

Глава седьмая

Молниезащита

7.1. Принцип действия молниеотводов

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 впервые получило объяснение в «Слове о явлениях воздушных, от электрической силы происходящих...» М.В. Ломоносова, который в 1753 г. писал: «Стрелы на местах, от обращения человеческого по мере удаленных, ставить за бесполезное дело почитаю: дабы ударяющая молния больше на них, нежели на головах человеческих и на храминах, силы свои изнуряла» [7.1]. Это образное определение роли молниеотводов остается справедливым до сих пор.

В 1800 г. Августом Вичманом были изданы в Петербурге едва ли не первые в мире правила устройства молниеотводов [7.2, 7.3], в которых впервые были указаны их основные элементы – молниеприемник, воспринимающий непосредственно на себя удар молнии, токоотвод и заземлитель – и приведены характеристические размеры этих элементов, мало отличающиеся от современных рекомендаций.

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 молниеотводов. Возникновение и развитие с молниеотвода встречного лидера еще более усиливает напряженности поля

на этом пути, что окончательно предопределяет удар - отвод. Защищаемый объект, более низкий, чем молниеотвод, будучи расположен поблизости от него, оказывается заэкранированным молниеотводом и встречным лидером, и поэтому поражение его молнией маловероятно.

Необходимым условием надежной защиты является также низкое сопротивление заземления молниеотвода, так как при ударе молнии на молниеотводе с большим сопротивлением заземления может возникнуть напряжение, способное вызвать пробой с молниеотвода на защищаемый объект по воздуху или в земле.

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.

7.2. Зоны защиты молниеотводов

Зоны защиты молниеотводов высотой $h \leq 30$ м были определены в 1936-1940 гг. А.А. Акопяном [1.1] на основе обширных лабораторных исследований. Надежность их подтверждена длительным опытом эксплуатации и оценивается как 0,999. Они вошли как составная часть в ряд нормативных документов. В последующем установленные зоны защиты были распространены на молниеотводы высотой до 100 м, при этом А.А. Акопяном была введена поправка, учитывающая снижение эффективности молниеотводов высотой больше 30 м вследствие боковых ударов молнии, поражающих молниеотвод в точках ниже его вершины.

В качестве аналога молнии использовался искровой разряд, происходивший под воздействием импульсов $1,5/1000$ мкс положительной полярности с максимальным значением, близким к 50%-ному разрядному напряжению. Отношение высоты расположения высоковольтного электрода к высоте модели молниеотвода H/h принималось при $h \leq 30$ м равным 20 для стержневых и 10 для тросовых молниеотводов. В последнем случае условия опытов были более жесткими (см. § 1.6), поскольку имелось в виду применение тросов для защиты воздушных линий электропередачи, которые достаточно часто поражаются молнией (§ 7.7). Для молниеотводов высотой $h > 30$ м в принятом масштабе моделирования устанавливались значения $H = 600$ м для стержневых и $H = 300$ м для тросовых молниеотводов.

Справедливость принятой методики определения зон защиты не может быть строго доказана, поэтому полученные в лаборатории зоны защиты имеют до некоторой степени условный характер. Однако надежность разработанных на основе лабораторных экспериментов рекомендаций подтверждена многолетним опытом эксплуатации молниеотводов, и это позволяет с уверенностью пользоваться этими рекомендациями.

Определение зон защиты производится следующим образом. Электрод, расположенный на высоте H (рис. 7.1), смещается относительно модели стержневого молниеотвода в горизонтальном направлении. Опыт показывает, что при $R = 3,5h$ все разряды поражают молниеотвод. При R_1 , несколько большем R , часть разрядов попадает в землю на расстоянии r от молниеотвода.

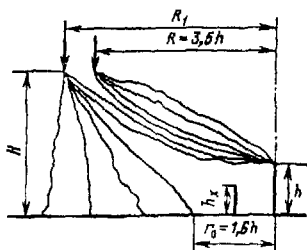


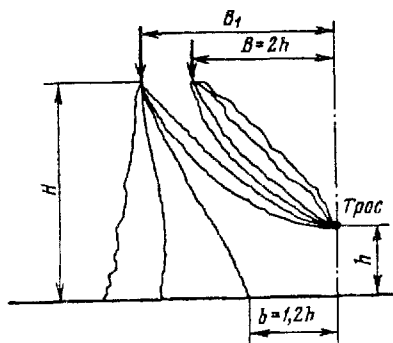
Рис. 7.1. К определению на модели зоны защиты стержневого молниеотвода

Минимальное значение r_0 является радиусом зоны защиты на уровне земли.

Определение радиуса зоны защиты на высоте h_x производится с помощью пробного стержня высотой h_x . В результате перемещения этого стержня и высоковольтного электрода относительно модели молниеотвода (все они находятся в одной плоскости) находится максимальное рас-

стоящие r_x между молниеотводом и пробным стержнем, при котором последний не поражается разрядами. Это расстояние r_x является радиусом защиты молниеотвода на высоте h_x .

Если определяется зона защиты тросового молниеотвода, то высоковольтный электрод перемещается по горизонтали в плоскости, перпендикулярной тросу. При принятой методике эксперимента размер зоны 100%-ного поражения троса $B=2h$, а размер зоны защиты на уровне земли $b=1,2h$ (рис. 7.2). Зона защиты b_x на высоте h_x определяется так же, как и в случае стержневого молниеотвода.



Аналогичным образом производится определение зон защиты систем двух или нескольких молниеотводов.

Рис. 7.2. К определению на модели зоны защиты тросового молниеотвода

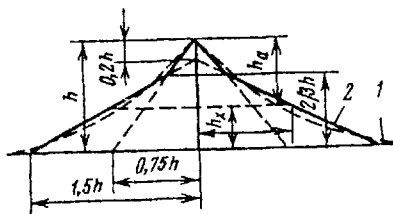
Зоны защиты стержневых молниеотводов. Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода (рис. 7.3) представляет собой пространство вблизи молниеотвода в виде «шатра», ограниченное поверхностью вращения, образующая которой находится по эмпирической формуле

$$r_x = 1,6ph \frac{h-h_x}{h+h_x}, \quad (7.1)$$

где $p=1$ при $h \leq 30$ м; $p = \sqrt{30/h} = 5,5/\sqrt{h}$ при $h=30-100$ м.

Коэффициент $p < 1$ учитывает снижение защитного действия молниеотводов большой высоты.

Рис. 7.3. Построение зоны защиты стержневого молниеотвода: 1 – по [7.4]; 2 – по [7.5]



При определении зоны защиты удобно криволинейную образующую заменить ломаной линией 2 [7.4], построение которой понятно из рис. 7.3.

Зона защиты системы двух стержневых молниеотводов имеет значительно большие размеры, чем сумма зон защиты двух одиночных молниеотводов. Как отмечалось, при $R=3,5h$ (рис. 7.4) все разряды попадают в молниеотвод. Очевидно, если два молниеотвода находятся на расстоянии $a=2R=7h$, то точка поверхности, лежащая посередине между молниеотводами, не будет поражаться молнией. Если нужно защитить точку, находящуюся посередине между молниеотводами высотой h на высоте h_0 , то расстояние между молниеотводами на высоте h_0 должно составлять $a \leq 7p(h-h_0)$. Или, если известны высота и расстояние между молниеотводами, высота защищенной точки посередине между молниеотводами находится как

$$h_0 = h - a/7p. \quad (7.2)$$

Внутренняя часть зоны защиты двух стержневых молниеотводов (рис. 7.4) в плоскости, проходящей через оба молниеотвода, ограничивается дугой окружности, которую можно построить по трем точкам: две из них – вершины молниеотводов, а

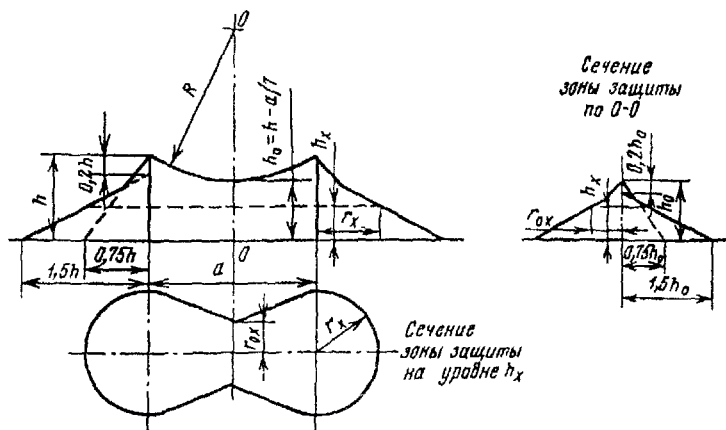


Рис. 7.4. Зона защиты двух стержневых молниеотводов

третья расположена посередине между молниеотводами на высоте h_0 . Внешняя часть зоны защиты строится так же, как и для одиночных стержневых молниеотводов. Построение сечений зоны защиты понятно из рис. 7.4.

Такие объекты, как, например, открытые распределительные устройства, располагаются на достаточно большой территории и защищаются поэтому несколькими молниеотводами. В этом случае внешняя часть зоны защиты определяется так же, как и зона защиты системы двух молниеотводов (рис. 7.5). Объект высотой h_x , находящийся внутри остроугольного треугольника или прямоугольника, защищен в том случае, если диаметр окружности, проходящей через вершины треугольника, в которых установлены молниеотводы, или диагональ прямоугольника, в углах которого находятся молниеотводы, удовлетворяет условию

$$D \leq 8p(h-h_x). \quad (7.3)$$

При произвольном расположении молниеотводов условие (7.3) должно быть проверено для каждого трех ближайших друг к другу молниеотводов в отдельности. При всех условиях высота h_x должна быть меньше фиктивной высоты h_0 , определенной для каждой отдельно взятой пары молниеотводов.

Зоны защиты тросовых молниеотводов. Сечение зоны защиты тросового молниеотвода строится так же, как стержневого, но с другими числовыми коэффициентами (рис. 7.6).

Внешняя часть зоны защиты двух параллельных тросовых молниеотводов, расположенных на расстоянии a (рис. 7.7), определяется так же как и для одиночного троса, в соответствии с рис. 7.6. Внутренняя часть ограничена поверхностью, которая в сечении плоскостью, перпендикулярной тросам, дает дугу

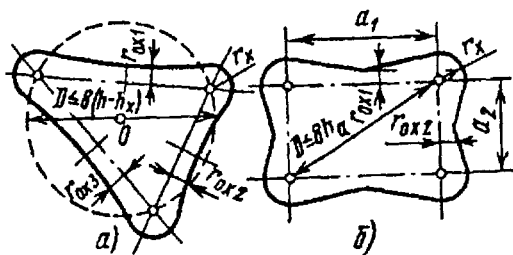


Рис. 7.5. Площади на уровне h_x , защищенные тремя молниеотводами (а) и четырьмя, расположенными в вершинах прямоугольника (б)

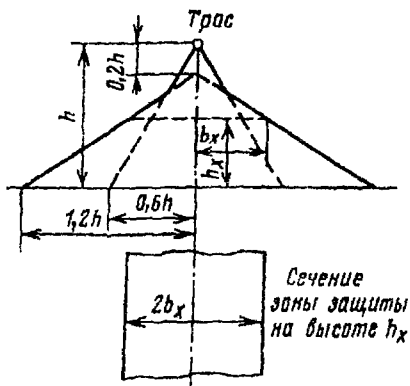


Рис. 7.6. Зона защиты тросового молниеотвода

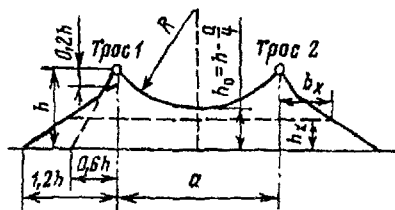


Рис. 7.7. Зона защиты двух параллельных тросовых молниеотводов

окружности, проходящей через три точки: два троса и точку по середине между ними на высоте

$$h_0 = h - a/4\rho. \quad (7.4)$$

Зоны защиты в особых случаях. В практике молниезащиты иногда целесообразно бывает использовать два молниеотвода разной высоты. Построение сечений зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов производится в этом случае аналогично (рис. 7.8). Сначала строится зона защиты более высокого молниеотвода 1. Затем через вершину молниеотвода меньшей высоты 2 проводится горизонтальная линия до пересечения в точке 3 с зоной защиты молниеотвода 1. При условии, что вершина некоего фиктивного молниеотвода совпадает с точкой пересечения 3, строится зона защиты для молниеотводов 2 и 3, имеющих одинаковую высоту h_2 и расположенных друг от друга на расстоянии a' . Значение h_0 определяется по формулам (7.2) или (7.4) в зависимости от типа молниеотвода.

