимаются наблюдателем как мерцание молнии.

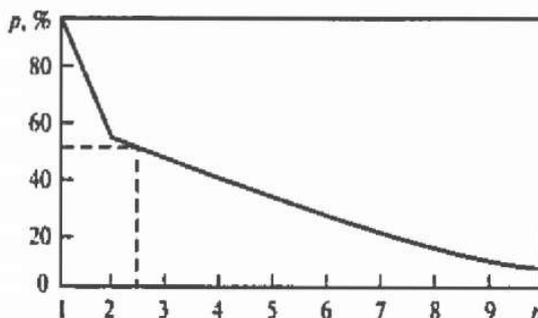


Рис. 9.7. Распределение числа компонентов в ударе молнии

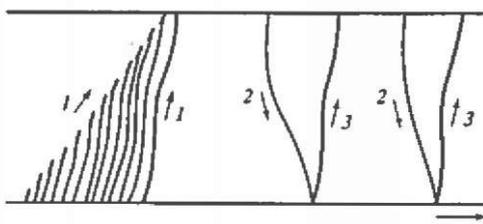


Рис. 9.8. Схема развития восходящей молнии (обозначения см. на рис. 9.5)

Если высота объекта составляет сотни метров, то напряженность электрического поля на его вершине может достигнуть критического значения раньше, чем напряженность поля в облаке. В таких случаях развитие молнии начинается не с облака, а с вершины объекта. Большинство разрядов, поражающих Останкинскую телебашню, начинается развитием лидера с ее вершины (540 м над поверхностью земли).

Такие молнии не имеют резко выраженной главной стадии. Лидеры повторных разрядов в этих случаях всегда развиваются от облака к земле, и повторные компоненты не отличаются от нисходящих от облака молний (рис. 9.8).

9.4. ВИДЫ МОЛНИЙ И ПАРАМЕТРЫ ТОКА

Из предшествующих параграфов следует, что молнии могут быть отрицательными (их большинство) или положительными в зависимости от знака заряда облака. Из самой структуры грозового облака (см. рис. 9.4) следует, что в некоторых случаях они могут быть биполярными, например, в начальной части на землю проходит отрицательный ток (переносятся отрицательные заряды), а потом его полярность меняется на положительную,

В зависимости от направления развития лидера — от облака к земле или наоборот - молнии разделяются на нисходящие (направленные вниз) и восходящие (направленные вверх). Последние наблюдаются при поражениях высоких объектов и в горах. Вероятность возникновения восходящих молний возрастает с увеличением высоты объекта. При поражениях конструкций высотой около 100 м только в 10 % случаев молнии бывают направленными вверх, в то время как при высоте конструкции более 400 м восходящие молнии составляют 95 %.

Наряду с завершенными разрядами, образующими канал облако—земля, могут быть и незавершенные разряды. В последнем случае лидерный канал прекращает свое развитие, не доходя до противоположного электрода — земли или облака. Причиной этому могут быть быстро меняющиеся условия в недостаточно зрелом грозовом облаке.

Классификация молний по К. Бергеру (1977 г) показана на рис. 9.9. Для большинства наземных сооружений характерны типы молний *1b* и *3b*.

Токи молнии являются причиной повышения потенциалов в точке удара и на металлических конструкциях, электрически связанных с этой точкой, а также на контуре заземлителя. Возникают высокие напряжения и на участках электрических контуров, по которым протекает ток молнии или его часть. Значения повышенного потенциала и возникающих высоких напряжений прямо пропорциональны активному сопротивлению и индуктивности контура растекания тока молнии.

В точке удара возникает мощный тепловой поток. Он определяется током и падением напряжения в приэлектродной области, которое практически не меняется во времени и не зависит от тока. Поэтому тепловой

поток, поступающий в металл в точке удара, прямо пропорционален протекшему заряду.

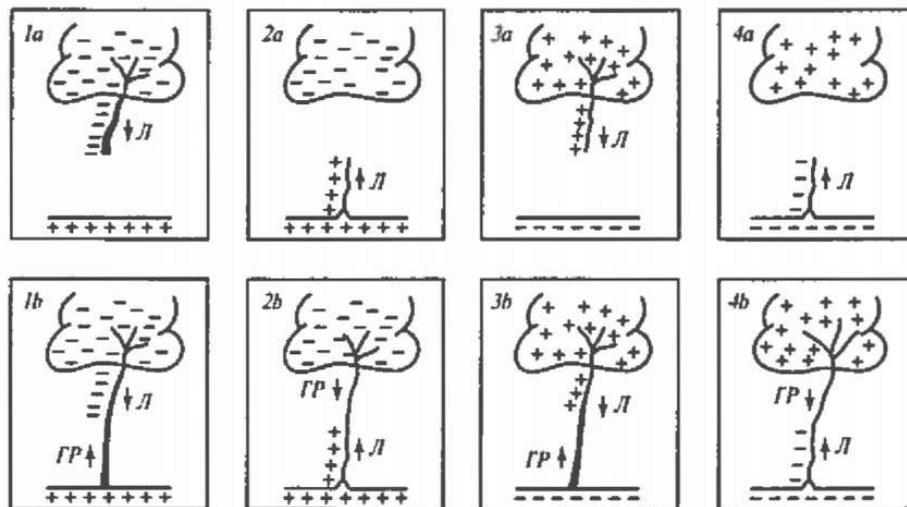


Рис. 9.9. Классификация молний по К. Бергеру:

Л - направление развития лидера; ГР — направление развития главного разряда

Нагрев металлических элементов, по которым протекает ток молнии, определяется произведением активного сопротивления и так называемой удельной энергии тока молнии, представляющей интеграл квадрата тока по времени.

Таким образом, при молниезащите необходимо считаться со следующими параметрами тока молнии:

- максимальное значение тока молнии I_m и изменение тока во времени;
- наибольшая крутизна тока $a = di/dt$;
- заряд, переносимый током, $Q = \int idt$;
- удельная энергия $A = \int i^2 dt$.

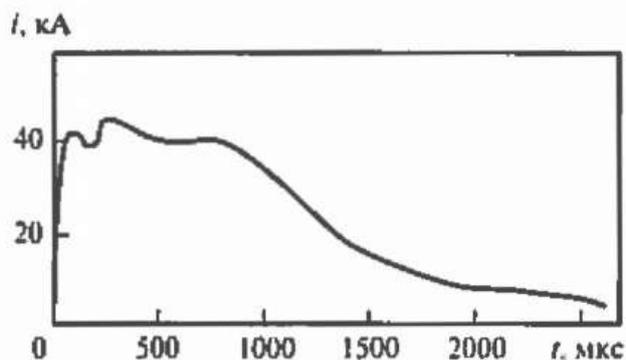
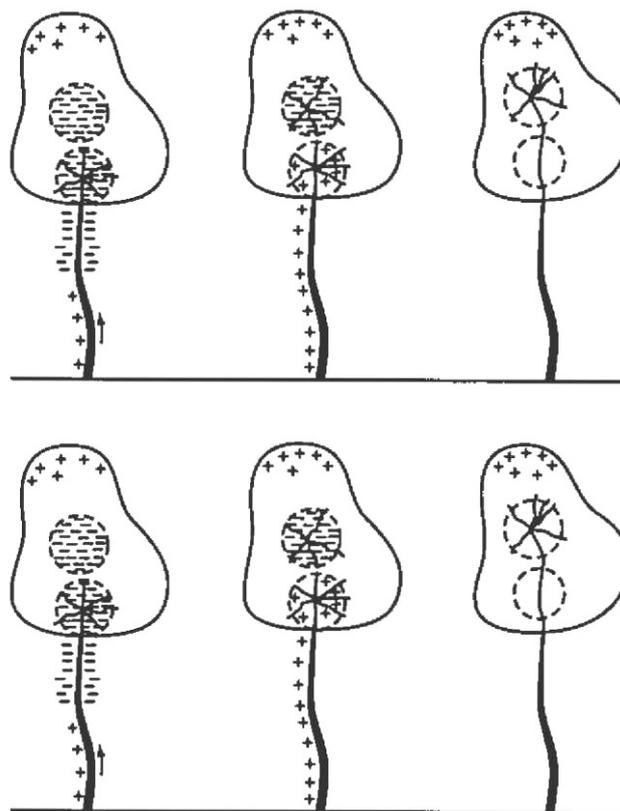


Рис. 9.10. Типичная осциллограмма тока молнии, развивающейся с



положительна заряженного облака

Ток молнии сложным образом меняется во времени. При положительной полярности заряда облака (примерно 10 % общего количества грозовых разрядов) он представляет собой однократный униполярный импульс и последующую за ним так называемую постоянную составляющую тока молнии. На рис. 9.10 показана типичная осциллограмма тока главного разряда положительной молнии.

При отрицательном заряде облака (примерно 90 % молний) ток молнии состоит из серии импульсов, наложенных на постоянную составляющую тока молнии (рис. 9.11). Импульс тока, следующий за первым, имеет наименьшую длительность, хотя его максимальное значение в несколько раз меньше, чем первого (рис. 9.12).

Таким образом, молнии каждого типа характеризуются специфическим изменением тока во времени.

При решении задач молниезащиты и обеспечения молниестойчивости объектов часто бывает достаточным знать указанные выше основные опасные параметры тока молнии. Важнейшим из них является максимальное значение тока. Как уже отмечалось выше, наибольшие по значению токи в объектах, расположенных на земле, при отрицательном заряде облака наблюдаются при нисходящих молниях, причем это токи первых главных разрядов.

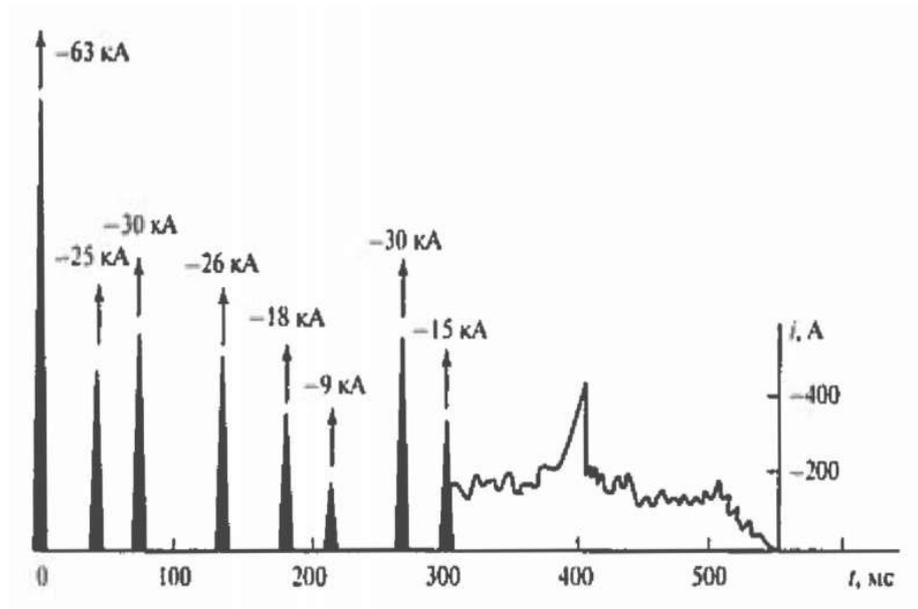


Рис. 9.11. Осциллограмма тока молнии, развивающейся с отрицательно заряженного облака

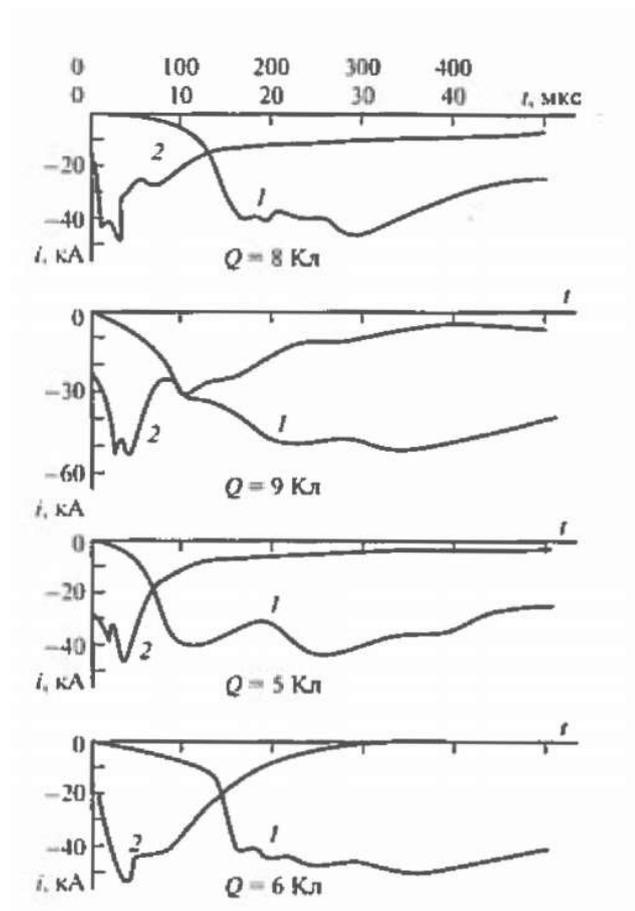


Рис. 9.12. Типичные осциллограммы токов главных разрядов отрицательных молний:

1 - нижняя шкала времени, 2 - верхняя шкала времени

Статистические данные о значениях токов главных разрядов приведены на рис. 9.13, где по оси ординат отложена вероятность p того, что амплитуда тока равна заданному значению I_m или превышает его. Зависимость 3 получена по формуле

$$p = \exp\left(-\frac{I_{\max}}{60}\right) \quad (9.1)$$

Эта зависимость выражает нормированное в нашей стране распределение вероятностей значений токов молнии. Распределение (9.1) сильно отличается от распределений максимальных значений измеренных токов молний. Это объясняется тем, что распределение (9.1) учитывает не только максимальные токи нисходящих молний, но и все другие, в том числе токи восходящих молний, а также токи при перекрытиях изоляции ВЛ в результате ударов молнии; при этом ток, определяемый магниторегистратором, не обязательно равен току молнии.

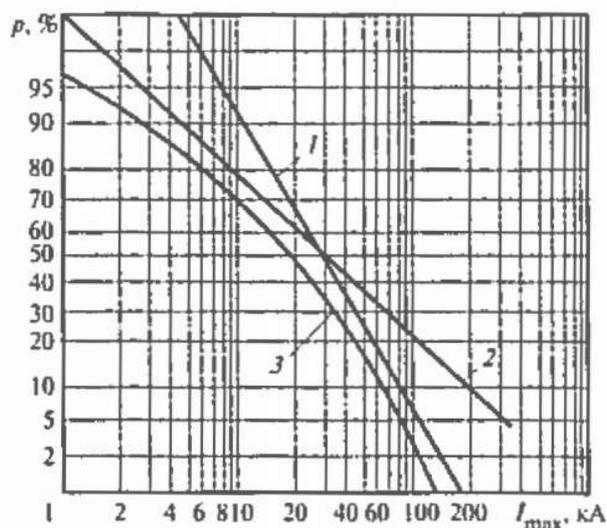


Рис. 9.13. Статистические данные о максимальных значениях токов молнии:

1 - измерения К. Бергера; 2 - измерения Е. Гарбагнатти; 3 - расчет по (9.1)

При определении поражающего действия тока молнии важно знать не только максимальное значение импульса тока, но и его временные параметры: длительности фронта и импульса.

Распределение вероятностей длительностей фронта T_{ϕ} приведено на рис. 9.14, из которого видно, что длительность фронта импульсов тока повторных вспышек отрицательных молний (зависимость 2) много меньше при той же вероятности, чем первых (зависимость 1), которая, в свою очередь, гораздо меньше длительности фронта тока положительных молнии (зависимость 3).

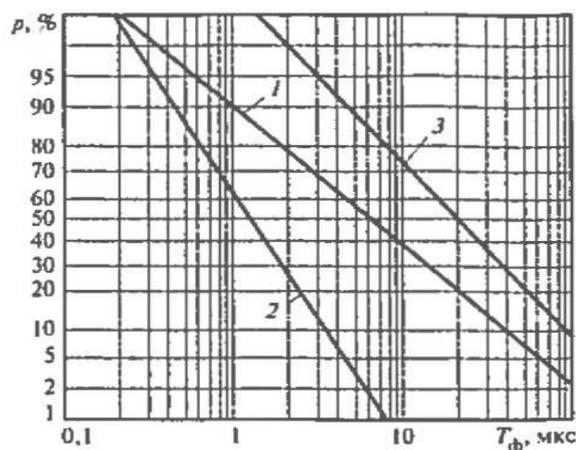


Рис. 9.14. Статистические данные о длительностях фронта токов молнии: 1 — первые импульсы отрицательных молний; 2 — вторые импульсы отрицательных молний; 3 — импульсы положительных молний

Распределения длительностей импульсов T_u приведены на рис. 9.15. Наименьшими длительностями обладают импульсы тока повторных разрядов отрицательных молнии (зависимость 2), наибольшими положительных (зависимость 3).

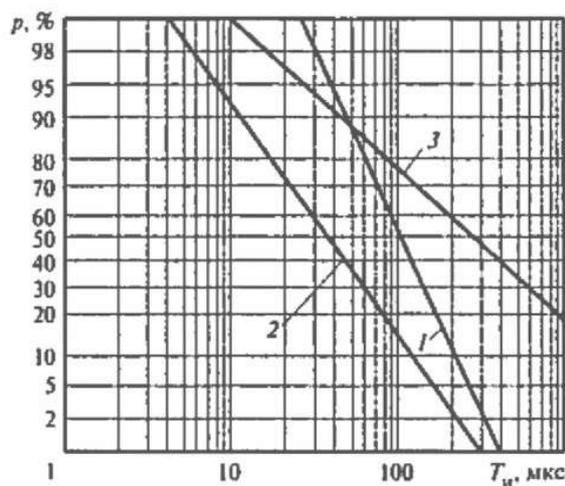


Рис. 9.15. Статистические данные о длительностях импульсов токов молнии:

1 — первые импульсы отрицательных молний; 2 — повторные импульсы отрицательных молний; 3 - импульсы положительных молний

В результате непосредственных измерений крутизны тока молнии установлено, что наибольшее значение крутизны тока молнии наблюдается при повторных импульсах токов главных разрядов отрицательных молний. Это связано с тем, что канал разряда расширен и прогрет за счет тока первого импульса и тока, протекающего по каналу в интервале между импульсами. Этим не только обеспечивается повторный пробой по уже существующему каналу от облака к земле, но и облегчается нейтрализация зарядов, сообщенных каналу после пробоя.

Вероятность p того, что крутизна тока повторных вспышек отрицательных молний превысит заданное значение a , приведена на рис. 9.16 (зависимость 1). Для расчетов перенапряжений в ВЛ принята следующая формула для вероятности крутизны тока:

$$p = \exp\left(-\frac{I_{\max}}{60}\right) \quad (9.2)$$

Эта зависимость показана на рис. 9.16 (кривая 2). Так как она учитывает вероятности при любых типах молний, а также крутизны токов, измеренных в линиях при грозовых разрядах, не обязательно совпадающих с токами повторных импульсов, то различие зависимостей 1 и 2 на рис. 9,16 является естественным.

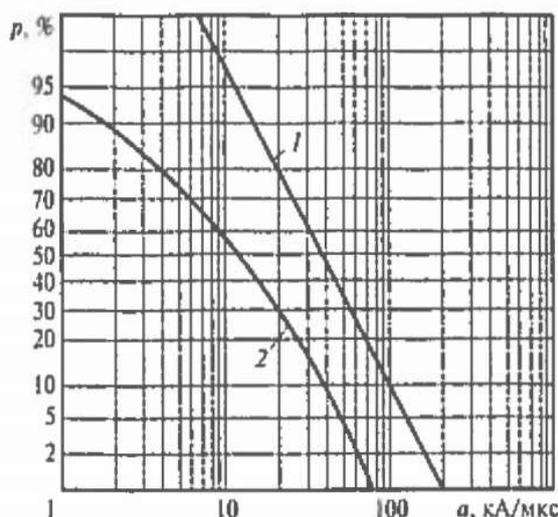


Рис. 9.16. Статистические данные о крутите токов молнии:

1 - повторные импульсы отрицательных молний; 2 - зависимость, рассчитанная по (9.2)

Так как условия накопления отрицательных и положительных зарядов в грозовом облаке не одинаковы и по-разному формируются каналы разряда,

то и заряды, переносимые токами с облака на землю, оказываются не одинаковыми при разных видах молний.

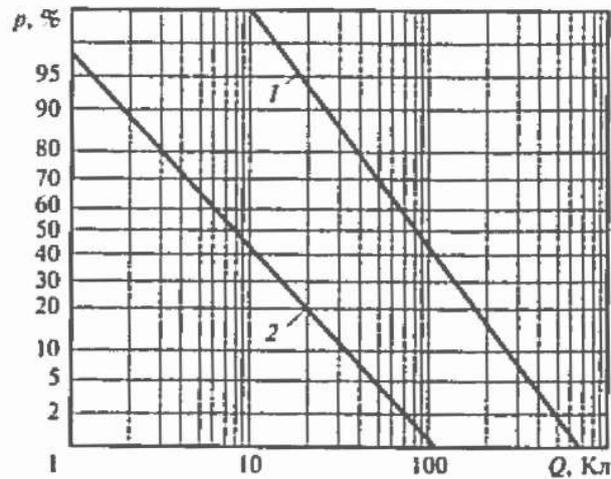


Рис. 9.17. Статистические данные о зарядах, переносимых токами молний:

1 — положительные молнии; 2 — отрицательные молнии

Статистические данные о зарядах Q , переносимых на землю при положительных и отрицательных молниях, приведены на рис. 9.17, из которого видно, что заряд Q положительных молний (зависимость 1) намного больше, чем отрицательных (зависимость 2).

Удельная энергия, или интеграл квадрата тока молнии по времени $A = \int i^2 dt$ в основном определяется импульсными составляющими тока. Вклад постоянной составляющей тока молнии в интеграл A незначителен. Как и заряд Q , энергия A при положительных молниях выше, чем при отрицательных.

Обобщенная вероятность p того, что A равно заданному значению или превысит его, приведена на рис. 9 18.

Обобщенные МЭК статистические данные, отражающие более полные сведения о параметрах токов различных видов молнии и их компонентов, приведены на рис. 9.19. На их основании были приняты следующие параметры испытательных импульсов токов молнии.

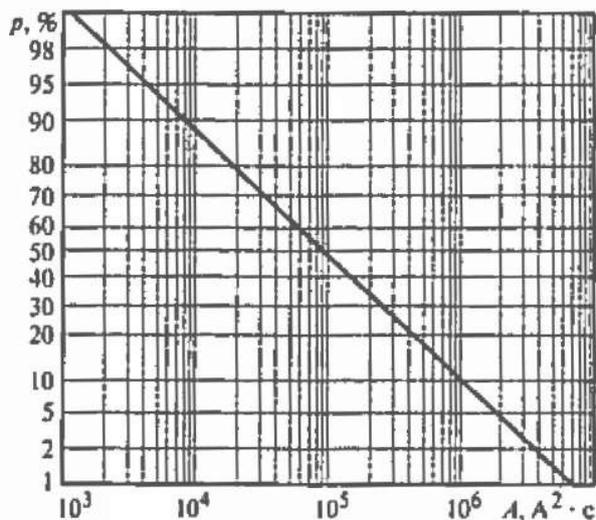


Рис. 9.18. Статистические данные об удельной энергии А

импульсов тока молнии, определяемые как 1,25 интервала времени между значениями тока 0,1 и 0,9 максимального значения, следующие: первый импульс — 10 мкс, повторный — 0,25 мкс. Длительности импульсов (интервал времени от начала импульса до момента снижения тока до половины максимального значения) составляют: первый импульс — 350 мкс; последующий — 100 мкс.

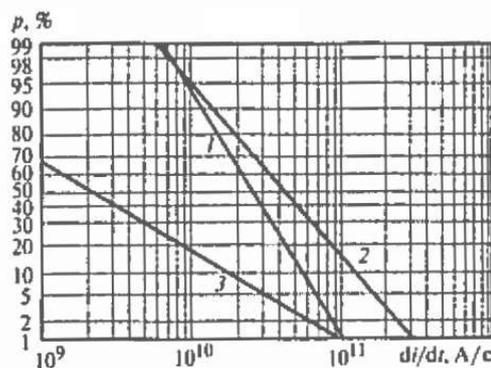
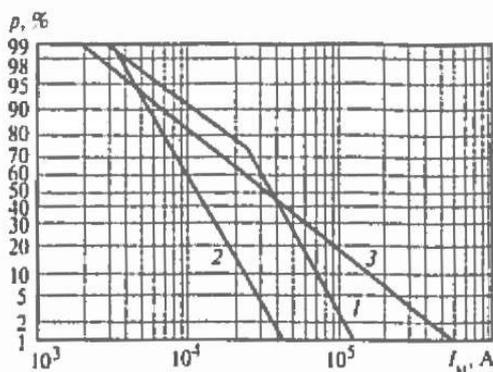
При решении вопросов молниезащиты приняты следующие испытательные импульсы:

- первый — 10/350 мкс (положительно заряженное облако);
- повторный 0,25/100 мкс (второй импульс тока при отрицательном заряде облака).

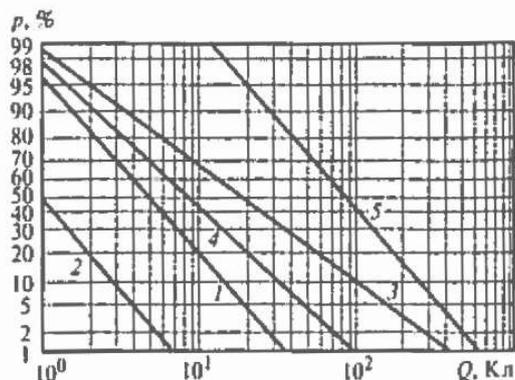
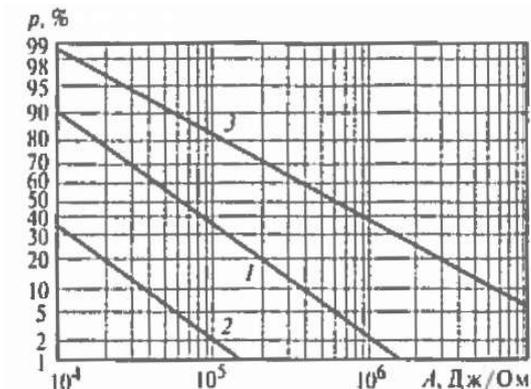
Введены четыре уровня защиты, характеризующие вероятность того, что параметр не превысит указанного значения:

- I уровень — вероятность 0,99;
- II уровень — вероятность 0,97;
- III уровень — вероятность 0,91;
- IV уровень — вероятность 0,84.

Параметры испытательных импульсов приведены в табл. 9.1 – 9.3.



б)



в)

а)

г)

Рис. 9.19. Вероятностные характеристики параметров таков МОЛНИИ максимального тока (а), максимальной крутизны (б), удельной энергии (в), заряда (г):

1 — первый импульс отрицательной молнии; 2 - второй импульс отрицательной молнии, 3 - импульс положительной молнии; 4 - суммарный заряд, переносимый током отрицательной молнии, 5 - суммарный заряд, переносимый током положительной молнии

Таблица 9.1. Параметры первого импульса

Параметр	Уровень защиты		
	I	II	III-IV
Максимальное значение тока, кА	200	150	100
Заряд, Кл	100	75	50
Удельная энергия, МДж/Ом	10	5,6	2,5

Таблица 9.2. Параметры второго импульса

Параметр	Уровень защиты		
	I	II	III-IV
Максимальное значение тока, кА	50	37,5	25
Средняя крутизна, кА/мкс	200	150	100

Таблица 9.3. Параметры постоянной составляющей

Параметр	Уровень защиты		
	I	II	III-IV
Заряд, Кл	200	150	100
Длительность, с	0,5		

9.5. ЗАЩИТА ОТ ПРЯМЫХ УДАРОВ МОЛНИИ

Защита от прямых ударов молнии осуществляется с помощью молниеотводов. Молниеотвод представляет собой возвышающееся над защищаемым объектом устройство, через которое ток молнии, минуя защищаемый объект, отводится в землю.

Защитное действие молниеотводов основано на том, что во время лидерной стадии молнии на вершине молниеотвода скапливаются заряды, и наибольшие напряженности электрического поля создаются на пути между развивающимся лидером и вершиной молниеотвода.

Возникновение и развитие с молниеотвода встречного лидера еще более усиливает напряженность поля на этом пути, что окончательно предопределяет удар в молниеотвод. Защищаемый объект, более низкий, чем молниеотвод, будучи расположен поблизости от него, оказывается заэкранированным молниеотводом и встречным лидером, и поэтому поражение его молнией маловероятно.

Основными действующими в России нормативными документами по защите зданий, сооружений и инженерных коммуникаций от прямых ударов молнии являются [17, 18].

Необходимым условием надежной защиты является также низкое сопротивление заземления молниеотвода

Молниеотводы по типу молниеприемников разделяются на стержневые и тросовые. Стержневые молниеотводы выполняются в виде вертикально установленных стержней (мачт), соединенных с заземлителем, а тросовые — в виде горизонтально подвешенных проводов. По опорам, к которым крепится трос, прокладываются токоотводы, соединяющие трос с заземлителем.

Защитное действие молниеотвода характеризуется его зоной защиты, т.е. пространством вблизи молниеотвода, вероятность попадания молнии в которое не превышает определенного достаточно малого значения, а также значением сопротивления заземления и конструкцией заземлителя.

Стандартной зоной защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой h является круговой конус высотой $h_0 < h$, вершина которого совпадает с вертикальной осью молниеотвода (рис. 9.20). Габариты зоны определяются двумя параметрами:

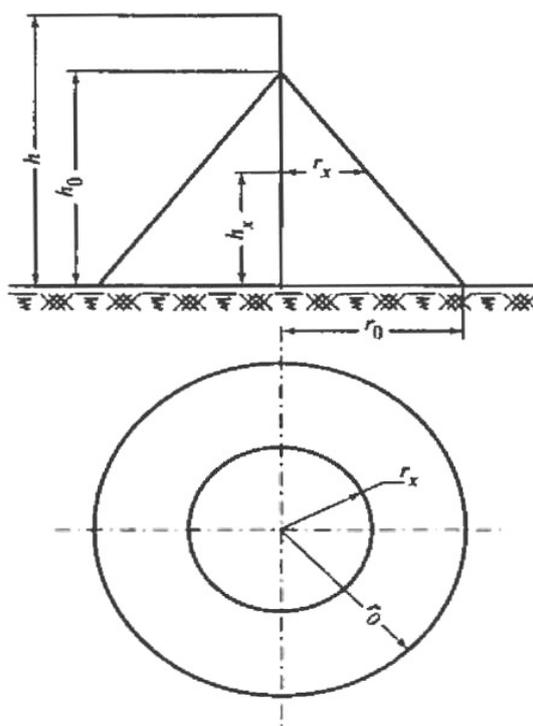


Рис. 9.20. Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода

высотой конуса h_0 и радиусом конуса на уровне земли r_0 .

Формулы для расчета зон защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой до 150 м приведены в табл. 9.4 Для зоны защиты требуемой надежности (рис. 9.20) радиус горизонтального сечения r_x , на высоте h_x определяется по формуле

$$r_x = \frac{r_0(h_0 - h_x)}{h_0} \quad (9.3)$$

Стандартные зоны защиты одиночного тросового молниеотвода высотой h ограничены симметричными двускатными поверхностями, образующими в вертикальном сечении равнобедренный треугольник с вершиной на высоте $h_0 < h$ и основанием на уровне земли $2r_0$ (рис. 9.21).

Формулы для расчета зон защиты одиночного тросового молниеотвода высотой до 150 м приведены в табл. 9.5. Здесь и далее под h понимается минимальная высота троса над уровнем земли (с учетом провеса).

Полуширина r_x зоны защиты требуемой надежности (рис. 9.21) на высоте h_x от поверхности земли определяется выражением (9.3):

$$r_x = \frac{r_0(h_0 - h_x)}{h_0}$$

Таблица 9.4. Расчет зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода

Надежность защиты	Высота молниеотвода h , м	Высота конуса h_0 , м	Радиус конуса r_0 , м
0,9	0-100	$0,85 h$	$1,2 h$
	100-150	$0,85 h$	$[1,2-10^{-3}(h-100)]h$
0,99	0-30	$0,8 h$	$0,8 h$
	30-100	$0,8 h$	$[0,8-1,43 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$
	100-150	$[0,8-10^{-3}(h-100)]h$	$0,7 h$
0,999	0-30	$0,7 h$	$0,6 h$
	30-100	$[0,7-7,14 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$	$[0,6-1,43 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$
	100-150	$[0,65-10^{-3}(h-100)]h$	$[0,5-2 \cdot 10^{-3}(h-100)]h$

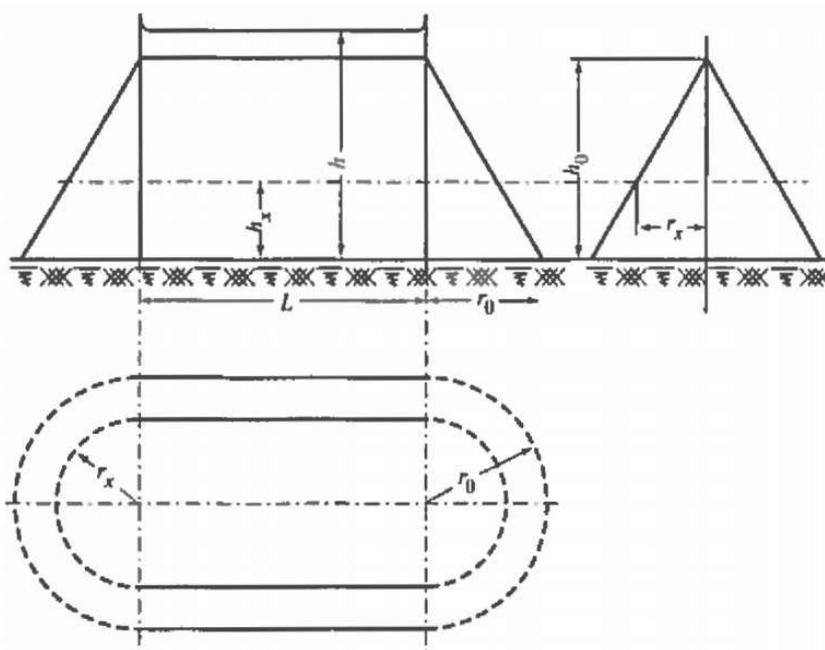


Рис. 9.1. Зона защиты одиночного тросового молниеотвода:

L — расстояние между точками подвеса тросов

При необходимости расширить защищаемый объем к горцам зоны защиты собственно тросового молниеотвода могут добавляться зоны защиты несущих опор, которые рассчитываются по формулам одиночных стержневых молниеотводов, представленным в табл. 9.4. В случае больших провесов тросов, например, у ВЛ, рекомендуется рассчитывать обеспечиваемую вероятность прорыва молнии программными методами, поскольку построение зон защиты по мини-

Таблица 9.5. Параметры зоны защиты одиночного тросового молниеотвода

Надежность защиты	Высота молниеотвода h , м	Высота конуса h_0 , м	Радиус конуса r_0 , м
0,9	0-150	$0,87 h$	$1,5 h$
0,99	0-30	$0,8 h$	$0,95 h$
	30-100	$0,8 h$	$[0,95-7,14 \cdot 10^{-4}(h-30)]h$
	100-150	$0,8 h$	$[0,9 \cdot 10^{-3}(h-100)]h$
0,999	0-30	$0,75 h$	$0,7 h$
	30-100	$[0,75-4,28 \cdot 10^{-4}(h-30)]h$	$[0,7-1,43 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$
	100-150	$[0,72 \cdot 10^{-3}(h-100)]h$	$[0,6 \cdot 10^{-3}(h-100)]h$

мальной высоте троса в пролете может привести к неоправданным запасам.

Молниеотвод считается двойным стержневым, когда расстояние между стержневыми молниеприемниками L не превышает предельного значения L_{max} . В противном случае оба молниеотвода рассматриваются как одиночные.

Конфигурация вертикальных и горизонтальных сечений стандартных зон защиты двойного стержневого молниеотвода (высотой h и расстоянием L между молниеотводами) представлена на рис. 9.22.

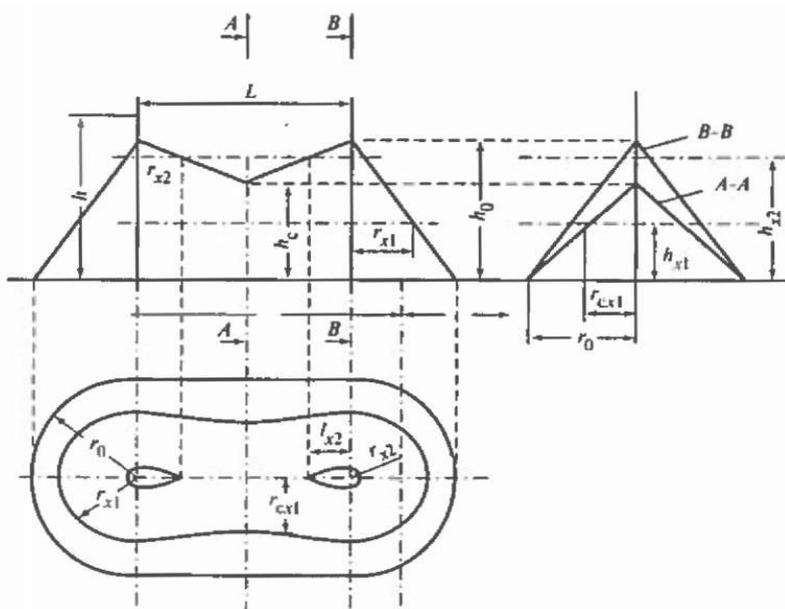


Рис. 9.22. Зона защиты двойного стержневого молниеотвода

Построение внешних областей зон двойного молниеотвода (полуконусов с габаритами h_0 , r_0) производится по формулам табл. 9.4 для одиночных стержневых молниеотводов.

Размеры внутренних областей определяются параметрами h_0 и h_c первый из которых задает максимальную высоту зоны непосредственно у молниеотводов, а второй — минимальную высоту зоны по середине между молниеотводами. При расстоянии между молниеотводами $L \leq L_c$ граница

зоны не имеет провеса ($h_c = h_0$). Для расстояний $L_c < L < L_{\max}$ высота h_c определяется по выражению

$$h_c = \frac{L_{\max} - L}{L_{\max} - L_c} h_0$$

Входящие в него предельные расстояния L_{\max} и L_c вычисляются по эмпирическим формулам табл. 9.6, пригодным для молниеотводов высотой до 150 м.

Размеры горизонтальных сечений зоны вычисляются по следующим формулам, общим для всех уровней надежности защиты:

максимальная полуширина зоны в горизонтальном сечении на высоте h_x :

$$r_x = \frac{r_0(h_0 - h_x)}{h_0}$$

длина горизонтального сечения на, высоте $h_x \geq h_c$:

$$l_x = \frac{L(h_0 - h_x)}{2(h_0 - h_c)}$$

причем при $h_x \geq h_c$, $l_x = L/2$;

ширина горизонтального сечения в центре между молниеотводами $2r_{c.x}$ на высоте $h_x \geq h_c$:

$$2r_{c.x} = \frac{2r_0(h_c - h_x)}{h_c}$$

Таблица 9.6. Параметры зоны защиты двойного стержневого молниеотвода

Надежность защиты	Высота молниеотвода h , м	Высота конуса h_0 , м	Радиус конуса r_0 , м
0,9	0-30	$5,75 h$	$2,5 h$
	30-100	$[5,75 - 3,57 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$	$2,5 h$
	100-150	$5,5 h$	$2,5 h$
0,99	0-30	$4,75 h$	$2,25 h$
	30-100	$[4,75 - 3,57 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$	$[2,25 - 0,0107(h-30)]h$
	100-150	$4,5 h$	$1,5 h$
0,999	0-30	$4,25 h$	$2,25 h$
	30-100	$[4,25 - 3,57 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$	$[2,25 - 0,0107 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$

	100-150	$4,0 h$	$1,5 h$
--	---------	---------	---------

Молниеотвод считается двойным тросовым, когда расстояние между тросами L не превышает предельного значения L_{\max} . В противном случае оба молниеотвода рассматриваются как одиночные.

Конфигурация вертикальных и горизонтальных сечений стандартных зон защиты двойного тросового молниеотвода (высотой h и расстоянием между тросами L) представлена на рис. 9.23. Построение внешних областей зон (двух односкатных поверхностей с размерами h_0, r_0) производится по формулам, приведенным в табл. 9.5 для одиночных тросовых молниеотводов.

Размеры внутренних областей определяются максимальной высотой зоны h_0 непосредственно у тросов и минимальной высотой зоны посередине между тросами h_c . При расстоянии между тросами $L \leq L_c$ граница зоны не имеет провеса ($h_c = h_0$). Для $L_c \leq L \leq L_{\max}$ высота h_c определяется по выражению

$$h_c = \frac{L_{\max} - L}{L_{\max} - L_c} h_0$$

Входящие в него предельные расстояния L_{\max} и L_c вычисляются по эмпирическим формулам приведенным в табл. 9.7, пригодным для тросов с высотой подвеса до 150 м.

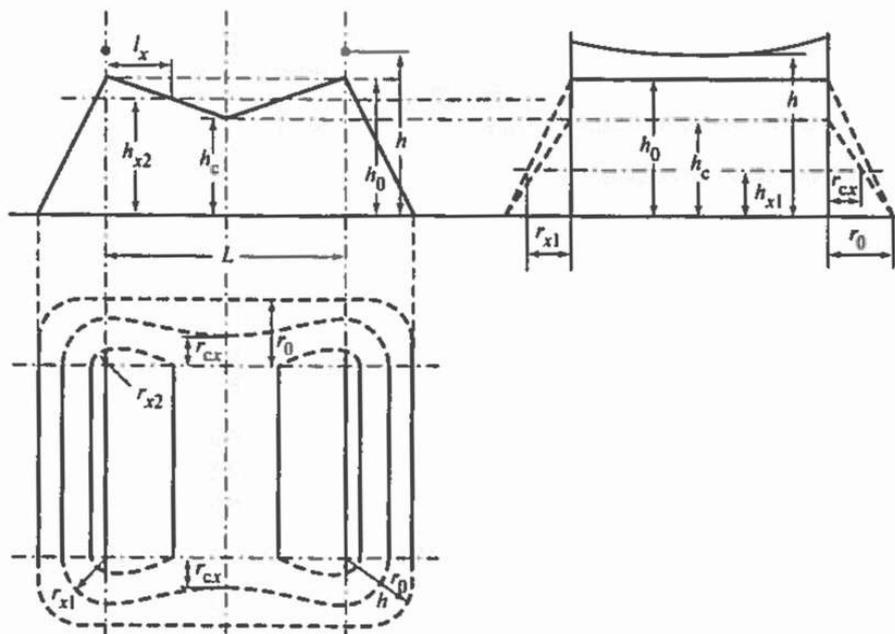


Рис. 9.23. Зона защиты двойного тросового молниеотвода

Длина горизонтального сечения зоны защиты на высоте h_x определяется по формулам

$$l_x = L/2 \quad \text{или} \quad h_x \geq h_c$$

$$l_x = \frac{L(h_o - h_x)}{2(h_o - h_c)} \quad \text{при} \quad 0 < h_c < h_x$$

Для расширения защищаемого объема на зону двойного тросового молниеотвода может быть наложена зона защиты опор, несущих тросы, которая строится как зона двойного стержневого молниеотвода, если расстояние L между опорами меньше L_{\max} , вычисленного по формулам табл. 9.6. В противном случае опоры рассматриваются как одиночные стержневые молниеотводы.

Когда тросы непараллельны или разновысоки, либо их высота изменяется по длине пролета, для оценки надежности их защиты следует воспользоваться специальным программным обеспечением. Так же рекомендуется поступать при больших провесах тросов в пролете, чтобы избежать излишних запасов по надежности защиты.

Таблица 9.7. Параметры зоны защиты двойного тросового молниеотвода

Надежность защиты	Высота молниеотвода h , м	Высота конуса h_0 , м	Радиус конуса r_0 , м
0,9	0-150	$6,0 h$	$3,0 h$
0,99	0-30	$5,0 h$	$2,5 h$
	30-100	$5,0 h$	$[2,5-7,14 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$
	100-150	$[5,0-5 \cdot 10^{-3}(h-100)]h$	$[2,0-5 \cdot 10^{-3}(h-100)]h$
0,999	0-30	$4,75 h$	$2,25 h$
	30-100	$[4,75-3,57 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$	$[2,25-3,57 \cdot 10^{-3}(h-30)]h$
	100-150	$[4,5-5 \cdot 10^{-3}(h-100)]h$	$[2,0-5 \cdot 10^{-3}(h-100)]h$

Воздушные линии электропередачи ежегодно подвергаются десяткам ударов молнии в каждые 100 км линии. Поражение молнией фазного провода, сопровождающееся прохождением большого тока, создает на проводе такое высокое импульсное напряжение, что практически невозможно создать изоляцию, которая могла бы его выдержать. Поэтому в большинстве случаев линии на металлических и железобетонных опорах номинальным напряжением 110 кВ и выше имеют один или два заземленных троса, подвешиваемых выше фазных проводов и воспринимающих на себя удар молнии.

Вероятность прорыва молнии через тросовую защиту, т.е. поражения фазного провода, можно оценить в соответствии с опытом эксплуатации по эмпирической формуле

$$\lg p_{\alpha} = \frac{\alpha \sqrt{h_{on}}}{90} - 4$$

где h_{on} - высота опоры, м; α - угол защиты, образованный вертикалью, проходящей через трос, и прямой, соединяющей трос с проводом.

Для ВЛ 110-750 кВ при положительных углах защиты троса (трос расположен ближе к оси опоры, чем провод) вероятность порыва молнии на провода рекомендуется определять по эмпирической формуле

$$p_{\alpha} = \exp \left[\frac{1}{D_U} \left(3,2 \frac{\Delta d}{\Delta h} \sqrt{\frac{h_{mp}}{\Delta h}} - \frac{9}{D_U} \right) \right],$$

где

$$D_U = 1 + \frac{U_{ном}}{100 \Delta h} \left(0,75 \frac{h_{mp}}{\Delta h} \cdot \frac{Q}{Q+Q_o} \right)^3;$$

$$Q_o = 200^{(1+0,1 \frac{U_{ном}}{1000})}; \quad Q = \frac{U_{ном}}{\ln \frac{2 h_{cp.np}}{r_{np}}},$$

где $U_{ном}$ - номинальное напряжение линии, кВ; Δh - разность высот подвеса проводов и тросов на опоре, м; Δd - смещение троса и провода по горизонтали, м; h_{mp} - высота подвеса троса на опоре, м; r_{np} - радиус провода (для расщепленной фазы – эквивалентный радиус $r_{эк}$), м; $h_{cp.np}$ - средняя высота подвеса провода, м.

9 РЕКОМЕНДАЦИИ МЕЖДУНАРОДНОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ КОМИССИИ (МЭК) ПО МОЛНИЕЗАЩИТЕ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

В документах МЭК, в том числе и в [21], рекомендуется определять зоны защиты либо методом катящейся сферы радиусом R , либо методом защитного угла α . Для плоских крыш рекомендуются сеточные молниеприемники с регламентированными размерами ячеек сетки.

Метод катящейся сферы состоит в том, вокруг защищаемого объекта перемещается расчетная сфера. Пространство между точками касания с

объектами, сферой и поверхностью земли является защитной зоной. Наивысшие точки касания дают точки возможных ударов в объект, где, если требуется, могут устанавливаться молниеприемники.

Метод катящейся сферы приведен и в отечественном нормативном документе [18]. Он называется методом фиктивной сферы. Там же приведен и метод защитного угла. Любые приведенные методы определения защитных зон допускаются при проектировании отечественных объектов. Однако при проектировании объектов по контрактам с другими странами целесообразно использовать рекомендации МЭК [21].

Проанализируем рекомендации МЭК [21] подробнее.

Радиус сферы R зависит от уровня защиты и высоты защищаемого объекта (рис. 9.24, табл. 9.8.).

Метод защитного угла α не используется при высотах молниеотвода, выходящих за кривые, приведенные на рис. 9.24.

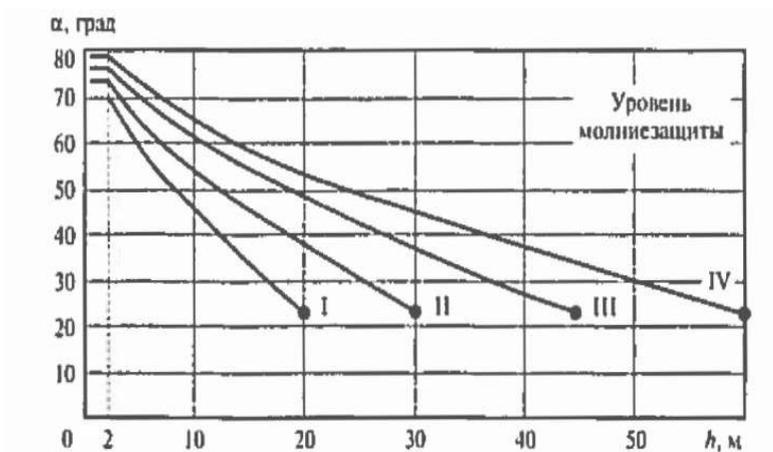


Рис. 9.24. Зависимости защитных углов от высоты молниеотвода при разных уровнях молниезащиты

Таблица 9.8. Радиус расчетной сферы R и размеры молниезащитной сетки при разных уровнях защиты

Уровень защиты	Радиус сфера R , м	Размеры ячеек молниезащитной сетки, м×м
I	20	5×5
II	30	10×10
III	45	15×15
IV	60	20×20

Если высота сооружения превышает указанные, то при определении защитных зон используется метод катящейся сферы.

При высоте молниеотвода менее 2 м защитный угол не зависит от высоты молниеотвода.

На рис. 9.25—9.29 демонстрируется метод катящейся сферы. Перемещение сферы по объекту простейшей формы (рис. 9.25) определяет защитные зоны, создаваемые самим объектом, и возможные точки удара молнии в верхнюю часть объекта. Защитными зонами являются пространства между катящейся сферой и защищаемым объектом. Перемещение сферы по поверхности земли вокруг объекта позволяет найти площадь, ограниченную штрихпунктирной линией на рис. 9.26, которую можно использовать при расчетах числа ударов молнии в объект за грозовой сезон, используя плотность ударов молнии (число ударов в единицу площади).

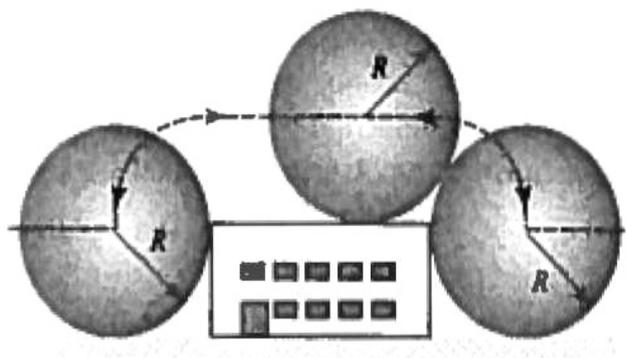


Рис. 9.25. Точки касания сферы и защищаемого объекта, в которые может ударить молния (вид сбоку)

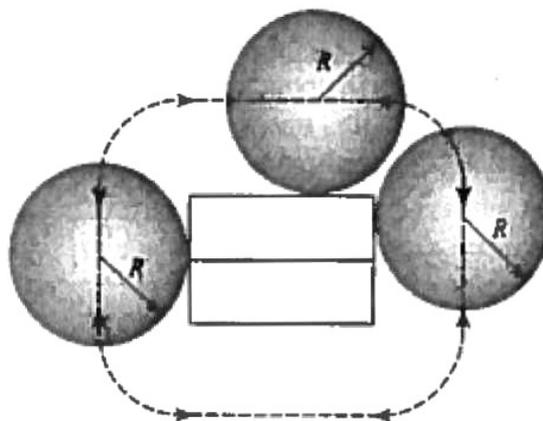


Рис. 9.26. Точки касания сферы и объекта (вид сверху)

Как отмечалось ранее, эта плотность зависит от географического места, интенсивности грозовой деятельности и т.д.

Метод катящейся сферы для определения защитных зон в комплексе зданий продемонстрирован на рис. 9.27. Защитной зоной является пространство между катящейся сферой и защищаемым объектом.

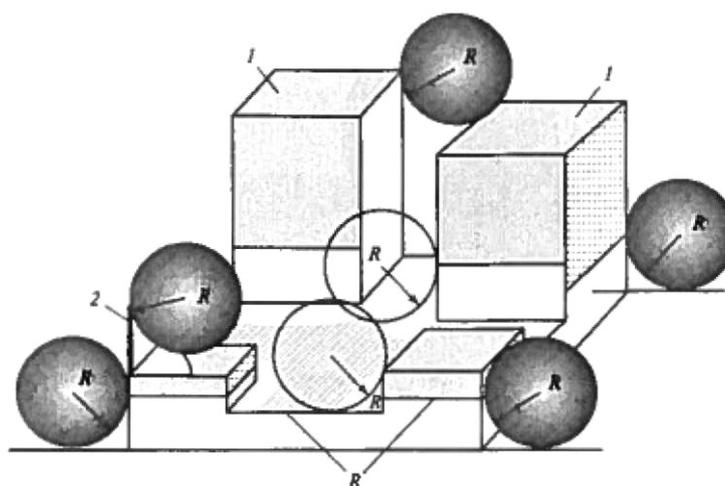


Рис. 9.27. Защитные зоны комплекса зданий, определяемые методом катящейся сферы:

1 - области, требующие защиты; 2 — мачта на здании; R — радиус сферы

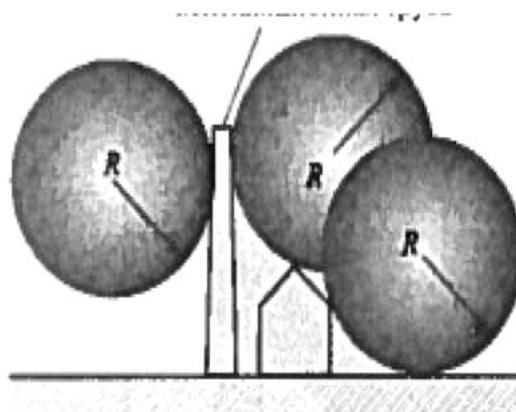


Рис. 9.28. Защитные зоны, полученные методом катящейся сферы

На рис 9.28 приведен пример определения защитных зон и мест возможных ударов молнии (жирные линии).

Если поверхность, на которой размещен молниеотвод, наклонная (рис. 9.29), то ось защитной зоны перпендикулярна поверхности, Вершина конуса защитной зоны совпадает с вершиной молниеотвода.

Защитная зона между двумя стержневыми или тросовыми молниеотводами определяется методом катящейся сферы согласно рис. 9.30 и 9.31.

Метод катящихся сфер, ранее называвшийся электрогеометрическим, в 30-е годы прошлого столетия предусматривал аналитическую зависимость радиуса сферы R от максимального тока молнии Однако в настоящее время радиус сферы выбирается в зависимости от уровня защиты по табл. 9.8.

Молниеотводы, отдельно стоящие (рис. 9.32) и установленные на крыше (рис. 9.33) характеризуются защитным углом. Удовлетворительная молниезащита достигается комбинацией вертикальных и горизонтальных

молниеотводов (рис. 9.34), стержневых и сетчатых молниеотводов (рис. 9.33).

На рис. 9.33 и 9.36 показан пример установки стержневых молниеотводов на крыше. Защитный угол (рис. 9.36) определяется высотой молниеприемника h_t над защищаемой поверхностью (базовая поверхность — крыша); защитный угол α_2 определяется суммой высот молниеприемника относительно крыши h_t и высоты здания H : $h_2 = h_t + H$ (базовая поверхность — земля).

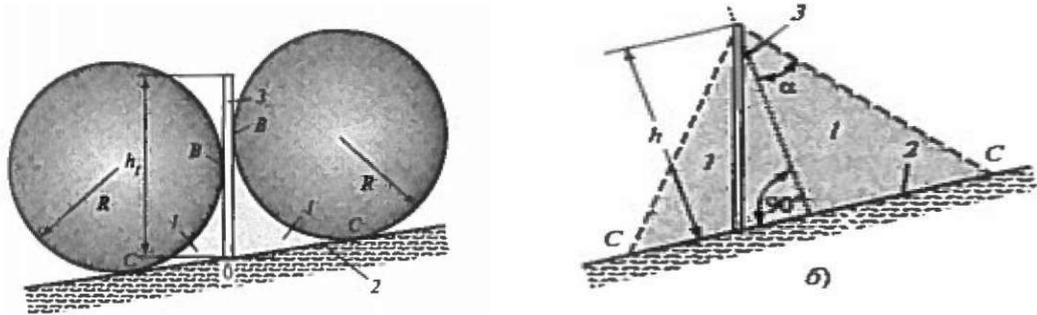


Рис. 9.29. Зона защиты стержневого молниеотвода, установленного на наклонной поверхности, определенная методом катящейся сферы:

а — метод катящейся сферы, б — границы зоны защиты. 1 — тона защиты; 2 — базовая плоскость; 3 — стержневой молниеотвод; h — расчетная высота стержневого молниеотвода; h_t — физическая высота стержневого молниеотвода; α — защитный угол; B, C — точки соприкосновения катящейся сферы с молниеотводом и базовой плоскостью; C — границы защищаемой области

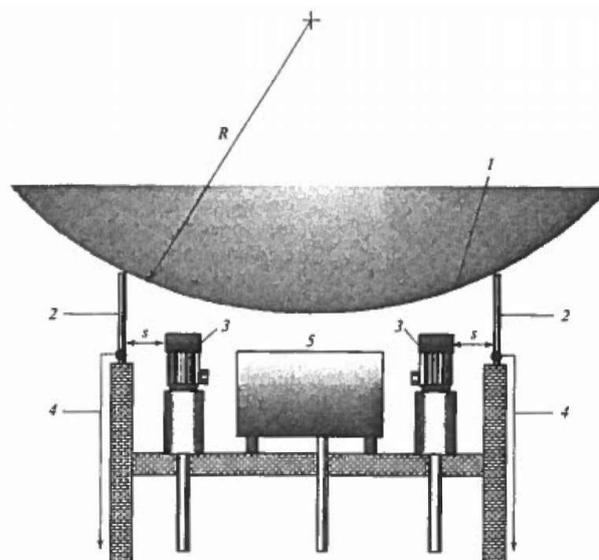


Рис. 9.30. Защита от прямых ударов молнии объектов, расположенных на крыше, с помощью вертикальных молниеприемников:

1 — катящаяся сфера радиуса R для определения защитных зон; 2 — стержневые молниеприемники; 3 - электротехническое оборудование; 4 — спуски, 5 — металлический резервуар; s — расстояние между электрооборудованием и молниеприемником или спуском

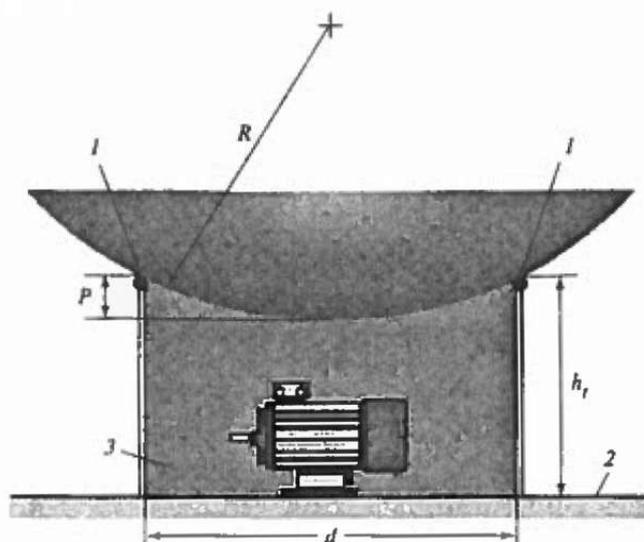


Рис. 9.31. Защитная зона двух горизонтальных молниеотводов, определенная методом катящейся сферы ($R > h_t$):

1 — горизонтальные провода, 2 — базовая плоскость; 3 — зона защиты; h_t — физическая высота молниеотводов над базовой плоскостью; p — провисание сферы; R — радиус сферы; d — расстояние между молниеотводами

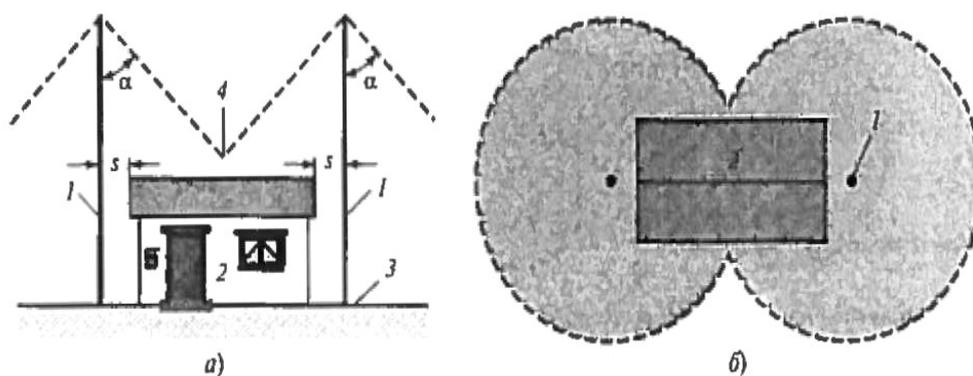


Рис. 9.32. Система молниезащиты с двумя отдельно стоящими молниеотводами и зона защиты, определенная с помощью метода защитного угла:

а — вертикальная проекция; б — горизонтальная проекция; 1 — мачта молниеотвода; 2 — защищаемый объект, 3 — земля (базовая поверхность); 4 - пересечение защитных зон; s — наименьшее расстояние между молниеотводом и защищаемым объектом; α - защитный угол

Молниеприемники, горизонтально установленные над проводящей крышей, показаны на рис. 9.37. В этом случае катящаяся сфера радиусом R должна быть выше выступов на крыше (превышение обозначено буквой a).