Если требуется защитить объект, расположенный на местности со значительным уклоном, то зону защиты молниеотвода, установленного на склоне, можно построить способом, который показан на рис. 7.9 [7.5]. Молниеотвод влияет на процесс разряда только своей верхней точкой, а поверхность земли в первом

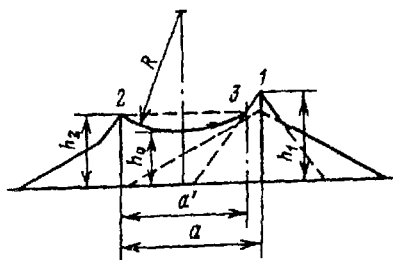


Рис. 7.8. Зона защиты двух молниеотводов разной высоты

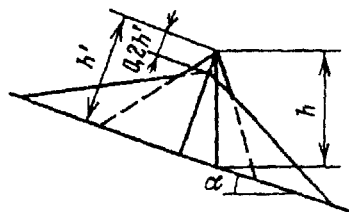


Рис. 7.9. Зона защиты молниеотвода, установленного на местности с уклоном

приближении может быть принята за плоскость нулевого потенциала, поэтому зона защиты строится относительно перпендикуляра высотой H , опущенного из вершины молниеотвода на поверхность земли. Зона защиты молниеотвода вниз по склону оказывается уменьшенной, а вверх по склону – увеличенной.

Зоны защиты молниеотводов высотой до 150 м. В настоящее время в связи с потребностями практики нормированы зоны защиты молниеотводов высотой до 150 м. Очертания зон защиты определены расчетом по вероятностной методике [2.3], в соответствии с которой лидер нисходящей от облака молнии, молниеотвод, защищаемый объект и поверхность земли образует связанную многоэлектродную систему. При этом считается, что головка лидерного канала находится на некоторой высоте, называемой высотой ориентировки, а пробивная напряженность электрического поля во всех промежутках между головкой лидера и заземленными объектами, в том числе и самой поверхностью земли, одинакова. Вероятность поражения одного из электродов определяется как произведение вероятности ориентировки канала молнии в направлении системы электродов и вероятности выбора одного из электродов системы.

Не вдаваясь в подробности расчетной методики, отметим что полученные зоны защиты приняты в качестве строительных норм [7.6].

Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой $h \leq 150$ м представляет собой круговой конус (рис. 7.10)

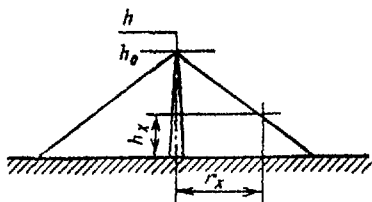


Рис. 7.10. Сечение зоны защиты стержневого молниеотвода высотой до 150 м

вершиной на высоте $h_0 < h$, сечение которого на высоте h_x имеет радиус r_x .

Граница зоны защиты находится по формулам

$$\left. \begin{aligned} h_0 &= 0,85h_x; \\ r_x &= (1,1 - 0,002h) \left(h - \frac{h_x}{0,85} \right), \end{aligned} \right\} \quad (7.5)$$

где все размеры – в метрах.

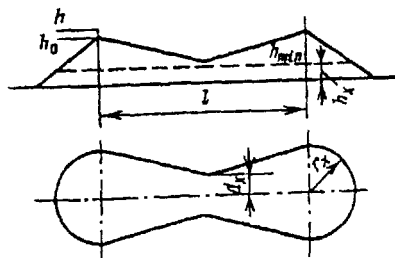
Вероятность прорыва молнии $p_{пр}$ через границу зоны не превышает 0,005.

Если допустить вероятность прорыва молнии 0,05, то зона защиты расширится. В ряде случаев такая зона удовлетворяет потребностям практики, так как для объектов высотой до 30 м число разрядов обычно меньше 0,1 в год. Поэтому при вероятности прорыва 0,05 защищаемый объект в среднем будет поражаться не чаще, чем 1 раз за 200 лет эксплуатации. Зона защиты одиночного молниеотвода при вероятности прорыва 0,05 описывается формулами

$$\left. \begin{aligned} h_0 &= 0,92h; \\ r_x &= 1,5 \left(h - \frac{h_x}{0,92} \right). \end{aligned} \right\} \quad (7.6)$$

Зона защиты стержневых молниеотводов, находящихся вблизи один от другого на расстоянии, меньшем $(3-5)h$, расширяется по сравнению с зонами отдельных молниеотводов. Возникает дополнительный объем зоны защиты, обусловленный совместным действием двух молниеотводов. Зоны двойного стержневого молниеотвода (рис. 7.11) определяются по формулам:

Рис. 7.11. Зона защиты двух стержневых молниеотводов высотой до 150 м



а) при $p_{\text{пр}}=0,005$:

$$h_{\min} = \left\{ \begin{array}{l} h_0 \text{ при } l \leq h, \\ h_0 - (0,17 + 3 \cdot 10^{-4}h)(l-h) \text{ при } l > h; \end{array} \right\} \quad (7.7)$$

$$d_x = \left\{ \begin{array}{l} r_x \text{ при } l \leq h, \\ [r_0(h_{\min} - h_x)]/h_{\min} \text{ при } l > h; \end{array} \right\}$$

б) при $p_{\text{пр}}=0,05$:

$$h_{\min} = \left\{ \begin{array}{l} h_0 \text{ при } l \leq 1,5h, \\ h_0 - 0,14(l - 1,5h) \text{ при } l > 1,5h; \end{array} \right\} \quad (7.8)$$

$$d_x = \left\{ \begin{array}{l} r_x \text{ при } l \leq 1,5h, \\ [r_0(h_{\min} - h_x)]/h_{\min} \text{ при } l > 1,5h; \end{array} \right\}$$

где r_0 – зона защиты одиночного молниеотвода на уровне земли ($h_x=0$).

Если расстояние l между молниеотводами превышает $3h$ ($p_{\text{пр}}=0,005$) или $5h$ ($p_{\text{пр}}=0,05$), каждый из молниеотводов следует рассматривать как одиночный.

Несколько молниеотводов, расположенных поблизости друг от друга (например, три и более), образуют систему молниеотводов. Зона защиты этой системы определяется попарными зонами защиты ближайших молниеотводов. При этом принимается, что внутренняя зона имеет вероятность прорыва такую же, как и зоны взятых попарно молниеотводов.

Для защиты протяженных объектов применяются тросовые молниеотводы, которые натягиваются над защищаемым объектом и заземляются на опорах.

Зона защиты одиночного тросового молниеотвода определяется по формулам:

а) при $p_{пр} = 0,005$

$$\left. \begin{aligned} h_0 &= 0,85h; \\ r_x &= (1,35 - 0,0025h) \left(h - \frac{h_x}{0,85} \right); \end{aligned} \right\} \quad (7.9)$$

б) при $p_{пр} = 0,05$

$$\left. \begin{aligned} h_0 &= 0,92h; \\ r_x &= 1,7 \left(h - \frac{h_x}{0,92} \right). \end{aligned} \right\} \quad (7.10)$$

Для двух тросовых молниеотводов, расположенных на расстоянии l друг от друга, наименьшая высота зоны защиты посередине между ними при $l > h$ составляет

$$h_{\min} = h_0 - (0,14 + 5 \cdot 10^{-4}h)(l - h), \quad (7.11)$$

а при $l \leq h$ $h_{\min} = h_0$.

Электрогеометрический метод. Во многих странах для определения защитных свойств молниеотводов используется «электрогеометрическая модель». Этот метод в законченном виде был разработан и предложен исследовательским комитетом № 33 СИГРЭ в 1975 г. [7.7], хотя принцип, положенный в основу электрогеометрического метода, был отражен еще в 1962 г. в венгерских строительных нормах.

В основу метода положено представление о том, что при приближении лидерного канала к наземному объекту с последнего начинает развиваться встречный канал разряда, что и предопределяет удар молнии в объект. Кратчайшее расстояние между головкой лидера и точкой удара в момент начала развития от нее встречного разряда называется расстоянием ориентировки h_m . Это расстояние тем больше, чем больше напряжение между

головкой лидера и заземленным объектом, заряд лидера и выше максимальное значение тока молнии, проходящего через пораженный объект.

Расстояние ориентировки зависит от тока молнии в первой компоненте удара и определяется по эмпирической формуле

$$h_M = 2I_M + 30(1 - e^{-I_M/6,8}), \quad (7.12)$$

где h_M - в м, I_M - в кА.

Пользуясь заданным значением h_M , можно построить зону защиты того или иного молниеотвода. На рис. 7.12 показано построение зоны защиты стержневого молниеотвода ($h < h_M$). Если развивающийся лидер достигает поверхности A , то молния поражает вершину молниеотвода. Если он достигает поверхности B , то удар приходится в землю. Объект, расположенный ниже поверхности C , находится в зоне защиты молниеотвода.

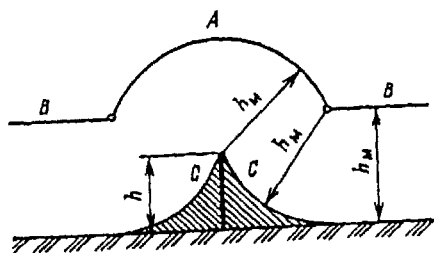


Рис. 7.12. Сечение зоны защиты стержневого молниеотвода высотой h при $h_M > h$

Если он достигает поверхности B , то удар приходится в землю. Объект, расположенный ниже поверхности C , находится в зоне защиты молниеотвода. Вероятность поражения объекта молнией (вероятность p прорыва молнии в зону защиты) определяется по вероятности тока молнии, которому по (7.12) соответствует определенное значение h_M , принятое при построении зоны защиты. Например, требуется установить размеры зоны защиты C с надежностью $1 - p = 0,9$. По кривой I на рис. 2.7 для первых компонентов нисходящих отрицательных молний вероятности 0,9 соответствует $I_M \approx 10$ кА. По (7.12) получаем расстояние ориентировки

$$h_M = 2 \cdot 10 + 30(1 - e^{-10/6,8}) = 43 \text{ м.}$$

Это означает, что объект, расположенный внутри зоны защиты, построенной при $h_M = 43$ м, защищен от ударов молнии

током $I_M \geq 10$ кА и может быть поражен молнией с током $I_M < 10$ кА, т.е. в 10% случаев ($p=0,1$). Ниже приведены расчетные значения расстояний ориентировки h_M в зависимости от минимального тока I_M , при котором обеспечивается заданная надежность зоны защиты:

$1-p$	0,9	0,95	0,995	0,999
I_M , кА	10	8	3,5	1,6
h_M , м	43	37	19	9

На рис. 7.13 показаны сечения зон защиты стержневого молниеотвода при разных значениях $1-p$.

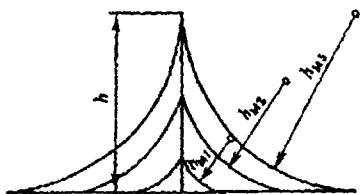


Рис. 7.13. Сечения зон защиты молниеотвода при разных значениях расстояния ориентировки $h_{M1} < h_{M2} < h_{M3}$ и соответственно при разных надежностьх: $(1-p_1) > (1-p_2) > (1-p_3)$

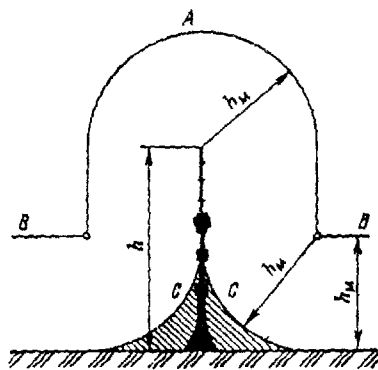


Рис. 7.14. Сечение зоны защиты стержневого молниеотвода высотой h при $h_M < h$

Сечение зоны защиты молниеотвода в случае, если его высота превышает расстояние ориентировки ($h > h_M$), показано на рис. 7.14. Это построение объясняет отмечавшиеся в [2.3] поражения Останкинской телебашни (высота 540 м) нисходящими молниями на расстояниях до 215 м от ее вершины, а также удары молнии в землю на расстоянии до 200 м от башни.

На рис. 7.15 показано сечение зоны защиты двух параллельных тросов, расположенных на одинаковом расстоянии от

земли. Зона защиты одиночного троса строится так же, как внешняя часть зоны двух тросов (или как сечение зоны защиты по рис. 7.12).

Проверка молниезащитности сооружений сложной конфигурации производится с использованием модели сооружений, выполненных в уменьшенном масштабе. В том же масштабе

изготавливается шар радиусом h_m . Этим шаром обкатывается модель сооружения во всех направлениях. Если шар при этом касается только устройств молниезащиты, то объект оказывается защищенным. В противном случае необходимы дополнительные защитные устройства [7.8].

Электрогеометрический метод включен в стандарт Международной электротехнической комиссии (МЭК) [7.18].

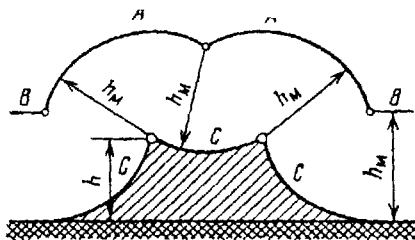


Рис. 7.15. Сечение зоны защиты двух параллельных тросовых молниеотводов

7.3. Молниеприемники и токоотводы

Молниеотводы могут устанавливаться как вблизи защищаемых объектов, так и на самих объектах.