Молниеотвод в виде горизонтального проводника установленного выше конька крыши, показан на рис. 9.38. Защищаемый объект должен полностью находиться в защитной зоне, определяемой защитным углом.

Примеры молниеприемников в виде сеток, устанавливаемых на крышах, приведены на рис. 9.39 и 9.40. Размер ячейки M выбирается по табл. 9.8 в зависимости от

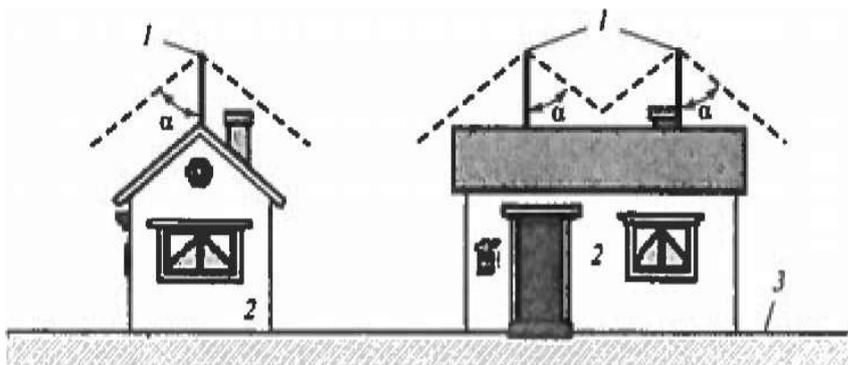


Рис. 9.33. Пример выполнения системы молниезащиты стержневыми молниеотводами, установленными на защищаемом объекте:

1 – стержневые молниеотводы; 2 – защищаемый объект; 3 – базовая плоскость; α - защитный угол

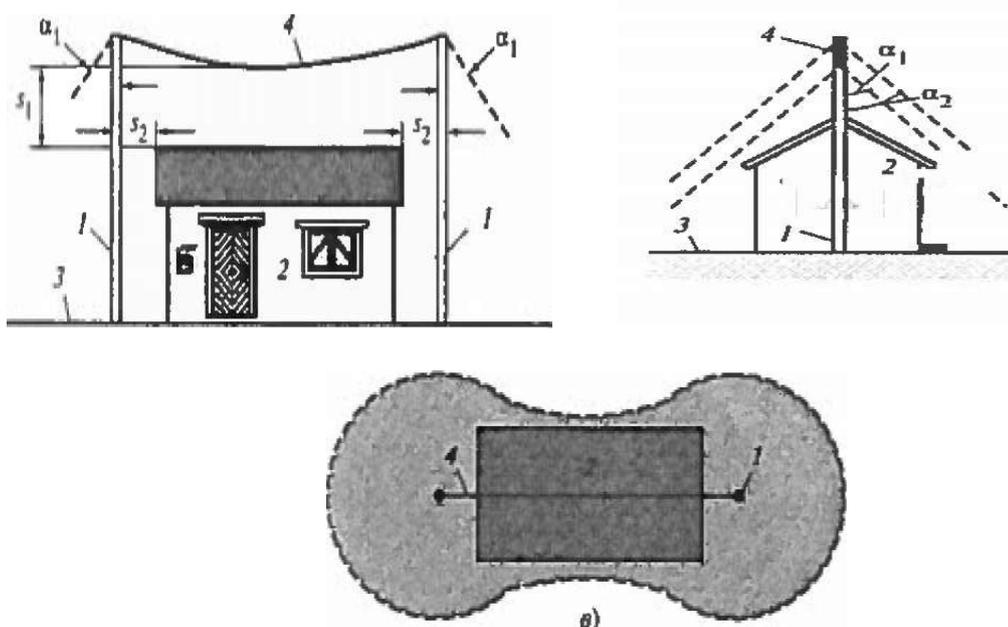


Рис. 9.34. Внешняя система молниезащиты с использованием двух стержневых молниеотводов и с нелиняющего их тросового молниеотвода:

а, б — вертикальные проекции; в — горизонтальная проекция на базовую плоскость; 1 — стержневые молниеотводы; 2 — защищаемый объект; 3 — зона защиты на базовой поверхности; 4 — тросовый молниеотвод; s_1, s_2 — наименьшие расстояния между молниеотводом и защищаемым объектом; α_1 — защитный угол возле стержневого молниеотвода; α_2 — защитный угол в середине между стержневыми молниеотводами

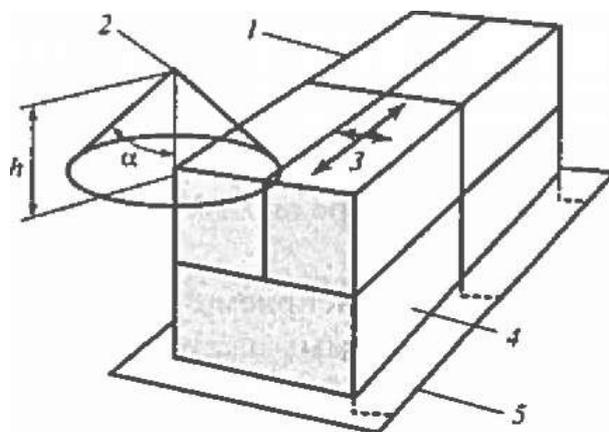


Рис. 9.35. Система молниезащиты здания с установленными на крыше стержневым и сетчатым молниеприемниками:

1 — протяженный молниеприемник; 2 — стержневой молниеприемник, 3 — размеры сетки; 4 — спуск; 5 — заземлитель; h — высота стержневого молниеприемника; α — защитный угол

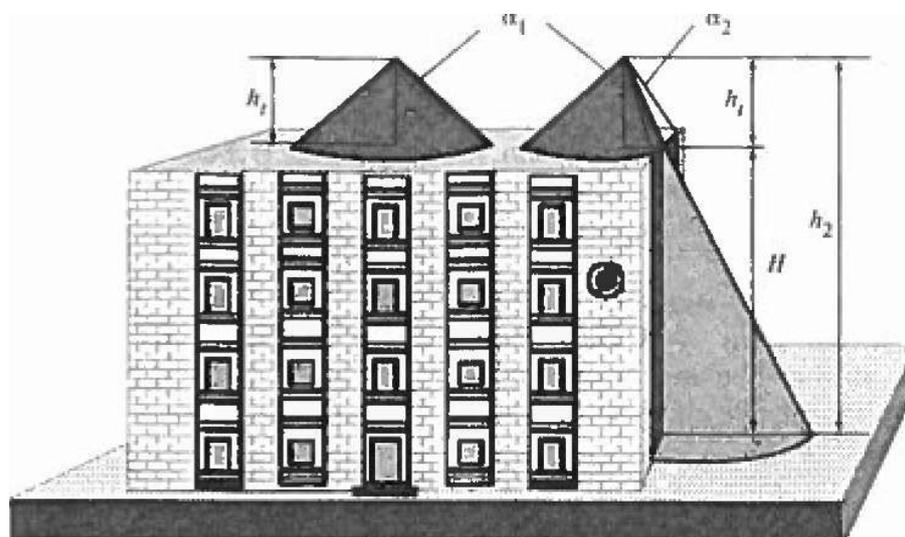


Рис. 9.36. К определению защитных углов для объектов с расположенными на крыше молниеприемниками

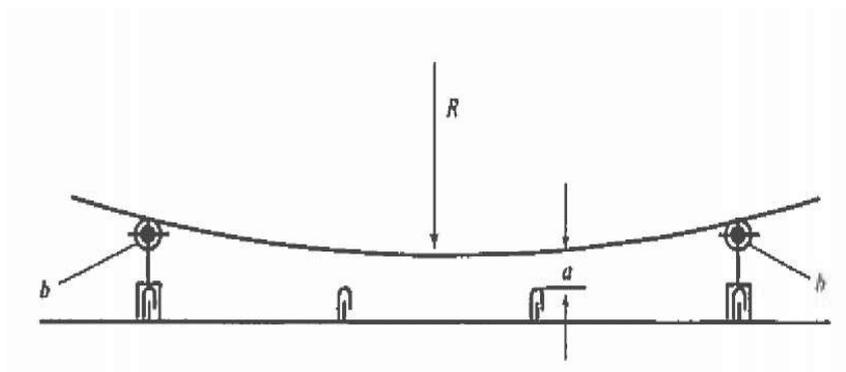


Рис. 9.37. Система молниеприемников на крыше с проводящим покрытием, в котором не допускается появлению отверстий:

R — радиус катящейся сферы; a — расстояние от сферы до выступа; b - молниеприемниками

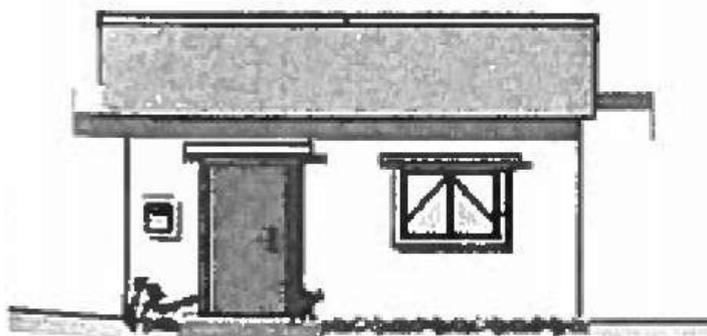


Рис. 9.38. Пример выполнения системы молниезащиты с помощью тросового молниеотвода, установленного на защищаемом объекте

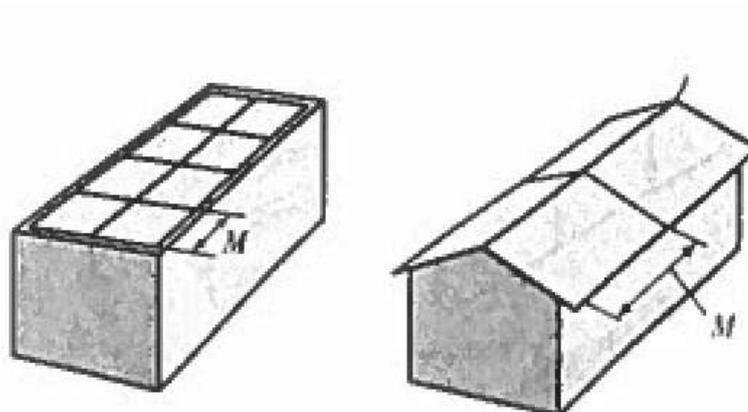


Рис. 9.39. Молниезащитная сетка на плоской крыше

Рис. 9.40. Защита здания с двухскатной крышей

здания:

M – размер ячейки сетки

уровня защиты В отличие от [18], в [21] для III уровня защиты $M=15 \times 15 \text{ м}^2$.

Как отечественные нормативные документы, так и рекомендации МЭК допускают использование металлических крыш, трубопроводов в качестве молниеприемников. При этом документы МЭК ставят следующие условия

Минимальная толщина металлического листа или трубы; из стали — 4 мм, если не допускается возникновение отверстий, 0,5 мм — если допускается; из меди — 5 и 0,5 мм; из алюминия — 7 и 0,6 мм соответственно.

Рассмотрим выполнение внешней части молниезащиты — спусков от молниеприемника до заземлителя. На рис. 9.41 показана система молниезащиты здания со ступенчатой крышей с несколькими спусками, по которым распределяется ток молнии при ударе в стержневой молниеотвод или молниеприемники на кромках крыши.

Внешняя часть системы молниезащиты должна содержать контрольные точки для проверки соединений с заземлителем и для измерения сопротивления растекания самого заземлителя. Контрольные точки, размещенные на системе молниезащиты, обозначены и на других рисунках.

Внешние части систем молниезащиты зданий других конфигураций показаны на рис. 9.42 - 9.44.

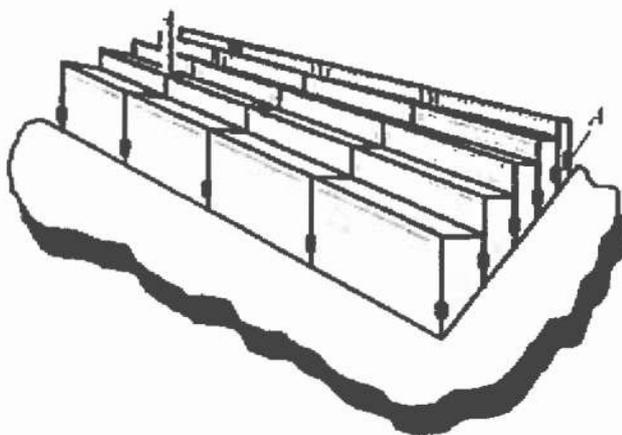


Рис. 9.41. Молниезащита здания со ступенчатой крышей:

A - контрольные точки

Типичные расстояния между точками присоединения спусков к кольцевому электроду заземлителя составляют 10 м для I и II защитных уровней, 15 м для III и 20 м - для IV уровня. В любом случае должно быть не менее двух спусков. Допускается скрутка вертикальных соединительных проводников. Длина скрутки должна быть не менее 20-кратного диаметра проводника.

Активное сопротивление цепи с использованием в качестве спусков арматуры железобетона (рис. 9.43) должно быть не менее 0,2 Ом. Примеры выполнения внутренних спусков в промышленных сооружениях приведены на рис. 9.45.

На рис. 9.46 показана система молниезащиты здания с укрепленной на молниеотводе телевизионной антенной, на рис. 9.47 — система молниезащиты с использованием фундаментного заземлителя. На рис. 9.48 приведен пример использования металлических элементов здания в системе молниезащиты. Так, металлический парапет может служить молниеприемником, а металлические балки каркаса здания — спуском.

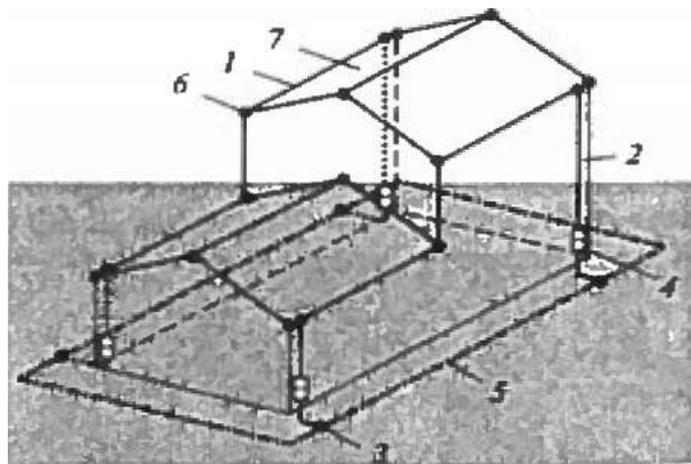
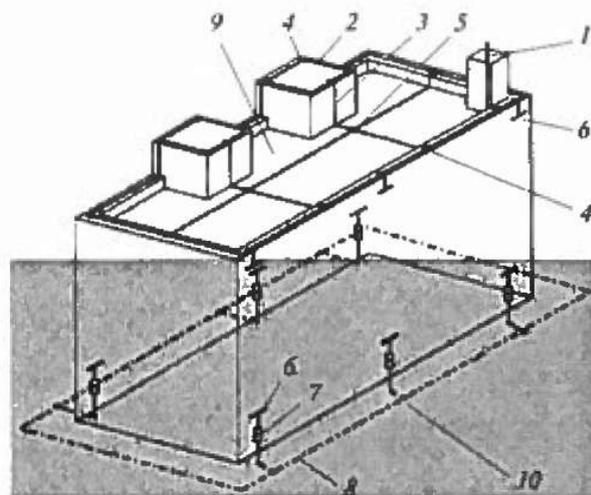


Рис. 9.42. Внешняя часть системы молниезащиты здания из изоляционных материалов со ступенчатой крышей:

1 — горизонтальный молниеприемник, 2 — спуск, 3 — коррозионно-стойкое соединение с заземлителем, 4 - точка, 5 - проводник - соединения на молниезащиты; 7 стандартными



контрольная кольцевой заземлителя, 6 углах системы — сетка со размерами

Рис. 9.43. Система молниезащиты здания из железобетона с использованием ступ в качестве естественных элементов системы:

1 — стержневой молниеприемник; 2 — горизонтальный молниеприемник; 3 — спуск; 4 — соединения горизонтальных молниеприемников; 5 — крестообразное соединение, 6 — соединения с арматурой стен; 7 - контрольные точки; 8 — кольцевой контур заземления; 9 — плоская крыша; 10 - коррозионно-стойкие соединения в контуре заземления

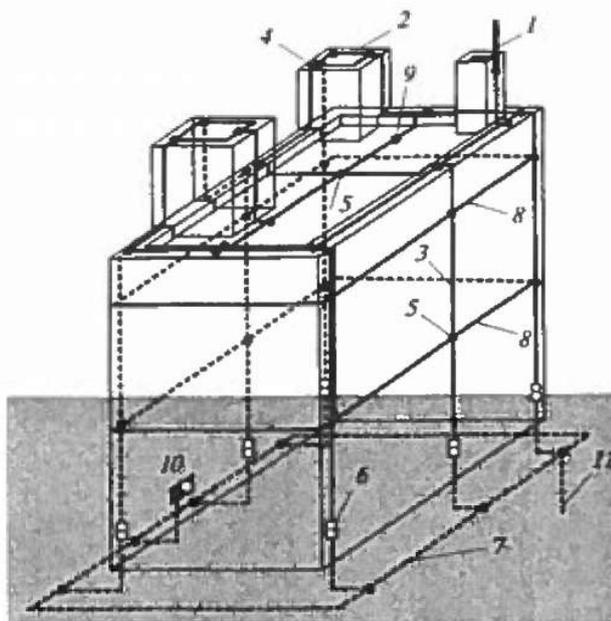
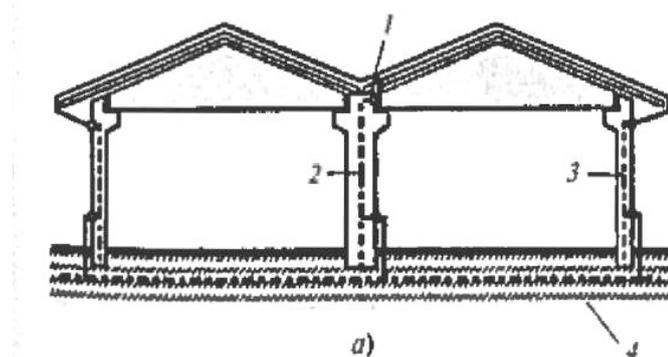


Рис. 9.44. Система молниезащиты деревянного или кирпичного здания высотой до 60 м с плоской крышей:

1 - стержневой молниеприемник; 2 - горизонтальные молниеприемник; 3 — спуск; 4 - соединение горизонтальных молниеприемников; 5 - крестообразные соединения; 6 — контрольные точки; 7 — кольцевой контур заземления. 8 — кольцевой контур выравнивания потенциалов; 9 — крепление системы молниезащиты на крыше; 10 — место присоединения шины выравнивания потенциалов внутри здания; 11 — вертикальный электрод заземлителя



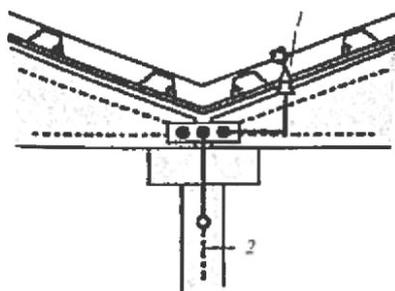


Рис. 9.45. Внутренние спуски в промышленных сооружениях:

а — в стенах; б — под крышей; 1 — проводник системы молниезащиты с водонепроницаемым вводом; 2 - стальная арматура колонны; 3 — стальная арматура стен, 4 — проводник заземлителя в фундаменте

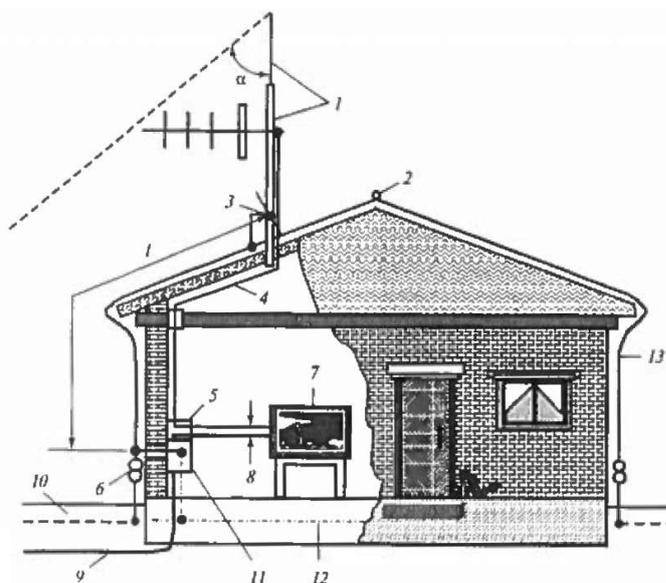


Рис. 9.46. Молниезащита здания с телевизионной антенной, укрепленной на молниеотводе:

1 - металлическая мачта; 2 — горизонтальный молниеприемник на коньке крыши; 3 — соединение мачты с металлическим спуском; 4 — кабель антенны; 5 - основная шина (оболочки кабеля антенны соединена с основной шиной), 6 - контрольная точка; 7 — телевизионное оборудование; 8 - параллельная прокладка кабеля антенны и силовых проводов питания телевизионного оборудования; 9 — кабель электропитания; 10 — система заземления, 11 - распределительный щит с защитным устройством; 12 - проводник заземлителя фундамента; 13 — спуск системы молниезащиты, l - расстояние между точками присоединения к системе молниезащиты; α — защитный угол

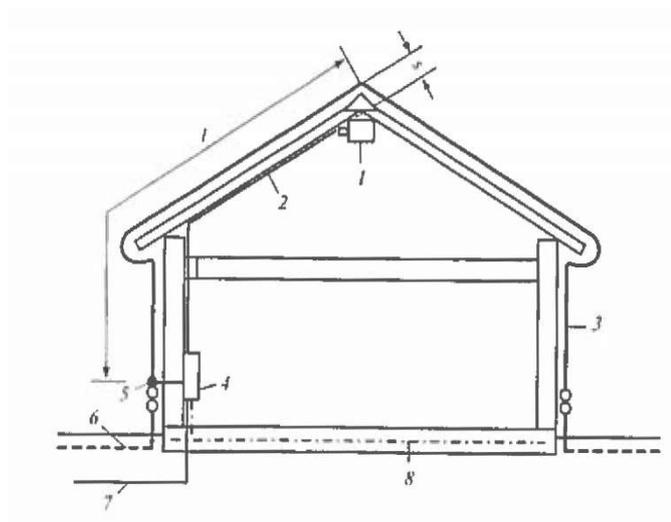


Рис. 9.47. Система молниезащиты с двумя спусками и с использованием в качестве заземлителя арматуры фундамента:

1 - электротехническое оборудование; 2 — электропроводка. 3 — шины системы молниезащиты, 4 - распределительный щит с защитным устройством, 5 – контрольные точки; 6 — заземлитель; 7 — силовой кабель; 8 — арматура фундамента; s — расстояние между шинами системы молниезащиты и электропроводкой; l — длина спуска

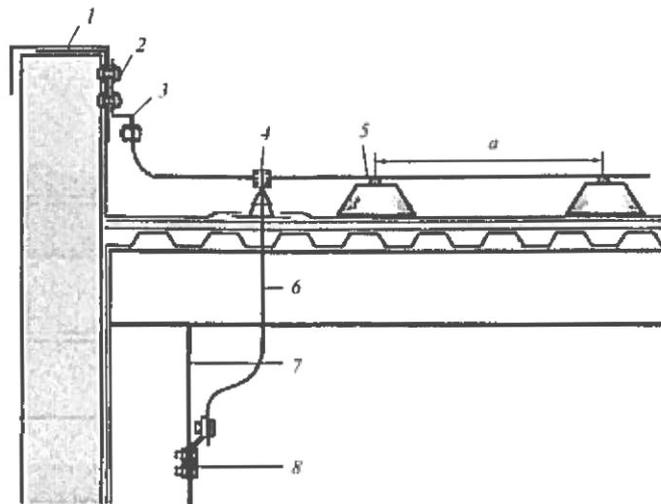


Рис. 9.48. Система молниезащиты с использованием металлических элементов крыши здания:

1 – парапет крыши; 2 – гибкий проводник; 3 – соединение горизонтального молниеприемника с парапетом; 4 – соединение горизонтального молниеприемника с проводником спуска; 5 – крепление молниеприемника; 6 – водонепроницаемый ввод спуска вовнутрь помещения; 7 – стальная балка; 8 – соединение

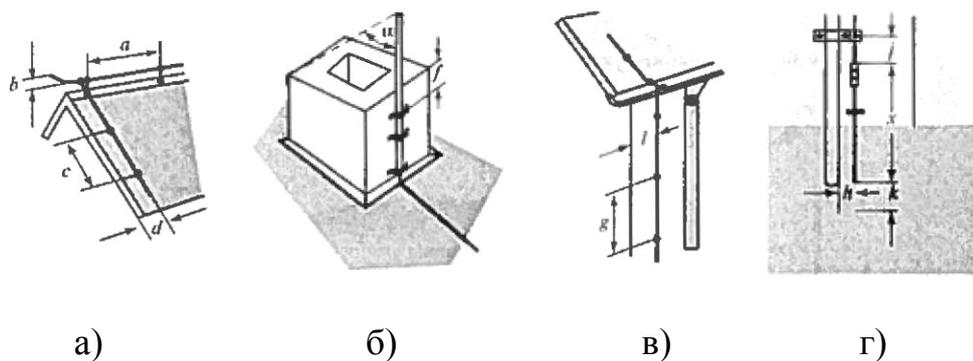


Рис. 9.49. Молниезащита зданий с черепичными крышами:

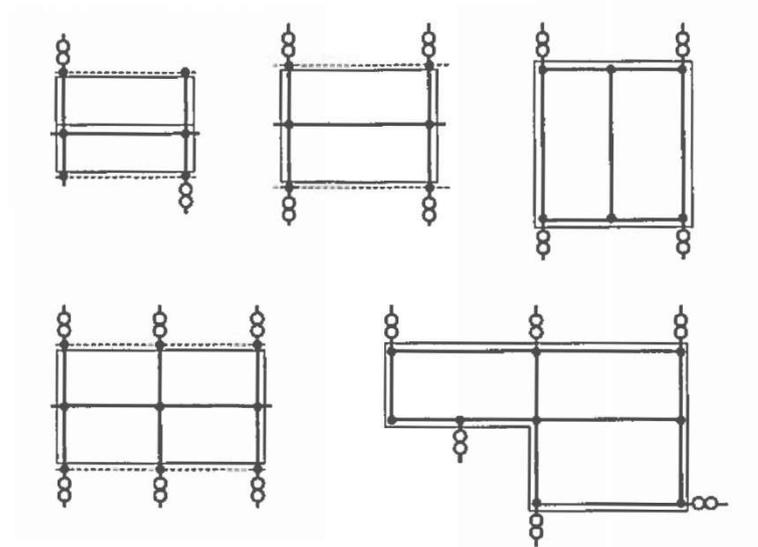
а - молниеприемник над коньком, б - молниеприемник для защиты вытяжной трубы, дымохода, в - спуск с присоединением к металлическому водостоку; г - спуск с контрольными точками и присоединением к металлической водосточной трубе

На рис. 9.49, а, б приведены примеры фиксации спусков на черепичной крыше и кирпичной трубе, а на рис. 9.49, в, г - к водостоку и к водосточной трубе. Характерные расстояния $a=1$ м; $b=0.15$ м; $c=1$ м; d - по месту; $l=0,2$ м; f 0,3 м; $g=1$ м; $h=0,05$ м; $x=0,3$ м; $i=1,5$ м; $k=0,5$ м.

Типичные конфигурации внешней части систем молниезащиты зданий приведены на рис. 9 50. Они представляют собой сетки проводников, объединенных во многих точках. Сетка имеет достаточное число контрольных точек.

Иногда систему молниезащиты выполняют скрытой под крышей, как показано на рис. 9.51.

Спуски в консольной части здания выполняются согласно рис. 9.52.



естественные элементы системы, например, водостоки;
 шины системы молниезащиты;
 контрольные точки;
 соединения

Рис. 9.50. Типичные конфигурации внешней части системы молниезащиты

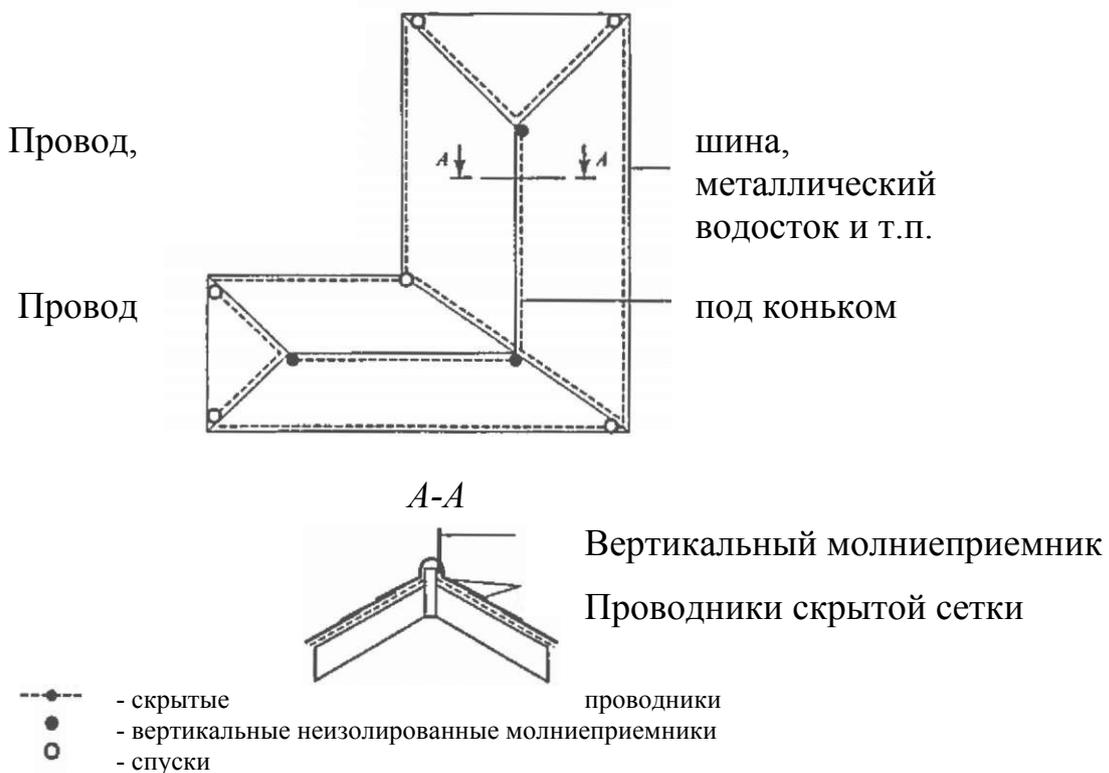


Рис. 9.51. Скрытая система молниезащиты с дополнительными вертикальными молниеприемниками

При этом принимается высота человека с поднятой рукой 2,5 м, а безопасное расстояние s определяется по падению напряжения на участке l спуска в консольной части здания, с учетом того, что по спуску протекает часть тока молнии, обратно пропорциональная количеству спусков.

На рис. 9.53—9.55 показаны типичные примеры защиты оборудования, находящегося в защитных зонах. Иногда используется молниеприемник в виде шляпки (рис. 9.56). Использование в качестве молниеприемника патрубка, выходящего из крыши здания, показано на рис. 9.57. В этом случае патрубок может быть соединен с горизонтальным молниеприемником. Обязательным является его соединение с системой выравнивания потенциалов.

Неотъемлемой частью системы молниезащиты является заземлитель. Он обычно представляет собой комбинацию параллельно объединенных заземлителей зданий, сооружений. Объединение реализуется, как правило, сетками, проложенными на территории предприятия. На электроэнергетических предприятиях сопротивление заземлителя нормируется. Для подстанций, распределительных устройств сопротивление заземлителя не должно превышать 0,5 Ом. Если расчетное сопротивление сеточного заземлителя с учетом естественных элементов превышает указанное значение, то сеточный заземлитель дополняется вертикальными стержнями. Существуют достаточно полные рекомендации по расчетам заземлителя, измерениям его сопротивления, диагностике и обслуживанию.

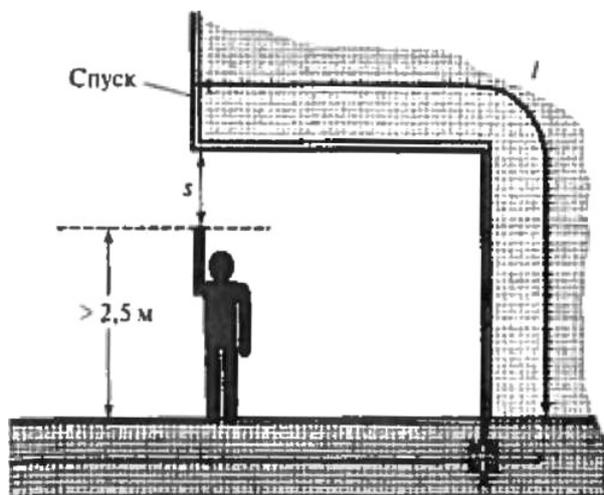


Рис. 9.51. Молниезащита в консольной части здания:

s — безопасное изоляционное расстояние; l — расчетная длина спуска

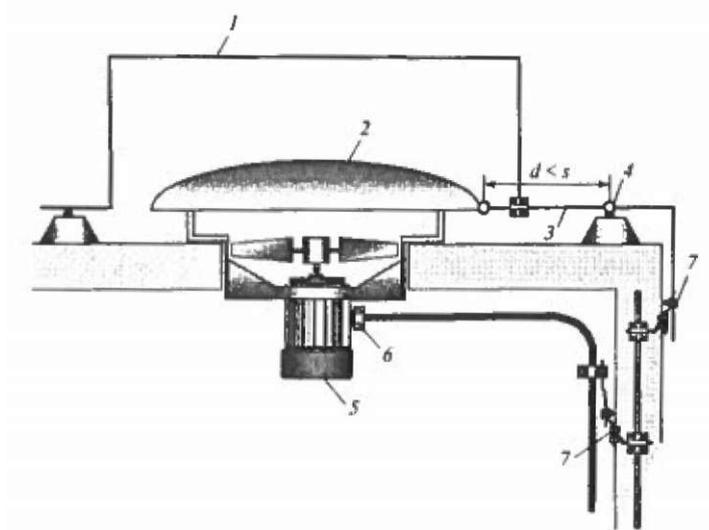


Рис. 9.53. Защита электротехнического оборудования, установленного на крыше и присоединенного к молниеприемнику, от прямых ударов молнии:

1 — молниеприемник; 2 — кожух из изоляционного материала; 3 - соединительный проводник; 4 — горизонтальный молниеприемник; 5 — электротехническое оборудование; 6 — клеммник для присоединения провода электропитания; 7 - точка соединения проводящих элементов здания; d - расстояние между изоляционным кожухом и молниеприемником; s — изоляционное расстояние

Некоторые из них содержатся в МУЭ [16], различных руководящих документах и инструкциях, таких как [17, 18].

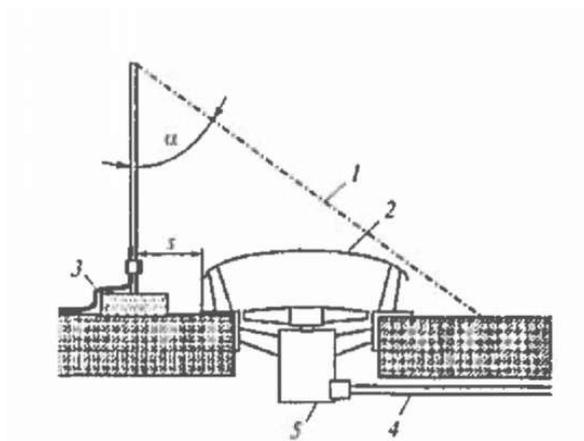


Рис. 9.54. Стержневой молниеприемник для защиты металлической крыши устанавливаемый рядом с электротехническим оборудованием, не присоединенным к молниеприемнику:

1 - защитный конус, 2 — крепление металлических элементов крыши; 3 — горизонтальный молниеприемник; 4 — силовая электропроводка в экране; 5 — электротехническое оборудование. s — неизолирующее расстояние, α - защитный угол

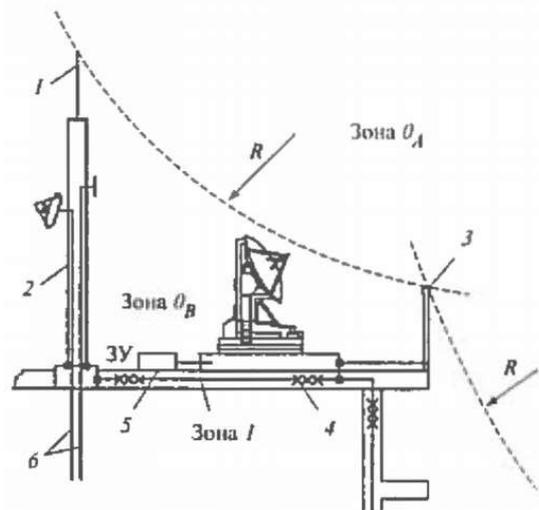


Рис. 9.55. Защита антенн и другого внешнего оборудования:

1 — стержневой молниеотвод, 2 - стальная мачта антенны; 3 — защитный барьер, 4 — соединения арматуры железобетонных конструкций; 5 — защитное устройство на линии, идущей из зоны θ_B ; 6 — шипы (внутри мачты), идущие из зоны 1 и не требующие защитных устройств; R - радиус катящейся сферы

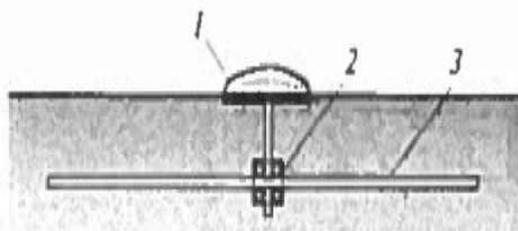


Рис. 9.56. Молниеприемник в виде шляпки на крышах автомобильных парковок:

1 - шляпка молниеприемника; 2 — стальные проводники для присоединений к арматуре; 3 - стальная арматура

На рис. 9.58 и 9.59 показаны примеры выполнения присоединений к простейшим вертикальным стержневым заземлителям, рекомендованные МЭК [21].

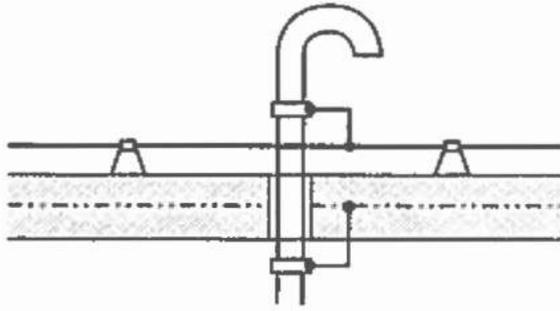


Рис. 9.57. Присоединение естественных молниеприемников-патрубков к системе молниезащиты и к системе выравнивания потенциалов здания (в данном случае к арматуре железобетонного здания):

1 - крепление молниеприемника; 2 - металлическая труба; 3 — горизонтальный молниеприемник; 4 - стальная арматура железобетона

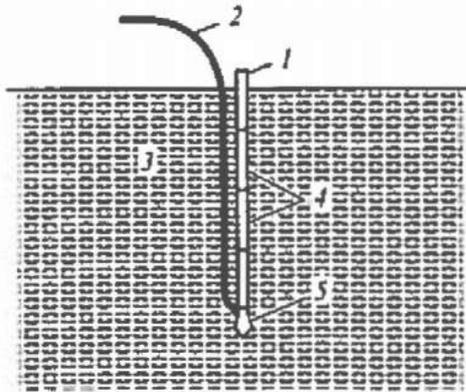


Рис. 9.58. Пример заземляющего устройства на с вертикальным электродом и удаляемой при необходимости верхней частью:

1 — удаляемая (при необходимости) верхняя часть вертикального электрода; 2 — шина, присоединяемая к заземляющему электроду (верхняя часть может иметь изоляционную оболочку); 3 — грунт, 4 — короткие участки заземляющего электрода, забитые в грунт; 5 — стальной направляющий наконечник

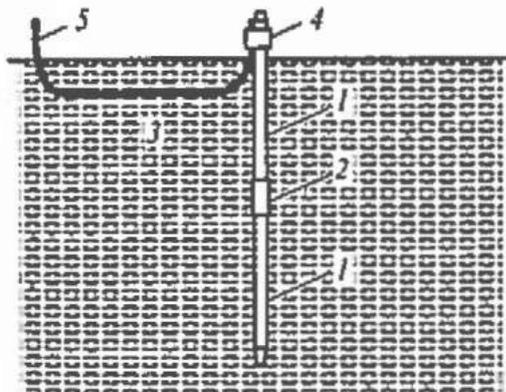


Рис. 9.59. Пример вертикального заземлителя с соединительной муфтой:

1 - участки составного электрода; 2 — соединительная муфта; 3 - грунт; 4 — соединение шины 5 с электродом 1; 5 — шина заземлителя

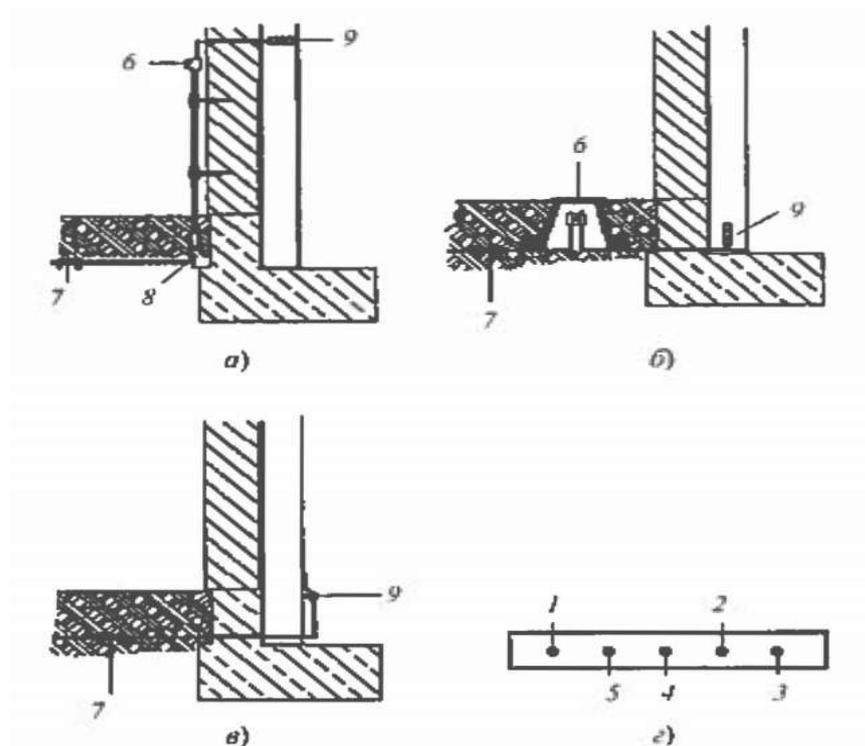


Рис. 9.60. Варианты соединений системы молниезащиты и заземлителя с использованием естественных спусков и детали контрольных точек:

а — контрольная точка на стене; б - контрольная точка на полу; в — с металлоконструкцией на наружной стороне стены; г — с использованием шины, расположенной в люках на полу рядом с помещением; 1 — спуск; 2 — присоединение к заземлителю типа А; 3 - присоединение к заземлителю типа В; 4 - присоединение к арматуре фундамента; 5 - шина связи с внутренней частью системы молниезащиты; 6 — контрольная точка на стене, 7 — коррозионно-стойкие присоединения типа Т к проводникам заземлителя в земле; 8 - коррозионно-стойкие присоединения в земле; 9 - соединения системы молниезащиты с металлоконструкцией

В заземлителе, показанном на рис. 9.58, вертикальный электрод, забиваемый в грунт, состоит из коротких стержней, имеющих хороший контакт при их соединении. Короткие стержни облегчают забивание электрода. При необходимости верхняя часть электрода может быть удалена после забивания. Пример вертикального составного заземлителя показан на рис. 9.59.

Как отмечалось, экран здания и заземлитель имеют контрольные точки для измерения параметров заземлителя и системы выравнивания потенциалов. Рекомендуемое МЭК размещение контрольных точек приведено на рис. 9.60. Контрольные точки следует располагать на внешней или внутренней стене здания или на полу.

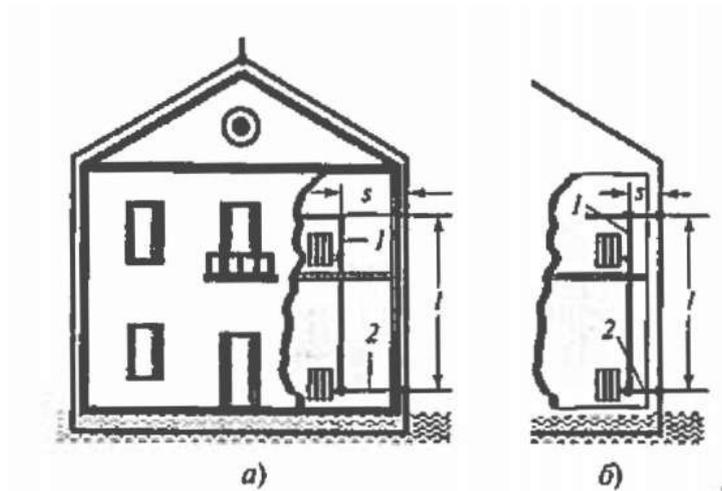


Рис. 9.61. Безопасные расстояния l и s между системой молниезащиты и металлоконструкциями внутри здания:

а — соединение металлических элементов 1 с шиной выравнивания потенциалов 2; б — соединение металлических элементов 1 с шиной выравнивания потенциалов 2 и со спуском на наибольшем расстоянии от шины выравнивания потенциалов

Заземлитель типа А на рис. 9.60 имеет не менее двух вертикальных электродов, типа В — с наружным кольцевым проводником или с горизонтальной сеткой.

В здании с внешней молниезащитой предъявляются особые требования к размещению оборудования в помещениях. Безопасные расстояния s между системой молниезащиты и металлическими заземленными предметами внутри здания (рис. 9.61 и 9.62) нормированы как и расстояния s_1 и s_2 на рис. 9.33. Наименьшее расстояние

$$s \geq K_i \frac{K_c}{K_m} l$$

где K_i — коэффициент, зависящий от уровня защиты; K_c — коэффициент, зависящий от тока, протекающего по ближайшему спуску или металлоконструкции; K_m — коэффициент, зависящий от изоляции; l — длина спуска от земли до точки определения расстояния.

Для уровня I коэффициент $K_i=0,1$ для уровня II $K_i=0,075$ и для уровней III и IV $K_i=0,05$.

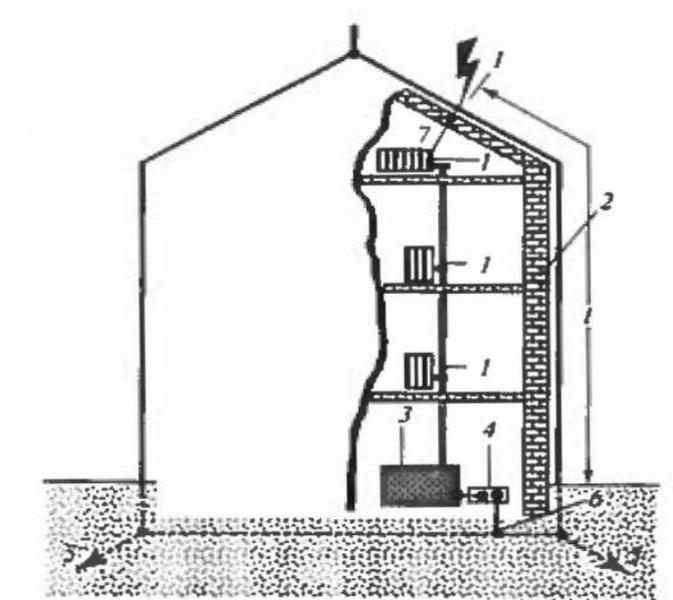


Рис. 9.62. К расчетам безопасного расстояния s для наибольшего расстояния l от шины выравнивания потенциалов:

1 — металлический радиатор системы отопления; 2 — стена из кирпича или дерева; 3 — нагреватель; 4 — шина выравнивания потенциалов; 5 — заземлитель; 6 — соединение с заземлителем или спуском; 7 — наиболее опасная точка поражения

Значения коэффициента K_c зависят от числа проводников спуска. При одном проводнике $K_c=1$, при двух - $K_c=0,66$, а при четырех и более $K_c=0,44$.

Для воздуха $K_m=1$, для кирпича и бетон $K_m=0,5$. При комбинированной изоляции принимается наименьшее значение K_m .

9.7. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКИ МОЛНИИ И МОЛНИЕЗАЩИТЫ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ ЗАРЯЖЕННЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ОБЛАКОВ

Исследование инициирования и развития разряда в облаках заряженных капель воды (в электрически активных облаках) и нейтрализации облачного заряда необходимо для более глубокого понимания физики разряда молнии, чтобы ответить на такие вопросы как:

- где будут происходить разряды внутри грозового облака;
- в какой степени облако будет заряжено;
- как влияют разрядные процессы в облаке на распространение разряда молнии;
- каковы шансы возникновения повторных разрядов и где они могут случиться и т.п.

Остаются открытыми важные вопросы: как присутствие крупных облачных капель или другого аэрозоля будет влиять на развитие разрядов внутри облака и как протяженные объемы облачного заряда эффективно нейтрализуются молнией. Без ответа на эти вопросы невозможно продвинуться в создании общей теории разряда молнии и физики грозы.

В настоящее время нет единого взгляда на роль развития разрядных процессов в заряженных областях грозового облака на разных этапах возникновения и распространения молнии. Это связано с тем, что представления о разрядных процессах внутри электрически активных облаков во многом основывались на мало информативных для этой цели наземных измерениях электромагнитного излучения разряда, а детали и многие разрядные формы из-за дистанционности в них просто не проявлялись. Еще одна нерешенная проблема — это моделирование процессов формирования восходящей молнии и поражения ею наземных объектов.

С достаточной точностью пока так и не установлены очень важные при инженерных приложениях физики молнии и молниезащиты корреляционные зависимости между характеристиками самой главной стадии и между ними и параметрами предшествующей лидерной стадии;

- скорости нейтрализации и амплитуды тока главного разряда;
- амплитуды тока главной стадии и заряда предшествующего ему нисходящего лидера;
- амплитуды тока молнии и его максимальной крутизны и др.

Знание этих зависимостей даст возможность гораздо точнее прогнозировать случаи ударов молнии в летательный аппарат в полете и в различные стационарные объекты.

Одним из подходов к решению этих проблем является применение искусственных заряженных аэрозольных водных облаков с предельной плотностью заряда, способных инициировать электрические разряды (аналоги разрядов молнии) и подробно исследовать процессы формирования и развития стадий разряда в ситуации, характерной для естественной природной ситуации, в лабораторных условиях.

На кафедре техники и электрофизики высоких напряжений Московского энергетического института (технического университета) создан экспериментальный комплекс, предназначенный для создания в воздушной среде протяженных заряженных аэрозольных образований (искусственных электрически активных облаков) с предельной плотностью заряда (до 10^{-2} — 10^{-3} Кл/м³), обеспечивающей возникновение протяженных электрических разрядов, моделирующих молнию (рис. 9.63). Электрические потенциалы создаваемых облаков достигают нескольких мегавольт и создаются сильные электрические поля (с напряженностью, превышающей 10 кВ/см) в протяженных областях (с линейным размером, составляющим десятки метров).

Одно из направлений исследований — физическое моделирование влияния гидрометеоров на условия инициирования и распространения

разрядных явлений (молнии) в природных электрически активных облаках и вблизи них.

Установлено: если группа модельных гидрометеоров (металлических предметов) с относительно небольшим коэффициентом усиления электрического поля располагается недалеко от границ облака или в промежутке между облаком и заземленной плоскостью, она может способствовать инициированию разряда и/или его дальнейшему распространению (рис. 9.64).

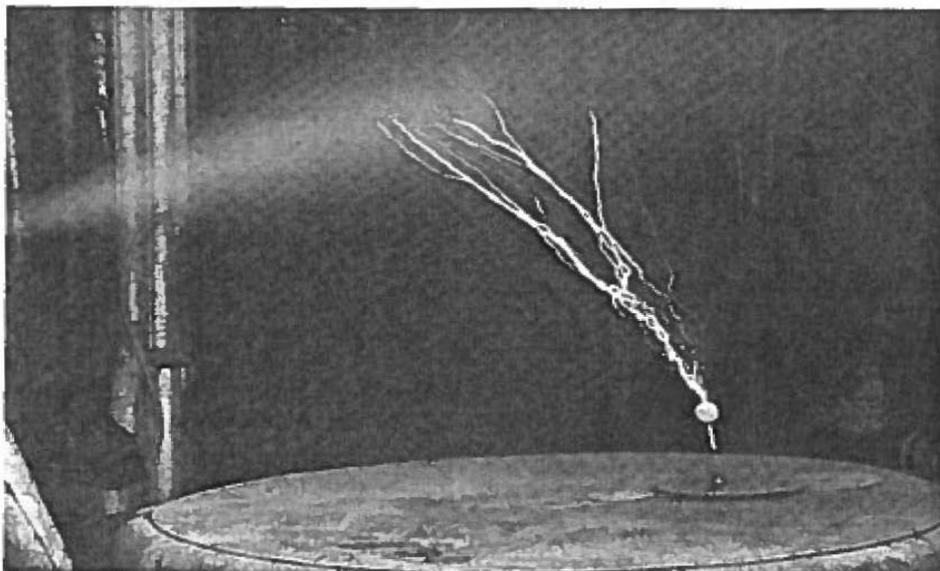


Рис. 9.63. Искусственное облако (заряженым) водного аэрозоля и электрические искровые разряды, инициированные с заземленного электрода

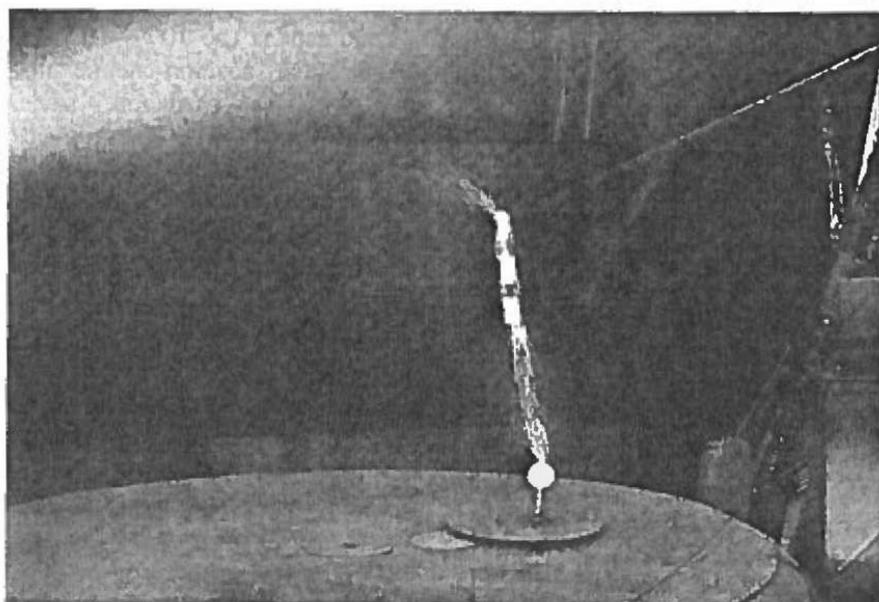


Рис. 9.64. Группа изолированных цилиндрических проводящих гидрометров инициирует и «направляет» разряд между искусственным обликом заряженного аэрозоля и землей

Это коррелируется с реальными грозowymi условиями как по напряженности облачных электрических полей, так и по размерам и виду гидрометеоров. При этом инициирование и развитие разряда из облака заряженного аэрозоля проходит в намного более стабильной форме в присутствии групп модельных гидрометеоров, чем без них

Экспериментальные исследования процессов формирования и распространения главной (финальной) стадии разряда из облака показали явно выраженную тенденцию роста амплитуды тока $I_{\text{мгл}}$ финальной стадии разряда с возрастанием средней скорости продвижения предшествующего ей лидерного процесса v_l (рис. 9.65).

Одним из направлений при экспериментальном определении вероятности поражения объектов разрядом молнии может являться использование искусственных сильно заряженных аэрозольных водных облаков. Существующие методы создания искусственных заряженных аэрозольных облаков позволяют создавать облака объемом до десятков кубических метров и потенциалом в несколько мегавольт. Это открывает новые возможности при экспериментальном моделировании процесса поражения объекта молнией: во-первых, существенно приближает физическое моделирование процесса поражения молнией наземных объектов к естественной грозовой обстановке; во-вторых, значительно упрощает экспериментальное моделирование процесса поражения молнией наземных объектов и дает возможность получать достаточный для анализа статистический материал.

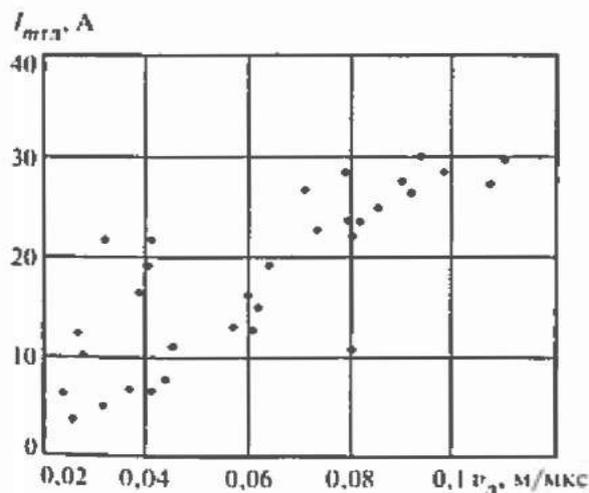


Рис. 9.65. Зависимость амплитуды тока финальной стадии разряда от скорости распространения предшествующего лидера

При исследовании процессов поражения разрядом из искусственного облака моделей сосредоточенных объектов установлено, что возникновение и распространение восходящего встречного лидерного разряда с вершины модели молниеотвода в большинстве случаев подавляет развитие лидера с модели защищаемого объекта, на котором наблюдается только слабая корона (рис. 9. 66)

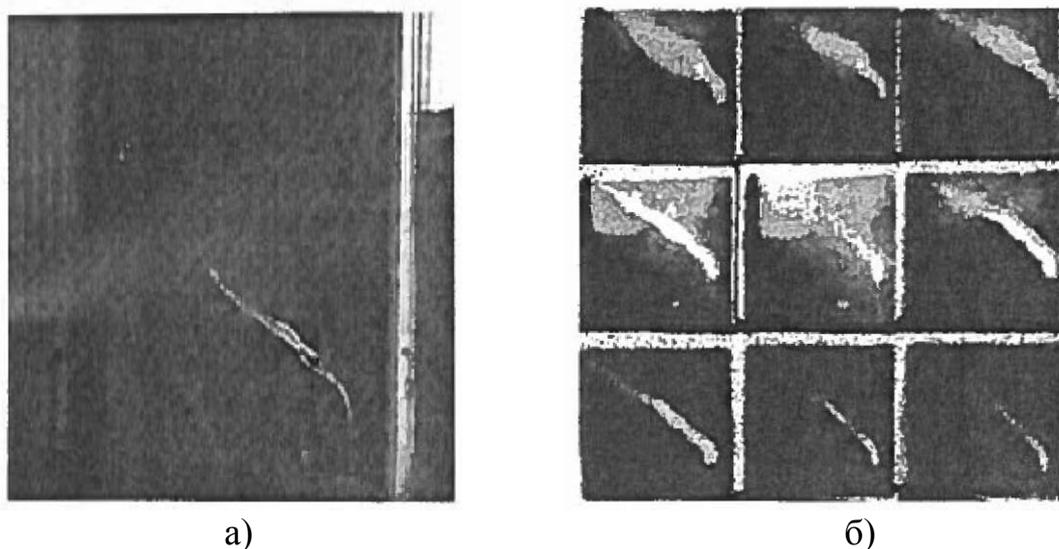
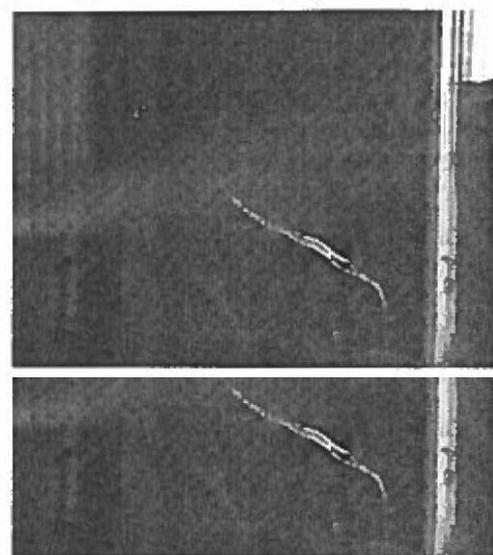


Рис. 9.66. Поражение модели молниеотвода разрядом из искусственного облака заряженного водного аэрозоля:

а – фотография; б — развертка процесса поражения программируемой электронно-оптической камерой (размер кадра 70×70 см², длительность экспозиции кадра 0,6 мкс, пауза между кадрами 0,2 мкс)

Рис. 9.67. Зависимость поражения разрядами первого модельного фазного провода от угла защиты модельного грозозащитного троса

На основе проведенных экспериментов (около 10 тыс. разрядов) для модельной линии электропередачи зависимость вероятности поражения крайнего провода от угла защиты а грозозащитного троса показана на рис. 9.67 (кривая 1). Зависимость вероятности прорыва молнии через тросовую защиту к фазному проводу линии электропередачи, рассчитанная по эмпирическому соотношению в масштабе 1:100, представлена кривой 2. Как видно, вероятность, полученная в эксперименте, существенно отличается от расчетной.



Когда угол α превышал 28° , в экспериментах наблюдалось резкое увеличение вероятности поражения разрядом из облака модельного фазного провода. Фактически угол защиты $25—40^\circ$ является критическим с точки зрения резкого роста вероятности возникновения восходящих встречных разрядов на фазных проводах линии электропередачи. Возможно, в этом случае условия для старта восходящего искрового разряда с фазного провода создаются в момент, когда коронный разряд присутствует на молниезащитном тросе, экранируя его и задерживая момент возникновения восходящего разряда на молниезащитном тросе.

Таким образом, применение искусственных заряженных аэрозольных облаков открывает новые возможности для оценки вероятностей прорыва молнии в зоны защиты молниеотводов.

Глава десятая

ПРАКТИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ПОМЕХ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ И ПОДСТАНЦИЯХ

10.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Виды компоновок. Здесь будут рассмотрены наиболее общие возможные планы размещения оборудования и его взаимосвязь с источниками возмущений, а также отмечены факторы, способствующие снижению помех, например наличие сети заземления, экранирующих конструкций и т.п.

Будет показано, что уровень помех, действующий на устройство, зависит от месторасположения остального оборудования, с которым связано рассматриваемое устройство. Такой подход позволит ввести понятия различных классов электромагнитного окружения.

Подстанции высокого напряжения. На рис. 10.1 приведен план подстанции высокого напряжения. Объекты подстанции можно разделить на три-четыре основные категории: оборудование высокого напряжения, помещения релейных щитов, щиты управления и иногда комнаты связи, причем все объекты связаны между собой цепями вторичной коммутации.

В некоторых ситуациях релейные щиты могут отсутствовать. В этих случаях их функции выполняют щиты управления.

Комната связи также может либо входить в состав щита управления, либо располагаться отдельно.

Все описанные объекты в нормальных условиях присоединены к единой сети заземления или к нескольким взаимосвязанным сетям заземления (если уровни их потенциалов различны).

Электростанции. План расположения оборудования обычной электростанции приведен на рис. 10.2.

На электростанции, в зависимости от места расположения, можно выделить три вида объектов:

- технологические помещения, предназначенные для силовых энергоблоков (котлы, генераторы, турбины), коммутационной аппаратуры и т.п.;
- площадки или помещения для РУ и оборудования (устройств управления, релейной защиты, приборов и т.п.);
- щит управления, имеющий экранированную область;
- вспомогательное оборудование (емкости с топливом, градирни, оборудование для измерения параметров атмосферы, дымовые трубы и т.д.).

Обычно главное здание и распределительное устройство имеют общий заземлитель или два отдельных заземлителя, связанных между собой. Заземление вспомогательного оборудования может представлять собой либо заземлители молниеотводов, либо расширение основного заземлителя, либо вообще может отсутствовать.

В отношении расположения оборудования особенных различий между обычными (электрическими или тепловыми) и атомными электростанциями нет, за исключением большей сложности последних, повышенных требований к их безопасности и использования некоторых сигнальных цепей особо низкого уровня напряжений. Более того, в связи с расположением котлов в отдельном здании многие электрические и электронные сети на АС имеют большую длину.

Радиостанции. Радиостанции, обслуживающие объекты электроэнергетики, часто устанавливаются в пределах подстанций или электростанций.

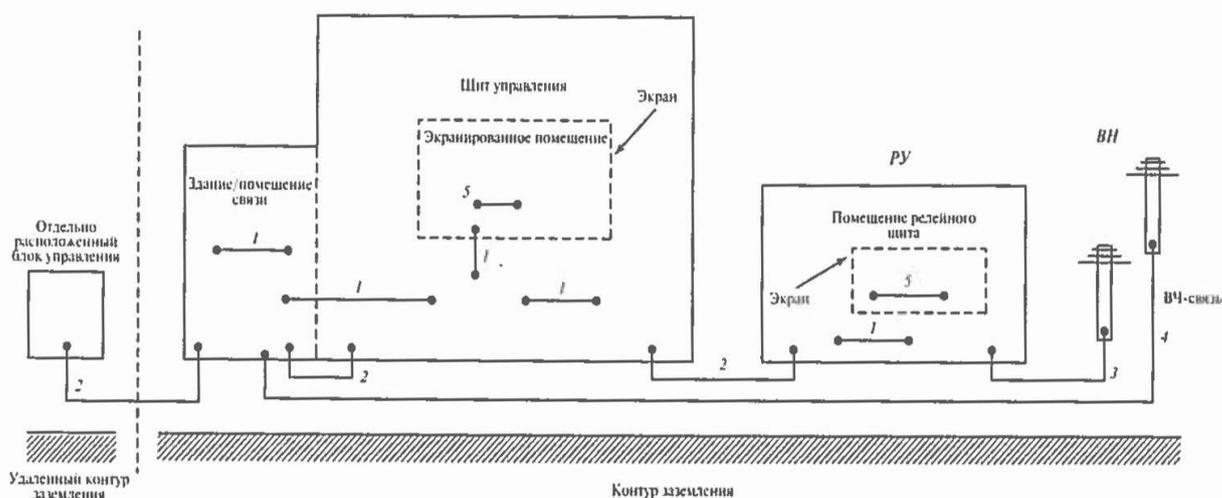


Рис. 10.1. План типовой подстанции высокого напряжения и соответствующие виды электромагнитного окружения:

1 - кабели управления внутри помещений; 2 — кабели управления вне помещений; 3 — связи с оборудованием высокого напряжения, например с силовыми выключателями, измерительными трансформаторами и т.п.; 4 — связи коммутационные, например с устройствами передачи данных по ВЛ или с удаленными оконечными устройствами; 5 — кабели связи внутри экранированных помещений (если таковые имеются)

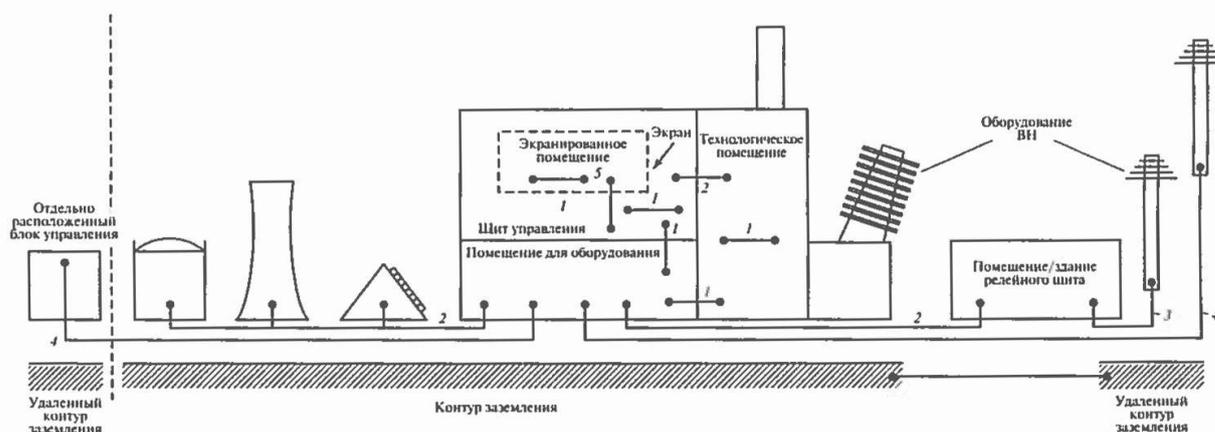


Рис. 10.2. План типовой электростанции и соответствующие виды электромагнитного окружения (обозначения те же, что на рис. 10.1)

Такой способ установки имеет достоинство в виде наличия хорошей заземляющей сети, а радиостанция с точки зрения ЭМС может быть сравнена со зданием релейного щита, хотя и имеет большую вероятность поражения молнией.

При установке вдали от подстанций ВН радиостанции обычно располагаются на возвышенностях, при этом часто имеет место повышенное сопротивление грунта, изолированная (отдельная) заземляющая сеть среднего качества и все та же повышенная вероятность поражения прямым ударом молнии.

Для всех указанных случаев следует обращать особенное внимание на выполнение связей такого оборудования (электропитание, телекоммуникации) с внешними объектами.

Щиты управления. Подобно радиостанциям щиты управления не обязательно располагаются вблизи оборудования ВН и, как следствие, не всегда обладают хорошим заземляющим устройством. При обеспечении молниезащиты это может быть недостатком, но при рассмотрении других источников возмущений может быть и достоинством (КЗ на высокой стороне, коммутации и т.д.).

Таким образом, существенные для каждого конкретного щита управления принципы его исполнения с учетом ЭМС зависят от его электрического окружения:

- при установке в пределах ПС, он может быть приравнен к зданию управления;

- если в состав щита входит антенна связи, он может быть частично приравнен к радиостанции;
- при установке щита в отдельном здании, расположенном в городе, никаких специальных мер по обеспечению ЭМС принимать не требуется.

Типы сигналов и их уровни. Помехи оказывают влияние на оборудование непосредственно или, что бывает чаще, через кабели.

В последнем случае уровень помех и порог невосприимчивости зависят в основном от двух факторов:

- типа кабеля и способа подключения;
- типа передаваемого сигнала.

Первый фактор характеризуется коэффициентом экранирования, определенным в гл. 8. Второй фактор грубо может быть охарактеризован амплитудой (в вольтах или амперах) и шириной спектра или скоростью нарастания сигналов, и на первый взгляд, при рассмотрении вопросов ЭМС не очень существенно, какие сигналы рассматриваются — цифровые или аналоговые.

Кроме того, можно было бы также классифицировать сигналы в зависимости от вида оборудования, между которым передаются эти сигналы, или в соответствии с типом ЭМО, в которой находится оборудование.

Хотя между тремя упомянутыми видами классификации (по типу сигналов, оборудования, окружения) существует некоторая взаимосвязь, здесь будет приведена классификация с учетом следующих обстоятельств:

- другие виды классификаций имеют слишком много исключений, например широкополосные сигналы низкого уровня, проходящие в пространстве со сложной ЭМО и наоборот;
- типы сигналов обладают большей изменчивостью, чем их окружение.

Классификация типовых сигналов в порядке увеличения их максимальных значений приведена в табл. 7.6.

Следует отметить, что хотя в данной классификации цифровые и аналоговые сигналы отнесены к одному типу (различаясь индексами a и b соответственно), подобное объединение имеет некоторые ограничения вследствие того, что цифровые и аналоговые системы на практике ведут себя совершенно по-разному.

10.2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ И ПРОКЛАДКИ КАБЕЛЕЙ

Правила выполнения заземления и прокладки кабелей. Во всех последующих разделах, посвященных выполнению заземления и прокладки кабелей, будут использоваться основные принципы, изложенные в гл. 2, 4, 7. Приведем основные положения:

- цепи заземления должны иметь, по возможности, больше взаимных связей. За исключением некоторых ситуаций следует без

колебаний увеличивать число связей оборудования с заземляющим устройством, а не увеличивать их сечение;

- следует уменьшать площадь петли электрических (и электронных) цепей. По возможности для цепей, присоединенных к одному оборудованию, следует использовать один путь прокладки кабелей. Всегда в качестве прямого и обратных проводов следует использовать жилы одного и того же кабеля. Следует избегать соединения более чем одной точки сигнальной цепи с землей (за исключением некоторых ВЧ-связей коаксиальными кабелями или в случае небольших цепей, построенных на качественно выполненной эквипотенциальной плоскости нулевого потенциала);

- следует располагать все части (заземленных) сигнальных цепей по возможности ближе к заземляющим проводникам с целью улучшения коэффициента ослабления и уменьшения передаточных сопротивлений;

- не следует располагать в непосредственной близости цепи (заземления или сигнальные цепи), по которым передаются (или могут передаваться) токи или напряжения, сильно различающиеся по амплитуде.

Некоторые изложенные требования, могут иногда оказаться противоречащими друг другу, особенно когда речь идет о сети заземления, по которой возможно протекание больших токов, например токов молнии.

С одной стороны, электрические цепи должны располагаться на определенном расстоянии от подобных заземляющих проводников. С другой стороны, кабели следует располагать максимально близко к заземляющим проводникам.

Причиной обоих этих требований является общий принцип уменьшения общего для двух цепей магнитного потока (рис. 10.3).

Противоречивыми также являются требования располагать сигнальные цепи по возможности ближе к заземленным проводникам и удалять сигнальные цепи от цепей, по которым передаются или могут передаваться токи или напряжения большой амплитуды (уменьшение связи через общее сопротивление).

Компромисс между требованиями может быть достигнут посредством прокладки множества заземляющих проводников в целях уменьшения тока, протекающего по каждому отдельному проводнику, и обеспечения пути с низким сопротивлением для протекания наибольших токов.

На рис. 10.4, *a, б* данные основные правила проиллюстрированы более подробно; на них приведены схемы для сравнения шести различных способов связи проводника тока молнии (например, приемное устройство антенны), идущего к заземляющему устройству электрической цепи.

На рис. 10.4, *a* цепь представляет собой вертикальную квадратную петлю, имеющую относительно большую площадь:

- 1 - часть петли располагается вблизи заземляющего проводника;
- 2 - 2/3 тока молнии отводится непосредственно в землю;
- 3 - ток молнии / протекает на расстоянии от сигнальной цепи.

При сравнении этих трех случаев видно, что уровень помех в системе, изображенной на рис. 10.4, а (1) наибольший, а на рис. 10.4, а (3) — наименьший. Подтверждение этого факта можно найти на рис. 4.6, где показаны форма и амплитуда токов измеренных импульсов и наведенных напряжений.

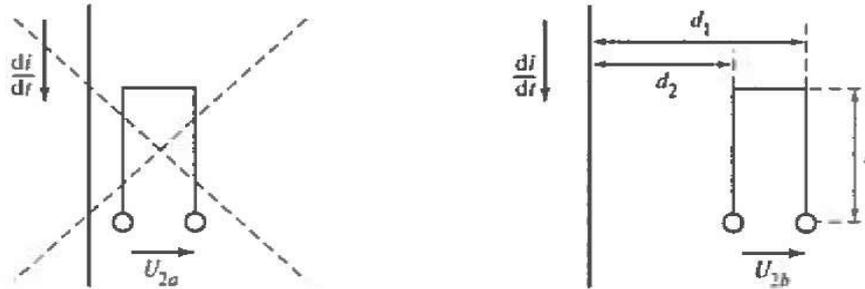


Рис. 10.3. Индуктивная связь между заземленным проводником, по которому протекает большой ток i , и чувствительной цепью l, d J или $l, d_1 - d_2$:

$$a - U_{1a} < U_{1b}; \quad U_1 = \frac{di}{dt} \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} l \ln \frac{d}{a}; \quad b - U_{2a} > U_{2b}; \quad U_2 = \frac{di}{dt} \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} l \ln \frac{d_1}{d_2}$$

Однако выгода прокладки всей цепи вблизи заземленных проводников становится более очевидной.

На рис. 10.4, а (4) протекающий в заземляющее устройство цепи ток молнии не создает никаких помех в петле, поскольку ток, разделенный на две части, может создавать в квадратной (или любой прямоугольной) петле магнитные потоки одинаковой амплитуды, но разного направления. На этом рисунке условно показано, что ток, протекающий по правой стороне заземленной цепи в 2 раза больше тока, протекающего по левой стороне, а длина его пути в полтора раза меньше. Следует отметить, что в данной ситуации, а также в большинстве других практических ситуации, ток делится на части, обратно пропорциональные длинам соответствующих проводников (при этом делается допущение о приблизительно одинаковом поперечном сечении проводников). При неравенстве токов, а также вследствие наличия на рис. 10.4, а (4) горизонтального участка a компенсация магнитного потока будет неполной, и в петле будет индуцироваться напряжение U_4 .

Схемы на рис. 10.4, а (5) и 10.4, а (6) менее предпочтительны для данной конкретной конфигурации, так как часть тока, попадающего непосредственно в заземлитель, образует петлю, магнитный поток которой не может быть скомпенсирован.

Очевидно, что показанные на рис. 10.4, а расположения цепей редко встречаются в действительности.

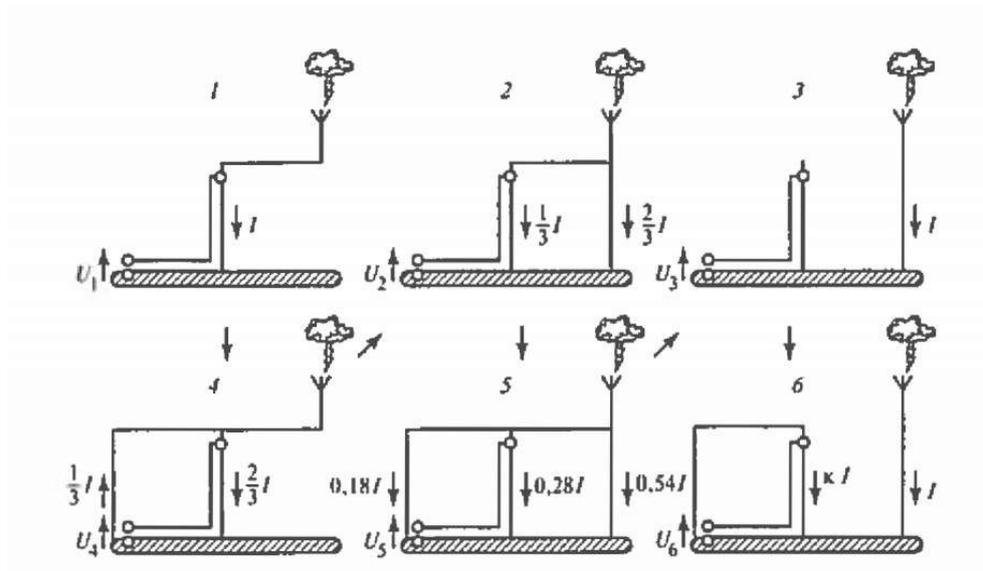


Рис. 10.4. Индуктивная связь между устройством молниезащиты:
 а – чувствительной к помехам цепью; б – заземленной цепью через общее сопротивление с устройством молниезащиты

Наиболее общая ситуация расположения приведена на рис. 10.4, б, где показано синфазное напряжение, появляющееся на одном конце цепи при заземлении другого ее конца.

Здесь важная часть цепи была намеренно установлена в непосредственном контакте с вертикальным заземляющим проводником, по которому может протекать весь ток или часть тока молнии.

В действительности на большинстве приведенных на рис. 10.4, б схем приемная цепь имеет общее сопротивление с проводником для тока молнии, и, следовательно, располагается очень близко к нему. Однако значения наведенных напряжений могут быть близкими к значениям напряжений, показанным на рис. 10.4, а.

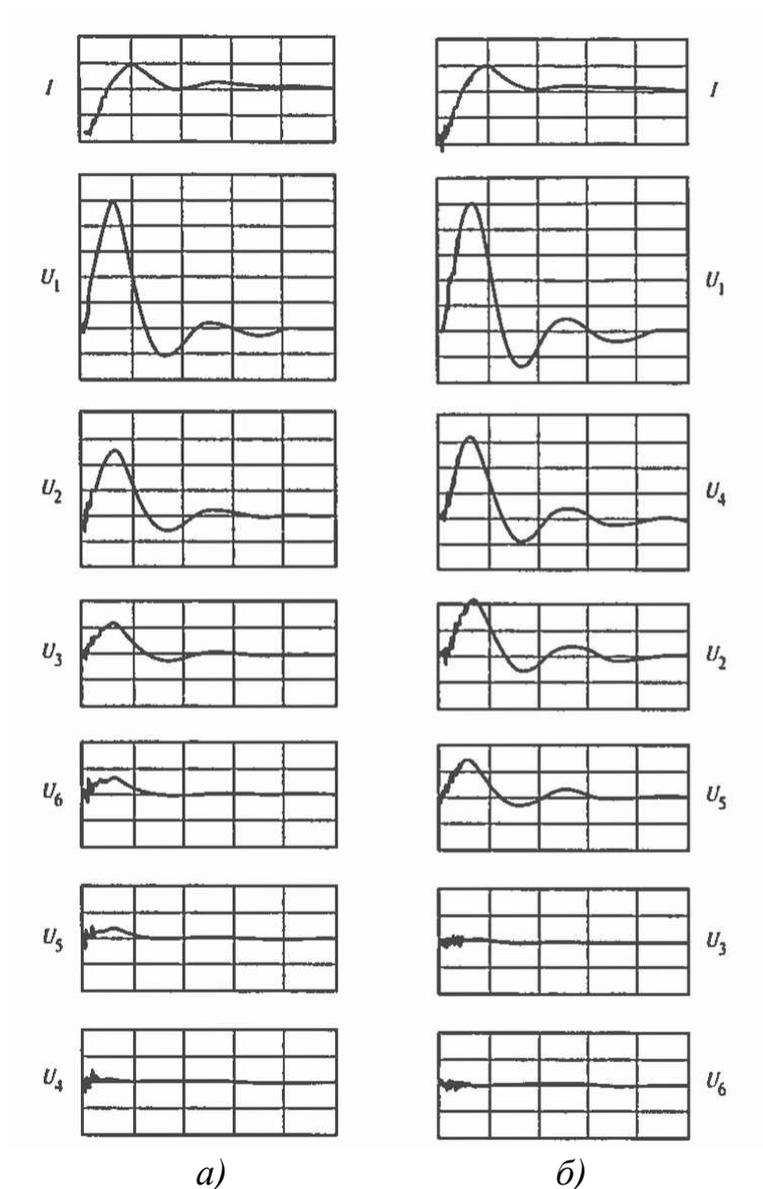


Рис. 10.5. Осциллограммы токов и напряжений в цепях, изображенных на рис. 10.4, а, б

Примеры осциллограмм токов и напряжений в схемах, показанных на рис. 10.4, а, б приведены на рис. 10.5 (масштаб времени — 0,5 мкс/дел.).

Из изложенного материала можно сделать следующий вывод. Если существует возможность избежать протекания больших токов в проводниках системы заземления, то ей следует воспользоваться. Иногда это невозможно, например при ударе молнии в антенну. В этих случаях приемлемым решением является создание для тока наилучшего (обладающего наименьшим сопротивлением) пути в землю

С учетом этого всегда применяется принцип прокладки чувствительных цепей вблизи заземленных элементов. Если существуют сомнения по поводу отсутствия сильных токов в заземленных элементах, рекомендуется прокладка цепей в индивидуальных экранах или трубах.

Применение параллельных заземленных проводов. Большое значение имеет передаточное сопротивление между электрической цепью и

заземленным проводом, включенным параллельно ей специально для снижения уровня помех.

Действие такого провода направлено на снижение уровня наведенного на кабель синфазного напряжения. Это снижение определяется передаточным сопротивлением провода Z_t по отношению к кабелю. Высокочастотная составляющая сопротивления сильно зависит от формы провода, и мало от площади поперечного сечения или свойств материала. На обоих концах провод следует подсоединять к тем заземленным элементам корпусов оборудования, которые имеют похожее передаточное сопротивление (примерно одинаковую с проводником форму).

На рис. 10.6 показаны примеры взаимного расположения параллельных заземленных проводов 1 и основного заземляющего провода 2.

Пример применения металлических труб в качестве параллельных заземленных проводников приведен на рис. 10.7. Такие решения могут быть реализованы на объектах энергетики, состояние заземляющего устройства которых вызывают сомнения.

Заметный эффект экранирования, достигаемый за счет прокладки проводов вблизи экранированного кабеля, зависит от относительного распределения токов помехи в обеих цепях. Для простого заземленного провода это распределение практически обратно пропорционально сопротивлениям обеих цепей. Это означает, что для эффективного действия эквивалентное поперечное сечение провода всегда должно быть больше общего сечения экранов всех кабелей. При этом необходимо учитывать поверхностный эффект.

По этой же причине лучше использовать большое число относительно тонких проводников вместо одного с равной площадью поперечного сечения.

Также очень важно отметить, что когда заземляющий провод оборудования (или экран кабеля) не располагается вблизи параллельного защитного провода, токи помехи разделятся между этим проводом и другими заземляющими проводами в соответствии с их индуктивностями. Отсюда следует, что соответствующие им площади поперечного сечения играют второстепенную роль, по крайней мере, на высоких частотах.

Другой важной особенностью параллельных заземляющих проводов является способность выполнять роль внешнего экрана триаксиального кабеля, внутренний экран которого в силу различных причин не может быть заземлен с обеих сторон.

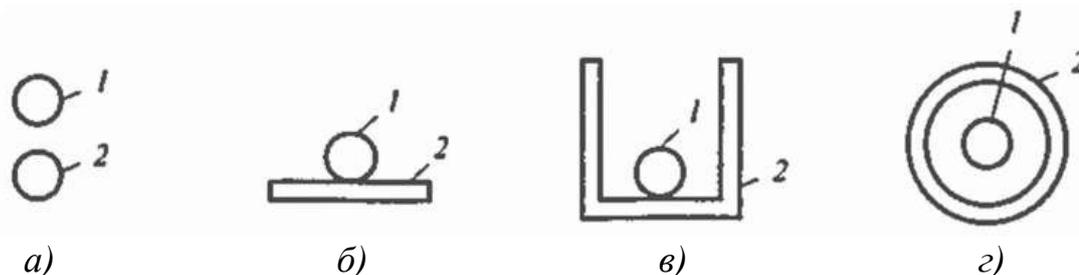


Рис. 10.6. Различные виды расположения параллельного заземленного провода 1 и основного заземляющего провода 2 в порядке увеличения эффективности действия:

а - рядом с проводом защитного заземления; б — многожильный заземленный проводник, проложенный в траншее или рядом с экраном другой цепи; в — в кабельном лотке; г — в металлической трубе

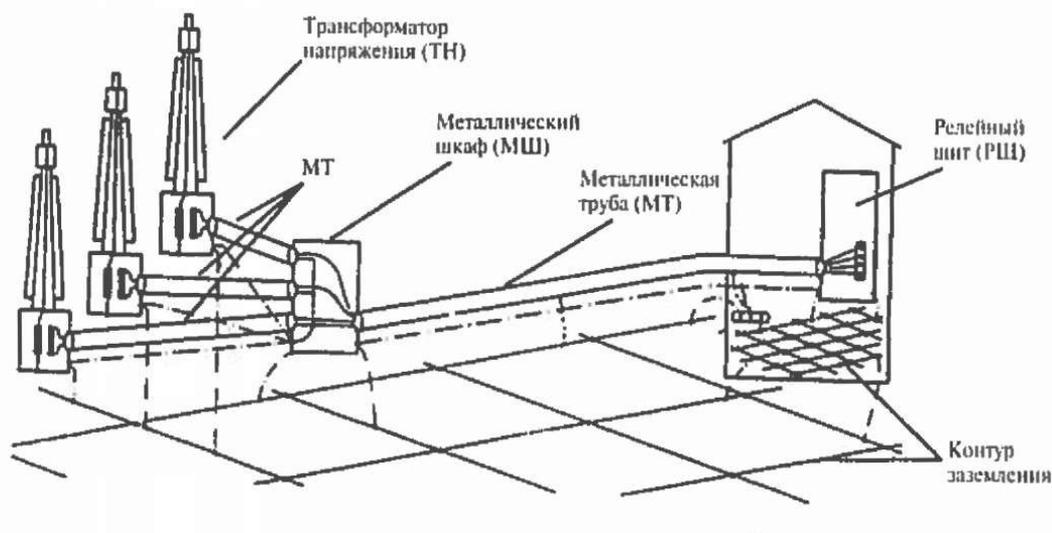


Рис. 10.7. Применение металлических труб в качестве параллельных заземленных проводников

10.3. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАЗЕМЛЕНИЙ НА ПОДСТАНЦИЯХ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Порядок выполнения заземления. Термин *сеть заземления* будем использовать для описания всех взаимосвязанных проводов, предназначенных для создания эквипотенциальной сети, а термин *заземление* или *контур заземления* применительно ко всем проводникам, находящимся в земле.

Заземляющее устройство предназначено для достижения следующих целей:

- создания небольшого сопротивления растекания;
- ограничения шагового напряжения и напряжения прикосновения;
- снижения синфазных ВЧ- и НЧ-помех.

Для достижения этих целей контур заземления должен быть многократно замкнутым и проходить по всей территории подстанции (ПС), включающей в себя оборудование высокого напряжения и все ее строения.

Сопротивление растекания многократно замкнутой сети с периметром p , проложенной в грунте с удельным сопротивлением ρ , может быть приближенно рассчитано по формуле $R=2\rho/p$.

Глубинные заземлители (вертикальные и наклонные прутья, трубы) могут использоваться для снижения сопротивления заземления на небольших ПС или там, где сопротивление земли с увеличением глубины снижается. Однако они редко используются в целях снижения уровня электромагнитных помех.

Заземлитель по возможности должен быть заглублен, по крайней мере, на 50 см, а лучше ниже глубины промерзания грунта. Поперечное сечение проводников определяется максимальным допустимым падением напряжения при протекании токов КЗ. Обычно допускаются падения напряжения в диапазоне 1-3 В/м. В целях обеспечения механической прочности сечение проводника не может быть меньше 25 мм² для многожильных медных проводников и 90 мм² для защищенной от коррозии стали. На практике обычно используются медные прутья сечением 150 мм².

Снижение наведенных напряжений требует создания контура с площадью ячейки сетки не более 250 м² при нормальном сопротивлении грунта ($\rho < 200$ Ом·м) и менее 150 м² при сопротивлении грунта, превышающем 1000 Ом·м.

Для снижения волнового сопротивления плотность сетки заземлителя должна быть повышена (например, до 5×5 м) вблизи оборудования высокого напряжения, особенно около силовых трансформаторов, емкостных трансформаторов напряжения, молниеотводов, опор линий электропередачи и других заземленных опорных конструкций, трансформаторов связи для систем передачи данных по ВЛ.

Оборудование высокого напряжения должно быть установлено вблизи узла сетки заземления и связано с ней, по крайней мере, двумя, а лучше четырьмя проводниками, при этом их сечение определяется токами частотой 50 (60) Гц.

Металлические основания оборудования высокого напряжения, шкафов управления, фундаменты зданий и другие металлические конструкции должны являться составной частью заземления.

Все заземляющие проводники должны иметь возможно меньшую длину. При заземлении предпочтение следует отдавать соединению при помощи нескольких проводников, отдаленных друг от друга на 10 см и более. В частности, силовые трансформаторы следует соединять с различными узлами сетки заземления при помощи нескольких проводов.

Следует избегать последовательного соединения заземляющих проводов различного оборудования.

Заземляющий проводник сечением не менее 50 мм² следует прокладывать в каждом кабельном канале или траншее и присоединять к заземляющему устройству на обоих концах, а если есть возможность, то и в нескольких других точках. Все проводники заземления должны соединяться в местах пересечения.

Если две подстанции или более располагаются вблизи друг друга (например, понижающая подстанция, подстанции с РУ различного напряжения) и если между ними производится обмен измерительными

сигналами, сигналами управления или связи, то их заземляющие устройства должны быть связаны, по крайней мере, двумя проводами, сечение которых определяется максимальным ожидаемым током частотой 50 (60) Гц между заземляющими устройствами подстанций.

Расстояние между этими проводами должно быть как можно большим. Кабельные каналы и траншеи следует прокладывать вблизи шин заземления (которые могут располагаться внутри траншеи), изготавливать их желательно из металла и при их монтаже заземлять с обоих концов.

Выполнение заземления зданий, содержащих электронное оборудование, должно преследовать цель создания общей плоскости нулевого потенциала. Для достижения этой цели шины заземления должны прокладываться вдоль стен комнат, желательно около пола. Сечение этих шин не особенно важно, но не должно быть меньше 50 мм^2 (для медного прута или полосы). Шины образуют замкнутую петлю, которая должна соединяться с заземлителем, по крайней мере, двумя проводами того же сечения, расположенными на наибольшем расстоянии друг от друга.

Шины следует присоединять к выводам заземления металлоконструкции и корпуса оборудования в пределах комнаты, к заземляющим проводникам, проложенным в кабельных траншеях, к экранам и свободным проводам кабелей, уходящих из комнаты.

Если несколько различных корпусов оборудования установлены в ряд, то от одной стены до другой должна быть проложена металлическая шина, объединяющая собой все указанное оборудование.

Каждая такая шина вносит свой вклад в создание многократно замкнутой сети, являющейся, в свою очередь, частью общей системы нулевого потенциала.

Связь корпусов с шиной должна выполняться как можно более короткой (менее 10 см). Для обеспечения ЭМС сечение проводника не важно. Достаточным является сечение от 4 до 16 мм^2 , его выбор зависит от значения токов, которые будут протекать по этим проводникам, при этом следует помнить, что установка четырех проводников сечением 4 мм^2 несомненно более предпочтительна, чем одного проводника сечением 16 мм^2 .

Использование металлических конструкций в качестве сети уравнивания потенциала. Для создания пространственной сети заземления следует объединять все несущие кабельные конструкции, лотки, стеллажи и каналы. Это означает, что для обеспечения ЭМС такое заземление корпусов оборудования или кабельных экранов более предпочтительно, чем связь с заземлителем или шиной оборудования при помощи единственного медного проводника.

Это значит, что шины заземления могут быть легко образованы из металлических конструкции, если требуемое общее эквивалентное сечение медного проводника превышает 50 мм^2 , а неизолированный медный проводник сечением 16 мм^2 , присоединенный к конструкции, обеспечивает электрическое соединение.

В принципе все рекомендации, сделанные для помещений релейных щитов, применимы и к зданиям щита управления. Однако наиболее важные щиты управления включают в себя несколько помещений с очень чувствительным оборудованием (например, компьютерами). Этот факт вызывает необходимость проведения некоторых специфических мероприятий при прокладке кабелей и, в особенности, заземления.

Хотя в данных условиях возможно создание смешанной сети заземления, особенно если здание имеет несколько этажей, но более простым и даже более эффективным оказывается создание цельной замкнутой сети, при этом шаг ячейки в помещениях с наиболее чувствительным оборудованием должен быть более частым.

Следует обращать особое внимание на прокладку кабелей и, в особенности, устройство заземления телекоммуникационных зданий, непосредственно примыкающих к опорным мачтам радиоантенн.

Существует, по крайней мере, три причины для подобного внимания:

- высокая вероятность поражения мачты молнией;
- большинство оборудования связи не удовлетворяет требованиям в части ЭМС, предъявляемым к оборудованию ПС высокого напряжения;
- использование широкополосных сигналов.

Все основные принципы выполнения заземлений, упомянутые ранее, остаются в силе, при этом особенно важна концепция построения трехмерной структуры нулевого потенциала.

Так как антенный фидер обычно входит в здание на уровне крыши, то рекомендуется устанавливать полосу заземления выше оборудования, над поверхностью потолка, вместо прокладки ее около пола (последний вариант рекомендуется в случае, если антенный фидер входит в здание на уровне земли).

Это означает, что все устройства для крепления кабелей должны размещаться на стенах вблизи потолка или на самом потолке, кабели должны прокладываться на том же уровне, попадать на различные стеллажи и вводиться в корпуса сверху.

При такой прокладке кабели образуют пучок (группу), свисают с потолка помещения и не имеют непосредственного контакта с полом.

Разделения подходящих к оборудованию кабелей на две части (заходящие сверху и снизу) следует избегать в любом случае, так как при такой прокладке образуются петли, которые могут как воспринимать, так и излучать сильные магнитные поля.

Принимая во внимание то, что токи молнии протекают с верхней части здания вниз, а для подключения радиоканалов используются коаксиальные кабели или волноводы с многократным заземлением, то единственным способом ослабить связь через общее сопротивление и индуктивную связь является прокладка вертикальных проводников заземления по углам здания вдали от оборудования.

По тем же причинам все кабели (в частности, коаксиальные), приходящие от антенн, и поддерживающие их конструкции, следует

заземлять прямо на входе в здание при помощи проводника сечением не менее 50 мм², прокладываемого по наружной стене здания и присоединенного к контуру заземления здания.

Все кабели, соединяющие здание связи с другими зданиями, следует вводить с той же стороны здания, что и кабели от мачты связи для того, чтобы избежать протекания токов молнии поперек здания.

Настойчиво рекомендуется избегать прокладки кабелей, проходящих от антенной мачты (например, коаксиальных кабелей, кабелей подогрева антенн и т.п.), и кабелей, трасса которых проходит внутри здания.

Обычно считается, что оборудование высокого напряжения и, в частности, система молниезащиты действуют и для оборудования низкого напряжения и зданий, расположенных в пределах подстанций высокого напряжения, поэтому нет необходимости устанавливать дополнительную защиту.

Однако необходимо проверять эффективность действующей защиты в соответствии с правилами, приведенными в общих руководящих указаниях и стандартах, касающихся молниезащиты.

По требованиям электробезопасности ограды никогда не присоединяются к контуру заземления подстанции, если существует вероятность одновременного прикосновения к ограде и оборудованию или элементам ПС. В этом случае контур заземления следует прокладывать и за пределами огороженной территории.

Цепи вторичной коммутации включают в себя кабели низкого напряжения, выполняющие на ПС высокого напряжения следующие функции:

- измерение токов и напряжений;
- управление оборудованием;
- индикация, связь;
- электроснабжение собственных нужд переменным и постоянным током.

Вторичные цепи следует располагать как можно дальше от источников возмущений. В частности, следует избегать прокладки параллельно с шинами высокого напряжения или вблизи них, вблизи емкостных трансформаторов напряжения и разрядников.

Кроме того, как уже упоминалось, необходима прокладка в каждой кабельной траншее заземляющего проводника сечением не менее 50 мм².

Все кабели, входящие и выходящие из здания, должны быть экранированы.

Экраны всех кабелей должны быть заземлены с обеих сторон, за исключением редко встречающихся на ПС кабелей, по которым передаются сигналы типа *2b* (согласно классификации, приведенной в табл. 7.6).

Заземление следует выполнять либо на щитках, либо на самом оборудовании, к которому присоединяется кабель. В первом случае рекомендуется устанавливать щитки параллельно стене вблизи места входа кабелей и присоединять экраны непосредственно к шине заземления.

Во втором случае, в настоящее время наиболее часто встречающемся на практике, экраны присоединяются к поверхностям с высокой проводимостью, например стенам шкафов, в месте входа кабелей. Длина проводника, соединяющего экран и корпус оборудования, должна быть наименьшей, причем наилучшим является присоединение экрана по окружности. Использование проводников длиной менее 10 см в большинстве случаев дает хороший результат.

Соединительные проводники должны обеспечивать непрерывность электрической цепи между кабелем и корпусом оборудования. Следует избегать использования для подключения заземляющих проводников одно- или двухштырьковых соединителей или фиксирующих устройств (замков, защелок).

Сечение проводников для заземления экрана кабеля должно быть эквивалентно сечению экрана.

В зависимости от вида используемого экрана кабеля могут быть получены различные значения передаточного сопротивления, приводящие к различным уровням синфазного напряжения для конкретной помехи.

На ПС высокого напряжения наиболее часто встречаются следующие виды экранов, приведенные в порядке убывания эффективности действия:

1) стальные ленты (броня), навитые в виде спирали без защитного покрытия и соединенные медными проволоками для повышения электрической проводимости. Ввиду малого шага повива коэффициент экранирования такой системы очень мал и зависит от толщины кабеля, при этом чем меньше его сечение, тем лучше экранирующее действие. На ПС высокого напряжения применение кабелей с такими экранами следует избегать;

2) стальная проволока, навиваемая спирально с шагом более 20 см. Эффективность действия такой системы немногим лучше, чем предыдущей. Применима на частотах до нескольких сотен килогерц. Может быть достигнут коэффициент экранирования 30—40 дБ, однако такие экраны не рекомендуются применять, в частности, на элегазовых подстанциях;

3) сплошной повив медной проволокой с большим продольным шагом, дополнительно покрытый на 50 % медной лентой, навитой в обратном направлении. Данный тип экрана может быть рекомендован, например, для экранирования кабелей, идущих от трансформаторов тока и напряжения;

4) одиночная или двойная оплетка с высоким коэффициентом заполнения (более 80 %). Иногда в дополнение к медной оплетке на жилы навивается пластиковая фольга с алюминиевым покрытием. При качественном выполнении оплетки может быть достигнут достаточно высокий коэффициент экранирования (более 40 дБ) даже при частотах выше нескольких мегагерц. Рекомендуется к применению на ПС высокого напряжения для любых цепей вторичной коммутации.

При прокладке в земле (кабельных траншеях) рекомендуется усиливать оплетку при помощи одной или двух медных (латунных) полос, навитых по

спирали. Такая операция повышает не только механическую прочность кабеля, но и его передаточное сопротивление;

5) экран из двух слоев медной ленты, навитых в противоположных направлениях с перекрытием. Вследствие хорошего заполнения и наличия двойного слоя коэффициент экранирования остается высоким даже при частотах выше 10 МГц. Однако относительная жесткость конструкции ограничивает ее применение в случаях, требующих использования кабелей малого размера, например кабелей связи;

6) сплошной экран, образованный обычной металлической трубой (из свинца или меди). Для достижения большей гибкости медные экраны обычно гофрируются. Сплошные экраны обеспечивают наилучшую эффективность, особенно на высоких частотах, что приводит к уменьшению противофазной помехи до нескольких десятков вольт. Рекомендуются к использованию в любых условиях, в том числе на элегазовых подстанциях;

7) многослойные экраны. Используются либо для достижения эффекта на низких частотах при очень низких передаточных сопротивлениях (экраны, содержащие магнитные материалы) или для получения триаксиальной системы, позволяющей одновременно выполнить несколько видов заземления экранов (например, внутренний экран заземлить на одном конце, внешний на другом).

Все сочетания рекомендованных выше конфигурации экранов, например экраны, выполненные на основе медной проволоки или лент, усиленных стальными лентами, несомненно, повысят общую эффективность экранирования.

В частности, сочетание хорошо экранированного кабеля и электрически непрерывного U - образного кабельного лотка может обеспечить получение коэффициента экранирования 60 дБ и даже более, при этом создается практически непреодолимый для помех путь при прокладке кабелей, передающих сигналы практически любого типа.

Следует указать, что в отличие от электростанций, количество кабелей на ПС высокого напряжения относительно невелико и в будущем, вероятно, уменьшится с появлением локальных вычислительных устройств и систем уплотнения.

Однако вследствие близости оборудования высокого напряжения и высокой вероятности поражения молнией, электромагнитная обстановка на ПС обычно более сложная, чем на электростанциях. Поэтому большее внимание следует обращать на качество прокладки кабелей (т.е. их экранирование) на ПС высокого напряжения, чем на электростанциях. Другими словами, польза от качественного выполнения экранов кабелей более существенна на ПС, чем на электростанциях.

Кабели, не выходящие за пределы здания, могут быть не экранированы, за исключением кабелей, по которым передаются широкополосные сигналы связи (при полосе пропускания $\Delta f > 4$ кГц или скорости более 20 кбод), аналоговые сигналы низкого уровня (при измерениях температуры и т.п.).

Минимальный уровень электрической прочности изоляции между жилой и экраном зависит от многих факторов, однако испытательное напряжение должно быть не менее 1000 В при частоте 50 (60) Гц.

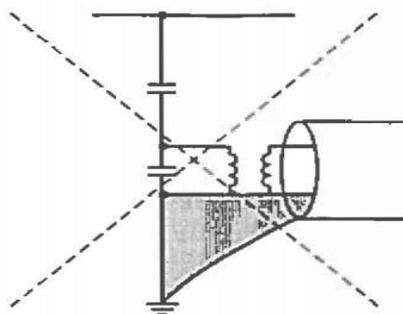
Как уже отмечалось, следует следить за тем, чтобы в одном кабеле (пучке неэкранированных кабелей) никогда не прокладывались цепи, по которым передаются сигналы различных типов.

То же самое правило относится к цепям, разделенным помехозащищающим устройством. Примером являются входные и выходные цепи фильтров или изолирующих трансформаторов.

Следует обращать особое внимание на кабели, соединяющие ТТ и ТН с релейными щитами, так как они относятся к тем цепям, которые подключаются непосредственно к оборудованию высокого напряжения. Даже если это соединение осуществляется через понижающий трансформатор, ситуация такова, что коэффициент трансформации определяется только для промышленной частоты. Реальное изменение как для синфазных, так и противофазных сигналов на высокой частоте мало зависит от коэффициента трансформации и сильно различается даже для трансформаторов одного типа.

Из соображений безопасности вторичные цепи должны быть заземлены около оборудования высокого напряжения. Во избежание образования петли между нулевым и заземляющим проводами экран измерительного кабеля следует соединять с корпусом трансформатора, а не отдельным проводом непосредственно к контуру заземления (рис. 10.8).

Связь между трансформаторами и релейным щитом могут выполняться отдельными двухжильными кабелями для каждой фазы или двумя четырехжильными кабелями — один для токовых цепей, другой — для цепей напряжения.



a)

б)

Рис. 10.8. Неправильное (а) и правильное (б) заземление экрана кабеля емкостного трансформатора напряжения

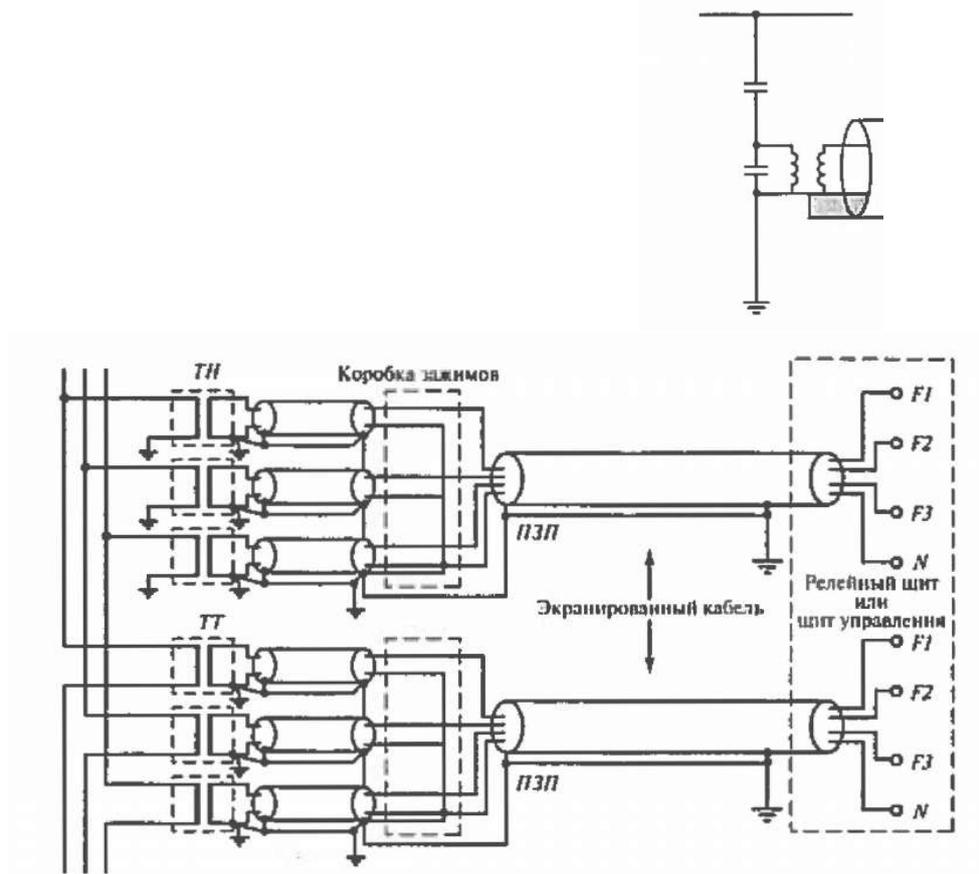


Рис. 10.9. Заземление вторичных цепей ТТ и ТН и кабелей, связывающих их с релейным щитом

В последнем случае установка колодки зажимов вблизи трансформатора позволяет выполнить соединение к заземлению различных нулевых проводников, как показано на рис. 10.9.

Нулевые проводники и экраны кабелей, входящих в коробку зажимов, присоединяются к корпусу коробки, которая в свою очередь, заземляется.

Подобное двойное заземление нулевого проводника (на трансформаторе и в коробке зажимов) оказывает очень небольшое влияние на уровень синфазных помех вследствие очень небольшой длины двухжильных кабелей между трансформатором и коробкой зажимов.

Повторное заземление нулевых проводников на релейном щите не допускается ни при каких условиях.

Иногда следует опасаться появления двойного заземления в случае, когда два измерительных трансформатора присоединены к одному и тому же оборудованию (например, цепи синхронизации). В этом случае необходима установка разделительных трансформаторов.

В любом случае настоятельно рекомендуется включать параллельно каждому двухжильному кабелю заземленный проводник сечением не менее 50 мм^2 .

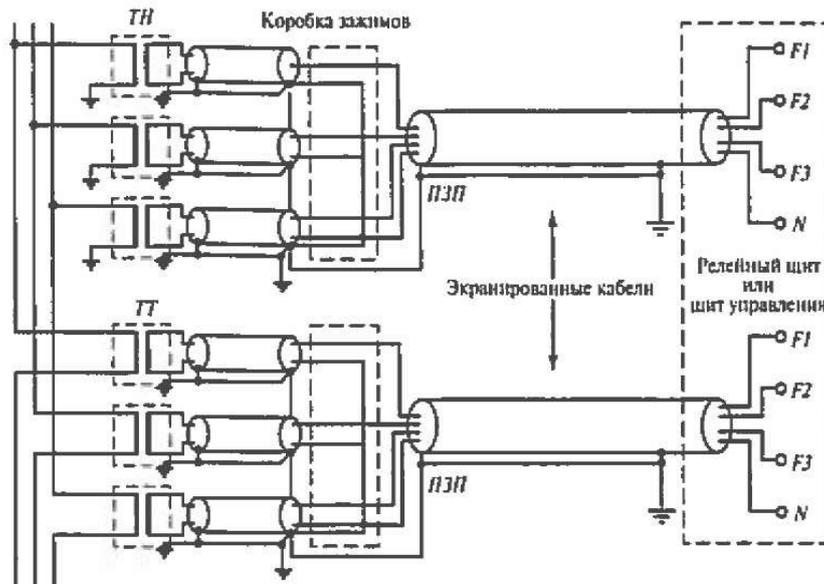


Рис. 10.10. Схема вторичных цепей ТТ и ТН, модифицированная в целях снижения появляющихся при переходных процессах противофазных помех

Если по условиям электробезопасности не требуется иного, то заземление нулевого проводника в одной точке, например, только в распределительной коробке предпочтительнее, так как напряжения помехи будут меньше (рис. 10.10).

Экранирование зданий. Необходимость экранирования строительных конструкций может возникнуть в случаях, когда требуется защитить установленное внутри здания очень чувствительное оборудование, например компьютеры или оборудование связи.

Основными источниками возмущений, наличие которых вероятно может оправдать создание глобальных экранов, являются на высоких частотах излучение, вызванное током молнии и коммутациями в Цепях высокого напряжения, и на низких частотах значительные магнитные поля вблизи ВЛ высокого напряжения и ошиновки, способные оказать влияние на чувствительное к помехам оборудование.

Выполнить экранирование от высокочастотного излучения относительно просто, если требуется достичь разумной эффективности экранирования (см. гл. 8). Достижение очень высокой степени экранирования совершенно не оправдано, так как достаточно много помех проникает в здание через кабели.

Одним из наиболее простых и дешевых способов экранирования от ВЧ-помех — это закладка в стены здания сетки из стальных прутьев (диаметром около 5 мм) с шагом 10-15 см, причем каждый прут на концах и на пересечениях присоединяется к соседним.

При подобном выполнении может быть достигнут коэффициент затухания магнитного поля от 15 до 30 дБ в диапазоне частот от 10 кГц до 30

МГц; он зависит от качества выполнения соединений между прутьями, между прутьями и металлоконструкциями и наличия строительных проемов (окон, дверей и т.п.).

Другой дешевый способ экранирования на ВЧ — это создание сетки из тонкой проволоки.

Обеспечить необходимое для нормальной работы мониторов затухание магнитных полей промышленной частоты, несомненно, более трудно. Применение стальных решеток, указанных выше, обеспечит затухание до нескольких децибелл. Использование стальных пластин или листов более эффективно, но весьма сложно. Коэффициент экранирования пропорционален толщине листа и квадратному корню из магнитной проницаемости материала. При использовании стального листа толщиной 2,5 мм с магнитной проницаемостью около 1000, образующего непрерывную магнитную цепь вокруг источника или приемника помех, можно достигнуть коэффициента затухания от 10 до 20 дБ. Если магнитная цепь не замкнута, ее магнитное сопротивление остается значительным, а значение коэффициента затухания редко превышает 10 дБ.

Значительное улучшение экранирующих свойств может быть достигнуто при применении стали с ориентированной внутренней структурой (подобно применяемой в трансформаторах).

Однако, вследствие наведения вихревых токов также возможно достичь приемлемого экранирования при помощи алюминиевых или медных пластин.

При одинаковой толщине пластин более эффективно применять сталь для создания экранов в непосредственной близости от защищаемого оборудования, в то время как использование алюминия более эффективно на больших расстояниях (например, несколько метров).

Использование сплавов с высокой магнитной проницаемостью позволяет получить очень большие коэффициенты экранирования, однако высокая стоимость ограничивает их применение для защиты небольшого оборудования.

Если источником возмущения является ошиновка, то лучшим методом подавления помех является увеличение расстояния между источником и приемником помех или уменьшение расстояния между проводами различных фаз.

Подстанции с элегазовой изоляцией. Все принципы прокладки кабелей, рассмотренные ранее, могут быть применены и на элегазовых подстанциях, однако вследствие наличия на них более сложной электромагнитной обстановки эти меры должны быть усилены.

В частности, большое значение имеет создание хорошей эквипотенциальной сети заземления или общей поверхности нулевого потенциала.

Поверхность нулевого потенциала может представлять собой непрерывную стальную сетку, залитую бетоном, сетку или металлические пластины, расположенные на одном или нескольких уровнях.

Стальные прутья, внедренные в армированный бетон, могут быть использованы для создания такой поверхности и даже образовывать основу для ее создания, если размер ячейки не превышает 5×5 м. Сеть заземления, образованная при соединении такой поверхности нулевого потенциала с классическим контуром защитного заземления должна иметь размер ячейки не более 2×2 м.

Все металлические корпуса должны заземляться, по крайней мере, в двух точках; в частности, кабельные лотки и кабельные эстакады из проводящих материалов должны заземляться на обоих концах и каждый раз, когда они пересекают другие металлические элементы.

Сам корпус элегазовой подстанции надо присоединять к сети заземления у основания каждой опоры (кронштейна). Данные соединения должны иметь очень небольшую длину и по возможности выполняться при помощи трех-четырех проводов.

В местах соединения с ВЛ металлический корпус элегазовой подстанции должен быть электрически соединен с поверхностью опорного потенциала при помощи металлических пластин площадью несколько квадратных метров (имеющих низкое сопротивление). Корпуса оборудования подстанции, имеющие трубчатую форму, присоединяются к пластине при помощи шести-восьми перемычек, равномерно распределенных по его периметру.

Экраны кабелей высокого напряжения и вторичных цепей, входящих в элегазовую подстанцию, могут быть присоединены или не присоединены к местному контуру заземления.

Единственный способ избежать появления помех значительного уровня - это коаксиально присоединить экран кабеля к корпусу подстанции. Если этого не сделать, т.е. если кабельные экраны присоединены только к контуру заземления, то разность потенциалов между экраном и корпусом может составить многие десятки киловольт и могут произойти перекрытия изоляции.