Для отдельно стоящих молниеотводов в качестве несущих элементов используются железобетонные или деревянные стойки (при высоте до 20 м). Для токоотвода используется металлическая арматура железобетонных стоек, по деревянным стойкам прокладывается специальный токоведущий спуск к заземлителю. При высоте более 20 м применяют стальные решетчатые конструкции. Молниеотводы рекомендуется выполнять в виде свободно стоящих конструкций без растяжек.

В качестве несущих устройств для крепления токоведущих частей молниеотводов должны использоваться, где это возможно, конструкции самих защищаемых объектов. Например, на подстанциях молниеприемники могут устанавливаться на мегал-

лических порталах, предназначенных для подвески ошиновок, а сами порталы могут использоваться в качестве токоотводов, соединяющих молниеприемники с заземлителем.

Если молниеотвод устанавливается, например, на здании, то он защищает от поражения молнией крышу здания и расположенные на ней детали (трубы, башни, скульптурные украшения и т.п.). От молниеприемника по наружной поверхности стен здания прокладываются токоотводы к заземлителю.

Если здание имеет железную крышу, то, естественно, установка специального молниеприемника не требуется. Его роль выполняет железная крыша, которую следует надежно заземлить по крайней мере двумя токоотводами. При длине здания свыше 20 м через каждые 20 м должны быть устроены дополнительные токоотводы к заземлителю. Все находящиеся на крыше здания выступающие детали снабжаются отдельными молниеприемниками, надежно присоединенными к крыше. Металлические кровли башен также электрически соединяются с крышей здания. Трубы, выполненные из непроводящего материала, снабжаются молниеприемниками из стального прутка, проложенными по периметру труб по верхнему краю и соединенными с крышей здания. В скульптурные фигуры при их изготовлении закладываются стальные прутья, выступающие на 20–30 см над фигурой и присоединяемые снизу к крыше, или же по поверхности скульптурных фигур прокладываются стальные прутки, если закладка их внутрь не была предусмотрена.

Если крыша здания выполнена из непроводящего материала, то можно снабдить ее молниеприемником в виде сетки из стальных прутьев диаметром 8 мм с размером ячейки $5 \times 5 \text{ м}^2$ (узлы сетки свариваются). В остальном защита осуществляется так же, как и для здания с железной крышей: дополнительные молниеприемники, установленные на выступающих частях здания, привариваются к стальной сетке на крыше, а сетка токоотводами соединяется с заземлителем.

В зданиях городского типа в качестве токоотводов могут быть использованы водопроводные и канализационные трубы, металлический каркас здания, а также арматура железобетонного каркаса здания, если при надлежащем соединении она образу-

ст сплошной путь от молниеприемника до заземлителя. В качестве дополнительных токоотводов могут быть использованы пожарные лестницы и водосточные трубы при условии надежного соединения их частей.

В домах сельского типа молнией поражаются преимущественно дымовые трубы, коньки крыш, края фронтонов от конька до нижнего края крыши. Если крыша не металлическая, то в этом случае не следует на ней устраивать сетку из стальных прутков. Достаточно проложить стальной прут в местах наиболее вероятного поражения молнией, т.е. по коньку крыши и по краям фронтонов, и соединить его с заземлителем двумя токоотводами. На вершине дымовой трубы также следует проложить стальной прут (или установить стержень, возвышающийся над трубой на 20–50 см) и соединить его с токоотводом.

Все элементы молниезащитного устройства должны иметь достаточное сечение, чтобы под действием тока молнии не происходило их перегревания, а тем более расплавления.

Рекомендуется применять стальные молниеприемники сечением 50–100 мм² для стержневых и однопроволочных тросовых молниеотводов. Поперечное сечение стальных многопроволочных тросов должно быть не менее 35 мм².

Для оценки нагрева токоотвода, по которому проходит ток молнии, удобно воспользоваться удельной энергией A , статистические данные о которой приведены в гл. 2 (рис. 2.12, 2.17).

Если предположить, что активное сопротивление токоотвода при прохождении тока не изменяется, то температура проводника повысится на величину

$$T = \frac{\rho}{S^2 \gamma c} A, \quad (7.13)$$

где S – сечение токоотвода; ρ , γ и c – удельные сопротивление, масса и теплоемкость материала токоотвода соответственно.

За счет поверхностного эффекта токопроводящая часть токоотвода оказывается меньше, чем его сечение. Грубо это уменьшение можно учесть, введя коэффициент k , тогда

$$T = \frac{k\rho}{S^2\gamma c} A. \quad (7.14)$$

Приняв для стали $\gamma = 7800 \text{ кг/м}^3$, $c = 0,46 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$, $\rho = 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $k = 3$, $A = 10^7 \text{ А}^2\cdot\text{с}$ (вероятность такого значения A согласно рис. 2.12 примерно 0,5%), получим:

$$T \approx 10^{-6} / S^2. \quad (7.15)$$

Отметим, что более строгий учет нагрева проводников из различных материалов при прохождении по ним тока молнии приведен в § 5.5.

Из (7.15) следует, что, например, при $S = 50 \text{ мм}^2$ повышение температуры стального токоотвода составляет примерно 400 К, т.е. даже при таких высоких параметрах тока молнии (удельной энергии) нагрев токоотвода не является чрезмерным.

Допустимые сечения токоотводов указаны в табл. 7.1 с учетом различной степени коррозии при расположении внутри и снаружи сооружения, а также в земле.

Таблица 7.1

Минимальные сечения стальных токоотводов

Профиль токоотвода	Место расположения		
	Внутри сооружения	Снаружи сооружения	В земле
Круглый:			
диаметр, мм	5	6	8
Прямоугольный:			
сечение, мм	24	48	48
толщина, мм	3	4	4
Угловая сталь:			
сечение, мм	24	48	48
толщина полок, мм	2	2,5	4
Трубы:			
толщина стенок, мм	1,5	2,5	3,5

Если имеется несколько токоотводов, соединенных параллельно и по каждому из них может проходить лишь часть тока молнии, то сечение может быть уменьшено.

Токоотводы следует прокладывать от молниеприемника к заземлителю по кратчайшим путям. На всем протяжении они не должны образовывать петель или острых углов (рис. 7.16). В противном случае возможны пробой между точками 1 и 2 (рис. 7.17) токоотводов, а также обрывы их под действием электродинамических сил, возникающих при прохождении по ним тока молнии. На рис. 7.17 эти силы показаны стрелками.

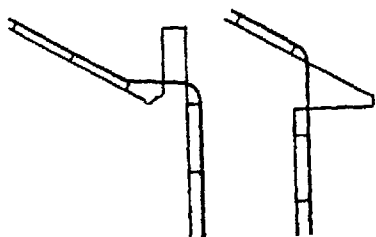


Рис. 7.16. Правильная прокладка токоотводов

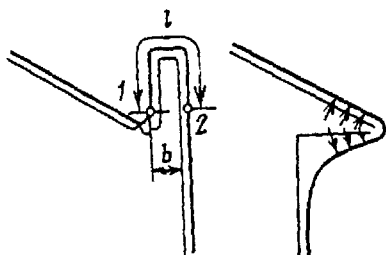


Рис. 7.17. Варианты неправильной прокладки токоотводов

Присоединение частей молниезащитного устройства друг к другу лучше всего производить с помощью сварки. Могут применяться также болтовые соединения и заклепки. Во всех случаях площадь контакта между соединяемыми деталями должна быть не меньше удвоенного сечения этих деталей.

Токоотводы крепятся к несущей конструкции (опоре) молниеотвода или к стене здания через каждые 1,5–2 м. Токоотвод, имеющий надлежащее сечение, может соприкасаться со стеной деревянного дома или с деревянной опорой молниеотвода.

Для предохранения от коррозии молниеприемники и токоотводы должны быть покрашены или оцинкованы. Применение в качестве токоотводов многопроволочных стальных тросов по условиям коррозии не рекомендуется, если же они и используются, то только в оцинкованном виде.

7.4. Заземление молниеотводов

Если вероятность прорыва молнии в зону защиты молниеотводов составляет $10^{-3} \div 5 \cdot 10^{-3}$, то это означает, что сами молниеотводы будут поражаться в 1000–2000 раз чаще, чем защищаемые ими объекты. Поэтому очень важны условия отвода тока молнии в землю.

Заземлитель молниеотвода характеризуется сопротивлением, которое окружающая земля оказывает стекающему с него току. Сопротивление заземления должно иметь достаточно низкое значение. На нем, а значит, и на токоотводе при прохождении тока молнии возникают высокие потенциалы, что может привести к пробоем с токоотвода на защищаемый объект. С заземлителя могут быть пробои на проходящие в земле кабели и трубопроводы. При этом разряд может развиваться частично по поверхности земли, а в самой земле канал разряда развивается часто по корням деревьев (в том числе и оставшихся после расчистки территории) на значительную длину. Известны многочисленные случаи повреждений по этой причине силовых кабелей и кабелей связи.

При растекании тока молнии с заземлителя возникает крайне неравномерное распределение потенциалов по поверхности земли: наибольшее значение пад заземлителем и быстрое уменьшение потенциала в направлении от него. Это создаст опасность попадания людей и животных под шаговое напряжение.

Следует также отметить, что ток молнии, проходя по молниеотводу, оказывает электромагнитное влияние на различного рода коммуникации: электросети, линии связи и особенно на компьютерные системы.

Для устройства заземлений применяются вертикальные и горизонтальные электроды. Для горизонтальных заземлителей используется полосовая сталь шириной 20–40 мм и толщиной не менее 4 мм, а также сталь круглого сечения диаметром не менее 8 мм. В качестве вертикальных заземлителей применяются стальные трубы, стержни и профильная сталь. На подстанциях заземлитель представляет собой сложную систему, состоящую обычно из горизонтальных полос, объединяющих вертикальные электро-

ды и образующих сетку на площади, занимаемой подстанцией. На линиях электропередачи в качестве заземлителя используются их железобетонные фундаменты.

Сопротивление заземлителя зависит от его геометрических размеров и удельного сопротивления грунта ρ , в котором он находится.

Для расчета сопротивления заземления одиночного стержневого молниеотвода используются следующие формулы: сопротивление вертикальной трубы или стержня

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \left[\frac{4l(2l+l)}{d(4l+l)} \right]; \quad (7.16)$$

сопротивление горизонтальной полосы

$$R = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{1,5l}{\sqrt{bl}}; \quad (7.17)$$

сопротивление железобетонного фундамента

$$R = 1,7 \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{b}, \quad (7.18)$$

где l – длина трубы или полосы; t – глубина залегания полосы, верхнего конца вертикального электрода или нижнего конца фундамента; b – ширина полосы или фундамента; d – диаметр трубы или стержня.

Сопротивление горизонтального кольца диаметром D из проволоки диаметром d (или полосы шириной $2d$), уложенного на глубине t ($t < D/2$), равно:

$$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \ln \frac{4\pi D^2}{td}. \quad (7.19)$$

Расчетное значение ρ определяется по данным измерений:

$$\rho = k\rho_{\text{изм}}, \quad (7.20)$$

где $\rho_{\text{изм}}$ – измеренное значение удельного сопротивления грунта.

Если измерение проводилось при средней влажности грунта, то $k=1,4$, при повышенной влажности земли перед измерением $k=2,6$.

В глинистой или черноземной почве ($\rho=100$ Ом·м) вертикальный стержень длиной 2,5–3 м имеет сопротивление приблизительно 30 Ом, а горизонтальная полоса длиной 5 м, уложенная на глубине 0,5–0,7 м, – приблизительно 25 Ом. Примерные сопротивления заземления, получаемые в разных грунтах с помощью одиночных электродов, приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Сопротивление одиночных заземляющих электродов в разных грунтах

Грунт	Удельное сопротивление грунта, Ом·м	Сопротивление, Ом	
		стержня длиной 2,5–3 м	полосы длиной 5 м
Глина, чернозем	100	30	25
Смешанный грунт (глина, известняк, щебень)	150	45	40
Суглинок	200	60	50
Супесок	500	150	125
Песок	1000	300	250
Мергель, известняк	1500	450	375
Скалы	3000	900	750

При больших импульсных токах – токах молнии – плотность проходящего через заземляющие электроды тока J велика, поэтому в земле у поверхности электродов создаются очень высокие напряженности поля $E=J\rho$, превосходящие пробивные напряженности грунта. Вокруг электродов образуются зоны искрения, увеличивающие их эффективные размеры, и сопротивление заземления уменьшается.

Быстрое же нарастание тока молнии на фронте импульса создает падение напряжения на индуктивности протяженного заземлителя, что ограничивает отвод тока с удаленных его частей. При этом сопротивление заземления, наоборот, увеличивается.