Наличие одновитковых трансформаторов тока (надеваемых на кабель) или необходимость выполнения соединения разъемным иногда влечет за собой невозможность коаксиального соединения. В этих случаях соединение следует выполнить при помощи минимум четырех коротких проводников, равномерно распределенных по окружности. Но даже в этом случае существует вероятность перекрытия, если расстояние между выводами экрана и корпусом меньше 10 см.

Для того чтобы избежать неконтролируемых разрядов, рекомендуется устанавливать на кабель кольцо (цилиндрический искровой разрядник, изображенный на рис. 10.11) с зазором между кольцом и корпусом примерно 2-5 мм.

Подобная конструкция работает как фильтр высоких частот и пропускает разряды низкой энергии (составляющие 50/60 Гц проходят через внешнее коаксиальное соединение), не оказывая практически никакого влияния на общий уровень помех.

При необходимости можно достичь полного подавления искрения при помощи шунтирования промежутка сопротивлением в несколько Ом.

Если экраны кабелей не присоединяются к местному заземлителю, то появляется необходимость установки по периметру места соединения между экраном и корпусом устройств защиты от перенапряжения (например, варисторов, конденсаторов или резисторов). Данное решение также применимо для развязывающих изолированных соединительных муфт в металлическом корпусе. Во всех случаях соединения с шунтирующими элементами должны быть как можно более короткими.

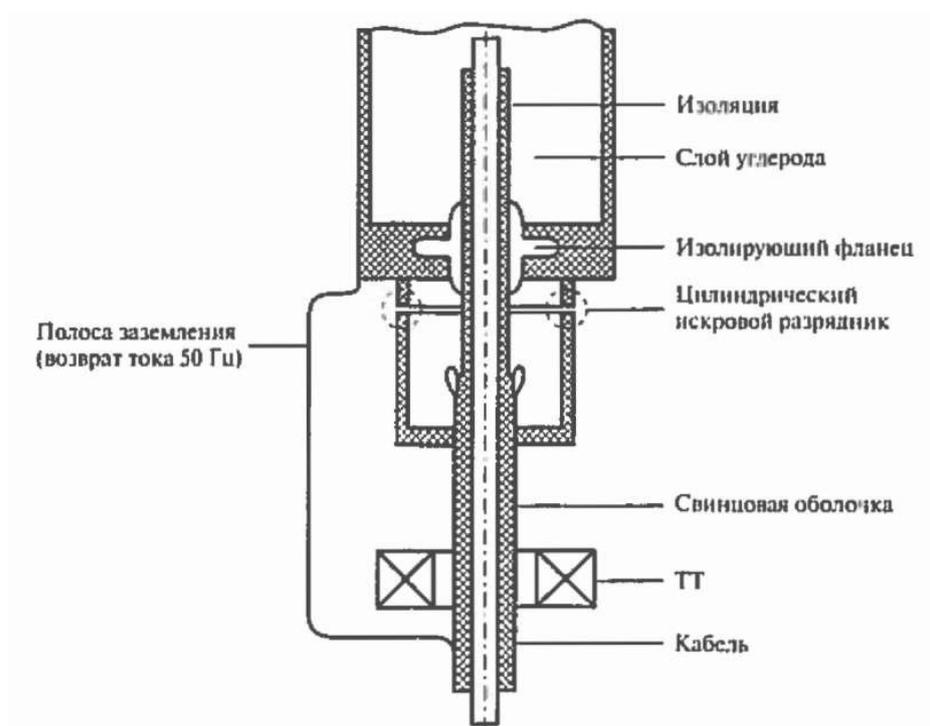


Рис. 10.11. Переход кабеля в злегазовую подстанцию с установкой трансформатора тока (показана только одна из фаз)

Как уже отмечалось, высококачественные экранированные кабели должны эксплуатироваться с экранами, заземленными соосно (по периметру) на обоих его концах. Следует внимательно относиться к выбору трассы прокладки таких кабелей. По всей трассе кабели должны прокладываться в надежно заземленных металлоконструкциях.

Помехозаграждение. Кроме общих методов выполнения экранов и прокладки кабелей, описанных ранее, иногда возникает необходимость использования заграждений для снижения уровня помех ниже некоторого приемлемого уровня, определяемого помехоустойчивостью или, что более вероятно, электрической прочностью оборудования.

Обычно это происходит тогда, когда приемные цепи проходят через границу зон с различной электромагнитной обстановкой.

Заграждающие устройства могут выполнять следующие функции: гальваническое разделение, ограничение перенапряжений и фильтрацию.

Гальваническое разделение. Приведем элементы, наиболее часто используемые для гальванического разделения цепей:

- электромагнитные и статические реле, возможности которых обычно ограничены переключениями между состояниями включено/выключено при очень низких частотах (50/60 Гц) с уровнем изоляции не более 2 кВ;

- оптроны, широко распространенные и используемые как в сочетании с электронными цепями, так и отдельно. Они позволяют осуществлять передачу сигналов частотой до нескольких мегагерц в устройствах с уровнем изоляции до 5 кВ. Паразитные емкости между входом и выходом оптрона (порядка нескольких пикофард) на высоких частотах могут значительно ограничить коэффициент снижения синфазной помехи, однако в настоящее время разработаны специальные конструкции, в состав которых входит экран между входом и выходом устройства;

- разделительные трансформаторы, часто используемые как симметричный барьер, который легко может быть добавлен к существующей цепи без специальной подготовки, и обычно не требующие подачи питания на свой выход. При помощи таких трансформаторов могут передаваться сигналы частотой от единиц герц до нескольких мегагерц, при этом уровень изоляции достигает 20 кВ и выше. Паразитные емкости между обмотками трансформатора значительно больше, чем у оптрона (до нескольких сотен пикофард), но также могут быть значительно снижены при помощи заземленных экранов. Большинство разделительных трансформаторов имеют обмотки с выводом средней точки и поэтому могут обеспечить выполнение заземления цепей, наряду с такими возможностями как электропитание симметричных цепей. Этот факт имеет большое значение в случаях, когда требуется снижение синфазных напряжений или противофазных напряжений промышленной частоты. Кроме того, если оборудование связи имеет значительное синфазное сопротивление, то паразитные емкости трансформатора могут вызывать появление перекрытий между его выводами и заземленными элементами, В этом случае возникает необходимость заземления средней точки обмотки на стороне оборудования непосредственно или через устройство защиты от перенапряжений;

- волоконно-оптические системы, несомненно, являются наилучшим барьером на пути помех всех типов. Однако если они не используются для передачи уплотненной информации (например, в локальных вычислительных сетях), то относительно высокая (с учетом окончного оборудования) стоимость ограничивает их применение в сложных системах, требующих широкополосных каналов передачи (например, для дифференциальных цифровых защит или защит удаленных объектов). Некоторые наиболее дешевые виды оптоволокна (пластиковые) могут представлять большой интерес для применения в качестве НЧ-каналов передачи данных на небольшие расстояния в случаях, когда требуется очень

высокий уровень прочности изоляции (например, телефонные цепи, выходящие за пределы ПС высокого напряжения, датчики на оборудовании высокого напряжения и т.п.).

Иногда возникает необходимость применения оборудования, сочетающего в себе различные типы гальванической развязки, такие как разделительные трансформаторы и реле или оптроны, или даже оптоволоконно. Примером могут служить телефонные цепи с вызовом по постоянному току.

Защита от перенапряжений. Понятие устройство защиты от перенапряжений отличается от гальванической развязки тем, что в срабатывании защиты ток отводится в землю и электрические характеристики передаваемого сигнала искажаются на время появления помехи (это может быть ограничение уровня напряжения, изменение сопротивления источника или даже КЗ).

Более того, если отводимый в землю ток помехи достаточно велик, то могут возникнуть проблемы в каких-либо других Цепях вследствие связи через общее сопротивление или из-за скачка потенциала заземлителя.

По указанным причинам защита от перенапряжении может быть применена только в тех цепях, сигналы которых допускают искажения во время возмущений. Применение подобных устройств в цепях сигналов защиты в нормальных условиях недопустимо.

Устройства защиты от перенапряжений обычно делятся на три типа (применяемые отдельно или в комбинации друг с другом): разрядники, металлооксидные варисторы (нелинейные сопротивления), лавинные диоды.

В приведенной ниже табл. 10.1 обобщаются основные характеристики этих трех типов составных элементов.

Газонаполненные разрядники (грубая защита) используются в схемах, требующих защиты от очень мощных возмущении (вызванных ударами молнии или КЗ в силовых цепях). Их минимальное статическое напряжение пробоя обычно составляет 90-300 В, в то время как динамическое напряжение перекрытия при крутизне фронта 1 кВ/мкс обычно превышает 500 В.

Из-за значительного уровня импульсных перенапряжений и больших сопровождающих токов КЗ, устанавливать такие устройства внутри оборудования не рекомендуется. Наилучшие результаты дает применение в качестве первичного средства защиты всей установки в месте входа кабелей в здание (помещение).

Таблица 10.1. Основные характеристики устройств, используемых для защиты от перенапряжений

Характеристика	Газонаполненный разрядник	Варистор	Лавинный диод
Способность выдерживать большие токи	Высокая	Средняя	Низкая
Постоянная времени срабатывания, с	$\sim 10^{-7}$	$\sim 10^{-8}$	$\sim 10^{-9}$

Защитный уровень	Высокий (зависит от формы импульса)	Любой (зависит от тока)	Любой
Отношение защитного уровня к напряжению срабатывания при медленном подъеме напряжения	>1	$=1$	$=1$
Емкость	Очень мала	Большая	Средняя
Ток утечки	Нет	Есть	Нет
Старение	Невелико	Есть	Нет

Преимущество варисторов по сравнению с газовыми разрядниками состоит в том, что при их срабатывании цепь не закорачивается. Поэтому они широко используются, особенно в цепях электропитания. Однако большая емкость устройств ограничивает их применение в некоторых ВЧ-цепях.

Лавинные диоды не способны пропускать значительные токи, однако их напряжение срабатывания может быть очень низким и не зависит от тока. Поэтому они используются главным образом в качестве подавителей помех (тонкая защита) непосредственно на входах оборудования или защищаемых цепей.

Совместное применение разрядника и подавителя помех. Необходимость защиты чувствительного оборудования от перенапряжений вызывает необходимость применения многоступенчатых схем защиты, в которых ступень грубой защиты (разрядник) устанавливается на входе в здание для отвода тока (выравнивания потенциала), а ограничение перенапряжений осуществляется ступенями тонкой защиты (подробнее см. гл. 11).

В такой схеме для достижения цели параметры ступеней и места их установки должны быть скоординированы.

При координации следует учитывать соотношение между напряжениями срабатывания элементов, времена срабатывания и рассеиваемые энергии устройств, а также сопротивления проводов между ними и форму воздействующего импульса. Решение данной задачи достаточно сложно.

Фильтры. Основная идея использования фильтров состоит в том, чтобы полоса пропускания цепи не превышала частотный диапазон, используемый при передаче сигнала. Большинство проблем ЭМС возникают вследствие проникновения помех в оборудование через цепи и порты связи, чья полоса пропускания ничем не ограничена, а также через цепи электропитания.

Наиболее известным типом фильтра является фильтр низких частот, устанавливаемый в цепях питания большинства электронных устройств.

Данные фильтры обычно выполняют две функции: подавление противофазных и синфазных помех.

Первая функция легко выполнима (она напрямую характеризуется передаточными характеристиками фильтра), в то время как выполнение второй функции связано со сложностями, так как сильно зависит от способа установки фильтра и подключения его к оборудованию.

Единственным способом обеспечения правильного снижения синфазных помех — это установка фильтра непосредственно на входе кабеля в оборудование (или на раму, или на стойку, где установлено оборудование) и выполнение заземления при помощи непосредственного контакта между (металлическим) корпусом фильтра и рамой, а не при помощи провода заземления.

Качество фильтра оценивают, прежде всего, по амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) или по частоте и крутизне среза, коэффициенту пропускания в полосе прозрачности. По виду АЧХ различают кроме фильтров низких частот (ФНЧ) полосовые (ПФ), режекторные (РФ) фильтры и высоких частот (ФВЧ) (рис. 10.12).

Частота среза f_{cp} определяется на некотором уровне, например 0,9 максимального значения коэффициента пропускания. Крутизну среза определяют в децибелах при двойном отклонении от частоты среза ($0,5f_{cp}$ для ФВЧ и $2f_{cp}$ для ФНЧ), которое называют октавой. Например, ФНЧ, имеющий $f_{cp} = 1000$ Гц и крутизну среза $\alpha_{cp} = 20$ дБ. октава на частоте 500 Гц имеет коэффициент пропускания в 10 раз меньше, чем на частоте 2000 Гц.

Для полосовых фильтров задают верхнюю и нижнюю частоты среза, для режекторных — центральную частоту f_0 .

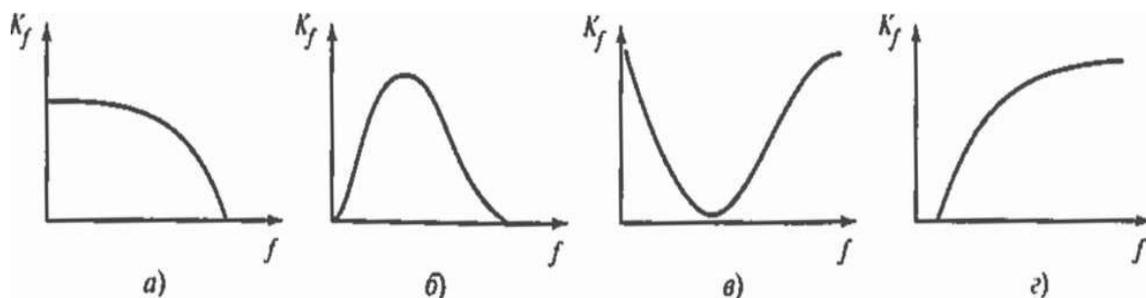


Рис. 10.12. Амплитудно-частотные характеристики фильтров:

a - ФНЧ; *б* - ПФ; *в* - РФ; *г* - ФВЧ

Все фильтры по исполнению делятся на две большие группы: пассивные и активные. Пассивные собираются из пассивных элементов - резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности. В активных фильтрах наряду с упомянутыми элементами используются также полупроводниковые приборы, микросхемы с источниками питания. Активные фильтры, в свою очередь, делятся на аналоговые и цифровые. Достоинством активных фильтров по сравнению с пассивными является большая крутизна среза и больший коэффициент пропускания в полосе прозрачности, высокое входное

и низкое выходное сопротивление. Во вторичных цепях подстанционного оборудования для защиты от помех в сети используют ФНЧ (табл. 10.2) и ПФ, в каналах телемеханики и связи чаще встречаются ПФ (заградительные фильтры на шинах и настроенные узкополосные фильтры присоединения к конденсаторам связи, входные фильтры в приемниках).

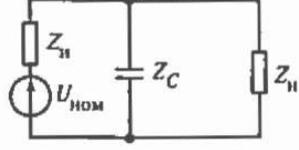
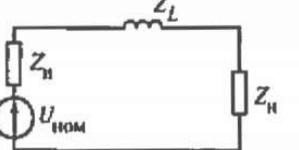
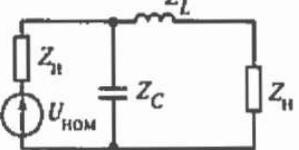
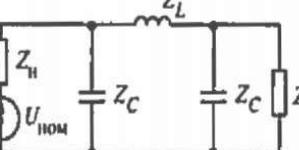
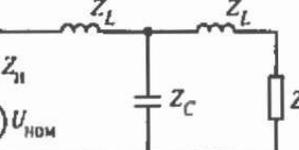
Принято составляющие элементы фильтров (емкости и индуктивности), как и сами фильтры, называть помехоподавляющими или защитными. Применение в качестве фильтра только одной емкости или индуктивности имеет смысл лишь в некоторых случаях. Блокировка сети электропитания емкостью эффективна тогда, когда внутреннее сопротивление источника помех и сети велико. Защита с помощью индуктивности может иметь место в другом случае, когда внутреннее сопротивление источника помех а сети мало. Г-образный фильтр с емкостным входом применяется, когда внутреннее сопротивление источника помех велико, а сопротивление сети мало. Г-образный фильтр с индуктивным входом целесообразно использовать в обратных ситуациях. Наибольшее распространение для фильтрации цепей получили П-образные индуктивно-емкостные фильтры, поскольку они при прочих практически равных показателях оказываются менее сложными по конструкции и обеспечивают достаточно высокое затухание помех.

Помехоподавляющие конденсаторы. Полное сопротивление конденсатора в широком диапазоне частот определяется не только его емкостью, но и индуктивностью его выводных проводников. Эквивалентная схема конденсатора может быть представлена в виде последовательного LRC-контура. Таким образом, каждый конденсатор имеет определенную резонансную частоту, выше которой его полное сопротивление определяется уже не емкостью, а его собственной индуктивностью. Для расширения диапазона частот, в котором полное сопротивление конденсатора не превышало бы определенного значения, необходимо уменьшить собственную индуктивность конденсатора. Кроме того, к конденсаторам, в зависимости от условий их работы, предъявляются требования в отношении влагостойкости, теплостойкости, электрической и механической прочности и т.п.

Отечественной промышленностью выпускаются специальные помехоподавляющие конденсаторы типа КЗ. Эти конденсаторы имеют собственную индуктивность меньше $50 \cdot 10^{-9}$ Гн.

Таблица 10.2. **Основные типы фильтров и оценки вносимого затухания**

Эквивалентная схема фильтра	Наименование фильтра и коэффициент B_C подавления помех
-----------------------------	---

	<p>Емкостной фильтр</p> $B_C = \frac{Z_H}{Z_H + Z_H} \cdot \frac{Z_H}{Z_C}$ <p>при $Z_H \ll Z_H$ $B_C \approx Z_H / Z_C$</p>
	<p>Индуктивный фильтр</p> $B_L = \frac{Z_H}{Z_H + Z_H} \cdot \frac{Z_H}{Z_C}$ <p>при $Z_H \ll Z_H$ $B_L \approx Z_L / Z_H$</p>
	<p>Г-образный CL-фильтр</p> $B_{CL}^\Gamma = \frac{Z_H}{Z_H + Z_H} \cdot \frac{Z_H}{Z_C} \cdot \frac{Z_L}{Z_H} \approx \frac{Z_H + Z_H}{Z_H} B_C B_L$ <p>при $Z_H \ll Z_H$ $B_{CL}^\Gamma = B_C B_L$</p>
	<p>П-образный CL-фильтр</p> $B_{CL}^\Pi = \frac{Z_H}{Z_H + Z_H} \cdot \frac{Z_H}{Z_C} \cdot \frac{Z_L}{Z_C} \approx \frac{Z_H + Z_H}{Z_H} B_C B_{CL}^\Gamma$ <p>при $Z_H \ll Z_H$ $B_{CL}^\Pi = B_{CL}^\Gamma B_C$</p>
	<p>Т-образный LC-фильтр</p> $B_{LC}^T = \frac{Z_H}{Z_H + Z_H} \cdot \frac{Z_L}{Z_H} \cdot \frac{Z_L}{Z_C} \approx \frac{Z_H + Z_H}{Z_H} B_{LC}^\Gamma B_L$ <p>при $Z_H \ll Z_H$ $B_{LC}^T = B_{LC}^\Gamma B_L$</p>

Однако в ряде случаев ввиду недостаточно широкой номенклатуры конденсаторов типа КЗ, а также из-за ограничений по массе и габаритам приходится применять обычные конденсаторы. Из них для фильтрации помехонесущих сетей рекомендуется применять конденсаторы типов КСО и КБГ и др.

Если обычные конденсаторы применяются в цепи переменного тока, то необходимо учитывать, что их номинальное рабочее напряжение указано только для постоянного тока. Применение конденсаторов типа КЗ и обычных конденсаторов ограничено частотами 10-20 МГц. При более высоких частотах их использование, как правило, малоэффективно. Схемы некоторых фильтров и формулы для определения коэффициента подавления помех приведены в табл. 10.2.

Для подавления помех в области частот выше 10-20 МГц рекомендуется применять *проходные конденсаторы*. Эти конденсаторы (например, типа КБП) имеют ряд особенностей, на которых следует остановиться подробнее.

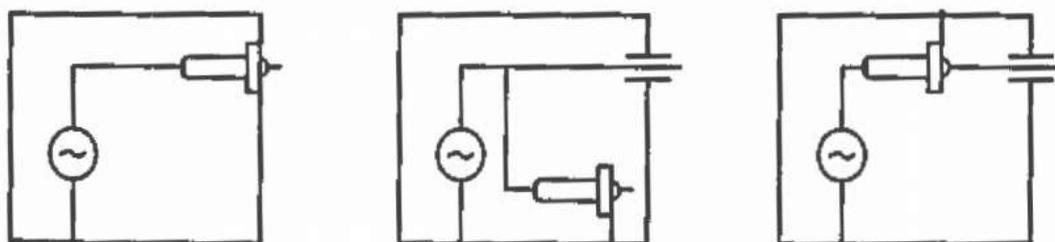
Проходной конденсатор по конструкции существенно отличается от обычного. Токонесущий стержень проходит сквозь корпус конденсатора и изолируется от него при помощи фарфоровых или стеклянных изоляторов.

Один торец секции припаян к токонесущему стержню, а другой по всему периметру — к корпусу, который является одним из выводов конденсатора. Для характеристики проходного конденсатора вводится параметр, равный отношению выходного напряжения (при отсутствии нагрузки на выходе) к входному току и, следовательно, имеющий размерность сопротивления.

Помехоподавляющие свойства проходного конденсатора очень существенно зависят от его размещения и способа крепления. Проходной конденсатор размещают так, чтобы входная и выходная цепи были эффективно экранированы, он должен устанавливаться на плоскости экрана, разделяющего входную и выходную цепи (рис. 10.13).

Высокие помехоподавляющие свойства проходного конденсатора в области частот выше рабочей могут быть достигнуты только при правильном его креплении, т.е. при линейном или многоточечном контакте его корпуса с экраном по всему периметру корпуса. Для крепления к экрану на корпусе проходного конденсатора имеется фланец, резьба или скоба. Проходные конденсаторы предназначены для работы в цепях постоянного или переменного тока промышленной частоты. Конденсаторы с креплением на резьбе выпускаются на рабочий ток до 10 А и номинальные напряжения постоянного тока 126, 250 и 500 В, что соответствует 50, 127 и 220 В переменного тока, их номинальные емкости находятся в пределах 0,022-0,1 мкФ. Конденсаторы с креплением фланцем и скобой выпускаются на номинальные напряжения 125-1600 В постоянного тока, что соответствует 50-500 В переменного тока, на рабочий ток 20, 40 и 70 А и емкостью 0,022-2,0 мкФ. В зависимости от номинального напряжения и емкости корпус конденсаторов типа КБП имеет диаметр 14-40 мм и длину 55-126 мм.

Помехоподавляющие катушки индуктивностей могут использоваться как в качестве самостоятельных устройств фильтрации, так и в виде составных частей фильтра. Они устанавливаются непосредственно на источнике помех или вблизи него и в фильтрах нижних частот включаются последовательно в провод, по которому распространяются помехи. Качеством катушки в значительной степени определяются достоинства фильтра.



Правильно

Неправильно

Рис. 10.13. Примеры установки проходного конденсатора

Характерной особенностью работы катушек индуктивностей защитных фильтров является то, что они должны обладать достаточно большим сопротивлением в широком диапазоне частот. Однако для выполнения этого

требования на низких частотах необходимо делать катушки со значительной индуктивностью и большим числом витков, в результате чего возрастает собственная емкость катушек, уменьшающая их сопротивление на высоких частотах. Применение секционированных обмоток в катушках снижает их собственную емкость, но уменьшает и индуктивность. Таким образом, следует искать компромиссное решение. Во избежание потерь надо стремиться к тому, чтобы активное сопротивление катушки было минимальным.

При конструировании катушек для фильтров следует стремиться к сокращению габаритов катушки, к обеспечению большей поверхности охлаждения для ограничения нагрева, к уменьшению расхода цветных материалов. В некоторых случаях осуществляется экранирование катушек. Обычно собственная частота катушки подбирается равной средней частоте защищаемого диапазона. При этом удается добиться того, что полное сопротивление катушки не выходит за пределы допустимого значения. Чтобы частотная характеристика фильтра была по возможности равномерной в требуемом диапазоне частот, не следует применять больших индуктивностей. Как правило, индуктивность катушек не должна превышать 500 мкГн, при этом их конструкцию разрабатывают таким образом, чтобы собственная емкость не превышала 100 пФ.

В качестве помехоподавляющих могут применяться любые катушки, имеющие необходимые частотные характеристики полного сопротивления. Катушка может быть как с ферромагнитным сердечником (дросселем), так и без него. В качестве материала для сердечника рекомендуется сталь ВЧ-2, магнитная проницаемость которой остается высокой и в области высоких частот. Для обеспечения требуемой проницаемости на высоких частотах при небольших протекающих по дросселю токах рекомендуется в качестве сердечника использовать ферриты, которые позволяют существенно уменьшать число витков и габариты дросселя.

Эффективность фильтров зависит от их конструкций и от монтажа элементов. При конструировании фильтра и монтаже помехоподавляющих элементов необходимо учитывать следующие рекомендации:

- фильтр необходимо экранировать (это требование не является обязательным для емкостных фильтров, выполненных на обычных конденсаторах). Обычно экраном для фильтра служит его корпус;
- входные и выходные провода должны вводиться в корпус фильтра с противоположных сторон, а вне корпуса проходить как можно дальше друг от друга. Если у входных или выходных проводов имеется экранирующая оплетка, то она должна иметь надежный контакт с корпусом фильтра по всему периметру отверстия для ввода провода;
- большое внимание нужно уделять экранированию входных и выходных цепей фильтра, включая входной и выходной конденсаторы, особенно если эти конденсаторы являются проходными и расположены на входе и выходе многозвенного высокоэффективного фильтра. В

многозвенном фильтре экранирование друг от друга средних звеньев цепи электропитания не обязательно;

- избегать расположения элементов фильтра на съемных частях его корпуса;

- размещать проходной конденсатор следует так, как это описано выше;

- обычные и защитные конденсаторы типа КЗ рекомендуется монтировать так называемым проходным способом, т.е. присоединять помехонесущий провод непосредственно к выводу конденсатора. Если корпус конденсатора служит одним из его выводов, то крепление корпуса конденсатора на шасси ИЛИ на корпусе фильтра должно обеспечить надежный контакт. Для этого корпус или шасси фильтра в месте крепления корпуса конденсатора должен иметь луженую или оцинкованную поверхность. Если один из выводов конденсатора должен быть соединен с шасси или корпусом фильтра, то это соединение должно быть выполнено возможно более коротким проводом (не длиннее 15 мм). Провод лучше всего припаивать к шасси. При невозможности соединения вывода конденсатора с корпусом фильтра столь коротким проводом это соединение рекомендуется осуществлять с помощью шик;

- нельзя использовать выводы конденсатора для его механического крепления;

- конденсаторы, которые при отключении аппаратуры от сети питания могут остаться заряженными, должны иметь разрядные резисторы, через которые конденсаторы должны разрядиться не позднее, чем через 10 с после выключения аппаратуры;

- в случае применения неэкранированных дросселей необходимо правильно располагать их относительно конденсаторов и подключенных к ним проводов.

Для подавления помех в диапазонах УВЧ и СВЧ обычно применяют ненастраиваемые фильтры низких частот. По конструкции защитные фильтры СВЧ обычно коаксиальные, а по принципу действия поглощающие. Важное место в проектировании таких фильтров занимает выбор поглощающего материала и расстояний между его частицами в спрессованном виде, так как для этих целей в большинстве случаев используются порошковые магнитные сплавы, состоящие из металлических частиц, покрытых оксидной или фосфатной пленкой. Частицы распределены в связующем веществе типа эпоксидной смолы. Изменяя расстояние между частицами, можно изменять распределение вихревых токов, а следовательно, и затухание фильтра. Выбор параметров конденсаторов и дросселей, применяемых как в качестве элементов фильтра, так и элементов помехоподавления, производится на основании расчета фильтра. Однако произвести точно этот расчет в подавляющем большинстве случаев затруднительно, так как необходимые для расчета параметры эквивалентной схемы могут быть неизвестны. Поэтому окончательный выбор параметров дросселей и конденсаторов рекомендуется производить после экс-

периментальной проверки при нормальном функционировании измерительной аппаратуры и системы экранирования.

Защита незэкранированных цепей, выходящих за пределы здания. Удар молнии в ПС и протекание тока молнии через заземлитель вызывает повышение потенциала заземлителя, приблизительно равного произведению тока на сопротивление заземлителя.

Если сопротивление заземлителя составляет (или превышает) 1 Ом, то потенциал легко может достичь нескольких десятков и даже сотен киловольт.

Повышение потенциала присутствует и за пределами контура заземления, где он снижается обратно пропорционально расстоянию (на расстояниях больше удвоенного значения характерного размера заземлителя).

Повышение потенциала может представлять опасность для кабелей, приходящих на подстанцию и проложенных в земле.

Часть кабеля, попадающая на территорию подстанции, должна иметь изоляцию высокой прочности (напряжение пробоя изоляции должно быть не менее десятков киловольт). Длина этого участка зависит от удельного сопротивления грунта, формы и сопротивления заземлителя и требуемой степени защиты; обычно длина рассматриваемого отрезка составляет от 50 до 300 м, а для очень больших электростанций может достигать 1 км.

Конструкция разделительных трансформаторов (или специального оборудования, например телефонных усилителей) также должна предусматривать подобные перегрузки по напряжению. Однако создание материалов с электрической прочностью более 20 кВ (на частоте 50 Гц) или 50 кВ (при импульсном воздействии) представляет определенные сложности вследствие наличия утечек по поверхности. Более того, данное оборудование всегда должно располагаться внутри здания или оборудоваться нагревательными элементами для предотвращения образования конденсата.

Разрядники для защиты от грозových перенапряжений с высоким напряжением срабатывания (например, 40 кВ) устанавливаются по синфазной схеме на кабельной стороне разделительного трансформатора для предохранения от перенапряжений. Данная защита может представлять собой простой воздушный промежуток между жилами и землей или между центральной отпайкой разделительного трансформатора и землей.

Газонаполненные разрядники или варисторы с нормальным остающимся напряжением (например, 90 или 230 В) устанавливаются по противофазной схеме между центральной отпайкой трансформатора и выводами оборудования на той же стороне трансформатора для защиты их обмоток и для ограничения напряжения между проводниками.

Устройства защиты от перенапряжений с напряжениями срабатывания, сравнимыми с уровнем прочности изоляции обычного кабеля (например, кабеля связи), или реакторы устанавливаются по синфазной схеме в месте соединения обычного и специального кабелей.

В дополнение к указанным мерам можно рекомендовать установку предохранителей между разделительным трансформатором и кабелем,

поскольку в отсутствие подобной защиты при срабатывании разрядника вынос повышенного потенциала за пределы хорошо защищенной установки может вызвать серьезные повреждения в других кабелях.

Для достижения максимальной эффективности предохранители должны иметь длину не менее 10 см для снижения вероятности поддержания электрической дуги. (В действительности опыт показал, что при одновременном протекании токов больше нескольких сотен ампер и повышении напряжения больше 50 кВ, установка предохранителей становится неэффективной).

Недостатком последнего способа является разрыв цепи при перегорании предохранителя, что для некоторых приборов может оказаться недопустимым. На рис. 10.14 приведен пример установки, выполненной в соответствии с приведенными выше рекомендациями.

Следует отметить, что все указанные требования относятся к неэкранированным кабелям или к кабелям, не имеющим гарантированно целого экрана (экрана, обладающего достаточной проводимостью), пример - телефонный кабель общего пользования.

Большинство используемых различными устройствами кабелей имеют экраны с высокой пропускной способностью по току.

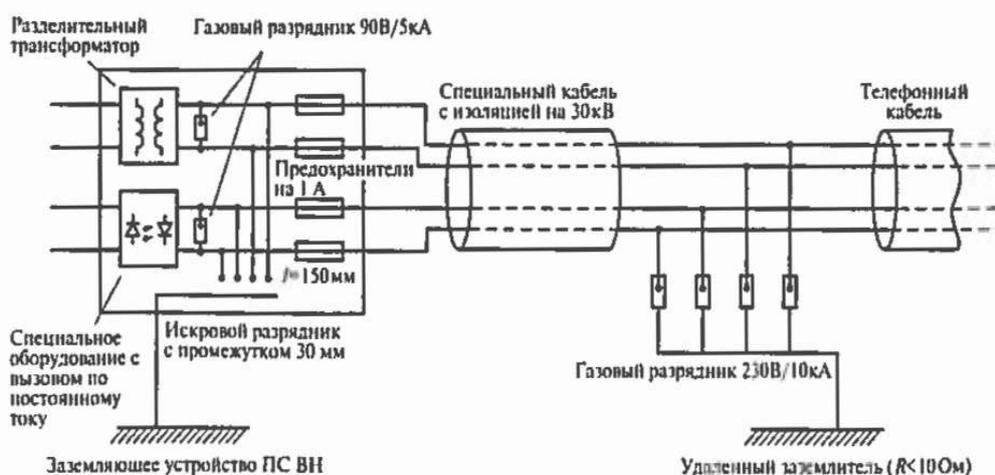


Рис. 10.14. Пример схемы защиты кабеля связи, выходящего за пределы ПС

В этом случае коэффициент экранирования обычно достаточен для того, чтобы можно было использовать обычные разделительные трансформаторы, рассчитанные на средний уровень напряжений (например, 6 кВ), без дополнительной защиты.

10.4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЗАЗЕМЛЕНИЙ НА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Все материалы, рассмотренные в гл. 2 и §10.2 без каких-либо ограничений могут применяться по отношению к электростанциям.

Способы выполнения заземления. Как и на ПС высокого напряжения, контур заземления электрических станций служит для выполнения нескольких функций, среди которых основными являются ограничение напряжения прикосновения и шагового напряжения, способность восприятия токов КЗ и достижение хорошей ЭМС.

Несмотря на то, что указанные цели сильно взаимосвязаны, здесь мы будем рассматривать функцию обеспечения ЭМС, не затрагивая требования электробезопасности, регулируемые существующими национальными и международными нормами.

В частности, поперечное сечение заземляющих проводников вблизи электрооборудования высокого напряжения определяется уровнем токов КЗ на стороне высокого напряжения, при этом требуемое значение сечения медных проводников может превысить 1000 мм².

Для обеспечения ЭМС достаточными являются сечения 100 мм² при использовании стальных полос (прутков) или 70 мм² для медных проводов.

Наружный заземлитель должен располагаться на всей площади электростанции. Шаг сетки зависит от установленного оборудования. Наружный контур заземления обычно проектируется в виде замкнутого кольца, прокладываемого вокруг каждого здания на глубине от 0,5 до 1 м.

Заземляющие проводники в фундаменте прокладываются в самом нижнем слое бетона каждого здания с шагом сетки не более 10 м.

Подстанции высокого напряжения, расположенные в непосредственной близости от электростанции, также должны связываться с основным контуром заземления при помощи, по крайней мере, двух проводников заземления. Это правило справедливо для всех установок (зданий, баков и т.п.), имеющих какую-либо электрическую связь с основной установкой, но не использующих тот же самый контур заземления.

Внешние системы молниезащиты Системы защиты от прямого удара молнии могут основываться на хорошо известной электрогеометрической (ЭГ) модели, которая, являясь частично эмпирической, подтверждена на опыте. В модели учтены параметры молнии и требования электробезопасности, установленные национальными и международными стандартами.

Система защиты от прямого удара состоит из молниеприемников, в которые происходят удары молнии, и определенного числа спускающихся вниз проводников (сетки), которые, кроме отвода тока молнии в землю, также действуют и как молниеприемники.

В настоящее время считают, что расстояние ориентировки d между головкой лидера, развивающегося с облака, и местом удара молнии в землю в момент, когда с земли начинает развиваться встречный лидер, связано с амплитудой импульса тока молнии в соответствии с выражением

$$d = 9,4 I^{2/3},$$

где d выражено в метрах, I — в килоамперах.

Отсюда следует, что для заданного шага молниезащитной сетки справедливо следующее: чем выше ожидаемое значение тока молнии, тем выше вероятность поражений молнией сетки.

Известно, что вероятность протекания тока молнии значением до 8 кА составляет 90 %, кроме того, электрические и электронные цепи внутри электростанции относительно просто защитить от прямого воздействия тока значением менее 8 кА, поэтому кажется вполне обоснованным рекомендовать это значение тока молнии в качестве расчетного для выбора шага молниезащитной сетки.

Подстановка в указанную выше формулу значения тока $I=8$ кА дает нам расстояние $d=37$ м.

На практике каждый край здания имеет молниеприемник; более того, каждый металлический объект, например вентиляционные трубы и оборудование, парапет, стальная арматура, присоединяется к молниезащитной системе, что приводит к уменьшению действительного шага сетки по сравнению с расстоянием ориентировки примерно до 20 м.

При необходимости здания, содержащие очень чувствительное оборудование (или оборудование, требующее очень высокого уровня безопасности), могут защищаться с помощью сетки с шагом, равным не более 15 м.

Все спускающиеся вниз проводники, число которых для заданного объекта не должно быть менее двух, следует присоединять к кольцевому заземляющему контуру вокруг здания.

Кроме того, арматура бетонных стен и колонн должна иметь сварное (или другое надежное) соединение с заземлителем в фундаменте или с наружным контуром заземления вокруг здания внизу и с молниезащитной сеткой на крыше вверху. Стальные прутья могут использоваться в качестве спусков.

Правильный выбор шага сетки и числа проводников-спусков очень важен. Следует отметить, что расстояние между проводниками сетки внешней системы молниезащиты определяется не только вероятностью удара молнии при любом токе, но также играет важную роль в определении распределения тока молнии и соответственно наводимых помех в защищаемом пространстве.

Чем выше число проводников-спусков, тем меньше ток в каждом проводнике и тем меньше магнитное поле вблизи них.

Различные теоретические и практические исследования показали, что распределение тока молнии по различным ветвям системы молниезащиты происходит, грубо говоря, обратно пропорционально длине этих ветвей при условии неизменности их поперечного сечения.

Это важное утверждение может быть очень полезным при расчете электромагнитных полей вблизи каждого заземляющего проводника, по которому возможно протекание тока молнии или его части.

Каждая дымовая труба должна оборудоваться двумя проводниками-спусками и, по крайней мере, одним молниеприемником.

Следует следить за обеспечением надежного соединения (не менее двух проводников сечением не менее 50 мм²) между заземлителем трубы (обычно контур вокруг трубы) и контуром основного здания.

Хотя градирни не требуют такой же степени защиты как другие здания, они также должны оборудоваться, по крайней мере, двумя (а лучше четырьмя) проводниками спусками и на самом верху кольцом из шин заземления, к которому должна присоединяться бетонная арматура.

Защита дымовых труб и градирен по большей части имеет целью обеспечение общей защиты станции при значительных токах молнии ($I \gg 8$ кА), чем их собственную защиту.

Общая философия выполнения заземления внутри зданий и выравнивания потенциалов заземлителя, рекомендуемая для современных электростанций, основывается на создании трехмерной многократно замкнутой сети заземления по возможности с выровненным потенциалом на всем ее протяжении.

Очень важно отметить разработки, выполненные в данной области пауки за последнее десятилетие.

Многие годы электроника основывалась на использовании низкочастотных аналоговых сигналов, а единственным типом возмущения были помехи промышленной частоты. Поэтому естественными казались старания избежать создания петель для частоты 50/60 Гц при помощи использования радиальных схем разделения между защитной, рабочей землей и землей для электронного оборудования.

В настоящее время с увеличением скорости работы современного электронного оборудования и повышения его чувствительности к ВЧ-помехам, но также и с более полным пониманием механизмов передачи помех, данная политика в части выполнения заземления становится непригодной. Напротив, отказ от нее не только помогает решить проблемы ЭМС, но и существенно упрощает прокладку кабелей и устраняет необходимость разделения различных видов заземления.

В частности, следует избегать использования отдельных сетей заземления для питания постоянным током, подключения кабельных экранов и корпусов оборудования.

Реализация на практике сети заземления с хорошо выровненным потенциалом дает гарантию того, что паразитные токи всегда будут возвращаться к своему источнику по пути с наименьшим сопротивлением (обычно — наиболее короткому пути), тем самым снижая вероятность возникновения связи через общее сопротивление, возможной при возникновении токовых петель.

В действительности создание сети с множественным заземлением не устраняет токовые петли. Однако эти петли, будучи более многочисленными и много меньшими, чем при радиальной схеме сети заземления, не являются

помехой, а даже наоборот, помогают в борьбе против навязанных возмущений.

Для удобства повторим здесь ранее сделанные утверждения:

- для снижения ВЧ помех необходимо заземлять экраны кабелей в нескольких местах;
- для цепей небольшой длины указанное заземление должно выполняться на обоих концах кабеля, в то время как экраны более длинных цепей, благодаря наличию обратной цепи через распределенную емкость, иногда с достаточной эффективностью могут заземляться только на наиболее чувствительной к помехам стороне, например там, где установлено электронное оборудование;
- вследствие того, что на электростанциях многие цепи включают в себя активные элементы на обоих концах (в будущем эта ситуация станет более распространенной с увеличением числа чувствительных датчиков и заменой, частично или полностью, коммутационной аппаратуры и механизмов управления вспомогательным оборудованием на электронные устройства), возникает необходимость заземления экранов большинства кабелей (а не самих цепей) на обоих концах вне зависимости от их длины;
- планомерное заземление всех кабельных экранов (за исключением НЧ-цепей с сигналами низкого уровня, например для термодатчиков и некоторых коаксиальных цепей) требует, в свою очередь, наличия хорошей эквипотенциальной сети заземления, которая, несомненно, будет усиливаться при выполнении многократного заземления экранов кабелей.

Таким образом, даже если необходимость заземления экранов кабелей на каком-либо его конце отсутствует (например, потому что оборудование, установленное на этой стороне, не чувствительно к возмущениям или не может являться источником помех для другого оборудования), всегда рекомендуется применять данную практику выполнения заземления.

Для достижения хорошей эквипотенциальной сети заземления должны быть объединены все следующие элементы:

- элементы конструкции зданий, например стальные балки и колонны;
- металлические трубы и каналы для электропроводки;
- корпуса электрощитов;
- металлические корпуса, в которых размещено электрооборудование и инструменты;
- пульты управления, кабельные лотки, вертикальные кабельные стояки, опорные конструкции и т.п.

Для кабельных лотков и другого оборудования, играющего роль защиты от помех, необходимо не только выполнить их заземление на обоих концах, но и обеспечить электрическую непрерывность на всем протяжении.

Все соединения между металлическими элементами следует выполнять помня о том, что важно не зафиксировать потенциал данных элементов, а обеспечить путь протекания токов помех по ним в том же направлении, в котором проходят цепи с полезными сигналами и, таким образом, создать

наименьшее возможное расстояние между полезными цепями и цепями заземления (рис. 10.15).

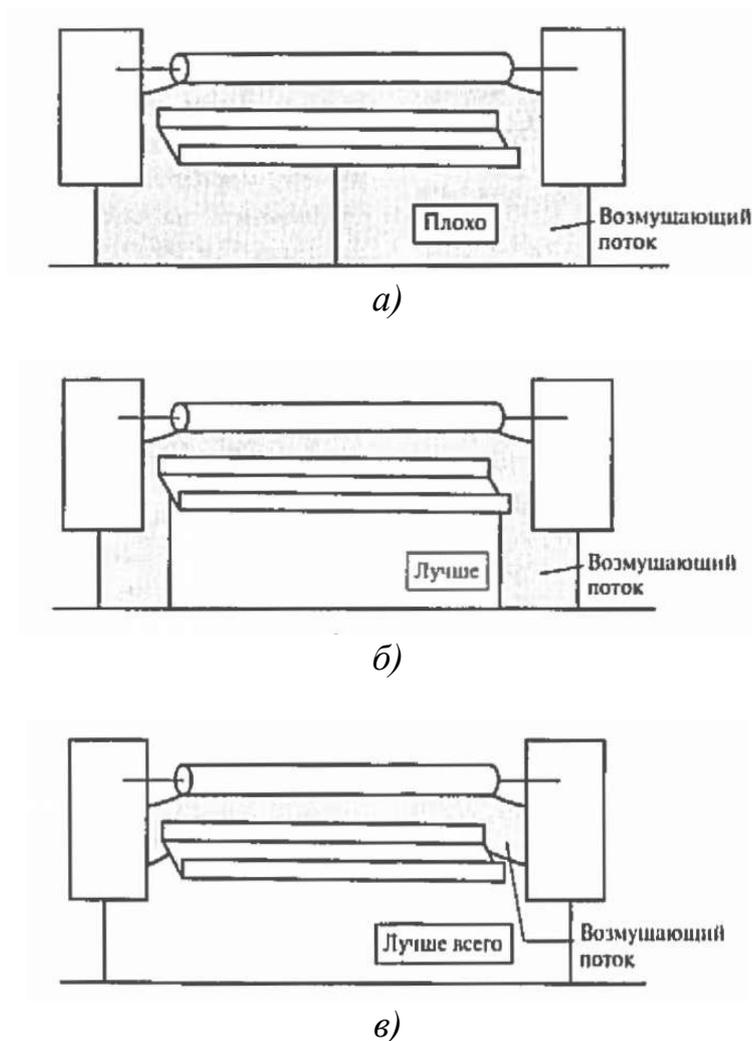


Рис. 10.15. Заземление кабельных лотков:

а - неудовлетворительное выполнение; б - лучшее выполнение; в - еще лучше выполнение

Другое важное замечание относится к способу соединения металлоконструкций между собой. Наилучшее соединение обеспечивает болтовое соединение с непосредственным контактом между различными элементами. При необходимости, если защитное покрытие металлических поверхностей не было полностью удалено, для создания лучшего контакта между элементами следует применять зубчатые или контрольные шайбы. Применение медных проводников-перемычек оправдано только в тех случаях, когда невозможно создание надежного прямого контакта между элементами.

В зависимости от электромагнитного окружения, зависящего от типа оборудования, установленного вблизи внешней системы молниезащиты,

допускается разделение внутренней сети заземления на зоны, имеющие различные плотности прокладки проводников.

В частности, если в отдельной комнате установлено чувствительное электронное оборудование, то может возникнуть необходимость не только выполнить надежные соединения между отдельными корпусами или между корпусами и кабельными лотками, но также обеспечить соединения (например, при помощи стальных полос) между рядами корпусов (или кабельных лотков) с некоторым интервалом, например 2 м, и затем объединить всю полученную систему с шиной заземления, прокладываемой по периметру помещения.

Указанная шина заземления может прокладываться на границе каждой защищаемой зоны и всего здания, создавая условия для выполнения многократных соединений между зонами.

Таким же образом внутренняя сеть заземления в нескольких точках (не менее четырех) должна присоединяться к защитному и наружному контурам заземления.

Для обеспечения возможности обнаружения однополюсного замыкания на землю в оперативных цепях постоянного тока может возникнуть необходимость искусственного заземления цепей (обычно в одной точке около аккумуляторной батареи).

В этих условиях единственным способом обеспечения ЭМС на высоких частотах является периодическая установка развязывающих конденсаторов (емкостью от 10 нФ до 1 мкФ в зависимости от нижней границы частотного спектра помех) между цепями питания и корпусом.

Однако подобные системы остаются чувствительными к токам при коммутациях (например, при замыканиях на землю). Отсюда вытекает необходимость использования преобразователей из постоянного тока в постоянный (с гальванической развязкой) в каждом отдельном блоке оборудования для обеспечения возможности искусственного местного заземления сети.

Одним из наиболее часто встречающихся возражений против создания сложносвязанной сети заземления является то, что при таком выполнении сети образуются замкнутые через землю петли и соответственно связи через общее сопротивление между чувствительными электронными элементами и оборудованием большой мощности (двигатели, электросварочные аппараты и т.п.).

В действительности это возражение не состоятельно, если были приложены соответствующие усилия для создания хорошей эквипотенциальной сети заземления при помощи связей между бетонной арматурой, металлическими балками, проводниками заземления, кабельными лотками, трубами, каналами, экранами и т.п.

Несомненно, принцип разделения остается в силе. Например, двигатель, имеющий большой ток КЗ, не должен присоединяться к тому же заземляющему проводнику, что и чувствительное электронное оборудование. Иногда может потребоваться усиление сети заземления вблизи оборудования

высокой мощности. При необходимости к чувствительной цепи или к потенциальному источнику помех может добавляться параллельный заземляющий проводник.

Более чем когда-либо следует применять следующий принцип развязки: в качественной многократно замкнутой сети заземления токи помехи будут возвращаться к источнику по кратчайшему пути. Чем больше имеется путей для протекания тока помехи, тем меньше вероятность образования связи через общее сопротивление между источником и приемником.

Прокладка кабелей. Внутренняя прокладка кабелей включает в себя цепи вторичной коммутации, расположенные в основном здании (управления оборудованием, работой), как показано на рис. 10.15.

Все общие рекомендации, данные для ПС высокого напряжения в общем случае действительны и при прокладке кабелей внутри помещений.

Однако некоторые характерные особенности электростанций иногда могут привести к выбору других типов кабелей или их иной прокладке.

Данные особенности обобщены ниже:

- общая электромагнитная обстановка на электростанциях менее сложная, чем на ПС высокого напряжения;
- благодаря большому числу взаимосвязей между металлическими конструкциями эквипотенциальная сеть заземления внутри главного здания может быть более высокого качества, чем на открытых ПС;
- число кабелей на электростанциях значительно больше, чем на подстанциях. На практике это означает, что по экономическим причинам на станциях обычно недостижим тот же уровень экранирования кабелей, что и на ПС;
- появление высокофункциональных датчиков-преобразователей и приводов приведет к увеличению децентрализации электронного оборудования и повышению необходимости выполнения многократного заземления экранов кабелей.

В зависимости от типа передаваемого сигнала могут быть рекомендованы различные типы кабелей:

сигнал типа *1a* (см. табл. 7.6): коаксиальный кабель или витая пара с экраном;

сигнал типа *1b*: высококачественный коаксиальный или триаксиальный кабель, по возможности защищаемый сплошной медной трубой. Иногда, во избежание возникновения резонанса, требуется использовать материалы с высокой магнитной проницаемостью или с высокими потерями (ферритовый порошок, пермаллой);

сигнал типа *2*: экранированная витая пара с экраном из алюминиевых лент или алюминиевой фольги, а лучше с плетеным медным экраном;

сигнал типа *3*: экранированная витая пара;

сигнал типа *4*: многожильный экранированный или неэкранированный кабель. Для нескольких цепей может использоваться один обратный провод.

Прокладка кабелей в электрически непрерывных кабельных лотках может внести заметный вклад в снижение помех.

В зависимости от уровня электропроводности кабельного лотка, способа его заземления (см. рис. 10.15) и от вида лотка (открытый он или закрытый) коэффициент экранирования будет значительно меняться (примерно от 10 до 30 дБ и более на частотах от 100 кГц до 10 МГц). Кроме того, кабельные лотки могут способствовать снижению взаимных помех между различными цепями.

Наилучший способ прокладки - это когда кабели, по которым передаются наиболее слабые сигналы (типов 1 и 2 согласно табл. 7.6) и кабели с сигналами больших уровней (типа 4) - силовые кабели постоянного и переменного тока, прокладываются в отдельных лотках.

При прокладке кабелей с сигналами разного типа в одном лотке следует предусматривать их разделение в различные пучки по типам сигнала и разведение на наибольшие возможные расстояния друг от друга.

Здесь следует отметить, что металлические кабельные лотки обеспечивают некоторое снижение взаимной связи между проложенными в нем кабелями при условии, что они не прокладываются слишком близко.

При наличии хорошей эквипотенциальной сети заземления большинство кабельных экранов следует заземлять через металлические корпуса тех аппаратов, к которым они подводятся.

Главное исключение из этого правила касается кабелей, по которым передаются НЧ-сигналы низкого уровня, например от датчиков измерения температуры. В этих случаях экраны должны заземляться на том конце кабеля, где наблюдается наибольшая несимметрия или где заземляется сама сигнальная цепь. Если кабель состоит из отдельных экранированных пар жил, то внутренние экраны следует заземлять с одной стороны, а внешний — с двух сторон.

Кабели, присоединенные к пассивным датчикам или неэлектронным приводам (реле, двигатели), могут заземляться только на одном конце (противоположном месту установки датчика или привода). Однако на практике этого следует избегать, так как такие действия противоречат задаче создания эквипотенциальной сети заземления. Более того, при заземлении экрана в единственной точке существует риск появления резонансных явлений на низких частотах.

Длинные коаксиальные кабели также могут заземляться только в одной точке, однако необходимо учитывать емкостное ВЧ-заземление для каждого присоединенного к нему элемента оборудования.

При прокладке кабелей над землей необходимо учитывать связи с внешним вспомогательным оборудованием, а также связи с очень удаленными частями электростанции, например дымовыми трубами, антеннами, электрофильтрами, наземным освещением.

Основной проблемой для такой прокладки, несомненно, являются удары молнии. Несмотря на то, что наилучшим способом защиты наружных цепей является способ, основанный на создании хорошей взаимосвязи между различными контурами заземления, без дополнительных мер, таких как установка устройств защиты от перенапряжений или гальваническая

развязка, гарантии полной защиты получить невозможно. Применение при этом кабелей с многократно и очень качественно заземленными экранами — необходимое условие.

Применение металлических лотков или, что еще лучше, металлических труб также значительно помогает снизить воздействие синфазных напряжений на оборудование. Экраны входящих в основное здание кабелей следует заземлять прямо у места их входа во избежание воздействия значительных токов переходных процессов, протекающих внутри здания. Кабели, присоединенные к оборудованию, установленному на дымовой трубе, следует прокладывать в конструкции лестничного типа, связанные с внешней системой молниезащиты здания и трубы, или в металлической трубе в земле.

10.5. ОСОБЕННОСТИ ЭМС НА ПОДСТАНЦИЯХ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Воздействия, вызываемые коммутациями, пробоями изоляции или перекрытиями в цепях высокого напряжения. Уровень помех на открытых подстанциях зависит от многих параметров, среди которых наиболее важными являются:

- напряжения и токи переходных процессов, возникающих при коммутациях;
- номинальное напряжение ПС;
- взаимное расположение источника и приемника помех;
- характеристики контура заземления;
- типы используемых кабелей (наличие или отсутствие экрана);
- способ заземления экранов.

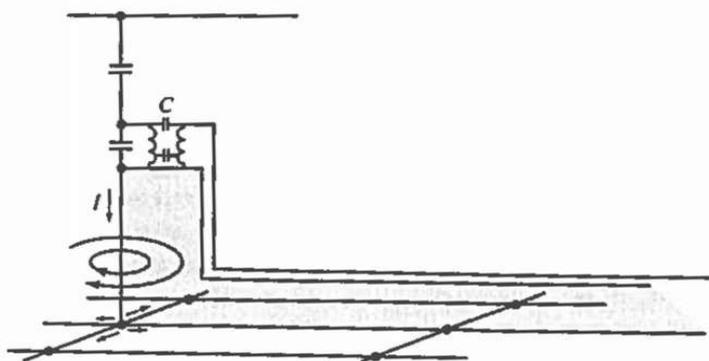


Рис. 10.16. Связь через общее сопротивление и магнитная связь вследствие заземления трансформатора напряжения

Основными каналами передачи помех являются магнитная (электромагнитная) связь вследствие распространения импульсов тока и напряжения по шинам и линиям, связь через общее сопротивление (рис. 10.16).

Измерения напряженностей электрических и магнитных полей при переходных процессах под ошиновкой и вблизи трансформаторов напряжения на подстанциях показали, что типичные амплитуды напряженностей составляют для электрического поля 1-10 кВ/м, для магнитного – 1-5 А/м. Однако в некоторых случаях были получены значения до 10 кВ/м и 100 А/м соответственно.

Спектральный состав полей определяется размерами ПС. Хотя спектр и содержит частоты до 200 МГц, но его основу составляют частоты от нескольких килогерц до нескольких мегагерц.

Длительность высокочастотных переходных процессов находится в пределах 1-10 мкс, однако они могут повторяться многократно в течение одной коммутации.

Синфазное напряжение, наводимое между выводом неэкранированного кабеля (второй конец жилы заземлен) длиной 100 м, проложенного на поверхности земли под шинами, может достигать 3-4 кВ при коммутационных операциях на ПС 150 кВ и 6-8 кВ на ПС 400 кВ.

Синфазное напряжение, наводимое на выводах экранированного кабеля с заземленным на обоих концах экраном, зависит от коэффициента экранирования (см. гл. 7) кабеля и спектрального состава помехи. Грубо говоря, коэффициент ослабления помехи в диапазоне от нескольких десятков (для экрана из стальных проволок) до более чем сотни раз (для качественных плетеных или трубчатых экранов) может быть достигнут в диапазоне частот от 200 кГц до 2 МГц (см. гл. 7). Ток в экране может составлять до нескольких десятков ампер.

На ПС напряжением 400 кВ наведенные синфазные напряжения в цепях, расположенных в непосредственной близости от емкостных трансформаторов или их вторичных цепей, могут превысить 10 кВ.

Наведенные в такой ситуации напряжения могут быть значительно снижены при использовании экранированных кабелей, однако достижение коэффициента ослабления, равного тем, что были указаны выше, представляется весьма затруднительным. Это связано с невозможностью уменьшения до нуля площади петли, образованной нулевым проводником, заземляющим проводником трансформатора и заземлением вторичной цепи. Более того, наличие паразитных емкостей между первичной и вторичной обмотками измерительных трансформаторов является источником появления во вторичных цепях противофазных напряжении высокой частоты, которые могут достигать нескольких киловольт. В спектре помехи могут присутствовать составляющие частотой более 10 МГц, которые обычно ослабляются за счет затухания в проводах.

Подстанции с элегазовой изоляцией, по сравнению с обычными открытыми ПС, обладают некоторыми принципиальными отличиями:

- размеры электрического оборудования гораздо меньше. По этой причине спектральный состав помех (большая часть которых являются следствием многочисленных отражений бегущих волн на ошиновке) содержит на порядок более высокие частоты;

- волновое сопротивление ошиновки элегазовой подстанции ниже того же сопротивления открытой подстанции примерно в 5 раз (60 Ом против 300 Ом).

Во время коммутаций такое различие является причиной появления стоячих волн и, в частности, волн тока высокой амплитуды (амплитуда волны напряжения зависит от номинального напряжения ПС и сравнима с волнами на открытых ПС, в то время как амплитуда волны тока прямо пропорциональна волновому сопротивлению). В тех местах, где металлический корпус элегазовой подстанции имеет разрыв, например, в месте соединения с воздушной или кабельной линией, он становится важным источником электрического и магнитных полей с напряженностями выше 10 кВ/м и 50 А/м (моделирование и измерения показали, что напряженность составляет 100 В/м на 1 кВ номинального напряжения).

Если место разрыва расположено вне здания, в котором находится элегазовая подстанция, но экран здания обеспечивает непрерывность экрана подстанции, то наличие разрыва не имеет большого значения.

Данная ситуация обычно имеет место в случаях с воздушными линиями. Если часть ПС открытая или если она соединена с кабелями с незаземленными (или неправильно заземленными) экранами, то это может привести к повышению уровня помех.

Следствием этих особенностей является наведение высоких потенциалов на контуре заземления и во вторичных цепях при коммутациях. Указанные повышения потенциалов хорошо известны под не очень точным названием «подъем потенциала заземлителя при переходном процессе». Он может вызывать появление перекрытий между заземленными металлическими элементами, не находящимися в непосредственном контакте друг с другом.

Все эти проблемы в элегазовой подстанции обостряются из-за расположения электронного и силового оборудования на небольших расстояниях друг от друга.

Помехи, создаваемые полями промышленной частоты. Сильное влияние электрических полей промышленной частоты (через емкостные связи) на оборудование, установленное в пределах ПС, наблюдается довольно редко, так как оно ослабляется наличием заземленных металлических экранов и заземленного оборудования.