В результате влияния того или иного фактора зоны искрения или падения напряжения на индуктивности – сопротивление заземлителя при прохождении тока молнии, так называемое импульсное сопротивление $R_{и}$, отличается от стационарного сопротивления заземления, измеренного при переменном напряжении и сравнительно небольшом токе или рассчитанного по (7.16)–(7.19).

Отношение импульсного и стационарного сопротивлений заземления называется импульсным коэффициентом:

$$\alpha_{и} = R_{и} / R. \quad (7.21)$$

Рассмотрим вертикальный заземлитель в виде стержня при $t=0$ [см. (7.16)]. На границе искровой зоны (рис. 7.18), представляющей собой цилиндрическую поверхность радиусом $r_{и.з}$, напряженность электрического поля

$$E_{пр} = J\rho = \frac{I_M \rho}{2\pi r_{и.з} l} \rho. \quad (7.22)$$

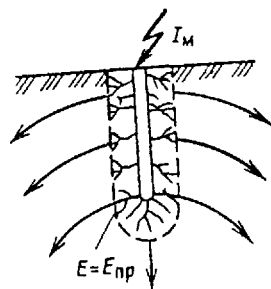


Рис. 7.18. Искровая зона вокруг вертикального электрода

Из (7.21) следует, что

$$r_{и.з} = \frac{I_M \rho}{2\pi l E_{пр}}, \quad (7.23)$$

а импульсное сопротивление заземления и импульсный коэффициент соответственно равны:

$$R_{и} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{2l}{r_{и.з}} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4\pi l^2 E_{пр}}{I_M \rho}, \quad (7.24)$$

$$\alpha_{и} = \frac{\ln(4\pi l^2 E_{пр} I_M \rho)}{\ln \frac{2l}{r_{и.з}}}. \quad (7.25)$$

Сосредоточенные заземлители имеют тем меньшее значение $\alpha_{и}$, чем больше ток молнии, проходящий через заземлитель, и выше удельное сопротивление грунта (рис. 7.19, табл. 7.3).

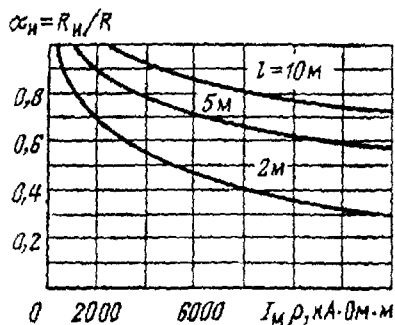


Рис. 7.19. Импульсные коэффициенты вертикальных электродов в зависимости от произведения $I_{и} \rho$ (грунт с $E_{пр} = 12 \text{ кВ/см}$)

Таблица 7.3

Значения импульсных коэффициентов $\alpha_{и}$ и $\eta_{и}$

Заземлитель	$\alpha_{и}$ при удельном сопротивлении $\rho, \text{Ом} \cdot \text{м}$				$\eta_{и}$
	100	200	500	1000	
Вертикальные стержни, соединенные полосой (расстояние между стержнями вдвое больше их длины):					
2–4 стержня	0,5	0,45	0,3		
8 стержней	0,7	0,55	0,4	0,3	0,75
15 стержней	0,8	0,7	0,55	0,4	
Две горизонтальные полосы длиной по 5 м, расходящиеся в противоположные стороны от точки присоединения токоотвода	0,65	0,55	0,45	0,4	1
Три полосы длиной по 5 м, симметрично расходящиеся от точки присоединения токоотвода	0,7	0,6	0,5	0,45	0,75

Анализ протяженного горизонтального заземлителя без учета искровых процессов, который здесь не дается из-за его громоздкости, приводит к следующему выражению для импульсного коэффициента:

$$\alpha_{и} = 1 + \frac{L_0 l}{3\tau_{\phi} R}, \quad (7.26)$$

где $L_0 = 0,2 \left(\ln \frac{l}{r} - 0,31 \right)$ – индуктивность единицы длины горизонтального заземлителя, мкГн/м; τ_{ϕ} – длительность фронта тока молнии, мкс.

Импульсный коэффициент протяженного горизонтального заземлителя больше единицы, и чем больше его длина и меньше продолжительность фронта импульсного тока, тем выше значение $\alpha_{и}$.

Следует иметь в виду, что у поверхности протяженного заземлителя имеют место искровые процессы, однако они ослабевают по мере удаления от начала заземлителя, поскольку уменьшаются его потенциалы и плотность стекающего тока. Искровые процессы в земле существенно влияют на импульсное сопротивление протяженного заземлителя. При малых длинах его, когда плотности тока велики, искровые процессы могут привести к уменьшению импульсного коэффициента до $\alpha_{и} \leq 1$.

Если заземлитель состоит из n труб или полос, то его импульсное сопротивление

$$R_{и} = \frac{\alpha_{и} R}{\eta_{и} n}, \quad (7.27)$$

где $\eta_{и}$ – импульсный коэффициент использования заземлителя.

Коэффициент $\eta_{и}$ учитывает ухудшение условий растекания тока с заземлителя, состоящего из нескольких близко расположенных электродов, вследствие взаимного экранирования последних. Растекание тока с каждого из электродов в сторону соседних затруднено (рис. 7.20), поскольку все электроды имеют одинаковый потенциал и напряженности поля в этом направлении оказываются существенно сниженными. В результате как бы уменьшается поверхность электродов, участвующая

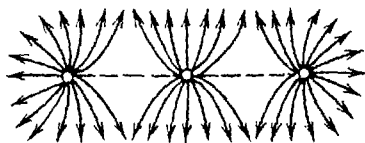


Рис. 7.20. Распределение линий тока с параллельных заземляющих электродов

в отводе тока в землю, ухудшается их использование и, следовательно, увеличивается сопротивление заземления ($\eta_{и} < 1$).

Коэффициент $\eta_{и}$ зависит от длины электродов, расстояния между ними и их геометрического расположения.

Усредненные значения $\alpha_{и}$ и $\eta_{и}$ для некоторых конструкций заземлителей приведены в табл. 7.2.

Практически во всех случаях $\alpha_{и}/\eta_{и} < 1$, поэтому сопротивление заземления, выполненного из нескольких электродов, можно приближенно определять как

$$R_{и} \approx R/n. \quad (7.28)$$

При этом действительная величина $R_{и}$ будет меньше рассчитанной. Расчет по формуле (7.28) даст удовлетворительный результат при $\rho = 100 \div 200$ Ом·м, для плохих грунтов ($\rho > 200$ Ом·м) ошибка может быть значительной.

Для сосредоточенных заземлителей, зная требуемое расчетное значение импульсного сопротивления $R_{и}$, можно определить предельно допустимое значение сопротивления заземления R , измеренное на переменном токе (табл. 7.4), и наоборот, по значению R можно оценить соответствующее значение $R_{и}$.

Таблица 7.4

Связь импульсного сопротивления с сопротивлением заземления на переменном токе

$R_{и}$, Ом	R , Ом		
	Глина, чернозем	Супесок	Песок
5	5	7,5	10
10	10	15	20
20	20	30	40
30	30	45	60
40	40	60	80

Сопротивление заземлителя в виде сетки, которая состоит из вертикальных электродов, объединенных горизонтальными полюсами, рассчитывается по эмпирической формуле

$$A = \sqrt{L + nl}$$

где L – суммарная длина всех горизонтальных заземляющих электродов (полос); n и l – число и длина вертикальных электродов; S – площадь, занимаемая заземлителем; ρ – расчетное значение удельного сопротивления грунта; A – коэффициент, зависящий от значения l/\sqrt{S} :

l/\sqrt{S}	0	0,05	0,1	0,2	0,5
A	0,44	0,4	0,37	0,33	0,26

Ориентировочные значения коэффициента $\alpha_{и}$ для заземлителей в виде сеток приведены на рис. 7.21. Для протяженных заземлителей ($\sqrt{S} > 10$ м) импульсный коэффициент можно оценить по приближенной формуле:

$$\alpha_{и} = \sqrt{\frac{1500 \sqrt{S}}{(\rho + 320)(I_M + 45)}}, \quad (7.30)$$

где S – в м²; ρ – в Ом·м; I_M – в кА.

Поперечное сечение заземляющих электродов должно быть не меньше 50 мм², при этом толщина полос, стенок труб или профильной стали должна быть не меньше 4 мм. В целях защиты от коррозии желательнее применение оцинкованной стали. Покраска или покрытие заземляющих электродов битумом не допускается.

Верхний слой земли в летнее время сильно высыхает, что увеличивает сопротивление заземлителя, поэтому не только полосы должны закладываться на глубину не менее 0,5 м, но и стержни реко-

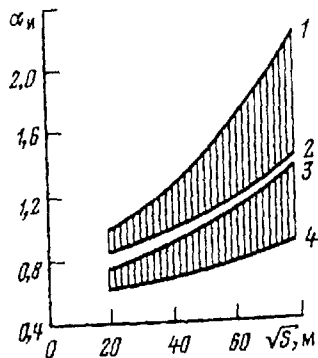


Рис. 7.21. Значение импульсного коэффициента для заземлителей в виде сеток ($\rho = 100 \div 600$ Ом·м): 1–2 $I_M = 10$ кА; 3–4 $I_M = 100$ кА

менуется забивать так, чтобы их верхний край находился на расстоянии около 0,5 м от поверхности земли.

Отдельные электроды стержневого заземлителя объединяются общей стальной полосой сечением не менее 50 мм² или стальным проводником круглого сечения диаметром не менее 8 мм. Соединение электродов с объединяющей полосой, а также присоединение к заземляющему устройству токоотводов предпочтительнее производить при помощи сварки. Можно также применять болты, но не менее двух в каждом месте соединения.

К заземляющему устройству следует присоединять проходящие поблизости от него металлические трубопроводы (водяные, отопительные, канализационные), если они не предназначены для горючих газов и жидкостей и не имеют антикоррозионных покрытий. Подземные трубопроводы из-за их большой протяженности могут обладать очень низким сопротивлением заземления, что следует использовать для уменьшения сопротивления заземляющего устройства. Подземные трубопроводы (особенно водопровод), естественно, во многих случаях могут быть использованы в качестве единственного заземляющего устройства.

Помимо трубопроводов в качестве заземлителей могут быть использованы также обсадные трубы артезианских колодцев, буровых скважин, свинцовые оболочки кабелей. Сопротивление такого рода заземлителей во многих случаях настолько мало ($R < 2$ Ом), что они могут также использоваться в качестве единственного заземляющего устройства. Заметим, что создание заземляющих устройств из стержней или полос, имеющих такое же сопротивление, затруднительно.

7.5. Допустимые расстояния между молниеотводом и защищаемым объектом

Защищаемый объект должен полностью входить в зону защиты молниеотводов. Вместе с тем он должен располагаться на определенном расстоянии от них. Если это расстояние меньше допустимого, то при ударах молнии могут происходить перекрытия с частей молниеотвода на защищаемый объект.

Молниезащитное устройство, включающее в себя молниеотвод, стержни, токоотводы и заземлитель, обладает электрическим сопротивлением (активным и индуктивным). Наиболее существенную часть активного сопротивления составляет сопротивление заземления молниезащитного устройства. Токоотвод представляет собой индуктивность, которая зависит прежде всего от длины токоотвода.

Ток молнии, проходя по молниеотводу, создает падение напряжения на сопротивлении его заземлителя и на индуктивности токоотвода. При косоугольной форме фронта тока молнии с крутизной a максимальный потенциал в точке молниеотвода на расстоянии l от заземлителя возникает в момент максимума тока молнии:

$$U_l = I_M R_{\text{и}} + aL_0 l, \quad (7.31)$$

где $L_0 \approx 1,7$ мкГн/м – индуктивность единицы длины токоотвода, что соответствует металлическим молниеотводам решетчатой конструкции, а также отдельно проложенным токоотводящим спускам.

В электроэнергетике, например, принимают расчетные значения тока молнии и средней крутизны его фронта соответственно 60 кА и 30 кА/мкс (вероятность их примерно 10%). Подставляя эти значения в (7.31), получаем:

$$U_l = 60R_{\text{и}} + 50l. \quad (7.32)$$

Напряжение на молниеотводе оказывается весьма высоким, например, при $R_{\text{и}} = 10$ Ом и на расстоянии $l = 10$ м от заземлителя:

$$U_l = 60 \cdot 10 + 50 \cdot 10 = 1100 \text{ кВ.}$$

Потенциал заземлителя при этом

$$U_3 = I_M R_{\text{и}} = 60 \cdot 10 = 600 \text{ кВ.}$$

Очевидно, чтобы не было перекрытия с молниеотвода на защищаемый объект, прочность изоляции между ними должна быть выше значения напряжения на молниеотводе.

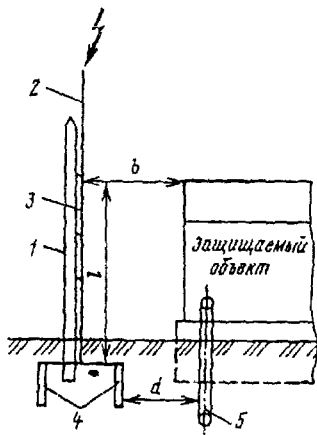
В том случае, когда объект и молниеотвод разделены воздушным промежутком длиной b , необходимо выполнить условие

$$b \geq U_1 / E, \quad (7.33)$$

где E – допустимая средняя напряженность электрического поля в воздухе, при которой невозможен пробой промежутка между молниеотводом и объектом; с некоторым преуменьшением она составляет 500 кВ/м.

Если в (7.33) подставить U_1 по (7.32) и E , то необходимая длина воздушного промежутка (рис. 7.22):

$$b \geq \frac{60 R_{\text{н}} + 50 l}{500} = 0,12 R_{\text{н}} + 0,1 l.$$



Чтобы исключить возможность перекрытия в земле с заземлителя на входящие, например, в здание металлические коммуникации, электрический кабель и др., нужно выдержать между ними расстояние

$$d \geq I_{\text{м}} R_{\text{н}} / E_3. \quad (7.34)$$

Пробивная напряженность электрического поля в земле зависит от удельного сопротивления грунта и длительности импульса. В неоднородном поле она составляет 300–550 кВ/м. Принимая $E_3 = 300$ кВ/м, в рассматриваемом примере получаем:

$$d \geq 60 R_{\text{н}} / 300 = 0,2 R_{\text{н}}.$$

Рис. 7.22. К определению допустимых расстояний между молниеотводом и защищаемым объектом: 1 – деревянная стойка; 2 – молниеприемник; 3 – токоотвод; 4 – заземлитель; 5 – подземные коммуникации

Таким образом, допускаемое расстояние в молниезащитном устройстве и объекта зависит от сопротивления заземления молниезотода и высоты над землей точки сближения. Если известны b , d и l , то легко найти сопротивление заземления, обеспечивающее безопасность сближения.

Заметим, что b должно быть не менее 5 м, а d — не менее 3 м. В особо ответственных случаях нужно учитывать также упоминавшуюся ранее возможность распространения канала разряда в земле на большие расстояния по остаткам корней деревьев и другим неоднородностям.

При ударе молнии в молниезотвод, расположенный на здании, между молниезащитным устройством и заземленными объектами внутри здания (электропроводкой, трубопроводами различного назначения, металлическим каркасом лифта и т.п.) также должно быть обеспечено необходимое расстояние, иначе между ними произойдет пробой, который вызовет местное повреждение здания и может оказаться опасным для людей. Расчет необходимого расстояния в месте сближения в случае одного токоотвода может производиться по приведенным формулам, однако если часть промежутка b занимает кирпичная (или из какого-либо другого непроводящего материала) стена, то ее следует учитывать утроенной толщиной.

Если здание имеет n токоотводов, то допустимое расстояние в точке сближения с одним из токоотводов определяется, например, по формуле

$$b \geq 0,12R_{\text{н}} + \frac{0,1l}{n}. \quad (7.35)$$

Если в качестве токоотвода используется стальной каркас здания или разветвленная водопроводная сеть, то второй член (7.35) очень мал и практически не влияет на расстояние b . Основную роль играет значение сопротивления заземления.

Заметим также, что если токоотвод имеет петлю длиной (рис. 7.17), то, чтобы не было пробоя между точками 1 и 2, необходимо выполнить условие

$$b \geq \frac{50 l}{E} = \frac{50 l}{500} = 0,1 l. \quad (7.36)$$

Если ни конструктивно, ни снижением величины сопротивления заземления не удастся обеспечить требуемую электрическую прочность между токоотводом и заземленными частями внутри здания, необходимо последние присоединить вблизи мест сближения к молниезащитному устройству, а в нижней части – к заземлителю.

Электропроводка при этом должна быть проложена в металлических трубах, которые также внизу присоединяются к заземлителю, а в местах сближения – к молниезащитному устройству. Электрическая емкость между трубой и лежащей внутри нее электропроводкой достаточно велика, а, как известно, емкостное сопротивление обратно пропорционально емкости и частоте тока. Поэтому при прохождении тока молнии, эквивалентного току весьма высокой частоты, емкостное сопротивление между проводкой и трубой ничтожно, и, таким образом, оказывается, что проводка и труба практически имеют между собой электрическое соединение. Этот эффект спасает изоляцию электропроводки от пробоев.

На подстанциях при установке молниеотводов на порталах помимо соблюдения безопасных расстояний по воздуху и в земле необходимо согласовать импульсные разрядные напряжения гирлянд изоляторов и напряжения, возникающие в точках их присоединения к portalу при ударах молнии в молниесотвод.

7.6. Молниезащита зданий и промышленных сооружений

Молниезащита промышленных сооружений, общественных и жилых зданий осуществляется в соответствии со строительными нормами [7.6]. В зависимости от степени опасности поражения молнией и выбора необходимых средств защиты все здания и сооружения классифицируются по трем категориям.

К I-й категории относятся здания и сооружения, в которых хранятся и перерабатываются в открытом виде взрывчатые вещества или внутри которых длительно сохраняются или систематически возникают смеси газов, паров или пыли горючих веществ с воздухом или другими окислителями, способные взорваться от электрической искры.

Защита таких объектов от молнии осуществляется отдельно стоящими молниеотводами. Могут также использоваться молниеотводы, устанавливаемые на здании, но изолированно от него (рис. 7.23). В этом случае должны быть обеспечены необходимые изоляционные расстояния между молниеотводом и зданием по воздуху, в земле и по изолирующей опоре молниеотвода, которые определяются на основании расчета потенциалов в соответствующих точках молниеотвода, возникающих при ударе в него молнии с предельными параметрами.

Высота молниеотводов (стержневых или тросовых) должна обеспечивать зону защиты с минимальной вероятностью прорыва молнии (до 0,5%).

Если сооружения имеют газоотводные трубы или вентиляционные устройства, через которые могут выбрасываться взрывоопасные смеси горючих газов и паров, то молниеотводы должны располагаться так, чтобы их молниеприемники находились вне взрывоопасной зоны. Размеры зон взрывоопасности, подлежащей защите, указаны в табл. 7.5.

Здания и сооружения, относящиеся к категории I, защищаются от проникновения в них опасных импульсов напряжения и от электромагнитного влияния молнии.

При ударах молнии непосредственно в провода воздушных линий (электрических, телефонных, радиотрансляционных), а

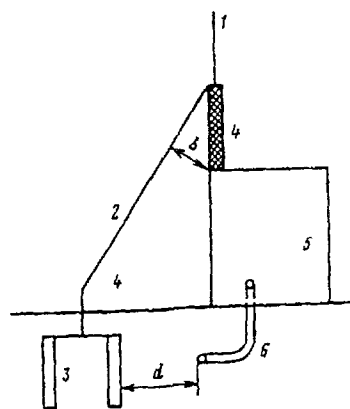


Рис. 7.23. Изолированный от сооружения молниеотвод: 1 — молниеприемник; 2 — токоотвод; 3 — заземлитель; 4 — изолятор молниеприемника; 5 — сооружение; 6 — подземная коммуникация

Размеры зон взрывоопасности

Избыточное давление внутри установки, кПа	Плотность газа	Зоны взрывоопасности от обреза трубы, м	
		по вертикали	по горизонтали
Не более 5	Тяжелее воздуха	1	2
5-25	То же	2,5	5
Не более 25	Легче воздуха	2,5	5
25-50	Любая	4	8

также вследствие электромагнитной индукции при ударах молнии в землю, на проводах возникают импульсы высокого напряжения. Проникая по проводам в здания и сооружения, они вызывают разряды на заземленные части, что может привести к тяжелым последствиям. Вследствие этого во взрывоопасные и пожароопасные здания ввод воздушных линий любого назначения не допускается. Вместо них должны применяться подземные кабельные линии.

Вследствие электростатической и электромагнитной индукции при разрядах молнии может возникнуть искрение внутри взрывоопасных объектов. Для предотвращения его необходимо заземлить все протяженные металлические конструкции: крыши, фермы, балки, каркасы, внутренние трубопроводы, металлические корпуса оборудования. Для этой цели на взрывоопасных объектах предусматривается специальное заземление защиты от вторичных воздействий молнии, которое выполняется в виде замкнутого контура, охватывающего весь защищаемый объект. Сопротивление заземления этого контура не нормируется. К защитному контуру допускается присоединение подземных металлических коммуникаций и защитного заземления электроустановок. Расстояние между заземлителями молниеотводов и заземлителем защиты от вторичных воздействий молнии определяется по (7.34).

Протяженные металлические конструкции (трубопроводы, кабели и пр.) внутри взрывоопасных зданий должны быть соединены между собой в местах сближений (при расстоянии в месте сближения до 10 см) и присоединены через каждые 20–30 м к заземлению защиты от вторичных воздействий. Хорошие контакты (с сопротивлением не более 0,03 Ом) должны быть созданы в местах соединения труб или других деталей протяженных устройств. При фланцевых соединениях труб хороший контакт обеспечивается нормальной затяжкой шести болтов. В соединениях, где не может быть обеспечен надежный контакт, необходима установка перемычек, например, из стальной проволоки диаметром 5–6 мм. Все металлические устройства, образующие петлевой контур, должны быть замкнуты перемычкой на конце петли.

Ко *II-й категории* относятся здания и сооружения, в которых взрывчатые или легковоспламеняющиеся вещества хранятся прочно закупоренными, а взрывоопасные смеси газов, паров или пыли с воздухом могут возникать только во время аварий или неисправностей. Защита объектов категории *II* осуществляется как отдельно стоящими молниеотводами (для хранилищ взрывчатых веществ), так и молниеотводами, устанавливаемыми на самом сооружении. Объекты, относящиеся ко *II-й категории*, могут не защищаться от вторичных воздействий молнии (электростатической и электромагнитной индукции), а их электроснабжение может осуществляться по воздушным линиям, которые подключаются к объекту через кабели длиной не менее 50 м.

Все прочие здания и сооружения, удар молнии в которые может вызвать пожар, механические разрушения и поражение людей и животных, относятся к *III-й категории*. Они могут защищаться как отдельно стоящими молниеотводами, так и молниезащитными устройствами, устанавливаемыми на самом защищаемом объекте. Защита от вторичных воздействий молнии для зданий категории *III* не требуется. Если к объекту подходят воздушные линии, то необходима защита от проникновения импульсов высокого напряжения.

Особенности молниезащиты высоких объектов. Высокие объекты (телебашни, высотные дома и пр.) достаточно часто пор

жаются молнией. По данным наблюдений [2.3] Останкинская телевизионная башня (высота 540 м) поражается в среднем 30 раз в году, при этом в 1–3 случаях точки удара бывают заметно ниже ее вершины, на боковых выступающих элементах. Высотные дома Москвы поражаются молнией 1–2 раза в год.

Целью защиты от молнии высоких объектов является обеспечение безопасности людей, предохранение от разрушений внешних непроводящих частей объекта, обеспечение безаварийной работы электрооборудования и средств связи.

Защита высоких объектов осуществляется с помощью молниеприемников, устанавливаемых на самом объекте. Токоотводом может служить металлический или железобетонный каркас здания или сооружения. Следует предусматривать надежное соединение во время строительства стальной арматуры железобетонных деталей каркаса. Для предотвращения разрушений керамической облицовки или каких-либо других непроводящих элементов в местах возможных поражений молнией должны быть установлены молниеприемники, соединенные с каркасом здания. В качестве таких молниеприемников могут быть использованы как конструктивные элементы здания (парапеты, перила балконов, пожарные лестницы и т.д.), так и специально проложенные стальные проводники. Следует иметь в виду, что объекты высотой более 100 м могут поражаться молнией не только в вершину, но и в боковые выступающие части.

К каркасу объекта, являющемуся токоотводом, с целью выравнивания потенциалов по этажам на разных горизонтальных уровнях (через каждые 10–15 м) должны быть присоединены все внутренние трубопроводы, протяженные металлические элементы (например, каркасы лифтов), а также металлические экраны электропроводки и оболочки кабелей. Каркас объекта через каждые 20–30 м по его периметру присоединяется к заземляющему контуру.

Для защиты электрооборудования и установок связи осуществляются следующие основные мероприятия: все сети низкого напряжения как внутри, так и снаружи объекта прокладываются в стальных трубах, которые через каждые 10–15 м соединяются с каркасом; кожухи всех электроаппаратов, а также сердечники

и нейтрали трансформаторов присоединяются к каркасу; обло-
лочные входящих в объект кабелей различного назначения присо-
единяются в месте входа к каркасу или к заземляющему контуру.

Заземляющий контур должен охватывать объект по всему пе-
риметру и иметь сопротивление растеканию тока 0,5 Ом. По-
следнее, как правило, не вызывает затруднений, поскольку к
контуру присоединяются подземные трубопроводы и обсадные
трубы буровых скважин, используемых с целью получения
данных по геологическому строению выбранной для строитель-
ства площадки.