Магнитные поля промышленной частоты также очень редко являются причиной опасного воздействия на аппаратуру ПС даже при КЗ. Однако установка на ПС видеомониторов, которые могут быть чувствительны к полям напряженностью порядка 1 А/м, существенно повышает требования к ЭМО.

Естественно, лучшим способом решения данной проблемы представляется увеличение расстояния r между источником и приемником помехи с учетом того, что напряженность магнитного поля, создаваемого током I в уединенном бесконечно длинном проводнике убывает обратно пропорционально расстоянию до провода:

$$H = \frac{I}{2 \pi x}$$

а для двух-или трехфазной сбалансированной системы - обратно пропорционально квадрату расстояния:

$$H = kI \frac{d}{x^2}$$

где d - расстояние между проводами (размеры которых принимаются много меньшими расстояния между ними); k - постоянная, определяемая положением проводников ($k \approx 0, 2$).

Для цепей, расположенных в ограниченном пространстве (например, трансформатора, ПС среднего напряжения) магнитное поле убывает практически как $1/x^3$, при условии, что расстояние x много больше наибольшего размера объекта.

Другой способ снижения возмущений — уменьшение расстояния d между проводами.

Если указанные меры не осуществимы, то единственным оставшимся способом (кроме замены электронно-лучевых мониторов на жидкокристаллические) остается экранирование помещений, где установлены мониторы. Иногда оправдана активная компенсация воздействующих полей.

Кроме относительно слабого воздействия полей промышленной частоты на оборудование и аппараты, следует отметить, что индуктивная и емкостная связи - главным образом при возникновении КЗ - могут являться причиной гораздо более важных проблем, связанных с такими протяженными элементами, как кабели и трубопроводы.

Помехи, создаваемые токами КЗ. Высокочастотные процессы, вызванные токами КЗ, аналогичны процессам при коммутациях. Однофазное КЗ на землю вызывает быстрое изменение напряжения на шинах с такой же амплитудой, что и при коммутациях.

Основное отличие низкочастотного КЗ состоит в протекании тока частотой 50/60 Гц по оборудованию высокого напряжения, контуру заземления и иногда экранам кабелей (если прокладки шин и заземлителя проложены недостаточно часто). В свою очередь эти токи наводят помехи в проводах посредством индуктивной связи или через общее сопротивление.

При токе КЗ 50 кА на обычных ПС в кабелях могут наводиться напряжения до 500 В. Однако если контур заземления и прокладка кабелей на ПС выполнены надлежащим образом, то наведенные напряжения не превышают 200 В.

Главной проблемой на ПС остается компенсация воздействий на выходящие за пределы ПС кабели повышения потенциала заземлителя при протекании через контур тока КЗ.

При протекании по заземляющему устройству тока КЗ на землю происходит повышение его потенциала (и потенциала близлежащей почвы) (рис. 10.17).

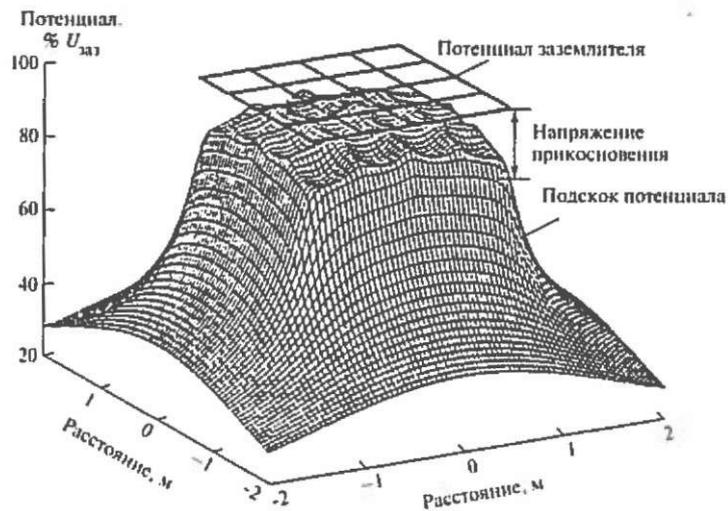


Рис. 10.17. Повышение потенциала (на частоте 50/60 Гц) заземлителя и вблизи него

На рисунке видно, что разность потенциалов между двумя точками заземлителя относительно невелика. Отсюда следует, что любая цепь, расположенная в пределах заземлителя, будет подвергаться воздействию помех, главным образом, возмущений, передаваемых индуктивной связью.

Для кабелей, входящих в зону влияния, ситуация совершенно иная, так как они подвергаются воздействию продольных напряжений, равных повышению потенциала заземлителя.

Потенциал заземлителя в обычных условиях равен произведению сопротивления контура и протекающего по нему тока.

Как правило, ток I меньше тока КЗ I_k , который представляет собой сумму следующих составляющих:

I_a - ток нулевой последовательности трансформаторов ПС;

I_b - ток ВЛ без молниезащитных тросов;

I_c - ток ВЛ с молниезащитными тросами;

I_d - ток силовых кабелей.

Ток в земле I_z не включает в себя составляющие, возвращающиеся к своим источникам по шинам заземления.

Для определения тока I_z можно использовать следующее выражение:

$$I_z = I_b + I_c = \frac{R_c + j\omega(L_c - M_c)}{R_c + j\omega L_c} + I_d \frac{R_d}{R_d + j\omega L_d}$$

где R_c и R_d - сопротивления шин заземления и экранов (оболочки, брони) силовых кабелей; ωL_c и ωL_d - индуктивные сопротивления различных цепей с возвратом тока через землю; ωM_c - удельное сопротивление взаимоиндукции между контуром, образованным заземляющим проводником и землей, и контуром, образованным замкнутой на землю линией и землей.

Для экранированных кабелей с заземленными на обоих концах экранами, наведенные напряжения U будут уменьшены на коэффициент ослабления помехи:

$$k = \frac{R}{R_3 + R'_3 + (R + j\omega L)}$$

где R — сопротивление экрана; R_3 - сопротивление заземлителя ПС; R'_3 - сопротивление заземлителя ПС на удаленном конце (допускается, что оно не подвержено воздействию тока КЗ); ωL - реактивное сопротивление контура экран/земля.

С другой стороны, наличие связи между заземлителями обеих подстанций предполагает наличие тока I_c , протекающего по экрану кабеля, и выноса потенциала заземлителя на удаленный конец кабеля:

$$I_c = \frac{U}{R_3 + R'_3 + (R + j\omega L)};$$

$$U_3 = \frac{UR_3}{R_3 + R'_3 + (R + j\omega L)}$$

$$U'_3 = \frac{UR'_3}{R_3 + R'_3 + (R + j\omega L)},$$

и

где U_3 - новый потенциал заземлителя; U'_3 - потенциал заземлителя удаленной подстанции.

Рекомендуется проверять, в частности при небольших расстояниях между ПС, превышают ли эти токи и напряжения допустимый уровень, и существует ли вероятность насыщения экранов.

Повышение потенциала заземлителя, вызванное протеканием тока однофазного КЗ, может иногда превышать 5 кВ, приводя к появлению перенапряжений в недостаточно защищенных цепях.

Более того, если параллельно воздушной ВЛ или силовому кабелю на протяжении значительного расстояния проложен кабель связи, то

протекающий ток КЗ будет оказывать на него влияние посредством индуктивной связи. Вызванные таким образом синфазные перенапряжения могут достигать нескольких киловольт и определяться множеством различных факторов, среди которых находятся амплитуда тока КЗ, длина пути совместной прокладки, расстояние между источником и приемником помех и разделение токов между землей и молниезащитными тросами или оболочкой и броней силового кабеля.

Для того чтобы получить общее представление о проблемах, возникающих в линиях связи, приведем здесь основные положения:

- емкостная связь имеет место только между ВЛ и воздушными линиями связи. Она может становиться заметной, если расстояние между линиями составляет менее 50 м;
- основная причина возникновения помех — это, несомненно, индуктивная связь, возникающая при КЗ. Такая связь может иметь место как с воздушными, так и подземными линиями связи.

Особое значение имеет длина зоны влияния. При воздействии на линию связи тока однофазного КЗ на ВЛ ВН с возвратом тока в землю на расстоянии менее $200\sqrt{\rho}$ характерными являются наведенные напряжения порядка $10 \text{ В}/(\text{км}\cdot\text{кА})$, Здесь ρ - удельное сопротивление земли.

Для кабелей связи, проложенных в земле вблизи силовых кабелей, наведенные напряжения могут превысить $100 \text{ В}/(\text{км}\cdot\text{кА})$.

Естественно, во всех указанных ситуациях может присутствовать фактор экранирования из-за наличия у ВЛ молниезащитного троса ($0,5 < k < 0,8$), экрана или параллельного заземленного проводника у подземного кабеля ($0,1 < k < 0,5$) и/или экрана кабеля связи ($0,1 < k < 0,8$).

Общий коэффициент ослабления помехи редко представляет собой произведение отдельных коэффициентов.

Помехи, вызываемые воздействием молнии. В отличие от обычных коммутационных операций молния при прямом попадании в ПС может вызвать разрушительное воздействие. В этом случае будет иметь место связь через общее сопротивление (например, повышение потенциала заземлителя) или прямая наводка в чувствительных цепях. Связь излучением может оказывать влияние только на уровень помех.

Полезно напомнить, что если длительность фронта импульса тока молнии на порядок больше, чем у токов переходных процессов, то амплитуда импульса может быть выше на порядок при одном и том же уровне помехи.

Прямое индуктивное влияние тока молнии, протекающего в проводнике заземления, на цепь, проложенную вблизи него, частично обсуждалось ранее. Соответствующий уровень помех может быть оценен по выражениям, приведенным в подрисуночной подписи к рис. 10.3.

В зависимости от относительного расстояния между проводниками, длины зоны влияния и амплитуды тока молнии результирующее возмущение будет варьироваться в широких пределах.

Очень важное замечание, о котором следует напомнить, касается числа проводников заземления. Недостаточно обеспечить только протекание тока молнии по кратчайшему пути к заземлителю, но и необходимо разделить его на несколько частей для снижения амплитуды каждой составляющей.

При токах молнии, как и при токах КЗ, наибольший уровень помех будет в цепях, выходящих за пределы контура заземления. Принимая во внимание значение протекающих токов, потенциал заземлителя может легко достичь несколько десятков или даже сотен киловольт.

Даже в пределах территории заземлителя ситуация является сложной, так как потенциал сетки не может быть одинаковым как в случае с током промышленной частоты. Это вызвано индуктивными явлениями, учет которых необходим при повышении частоты.

Если контур заземления выполнен из изолированных проводников или проложен выше уровня земли (как в случае с сетью заземления) и на краях присоединен к идеальной земле, то чем ближе сеть к контуру, тем меньше будут наведенные в ней напряжения. Если же контур заземления расположен в земле, то ситуация будет следующей.

Вследствие наличия рассеяния в проводящей среде ток, протекающий по каждой шине заземления, уменьшается с увеличением расстояния до места введения тока в контур. Это утверждение справедливо для любой частоты, однако на высоких частотах увеличенное реактивное сопротивление шин приводит к тому, что ток начинает стекать с шин более интенсивно, так как распределенное сопротивление почвы становится меньше сопротивления самих шин заземления.

Данная ситуация проиллюстрирована на рис. 10.18, где показан контур заземления, состоящий из одиночной горизонтальной шины, представленной сосредоточенной индуктивностью, с подключенными по краям сопротивлениями R_1 и R_2 , определяющими сопротивление растекания тока в почве.

Если предположить, что для низких частот

$$\omega L \ll R_1 = R_2 = R$$

а для высоких частот

$$\omega L \gg R_1 = R_2 = R$$

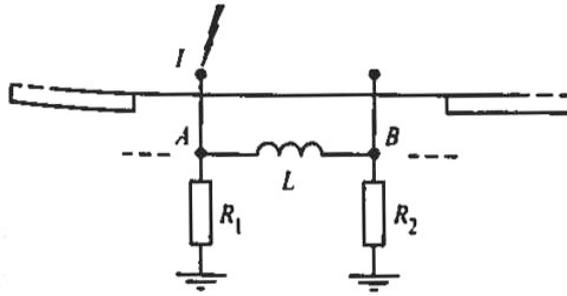


Рис. 10.18. Простейшая модель горизонтального заземлителя

то потенциал точки ввода тока

$$\phi_{HЧ} = IR/2,$$

$$\phi_{BЧ} = IR.$$

Отсюда следует, что в действительности скалярный потенциал земли около контура заземления при высокой частоте будет выше, чем при промышленной частоте.

Данное утверждение иллюстрируется на рис. 10.19 и 10.20, на которых приведено распределение потенциала по заземлителю, рассчитанное при введении постоянного тока 1 кА в центр сетки при частоте 0,5 МГц. Сетка представляет собой квадрат размерами 60×60 м² с шагом сетки 10 м, расположенной на глубине 0,5 м и выполненной из медных проводников радиусом 5 мм.

Понятие *поверхности потенциала* заземлителя проиллюстрировано на рисунках очень наглядно, но при этом следует иметь в виду, что наряду с гальванической связью между рассматриваемой цепью и контуром заземления может существовать сильная магнитная связь.

Для пояснения этого явления добавим в схему на рис. 10.18 новую цепь, состоящую из одиночного проводника, проложенного над поверхностью земли и заземленного в точке удара молнии (рис. 10.21).

В данной схеме синфазное напряжение U , приложенное к цепи, можно определить по формуле

$$U = j\omega(L - M)I_2 = R_1 I_1 - R_2 I_2 - j\omega M I_2,$$

или

$$U = \Delta\phi - j\omega M I_2,$$

где M - взаимная и идущая живность между проводниками; $\Delta\phi$ - разность скалярных потенциалов заземлителя между точками A и B ; ω - круговая частота.

Теперь следует оценить влияние каждого из этих двух параметров. Для этого необходимо рассчитать значения L и M .

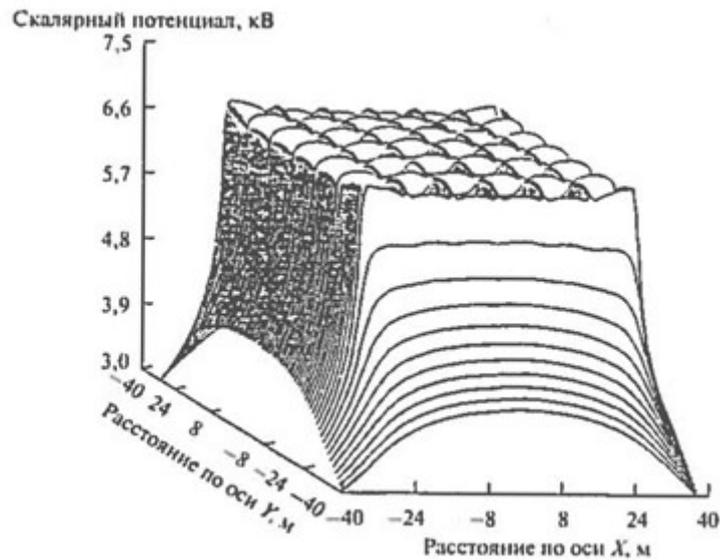


Рис. 10.19. Распределение потенциала на поверхности земли при $\rho=1000$ Ом·м

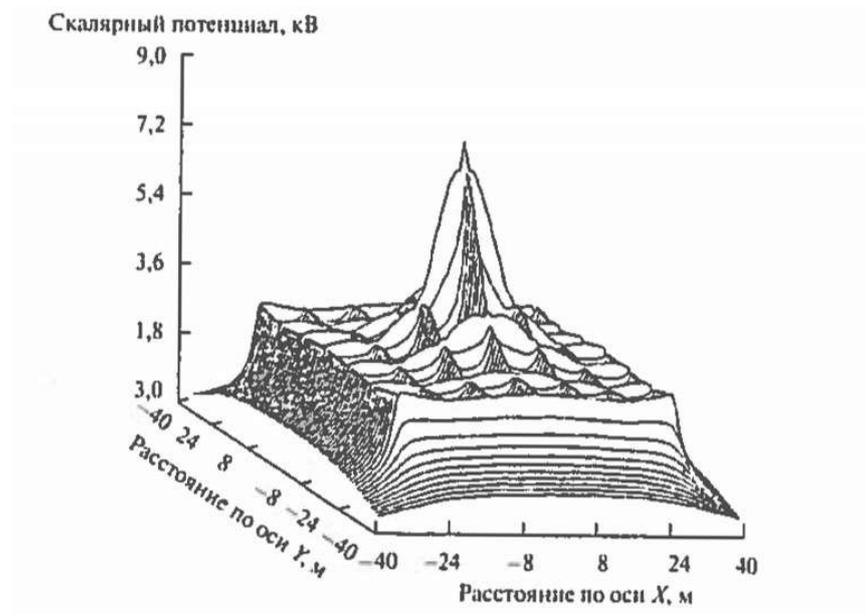


Рис. 10.20. Распределение потенциала на поверхности земли при $I=1$ кА, $f=0,5$ МГц, $\rho=1000$ Ом·м ($\epsilon_r=10$)

Указанные параметры могут быть рассчитаны последующим выражением:

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{\sqrt{2da}} - 1 \right);$$

$$M = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{d+h} - 1 \right),$$

где a - радиус проводника; h - расстояние от проводника до поверхности земли; d - глубина прокладки проводника; l - длина зоны влияния заземляющего проводника, т.е. расстояние, на котором почти весь ток стекает с проводника в грунт (может быть принято равным критической длине l_c , которая будет введена позднее).

Из приведенных выражений следует, что если расстояние $d+h$ становится много большим радиуса a , индуктивность L начинает превышать взаимную индуктивность M , и напряжение U определяется, в основном, разностью потенциалов заземлителя.

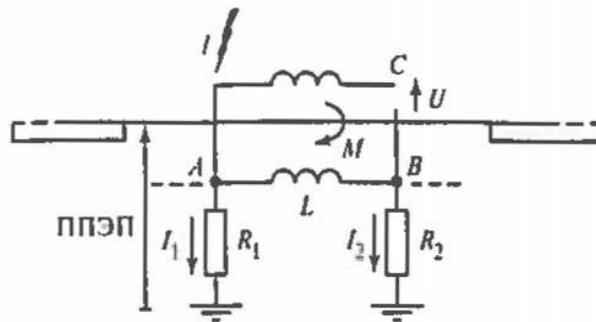


Рис. 10.21. Схема замещения горизонтального проводника

Это логически правильно, так как L определяет общий магнитный поток проводника заземления, в то время как разность $L - M$ определяет часть потока, ограниченную проводником, расположенным над поверхностью земли.

Так как магнитное поле быстро убывает с ростом расстояния до шины заземления, становится очевидным, что часть магнитного потока, оказывающая наибольшее влияние, — это та часть, которая ограничена петлей, образованной двумя горизонтальными проводниками.

Заметим, что величина $L - M = L_{BAC} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{d+h}{\sqrt{2ad}} - 1 \right)$ это ни что иное, как собственная индуктивность петли, образованной обоими проводниками, $a\sqrt{2ad}$ - эквивалентный радиус проводника, расположенного в земле.

Также очень важным является понятие зоны влияния или критической длины l_c : на самом деле, чем выше частота и меньше сопротивление грунта, тем меньше эта величина и соответственно тем больше будет вклад

составляющей, связанной со скалярным потенциалом заземлителя, в общем случае не равно разности скалярных потенциалов заземлителя между точками A и B , но эта величина обычно принимается в качестве наибольшего возможного напряжения U по сравнению с наведенной составляющей.

По указанным причинам синфазное напряжение U в общем случае не равно разности скалярных потенциалов заземлителя между точками A и B , но эта величина обычно принимается в качестве наибольшего возможного напряжения.

Но если расстояние между источником и приемником помехи мало и сравнимо с поперечными размерами проводника или проводник заземления не является оголенным и не находится в контакте с почвой, т.е. отсутствует стекание тока с проводника в грунт и зона влияния увеличивается (по сравнению с критической длиной l_c), другими словами, если проводник заземления является экраном кабеля или параллельным заземленным проводником, то потенциал поверхности заземлителя более не является реальным синфазным напряжением, появляющимся на выводе заземленной цепи.

Этот вывод имеет большое значение, так как практически он означает следующее: вклад тон части сети заземления, которая расположена над поверхностью земли, в снижение уровня помех не равен вкладу подземного контура заземления. Надземная сеть заземления имеет гораздо большую роль в снижении ВЧ-помех и помех, вызванных переходными процессами.

Во всех ситуациях, когда кабель защищается параллельным заземленным проводником или экраном, уровень возмущений может быть оценен после выполнения следующих расчетов (или измерений):

- синфазного напряжения U' в отсутствие проводника или экрана;
- тока, протекающего по проводнику или экрану;
- результирующего напряжения U через передаточное сопротивление.

Пример таких расчетов приведен в [1]. Предлагаемый здесь метод оценки уровня синфазных помех с использованием теории цепей, естественно, весьма приближенный, так как эта теория слабо подходит для расчета ВЧ-процессов в диссипативной среде. Это является следствием того, что волновые эффекты проявляются в почве на гораздо более низких частотах, чем в воздухе (на частоте 1 МГц при $\rho=100$ Ом·м длина волны в почве составляет 22 м, а в воздухе - 300 м).

Гораздо более строгий подход к решению данной проблемы основан на теории антенн. Ниже приводится пример, иллюстрирующий некоторые из сделанных выводов.

В угол контура заземления, подобного тому, что изображен на рис. 10.19 и 10.22 (глубина прокладки которого в грунте с параметрами $\rho=1000$ Ом·м и $\varepsilon_r=9$ составляет 0,8 м), вводится импульс тока с параметрами 0,25/100 мкс.

На глубине 0,3 м (рис. 10.22) прокладывается кабель, заземленный на одном конце. Рассматриваются два возможных пути прокладки кабеля: первый - вдоль проводника заземления (1-2-3), второй - напрямую от точки 1 до точки 3.

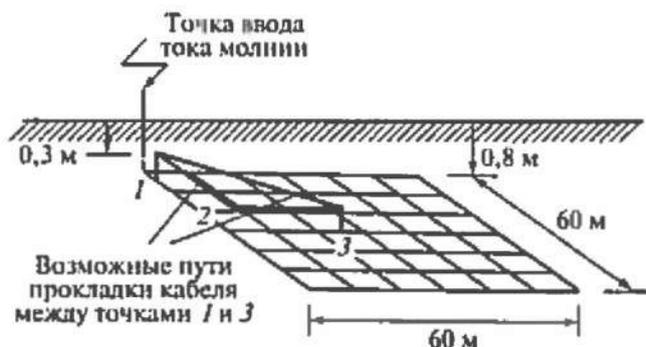


Рис. 10.22. Сетка заземления к две трассы прокладки кабеля

Синфазное напряжение, возникающее на незаземленном конце кабеля, может быть выражено как сумма двух составляющих:

$$U_T = \Delta\phi - U_l,$$

где $\Delta\phi$ - разность потенциалов заземлителя при переходном процессе, однозначно определяемая для точек 1 и 3; U_l - напряжение, определяемое трассой прокладки и изменяющимся магнитным полем.

На рис. 10.23 показаны напряжение при переходном процессе и обе его составляющие для обеих трасс прокладки кабеля (рис. 10.23, а для пути 1-2-3 и рис. 10.23, б для пути 1-3).

Из рис. 10.23, б видно, что в соответствии с выводами, сделанными на основе теории цепей, помехи частично ослабляются ЭДС, наведенной изменяющимся магнитным потоком. Этот эффект усиливается, если трасса прокладки кабеля совпадает с проводником заземления.

На практике на амплитуду и форму импульса напряжения могут оказывать влияние многие факторы. Некоторые факторы оказывают определяющее влияние на обе составляющие напряжения. Примером таких факторов являются форма импульса тока молнии и удельное сопротивление грунта.

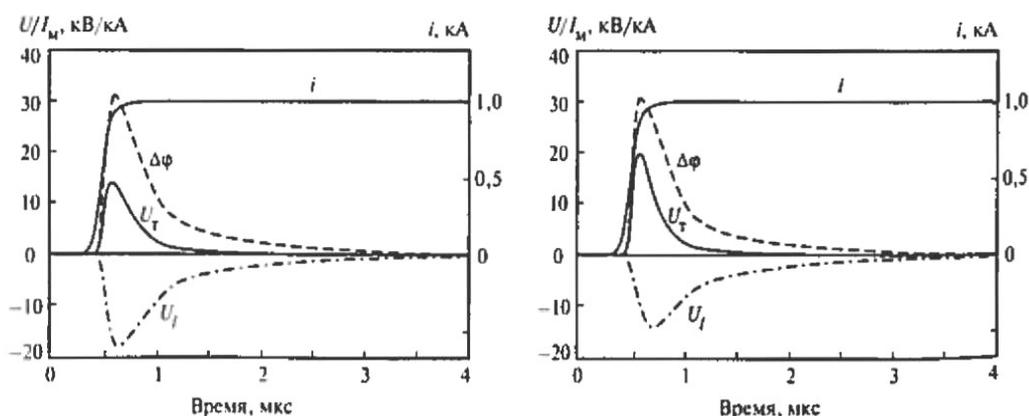


Рис. 10.23. Напряжения на незаземленном конце кабеля

На составляющую, связанную с повышением потенциала заземлителя оказывают влияние, главным образом, следующие факторы:

- точка ввода тока молнии в заземлитель;
- плотность сетки заземлителя в месте ввода тока молнии;
- точка заземления кабеля (его экрана).

На наведенную составляющую напряжения оказывают влияние факторы:

- трасса прокладки кабеля;
- расстояние от кабеля до контура заземления;
- наличие параллельного заземленного провода или надземной сети заземления.

Кроме того, существует множество других параметров, которые могут приниматься во внимание: форма заземлителя и его размеры, глубина прокладки, материал проводников, наличие вертикальных электродов и т.п.

В настоящее время стало возможным проведение подробного параметрического анализа, включающего в себя варьирование указанных параметров при помощи численных методов. Примеры соответствующих программ приведены в [1].

Прямой удар молнии в ВЛ встречается гораздо чаще, чем прямой удар молнии в ПС. Ее последствия имеют существенно меньшее значение.

Следствием удара молнии в ВЛ может быть перекрытие изоляции и, вследствие этого появление импульса напряжения с очень крутым фронтом, спектральный состав которого содержит гораздо более высокие частоты, чем импульс напряжения, вызванный самой молнией.

В этом случае уровень помех может сравняться с тем уровнем помех, который имеет место при пробое изоляции оборудования или коммутационных операциях на **самой ПС**.

Быстрые переходные процессы, вызванные коммутациями в цепях низкого напряжения. В индуктивных цепях низкого напряжения, связанных с цепями управления выключателями или разъединителями, а также в других цепях очень низкого напряжения (12-24 В), содержащих реле, при коммутациях могут иметь место быстрые переходные процессы, амплитуда

напряжения при которых может составлять несколько киловольт (подробнее см. §10.8).

Взаимодействие с чувствительными цепями происходит при связи через общее полное сопротивление в цепях питания или посредством емкостной и индуктивной связей между цепями (т.е. между жилами одного кабеля или между неэкранированными кабелями, проложенными в одном пучке). Однако происходит довольно быстрое демпфирование помех, и уровень помех в соседних цепях ограничивается.

Наряду с электромагнитными реле, источником помех также могут быть тиристоры, коммутации тока в цепях освещения (газоразрядные лампы). Последний источник создает гораздо более низкий уровень помех, чем реле и тиристоры.

Разряды статического электричества. Разряды статического электричества создают помехи, встречающиеся в любых условиях. Однако климатические условия (температура, влажность) на обычной ПС, в общем случае, контролируются гораздо менее строго, чем на электростанции или в помещении щита управления. Кроме того, в пределах ПС могут перемещаться транспортные средства и мебель, поэтому считается, что вероятность возникновения сильных разрядов статического электричества на ПС выше.

Возмущения, создаваемые радиопередающими устройствами. При работе бригад оперативного управления и ремонтных бригад в полевых условиях, а также в пределах здания широко используются портативные устройства радиосвязи

Иногда эти устройства применяются вблизи чувствительного электронного оборудования, которое может оставаться незащищенным при работе с ним (например, при открытых дверцах шкафов).

Известно, что напряженность электрического поля передатчика мощностью 5 Вт может превышать 10 В/м на расстоянии 50 см и 30 В/м на расстоянии 20 см от него. При воздействии этого излучения на оборудование могут происходить нежелательные отключения оборудования. При качественной проводке кабелей связь между полями радиочастотного диапазона и сигнальными или силовыми цепями возникает гораздо реже.

10.6. ПРИРОДА ВОЗНИКНОВЕНИЯ И УРОВНИ ПОМЕХ НА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Основные причины и источники возникновения помех. Проблемы ЭМС на электростанциях по сравнению с ПС имеют меньшую остроту. Среди основных причин можно назвать большие расстояния между оборудованием высокого и низкого напряжений и наличие лучшего контура заземления.

В частности, удары молнии и коммутационные операции на РУ высокого напряжения электростанции в очень редких случаях могут

становиться источниками помех на самой станции, между тем они могут быть причиной серьезных воздействий на ПС высокого напряжения.

Однако в отличие от подстанций, на электростанциях более часты случаи расположения чувствительного оборудования на обоих концах кабелей (например, электронные многофункциональные датчики на одном конце, аппаратура — на другом), что повышает требования к прокладке кабелей и выполнению их экранов.

Далее сделаем обзор основных источников возмущений на электрических станциях.

Максимальные токи КЗ в распределительных сетях среднего и низкого напряжения обычно составляют 10—20 кА. Однако на шинах генераторного напряжения токи КЗ могут достигать порядка 100 кА (при этом при двухстороннем питании токи КЗ от двух источников суммируются).

Очевидно, что сетка заземлителя вблизи генераторов или трансформаторов должна усиливаться в целях удовлетворения требований электробезопасности. В частности, это означает что ток возмущения возвратится к источнику по наиболее короткому пути и не будет оказывать воздействия на цепи, не находящиеся в непосредственной близости от места КЗ.

Однако следует позаботиться об ограничении токов, протекание которых возможно по экранам кабелей, присоединенных к этому оборудованию. Это может быть осуществлено при помощи прокладки дополнительного проводника или применения кабельного лотка.

Последствия удара молнии в электростанцию сильно зависят от точки удара. Если внешняя молниезащита основного здания была выполнена правильно, то не следует ожидать значительных уровней возмущений во внутренней проводке.

Ситуация предстает в немного другом свете, если удар молнии происходит в удаленную часть электростанции, расположенную не на основной части контура заземления. В этой ситуации возможно возникновения значительного подъема потенциала заземлителя и воздействие его на некоторые специфические цепи

Наличие на электростанциях многих цепей регулирования мощности, устройств изменения частоты вращения и другого оборудования делает более высокой вероятность возникновения кратковременных повторяющихся возмущений. По этой причине необходимо обращать особое внимание на прокладку чувствительных цепей (емкостная и индуктивная связь) и на фильтрацию в силовых цепях (связь через общее полное сопротивление).

Силовые кабели СН
Силовые кабели НН
Вторичные цепи
Цепи управления
Цепи измерения

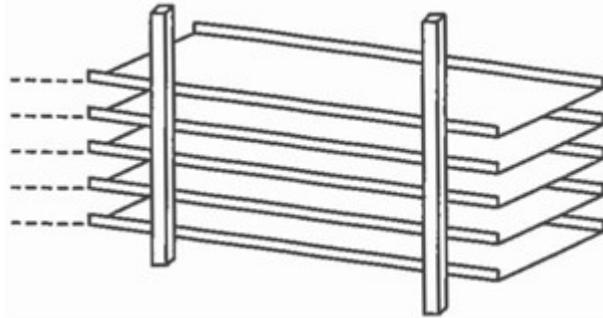


Рис. 10.24. Пример расположения лотков для прокладки кабелей различных типов. Лотки должны быть гальванически связаны с заземленными вертикальными рейками

В частности, использование отдельных кабельных лотков для кабелей, по которым передаются сигналы различных типов - это хороший способ избежать таких помех, улучшить сеть заземления (рис. 10.24).

Портативные радиопередатчики на ПС являются сложно определяемыми источниками помех, так как они могут присутствовать в любом месте и быть никак не связанными с типом электромагнитными окружения.

Стационарные радиоустановки, подобные пейджинговым системам, иногда могут оказывать влияние на нормальную работу аппаратуры, если антенна установлена вблизи цепей с сигналами низкого уровня.

Маловероятно, чтобы создаваемые ими поля радиочастотного диапазона оказывали непосредственное влияние на отдельные элементы аппаратуры, например интегральные схемы, транзисторы, диоды и т.п., однако они будут оказывать влияние на различные проводники, а наводимые напряжения и токи будут нежелательно воздействовать на электронные модули и оборудование, среди которых можно назвать:

- датчики температуры (искажение входных данных);
- системы управления (ложные срабатывания);
- передатчики сигналов (выдача сигналов неправильного уровня);
- электронные источники питания (нарушение стабильности уровня напряжения).

В большинстве аппаратов рабочие сигналы представляют собой сигналы постоянного или переменного токов низкой частоты, а диапазон воздействующих РЧ-помех не совпадает с их рабочим диапазоном. Однако наведенные помехи РЧ-диапазона могут оказывать нежелательное воздействие посредством различных механизмов связи. Может иметь место:

- перегрузка усилителей с большим коэффициентом усиления;
- выпрямление напряжения РЧ-диапазона нелинейными элементами (например, полупроводниковым переходом) и последующее создание помехи в виде выпрямленного напряжения или тока;
- демодуляция модулированного сигнала на полупроводниковом переходе и последующее создание напряжения помехи низкой частоты;

- кратковременные воздействия при включении или выключении передатчика.

Поля РЧ-диапазона от локальных передатчиков могут проникать в пределы корпуса оборудования с очень небольшим затуханием, если корпус выполнен не из металла или если размеры отверстий превышают 1/10 часть длины волны в металлическом корпусе или если боковые стенки металлического корпуса имеют плохой контакт друг с другом.

Проникновение полей РЧ-диапазона в аппаратуру через сигнальные кабели является преобладающим видом воздействия во многих подверженных помехам установках, так как воздействие осуществляется на наиболее чувствительные порты системы. В частности, это справедливо, если используются сигналы низкого уровня без фильтрации или промежуточного преобразования входного сигнала. Даже в случае с симметричными усилителями, когда наводка РЧ-диапазона является синфазной помехой, помеха все равно может иметь место, так как ослабление синфазной помехи активного устройства обычно уменьшается на высоких частотах и/или при высоких уровнях снижаемых синфазных напряжений.

К счастью, кабели общего применения для аппаратуры обычно выполнены из диэлектрических материалов, имеющих значительные потери на ОВЧ и УВЧ, вследствие чего в них происходит существенное затухание на этих частотах. Затухание в проводнике кабеля длиной 10 м на частоте 30 МГц может составить 10 дБ, на частоте 100 МГц - 20 дБ и на частоте 400 МГц - около 60 дБ. По этой причине, а также благодаря наличию металлических корпусов и других экранирующих элементов место и зона действия излучаемых полей в общем случае будут определяемыми, а помехи - незначительными.

Однако для рассматриваемого частотного диапазона (до 470 МГц) большинство проводников заземления, связанных с электронным оборудованием, являются электрически длинными. В частности, везде, где соединение между экранами кабеля и корпусами оборудования выполнено не коаксиально (по периметру), существует вероятность возникновения помехи.

В подобной ситуации находятся цепи датчиков (например, датчиков давления), подключенных к оборудованию сигнальными цепями на 4-20 мА и с удаленным питанием постоянным током. Наведенные в обмотках датчика напряжения порядка нескольких вольт могут с легкостью вызвать срабатывание преобразователя и изменить значение постоянного тока в цепи.

Следует отметить, что некоторые сервоприводы также очень чувствительны к помехам подобного рода. По указанным причинам максимально допустимая мощность ручных радиопередатчиков ограничена уровнем 200 мВт или еще меньше (на атомных электростанциях), а в некоторых странах они полностью запрещены.

Другие источники воздействий. Среди других возможных источников помех следует отметить электросварку, которая, подобно КЗ на частоте 50/60 Гц, может вызывать протекание значительных токов по сети заземления. Однако вопреки широко распространенному мнению решением проблемы

является выполнение сети заземления в виде многократно замкнутой, а не радиальной сети для создания кратчайшего пути возврата тока источника возмущения и снижения вероятности возникновения связи через общее полное сопротивление.

Кроме НЧ-помех данного типа, сварочные системы вследствие возникновения ВЧ-колебаний при работе сварочных пистолетов плазменного типа могут являться источниками излучения.

Излучение радара находится на самом конце спектрального диапазона помех.

Так как электростанции обычно располагаются вблизи загруженных водных путей, вероятность воздействия радаров на электронное оборудование ПС не так уж мала.

Хотя нам не известно о случаях воздействия помех такого типа на оборудование электростанций, на практике встречаются случаи возникновения помех от работы микроволновых радиосистем, связанные с прохождением судов по водным артериям вблизи объектов.

Уровни испытательных воздействий на оборудование ЭС и ПС. В §10.2 и 10.4 сформулированы основные положения, касающиеся прокладки кабелей и связанные с этим способы снижения помех, на основе описаний источников помех, приведенных в гл. 3, и путей передачи помех на восприимчивые к ним цепи (см. гл. 2).

Ранее были проанализированы возможные уровни возмущений в цепях различных типов.

Настоящий раздел является естественным продолжением предыдущих в части попыток оценить максимальный уровень возмущений, воздействующих на оборудование, и сопоставить его с испытательными воздействиями.

Электромагнитная обстановка зависит от природы возмущения, механизмов их передачи, места расположения оборудования и способов его подключения к другим устройствам.

По указанным причинам информационная связь между оборудованием осуществляется при помощи портов. Дать точные значения ожидаемых уровней помех невозможно вследствие наличия огромного числа влияющих факторов. По этим причинам уровни помех делятся на несколько классов, после чего становится возможным создание спецификации на тесты по помехозащищенности.

Нормы ГОСТ выделяют четыре класса ЭМО окружающей среды.

В соответствии с рекомендациями МЭК, можно выделить пять (или шесть) классов ЭМО от 0 класса (очень хорошо защищенного от помех объекта) до 4 класса (объект подвергается многим возмущениям) или даже специального класса X.

Помехи на сигнальных портах оборудования подразделяются на четыре класса (см. рис. 10.1 и 10.2 и табл. 10.3).

В данной классификации не учитывается, где установлено само оборудование - на электростанции, подстанции или в других условиях. Это

обусловлено тем, что многие источники кондуктивных помех (молния, быстрые переходные процессы в цепях низкого напряжения) не связаны с конкретным видом установки, а также потому, что методы снижения помех, в общем случае, применяются в условиях, где источники возмущений хорошо известны (например, быстрые переходные процессы при коммутациях в цепях высокого напряжения подстанций).

Ранее было сделано допущение о том, что воздействующие на оборудование возмущения на ПС высокого напряжения могут быть более сильными, чем в других местах, но при этом не должны зависеть от места расположения оборудования в пределах ПС или электростанции.

Таблица 10.3. Классификация сигнальных портов оборудования по уровням воздействующих помех

Класс	Характеристика объекта	Место присоединения порта
А	Защищенный объект	Оборудование, установленное в том же защищенном помещении с применением специальных способов подавления помех
В	Местное воздействие на объект	Имеется другое оборудование, расположенное в том же здании, кроме технологического или расположенного вблизи оборудования высокого напряжения
С	Объект находится в полевых условиях	Имеется другое оборудование, расположенное в пределах того же контура заземления, кроме оборудования высокого напряжения
Д	Оборудование высокого напряжения	Имеется оборудование высокого напряжения, сеть связи или оборудование, расположенное на другом контуре заземления

Кроме того, предполагалось, что для цепей питания, по сравнению с другими цепями, ЭМО является более сложной, но, опять же, не делалось никаких различий относительно места расположения установки, так как предполагалось, что для всего оборудования установки система электропитания общая.

Для получения общего представления о вероятных уровнях помех ниже приводятся некоторые типовые испытательные воздействия, используемые при сертификации оборудования (табл. 10.4—10.6).

Приводимые данные включают в себя некоторый запас по отношению к действительному уровню помехоустойчивости не только потому, что они являются тестовыми величинами, но и потому, что их выбор основан на допущении того, что часто используется минимальный набор методов снижения помех.

Также важно не путать классификацию электромагнитной обстановки, относящуюся к оборудованию (входным/выходным цепям), с уровнями воздействий при испытаниях на устойчивость к условиям среды, которые для каждой цепи в разных тестах могут отличаться друг от друга.

Таблица 10.4. Уровни воздействий при типовых испытаниях сигнальных входных/выходных цепей

Класс	Переменное напряжение частотой 50/60 Гц, В	Грозовой импульс, кВ	Напряжения, вызванные колебательными переходными процессами, кВ	Напряжения, вызванные быстрыми переходными процессами, кВ	Радиочастотные напряжения, В
B	100	1	-	1	10
C	300	2	1	2	10
D	300	4	2,5	4	10

Таблица 10.5. Уровни воздействий при типовых испытаниях силовых цепей питания переменным и постоянным током

Объект	Грозовой импульс, кВ	Напряжения, вызванные колебательными переходными процессами, кВ	Напряжения, вызванные быстрыми переходными процессами, кВ	Радиочастотные напряжения, В	Перерывы электропитания, с
Электростанции	2	1	2	10	Переменный ток-0,1
ПС высокого напряжения	4	2,5	4	10	Постоянный ток-0,05

Таблица 10.6. Уровни воздействий при типовых испытаниях экранирующих свойств корпуса оборудования

Объект	Напряженность магнитного поля частотой 50/60 Гц при переходных процессах, А/м	Напряженность постоянного магнитного поля, А/м	Напряженность ВЧ магнитного поля при переходных процессах, А/м	Напряженность поля радиочастотного диапазона, В/м	Электростатическое напряжение, кВ
Электростанции	100	100	30	10	8
ПС высокого напряжения	1000	100	100	10	15

10.7. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ СИСТЕМ КОМПЛЕКТНЫХ КРУЭ

Общие положения. Поскольку площадь, занимаемая КРУЭ, обычно составляет лишь 10—25 % площади открытых ПС, достичь требуемого сопротивления заземления становится труднее. Более того, отдельные элементы оборудования находятся близко друг к другу, что требует сетки высокой плотности, т.е. большего числа проводников в заданной области. Это обстоятельство позволяет снизить сопротивление заземления, но не является экономически эффективным путем, поскольку увеличение площади контура заземления более эффективно, чем увеличение числа проводников на единицу площади. Следовательно, впоследствии может оказаться необходимым применение дополнительных методов достижения необходимого сопротивления заземления.

Переходное напряжение корпуса появляется за счет протекания высокочастотных токов, а не токов промышленной частоты. Это напряжение возникает при ударах молнии, срабатывании молниезащитных разрядников, замыканиях на землю и повторных зажиганиях разряда между контактами при коммутациях в основном при отключениях. Они появляются под действием токов, протекающих через систему заземления и емкости КРУЭ, и могут иметь времена нарастания от 3 до 20 нс, но длиться не более 20—30 мс.

Высокочастотные токи вызывают локальные повышения потенциала за счет относительно высокой индуктивности обычных заземляющих проводников, например один 1 м прямого медного стержня имеет реактивное сопротивление около 60 Ом на частоте 10 МГц, тогда как на частоте 50 Гц сопротивление составляет примерно 0,003 Ом. Поэтому соединения должны короткими и прямыми насколько это можно, так как изгибы медных проводников также приводят к возрастанию реактивных сопротивлений на высоких частотах.

Все КРУЭ содержат преднамеренные разрывы корпуса в целях предотвращения протекания электрического тока с одной секции на другую, которые, однако, позволяют высокочастотным процессам распространяться за пределы КРУЭ.

Разрывы существуют в местах трансформаторных или реакторных вводов; кабельных муфт; изолированных фланцев, применяемых для крепления внешних трансформаторов тока, устанавливаемых вокруг металлического корпуса; соединения фланцев с корпусом; устройств мониторинга; вторичных обмоток измерительных трансформаторов.

В некоторых проектах корпусов КРУЭ основные фланцевые соединения делаются с применением изолирующей прокладки. В этом случае должны приниматься специальные меры для предотвращения появления искр в разрывах, которые могут вызвать срабатывание сигнализации у оперативного персонала.

Переходное напряжение корпуса электромагнитным путем воздействует на защитные, управляющие и коммуникационные цепи. Если заземление недостаточно эффективно, высокочастотные напряжения на корпусе КРУЭ могут достигать 50 кВ, что делает необходимым экранирование защитных, коммуникационных и управляющих кабелей,

присоединенных к корпусу КРУЭ и отделение их от корпуса везде, где только возможно.

Появление на КРУЭ переходных повышений напряжения часто ставит вопросы безопасности персонала, имеющего доступ к подстанции. Однако переходное повышение напряжения представляет собой кратковременное неэнергоемкое явление, и до сих пор не было оснований предполагать, что оно напрямую опасно для персонала, работающего на КРУЭ.

Возникновение искр в местах разрывов во время коммутаций может вызвать испуг работников и тем самым причинить им вред. Следовательно, представляется целесообразным ввести предупреждения, ограничивающие доступ персонала во время коммутаций.

Проектирование заземляющих систем КРУЭ. Контур заземления предназначен для создания пути малого сопротивления для токов КЗ, а также для высокочастотных токов, возникающих из-за переходного повышения напряжения.

Перед проектированием контура необходимо выяснить наибольший ток КЗ на землю, проводимость грунта и наибольший допустимый потенциал земли, после чего несложно рассчитать необходимое полное сопротивление заземления. Например, если наибольший допустимый потенциал составляет 650 В, а ток замыкания - 10 кА, полное сопротивление заземления должно быть менее 0,065 Ом. Указания по этому вопросу имеются в многочисленных национальных и международных стандартах. Для оптимизации конструкции контура заземления написаны компьютерные программы.

Обычно на открытых ПС обеспечить достаточно низкое сопротивление заземления можно с помощью неизолированной медной рамки, проложенной по периметру ПС, и внутренними проводниками для подключения различных элементов оборудования. Однако меньшая площадь, занимаемая КРУЭ, приводит к тому, что размеры контура будут меньше и, следовательно, могут потребоваться дополнительные мероприятия.

Увеличение суммарной длины проводников, проложенных внутри одиночной рамки, снизит сопротивление сетки, но не прямо пропорционально увеличению длины (рис. 10.25).

Однако, стремление обеспечить частые и короткие соединения между близко расположенными элементами оборудования служит дополнительным стимулом для прокладки сетки высокой плотности.

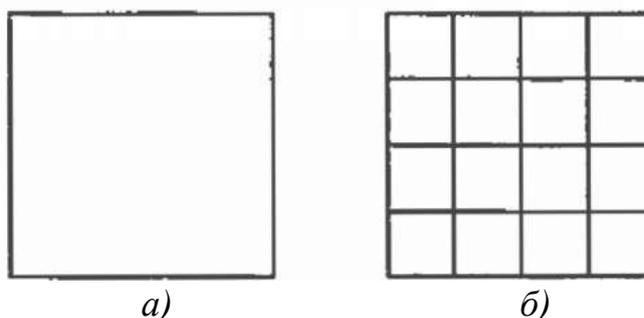


Рис. 10.25. Структуры сеток:

а - суммарная длина проводников 55,2 м; относительное сопротивление 0,0518 Ом/(Ом·м) при частоте 50 Гц; б - суммарная длина проводников 138 м; относительное сопротивление 0,0419 Ом/(Ом·м) при частоте 50 Гц

Если используется сплошное железобетонное основание, то соединение железной арматуры с контуром заземления безусловно приведет к снижению полного сопротивления заземления и обеспечит лучшее выравнивание потенциала внутри основания и по поверхности пола. Желательно, чтобы стержни арматуры были соединены друг с другом. Это мероприятие влечет за собой ряд практических затруднений, например необходимость осуществления заземления через бетонное основание и требование исключения нежелательных контуров высокочастотного тока. Возможно положить сетку сверху бетонного основания, но это увеличит сопротивление заземления, потому что сетка не будет проложена в земле.

Снижение сопротивления заземления до допустимо малого значения невозможно с помощью описанных выше методов, поэтому для этой цели могут оказаться полезными вертикальные заземляющие стержни и химическая обработка грунта.

Расчетные сопротивления заземления могут быть получены с помощью эмпирических формул, приведенных в различных стандартах, тем не менее, рекомендуется проведение измерений по завершении строительства. В случае необходимости проводят дополнительные мероприятия.

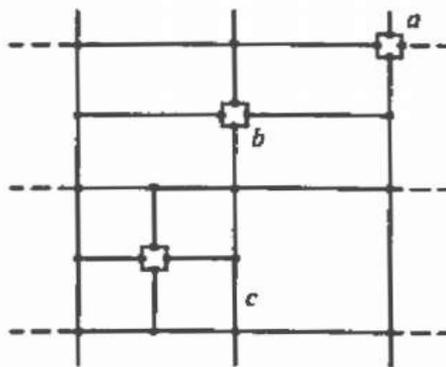


Рис. 10.26. Соединения оборудования с контуром заземления

Частые соединения корпуса КРУЭ с контуром заземления и то обстоятельство, что фазные оболочки также соединены друг с другом, снизит напряжения шага и прикосновения в пределах площади, занятой КРУЭ. Соединения должны быть короткими и прямыми насколько возможно для снижения их сопротивления при высоких частотах.

На рис. 10.26 показано, что оборудование может быть подключено в точке пересечения сетки (а) или с помощью дополнительных соединений (в и с).

Требование выполнять соединения с землей насколько возможно короткими и прямыми предполагает, что корпус КРУЭ находится как можно ближе к поверхности земли, хотя это соображение не должно быть определяющим при проектировании самого КРУЭ.

На разрывах в корпусе КРУЭ могут возникать высокочастотные напряжения и поэтому необходимо принять меры по их снижению.

Применение изоляционных фланцев для кабельных вводов приводит к разрыву оболочки корпуса. Доступно простое и экономичное решение проблемы путем установки нелинейных резисторов (варисторов), симметрично подключенных короткими соединительными проводами вокруг фланца (рис. 10.27). Вместо нелинейных Резисторов можно использовать помехоподавляющие конденсаторы.

Там, где оборудование КРУЭ подключается к трансформатору, реактору и другому оборудованию с помощью вводов, требование разделить металлические оболочки двух элементов приводит к необходимости изоляции двух фланцев и соответственно к разрыву в корпусе. Высокочастотная разность потенциалов на разрыве может быть снижена до допустимого уровня путем установки нелинейных сопротивлений (рис. 10.28). В ряде случаев металлические оболочки принудительно соединяют друг с другом, но даже несмотря на это возможно проявление импульсного сопротивления соединений.

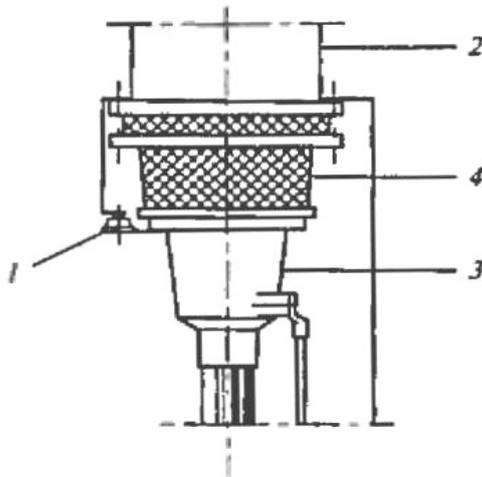


Рис. 10.27. Включение варистора между металлическим корпусом КРУЭ и металлическими частями кабеля:

1 - варистор; 2 - металлический корпус КРУЭ; 3 - металлическая часть концевой муфты, 4 - изолятор

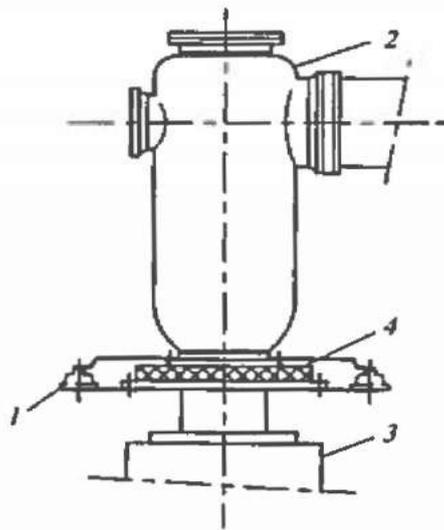


Рис. 10.28. Включение варистора между металлическим корпусом КРУЭ и баком трансформатора:

1 - нелинейное сопротивление; 2 - металлический корпус КРУЭ; 3 - бак трансформатора; 4 - изолятор

Если трансформаторы тока установлены на внешней стороне корпуса, то необходимо устранить протекание токов промышленной частоты по корпусу в направлении, противоположном току КЗ в основном проводнике. Соответственно в этих местах необходима установка изолирующих фланцев. Это приводит к появлению еще одного вида разрыва бака с соответствующей опасностью появления большой разности потенциалов высокой частоты. Устранить проблему можно путем установки специально спроектированных шунтов вокруг ТТ или, что более предпочтительно, варисторов, включенных симметрично вокруг фланца (рис. 10.29). В ряде случаев можно использовать искровые промежутки. Также могут оказаться эффективными помехоподавляющие конденсаторы.

Несмотря на то, что для элегазовых вводов не применяют изолированные фланцы, тем не менее, за счет различия импульсных сопротивлений внутренних шинпроводов и вводов существует разрыв корпуса, и важно свести к минимуму высокочастотное сопротивление заземляющих проводников у вводов. Должны быть приняты все меры для того, чтобы устанавливая вводы как можно ближе к земле так, чтобы длина заземляющих проводников была как можно более короткой.

Место, в котором КРУЭ входит в здание, предоставляет великолепную возможность улучшения соединений с землей, особенно если КРУЭ заканчивается элегазовым вводом вне здания. В этих условиях появится возможность обеспечить путь низкого сопротивления для проходящей волны.

Компоновка, показанная на рис. 10.30, обеспечивает идеальный метод предотвращения входа в здание импульсов. Для наибольшей эффективности корпус КРУЭ должен быть хорошо соединен с металлическими частями

окружающих стен, которые, в свою очередь, должны быть соединены с контуром заземления, по крайней мере, в двух точках, а желательно в большем количестве точек. В качестве альтернативного варианта можно выполнить стены целиком из металла, при этом, конечно, обеспечив их хорошее соединение с корпусом КРУЭ.

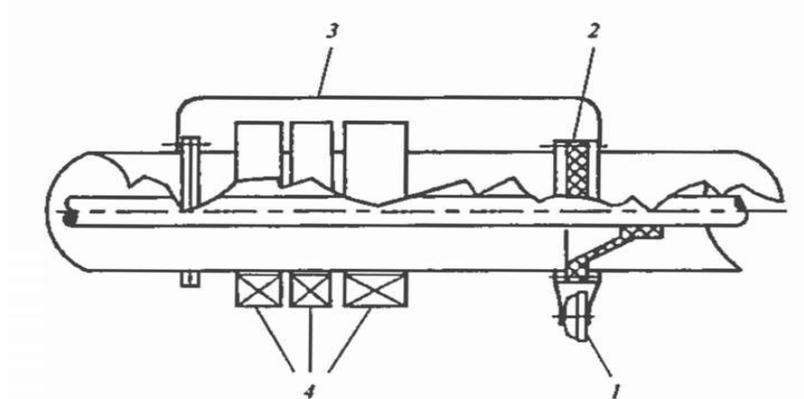


Рис. 10.29. Шунтирование разрыва металлического корпуса варистором:
 1 - варистор; 2 - изолятор; 3 - шунт; 4 - трансформатор тока

Варисторы, спроектированные специально для защиты разрывов корпуса КРУЭ, как правило, недоступны. Следовательно, проектировщик систем заземления должен либо адаптировать варисторы, предназначенные для других целей, либо разработать варисторы собственного производства, оптимизированные для достижения указанной цели. Во внимание следует принять такие факторы, как реакция на ступенчатое воздействие, номинальное напряжение и поглощаемая энергия. Особое внимание должно быть уделено снижению индуктивностей путем тщательного проектирования заземлителей.

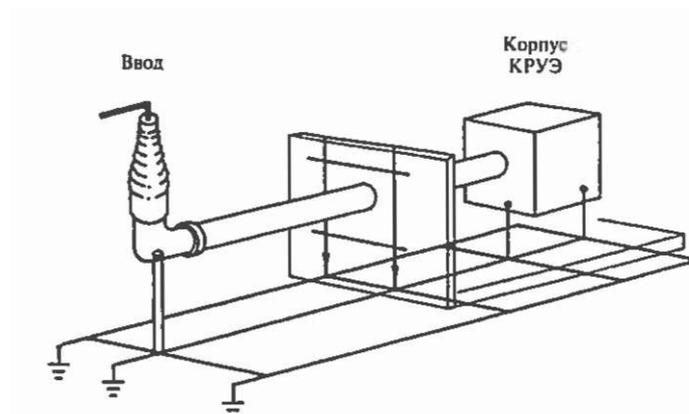


Рис. 10.30. Экранирование элегазового ввода на входе в здание

Проектировщику заземляющих систем должно быть очевидно, что при значительном расстоянии между концами кабелей управления и при

сравнительно большом высокочастотном сопротивлении соединений с землей, если не принять специальные меры, возможно появление большой разности потенциалов между концами управляющего кабеля (сотни киловольт).

Ситуацию можно облегчить, если тщательно выбирать пути прокладки управляющих кабелей и экранировать их. Связь между корпусом и управляющими кабелями можно уменьшить, если последние расположить как можно дальше от корпуса и после точек входа (например, точек подключения ТТ) как можно быстрее увести их от корпуса.

Частотный диапазон помех на КРУЭ приводит к необходимости применять сплошные экраны; плетенные экраны ограничены в применении за счет их большого сопротивления на высоких частотах. Эффективного экранирования, тем не менее, можно добиться путем заключения отдельных кабелей в собственные экраны или заключения группы кабелей в металлические кабельные каналы или полностью замкнутые кабельные лотки. Эти экраны должны быть соединены с оборудованием, например реле давления газа, и заземлены на противоположном конце кабеля прямыми короткими соединениями.

Если некоторые устройства управления, защиты или телекоммуникации, связанные с КРУЭ, имеют очень высокий уровень чувствительности, или, если релейный шкаф расположен внутри КРУЭ, может оказаться необходимым осуществить полное экранирование шкафов, содержащих оборудование. При применении клетки Фарадея кабели от шкафа управления КРУЭ должны быть полностью экранированы, и экраны соединены с экраном клетки по возможности напрямую. Для кабелей длиннее 60 м может оказаться необходимым применение разделительных трансформаторов или реле.

При усиливающейся тенденции устанавливать оборудование управления вблизи коммутирующих устройств возможность опасного их взаимного влияния возрастает.

Переходные напряжения, передаваемые измерительными трансформаторами во вторичные цепи, могут быть снижены путем тщательного расположения заземляющих проводов в трансформаторе и внутреннего экранирования вторичных обмоток.

Оценка влияния переходного потенциала корпуса. Явление повышения переходного потенциала корпуса вследствие протекания высокочастотных токов по корпусу, также известное как переходное повышение потенциала земли, состоит из кратковременного переходного процесса при высоких уровнях напряжения на внешней поверхности корпуса КРУЭ, связанного с пробоем элегаза, внутренними повторными зажиганиями между контактами работающих выключателей и разъединителей или внешними пробоями изоляции.

В любом случае скачок потенциала приводит к появлению импульсов, распространяющихся во всех возможных направлениях от точки пробоя. Эти

импульсы, характеризующиеся очень короткой длительностью фронта, вызывают очень быстрые перенапряжения.

Существуют две причины возникновения повышения напряжения корпуса КРУЭ:

- пробой элегаза между фазным проводом и корпусом (замыкание на землю);
- повторные зажигания дуги между контактами работающих разъединителей и выключателей.

В обоих случаях импульсы распространяются внутри коаксиальных шин (вследствие поверхностного эффекта) подстанции до точки разрыва. Точку разрыва можно смоделировать двумя линиями передачи с разными волновыми сопротивлениями. В этой точке импульс попадает на внешнюю поверхность корпуса КРУЭ, вызывая тем самым переходное повышение напряжения.