7.7. Молниезащита электроэнергетических установок

Наиболее часто подвержены ударам молнии воздушные
линии электропередачи. Общая длина линий напряжением
35–1150 кВ у нас в стране достигла почти 800 тыс. км, а протя-
женность воздушных линий меньшего номинального напряже-
ния исчисляется несколькими миллионами километров.

Возникающие на линиях электропередачи при ударах молнии
импульсы перенапряжений, распространяясь по линиям, достига-
ют подстанций и могут представлять опасность для установлен-
ного там электрооборудования. Кроме этого, возможны и удары
молнии в подстанции.

Таким образом, защите от молнии подлежат воздушные
линии электропередачи, а также подстанции от прямых ударов
молнии и от импульсов грозовых перенапряжений, приходящих
на подстанцию по воздушным линиям.

Молниезащита воздушных линий электропередачи. Воздуш-
ные линии электропередачи подвергаются ежегодно десяткам
ударов молнии в каждые 100 км линии. Поражение молнией фаз-
ного 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 метал-
лических опорах имеют один или два заземленных троса, подве-
шиваемых выше фазных проводов и воспринимающих на себя

удары молнии. Однако наличие тросов не исключает возможности появления высоких потенциалов на вершине металлической опоры при прямых ударах в нее молнии даже при малых импульсных сопротивлениях заземления опоры. Высокий потенциал на опоре может стать причиной разряда с опоры на фазный провод (обратное перекрытие). Наличие тросов не исключает, хотя и с очень малой вероятностью, ударов молнии в фазные провода.

Число перекрытий линейной изоляции меньше числа ударов молнии в линию, поскольку для перекрытия изоляции необходимо определенное напряжение, которое зависит от значения тока молнии и электрических параметров линии. Например, при малом импульсном сопротивлении заземления металлической опоры обратное перекрытие может произойти только при достаточно большом токе молнии. В то же время поражение молнией фазного провода может привести к перекрытию при очень небольшом токе, однако вероятность прорыва молнии через тросовую защиту невелика.

Вероятность перекрытия $P_{\text{пер}}$ изоляции линии можно оценить, исходя из параметров линии, импульсной прочности гирлянд изоляторов и вероятности токов молнии. Число перекрытий линейной изоляции определяется из выражения

$$n_{\text{пер}} = n_{\text{уд}} P_{\text{пер}}$$

По пути перекрытия изоляции линии проходит ток промышленной частоты – ток короткого замыкания на землю. Если дуга короткого замыкания горит устойчиво, то происходит отключение линии. Если линия не оборудована устройством автоматического повторного включения или АПВ неуспешно, то возникает перерыв в электроснабжении потребителей.

Длительность импульсного тока молнии мала (примерно 100 мкс) по сравнению с полупериодом напряжения промышленной частоты (10 000 мкс). Немаловажную роль играет фаза рабочего напряжения в момент удара молнии. При малом мгновенном значении рабочего напряжения и достаточно большом пути импульсного перекрытия не создаются условия для устойчивого го-

рения дуги промышленной частоты. В инженерных расчетах принято оценивать вероятность перехода импульсного перекрытия в устойчивую дугу по средней напряженности вдоль пути перекрытия при наибольшем рабочем напряжении $E_{\text{ср}} = U_{\text{наиб.раб}} / l_{\text{пер}}$. Для линий на деревянных опорах и длинных воздушных промежутков вероятность возникновения устойчивой дуги η определяется по формуле

$$\eta = (1,6E_{\text{ср}} - 6) \cdot 10^{-2}, \quad (7.37)$$

где $E_{\text{ср}}$ – средняя напряженность (действующее значение), кВ/м.

Если η по (7.37) получается меньше 0,1 или больше 0,9, то в расчетах принимаются эти предельные значения.

Для линий на металлических опорах при номинальных напряжениях до 220 кВ принимают $\eta = 0,7$ а при номинальных напряжениях 330 кВ и выше $\eta = 1,0$.

Показателем грозоупорности воздушных линий служит число отключений на 100 км линии в районе со 100 грозовыми часами в году:

$$n_{\text{откл}} = 4h_{\text{ср}} P_{\text{пер}} \eta, \quad (7.38)$$

где $h_{\text{ср}}$ – средняя высота подвеса провода или троса [см. (1.6)].

На линиях 6–35 кВ, работающих с изолированной нейтралью, часто используются металлические или железобетонные опоры. Применение грозозащитных тросов на таких линиях нецелесообразно, поскольку вследствие малой электрической прочности изоляции линии практически любой удар молнии в трос приводит к обратному перекрытию с троса на провод. Поэтому наиболее эффективными мерами, повышающими грозоупорность таких линий, являются оборудование их АПВ и установка дугогасящего реактора, уменьшающего ток дуги однофазного замыкания на землю и увеличивающего вероятность самопроизвольного погасания дуги.

Таким образом, возможны два различных пути уменьшения числа грозовых отключений линии: уменьшение вероятности пе-

перекрытия и уменьшение вероятности перехода импульсного перекрытия в устойчивую дугу тока короткого замыкания. Первый метод реализуется подвеской тросовых молниеотводов и созданием малого импульсного сопротивления заземления опор. При этом, с одной стороны, резко снижается вероятность непосредственного поражения молнией фазных проводов и, с другой стороны, снижается импульсное напряжение на изоляции при ударах в опоры и тросы. Второй метод осуществляется путем удлинения пути перекрытия (использование изоляционных свойств дерева на линиях с деревянными опорами), что приводит к снижению средней рабочей напряженности, или с помощью дугогасящих реакторов в сетях 6–35 кВ, что дает значительное увеличение вероятности самопроизвольного погасания дуги замыкания на землю.

Исходя из условий надежности электроснабжения, допустимое число отключений воздушных линий в год принимают равным

$$n_{\text{откл. доп}} = N_{\text{доп}} (1 - \beta_{\text{АПВ}}), \quad (7.39)$$

где $N_{\text{доп}}$ – допустимое число перерывов электроснабжения в год ($N_{\text{доп}} \leq 0,1$ при отсутствии резервирования и $N_{\text{доп}} \leq 1,0$ при наличии резервирования); $\beta_{\text{АПВ}}$ – коэффициент успешности АПВ, равный 0,8–0,9 для линий 110 кВ и выше на металлических и железобетонных опорах.

Допустимое число отключений принимается в зависимости от типа выключателя равным 1–4, поскольку более частая работа выключателей осложняет их эксплуатацию (требуется внеплановые ревизии).

Грозоупорность линий без тросов [7.9]. При прямом ударе молнии в провод ток молнии растекается по пораженному проводу в обе стороны, поэтому амплитуда волны перенапряжения на проводе определяется по формуле

$$U = \frac{I_M Z}{2}, \quad (7.40)$$

где Z – волновое сопротивление провода, которое в среднем, с учетом импульсной короны, может быть принято равным 300 Ом. При коронировании емкость провода увеличивается и соответственно уменьшается его волновое сопротивление.

На линии с металлическими опорами импульс перенапряжения с амплитудой U воздействует на изоляцию провода на опоре. При токах молнии порядка 5–10 кА, т.е. в большинстве грозовых разрядов в линию, создаются перенапряжения, достаточные для перекрытия гирлянды изоляторов.

На линиях с номинальным напряжением до 220 кВ наряду с металлическими и железобетонными используются деревянные опоры.

Древесина обладает изоляционными свойствами, поэтому, например, участок деревянной траверсы между точкой подвеса гирлянды и заземляющим спуском на опорах с тросами может рассматриваться как дополнительная изоляция провода относительно земли. Точно так же участок траверсы между точками закрепления двух гирлянд на опорах без тросов является дополнительной междуфазной изоляцией (см. рис. 7.24).

Изоляционные свойства дерева в значительной степени зависят от его состояния. Хорошо высушенная древесина обладает относительно высокой электрической прочностью. Однако вследствие пористости и высокой гигроскопичности она всегда содержит большое количество влаги (15–40%). Увлажненность древесины сильно зависит от атмосферных условий и может изменяться в достаточно широких пределах. При этом в широком диапазоне изменяется и ее электрическая прочность. Наиболее низкое разрядное напряжение имеет дерево, поверхность которого смачивается ливневым дождем.

Для ориентировочных расчетов дополнительную импульсную прочность, создаваемую деревянной траверсой, принимают равной 70 кВ на 1 м пути разряда по этой траверсе.

На линиях с деревянными опорами (рис. 7.24) перекрытие прежде всего происходит между проводами по пути гирлянда – траверса – гирлянда. Импульс на пораженном проводе индуцирует напряжение на соседнем проводе в соответствии с коэффи

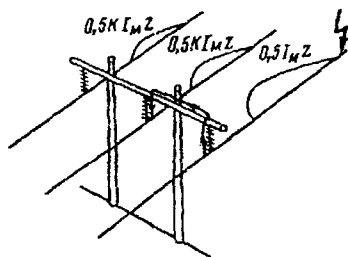


Рис. 7.24. Импульсы грозовых перенапряжений при ударе молнии в провод линии на деревянных опорах

циентом электромагнитной связи k . Между проводами возникает напряжение

$$U = \frac{I_M Z}{2} (1 - k), \quad (7.41)$$

где k – коэффициент связи между проводами с учетом импульсной волны, равный 0,25–0,4.

Вероятность перекрытия линейной изоляции $P_{\text{пер}}$ рассчитывается по критическому значению тока молнии. Критический ток молнии

определяется из условий равенства воздействующего напряжения U и импульсного разрядного напряжения изоляции $U_{50\%}$ по формулам:

для ВЛ на металлических и железобетонных опорах

$$I_{\text{кр}} = \frac{2U_{50\%}}{Z}; \quad (7.42)$$

для ВЛ на деревянных опорах

$$I_{\text{кр}} = \frac{2U_{50\%}}{Z(1-k)}. \quad (7.43)$$

Малое число отключений линий на деревянных опорах без тросов обеспечивается обычно за счет низкого значения коэффициента η перехода импульсного перекрытия в устойчивую дугу. Очевидно, что в случае металлических опор разрядный промежуток уменьшается до длины одной гирлянды, что вызывает существенное увеличение как коэффициента η , так и вероятности перекрытия изоляции $P_{\text{пер}}$. Поэтому линии 100 кВ и выше на металлических опорах без тросов в районах со средней или большой интенсивностью грозовой деятельности имели бы недопустимо большое число отключений. Как правило, такие линии защищаются тросовыми молниеотводами по всей длине.

Несколько по-иному обстоит дело с линиями 35 кВ на металлических опорах, работающими в системе с изолированной нейтралью, особенно если в ней применены дугогасящие аппараты. В таких системах однофазные перекрытия изоляции не приводят к отключению линии, так как дуга емкостного тока в большинстве случаев гаснет в результате действия дугогасящего реактора, а коэффициент перехода в силовую дугу $\eta \approx 0$ независимо от значения $E_{\text{ср}}$. Поэтому отключения линий 35 кВ из-за грозовых поражений могут происходить только в случае двухфазных или трехфазных перекрытий.

После перекрытия изоляции пораженного провода в путь тока вместо волнового сопротивления провода $Z/2$ включается значительно меньшее сопротивление заземления опоры $R_{\text{и}}$. Если разряд молнии произошел в провод на небольшом расстоянии от опоры, через заземлитель проходит практически полный ток молнии и опора приобретает потенциал, приблизительно равный $I_{\text{м}}R_{\text{и}}$. На соседнем проводе наводится потенциал $kI_{\text{м}}R_{\text{и}}$. Перекрытие изоляции второго провода произойдет, если

$$I_{\text{кр}} \geq \frac{U_{50\%}}{R_{\text{и}}(1-k)}. \quad (7.44)$$

Отсюда следует, что вероятность перекрытия $P_{\text{пер}}$ тем меньше, чем ниже сопротивление $R_{\text{и}}$ (или больше критическое значение тока молнии). Поэтому на линиях 35 кВ на металлических опорах без тросов целесообразно применять дополнительные заземлители для уменьшения сопротивления заземления опор.

Очевидно, что наибольшие перенапряжения на линиях без тросов возникают при прямом поражении линии молнией. Тем не менее определенную роль играют и удары молнии вблизи линии. Такие удары приводят к появлению индуктированных напряжений. Индуктированные напряжения на фазных проводах имеют электрическую и магнитную составляющие:

$$U_{\text{инд}} = U_{\text{и.э}} + U_{\text{и.м}}. \quad (7.45)$$

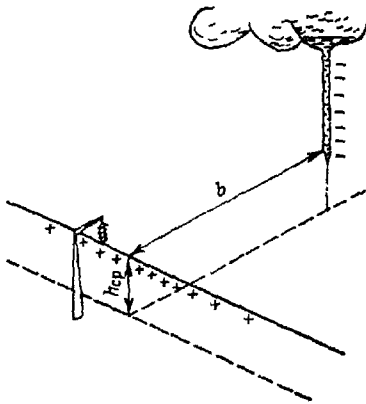


Рис. 7.25. К оценке индуктированных перенапряжений

Заряды лидерного канала молнии связывают на проводе заряды противоположного знака (рис. 7.25). Электрическое поле связанных зарядов уравнивается полем лидера, поэтому потенциал провода во время лидерной стадии равен нулю (рабочее напряжение не учитывается). Во время главного разряда заряды лидера нейтрализуются, при этом связанные на проводе заряды освобождаются, что сопровождается повышением потенциала провода и образованием импульсов на-

пряжения, распространяющихся по проводу в обе стороны. Так возникает электрическая составляющая индуктированного напряжения.

Изменение магнитного поля при главном разряде приводит к возникновению магнитной составляющей индуктированного напряжения в петле опора-гирлянда изоляторов-провод-земля.

Максимальное значение индуктированного напряжения можно оценить по формуле [2.28]:

$$U_{\text{инд}} \approx 30 \frac{h_{\text{ср}}}{b} I_{\text{м}}. \quad (7.46)$$

Расчеты показывают, что индуктированные перенапряжения могут превышать импульсное разрядное напряжение изоляции линий 35 кВ 1-2 раза в год, а для воздушных линий напряжением 110 кВ и выше они не имеют существенного значения.

Грозоупорность линий, защищенных тросами [7.9]. Грозовые отключения воздушных линий с тросами могут происходить по следующим причинам: 1) удар молнии в трос в середине пролета и перекрытие воздушного промежутка трос-провод; 2) прорыв

молнии через тросовую защиту, т.е. поражения молнии в опору и обратное перекрытие изоляции с опоры на провод.

Расчеты и опыт эксплуатации линий показывают, что вероятность пробоя воздушного промежутка между тросом и проводом при ударе молнии в трос пренебрежимо мала и с нею можно не считаться, если расстояние трос-провод составляет не менее 2% длины пролета между опорами линии. Минимальные расстояния между тросом и проводом в середине пролета по вертикали в соответствии с ПУЭ [7.10] должны быть следующими:

Длина пролета, м	100	150	200	300	400	500	600	700
Расстояние трос-провод, м	2	3,2	4	5,5	7	8,5	10	11,5

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

$$\lg p_{\alpha} = \frac{\alpha \sqrt{h_{\text{оп}}}}{90} - 4, \quad (7.47)$$

где $h_{\text{оп}}$ – высота опоры, м; α – угол защиты, образованный вертикалью, проходящей через трос, и прямой, соединяющей трос с проводом.

Угол защиты характеризует экранирующее действие тросов и при высоте опор до 30 м в соответствии с рис. 7.6 или 7.7 должен быть не более 30° .

Долю ударов молнии в опоры (в трос вблизи опор) от общего числа поражений линии можно оценить как $4h_{\text{оп}}/l_{\text{п}}$, где $h_{\text{оп}}$ – высота опоры, а $l_{\text{п}}$ – длина пролета. Тогда число ударов в опоры определяется формулой

$$n_{\text{оп}} = n_{\text{уд}} \frac{4h_{\text{оп}}}{l_{\text{п}}}, \quad (7.48)$$

где $n_{\text{уд}}$ – число ударов молнии в линию.

Обратное перекрытие линейной изоляции с опоры на провод фазы может произойти, если напряжение на изоляции достигнет ее импульсного разрядного напряжения или превысит его.

Упрощенно вероятность перекрытия изоляции при ударе молнии в опору можно определить по значению критического тока

$$I_{кр} = \frac{U_{50\%}}{R_{и} + \delta h_{оп}}, \quad (7.49)$$

где $\delta=0,15$ для линий с двумя тросами и $\delta=0,3$ для линий с одним тросом.

Очевидно, что при двух тросах доля тока в опоре меньше, чем при одном тросе, и критическое значение тока молнии выше. Увеличение высоты опоры, а значит, и ее индуктивности, приводит к росту напряжения на гирлянде изоляторов и вследствие этого – к уменьшению критического тока, что также отражает формула (7.49).

Упрощенная методика может быть использована для оценки числа отключений воздушных линий напряжением до 500 кВ при сопротивлениях заземлений опор до 30 Ом.

Таким образом, удельное число грозовых отключений линий с тросами можно оценить по формуле

$$h_{откл} = 4h_{ср} \left(\frac{4h_{оп}}{l_{и}} p_{оп} + p_{\alpha} p_{пр} \right) \eta, \quad (7.50)$$

где p_{α} – вероятность прорыва молнии на провод, определяемая по (7.47); $p_{пр}$ – вероятность перекрытия изоляции линии при ударе молнии в провод, определяемая по критическому току (7.42); $p_{оп}$ – вероятность перекрытия изоляции при ударе молнии в опору [см. (7.49)].

Для достижения приемлемых показателей грозоупорности линий [см. (7.39)] для грунтов с различными удельными сопротивлениями нормируются следующие значения сопротивления заземления опор при промышленной частоте тока:

ρ , Ом·м	100	100–150	500–1000	Более 1000
R , Ом.	До 10	До 15	До 20	До 30

При токах молнии сопротивления сосредоточенных заземлителей получают несколько меньше из-за искрового эффекта.

В горных районах (скальные грунты) сопротивления заземления могут получаться более высокими, чем приведенные выше, но благодаря уменьшению токов молнии по сравнению с равнинной местностью число отключений может оказаться приемлемым (см. § 2.2).

Молниезащита подстанций. Защита открытых распределительных устройств подстанций высокого напряжения от прямых ударов молнии осуществляется с помощью стержневых молниеотводов в соответствии с рекомендациями § 7.2–7.5. Молниеприемники целесообразно устанавливать на порталах (кроме трансформаторных), прожекторных мачтах и крышах зданий. Металлоконструкции порталов и мачт при этом используются в качестве токоотводов, соединяющих молниеприемники с заземлителем. Следует иметь в виду, что возможность установки молниеотводов на порталах подстанций 110 кВ и ниже должна быть проверена по указаниям § 7.5.

Заземлители подстанций с целью выравнивания потенциалов по их территории при аварийных замыканиях на землю и обеспечения таким образом электробезопасности персонала выполняются в виде сетки, образуемой горизонтально расположенными в земле полосами, которыми соединяются вертикальные электроды. К заземлителю присоединяются все металлоконструкции (порталы, мачты) и металлические корпуса электрооборудования (баки трансформаторов, масляных выключателей и т.п.). В соответствии с нормами стационарное сопротивление заземления для подстанций 110 кВ и выше не должно превышать 0,5 Ом.

Сопротивление таких протяженных заземлителей в виде сетки при прохождении токов молнии обычно возрастает (см. § 7.4), поэтому для его уменьшения в местах присоединения токоотводов к заземляющему контуру подстанции устанавливаются дополнительные сосредоточенные заземлители в виде вертикальных электродов.

На подстанциях 35 кВ нейтрали трансформаторов присоединяются к заземлителю через дугогасящий реактор. В этом случае необходимое значение стационарного сопротивления заземления определяют исходя из того, что при прохождении через заземлитель увеличенного на 25% номинального тока дугогасящего ре-

актора потенциал заземлителя не должен превышать 125 В. Однако сопротивление заземления подстанции не должно превышать 10 Ом.

Подстанционные здания и сооружения защищаются путем заземления металлической кровли или, если крыша неметаллическая, посредством сетки размером $5 \times 5 \text{ м}^2$ из стальной проволоки диаметром 8 мм, которая располагается на крыше и присоединяется к заземлению.

По экономическим соображениям уровень изоляции подстанционного оборудования устанавливается ниже уровня изоляции линии. Поэтому импульсы напряжения, образующиеся при ударах молнии в линию и имеющие наибольшую амплитуду, равную импульсному разрядному напряжению линейной изоляции (или установленного на подходе к подстанции трубчатого разрядника), представляют опасность для подстанционного электрооборудования.

Основным средством защиты электрооборудования служат высоконелинейные ограничители перенапряжений (ОПН) и вентильные разрядники (РВ). В сочетании с мероприятиями, осуществляемыми на подходе линии к подстанции, защитные аппараты (ЗА) позволяют ограничить грозовые перенапряжения до допустимых для оборудования значений.

Характеристики ЗА и допустимые импульсные напряжения на изоляции оборудования $U_{\text{доп}}$ связаны соотношением

$$U_{\text{доп}} \geq U_{\text{ост}} + \Delta U_{\text{к}}, \quad (7.51)$$

где $U_{\text{ост}}$ – остающееся на нелинейном резисторе ЗА напряжение при наибольшем допустимом токе в резисторе; $\Delta U_{\text{к}}$ – так называемый координационный интервал.

Координационный интервал учитывает повышение напряжения на защищаемом оборудовании по отношению к напряжению на ЗА, зависящее от их взаимного удаления и от крутизны фронта импульса грозового перенапряжения, набегающего на подстанцию.

Допустимая крутизна импульса $a_{\text{доп}}$ и расстояние l между ЗА и защищаемым оборудованием связаны соотношением

$$\Delta U_{\text{к}} = 2a_{\text{доп}} l / v, \quad (7.52)$$

где v – скорость распространения импульса, составляющая при коронировании проводов примерно 250 м/мкс.

Если из конструктивных соображений установлено значение l , то для соблюдения координационного интервала необходимо, чтобы на входе подстанции грозовой импульс имел в соответствии с (7.52) крутизну фронта не выше определенного значения. Достигается это с помощью защищенного подхода к подстанции (называемого также опасной зоной).

На защищенном подходе особенно тщательно выполняются требования молниезащиты: снижение сопротивлений заземления опор и уменьшение углов защиты тросов. Целью этих мероприятий является уменьшение вероятностей прорыва молнии через тросовую защиту и обратных перекрытий при ударах в опоры в пределах защищенного подхода к подстанции. При прохождении импульса напряжения по защищенному подходу вследствие действия импульсной короны происходит удлинение его фронта, т.е. снижение крутизны фронта импульса, набегающего на подстанцию.

Принимая в месте удара молнии в качестве расчетного импульс с вертикальным фронтом, бесконечно длинным спадом и амплитудой, определяемой вольт-секундной характеристикой линейной изоляции, находим необходимую длину защищенного подхода:

$$l_{\text{подх}} = \frac{UK}{a_{\text{доп}} \left(0,5 + \frac{0,008U}{h_{\text{ср}}} \right)}, \quad (7.53)$$

где U – амплитуда импульса, кВ; $a_{\text{доп}}$ – допустимая крутизна, кВ/мкс; $h_{\text{ср}}$ – средняя высота подвеса провода, м; K – коэффициент, равный 1; 1,2 и 1,5 при количестве проводов в фазе соответственно 1, 2 и 3.

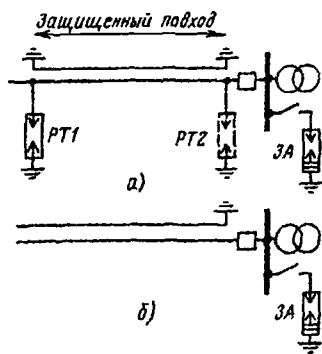


Рис. 7.26. Защищенные подходы воздушных линий к подстанции: а — линия на деревянных опорах; б — линия на металлических или железобетонных опорах

на навешивают трубчатые разрядники $PT1$. В конце подхода иногда устанавливают второй комплект трубчатых разрядников $PT2$, который служит для защиты разомкнутого линейного выключателя.

Если линия выполнена на металлических или железобетонных опорах и защищена тросами по всей длине, то трубчатые разрядники на подходе не устанавливаются (рис. 7.26, б).

На подстанциях 110–500 кВ длина защищенного подхода при обычно встречающихся расстояниях от ЗА до защищаемого оборудования составляет 1–4 км.

Эффективность защиты подстанции определяется двумя составляющими, связанными с прямыми ударами молнии и с набегающими на подстанцию грозowymi импульсами.

Эффективность защиты от прямых ударов молнии оценивается годовым числом β_1 прорывов молнии в зону защиты и обратных перекрытий при ударах в молниеотводы:

$$\beta_1 = n_{\text{уд}} \frac{D_{\Gamma}}{100} (\psi + P_{\text{оп}}), \quad (7.54)$$

где $n_{\text{уд}}$ — число ударов молнии в подстанцию за 100 грозowych часов [см. (1.5)]; D_{Γ} — число грозowych часов в году; $\psi \approx 10^{-3}$ — веро-

ятность прорыва молнии в зону защиты; $p_{\text{оп}}$ – вероятность перекрытия изоляции при ударе в молниеотвод (см. § 7.5).

При установке молниеотводов на поргалах подстанции (7.54) наибольшее значение имеет вероятность $p_{\text{оп}}$, поскольку молниеотводы поражаются при $\psi = 10^{-3}$ в 1000 раз чаще, чем токоведущие части.