Наиболее типично возникновение разрывов на воздушных и на кабельных вводах КРУЭ (рис. 10.31, 10.32).

Остальные представляющие интерес разрывы возникают у трансформаторов тока, установленных снаружи корпуса, и, в ряде случаев, также у фланцев всех опорных изоляторов.

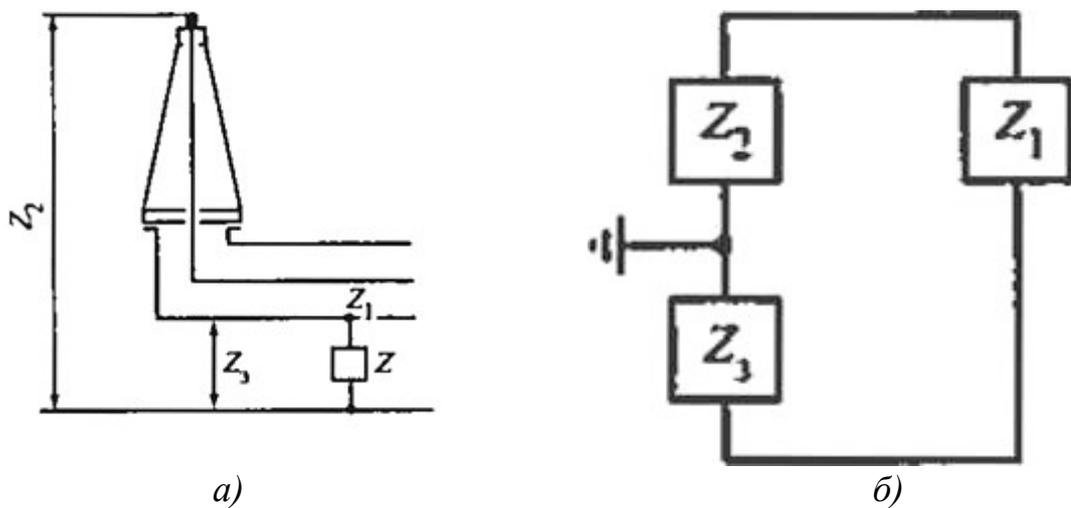


Рис. 10.31. Воздушный ввод в КРУЭ (а) и его схема замещения (б)

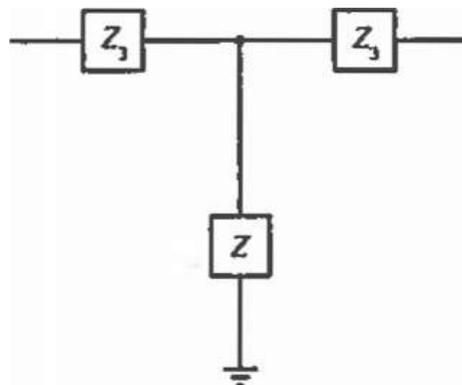


Рис. 10.32. Схема для оценки распространения импульса за пределы КРУЭ

При замыкании на землю сначала появляется скачкообразное изменение напряжения, амплитуда которого на разрыве равна пробивному напряжению разрыва. Можно принять, что максимальная амплитуда импульса напряжения составляет

$$U_{100\%} = 1,2 \cdot 1,12 U_{н.п.},$$

где коэффициент 1,2 составляет отношение между пробивными напряжениями при положительной и отрицательной полярностях; $U_{н.п.}$ - импульсная прочность; коэффициент 1,12 осуществляет переход от $U_{н.п.}$ (10 %-ная вероятность пробоя) к 100 %-ной вероятности (полагая, что закон распределения $U_{н.п.}$ нормальный, среднеквадратичное отклонение $\sigma = 6\%$).

При наличии внутренних дефектов можно получить внутренние пробои при уровнях напряжения меньших $U_{н.п.КРУЭ}$; в этом случае возникающие отражения импульсов от разомкнутых концов могут приводить к вторичным пробоям на более высоких уровнях напряжения, вплоть до $U_{100\%}$. В частности, это может происходить во время испытаний изоляции, даже если координация изоляции была осуществлена верно.

Скачок напряжения при внутреннем пробое характеризуется временем нарастания T , нижний предел которого, нс, можно оценить как

$$T = (1 \div 1,5) / p,$$

где p — давление газа.

При внутренних повторных зажиганиях наибольшая разность потенциалов между контактами равна примерно трехкратному номинальному напряжению, при коммутации ненагруженного трансформатора (индуктивная нагрузка) — контура — двукратному для разъединителей. Из-за пробоя между контактами возникает два импульса напряжения, распространяющихся в противоположных направлениях к точкам разрыва, причем амплитуда каждого скачка составляет половину от начальной разности потенциалов.

Далее рассматриваются коэффициенты преломления, относящиеся к распространению первого скачка напряжения при внутреннем пробое, для каждого из двух Равных видов разрыва в КРУЭ, т.е. для воздушных и кабельных вводов в КРУЭ.

Воздушный ввод можно представить как соединение трех длинных линий (см. рис. 10.31). Преломление падающей внутренней волны на воздушную линию и на корпус приводит к повышению напряжения

относительно земли, амплитуда которого может быть получена умножением амплитуды начального скачка, появившегося внутри КРУЭ на коаксиальном шинопроводе, на коэффициент

$$S_1 = \frac{-2Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3},$$

где Z_1 - волновое сопротивление коаксиального шинопровода; Z_2 - волновое сопротивление линии; Z_3 - волновое сопротивление корпуса (относительно земли).

Когда волна распространяется на внешнюю сторону корпуса, в процесс вовлекаются соединительные провода с землей и соседними фазами, которые можно рассматривать как длинные линии.

Амплитуда скачка, распространяющегося в сторону соединителей, определяется умножением амплитуды начального скачка на передаточный коэффициент соединения (см. рис. 10.32):

$$S_2 = \frac{-2Z_3}{2Z + Z_3},$$

где Z - волновое сопротивление заземляющих проводников.

Часть волны, распространяющаяся вдоль заземляющих проводников, отражается в точке соединения с землей и возвращается к корпусу с обратным знаком, где снижает напряжение исходной волны (рис. 10.33). Если длина заземляющего проводника такова, что удвоенное время пробега меньше времени фронта исходного скачка напряжения, то изменение напряжения происходит до достижения максимального значения, т.е. на фронте скачка.

Экраны кабелей и корпус КРУЭ обычно разделены изоляционной муфтой и соединяются с землей отдельно. Соединение кабеля и КРУЭ может быть представлено схемой на рис. 10.34. Передаточный коэффициент, связывающий амплитуду волны между корпусом и землей определяется следующим образом:

$$S = \frac{-2Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_c},$$

где Z_c - волновое сопротивление экрана кабеля.

Обычно между экраном кабеля или корпусом КРУЭ установлены варисторы, конденсаторы или искровые промежутки, предназначенные для снижения быстрых перенапряжений на корпусе за счет обеспечения электрической целостности.



Рис. 10.33. Распространение импульса по заземляющему проводнику

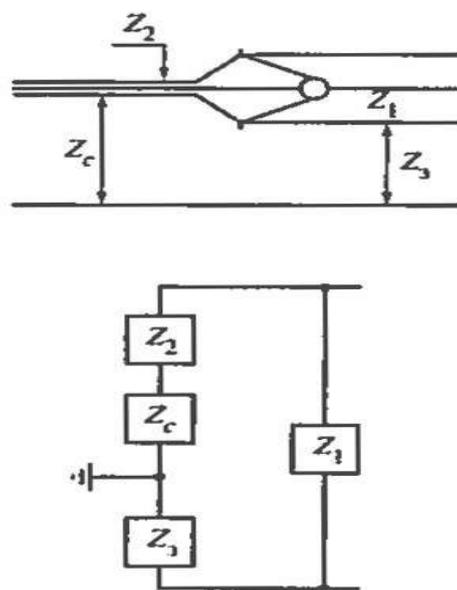


Рис. 10.34. Схема для расчета перенапряжений на корпусе, обусловленных вводом кабеля в КРУЭ

Падение напряжения на конденсаторе, варисторе или искровом промежутке в сумме с падением напряжения на соединительных проводниках определяют напряжение, приложенное к последовательной цепи, образуемой Z_c и Z_3 (рис. 10.35).

С учетом сказанного выше можно констатировать, что наиболее тяжелые условия возникают на воздушных вводах КРУЭ. Для одной фазы корпуса КРУЭ интересующие нас волновые сопротивления можно рассчитать следующим образом:

- для коаксиальной системы $Z = 60 \ln(R/r)$;
- для системы цилиндр – плоскость $Z = 60 \ln[(h + \sqrt{h^2 - R^2})/R]$, где r - радиус внутреннего проводника; R - радиус корпуса; h - расстояние (высота) между центром проводника и плоскостью земли.

Следует иметь в виду, что формула для системы цилиндр - плоскость - приближенная.

Волновое сопротивление вертикального заземляющего проводника может быть приближенно получено так же, как для горизонтального проводника, находящегося на высоте середины вертикального. Волновые сопротивления других элементов перехода меняются в широком диапазоне.

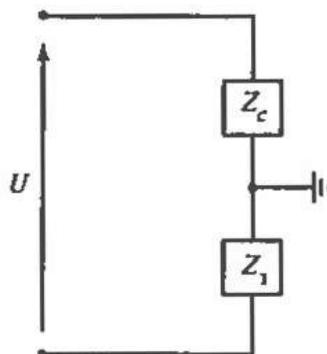


Рис. 10.35. Схема включения ограничителя в точке воздушного ввода в КРУЭ

Ориентировочные значения следующие:

$Z_1 \dots 60-90 \text{ Ом}; Z_2 \dots 350-450 \text{ Ом};$
 $Z_3 \dots 200-260 \text{ Ом}; Z_4 \dots 150-300 \text{ Ом}.$

При указанных сопротивлениях коэффициенты S_1 и S_2 , определенные для воздушного ввода, принимают значения:

$$S_1 = 0,54 \div 0,78 \quad \text{и} \quad S_2 = 0,54 \div 0,75$$

Учитывая, что на некотором расстоянии корпуса каждой из трех фаз очень близки и, следовательно, соединены параллельно, полное волновое сопротивление корпуса может рассматриваться как параллельное соединение трех волновых сопротивлений трех корпусов. В этом случае диапазон S_1 снижается до 0,1—0,18.

Более того, наличие нескольких заземляющих проводников может привести к снижению сопротивления Z , уменьшая тем самым S_2 .

Пробой снаружи КРУЭ. Основной причиной быстрых переходных процессов, приходящих извне, являются пробой линейной изоляции, вызванные, например, обратными перекрытиями. Вследствие этого максимальное значение напряжения импульса, набегающего на КРУЭ, может быть определено из уровня электрической прочности линии. Это значение определяется для положительной полярности и 10%-ной вероятности пробоя. Следовательно, максимальное значение получается умножением уровня

прочности на коэффициент 1,15, учитывающий возможность пробоя при отрицательной полярности, и на коэффициент 1,12 для достижения 100%-ной вероятности пробоя (как это было выше сделано для внутренних КЗ):

$$U_{100\%} = 1,15 \cdot 1,12 U_{пр.л.}$$

Получающийся скачок напряжения характеризуется крутизной примерно 2000 кВ/мс.

Коэффициенты преломления такие же, как и для внутренних пробоев.

Критичность начального броска напряжения. Очевидно, что амплитуда и форма быстрых переходных напряжений являются функциями начального скачка напряжения, а также конфигурации подстанции.

Из рассмотренных выше значений амплитуд и длительностей фронта начальных скачков напряжения следует, что источником наибольших переходных повышений напряжения являются пробой внутри КРУЭ. Повторные зажигания между контактами дают много меньшие напряжения, но они возникают в ходе нормальной работы подстанции. Более того, за время отключения секции шин разъединителем возможно возникновение десятков и сотен повторных зажиганий между контактами.

Испытания и обслуживание заземляющих установок КРУЭ. Основной причиной для проведения измерений заземляющей установки является проверка соответствия новой установки проекту и выявление дополнительных мер, необходимых для защиты персонала и управляющих или коммутационных устройств. Измерения также рекомендуется проводить после серьезных изменений, влияющих на базовые требования, и через регулярные промежутки времени (от 5 до 10 лет) для проверки работоспособности заземляющей конструкции. Измерения обычно дают более надежные результаты, чем расчеты и в любом случае всегда полезны для проверки последних.

Удобный метод, базирующийся на инъекции тока с помощью вспомогательного электрода, применен в некоторых коммерчески доступных измерительных устройствах и позволяет напрямую получить значение сопротивления заземления.

Для больших установок, где расстояние до вспомогательного электрода велико, эффекты индукции в длинных измерительных кабелях могут приводить к ощутимым ошибкам. Они могут быть снижены путем увеличения инъектируемого тока.

Инспектирование и испытания контура заземления и соединительных проводников должны проводиться до ввода установки в эксплуатацию. Необходимо убедиться в надежности всех соединений. При измерении контактного сопротивления проводников одинакового размера измерительные зажимы должны располагаться на расстоянии примерно 25 мм с каждой стороны соединителя. Контактное сопротивление не должно превосходить сопротивления аналогичного проводника эквивалентной

длины. Если соединяются проводники различного сечения, сопротивление не должно превышать 75 % сопротивления проводника наименьшего сечения эквивалентной длины.

Указанные выше проверки и испытания должны повторяться через интервалы обслуживания, когда устраняются последствия погодных, разрушающих или коррозионных воздействий.

Испытания и проверки должны быть направлены на обеспечение целостности заземляющей конструкции при токах промышленной частоты, но для высокочастотных цепей возможно принятие дополнительных мер.

Так как высокочастотные явления возникают в основном из-за коммутаций разъединителями, работа заземляющей конструкции при высокочастотных переходных воздействиях вероятно может быть оценена при плановой коммутации разъединителем на этапе сдачи подстанции в эксплуатацию. Во время таких коммутаций нужно проверить петли образования искр у фланцев и ошибок в работе защитных и управляющих систем.

Предполагается, что все оборудование вторичных цепей проходит проверку на ЭМС в заводских условиях и что цель всех испытаний на месте установки сводится к проверке корректности транспортировки и монтажа оборудования. Испытания показывают также, не воздействует ли каким-либо образом КРУЭ на оборудование вторичных цепей.

Вопросы компоновки КРУЭ привносят в процесс проектирования заземляющих систем ряд факторов, не присущих традиционным открытым подстанциям. Тем не менее, выполняя представленные выше указания, можно проектировать заземляющие системы, нечувствительные к повышению переходного напряжения.

Таким образом, очевидно, что между производителем КРУЭ и потребителем должна быть тесная координация решений различных аспектов задачи проектирования систем заземления на ранних этапах. Также на этапе проектирования требуется обеспечить тесное взаимодействие между различными производителями, вовлеченными в строительство подстанции. Устранение недоработок после ввода оборудования в эксплуатацию может оказаться дорогостоящим и неудобным мероприятием.

10.8. ОГРАНИЧЕНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ В ЦЕПЯХ УПРАВЛЕНИЯ С ИНДУКТИВНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

В индуктивных цепях электрического оборудования, включающих, например, обмотки возбуждения двигателей или устройства с электромагнитным приводом, такие как реле, а также соединительные силовые и управляющие провода при отключениях и включениях возникают перенапряжения с высокими крутизной и частотой колебания, попадающие в сеть питания.

Индуктивные элементы в цепи тока принадлежат, таким образом, к источникам интенсивных помех. Если они эксплуатируются в тесном пространственном расположении с электронными узлами, например» внутри одного прибора, одного управляющего шкафа или установки ожидаемы⁶ перенапряжения путем соответствующих мер необходимо снизить до уровня, допустимого для электронных приборов и систем.

Ниже будут рассмотрены физические причины, порядки величин и принципиальные временные диаграммы этих переходных перенапряжений и также описаны выбор, измерение и расположение соответствующих средств для их ограничения.

10.8.1. Физические процессы при коммутациях в индуктивных цепях

На рис. 10.36 в упрощенном виде показана модель взаимодействия между цепью тока возбуждения электромагнитного устройства и цепью тока систем РЗА и автоматизированного и автоматического управления технологическим процессом. Обе цепи гальванически разделены из соображений помехозащищенности, однако связаны через практически всегда имеющиеся паразитные емкости C_{13} , C_{14} , C_{23} , C_{24} . Кроме того, через сцепление магнитных потоков обоих контуров возникает индуктивная связь, характеризующаяся взаимной индукцией M . Вследствие возникающего при разрядных явлениях между контактами выключателя СВЧ-излучения возможно неблагоприятное влияние дальнего поля на логические цепи систем РЗА и автоматизированного и автоматического управления технологическим процессами.

При включении прибора Y емкость C_s заряжается через сопротивление R_s (внутреннее сопротивление источника напряжения и сопротивление линии) и индуктивность L_s . При идеально быстро включающемся выключателе в контуре $L_s C_s$ развивается электрический колебательный затухающий процесс, который в основном определяется параметрами L_s и C_s . Он протекает с частотой $f_3 = 1/(2\pi\sqrt{L_s C_s})$ (рис. 10.37) и максимальным напряжением U_{smax} на катушке индуктивности.

Напряжение U_{smax} может лежать между 300 В и несколькими киловольтами, скорости изменения напряжения — от 1 до 1000 В/мкс, общая длительность процесса лежит в микросекундной области, а частота — в границах от 10^6 до 10^8 Гц.

Образование помех затрудняется тем, что для срабатывания реального выключателя требуется конечное время.

Например, для тиристора оно образуется из времени, которое необходимо, чтобы заполнить достаточно большие зоны полупроводникового материала носителями заряда, а для выключателей с

подвижными контактами, включающими напряжение, равное или более 300 В, из времени, за которое образуется проводимость искрового разряда.

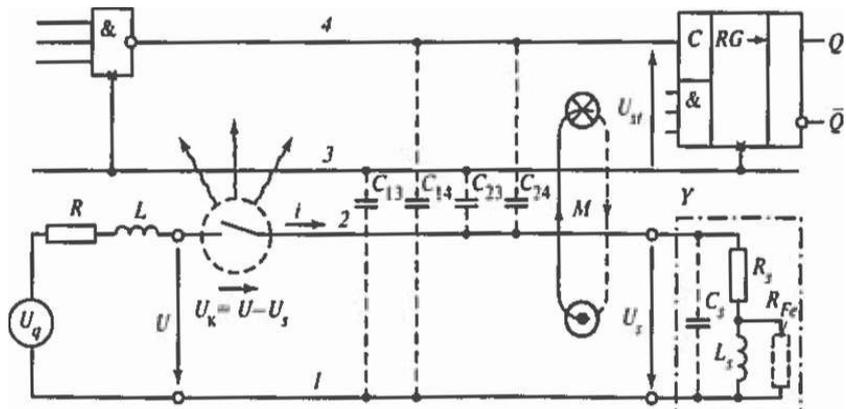


Рис. 10.36. Модель взаимодействия цепи, содержащей индуктивный элемент, с логической цепью системы автоматизированного и автоматического управления технологическим устройством

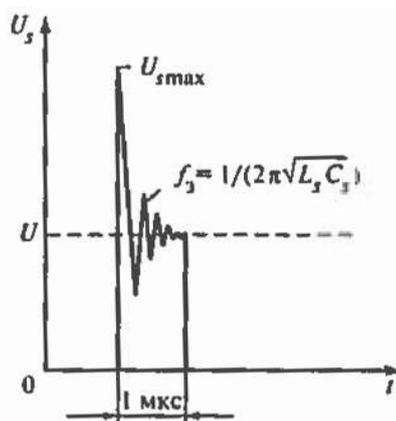


Рис. 10.37. Типичная форма импульса U_s напряжения на катушке при включении

Типичные времена срабатывания мощных тиристоров (0,2—4 кВ) от 5 до 200 мкс, реле и герконов — примерно 3 нс.

Процесс включения контактных устройств вследствие явлений вибрации и других физических процессов состоит из ряда следующих друг за другом циклов замыкания и размыкания. Поэтому в течение включения возникают несколько изображенных на рис. 10.37 затухающих процессов, типичных для процессов отключения (см. ниже). Таким образом, в целом каждый процесс включения электромагнитного устройства необходимо оценивать как потенциальную причину помехи.

При отключении электромагнитного устройства, т.е. при внезапном прерывании стационарного тока возбуждения i в колебательном контуре, образованном R_s , L_s и C_s также происходит электрический колебательный

затухающий процесс, при котором запасенная к моменту отключения в L_s и C_s энергия в R_s превращается в тепло. Если опять предположить наличие в цепи тока быстрого, почти идеального выключателя, то этот затухающий процесс протекает либо колебательно с частотой $f_c \approx 1/(2\pi\sqrt{L_s C_s})$ (рис. 10.38, а) или аperiodически затухая (рис. 10.38, б). Вид импульса напряжения на катушке U_s , приведенный на рис. 10.38, а типичен для устройств с магнитопроводом, набранным из отдельных пластин, а вид на рис. 10.38, б - для устройств с массивным магнитопроводом. Сильно затухающий процесс на рис. 10.38, б можно объяснить влиянием R_{Fe} сопротивления потерь в стали массивного магнитопровода.

Без специальных мер затухающие процессы в обоих случаях сопровождаются высокими перенапряжениями $U_{s \max}$ и большими скоростями изменения напряжения dU_s/dt .

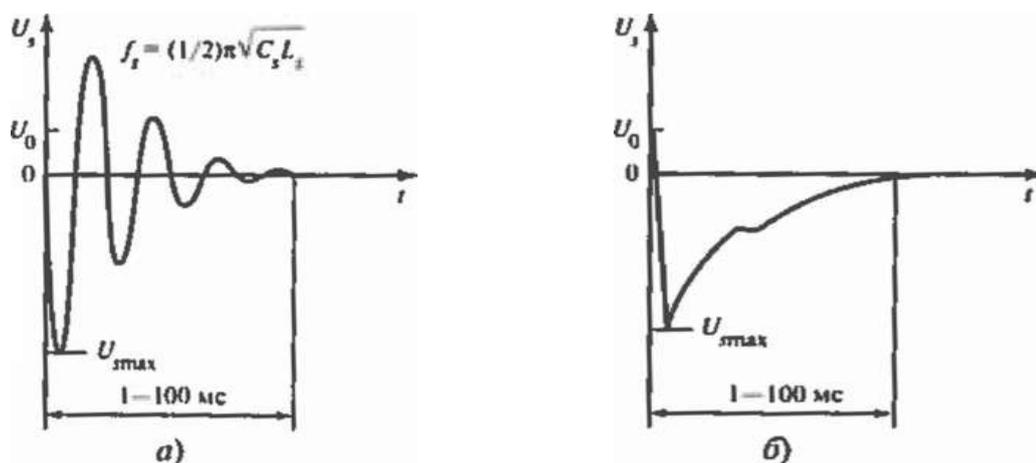


Рис. 10.38. Типичные импульсы напряжения на катушке U_s при отключении тока идеальным выключателем:
 а – наборный магнитопровод; б – массивный магнитопровод

Максимальное, теоретически возможное, перенапряжение на катушке может быть оценено, исходя из баланса энергии

$$C_s \frac{U_{s \max}^2}{2} \approx L_s \frac{i^2}{2}, \quad (10.1)$$

а максимально возможное значение производной по времени $(dU_s/dt)_{\max}$, - исходя из описывающего затухающий процесс дифференциального уравнения. Если положить в основу практически всегда выполняющееся условие $C_s R_s \ll L_s / R_s$ и пренебречь влиянием R_s , можно получить в итоге для обеих величин, простые соотношения:

Параметр... $U_{smax} \left(\frac{dU_s}{dt} \right)_{max} \sim f_s$

Формула... $\sim i \sqrt{\frac{L_s}{C_s}} \sim \frac{i}{C_s} \sim 1/(2\pi\sqrt{L_s C_s})$.

Теоретическое значение U_{smax} , однако, не достигается, поскольку:

- часть запасенной к моменту отключения в L_s энергии $W_s = L_s \frac{i^2}{2}$ при перезарядке превращается в тепло в сопротивлении обмотки R_s ;
- вихревые токи и потери на гистерезис также поглощают часть энергии W_s , особенно при массивном магнитопроводе;
- при отключении контактным отключающим устройством между контактами, как правило, начинается разрядный процесс, который также поглощает часть энергии W_s .

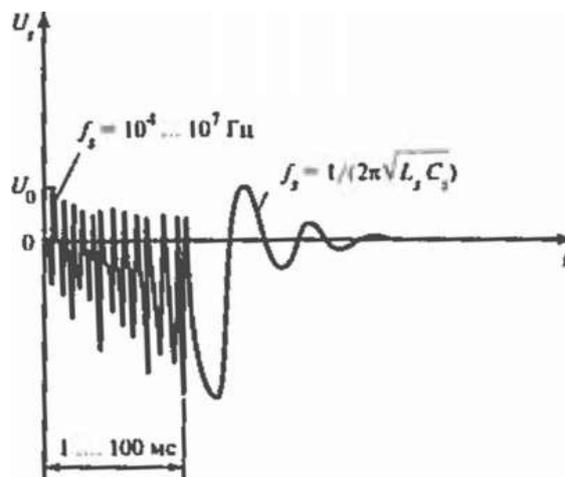


Рис. 10.39. Процесс отключения с щеточным явлением

Параметры U_{smax} , $(dU_s/dt)_{max}$ имеют следующие воздействия:

- изоляция обмоток электромагнитного Устройства подвергается перенапряжениям, так как $U_{smax} \gg U$;
- **в выключателях в зависимости от возможного значения тока возникают тлеющие, искровые или дуговые разряды между контактами. Из-за этого, в частности, контакт-промежуток в течение времени отключения многократно размыкается и замыкается. Это ведет к известным явлениям на графике напряжения катушки (рис. 10.39). Частота, сопровождающая щеточные явления, лежит в области 10^4 - 10^7 Гц. Таким образом, явления разряда, с одной стороны, являются источником интенсивных ВЧ- помех, а с другой, особенно в цепях постоянного тока с большими индуктивностями, причиной сильного износа контактов;**

- в расположенных рядом цепях РЗА возникают кратковременные помехи, либо нарушается работа логических элементов, если наведенное через $C_{13}, C_{14}, C_{23}, C_{24}$ и M напряжение помехи U_s (рис. 10.38, б) либо энергия помехи через излучение превышают порог помехоустойчивости.

В цепях электромагнитных устройств, содержащих индуктивный элемент, всегда требуются меры для подавления ожидаемых перенапряжений при отключениях. Это удастся осуществить схемными комбинациями из пассивных или активных элементов. Их структурирование, значение и расположение зависят от того, с какой целью должны быть реализованы схемные мероприятия (табл. 10.7). В дальнейшем будут рассматриваться исключительно схемы защиты от помех.

Таблица 10.7. Схемные мероприятия в цепях электромагнитных приборов, содержащих индуктивные элементы

Схемные мероприятия	Цели	Расположение элементов защиты
Схема защиты обмоток возбuditелей	Защита изоляции от перенапряжений	Параллельно катушке индуктивности
Схемы защиты от радиопомех и защиты контактов	Подавление тлеющих, дуговых, искровых разрядов между контактными элементами во избежание ВЧ-колебаний и для уменьшения обгорания контактов	Устройства защиты от радиопомех – параллельно контактом, чтобы исключить влияние индуктивности проводов. Устройства защиты контактов (преимущественно RC -звенья) параллельно катушке индуктивности
Схемы защиты полупроводниковых участков включения	Защита полупроводниковых элементов от перенапряжений	Параллельно участку включения тиристорov. Параллельно нагрузке, если между катушкой и транзистором нет длинных соединительных проводов
Схема защиты от помех	Возможное снижение U_{smax} и $(dU_s/dt)_{max}$, чтобы избежать функциональных помех в соседних электронных системах или предотвратить разрушение логических элементов	По возможности непосредственно на катушке индуктивности

10.8.2. Критерии оценки схем защиты от помех

Для устройств на постоянном и переменном токе существует большое число возможных вариантов схем защиты (см. табл. 10.8 и 10.10, рис. 10.44 и 10.45). Вопрос о возможности их применения в конкретных случаях решают с учетом следующих факторов (перечисление без учета важности):

- время срабатывания;
- нагрузочная способность по импульсному току и способность к поглощению энергии;
- эффективность ограничения и U_{smax} и $(dU_s/dt)_{max}$;
- вид напряжения на катушке U_s и тока возбуждения i после отключения (колебательный или апериодический);
- нагрузка выключателя по току при включении;
- стационарный ток потерь;
- влияние времени задержки защищаемого прибора;
- влияние надежности системы в целом;
- характеристика старения (дрейф параметров);
- характеристика поведения при аварии (КЗ или обрыв с вытекающими отсюда последствиями);
- степень сложности правильного определения параметров.

Подходящей должна считаться схема защиты, которая:

- имеет приемлемые экономические показатели;
- при экономном исполнении позволяет производить достаточное подавление перенапряжений по возможности непосредственно на катушке индуктивности;
- характеризуется очень малым временем срабатывания;
- по возможности не вызывает стационарных потерь энергии;
- не ухудшает общей надежности системы;
- по минимуму изменяет время срабатывания устройства;
- может рассчитываться по простым формулам.

10.8.3. Схемы защиты от помех для устройств постоянного тока

В табл. 10.8 приведен обзор важнейших свойств схем защиты, которые могут применяться в приборах постоянного тока.

В табл. 10.8 приняты следующие обозначения:

$R_s, L_s, C_s, T_s = L_s / R_s$ - действующее сопротивление, индуктивность, емкость и постоянная времени обмотки возбуждения;

$I_{ном}, U_{ном}$ - номинальные ток и напряжение обмотки;

$I_{доп}$ - допустимый ток включения выключателя;

I_D - ток пропускания диода;

I_{II} - ток потерь;

$I_{Z_{max}}$ - максимально допустимый ток;

MOV - металлооксидный варистор;

$P_{n_{max}}$ - максимально допустимая мощность потерь;

R_p - разрядное сопротивление;

t_{zap} - время запираания диода;

$U_{Сном}$ - номинальное напряжение конденсатора;

$U_{нб. раб}$ - наибольшее рабочее напряжение варистора (см. рис. 10.5);

U_R - напряжение запираания диода;

$U_Z - Z$ - напряжение (см. рис. 10.42, а);

z - число отключений за единицу времени;

a - постоянная варистора.

Далее остановимся на характеристиках некоторых защитных элементов.

Диоды. Самое радикальное подавление перенапряжений при отключении осуществляется чисто диодной схемой (см. табл. 10.8, столбец 2). Поскольку скорость включения диода существенно выше, чем у коммутационного устройства, на катушке при отключении не возникает перенапряжений.

Напряжение запираания диода выбирается $U_R > 1,5U_{ном}$ и ток $I_F > 1,5I_{ном}$. Время должно быть восстановления запираания, меньше 100 нс, чтобы вибрационные процессы на контактах выключателя не разрушили диод. При подключении нужно обращать внимание на правильную полярность. В приборах с якорем время срабатывания за счет схемы защиты не изменяется, тогда как время возврата по сравнению с прибором без такой схемы увеличивается в 10 - 20 раз. Это свойство может успешно использоваться, когда, например, нужно прекратить перерывы напряжения в течение нескольких миллисекунд. В целом диодные схемы при малых размерах и пренебрежимом токе потерь имеют очень хорошее помехозащитное действие. Они используются, когда удлинение времени возврата прибора со схемой защиты не имеет негативных последствий для функционирования устройства в целом.

Резисторы. Параллельное с индуктивной обмоткой включение резистора сопротивлением R_p (см. табл. 10.8, столбец 3) является лишь условно возможной схемой защиты. Для снижения перенапряжения при отключении оно должно быть не слишком большим, с другой стороны, для ограничения длительности процесса отключения и сохранения тока потерь $I_{II} = U_{ном} / R_p$ в приемлемых границах, не слишком малым. Оно выбирается в пределах $R_p = (2 \div 3) R_s$ и рассчитывается по току потерь. Параллельные

сопротивления используются в схемах обмоток двигателей. Для схем защиты от помех их нельзя рекомендовать к применению.

Резисторы с диодами. Можно получить улучшенные свойства, если последовательно с R_p включить диод (см. табл. 10.8, столбец 4). При включенной катушке в этом случае без учета обратного тока диода, который пренебрежимо мал, через R_p не протекает никакого тока. Следовательно, источник напряжения дополнительно не нагружается, исключается дополнительное выделение тепла и резистор R_p термически нагружается меньше. Выбор диода производится, как показано в столбце 2 в табл. 10.8. Здесь также необходимо следить за правильной полярностью.

Варисторы. Варисторы (см. табл. 10.8, столбец 5) являются сопротивлениями, зависящими от напряжения с симметричной, сильно нелинейной вольт-амперной характеристикой. Она описывается уравнением

$$I = kU^\alpha,$$

где k - константа; α - показатель степени, характеризующий нелинейность вольт-амперной характеристики. При обычных варисторах из карбида кремния значения α лежат в области от 3 до 5, а при металлооксидных варисторах на базе оксида цинка - в области от 20 до 30. Последние вследствие того, что они имеют очень короткое время срабатывания (20-50 нс), очень хорошо подходят в качестве элементов ограничения перенапряжений. При отключении катушки они обеспечивают при сравнимых перенапряжениях U_{smax} меньшее время t_0 , чем описанные до этого варианты схем.

Выбор подходящего металлооксидного варистора осуществляется с учетом следующих обстоятельств:

с учетом наибольшего рабочего напряжения варистора $U_{нб.раб}$. Оно выбирается с учетом допуска $\Delta U_{ном}$ положительного отклонения номинального напряжения прибора $U_{нб.раб}$:

$$U_{нб.раб} \geq U_{ном} \left(1 + \frac{\Delta U_{ном}}{U_{ном}} \right) = (1,1 \div 1,2) U_{ном}, \quad (10.3)$$

где $U_{нб.раб}$ - наибольшее рабочее напряжение (наивысшее длительно допустимое постоянное напряжение, которое может быть приложено к варистору); $U_{ном}$ - номинальное напряжение варистора;

с учетом максимально допустимой мощности потерь варистора P_{nmax} определяется согласно соотношению

$$P_{n \max} \geq \frac{L_s}{2} I_{\text{ном}}^2 z, \quad (10.4)$$

где z - число отключений в единицу времени.

По $U_{\text{нб. раб}}$ согласно (10.3) и $P_{n \max}$ соответственно (10.4) первоначально устанавливается тип варистора. Возникающее при отключении перенапряжение можно простым способом получить из вольт-амперной характеристики (рис. 10.40).

В-третьих, нужно убедиться, что максимально допустимый отводимый импульсный ток выбранного варистора не превышает, т.е. обеспечивается выполнение условия

$$\hat{i}_{u. \max} = \hat{i}_{u. \text{ном}} \geq I_{u. \text{ном}}, \quad (10.5)$$

где $\hat{i}_{u. \text{ном}}$ - максимально допустимая амплитуда стандартного импульса 8/20 мкс.

Номинальные отводимые металлооксидными варисторами токи (импульс 8/20 мкс) в зависимости от диаметра варистора и числа коммутаций приведены в табл. 10.9.

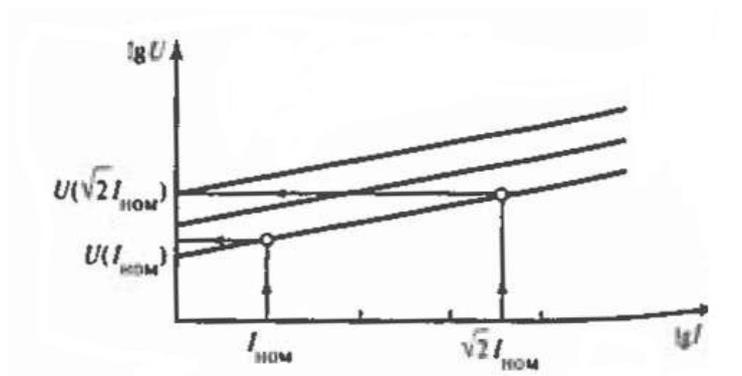


Рис. 10.40. Вольт-амперная характеристике варистора в логарифмическом масштабе

Таблица 10.9. Номинальный отводимый импульсный ток $\hat{i}_{u. \text{ном}}$ металлооксидных варисторов для различного числа коммутаций m

Диаметр варистора, мм	$U_{\text{ном}}, \text{ В}$	$U_{\text{нб. раб}}, \text{ В}$	Номинальный отводимый импульсный ток $\hat{i}_{u. \text{ном}}, \text{ А}$, для различного числа коммутаций m			
			1	10	10^4	10^6
5	95	125	200	50	20	10
7	95	125	500	125	50	25
10	95	125	500	125	50	25

10	95	125	1000	250	100	50
14	95	125	1000	250	75	25
14	95	125	2000	500	175	50
20	95	125	4000	1000	200	50
30	250	320	10000	2000	250	60

Таким образом, варистор диаметром 5 мм переносит в целом 10^6 стандартных импульсов амплитудой 10 А. Для случая, когда длительность импульса более 20 мкс, допустимая амплитуда импульса **уменьшается**. Это предусматривается **понижающим** коэффициентом RF который может быть получен в зависимости от длительности импульса τ (рис. 10.41). Например, для $\tau = 5$ мс при $m = 10^6$ срабатываний получаем коэффициент $RF = 0,06$. Для упомянутого варистора выполняется соотношение

$$\hat{i}_{u. \max} = 10 \cdot 0,06 = 0,6 \text{ A} \geq I_{\text{ном}},$$

Это означает, что выбранный варистор применим, когда номинальный ток $I_{\text{ном}}$, протекающий через варистор, меньше или равен 0,6 А. Если это не так, то должен быть выбран варистор с большей нагрузочной способностью и диаметром.

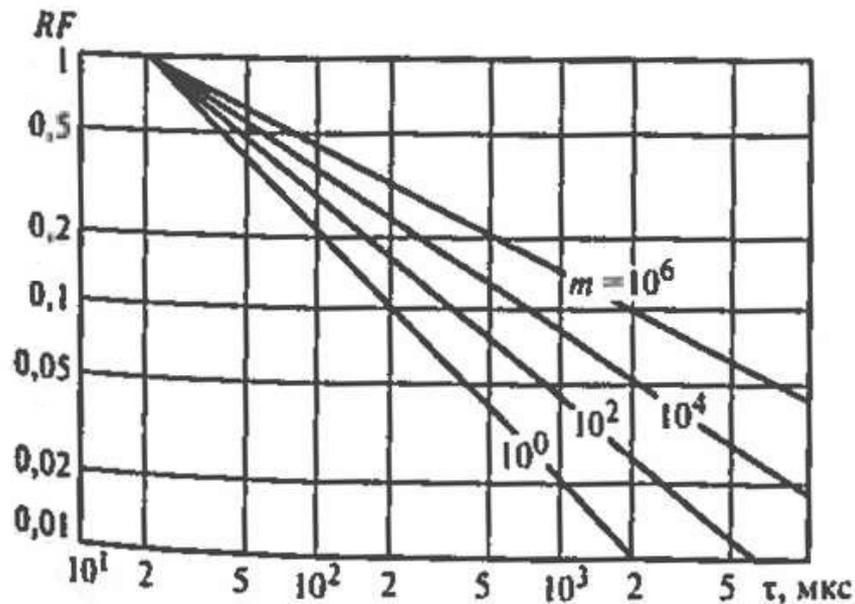


Рис. 10.41. Коэффициент уменьшения RF для длительности импульса $\tau > 20$ мкс

Величина τ может быть оценена при помощи соотношения

$$\tau \approx t_0 \approx L_s I_{\text{ном}} / U_{s \max}, \quad (10.6)$$

где U_{smax} - перенапряжение при отключении катушки (см. рис. 10.40). Уравнение (10.6) получается путем упрощения данного в табл. 10.9, столбец 4 соотношения для

Z-диоды. Z-диоды (диоды Зенера) имеют асимметричную вольт-амперную характеристику (рис. 10.42, а). Чтобы при включенном приборе через помехозащищающую цепь не протекало тока, включается встречно диод D (см. табл. 10.8, столбец 6). Требуемое значение U_Z Z- диода (рис. 10.42, а) определяется по одной из пар величин: $U_{smax}/U_{ном}$; $t_0/3T_s$. Обычно она выбирается в пределах $U_Z=(1,5 \div 2,5)U_{ном}$ (рис. 10.42, б). Как правило, Z - диод должен быть способен кратковременно проводить ток $I_{ном}$ защищаемого прибора, т.е.

$$I_{Zmax} \geq I_{ном} \quad (10.7)$$

и должен быть выбран по рассеиваемой энергии

$$W \geq \frac{L_s}{2} I_{ном}^2 \quad (10.8)$$

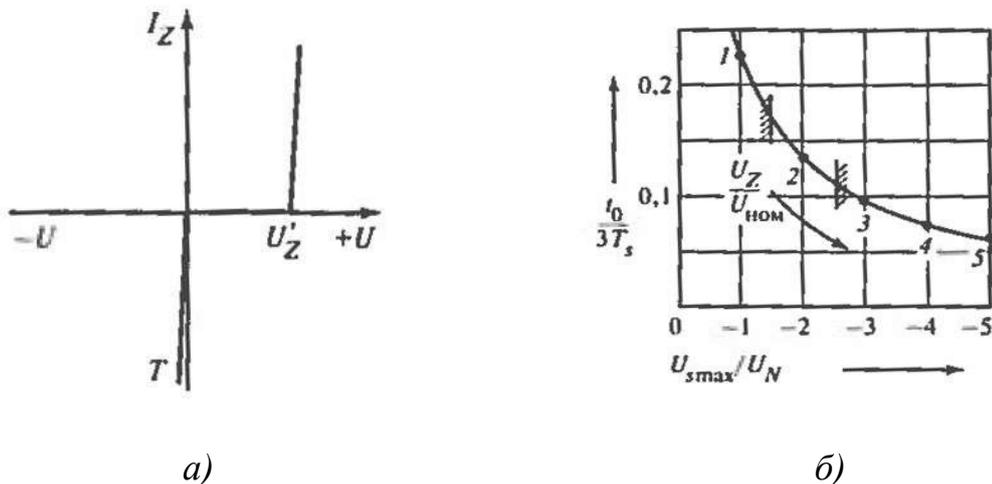


Рис. 10.42. Характеристики Z - диодов

а – вольт-амперная характеристика; б - $t_0/3T_s = f(U_{smax}/U_{ном})$ согласно табл. 10.8, столбец 6

Определение параметров диода производится, как указано в столбце 2 табл. 10.8.

Z-диоды, хотя и имеют малое время срабатывания и обеспечивают эффективное ограничение перенапряжений при отключении, являются

сравнительно дорогими. Их нагрузочная способность по импульсному току и возможность поглощения энергии, так же как и U_Z , ограничены, так что они могут использоваться только в небольших, управляемых полупроводниковыми схемами приборах, с низкими номинальными напряжениями $U_{ном} \leq (0,4 \div 0,8) U_Z$. Лучшими свойствами в этом отношении обладают специально разработанные для отвода переходных перенапряжений *TAZ*-диоды (переходные поглощающие стабилитроны).

RC-цепочки. Очень хорошими свойствами по ограничению перенапряжений при отключении, снижению производных напряжения, так же как и по обеспечению малого времени срабатывания обладают соответствующим образом подобранные *RC*-цепочки. В простейшем случае они состоят из резистора R_p и конденсатора C_p , расположенных параллельно катушке индуктивности (см, табл. 10.8, столбец 7). При включении C_p быстро (постоянная времени заряда $T_L = C_p R_p$) заряжается до номинального напряжения $U_{ном}$. После этого через цепь помехоподавления течет лишь ток утечки конденсатора, которым можно пренебречь.

RC-цепочка рассчитывается так, что в ней после отключения происходит затухающий колебательный разряд:

$$R_p = (0,2 \div 1) R_s, \quad (10.9)$$

причем нельзя переходить за нижнее граничное сопротивление $R_p = U_s / I_{дон}$, чтобы при включении не произошло сваривания контактов выключателя:

$$C_p \approx L_s / 4 R_s^4, \quad (10.10)$$

Цепь помехозащиты должна кратковременно проводить ток $I_{ном}$, а конденсатор должен быть рассчитан на двух-трехкратное номинальное напряжение. Поскольку в процессе разряда меняется направление тока, то используются, как правило, только металлобумажные конденсаторы.

RCD-цепочки. Еще одна помехозащитная комбинация (рис. 10.43), состоящая из последовательности диод — конденсатор — резистор, представлена в табл. 10.8, столбец 8. Конденсатор после отключения обмотки возбуждения заряжается до момента t_0 . Смена направления тока через диод невозможна; C_p разряжается через R_E . Поскольку не возникает низкочастотных колебаний, этот вариант схемы специально подходит для выключателей.

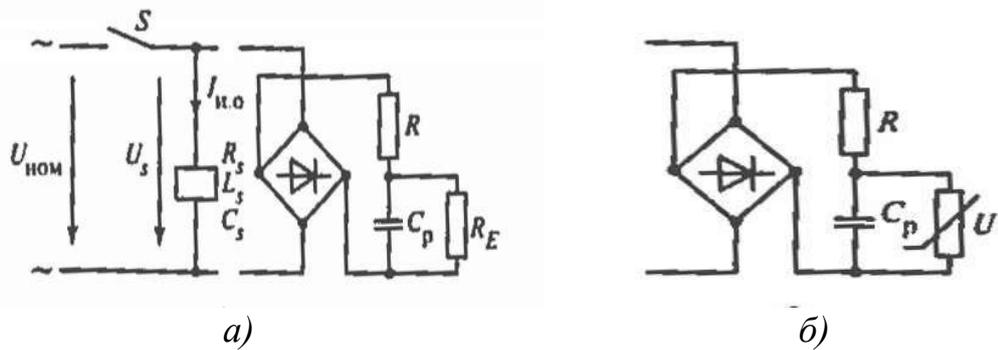


Рис. 10.43. RC - схемы со вспомогательным выпрямителем:

а – с разрядным резистором; *б* – с варистором в качестве разрядного сопротивления

Устраняется повторное втягивание якоря. Основы расчета *RCD*-цепочки состоят в следующем.

Диод выбирается согласно табл. 10.8, столбец 8, емкость конденсатора рассчитывается по формуле

$$C_p \approx \frac{L_s}{(2 \div 4) R_s^2} \quad (10.11)$$

Напряжение на конденсаторе

$$U_{Cном} = (2 \div 3) U_{ном} \quad (10.12)$$

Сопротивление

$$R_E < T_p / 3 C_p, \quad (10.13)$$

где T_p - время паузы между двумя отключениями.

Если сравнить отдельные защитные схемы согласно данным в п. 10.8.3 критериям оценки, можно дать следующие рекомендации:

- если замедление времени возврата не играет роли, удобна диодная схема (см. табл. 10.8, столбец 2);
- если время реакции защищаемого прибора по возможности не должно изменяться, преимущество имеют комбинации с металлооксидными варисторами (см. табл. 10.8, столбец 5) или *RC*-цепочки (см. табл. 10.8, столбцы 7 и 8); для небольших приборов пригодны *Z*-диоды или *TAZ* - диодные схемы (см. табл. 10.8, столбец 6);
- резисторы (см. табл. 10.8, столбец 3) не годятся в качестве защиты от помех.

10.8.4. Схемы защиты от помех для устройств переменного тока

При отключении обмотки переменного тока нужно различать два граничных случая: разрыв цепи тока в момент перехода тока через нуль и в момент достижения максимального значения $\sqrt{2}I_D$ (I_D - действующее значение установившегося тока). Второй случай представляет наихудшие соотношения при отключении цепи переменного тока. При этом, как и в цепях постоянного тока, могут возникнуть высокие перенапряжения при отключении. В дальнейшем будет рассматриваться исключительно этот случай, который будет положен в основу определения параметров защитных схем. Возможные схемы помехозащиты в однофазных приборах переменного тока показаны в табл. 10.10.

Резисторы. Простейший, однако для эффективной защиты от помех не слишком подходящий вариант схемы - это активное сопротивление параллельно индуктивности (табл. 10.10, столбец 2). Он используется только в отдельных случаях в качестве временной меры. Сопротивление выбирается в диапазоне

$$R_p = (2 \div 4) \frac{U_{ном}}{I_D} \quad (10.14)$$

и рассчитывается по длительному току $I_{II} = U_{ном} / R_p$.

Варисторы. Более подходящими, чем резисторы, являются варисторы (табл. 10.10, столбец 5), особенно металлооксидные. Перенапряжение при отключении удается при этом ограничить на защитном уровне - примерно два-три номинальных напряжения прибора. Выбор подходящего металлооксидного варистора осуществляется аналогично п. 10.8.3, при этом определяется наибольшее рабочее переменное напряжение $U_{нб. раб}$ варистора при учете возможного положительного отклонения $\Delta U_{ном}$ от номинального напряжения $U_{ном}$:

$$U_{нб. раб} \geq U_{ном} \left(1 + \frac{\Delta U_{ном}}{U_{ном}} \right) = (1, 1 \div 1, 2) U_{ном} \quad (10.15)$$

и рассчитывается максимально допустимая мощность потерь

$$P_{n \max} \geq \frac{L_s}{2} I_{ном}^2 \quad (10.16)$$

По $U_{нб. раб}$ и $P_{n \max}$ предварительно выбирается соответствующий тип варистора. Ожидаемое при отключении перенапряжение $U_{s \max}$ может быть получено из вольт-амперной характеристики.

Таким же образом, как и в п. 10.8.3, нужно проверить, не превышает ли максимально допустимый импульсный ток выбранного варистора, т.е. насколько обеспечивается условие

$$\hat{i}_{i \max} = \hat{i}_{i \text{ном}} \geq \sqrt{2} I_D. \quad (10.17)$$

Значения $\hat{i}_{i \text{ном}}$ и RF могут быть взяты из рис. 10.41. Необходимая для определения RF длительность импульса τ может быть оценена по соотношению

$$\tau \approx t_0 \approx \frac{\sqrt{2} U_{\text{ном}}}{2 \pi f} / U_{s \max}. \quad (10.18)$$

Уравнение (10.18) соответствует упрощенному, данному в табл. 10.10, столбец 3, выражению для t_0 .

Z-диоды и TAZ-диоды. Очень хорошими свойствами обладают схемы защиты от помех из двух включенных встречно Z-диодов или двустороннего TAZ-диода (см. табл. 10.10, столбец 4). TAZ-диоды выполнены специально для ограничения переходных перенапряжений и по сравнению с нормальными Z-диодами обладают повышенной стойкостью к импульсному току. Преимущество схемы с Z-диодами состоит в том, что они при сильном ограничении перенапряжений практически не влияют на время возврата защищаемого прибора. Однако их цена высока. Кроме того, они не применимы для больших токов и напряжений, и поэтому используются в маленьких приборах.

Напряжение U_Z (см. рис. 10.42, а) выбирается согласно соотношению

$$U_Z > \sqrt{2} U_{\text{ном}}. \quad (10.19)$$

Требуемая нагрузочная способность определяется $P_{n \max}$ с помощью уравнения

$$P_{n \max} \geq \frac{U_{\text{ном}} I_D}{2 \pi f} z \quad (10.20)$$

(см. обозначения в табл. 10.10).

В заключение, как и при расчете металлооксидных варисторов, проверяется, не превышает ли нагрузочная способность выбранных по (10.19) и (10.20) диодов:

$$I_{Z \max} k_R \geq \sqrt{2} I_D, \quad (10.21)$$

где $I_{Z\max}$ - максимально допустимая амплитуда тока при определенном **импульсном** токе; k_R - понижающий коэффициент» предусматривающий другую **длительность** импульса.

В табл. 10.10 приняты следующие обозначения:

$R_s, L_s, C_s, T_s = L_s / R_s$ - сопротивление, индуктивность, емкость и постоянная времени обмотки;

$I_D, U_{ном}$ - установившийся ток и номинальное напряжение защищаемого прибора (эффективные значения);

$\cos \phi = I_D R_s / U_{ном}$ - коэффициент мощности прибора;

f - частота сети;

$I_{доп}$ - допустимый ток включения выключателя S ;

I_{Π} - ток потерь (эффективное значение);

$I_{Z\max}$ - максимально допустимый ток;

MOV - металлооксидный варистор;

$U_{Сном}$ - номинальное напряжение конденсатора;

$U_{нб. раб}$ - наибольшее рабочее переменное напряжение варистора;

U_Z - напряжение (см. рис. 10.42, а);

z - число отключений в единицу времени;

a - коэффициент нелинейности варистора.

Селеновые ограничители перенапряжений. Селеновые ограничители перенапряжений - это селеновые выпрямители с особо крутой характеристикой запираания, которые могут кратковременно нагружаться в прямом и обратном направлениях очень высокими плотностями тока (до 5 А/см²). При встречном включении двух пластин они имеют такие же свойства, как варисторы или TAZ -диоды. Они, однако, занимают больше места, и поэтому преимущественно применяются в больших установках.

Требуемое для каждого направления число n пластин определяется из номинального напряжения прибора $U_{ном}$:

$$n \geq U_{ном} / U_{д.пл}, \quad (10.22)$$

где $U_{д.пл} \approx (25 \div 50)$ В — действующее значение напряжения одной пластины.

Требуемая площадь пластины вычисляется, как

$$A_p \geq \sqrt{2} I_{u.o} / J, \quad (10.23)$$

где $I_{u.o}$ - импульсный ток через ограничитель и $J = 5$ А/см² — допустимая плотность импульсного тока.

RC-цепочки. При переменном токе простые RC-цепочки (см. табл. 10.10, столбец 6) обладают хорошими свойствами ограничивать перенапряжения при отключении и обеспечивать короткое время возврата, связанное с уменьшением производной напряжения. Расчет их параметров производится так, чтобы при отключении возникало затухающее колебание. Это обеспечивается при

$$R_p \approx 0,2 \frac{U_{ном}}{I_{у.о.}} > \frac{\sqrt{2} U_{ном}}{I_{доп}}, \quad (10.24)$$

чтобы избежать спаривания контактов выключателя, и

$$C_p \approx \frac{1}{8\pi f} \cdot \frac{I_{у.о.}}{U_{ном}} \sqrt{1 - \left(\frac{R_s I_{у.о.}}{U_{ном}} \right)^2}. \quad (10.25)$$

Сопротивление R_p должно выдерживать длительный ток потерь

$$I_{II} = 2\pi f C_p U_{ном} \sqrt{1 + (2\pi f C_p R_p)^2}, \quad (10.26)$$

а емкость C_p выдерживать напряжение, в 2—3 раза превышающее номинальное напряжение $U_{ном}$.

Длительный ток через RC-цепочку будет предотвращен, если дополнительно используется вспомогательный выпрямитель (см. рис. 10.37).

Для практического применения средств защиты от помех для приборов переменного тока на основе введенных в п. 10.8.2 критериев можно дать следующие рекомендации:

- RC-цепочки (см. табл. 10.10, столбец 6) являются очень выигрышными, особенно для приборов 220 и 380 В. Они приемлемы по цене, занимают не слишком много места, одновременно компенсируют реактивный ток и гарантируют время возврата прибора такое же, как при отсутствии схемы защиты, даже в наиболее неблагоприятный момент включения при хорошем ограничении перенапряжения;
- металлооксидные варисторы имеют такие же хорошие свойства (см. табл. 10.10, столбец 3). Для защиты выключателей существуют особо компактные варисторы;
- селеновые ограничители перенапряжений (см. табл. 10.10, столбец 5) пригодны для больших приборов;
- двусторонние Z-диодные схемы (см. табл. 10.10, столбец 4), разработаны специально для малых и очень малых устройств;
- резисторы (см. табл. 10.10, столбец 2) не пригодны в качестве защиты от помех приборов переменного тока.

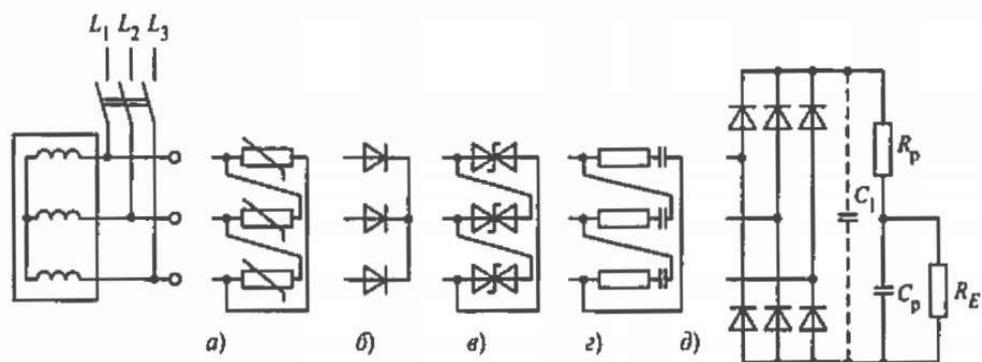


Рис. 10.44. Схемы защиты от помех трехфазных приборов:

а - варисторы; *б* - Z-диоды или селеновые диоды; *в* - двусторонние TAZ-диоды или селеновые ОПН; *г* - RC-звенья; *д* - RC-звенья со вспомогательным выпрямителем

10.8.5. Схемы защиты от помех для трехфазных установок

Для трехфазных магнитов и других установок, таких как зажимные приспособления, тормоза, трехфазные асинхронные двигатели могут быть использованы похожие схемы ограничения перенапряжений, как и в однофазных устройствах; их расчет ведется аналогично описанному в п. 10.8.4.

Очень выгодными также являются элементы, имеющие сильно нелинейные вольт-амперные характеристики, т.е. схемы с металлооксидными варисторами, с Z-диодами, TAZ-диодами или с селеновыми ОПН (рис. 10.44, *а* - *в*). Ток утечки во всех трех случаях пренебрежимо мал.

Очень хорошим помехоподавляющим действием обладают также и RC-цепочки, соединенные в треугольник (рис. 10.44, *г*) или звезду, присоединяемые к выводам трехфазного прибора. Особое преимущество RC-схем состоит в том, что они снижают как амплитуду, так и производную перенапряжения при отключении.

Свойства, подобные симметричным RC-схемам, имеют защитные схемы, состоящие из RC-звена и вспомогательного выпрямительного моста (рис. 10.44, *д*). Стационарные потери мощности здесь устраняются практически полностью. Схемы защиты от помех такого рода предпочтительны для устройств большой мощности. Как правило, конденсатор C_p дополняется резистором или варистором R_E и включенным параллельно для подавления ОВЧ составляющих перенапряжения небольшим, имеющим крайне малую индуктивность, конденсатором C_1 .

10.8.6. Схемы защиты от помех для люминесцентных ламп

Люминесцентные лампы низкого давления (рис. 10.45), очень часто устанавливаемые в качестве рабочего освещения в непосредственной

близости от электронных установок, часто выступают в качестве неприятных источников помех при включении и отключении. В особенности следует ожидать интенсивных помех при отключении в неудачный момент (прерывание в момент максимума тока, рис. 10.46, *a* и табл. 10.11). При этом, как и при электромагнитных приборах, может быть полезной защитная *RC*-комбинация, установленная в непосредственной близости от лампы. Помехи в этом случае могут быть снижены до приемлемого уровня (рис. 10.46, *б* и табл. 10.11). Возможно также применение варисторов из металлооксида (см. табл. 10 8, столбец 5).

Таблица 10.11. Параметры процесса отключения люминесцентной лампы низкого давления типа *LS-40* мощностью 40 Вт

Люминесцентная лампа	U_{\max} , В	$(dU/dt)_{\max}$, В/мкс	f_a , кГц	f_u
Некомпенсированная, помехи на подавляются	3000	111	5	100-500 кГц с наложением частот до 10 МГц
Со схемами защиты как на рис. 10.44	600	0,77	0,2	-

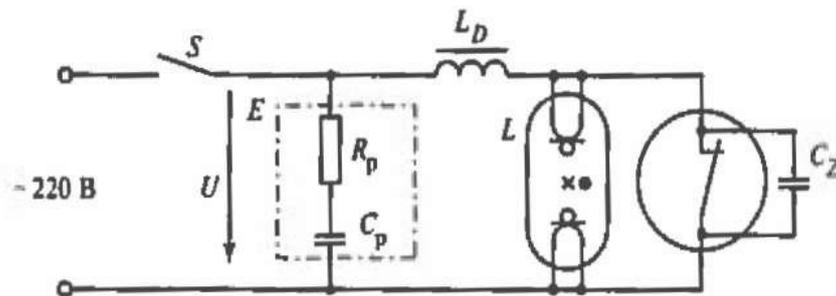


Рис. 10.45. Цепь тока люминесцентной лампы:

S - выключатель; *E* - помехоподавляющее устройство; R_p - активное сопротивление устройства *E* (проволочный резистор 470 Ом, 250 В, 4 Вт, 5 %); C_p - емкость помехоподавляющего звена *E* (МБ-конденсатор 0,47 мкФ; 630 В); *D* - дроссель предварительного включения; L_D - индуктивность дросселя *D*; *L* - люминесцентная лампа; *Z* - стартер; C_z - емкость помехоподавления на стартере

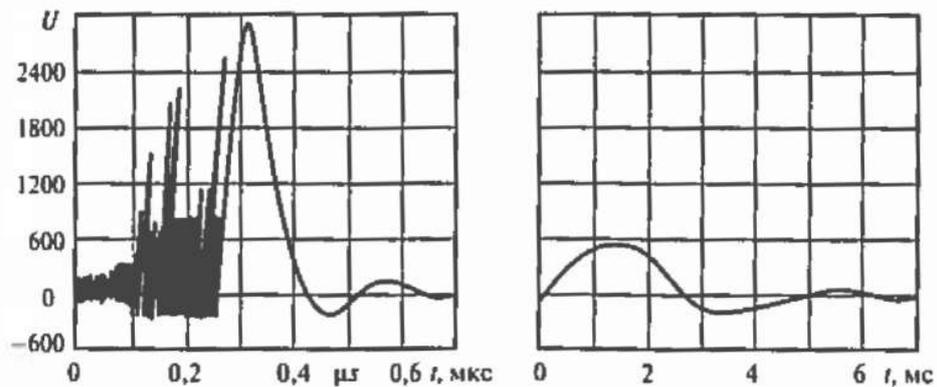


Рис. 10.46. Процесс отключения люминесцентной лампы мощностью 40 Вт:
 а - Некомпенсированный, помехи не подавляются; б - помехи подавлены согласно рис 10.45

ВОПРОСЫ АЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Перечислите типовые сигналы в порядке уменьшения чувствительности оборудования к внешним возмущениям.
2. Нарисуйте план подстанции ВН и соответствующие виды электромагнитного окружения.
3. Нарисуйте план типовой электростанции и соответствующие виды электромагнитного окружения.
4. Перечислите основные положения правил выполнения заземления и прокладки кабелей.
5. В каких случаях применяются параллельные заземленные проводники?
6. Каким образом выполняется заземление вторичных цепей ТТ и ТН, связывающих их с релейным щитом?
7. Каким образом осуществляется экранирование зданий?
8. Как выполняется заземление на электрических станциях?
9. Перечислите особенности ЭМС на ПС и электростанциях.
10. Каковы уровни испытательных воздействий на оборудование электростанции и ПС?
11. В чем состоят особенности проектирования заземляющих систем комплектных КРУЭ?
12. Какие особенности электромагнитных помех, возникающих при коммутациях тока в цепях с индуктивностью?
13. Объясните методы защиты от помех в устройствах постоянного тока.
14. Объясните методы защиты от помех в устройствах переменного тока.
15. Какие методы защиты от помех используются в трехфазных установках?

16. ОБЪЯСНИТЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ЗАЩИТЫ ОТ ПОМЕХ, СОЗДАВАЕМЫХ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫМИ ЛАМПАМИ.

Г л а в а п е р в а я ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

1.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Электромагнитная обстановка на объектах электроэнергетики (электрических станциях, подстанциях, линиях электропередачи) резко отличается от электромагнитной обстановки на других объектах (на промышленных предприятиях, в офисных, жилых помещениях и т.д.).

Характерными особенностями этой обстановки является наличие постоянной во времени высокой напряженности электрического поля промышленной частоты (25 кВ/м и более) и напряженности магнитного поля промышленной частоты 4 кА/м и более). Кроме того, на объектах электроэнергетики могут быть высокочастотные поля, создаваемые устройствами управления, сигнализации, передачи данных и, т.д.

В целом электромагнитная обстановка достаточно сложна даже в стационарных условиях и представляет собой наложение полей естественного и искусственного происхождения, причем напряженности полей искусственного происхождения часто существенно превышают напряженности естественных полей. Ситуация усугубляется тем обстоятельством, что электромагнитные поля искусственного происхождения подвержены быстрым изменениям вследствие изменения режимов работы объектов электроэнергетики, возникновения аварийных ситуаций и т.д. В результате возникают возмущения стационарной электромагнитной обстановки.

Источники электромагнитных воздействий. Характерными источниками электромагнитных воздействий, которые могут оказывать влияние на автоматические и автоматизированные системы технологического управления электротехническими объектами на электрических станциях и подстанциях, являются:

- процессы в цепях различных классов напряжения при ударах молнии непосредственно в объект или вблизи него;
- коммутационные процессы в цепях высокого напряжения (ВН);
- переходные процессы в цепях высокого напряжения при коротких замыканиях (КЗ); срабатывании разрядников или ограничителей перенапряжений (ОПН);
- электрические и магнитные поля промышленной частоты, создаваемые силовым оборудованием электрических станций и подстанций;
- переходные процессы в заземляющих устройствах подстанции, обусловленные токами КЗ промышленной частоты и токами молний;
- быстрые переходные процессы при коммутациях в индуктивных цепях низкого напряжения (НИ);
- радиочастотные поля различного происхождения;
- разряды статического электричества;

- электромагнитные возмущения в цепях оперативного тока.

Дополнительным источником электромагнитных возмущений на электрических станциях и подстанциях, которые могут вызвать сбои в работе электронных и микропроцессорных устройств, является также вспомогательное электрооборудование, такое как сварочные аппараты, осветительные приборы, мощные тяговые механизмы, бытовые электроприборы, электроинструменты и др.

Кроме того, в устройствах автоматических и автоматизированных систем технологического управления электротехническими объектами могут возникнуть и другие электрические явления, которые могут стать причиной их неправильного функционирования. К таким явлениям относятся переходные значения сопротивления в контактных соединениях, шумы активных и пассивных элементов, дрейф параметров элементов, разброс времени коммутации в логических устройствах, исчезновения сигналов при передаче, явления отражения волн в линиях, вибрации и микрофонный эффект в контактах, пьезоэлектрические смещения зарядов при сжатии и изгибах изоляции, а также контактные напряжения, схемо и термоэлектрические эффекты в точках соединения проводников из различных материалов.

Наконец, два следующих вида воздействий должны рассматриваться в особых ситуациях:

- электромагнитные импульсы ядерных взрывов;
- магнитное поле Земли при аномальных явлениях на поверхности Солнца.

На рис. 1.1 изображены некоторые источники воздействий из отмеченных выше на электростанциях и подстанциях высокого напряжения.

Основные типы и возможные диапазоны значений электромагнитных помех.

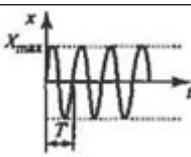
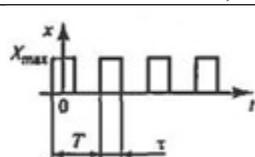
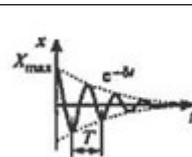
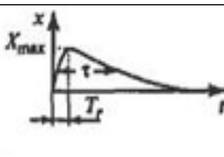
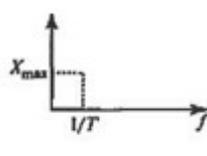
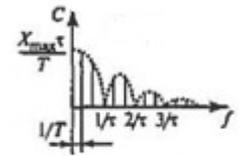
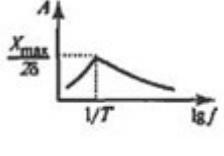
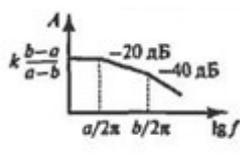
Помехи, создаваемые источниками электромагнитных возмущений, могут возникать в виде как периодически появляющихся, так и случайно распределенных во времени величин. В обоих случаях речь может идти как об узкополосных, так и о широкополосных процессах. При систематизации в первом приближении, несмотря на бесконечное разнообразие вариантов, выделяют четыре типа помех.

Характерные примеры помех приведены в табл. 1.1, а именно: синусоидальные (например, постоянно действующие периодические узкополосные помехи в форме переменного напряжения частотой 50 Гц или больше), прямоугольные, периодические затухающие однократные импульсы и одиночные импульсы, образованные двумя экспонентами.

Помехи, возникающие в автоматических и автоматизированных системах технологического управления электротехническими объектами, могут рассматриваться как синфазные или противофазные напряжения (рис. 1.2).

Таблица 1.1. Разновидности электромагнитных помех

Периодические помехи	Непериодические, случайные помехи
----------------------	-----------------------------------

узкополосные	широкополосные	узкополосные	широкополосные
<i>Временная область, изменение помех во времени</i>			
 <p>$x = X_{\max} \sin \omega_0 t$ $\omega_0 = 2\pi / T$</p>	 <p>$x = \frac{X_{\max} \tau}{T} + \sum_{n=1}^{\infty} c(n, \omega) \cos(n\omega t)$ $\omega_0 = 2\pi / T$</p>	 <p>$x = X_{\max} e^{-\delta t} \cos \omega_0 t$ $\omega_0 = 2\pi / T$</p>	 <p>$x = k(e^{-at} - e^{-bt})$ $k = f_1(X_{\max}, T_r, \tau)$ $a = f_2(T_r, \tau)$ $b = f_3(T_r, \tau)$</p>
<i>Частотная область, амплитудные спектры</i>			
	 <p>$C = c(n, \omega)$</p>		 <p>$k \frac{b-a}{a-b}$, -20 дБ, -40 дБ, $a/2\pi$, $b/2\pi$, $\lg f$</p>

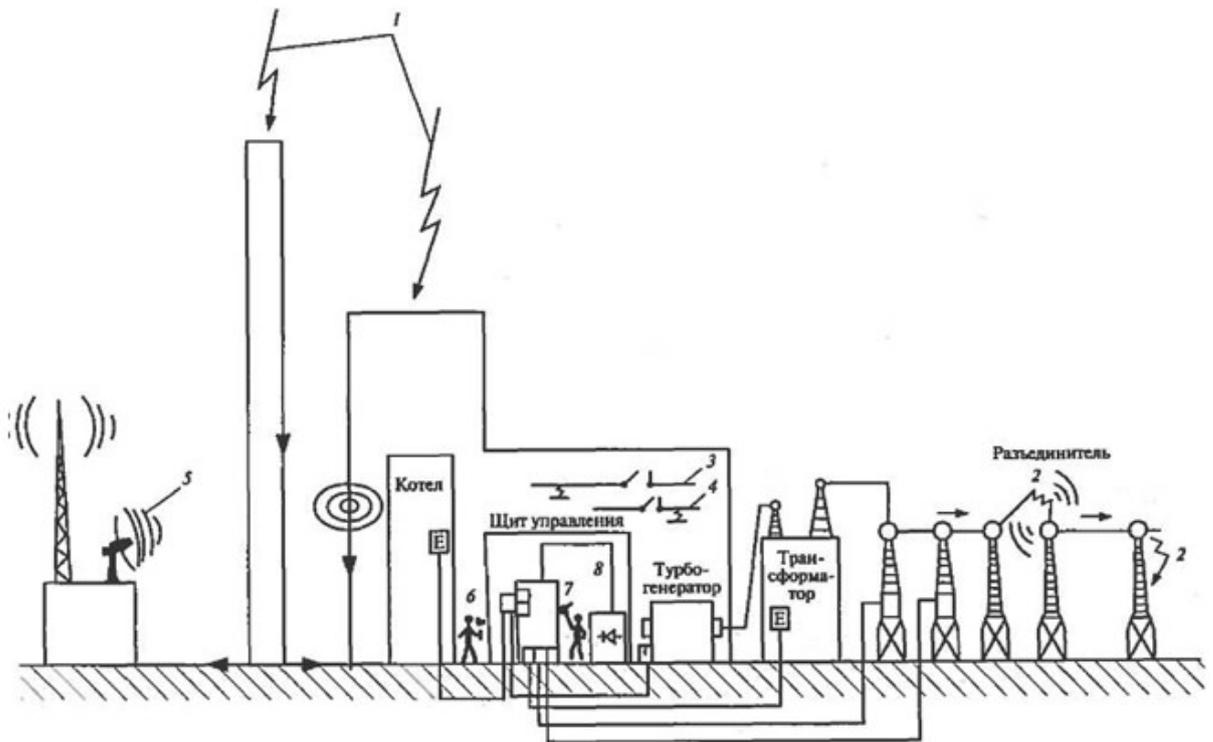


Рис. 1.1. Источники электромагнитных воздействий на электрических станциях и подстанциях:

1 – молния; 2 – переключения и КЗ в сети; 3 – переключения и КЗ в сети среднего напряжения (СН); 4 – переключения и КЗ в сети НН; 5 – внешние источники радиочастотных излучений; 6 – внутренние источники радиочастотных излучений; 7 – разряды статического электричества; 8 – источники кондуктивных помех по цепям питания

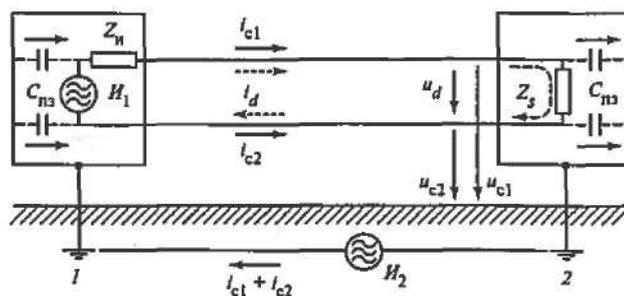


Рис. 1.2. Помехи, связанные с передачей сигналов по линии:

$C_{пз}$ - паразитные емкости относительно заземленного корпуса; I_1 - источник противофазных помех; I_2 - источник синфазных помех; Z_u, Z_s - полные сопротивления источника и приемника помех; i_{c1}, i_{c2} - синфазные токи; i_d - противофазный ток; u_{c1}, u_{c2} - синфазные напряжения помех; u_d - противофазное напряжение помех

Противофазные напряжения электромагнитных помех (поперечные, симметричные) возникают между проводами двухпроводной линии (u_d на рис. 1.2). Они накладываются непосредственно на полезные сигналы в сигнальных цепях или на напряжение питания в цепях электроснабжения; воздействуют на линейную изоляцию между проводами и могут быть восприняты как полезные сигналы в цепях автоматических и автоматизированных систем технологического управления на электрических станциях и подстанциях и тем самым вызвать ошибочное их функционирование.

Противофазные напряжения помех возникают в цепях автоматических и автоматизированных систем технологического управления через гальванические или полевые связи или появляются из синфазных напряжений помех в системах, несимметричных относительно земли.

Синфазные напряжения электромагнитных помех (несимметричные, продольные напряжения) возникают между каждым проводом и землей (u_{c1}, u_{c2} на рис. 1.2) и воздействуют на изоляцию проводов относительно земли.

Синфазные помехи обусловлены главным образом разностью потенциалов в цепях заземления устройства, например, между точками 1 и 2 на рис. 1.2, вызванной

токами в земле (токи КЗ или токи молнии). Они также могут возникать в результате воздействия магнитных полей.

Параметры помех в зависимости от электромагнитной обстановки на энергообъекте, могут изменяться в очень широком диапазоне (табл. 1.2).

Способы описания и основные параметры помех. Помехи можно представить и описать как во временной, так и в частотной области. Рассмотрим систему из двух контуров, имеющих гальваническую, емкостную или индуктивную связь (рис. 1.3). В первичном (влияющем) контуре возник-

кает помеха, которая передается во вторичный (подверженный влиянию) контур.

Важнейшими параметрами периодических помех являются частота f и амплитуда X_{\max} помехи в первичном контуре; эти параметры определяют амплитуду напряжения помехи $U_{s\max}$ во вторичных контурах.

Важнейшими параметрами непериодических помех являются: скорость изменения $\Delta x/\Delta t$ (скорость нарастания или спада) помехи x ; она определяет максимальное напряжение помехи $U_{s\max}$ во вторичной цепи;

- изменение времени Δt , или интервал времени, в течение которого, например, помеха x имеет максимальную скорость изменения амплитуды; этот интервал идентичен длительности действия напряжения помехи $U_{s\max}$ во вторичной цепи;

- максимальное значение изменения амплитуды Δx , пропорциональное интегралу напряжения помехи вторичной цепи по времени (площади импульса помехи).

Таблица 1.2. Возможные диапазоны значений параметров помех

Параметр	Обозначение	Значение
Частота, Гц	f	0-10 ¹⁰
Максимальное значение напряжения, В	U_{\max}	10 ⁻⁶ -10 ⁶
Скорость изменения напряжения, В/с	du/dt	0-10 ¹²
Напряженность электрического поля, В/м	E	0-10 ⁵
Максимальное значение тока, А	I_{\max}	10 ⁻⁹ -10 ⁵
Скорость изменения тока, А/с	di/dt	0-10 ¹¹
Напряженность магнитного поля, А/м	H	10 ⁻⁶ -10 ⁸
Время нарастания импульса, с	T_r	10 ⁻⁹ -10 ⁻²
Длительность импульса, с	t	10 ⁻⁸ -10
Энергия импульса, Дж	W	10 ⁻⁹ -10 ⁷

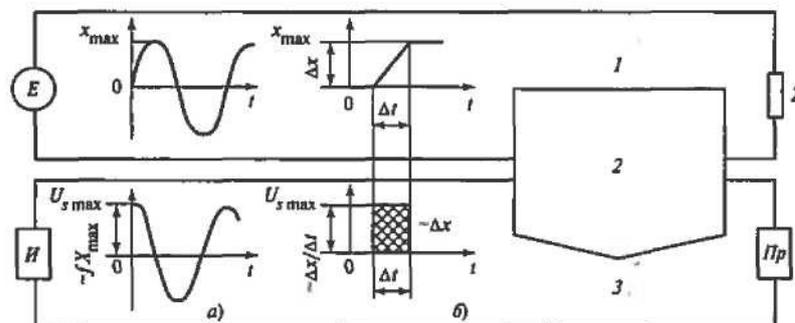


Рис. 1.3. К определению параметров периодических (а) и непериодических переходных (б) помех:

P_p - приемник сигналов; I - источник сигналов; x - помеха (напряжение или ток); U_{smax} - максимальное напряжение помехи, обусловленное связью; 1 - влияющий контур; 2 - гальваническая, емкостная или индуктивная связь; 3 - контур, подверженный влиянию

Для взаимосвязанного представления этих величин используют при периодических помехах амплитудный спектр, а при импульсных спектр амплитудной плотности (см. табл. 1.1). Применительно к рассматриваемой (измеряемой) помехе оба представления позволяют:

- оценить воздействие помехи на узкополосную систему;
- рассчитать воздействие, обусловленное заданной связью;
- выбрать параметры средств подавления помех, например фильтров;
- определить граничные области, например, максимально возможного или допустимого излучения помех или охарактеризовать границы помехоустойчивости;
- получить представление о параметрах воздействий при испытаниях согласно нормам ЭМС.

Для количественной оценки величин, характеризующих ЭМС, пользуются логарифмическими масштабами электрических величин в безразмерных единицах, что позволяет наглядно представить соотношение величин, отличающихся на много порядков, а также умножать значения этих величин простым сложением их логарифмов. Различают два вида логарифмических относительных величин: уровень и меру сигнала.

Уровень — логарифм относительной величины с постоянной базой — знаменателем. Понятием «уровень» можно описывать значения помех (напряжения, тока, напряженности полей помех и т.п.). В качестве базового значения напряжения часто принимают $U_0=1$ мкВ. Логарифм относительного напряжения называют уровнем напряжения. При применении десятичного логарифма справедливы следующие выражения для уровней, дБ;

напряжения

$$u = 20 \lg \frac{U_x}{U_0} \text{ при } U_0 = 1 \text{ мкВ};$$

тока

$$i = 20 \lg \frac{I_x}{I_0} \text{ при } I_0 = 1 \text{ мкА};$$

напряженности электрического поля

$$E = 20 \lg \frac{H_x}{H_0} \text{ при } E_0 = 1 \text{ мкВ/м};$$

напряженности магнитного поля

$$H = 20 \lg \frac{H_x}{H_0} \text{ при } H_0 = 1 \text{ мкА/м;}$$

мощности

$$P = 0,5 \ln \frac{P_x}{P_0}.$$

Уровень сигнала является безразмерной величиной. Физическая природа описываемых величин подчеркивается принятыми для них обозначениями, такими как u, i, E, H, P а размерность базовой величины указывается в индексе или в скобках, например дБ (мкВ), дБ (мкА) и т.д.

Мера сигнала — логарифм отношения величин для обозначения измеряемых свойств объекта (степени передачи, коэффициентов усиления, ослабления). При этом используют отношение величин на входе и выходе системы или отношение величин в определенной точке при наличии и отсутствии демпфирующего элемента (фильтра, экрана). Например, коэффициент затухания a_e , дБ, вносимого фильтром, выражают с помощью десятичного логарифма

отношения $\frac{U_{20}}{U_2}$:

$$a_e = 20 \lg \frac{U_{20}}{U_2} ;$$

при наличии экрана

$$a_e = 20 \lg \frac{E_0}{E_1} .$$

Здесь U_2 и U_{20} - напряжения помех на входе с фильтром и без фильтра, а E_1 , и E_0 - воздействующие на прибор напряженности электрического поля без экрана и с экраном соответственно.

С помощью натурального логарифма можно выразить отношение величин в неперах, например:

для напряжения

$$U_{Hn} = \ln(U_x / U_0)$$

(1 Нп соответствует соотношению $U_x / U_0 = e$, а для энергетических величин — соотношению $P_x / P_0 = e^2$);

для мощности

$$P_{Hn} = 0,5 \ln(P_x/P_0)$$

Между непером и децибелом существуют соотношения

$$\ln(U_x/U_0), Hn = 20 \ln(U_x/U_0) \text{ дБ,}$$

или

$$1 \text{ Нп} = 8,686 \text{ дБ} \quad \text{и} \quad 1 \text{ дБ} = 0,115 \text{ Нп.}$$

Понятие «помехоподавление» характеризует степень защитного действия средств защиты от помех, и чаще всего оно дается в зависимости от частоты. Помехоподавление характеризуют, например, логарифмом отношения напряжений на входе U_1 и выходе U_2 фильтра (коэффициент затухания a_ϕ) или напряженности поля перед экраном H_0 и за ним $H_э$ (коэффициент экранирования a_e): $a_\phi = 20 \lg(U_1/U_2)$; $a_e = 20 \lg(H_0/H_э)$.

1.2. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ УДАРАХ МОЛНИИ

Молния является наиболее мощным естественным источником электромагнитных возмущений.

В настоящее время получены достаточно достоверные сведения по основным параметрам молнии (амплитуда тока, крутизна фронта, параметры грозовой активности и т.д.) для положительных и отрицательных ее импульсов при любом возможном механизме их образования.

При рассмотрении вопросов ЭМС следует иметь в виду, что молния и связанные с ней электромагнитные поля оказывают сильное влияние в месте удара и вблизи него. При разработке устройств внутренней молниезащиты учитывают максимальное значение и крутизну нарастания тока. В каждом конкретном случае могут быть рассчитаны электрические и магнитные поля, связанные с полным током молнии или токами в заземляющем устройстве, а также индуцированные ими токи и напряжения в цепях автоматизированной системы технологического управления электротехническим объектом. При этом необходимо учитывать такие факторы, как удаление от места удара молнии, конфигурацию приемной системы, характеристики зданий, заземляющих устройств и др.

1.2.1. Электромагнитное поле тока молнии при ударе в землю

Для расчета электрических и магнитных полей, создаваемых током молнии на уровне земли на различных расстояниях от места удара, используется рис. 1.4.

Формулы для расчета напряженности электрического поля $E_z(d, t)$ и индукции $B_z(d, t)$:

$$E_z(d, t) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \times \left\{ \int_0^z \frac{2z^2 - d^2}{R^5} \left[\int_0^t i(z, (t - R/c)) dt \right] dz + \int_0^z \frac{2z^2 - d^2}{cR^4} i(z, (t - R/c)) dz - \int_0^z \frac{d^2}{c^2 R^3} \left[\frac{di(z, (t - R/c))}{dt} \right] dz \right\},$$

$$B_z(d, t) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left\{ \int_0^z \frac{d}{cR^3} i(z, (t - R/c)) dz + \int_0^z \frac{d^2}{cR^2} \left[\frac{di(z, (t - R/c))}{dt} \right] dz \right\},$$

где $i(z, t)$ - ток молнии; ϵ_0, μ_0 - электрическая и магнитная постоянные; c - скорость света в вакууме.

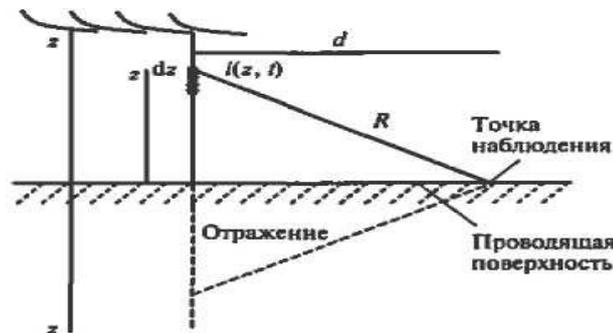


Рис 1.4. Положение канала молнии при оценке электрического и магнитного полей, создаваемых током молнии

Существуют различные модели расчета зависимости $i(z, t)$ базирующиеся на экспериментальных данных.

С помощью уравнений Максвелла можно рассчитать электрические и магнитные поля на уровне земли на расстоянии d от канала молнии. При этом делается допущение о том, что канал молнии представляет собой вертикальную антенну высотой Z , поверхность земли имеет нулевое сопротивление, а радиус поперечного сечения канала молнии много меньше, чем минимально возможная длина волны тока молнии.

На рис. 1.5 показаны типичные результаты измерений вертикальной составляющей напряженности электрического поля E_V и горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля H_Γ полученные одновременно на расстоянии 5 и 50 км от первого удара и последующего обратного удара молнии.

На основе выполненных исследований были определены следующие характеристики электрических и магнитных полей, создаваемых током молнии:

вертикальная составляющая напряженности электрического поля E_V и горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля H_Γ на

порядок и более превышают горизонтальную составляющую напряженности электрического поля E_{Γ} и вертикальную составляющую напряженности магнитного поля H_{B} ;

вертикальная составляющая электрического поля E_{B} и горизонтальная составляющая магнитного поля H_{Γ} представляют собой кривую с очень крутым первым фронтом, за которым следуют всплески с гораздо менее крутым фронтом (см. рис. 1.5). Первый фронт обоих компонентов имеет одинаковую крутизну и представляет собой так называемую излучаемую составляющую поля, затухающую обратно пропорционально расстоянию ($1/d$). Последующие фронты (всплески) соответствуют емкостной и индуктивной составляющим, которые уменьшаются с увеличением расстояния быстрее чем пропорционально $-1/d^2$ и $1/d^3$ соответственно. С дальнейшим увеличением расстояния до нескольких десятков километров излучаемая составляющая становится преобладающей, а вертикальная составляющая электрического поля

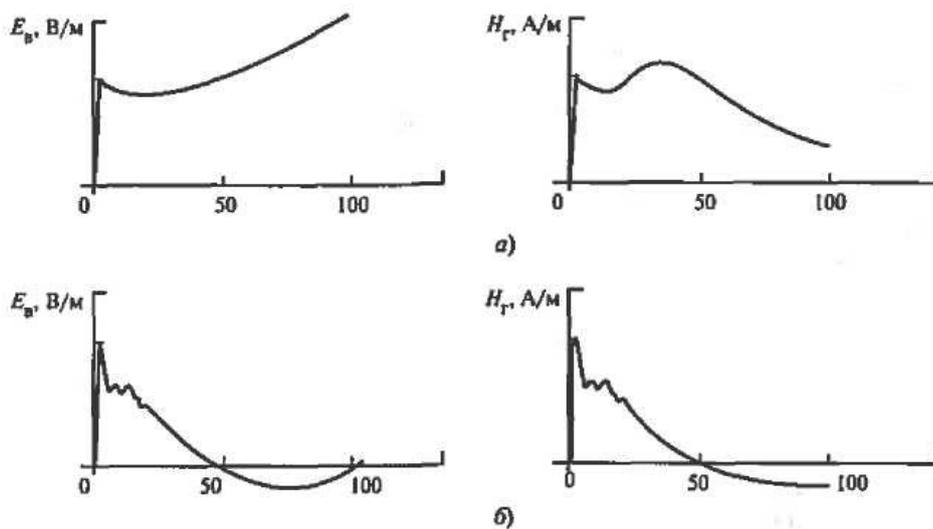


Рис. 1.5. Результаты измерений вертикальной составляющей напряженности электрического E_B и горизонтальной составляющей напряженности магнитного H_{Γ} полей:

a – на расстоянии 5 км от места удара; *б* – на расстоянии 50 км от места удара

E_B и горизонтальная составляющая магнитного поля H_{Γ} становятся взаимосвязанными через волновое сопротивление вакуума, равное 120π Ом.

Максимальная крутизна S_{Em} первого фронта кривой напряженности электрического поля является очень важной величиной. Эта величина пропорциональна наибольшей крутизне фронта тока молнии $S_{Im} = (dI/dt)_{\max}$:

$$S_{Em} = [v / (2\pi\epsilon_0 c^2)] S_{Im} / d,$$

где v - скорость фронта волны тока молнии, $v = (0,2 \div 0,6)$ с.

Крутизна тока молнии согласно последним измерениям может достигать до 300 кА/мкс. В наиболее известных документах СИГРЭ и МЭК, посвященных этому вопросу, приводятся значения крутизны фронта тока на уровне 200 кА/мкс с вероятностью того, что эта крутизна будет превышена не менее чем на 0,01.

Рассчитанные максимальные крутизны первого фронта кривой электрического поля молнии во время разряда могут удерживаться в течение нескольких сотен наносекунд.

Токи разрядов между облаками вызывают появление значительно более слабых электромагнитных полей по сравнению с токами разрядов в землю. Так, напряженность электромагнитного поля вблизи разряда между облаками сопоставима с напряженностью поля основного разряда. В связи с этим разряды между облаками представляют интерес только для аэронавигации.

Оказалось, что при протекании обратного тока молнии и токов разряда между облаками, при рекомбинации зарядов и развитии лидера генерируются электромагнитные поля в диапазоне очень высоких (ОВЧ) или ультравысоких (УВЧ) частот.

На рис. 1.6 приведена кривая Пирса, представляющая собой кривую напряженность электрического поля тока молнии

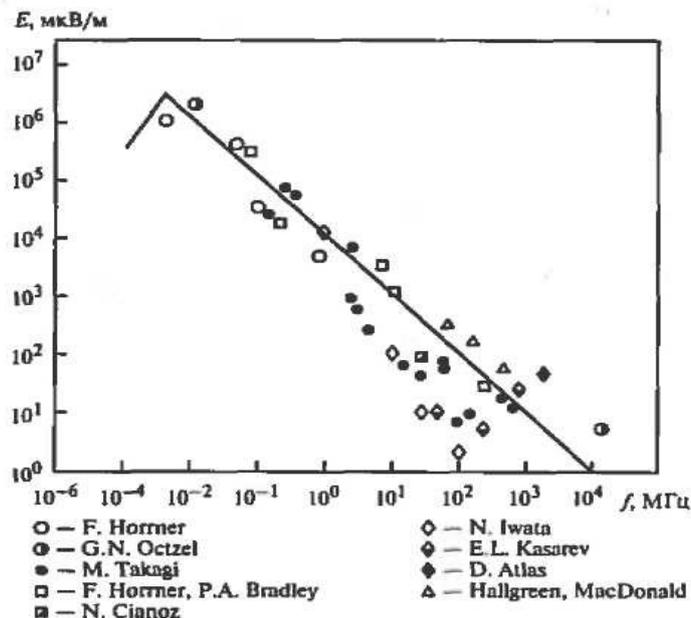


Рис. 1.6. Усредненный спектр амплитудных значений напряженности электрического поля, образующегося при разряде молнии на расстоянии 10 км (кривая Пирса) по данным исследований различных авторов

(измеренную с учетом всех вышеупомянутых составляющих) в диапазонах частот от 1 кГц до 1 МГц при обратном разряде и от десятков мегагерц до гигагерц при рекомбинации зарядов либо развитии стреловидного лидера.

1.2.2. Прямые удары молнии в линии электропередачи и в другие элементы электроустановок

Прямое попадание молнии в линию электропередачи. Результатом такого воздействия является бегущая волна, распространяющаяся вдоль линии электропередачи.

При прямом попадании молнии в фазный провод вид фронта и спада импульса напряжения зависит от формы тока молнии. Длительность фронта импульса может составлять доли микросекунд, а его крутизна достигать 50 МВ/мкс. Крутизну импульса напряжений можно рассчитать по следующей формуле:

$$V_{\max} = S_{\text{lm}} Z_c / 2,$$

где Z_c - волновое сопротивление линии электропередачи.

Импульс напряжения имеет длительность (время до момента уменьшения импульса до половины его амплитуды) порядка нескольких десятков микросекунд.

В случае обратного перекрытия — с опоры или заземленного троса на фазный провод — длительность фронта импульса напряжения составляет порядка нескольких десятков наносекунд (до нескольких сотен наносекунд при большой длине промежутка), а длительность импульса меньше, чем в случае прямого попадания молнии в фазный провод, и составляет от 5 до 15 мкс.

В обоих случаях наклон импульса S сглаживается в той части фронта импульса, где напряжение превышает начальное напряжение возникновения импульсной короны U_0 , что приводит к уменьшению крутизны фронта импульса при прохождении ею некоторого расстояния d .

Для инженерного расчета крутизны фронта S_d бегущего импульса на расстоянии d от места удара молнии используют следующую формулу:

$$S_d = \frac{S}{1 + AdS},$$

где S - крутизна фронта импульса в месте удара молнии, кВ/мкс; d - расстояние, м; A - параметр искажения.

Эффект сглаживания фронта импульса имеет огромное значение. Так, на расстоянии около 1 км (или немного меньше) от места удара молнии вне зависимости от формы импульса в месте удара крутизна фронта импульса будет не меньше 1 МВ/мкс.

Для ЭМС наиболее важным является перекрытие изоляции ВЛ. Вследствие пробоя образуется резкий срез импульса напряжения (обычно на спаде) длительностью порядка десятков или нескольких сотен наносекунд.

При движении импульса вдоль ВЛ крутизна этого среза остается практически неизменной, так как импульсная корона не оказывает на него заметного влияния. Крутизна этого среза может уменьшаться только из-за потерь в линии.

Таким образом, срезанный импульс, возникающий при перекрытии линейной изоляции, оказывает более сильное воздействие на оборудование (например, на вторичные обмотки трансформатора тока), присоединенное непосредственно к линии, чем фронт.

Удары молнии на территории подстанции. При расчете эффектов, обусловленных молнией при прямом ударе в элементы подстанций (здания, молниезащитные тросы или заземленные токоведущие части открытой подстанции), ВЧ-излучение, создаваемое каналом молнии, обычно не учитывают.

В этой ситуации основную роль играет распределение импульсных токов молнии по элементам подстанции, включая оборудование, попадающее в зону растекания -тока молнии.

Можно отметить два основных механизма передачи помех: низкочастотный, связанный с повышением потенциала заземлителя и напрямую связанный с амплитудой тока молнии; высокочастотный, зависящий главным образом от пространственного расположения элементов подстанции (и в меньшей степени связанный с их заземлением) и напрямую связанный с крутизной фронта тока молнии.

На практике непосредственные попадания молнии в элементы подстанции могут рассматриваться как квазистационарные явления. Из этого следует, что для практического моделирования пригодна теория цепей, особенно в тех случаях, когда элементы могут быть представлены в виде взаимосвязанного набора проводящих ветвей. Таким образом, с помощью классической теории цепей можно оценить распределение импульсных токов по объекту.

Процессы, происходящие в модели, анализируются в некотором диапазоне частот, а затем с помощью принципа суперпозиции оцениваются результаты воздействия при различных частотах.

Основные особенности разработанной модели сводятся к следующему:

- при оценке помех цепи или элементы сооружения представляют как часть сети, а напряжения и токи в них определяют как наведенные в элементах сети. При таком подходе становится возможным анализ распространения импульса, если рассматриваемое сооружение достаточно дискретизировано и учтены паразитные емкости;
- математическая модель позволяет одновременно учесть взаимодействия между всеми токами, протекающими в различных ветвях элементов модели сети. При расчете активного сопротивления ветвей учитывается поверхностный эффект. Между двумя соседними узлами может быть помещена ветвь, представляющая RLC - цепочку, Если расстояние между ветвями много больше их размеров, то взаимные индуктивности между этими

ветвями можно не учитывать;

- в модели наличие земли учитывают посредством отображений проводников на определенной глубине в земле, в зависимости от частоты тока и удельного сопротивления земли.

На рис. 1.7 приведены результаты лабораторных испытаний, достаточно хорошо согласующиеся с результатами расчетов.

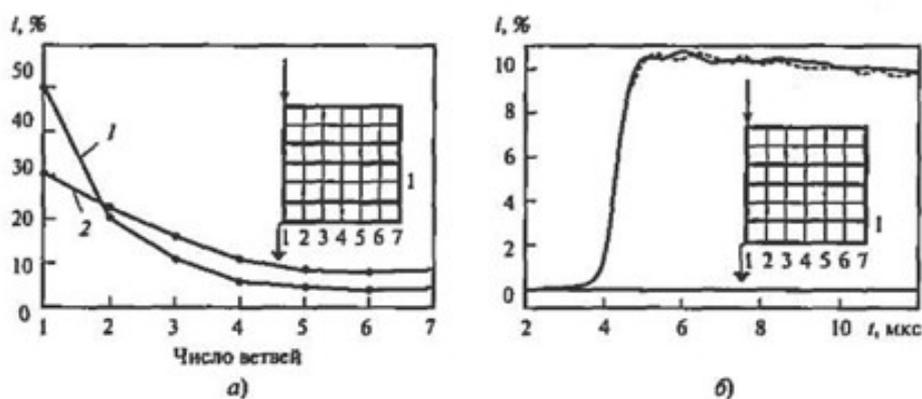


Рис 1.7. Результаты расчетов и лабораторных испытаний:

а - распределение импульсных токов по ветвям 1 и 2 объекта (смоделированного сеткой из медной проволоки диаметром 1 мм с ячейками размером 500 мм), полученное при воздействии импульсного тока стандартной формы; *б* - измеренное (пунктир) и расчетное (сплошная линия) значение тока в одной из ветвей проволочной сетки, обозначенной цифрой 1

1.2.3. Воздействие электромагнитного поля молнии на линии электропередачи или сооружения

Рассматриваемое воздействие имеет важное значение для распределительных линий низкого и среднего напряжения, поскольку на таких линиях возможно возникновение пробоев изоляции, вызванных индуцированными грозовыми перенапряжениями.

Результатом индуцированных перенапряжений является бегущий импульс тока и напряжения, распространяющийся по линии подобно импульсам, вызванным прямыми ударами молнии в ВЛ.

Амплитуда импульса напрямую зависит от расстояния от места удара молнии в землю до линии, возрастает при увеличении высоты линии и заметно уменьшается вследствие экранирования заземленными молниезащитными тросами, если они имеются.

На линиях среднего и низкого напряжения амплитуда бегущего импульса часто превышает напряжение пробоя изоляции, что вызывает ее пробой и срез импульса.

В месте ВЛ, ближайшем к месту удара молнии, фронт импульса имеет такой же вид, как и при прямом ударе молнии, в то время как длительность импульса волны заметно меньше и составляет 5-10 мкс. Выводы по поводу

искажения формы импульса импульсной короной и пробоями изоляции, сделанные применительно к прямому попаданию молнии в провода ВЛ и обратным перекрытиям, одинаково применимы и к данному случаю.

Если сооружение имеет меньшие размеры (длину), чем ВЛ, то и запасаемая им электромагнитная энергия будет меньше. Возмущение же, переданное от сооружения к оборудованию, присоединенному или расположенному в непосредственной близости от сооружения, будет меньше, чем при прямом воздействии поля тока молнии. В этом случае сооружение выступает в роли экрана для излучаемого поля.

1.2.4. Стандартизированные параметры тока молнии

В стандарте МЭК 61312-1 приведены нормированные параметры импульса тока молнии (рис. 1.8 и табл. 1.3-1.5).

Средний ток приблизительно равен Q/T .

Удары молнии в молниеприемники на территории энергообъекта, как правило, вызывают нарушения в работе автоматизированных систем технического управления

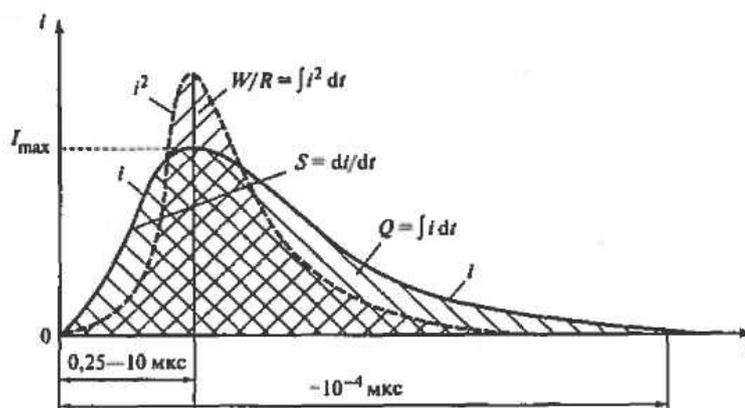


Рис. 1.8. Форма импульса тока молнии i и поражающие факторы тока молнии:

W/R - удельная энергия; S - крутизна тока; Q - заряд; I_{\max} - максимальный ток

Таблица 1.3. Параметры первого импульса тока молнии, развивающейся с положительно заряженного облака

Параметр тока	Уровень защиты		
	I	II	III—IV
Максимальный ток, кА	200	150	100
Длительность фронта T_1 , мкс	10	10	10
Длительность импульса T_2 , мкс	350	350	350
Заряд в коротком импульсе Q_s , Кл	100	75	50

Удельная энергия W/R , МДж/Ом	10	5,6	2,5
---------------------------------	----	-----	-----

Таблица 1.4. **Параметры второго импульса тока молнии, развивающейся с отрицательно заряженного облака**

Параметр тока	Уровень защиты		
	I	II	III—IV
Максимальный ток, кА	50	37,5	25
Длительность фронта T_1 , мкс	0,25	0,25	0,25
Длительность импульса T_2 , мкс	100	100	100
Средняя крутизна S , кА/мкс	200	150	100

Таблица 1.5. **Параметры постоянной составляющей тока молнии**

Параметр тока	Уровень защиты		
	I	II	III—IV
Заряд Q , Кл	200	150	100
Длительность T , с	0,2-0,8	0,2—0,8	0,2—0,8

электротехническими объектами: повреждения кабелей и элементов устройств, нарушение функционирования отдельных устройств.

Анализ таких случаев на действующих подстанциях и электростанциях показал, что при ударах молнии в молниеприемники, расположенные вблизи кабельных каналов или лотков, происходит пробой изоляции кабелей с земли. В результате перекрытия изоляции импульс перенапряжения распространяется по вторичным цепям системы (например, цепям оперативного тока), вызывая повреждение отдельных элементов устройств.

Амплитудно-частотные характеристики импульсных помех, возникающих в кабелях, изменяются в широком диапазоне и зависят от параметров тока молнии, трассы и длины кабелей, нагрузки на концах кабелей. Частотный спектр изменяется от десятков килогерц до нескольких мегагерц. Амплитуда импульсных помех может находиться в пределах от десятков вольт до десятков киловольт.

При ударах молнии в территорию энергообъекта представляют опасность следующие воздействия:

- непосредственное попадание в оборудование высокого напряжения и здания;
- воздействие на автоматические и автоматизированные системы технологического управления электротехническими объектами импульсных магнитных полей от тока молнии;
- перекрытие с заземляющего устройства через грунт на кабели автоматической и автоматизированной системы технологического управления электротехническими объектами;
- перекрытие с поверхности земли на жилы кабелей;
- обратное перекрытие с молниеприемника на первичное

оборудование;

- индукирование импульсных перенапряжений в цепях вторичной коммутации.

На рис. 1.9 дана иллюстрация воздействий молнии на энергообъект, а в табл. 1.6 приведены их некоторые характеристики.

Непосредственное попадание молнии в оборудование высокого напряжения и здания исключается при правильном выборе зон защиты молниеприемников.

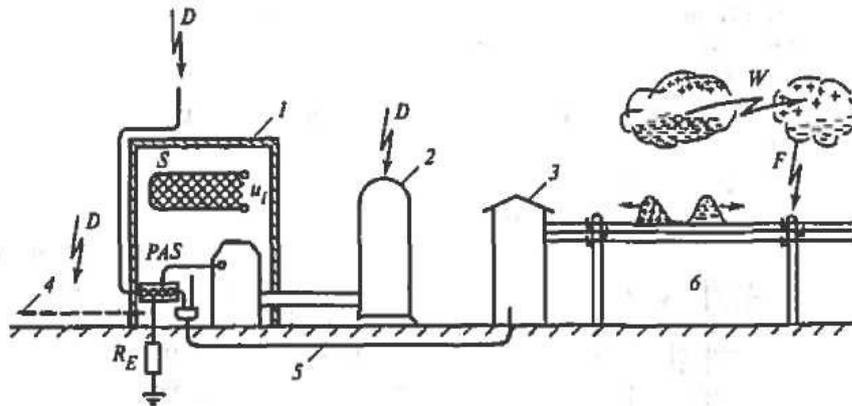


Рис 1.9. Возможные воздействия молнии:

D - непосредственный удар; F - удаленный разряд; PAS - шина выравнивания потенциалов; R_E - сопротивление заземления (0,5-10 Ом); S - пени, образованная проводами; W - разряд между облаками; I - защищаемый объект; 2 - часть защищаемого устройства; 3 - трансформаторная подстанция; 4 - кабель линий управления, связи; 5 - кабель низкого напряжения; 6 - ВЛ

Таблица 1.6. Характеристики воздействия молнии на объекты

Воздействие	Параметр молнии			
	Максимальный ток $I_{max} = 2 \div 200$ кА	Крутизна ток $S = di/dt = 2 \div 200$ кА/мкс	Заряд $Q = \int idt = 150 \div 300$ А·с	Удельная энергия $W/R = \int i^2 dt = 2,5 \div 10$ МДж/Ом
Схема воздействия				
Эффект воздействия в точке удара	Повышение потенциала относительно удаленной	Индукирование напряжения в петлях	Плавление металла в точках удара	Нагрев проводников, по которым протекает ток

	земли			молнии
Примеры	$I_{\max} = 200$ кА; $R_E = 5$ Ом; $U_{\max} = 1$ МВ	$S = 200$ кА/мкс $a = 10$ м $b = 0,1(10)$ м; $u_i = 40$ В (216 кВ)	При $Q = 300$ Кл плавятся алюми- ниевые стенки толщиной до 5 мм	При $W/R = 10$ МДж/Ом плавятся медные провода сечением 10 мм ² и стальные сечением 25 мм ²

При определении типа и мест размещения молниеприемников (стержневой, тросовой или сетка на здании), а также токоотводов и заземления молниеприемника необходимо рассчитывать не только зоны защиты от прямого удара молнии, но и уровни воздействий на автоматические и автоматизированные системы технологического управления электротехническими объектами.

Рассмотрим ситуацию при ударе молнии в стержневой молниеприемник, расположенный вблизи кабельного канала.

Сопротивление растеканию импульса тока молнии (первый импульс 100 кА, 10/350 мкс) может составлять от единиц до десятков ом в зависимости от удельного сопротивления грунта. При этом потенциал молниеприемника $U_{МП}$ при ударе молнии составит от сотен киловольт до нескольких мегавольт. Средняя напряженность пробоя в грунте обычно принимается $E_{ср.пр.} = 300$ кВ/м.

Исходя из этих данных минимально допустимое расстояние от молниеприемника или от его заземляющего устройства до кабельного канала по условию пробоя в грунте составит:

$$L_{дон} = \frac{U_{МП}}{E_{ср.пр.}} = \frac{10^5 \div 10^6}{3 \cdot 10^5} \approx 0,3 \div 3 \text{ м.}$$

При ударе молнии в молниеприемники, расположенные ближе указанных расстояний до кабельных каналов, с большой вероятностью произойдет перекрытие с заземляющего устройства молниеотвода на кабели.

Минимальное расстояние от токоотводов молниеприемника до места размещения автоматических и автоматизированных систем технологического управления электротехническими объектами определяется также из условия

$$l \geq \frac{I}{2\pi H_{дон}},$$

где I - ток; $H_{дон}$ - допустимая напряженность импульсного магнитного поля для рассматриваемых систем.

Учитывая, что автоматические и автоматизированные системы технологического управления электротехническими объектами установлены в железобетонных зданиях и в металлических шкафах, вводят коэффициент ослабления магнитного поля, обусловленного этими конструкциями. Для импульсных полей тока молнии указанный коэффициент для зданий и шкафов, в которых размещаются автоматические и автоматизированные системы технологического управления электротехническими объектами, как правило, более 10.

Расчет наведенных в кабелях импульсных напряжений обычно производят с использованием специальных программ. Наведенные напряжения зависят от длины, типа и трассы прокладки кабелей, а также от расстояния между молниеприемником и кабельным каналом. Так, например, на неэкранированном кабеле длиной 100 м, лежащем на поверхности земли на расстоянии 10 м от молниеприемника, индуцируется напряжение около 60 кВ при ударе молнии (при втором импульсе тока 25 кА, длительности фронта 0,25 мкс).

Пробивное напряжение для воздуха в условиях неравномерного импульсного поля $E_{в.пр} = 500$ кВ/м. Максимальный потенциал на молниеприемнике $U_M = R_{И} I_M + \Delta U_{МО}$, где $R_{И}$ - импульсное сопротивление заземлителя, а $\Delta U_{МО}$ - падение напряжения на молниеотводе. Тогда допустимое расстояние от первичных цепей до молниеприемника можно оценить по формуле $L_{перв} = U_M / E_{в.пр}$.

1.3. КОММУТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЦЕПЯХ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Коммутации выключателями и разъединителями высокого напряжения (рис. 1.10 и 1.11) на электростанциях и подстанциях вызывают электромагнитные помехи вследствие резкого изменения напряжения ΔU на шинах ВН распределительного устройства подстанции или станции.

Изменение напряжения ΔU в первичной цепи вызывает в ней переходный процесс и появление колебательных затухающих импульсов тока и напряжения (серию импульсов в случае повторных зажигания дуги).



Рис 1.10. Коммутация разъединителем на ОРУ 500 кВ

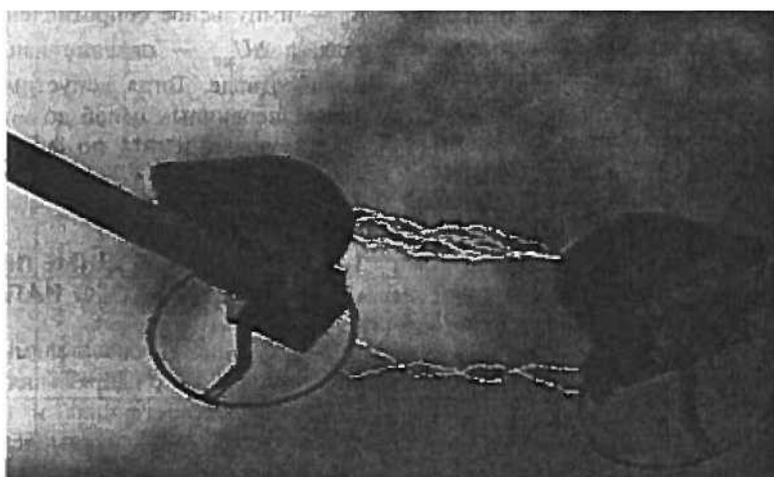


Рис. 1.11. Коммутация разъединителем на ОРУ 330 кВ

Первоначальное (амплитудное) значение тока пропорционально отношению ΔU к волновому сопротивлению первичной цепи. Следовательно, можно ожидать, что амплитуда тока примерно пропорциональна напряжению системы (табл. 1.7).

Время изменения напряжения сильно зависит от расстояния между контактами

Таблица 1.7. Амплитуда импульсной составляющей тока в аппаратах высокого на ПС при коммутациях в КЗ

Параметр	Номинальное напряжение сети									
	110		220		330		500		750	
$n_{Д}$	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4

$I_{ОПНк}, \text{кА}$	0,48	1,9	0,95	3,8	1,15	6,2	2,75	11,0	4,75	19,0
$I_{PB \min \kappa}, \text{кА}$	0,55	2,2	1,1	4,25	1,8	7,0	3,2	12,8	4,4	17,6
$I_{PB \max \kappa}, \text{кА}$	0,88	3,5	1,8	7,1	2,2	8,7	3,3	15,3	5,4	21,5
$I_{ком \max}, \text{кА}$	0,225		0,45		0,77		1,450		2,450	
$I_{ком.вер}, \text{кА}$	0,035		0,09		0,23		0,50		0,85	

Обозначения: $n_{л}$ - число отходящих линий; $I_{ОПНк}$ - амплитуда импульса тока, проходящего в заземлитель при КЗ на подстанции с ОПН; $I_{PB \min \kappa}$, $I_{PB \max \kappa}$ - амплитуда импульса тока при КЗ на подстанции с вентильными разрядниками (при минимальном и максимальном значениях пробивного напряжения); $I_{ком \max}$ - максимальное значение тока при коммутациях с разъединителями ВН; $I_{ком.вер}$ - наиболее вероятное значение тока при коммутациях с разъединителями ВН.

выключателя ВН и может варьироваться от нескольких наносекунд для подстанции с элегазовой изоляцией до нескольких десятков или даже сотен наносекунд для подстанций и станций с ОРУ.

Коммутации с разъединителями характеризуются многократными (до 5000 и более) повторными зажиганиями дуги. Время коммутации зависит от типа разъединителя и составляет от десятков миллисекунд до нескольких секунд.

Крутизна фронта импульсов тока и напряжения зависит от скорости изменения напряжения, а частота колебаний зависит от характеристик первичной цепи и может составлять от десятков килогерц до единиц мегагерц для подстанций и станций с ОРУ и до десятков мегагерц для подстанций с элегазовой изоляцией.

Колебательные затухающие импульсы тока и напряжения могут распространяться по шинам распределительного устройства и создавать электрические и магнитные поля.

На рис. 1.12 показаны результаты измерений напряженностей магнитных и электрических полей, вызванных отключением

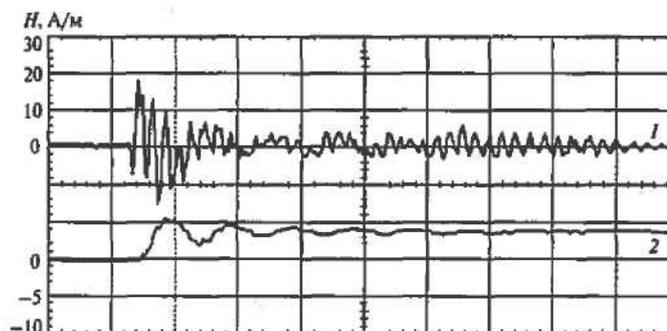


Рис. 1.12. Осциллограммы напряженностей магнитного и электрического полей при отключении шинного разъединителя на ОРУ 110 кВ:

1 - напряженность магнитного поля; 2 - напряженность электрического поля

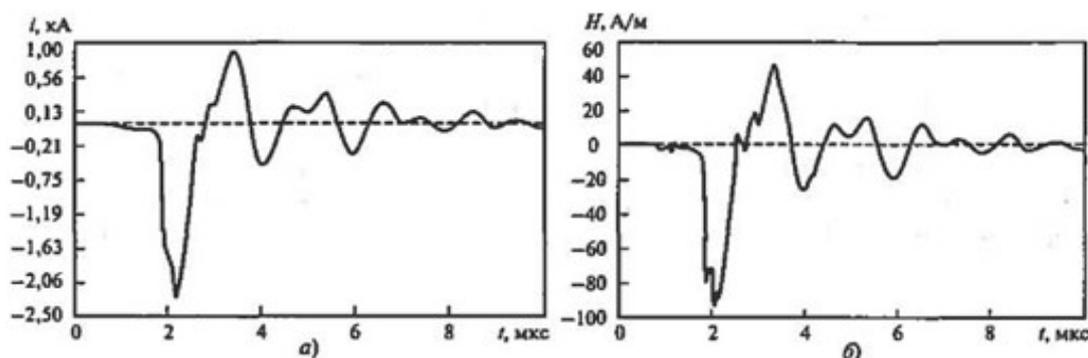
разъединителя на ОРУ 110 кВ. Измерения проводили на расстоянии 3 м от шин. На рис. 1.13 и 1.14 показаны результаты измерений электрических и магнитных полей, вызванных отключением разъединителей 500 кВ. Измерения проводили на уровне земли непосредственно под шинами напряжением 500 кВ на подстанциях с воздушной и элегазовой изоляцией.

Результаты измерений (см. рис. 1.13) подтверждают, что напряженность магнитного поля прямо пропорциональна току в шинопроводе. Напряженность магнитного поля аналогично значению тока в течение нескольких микросекунд уменьшается до нуля, в то время как напряженность электрического поля, зависящая от заряда шинопровода, достигает некоторого установившегося значения.

В табл. 1.8 приведены характерные значения напряженностей электрического и магнитного полей и частоты их колебаний при отключениях разъединителей и выключателей ОРУ и элегазовой ячейки. Измерения проводили непосредственно под шинами присоединений на уровне земли.

Сравнение осциллограмм рис. 1.13 и 1.14 позволяет отметить следующие основные отличия переходных процессов на подстанции с элегазовой изоляцией от процессов на подстанции с воздушной изоляцией:

- основная частота колебаний переходного процесса на подстанции с элегазовой изоляцией, по крайней мере, в 10 раз выше;
- максимальные напряженности электрических и магнитных полей на подстанции с элегазовой изоляцией несколько ниже;
- постоянная времени затухания колебаний напряжения на подстанции с элегазовой изоляцией меньше;
- напряженность электрического поля на подстанции с элегазовой изоляцией за небольшой промежуток времени снижается до нуля.



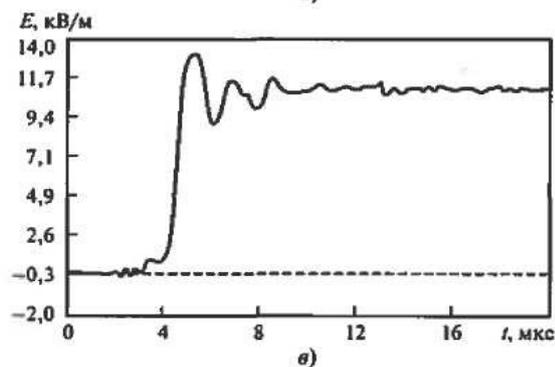


Рис. 1.13. Осциллограммы тока i в цепи ошиновки ВН (а), напряженностей H магнитного (б) и E электрического (в) полей при отключении разъединителя 500 кВ

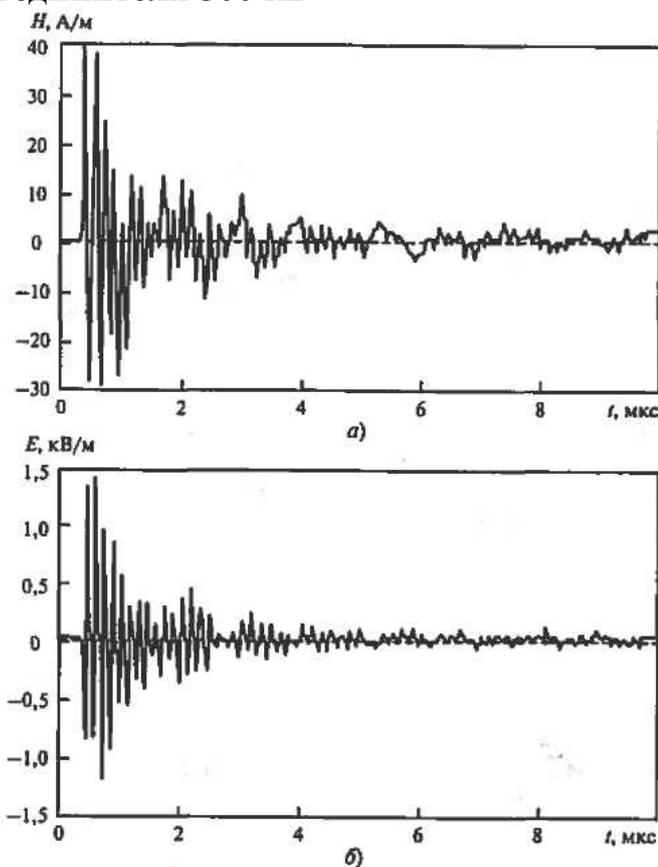


Рис. 1.14. Осциллограммы напряженности магнитного H (а) и электрического E (б) полей при отключении разъединителя 500 кВ на подстанции с элегазовой изоляцией

Таблица 1.8. Напряженность электрического и магнитного полей на ОРУ вблизи элегазовой ячейки

Номинальное напряжение, кВ	Коммутируемый аппарат	Электрическое поле		Магнитное поле	
		f , МГц	E , кВ/м	f , МГц	H , А/м
500	Разъединитель на ОРУ	0,5	15,0	0,5	150,0
230		1,0-2,0	6,0	1,0-2,0	90,0

115		2,0-3,0	10,0	2,0-3,0	50,0
500	Выключатель на ОРУ	2,1-80,0	7,0	1,0-40,0	20,0
230		12,0-30,0	1,2	30,0	9,0
115		0,1	4,0	0,1-30,0	0,7
500	Разъединитель в элегазовой ячейке	20,0	8,0	10,0	100,0
230		115,0	5,0	40,0	90,0
115		—	—	—	—

Вероятной основной причиной уменьшения напряженности магнитного и особенно электрического полей служит наличие металлического заземленного экрана (корпус КРУЭ).

Опыт показывает, что наиболее сильные магнитные поля создаются вблизи мест соединений или мест заземления корпуса КРУЭ. Вследствие этого таким местам следует уделять повышенное внимание.

Пробой электрической изоляции (КЗ на землю) или срабатывание разрядников приводит к снижению потенциала токоведущих частей установки ВН, что, в свою очередь, вызывает переходный процесс, подобно тому, как это происходит при коммутационных операциях. Ток КЗ, протекающий по заземляющему устройству установки, вызывает повышение его потенциала, содержащего высокую и промышленную частоты колебаний.

Амплитуда такого тока в первом приближении прямо пропорциональна напряжению пробоя, которое может быть значительно больше напряжения повторного зажигания дуги при коммутациях (см. табл. 1.7). Такие ситуации могут вызывать появление сильных электромагнитных возмущений, особенно если они происходят в непосредственной близости от приемника помех.

Срабатывание искровых разрядников менее опасно, чем пробой изоляции, из-за меньшего напряжения перекрытия и удаленного положения этих устройств. Однако амплитудные значения параметров таких переходных процессов намного выше, чем при повторных зажиганиях дуги в коммутационных аппаратах.

Зажигание дуги в вентильном разряднике вызывает, подобно искровому разряднику, появление переходных процессов высокой частоты. Максимальные значения параметров переходного процесса ниже вследствие ограничивающего действия остаточного напряжения на нелинейном резисторе разрядника. Наличие нелинейного резистора предотвращает появление больших токов замыкания на землю промышленной частоты.

Срабатывание ОПН не приводит к появлению высокочастотных переходных процессов в сети, так как переход ОПН из практически непроводящего состояния в проводящее происходит плавно.

В ходе обследования действующих энергообъектов выявлено, что при коммутациях цепей высокого напряжения разъединителями и выключателями во вторичных цепях возникают импульсные помехи в виде колебательных затухающих импульсов различной частоты, продолжительности и декремента колебаний (рис. 1.12-1.16). При коммутациях разъединителем имеет место наиболее продолжительный процесс из серии импульсов — до нескольких тысяч

за одну коммутацию. При коммутациях выключателями возникают помехи в виде нескольких импульсов.

Максимальное значение импульсных помех на обследованных объектах составило от десятков вольт до нескольких киловольт, а длительность импульсов — от единиц до десятков микросекунд. Для энергообъектов с ОРУ амплитуда помехи приблизительно пропорциональна номинальному напряжению. Более высокий уровень импульсных помех при коммутациях разъединителями и выключателями наблюдается на объектах с высоким удельным сопротивлением грунта.

Чем ближе проходит трасса кабелей автоматизированной системы технологического управления к шинам высокого напряжения, тем выше уровень помех. При прокладке кабелей в лотках уровень помех в несколько раз ниже, чем при контрольном кабеле, проложенном по той же трассе на поверхности земли, из-за взаимного экранирования кабелей в лотке. Для кабелей, проложенных в кабельном канале в земле ниже контура заземления, уровень помех снижается в сотни раз по отношению к уровню помех в контрольном кабеле на поверхности земли.

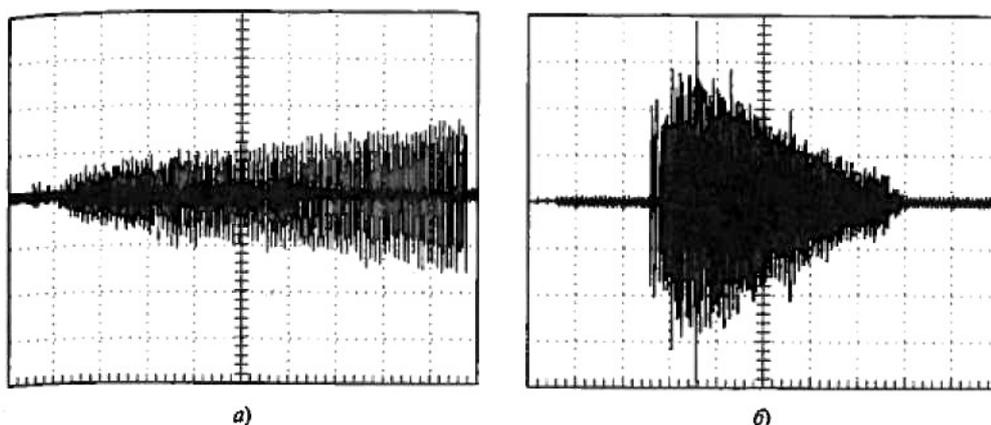


Рис 1.15. Серия импульсных помех:

а - при отключений разъединителя 330 кВ (масштаб 50 В/дел., 200 мс/дел.); *б* - при включений разъединителя 400 кВ (масштаб 100 В/дел., 200 мс/дел.)

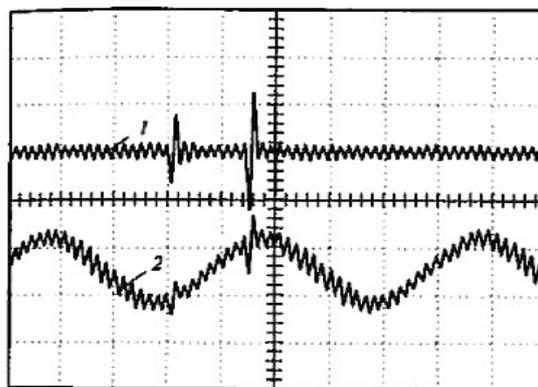


Рис. 1.16. Импульсные помехи в цепи напряжения при коммутации выключателем 330 кВ:

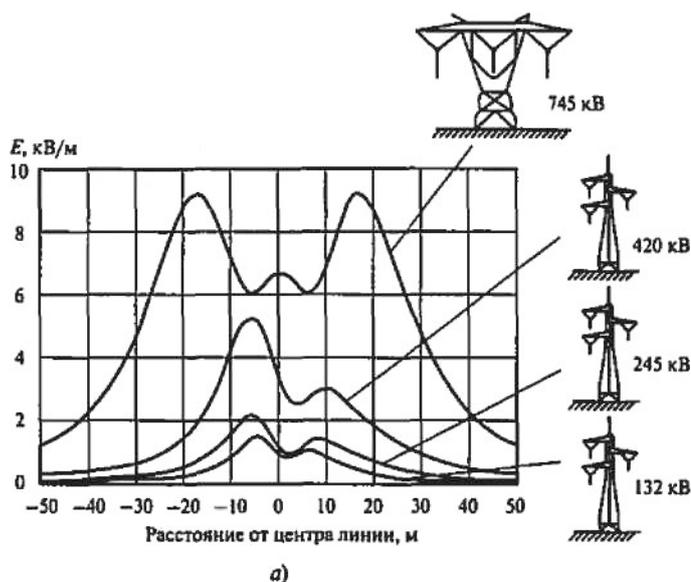
1 – фаза В (заземлена); 2 - фаза А (масштаб 100 В/дел., 5 мс/дел.)

Наибольшие уровни помех регистрируются в измерительных цепях напряжения, заземленных в распределительном устройстве. В некоторых случаях наблюдаются резонансные явления, когда амплитуда помех возрастает в несколько раз. В частотном спектре импульса присутствует несколько составляющих. Диапазон изменения этих частот для энергообъектов лежит в интервале от десятков килогерц до десятков мегагерц. Основная частота помехи увеличивается с уменьшением размеров распределительного устройства. Для подстанций с элегазовой изоляцией основная частота на порядок больше, чем для открытой подстанции.

1.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ, СОЗДАВАЕМЫЕ СИЛОВЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Силовое оборудование подстанций и станций (шины, силовые кабели, реакторы, трансформаторы и т.д.), находящееся под напряжением, создает вокруг себя электрические и магнитные поля промышленной частоты.

Напряженности этих полей зависят от класса напряжения и тока в силовом оборудовании, а кроме того, и от пространственного положения проводников с током (в частности, от высоты проводников над поверхностью земли, междуфазного расстояния, последовательности фаз и числа цепей).



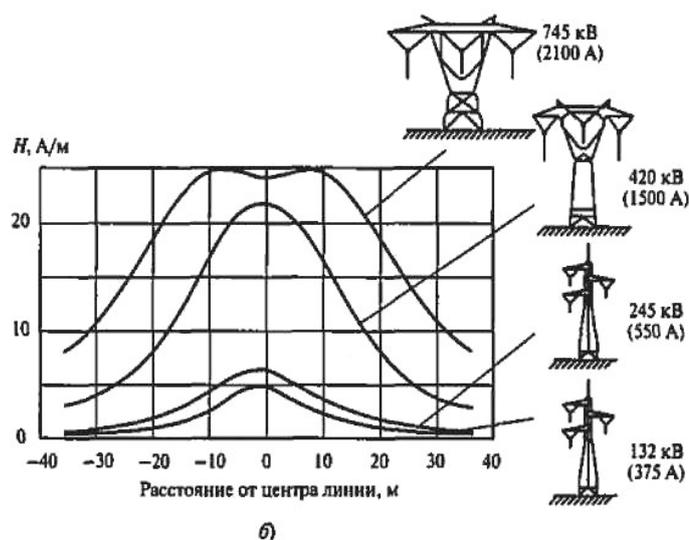


Рис. 1.17. Эпюры напряженности электрического и индукции магнитного полей промышленной частоты, создаваемых на уровне поверхности земли под ВЛ:

a - вертикальная составляющая напряженности электрического поля; *б* - магнитное поле

В качестве примера на рис. 1.17 приведены результаты расчета электрических и магнитных полей, создаваемых ВЛ высокого напряжения в нормальных эксплуатационных условиях. Даны эпюры напряженности электрического и магнитного полей при поперечном разрезе ВЛ в середине пролета. Вследствие того, что провес проводов в середине пролета наибольший, в других аналогичных разрезах создаваемые поля будут заметно меньшими.

Полученные эпюры напряженностей электрических и магнитных полей, создаваемых линиями электропередачи, обычно хорошо согласуются с результатами измерений, так как ВЛ имеют относительно простую конфигурацию.

Расчеты напряженностей электрических и магнитных полей на территории ОРУ электростанций и подстанций затруднены вследствие экранирующего действия многочисленного силового оборудования, расположенного в различных местах ОРУ. На рис. 1.18 приведена карта магнитного поля частотой 50 Гц, полученная в результате такого приближенного расчета. Более достоверные сведения могут быть получены на основе измерений. На рис. 1.19 в качестве примера показаны результаты измерений, выполненных на подстанции напряжением 380/130 кВ.

Магнитные и электрические поля промышленной частоты (а также гармонические составляющие низкой частоты) могут оказывать неблагоприятное влияние на автоматические и автоматизированные системы технологического управления электротехническими объектами из-за низкочастотных наводок в цепях сигнализации и управления, измерительных цепях, воздействуя непосредственно на терминалы микропроцессорных устройств и на мониторы компьютеров. На рис. 1.20 приведена картина магнитного поля токоограничивающих реакторов на релейном щите управления подстанции.

Близкое расположение реакторного помещения и щита управления является примером неучета обеспечения ЭМС автоматической и автоматизированной систем технологического управления электротехническими объектами на стадии проектирования объекта.

В табл. 1.9 приведены некоторые данные по напряженностям магнитных полей промышленной частоты на электрических станциях и подстанциях.

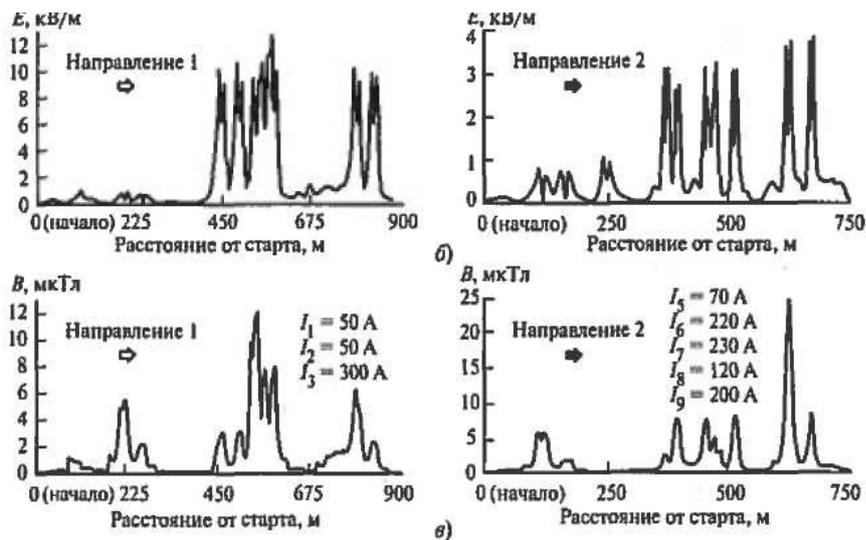
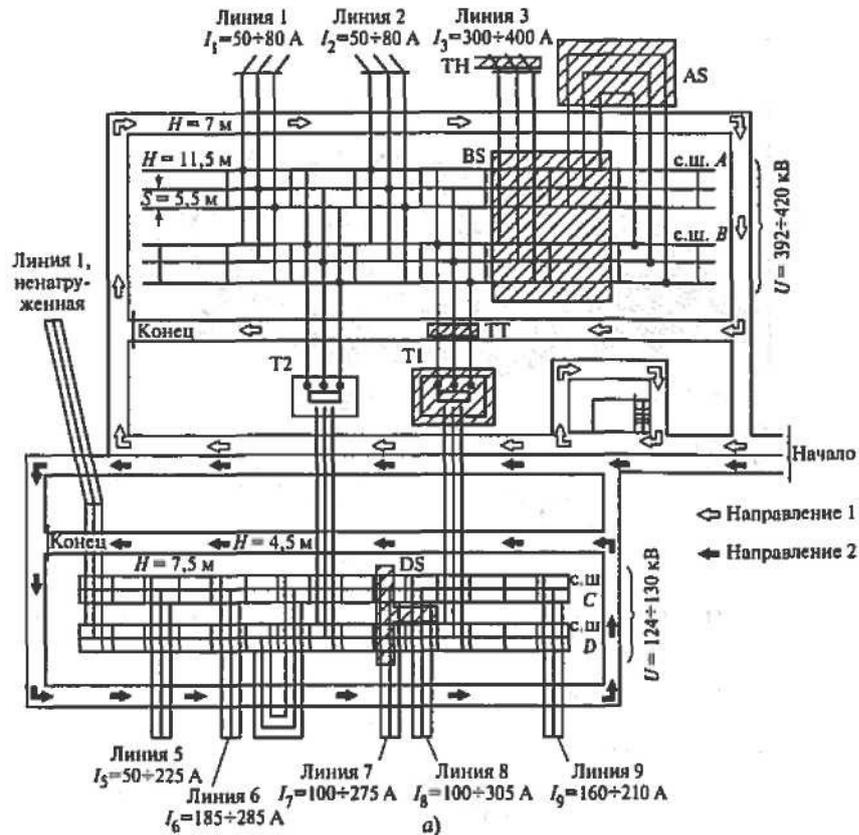


Рис. 1.19. Электрические и магнитные поля промышленной частоты на территории подстанции напряжением 380/130 кВ по результатам измерений:

а - план подстанции; *б* - эпюры напряженности электрического поля; *в* - эпюры магнитной индукции по некоторым направлениям

Таблица 1.9. **Напряженности магнитного поля промышленной частоты на промышленных предприятиях**

Предприятие, устройство	Место измерения	Напряженность, А/м
Электростанция	На расстоянии 0,3; 0,5; 1,0; 1,5 м от генераторных сборных шин с током 2,2 кА	36; 22; 12; 6,5
	Вблизи трансформатора мощностью 190 МВ·А, связывающего генератор с сетью ВН	6,4
	На расстоянии 0,3; 0,5; 1,0; 1,5 м от ячейки РУ 6 кВ	13; 9; 4,3; 2,4
	На расстоянии 0,3; 0,5; 1,0 м от трансформатора мощностью 0,6 МВ·А СН	14; 9,6; 4,4
	На расстоянии 0,3; 0,5; 1 м от двигателя насоса мощностью 6 МВ·А с номинальным током 0,65 кА на стороне кабельного подвода СН	26; 15; 7
	В приборном помещении на расстоянии 0,3 м от многоканального записывающего устройства	10,7
	В диспетчерской на расстоянии 0,3 м от записывающего устройства	0,9
Линия электропередачи 400 кВ	Под проводами в середине пролета при токе 1 кА	10
Подстанция	Под сборными шинами 400 кВ вблизи присоединения линии с током 0,6 кА	9
	Под сборными шинами вблизи присоединения линии 200 кВ с током 0,5 кА	14
	В помещении с релейным оборудованием на расстоянии 0,1; 0,3 м от трансформаторов	7; 11
Электростанция на буром угле	На пульте управления на расстоянии 20 м от генератора	8
Электротяговая подстанция	В помещении с вычислительной техникой на расстоянии 16 м от РУ 5 кВ	4 - 6
	Непосредственно в РУ	До 80
Электролизное хлорно-газовое устройство	В помещениях рядом с электролизным устройством	1600 постоянное поле с наложенным переменным полем
Устройство для плавки алюминия	В помещениях на расстоянии 6 м от шин с током 100 кА	1200 постоянное поле

1.5. РАДИОЧАСТОТНЫЕ ПОЛЯ

Радиопередатчики относятся к классу источников преднамеренного, излучения. Примерами такого излучения являются радиовещательные передатчики, навигационные средства и устройства дистанционного управления.

В табл. 1.10 приведена информация по некоторым официально разрешенным источникам преднамеренного излучения с указанием значений

излучаемой мощности, типичных расстояний от радиопередатчика до приемника в населенной местности и расчетной напряженности электрического поля. Для всех диапазонов, кроме диапазона волн ОВЧ (0,014÷0,5 МГц), напряженность электрического поля дана для расстояний, превышающих зону поля электромагнитной индукции.

Значения напряженности электрического поля, приведенные в табл. 1.10 (согласно МЭК 61000-2-3), получены по выражению:

$$E = k (\text{ЭИМ})^{0,5} r^{-1},$$

где k - постоянная величина ($k=7$ для всех источников, кроме переговорных устройств, для которых $k=3$ (см. МЭК 61000-4-3); ЭИМ - эффективная излучаемая мощность, Вт; r - минимальное расстояние, м.

В рассматриваемой модели источник излучения - передающая антенна - ведет себя как полуволновой диполь в дальней зоне излучения, в которой расстояние между источником излучения и точкой наблюдения больше, чем значение $\lambda/2\pi$, где λ - длина волны излучения, превышающая размеры источника излучения. В дальней зоне излучения выполняется отношение $E/H \approx 377$ Ом в воздухе, где E и H - напряженности электрического и магнитного полей.

Таблица 1.10. Электрические поля, создаваемые некоторыми радиопередатчиками

Источник	Частотный диапазон, МГц	Типичное максимальное действующее значение излучаемой мощности, Вт	Типичное минимальное расстояние, м	Напряженность электрического поля в соответствующей точке, В/м
Радиотрансляция в диапазоне длинных волн и в приморской зоне	0,014 - 0,5	$2,5 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^3$	5,5
Радиотрансляция в диапазоне средних волн	0,2 - 1,6	$800 \cdot 10^3$	500	12,5
Любительские радиостанции	1,8 - 30	$1 \cdot 10^3$	10	22
Коротковолновая связь, включая радиотрансляцию	1,6 - 30	$10 \cdot 10^3$	1×10^3	0,1
«Гражданский» диапазон	27 - 28	12	10	2,5
Любительские радиостанции диапазона ОВЧ и УВЧ	50 - 52 144 - 146 432 - 438 1290 - 1300	$8 \cdot 10^3$	10	65
Стационарные и мобильные средства	29 - 40 68 - 87	130	2	40

связи	146 - 174 422 - 432 438 - 470 860 - 990			
Портативные телефоны, включая сотовые и радиотелефоны	900 - 1900	5	0,5	30
Телевидение диапазона метровых волн (ОВЧ)	48 - 68 174 - 230	$320 \cdot 10^3$	500	8
Радиотрансляция в диапазоне метровых волн (ОВЧ)	88 - 108	$100 \cdot 10^3$	250	9
Телевидение диапазона дециметровых волн (УВЧ)	470 - 853	$500 \cdot 10^3$	500	10
Радарные установки	1000 - 30 000	$10 \cdot 10^6$	200	110
Приемопередатчики (переносные)	27 - 1000	5	0,5	30

В табл. 1.10 напряженности электрического поля приведены для радаров военного назначения. Эти значения рассчитаны для расстояния 200 м, так как электрические станции и подстанции могут располагаться вблизи мест использования таких радаров (например, около моря).

Кроме устройств, указанных в табл. 1.10, существуют и другие устройства излучения электромагнитной энергии (например, устройства охранные сигнализации, дистанционные пульты управления гаражными воротами). В таких устройствах, как правило, используют запрещенные радиодиапазоны с относительно малыми излучаемыми мощностями.

В составе силовых установок присутствуют и другие источники высокочастотных возмущений, например двигатели, генераторы, силовые преобразователи, осветительные устройства, электронные системы и т.д.

Проведенные измерения показали, что на большинстве обследованных энергообъектов уровень напряженности поля радиочастотного диапазона не превышал допустимых для микропроцессорных устройств автоматических и автоматизированных систем технологического управления электротехническими объектами значений. В то же время на одной из подстанций Мосэнерго была зарегистрирована напряженность поля более 100 В/м на частоте около 1 МГц. Высокий уровень напряженности поля (более 25 В/м) был также зарегистрирован при использовании персоналом энергообъекта на релейном щите (расстояние от источника излучения 3 м) стандартного радиопереговорного устройства на частоте 27 МГц.

1.6. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ИМПУЛЬС ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА

Термин электромагнитный импульс (ЭМИ) ядерного взрыва включает в себя множество категорий импульсов, в том числе вызванных взрывами на поверхности Земли или в космическом пространстве. Высотные (выше 30 км)

ядерные взрывы особенно опасны для объектов электроэнергетики. Они вызывают появление трех типов электромагнитных импульсов, которые могут проявить себя на поверхности Земли:

- первый и второй ЭМИ;
- третий (магнитогидродинамический) ЭМИ.

Возникновение первого ЭМИ связано с отражением электронов Комптона, создаваемых X - излучением, Y - излучением и нейтронами при их взаимодействии с молекулами воздуха при ядерных взрывах на больших высотах (рис. 1.21).

Эти электроны когерентно отражаются магнитным полем Земли, так что поперечный поток электронов создает поперечное электрическое поле, распространяющееся по направлению к поверхности Земли.

Первый импульс характеризуется значительными пиковыми напряжениями электрического поля (десятки киловольт на метр), малой длительностью фронта (порядка единиц наносекунд), небольшой общей длительностью импульса (до сотен наносекунд).

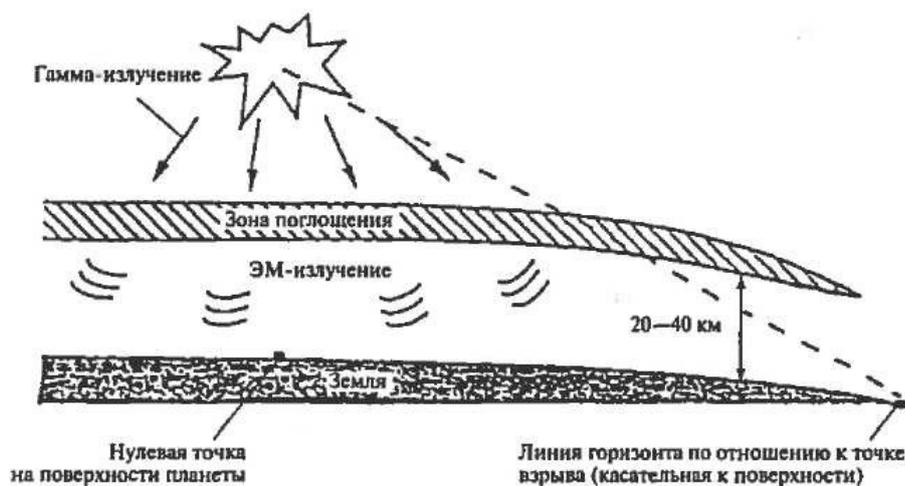


Рис. 1.21. Первый ЭМИ высотного ядерного взрыва

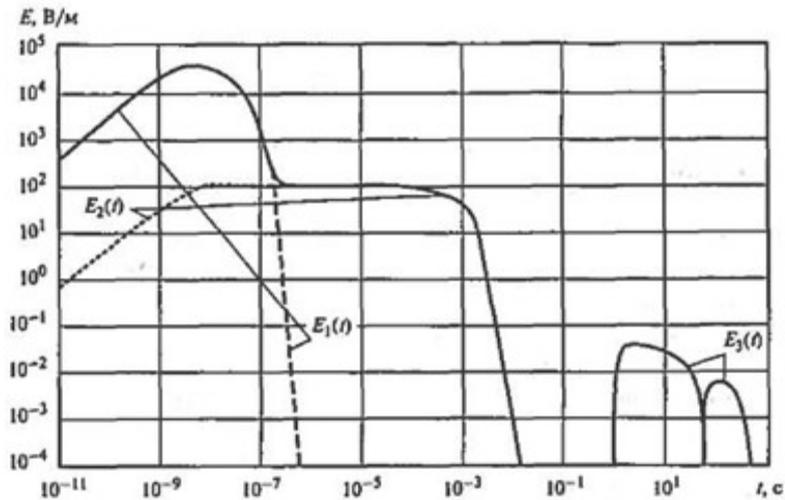


Рис 1.22. Форма ЭМИ высотного ядерного взрыва:

$E_1(t)$ - напряженность первого ЭМИ; $E_2(t)$ - напряженность второго ЭМИ; $E_3(t)$ - напряженность МГД ЭМИ

Непосредственно за быстрым первоначальным переходным процессом излучаемое нейтронами рассеянное и жесткое гамма-излучение создает дополнительную ионизацию, приводящую к появлению второго ЭМИ.

Напряженность электрического поля этого импульса составляет от 10 до 100 В/м и может длиться от единиц до десятков миллисекунд.

Последний импульс, обычно называемый магнитогидродинамическим (МГД ЭМИ), генерируется самим ядерным взрывом и характеризуется электрическим полем низкой амплитуды (порядка десятков милливольт на метр), длительным фронтом (порядка секунд) и длительным импульсом (сотни секунд).

На рис. 1.22 (публикация МЭК 1000-2-9 за 1996 г.) показаны три рассмотренные составляющие высотного ядерного взрыва ЭМИ. Общая напряженность электрического поля определяется как

$$E(t) = E_1(t) + E_2(t) + E_3(t),$$

где E_1 - напряженность первого ЭМИ высотного ядерного импульса; E_2 - напряженность второго ЭМИ; E_3 - напряженность МГД ЭМИ.

Воздействие описанных выше ЭМИ может представлять угрозу работе электроустановок при совпадении двух условий:

- ВЛ имеют достаточную длину для образования больших разностей потенциалов на их концах;
- на обоих концах ВЛ сопротивление заземлителя постоянному току небольшое, что создает возможность протекания по линии постоянных токов (при этом токи в несколько сотен ампер могут вызвать эффект насыщения сердечника трансформатора).

Благодаря своим свойствам МГД ЭМИ могут взаимодействовать с ВЛ очень большой длины и наводить в них токи, вызывающие появление гармонических составляющих тока и дисбаланса фаз, которые, в свою очередь, могут серьезно повредить некоторые компоненты энергосистемы (например, силовые трансформаторы). Поля, создаваемые МГД ЭМИ, вызывают появление наведенных токов, подобных токам в телефонных сетях (земляным токам), причиной появления которых являются магнитные бури, довольно часто случающиеся в северных странах.

1.7. РАЗРЯДЫ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Накопление заряда статического электричества на теле человека обычно имеет трибоэлектрическую природу. При этом электростатический заряд человека обусловлен трением двух материалов, один из которых является непроводящим (пластик, синтетика).

Первичные источники статического электричества приведены в табл. 1.11.

В общем случае значение заряда статического электричества объекта зависит от следующих факторов:

- уровня относительной влажности воздуха (при повышенной влажности воздуха заряд стекает быстрее);
- сопротивления изоляции и диэлектрической проницаемости диэлектрика - подошвы обуви, ковра, одежды, покрышек колес и т.д., отделяющего заряженный объект от проводящей поверхности;
- электрической емкости объекта, включая человека, относительно земли;
- ритмичности шагов при движении и скорости перемещения человека;
- сопротивления кожи человека (с учетом потоотделения);
- поверхностного давления между двумя взаимодействующими материалами.

В зависимости от условий окружающей среды потенциал человека может достигать 10-25 кВ, а запасенная энергия— несколько миллиджоулей. Типичные потенциалы приведены в табл. 1.12.

На рис. 1.23 приведены зависимости потенциала, обусловленного зарядом статического электричества человека, от относительной влажности воздуха.

Разряд статического электричества с тела человека может вызывать протекание кратковременных импульсов тока (длительностью фронта от сотен пикосекунд до нескольких наносекунд) с амплитудой в несколько десятков ампер и длительностью импульса до 100 нс; параметры тока зависят от уровня напряжений и параметров цепи разряда.

Таблица 1.11. **Первичные источники статического электричества**

Предмет	Материал, изделие
---------	-------------------

Рабочие столы	Покрытые пластиком, лакированные или натертые мастикой поверхности
Рабочие стулья	Пластик, фибerglass, лакированные деревянные поверхности, дедероновые чехлы, мягкая обивка на основе пенорезины, незаземленные металлические стулья
Полы	Лакированный бетон, натертое дерево, пластиковые покрытия, каменные плиты, ковры из синтетических материалов
Одежда	Рабочая и прочая одежда из синтетических материалов, хлопка, не подлежащая глажению, обувь с креповой или резиновой подошвой
Упаковка, тара	Коробки, кляссеры, футляры, чехлы, кожухи, сумки, пакеты и упаковочные материалы из пластмассы
Инструмент	Инструмент с пластмассовыми ручками, незаземленные работающие паяльники, оксидированные алюминиевые и анодированные металлические поверхности, всасывающие патрубки из пластика, щетки и кисти с синтетической щетиной, изолированные каретки в устройствах поточной пайки, испаряющийся флюс
Документация, бумага, письменные принадлежности	Бумага любого вида, фотокопии, фольга, пишущие приборы из пластика

Таблица 1.12. Потенциалы, обусловленные зарядами статического электричества, измеренные при относительной влажности воздуха 24 % и температуре воздуха 21°C

Причина возникновения	Производственное помещение	Потенциал, В
Человек, идущий по полу с поливинилхлоридным покрытием	Монтажное	200 - 9000
Человек, работающий за верстаком	»	100 – 3000
Человек, держащий пластмассовую сумку перед верстаком	»	300 – 7000
Человек, заполняющий приемный бункер автоматического сортировочного устройства	»	100 – 2000
Извлечение пластиковой микросхемы из пластикового пакета	»	До 20000
Извлечение пластиковой микросхемы из пенопластовой тары	»	До 11000
Упаковка керамической микросхемы в пластмассовый футляр и извлечение из него	»	До 4000
Упаковка керамической микросхемы в пенопластовую тару и извлечение из нее	»	До 5000
Манипуляции с паяльными устройством	Ремонтная мастерская	500 – 1500
Размещение отдельных печатных плат в пластиковый чемодан	Испытательное помещение	100 – 800
Человек, идущий по нейлоновому ковру	Канцелярское помещение	10000 - 15000
Полиэфирная натертая сумка, положенная на верстак с поливинилхлоридным покрытием	Лаборатория	100 – 800 (2000 В при подъеме сумки на 10 см)

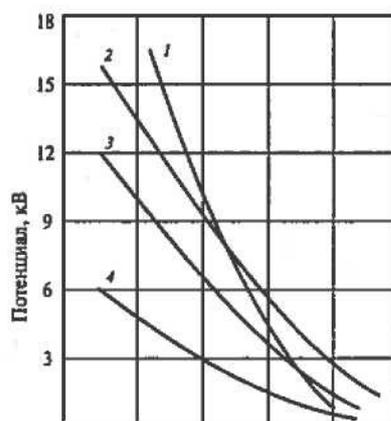


Рис. 1.23. Зависимости потенциала зарядов статического электричества человека от относительной влажности воздуха:

1 - при проходе по резиновому мету на расстояние 6 м; 2 - при поднятии пластикового пикета с верстака; 3 - при проходе по виниловому полу на расстояние 6 м; 4 - при вставании со стула

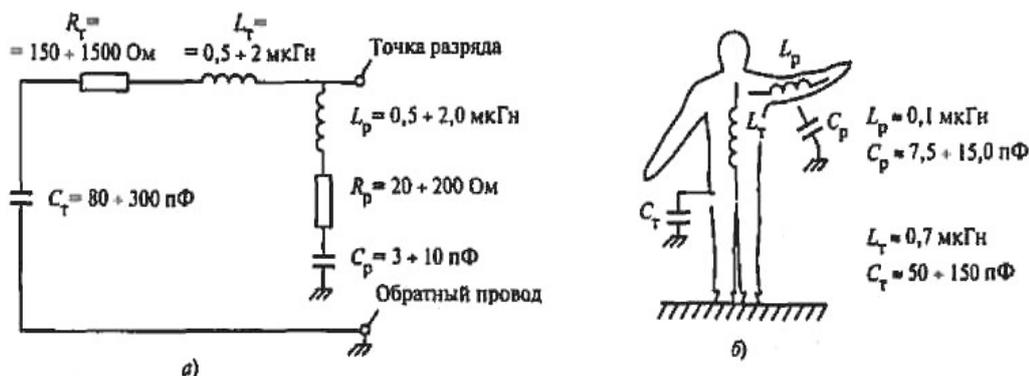


Рис 1.24. Расчетная схема на основе модели электростатического разряда тела человека:

а - модель электростатического разряда на основе двойной RLC -цепочки; б - модель человеческого тела для электростатического разряда (активные сопротивления для простоты опущены)

В процессе накопления заряда статического электричества человеческое тело проявляет себя как конденсатор емкостью от 100 до 200 пФ. Если человек во время заряда изменяет свое положение, то меняется его емкость относительно окружающих предметов и соответственно потенциал. Например, когда человек поднимается со стула, его емкость уменьшается, а потенциал увеличивается. Запасенная человеком энергия может превысить 1 мДж. Считается, что при разряде статического электричества человек обладает активным сопротивлением от 500 до 1500 Ом.

Схема замещения контура разряда с тела человека представлена в виде упрощенной модели разрядной цепи (рис. 1.24), суть которой состоит в следующем. Модель основана на разделении составляющих тока с тела

человека с параметрами R_T, L_T, C_T и его руки с параметрами R_p, L_p, C_p . Указанная RLC - цепь руки вызывает появление первоначальных пиков тока.

Разряд статического электричества с тела человека является чрезвычайно быстрым процессом. Иногда ток разряда состоит из весьма кратковременных предварительных импульсов, наложенных на начальную часть основного, длительного тока.

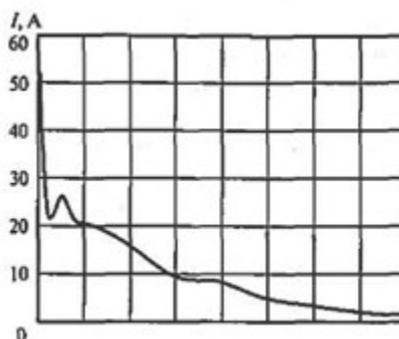


Рис. 1.25. Типичный ток разряда оператора через имеющийся в его руке металлический ключ

Это поясняет рис. 1.25, где показана осциллограмма тока разряда с оператора, заряженного до потенциала 8 кВ. Полоса пропускания системы измерения составляла 1 ГГц.

Предварительные кратковременные импульсы тока появляются в основном при небольших зарядных напряжениях.

При анализе действия разряда как источника помех очень важно знать, есть ли предварительные пики тока. На рис. 1.26 показан спектральный состав полного импульса тока разряда статического электричества (суммы кратковременного и длительного токов). Наличие кратковременных составляющих тока увеличивает спектральную плотность в области высоких частот.

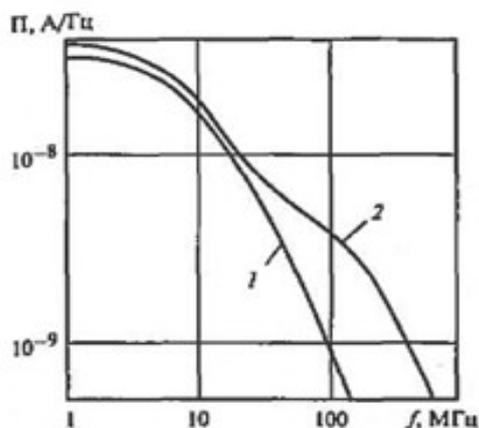


Рис. 1.26. Спектральный состав полного тока разряда статического электричества:

Π - плотность распределения амплитуд; I - длительная составляющая; 2 - полный импульс

Отсюда следует, что первоначальные кратковременные составляющие тока очень важны, так как большинство механизмов передачи помех являются высокочастотными.

Если зарядные потенциалы человека достигают значений, при которых возможен коронный разряд, то крутизна импульса тока разряда в значительной степени определяется скоростью приближения заряженного объекта к объекту разряда. Если сближение происходит достаточно быстро, фронт импульса тока имеет большую крутизну.

Наиболее сильным воздействием разрядов статического электричества получается, когда в руке или на руке имеется металлический предмет (ключ, отвертка, проводящие браслеты и т.д.). В этом случае крутизна тока, определяющая индуцированные напряжения помех, может достигать 100 А/нс.

Основными методами предотвращения вредного воздействия разрядов статического электричества и несанкционированного функционирования средств электроники являются исключение или ограничение накопления зарядов, отвод или нейтрализация неизбежно возникающих зарядов статического электричества, сведение к минимуму полевых и разрядных воздействий.

1.8. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОМЕХИ, ВЫЗВАННЫЕ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ЗЕМЛИ

Протекание в энергосистемах токов, наведенных магнитным полем Земли, вызвано изменениями этого магнитного поля. Первоисточником токов является Солнце, с поверхности которого при определенных условиях в окружающее пространство выбрасывается огромное количество заряженных частиц, суммирующихся с постоянным потоком подобных заряженных частиц (солнечный ветер). Выбросы Солнцем заряженных частиц взаимосвязаны (хотя и не полностью) с циклом солнечных пятен. Иногда магнитные бури происходят из-за «дыр» в короне Солнца, создающих в его поверхности проколы. Наибольшие выбросы происходят при повышенной солнечной активности, а максимальный поток электронов достигается во время фазы уменьшения солнечной активности.

Когда излучаемые Солнцем заряженные частицы достигают Земли (по прошествии примерно трех дней с момента излучения), они отражаются магнитным полем нашей планеты. Взаимодействие между частицами и магнитным полем Земли приводит к появлению в ионосфере и магнитосфере кругового движения частиц вокруг магнитных полюсов. Токи, протекающие таким образом в ионосфере и магнитосфере Земли, могут вызывать магнитные возмущения и бури длительностью в несколько часов.

По статистике наведенное геоэлектрическое поле имеет наибольшее значение напряженности в направлении восток - запад, так как северный магнитный полюс Земли находится в Гренландии.

Наибольшая интенсивность геомагнитных возмущений наблюдается обычно

ночью в виде северного и южного сияний. Однако возможны многочисленные исключения в отношении времени и места появления магнитных бурь.

В случае, если энергосистема располагается в зоне северных или южных сияний, и удельное сопротивление грунта достаточно велико, то под действием магнитного поля Земли ТНМПЗ (частота составляет порядка нескольких миллигерц), могут иметь значительные амплитуды.

Токи, наведенные в электроустановках магнитным полем Земли, оказывают на них существенное влияние, если выполняется хотя бы одно из следующих условий:

- большое удельное сопротивление грунта;
- система соединена с заземлителями с низким сопротивлением растеканию тока, по крайней мере, в двух точках; обычно это имеет место, если сеть выполнена с эффективно или глухо заземленной нейтралью. В этих случаях длинные ВЛ подвергаются действию сравнительно больших токов в несколько десятков ампер на фазу.

Главные результаты действия токов, наведенных магнитным полем Земли, следующие:

- может наблюдаться быстрое насыщение магнитопровода силовых трансформаторов. Как следствие, возможно повреждение трансформаторов из-за их перегрева, искажение напряжений и токов линий, а также потоков реактивной мощности в системе;

- появление гармонических составляющих токов и напряжений. Следствием этого может быть неправильная работа устройств управления и релейных защит. Кроме того, может повреждаться оборудование, работающее с изолированной нейтралью.

Проблемы такого рода явились причиной повреждений в США и Канаде нескольких силовых трансформаторов и одного масштабного нарушения электроснабжения. На рис. 1.27 приведен пример изменения напряженности электрического поля во времени, вызванное изменением магнитного поля Земли. Это изменение магнитного поля явилось причиной нарушения электроснабжения системы ГидроКвебек в Канаде.

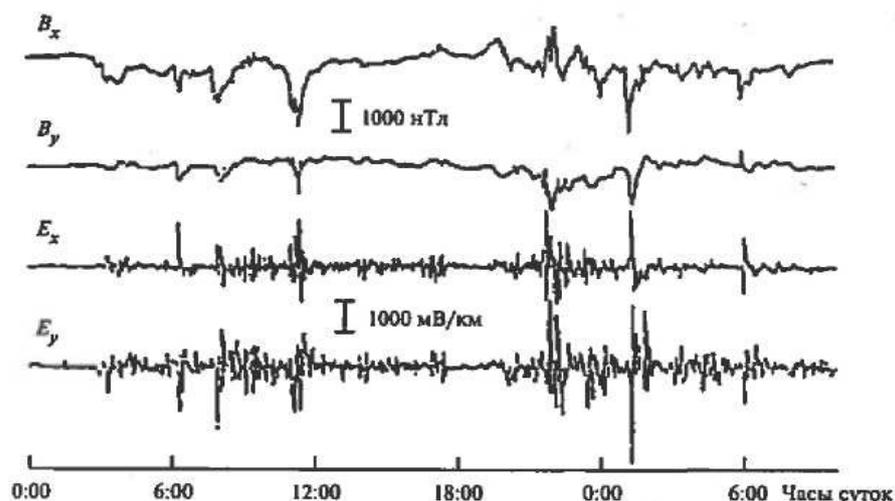


Рис. 1.27. Результаты измерений индукции магнитного поля Земли в провинции Оттава (Канада) (B_x, B_y) и соответствующие расчетные напряженности электрического поля E_x, E_y , (для Квебека)

Был отмечен интересный факт: большее по амплитуде изменение напряженности магнитного поля тремя часами позже вызвало появление меньшего электрического поля вследствие меньшей скорости его изменения. Последующие возмущения магнитного поля и связанное с ними электрическое поле также вызвали сбои в работе энергосистем в ряде мест всей США и Канады. В результате в энергосистеме произошло несколько нежелательных отключений трансформаторов и линий электропередачи.

На рис. 1.28. приведены осциллограммы более ранних измерений магнитного поля Земли в Финляндии. Осциллограммы возмущений в сети переменного тока, вызванные этими полями, показаны на рис. 1.29.

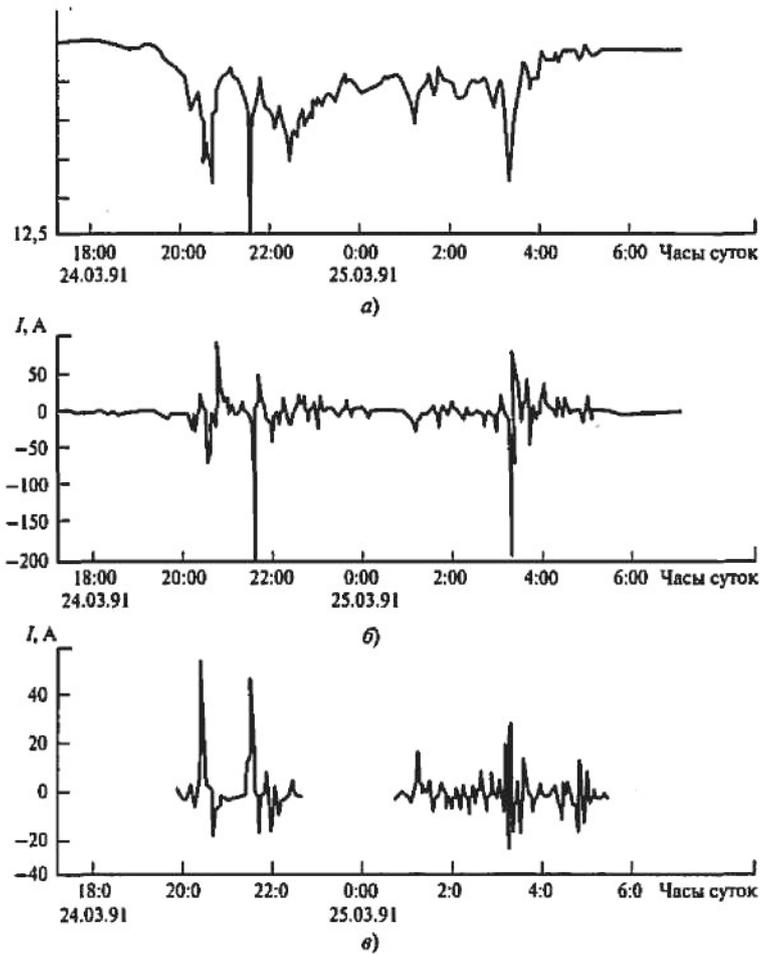


Рис. 1.28. Взаимосвязь токов в заземляющем проводе силового трансформатора напряжением 400 кВ (Финляндия) с магнитным полем Земли:

а - изменение индукции геомагнитного поля на ПС «Нурмиярве» в северном направлении; *б* - соответствующие токи в заземляющем проводнике трансформатора 400 кВ на ПС «Раума»; *в* - то же на ПС «Пиртикоски» (измерения проводились 24 и 25 марта 1991 г.)

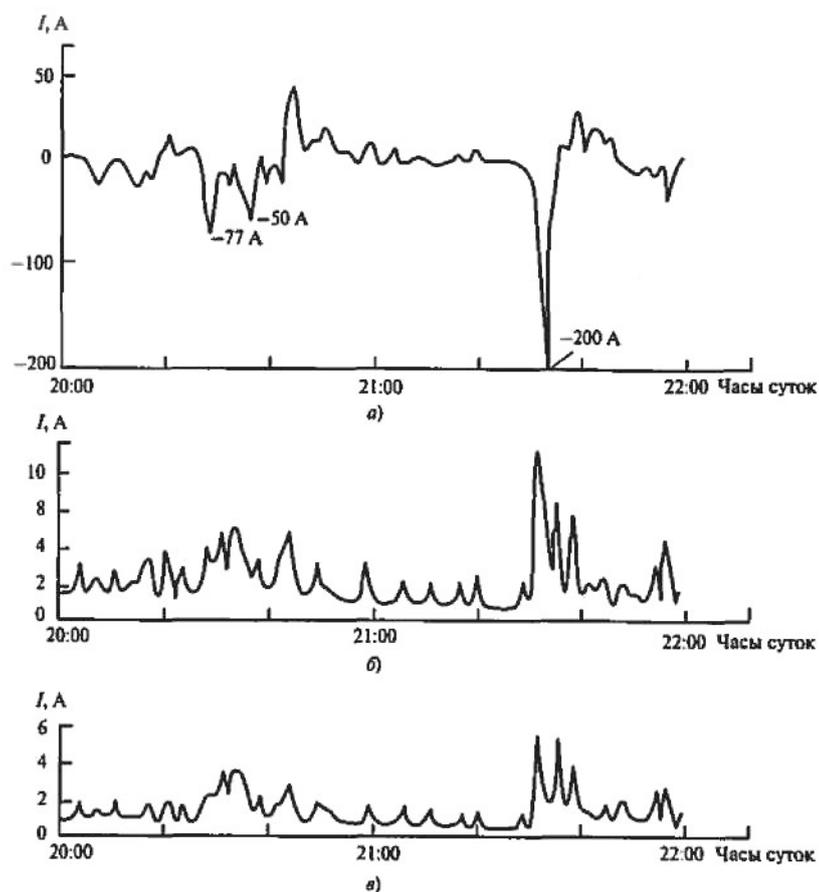


Рис. 1.29. Токи в заземляющем проводе силового трансформатора напряжением 400 кВ, вызванные изменениями магнитного поля Земли (Финляндия):

а - ток в линии переменного тока 400 кВ, подходящей к ПС «Раума» с севера; *б* - ток в линии переменного тока 400 кВ, подходящей к ПС «Раума» с юга; *в* - ток в нейтрали трансформатора ПС «Раума» (измерения проводились 24 марта 1991 г.)

Глава вторая КАНАЛЫ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ И СПОСОБЫ ИХ ОСЛАБЛЕНИЯ

2.1. МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ СВЯЗИ

Все модели, описывающие связь электромагнитного поля с автоматическими и автоматизированными системами технологического управления электротехническими объектами, могут быть построены с применением *теории антенн*. Основу этой теории составляют уравнения Максвелла, представляемые в форме, наиболее часто используемой для реализации численных методов расчета.

Данная теория основана на том принципе, что любой ток является источником поля (задача излучения) и любое поле может быть источником тока (задача приема), который, в свою очередь, является источником излучаемого поля.

Указанный подход приводит к появлению интегральных уравнений, описывающих поведение проводящего тела, подверженного воздействию падающей волны электромагнитного поля. Данные уравнения в общем случае не имеют аналитического решения и требуют применения численных методов.

Теория антенн является одной из наиболее общих и строгих из используемых теорий для решения задач определения параметров механизмов связи и поэтому содержит мало допущений, а именно:

- электропроводящее тело имеет размеры, много меньшие длины волны;
- тело обладает абсолютной проводимостью.

Однако расчеты с применением данной теории требуют больших затрат времени и значительных объемов памяти компьютера.

Другой, широко используемой является *теория линий* (ТЛ). Эта теория основывается на следующих допущениях:

- диаметр проводников и расстояние между ними (или между проводником и землей) меньше длины волны;
- между токами, протекающими по различным элементам линии, отсутствует взаимное влияние, наведенные токи не влияют друг на друга посредством излучения (предполагается, что линия более или менее прямолинейна).

С помощью теории линий можно получить быстрое и точное решение задач, связанных со взаимодействием кабелей и линий.

Частным случаем двух достаточно общих теорий является третья, более простая, квазистатическая теория, или *теория цепей* (ТЦ), иногда также известная как теория Кирхгофа или теория Ленца, так как ее основой являются законы Кирхгофа и Ленца.

Эта теория требует для своего применения выполнения следующих ограничений:

- длина цепи много меньше длины волны, т.е. отсутствует эффект распространения (волновой эффект);
- ток остается неизменным в пределах каждого элемента цепи.

При выполнении этих условий цепь может быть представлена сосредоточенными элементами (не имеющими размеров), соединенными последовательно или параллельно в сеть, состоящую из узлов и ветвей, для которой составляются уравнения Кирхгофа. Магнитный поток, пересекающий контур, учитывается введением сосредоточенного элемента в виде индуктивности.

Все эти допущения ограничивают распространение (по крайней мере, количественно) полученных выводов теории цепей длинные цепи (длина которых сравнима с длиной волны). Для таких цепей требуется либо обращение к более общим теориям, либо использование эмпирических законов или законов статистики.

Одним из основных преимуществ теории цепей является простота вычислений, для которых не требуется применения численных методов. Вследствие этого механизм связи может быть рассмотрен при небольших размерах цепи. Более того, отпадает необходимость в расчете электромагнитных полей и построении соответствующей модели, а источник электромагнитных долей всегда представляется в виде тока или напряжения. Таким образом, модель может быть использована для описания непосредственного контакта с источником

возмущения (источником тока или напряжения, введенным непосредственно в сеть) или косвенного взаимодействия посредством электрического или магнитного поля.

По указанным причинам большинство механизмов передачи помех описывают с помощью теории цепей..

2.2. УПРОЩЕННЫЕ МОДЕЛИ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ И МЕТОДЫ ИХ СНИЖЕНИЯ

Существуют два способа передачи возмущений от источника к приемнику: прямой электрический контакт между источником и приемником или через электромагнитное поле (отдельно электрическую или магнитную составляющие, или через их совместное воздействие).

Таким образом, может быть сделано: первое разделение (классификация) способов передачи помех: *гальванические (кондуктивные) связи* и *связи излучением (полевые связи)*.

Однако, когда возмущение воздействует на приемник посредством гальванической связи, его воздействие на чувствительные цепи может происходить по-разному, в зависимости от типа сопротивления цеп(активное или реактивное, собственное или взаимное), по которому протекает ток. Иногда при передаче возмущения происходит комбинация различных физических механизмов воздействия. В дальнейшем будем использовать понятие *связь через общее полное сопротивление*. При очень низких частотах или при чисто активном характере сопротивления данный способ взаимосвязи может быть назван также *связью через активное сопротивление*.

Способы взаимосвязи без гальванического контакта будем подразделять на три категории в зависимости от того, могут ли электрическая и магнитная составляющие магнитного поля рассматриваться отдельно или необходимо совместное рассмотрение электрической и магнитной составляющих.

Таким образом, может быть предложена следующая классификация видов передачи возмущений:

- *связь через общее полное сопротивление* (в том числе связь через активное сопротивление);
- *индуктивная, или магнитная связь* (магнитное поле в ближней зоне);
- *емкостная, или электрическая связь* (электрическое поле в ближней зоне);
- *связь излучением, или электромагнитная связь* (поле в дальней зоне).

Теория цепей может быть применена для рассмотрения только трех первых видов взаимосвязи. Четвертый способ требует для своего рассмотрения применения одной из более общих теорий.

В действительности ни один из указанных видов связи не существует в отдельности, однако обычно в диапазоне низких или средних частот один из них превалирует над остальными.

Для всех механизмов связи возможно определить передаточную функцию между источником энергии и оборудованием, подверженным помехе, или приемником.

Передаточная функция может представлять собой полное сопротивление, полную проводимость или безразмерную величину,

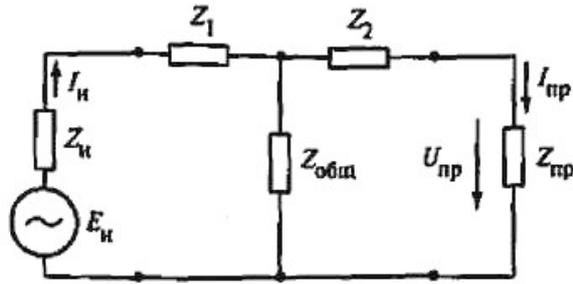


Рис. 2.1. Схема замещения источника возмущения (E_u, Z_u) и приемника $(U_{пр}, Z_{пр})$ электромагнитного взаимодействия с элементами связи Z_1, Z_2 и $Z_{общ}$

в зависимости от приложенной величины (тока или напряжения) и результата ее действия на цепь.

Во всех случаях электромагнитное взаимодействие между источником (E_u, Z_u) и приемником $(U_{пр}, Z_{пр})$ может быть смоделировано четырехполюсником, представленным на рис. 2.1, причем в наиболее простых случаях - Т-образной схемой замещения, содержащей полные сопротивления Z_1, Z_2 и $Z_{общ}$.

На этом и последующих рисунках символ E (если отсутствует понимание его как напряженности электрического поля) используется для обозначения источника напряжения, а символ U - для обозначения падения напряжения или наведенной ЭДС. Данная модель, в которой обратным проводом обычно является земля, предполагает два направления для снижения коэффициента взаимосвязи между источником и приемником: *короткозамкнутая* или *разомкнутая цепь*.

Очевидно, что если сопротивление $Z_{общ}$ равно нулю, энергия из источника не может быть передана приемнику. Аналогично, если какое-либо из сопротивлений Z_1 и Z_2 (или оба) бесконечно велики (т.е. цепь разомкнута), приемник также не может получить энергию из источника. Следует отметить, что идеально короткозамкнутую или разомкнутую цепь создать невозможно, так как даже при наилучшем исполнении существуют паразитные индуктивности и емкости.

Создание короткозамкнутой цепи предполагает уменьшение сопротивления всех заземляющих проводников и, в частности, их индуктивности, влияние которой становится наиболее заметным при высоких частотах.

Создание разомкнутой цепи подразумевает изолирование приемника от источника, которое достигается либо увеличением расстояния между ними, либо введением искусственных преград на пути помех (уменьшением

коэффициента связи), либо созданием отдельных сетей заземления с присоединением к земле в одной точке.

Количественно возмущения обычно характеризуют значением напряжения на оборудовании, а напряжение часто является результатом протекания токов в элементах заземляющих или экранирующих устройств.

2.3. СВЯЗЬ ЧЕРЕЗ ОБЩЕЕ ПОЛНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Этот вид связи возникает, когда разные цепи имеют в своем составе одно или несколько общих сопротивлений.

Простейшим и наиболее общим случаем такой связи являются цепи, имеющие общий обратный провод, обычно являющийся сетью заземления, причем предполагается, что он не идеален, т.е. имеет отличное от нуля сопротивление. На рис. 2.2 приведен

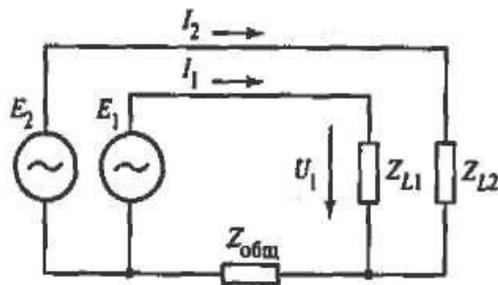


Рис. 2.2. Связь через общее полное сопротивление:

$$U_1 = (E_1 - I_2 Z_{общ}).$$