Эффективность защиты от импульсов грозовых перенапряжений, набегающих на подстанцию по воздушным линиям, характеризуется средним числом опасных перенапряжений β_2 , возникающих на подстанции за год:

$$\beta_2 = 4h_{\text{ср}} \frac{D_{\Gamma}}{100} \frac{ml_{\text{подх}}}{100} \left(p_{\alpha} + \frac{4h_{\text{оп}}}{l_{\text{п}}} p_{\text{оп}} \right), \quad (7.55)$$

где m – число отходящих от подстанции воздушных линий; $l_{\text{подх}}$ – длина защищенного подхода (опасной зоны); p_{α} – вероятность удара молнии в фазные провода на подходе [см. (7.47)]; $p_{\text{оп}}$ – вероятность перекрытия изоляции при ударах молнии в опору в пределах защищенного подхода [см. (7.49)].

Напомним, что на подходах уменьшаются защитные углы троса α и снижаются сопротивления заземления опор $R_{\text{н}}$.

Показателем эффективности защиты подстанции (грозоупорности) служит число лет ее безаварийной работы

$$T = \frac{1}{\beta_1 + \beta_2}. \quad (7.56)$$

Расчетные значения T современных подстанций составляют сотни лет, т.е. на порядок превышают расчетные сроки службы электрооборудования подстанций.

7.8. Молниезащита транспортных средств

Корпуса наземного транспорта – автомобилей, локомотивов, пассажирских вагонов и др. – в настоящее время выполняются из металла, поэтому находящиеся в нем люди в достаточной мере защищены от молнии. Помимо этого поражение молнией,

например, автомобиля является чрезвычайно редким. Отмечались отдельные случаи удара в автомобили при движении их по открытым равнинам. В одном из них оказались пробитыми шины.

Электрифицированные железные дороги имеют контактную сеть, которая вследствие значительной протяженности и большой высоты подвески (контактный провод располагается на высоте 6,5 м, а несущий его трос еще на 1–1,5 м выше) часто подвергается как прямым ударам молнии, так и индуктированным перенапряжениям. Возникающие в контактной сети импульсы грозовых перенапряжений воздействуют на электрооборудование подвижного состава и тяговых подстанций.

Для контактной сети и электрооборудования электрических железных дорог применяются те же методы расчета грозовых перенапряжений и те же основные средства защиты от них, что и для воздушных линии электропередачи и подстанций (см. § 7.7). Однако имеются и некоторые особенности, связанные со спецификой железнодорожного транспорта [7.11].

Контактная сеть имеет малые длины пролетов, составляющие 60–70 м, т.е. на каждый километр пути приходится примерно 15 опор. Поэтому доля ударов в опоры много больше, чем на линиях электропередачи.

На электрифицированных железных дорогах опоры контактной сети заземляются на рельсы. При ударах молнии в опору или при срабатывании разрядника, защищающего изоляцию контактной сети, ток молнии стекает преимущественно не через фундамент опор, имеющий большое сопротивление заземления, а в рельс. Рельсы лежат на деревянных или железобетонных шпалах, находящихся в щебне или песке. Поэтому переходное сопротивление между рельсом и грунтом много больше, чем у обычных протяженных заземлителей (§ 7.4), и зависит от состояния железнодорожного полотна. При прохождении импульсного тока по рельсам в них возникают вихревые токи, повышающие активное сопротивление и снижающие индуктивность рельсов. Индуктивность рельсов при этом практически остается постоянной и равной 0,8–0,9 мкГн/м. Активное сопротивление рельсов,

Ом/м, в области частот больше 100 кГц приближенно определяется по уравнению

$$r_p = m_p \sqrt{\omega}, \quad (7.57)$$

где $m_p = 5 \cdot 10^{-3} - 10^{-4}$; ω – круговая частота.

При поражении опоры молнией обычно перекрывается изоляция на нескольких опорах, число которых зависит от тока молнии и от сопротивления заземления опор, которое может изменяться по указанным выше причинам от 1 до 200 Ом и более. Прохождение тока молнии через опору и рельс приводит к снижению напряжения на изоляции соседних опор, поскольку повышается их потенциал. Вследствие этого на более удаленных опорах напряжения на изоляции могут быть выше, чем на соседних с пораженной, и могут происходить перекрытия изоляции на опорах через одну или две от пораженной.

При ударах молнии в опоры и провода контактной сети предотвращение перекрытия ее изоляции, имеющей невысокое импульсное разрядное напряжение, с помощью технических мероприятий (защитные тросы, усиление изоляции) трудно осуществимо и экономически нецелесообразно. Важной задачей является исключение длительного горения дуги сопровождающего тока короткого замыкания, что может привести к повреждению изоляторов. С этой целью вдоль контактной сети через каждые 1,5–2 км устанавливаются параллельно изоляторам защитные промежутки с рогообразными электродами («роговые разрядники»), имеющие разрядное напряжение несколько ниже напряжения перекрытия изоляторов (рис. 7.27). С помощью этих разрядников дуга сопровождающего тока удаляется от поверхности изоляторов, предотвращая их повреждение, а кроме того, дуга под действием тепловых потоков воздуха и электромагнитных сил перемещается по электродам рогового разрядника, удлиняется и может погаснуть еще до срабатывания защиты от коротких замыканий. На фидерах, питающих сеть, применяется также автоматическое повторное включение.

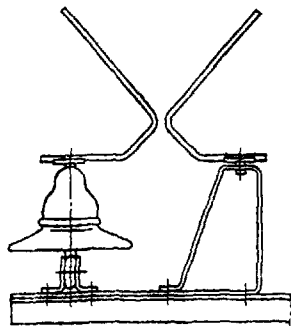


Рис. 7.27. Защитный промежуток («роговой разрядник») для контактной сети железных дорог

Электрооборудование электровозов защищается с помощью ограничителей перенапряжений (ОПН) и вентильных разрядников постоянного или переменного тока в зависимости от типа применяемого оборудования [7.11]. Защита тяговых подстанций осуществляется в соответствии с [7.10.] и § 7.7.

Корпуса морских и речных судов выполняются, как правило, из металла, а вода имеет на порядок меньшее удельное сопротивление, чем обычные грунты: $\rho = 10 \div 30 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ для речной и $\rho = 1 \div 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ для морской воды. Поэтому находящиеся на плаву суда хорошо «заземлены».

Возвышающиеся металлические части — мачты и краны — обычно имеют хорошее электрическое соединение с корпусом через остов судна. Бимсы и ребра жесткости, на которых крепится настил палуб, обеспечивают выравнивание распределения потенциалов по палубам при ударе молнии в возвышающиеся части судна, чем обеспечивается безопасность пассажиров и команды (см. § 7.4 и 7.10). Электрические сети, а также цепи связи прокладываются в трубах или кабелями с металлической оболочкой. Трубы и оболочки кабелей на уровне каждой из палуб электрически присоединяются к их металлическому основанию. Аппаратура должна иметь экранирующие кожухи, присоединенные к остову судна.

Примером наиболее распространенных деревянных судов может служить парусная яхта. Для молниезащиты ее мачта снабжается молниеприемником и токоотводом. В качестве «заземлителя», к которому присоединяется токоотвод, служит металлический лист, укрепляемый на борту яхты ниже ватерлинии. При прокладке токоотвода следует руководствоваться рекомендациями § 7.3 и 7.5.

Значительное расширение сети авиалиний, большая плотность воздушного движения вблизи крупных аэропортов во многих случаях не позволяют, как это было ранее принято, об-

ходить грозовой район. Это обстоятельство привело к существенному росту числа поражений самолетов молнией.

Известно, что при внесении металлического шара в равномерное электрическое поле вследствие разделения в нем зарядов максимальная напряженность на поверхности шара втрое превышает напряженность внешнего равномерного поля. Подобный эффект возникает и при вхождении самолета в электрическое поле грозowych облаков. Но поскольку самолет имеет большие размеры и сложную форму с многочисленными участками поверхности, имеющими малый радиус кривизны, напряженность электрического поля на этих участках в десятки и сотни раз превышает напряженность поля грозового облака и может достигать критического значения, при котором возможна ионизация воздуха. В результате этого с поверхности самолета начинают развиваться разнополярно заряженные каналы разряда: один по направлению к облаку, а другой по направлению к земле или же в направлении двух скоплений разноименных зарядов в облаках. Развитие лидеров с поверхности самолета инициирует удар молнии между облаком и землей или между облаками. При этом самолет оказывается включенным в канал разряда и по нему проходит ток молнии.

Расчеты показывают (ЭНИН), что самолеты, имеющие максимальные линейные размеры 30–50 м, могут инициировать молнию, если напряженность поля грозового облака составляет примерно 0,5 кВ/см. Наблюдения показывают, что появление электрических полей в атмосфере с такой напряженностью достаточно вероятно не только при грозowych облаках, но даже и при кучевой облачности. Последнее подтверждается случаями инициирования молнии космическим кораблем «Аполло-12» (1969 г.) и ракетой-носителем «Атлас-Кентавр-67» (1987 г.) в отсутствие грозовой обстановки [7.12].

Трассы самолетов проходят над территориями с различной интенсивностью грозовой деятельности, поэтому поражаемость их лучше всего оценивать по данным эксплуатационной статистики. На европейских и североамериканских трассах один удар молнии в самолет приходится в среднем на 2100 летных часов при межконтинентальных полетах – на 4500 летных часов. Пр

полетах в пределах территории бывшего СССР число ударов молнии в самолет за год $n_{уд}$ можно оценить по эмпирической формуле [7.13]

$$n_{уд} = nL^2K \cdot 10^{-6}, \quad (7.58)$$

где n – общее число ударов молнии облако-земля и облако-облако в пределах 100 км² территории за год, определяемое по (1.4) с учетом (1.2) и (1.3); L – наибольший линейный размер самолета, м; K – коэффициент использования самолета, равный отношению летного времени в году к общей продолжительности года в часах.

Оценки по (7.58) дают значения $n_{уд} = 0,1 \div 1$ ударов/год, что не противоречит приведенным выше статистическим данным. Естественно, более высокие значения $n_{уд}$ относятся к самолетам больших размеров.

Точки удара («входа» и «выхода» молнии) распределяются по поверхности самолета неравномерно. Для гражданских самолетов современных форм характерно такое распределение: 33% – в носовой обтекатель, 10% – в фюзеляж, 32% – в законцовки и кромки крыла, 10% – в киль и 15% – в горизонтальный стабилизатор (рис. 7.28).

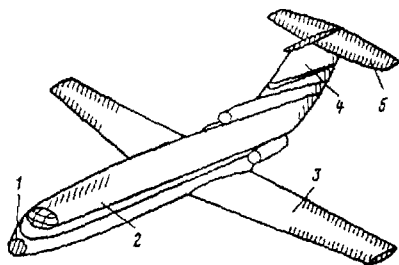


Рис. 7.28. Вероятные места поражения самолета молнией (отмечены штрихами): 1 – носовой обтекатель; 2 – фюзеляж; 3 – крыло; 4 – киль; 5 – горизонтальный стабилизатор

Под действием потока воздуха опорная точка канала молнии смещается по поверхности самолета в направлении, противоположном его движению. При многокомпонентных ударах молнии и скоростях современных самолетов следы смещения канала, например, на фюзеляже могут наблюдаться на протяжении многих метров. На крыле канал разряда смещается с передней кромки на заднюю. Таким образом, воздействию

канала молнии подвергаются не только повреждению, а ток молнии проходит от точки «входа» до точки «выхода» по обшивке самолета.

Рассмотрим предполагаемые авиационные происшествия, возникающие при поражении самолета молнией, и методы их предотвращения.

1. Повреждение радионавигационного оборудования в результате удара молнии в антенны, закрытые носовым диэлектрическим обтекателем, а также в изолированные законцовки крыла или участки киля, используемые как антенны. При ударе в носовые антенны в обтекателе образуется отверстие, которое увеличивается в размерах скоростным напором воздуха и обтекатель может быть полностью разрушен. Последнее может повлиять на аэродинамические свойства самолета.

Защита обтекателя от разрушения и защита носовых антенн осуществляется с помощью молниеприемников, расположенных на поверхности обтекателя и электрически соединенных с металлическим фюзеляжем самолета [5.12]. Молниеприемники могут быть полосовые (рис. 7.29) и секционированные. Применяются также полупроводящие покрытия, формирующие путь смещения канала разряда на корпус самолета.

Другие антенны и соответственно оборудование защищаются искровыми разрядниками, включаемыми между антенной и корпусом самолета.

2. По плоскости крыла с находящимися на нем крышками топливных баков может смещаться канал разряда. В этом случае определяющее значение имеет толщина крышек. Она должна быть достаточной для того, чтобы исключить возможность сквозного проплавления, а также возможность нагрева крышки выше температуры воспламенения паров находящегося в баке горючего. Могут применяться также двойные толкостенные крышки, разделенные воздушной полостью.

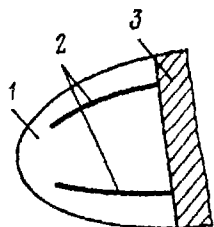


Рис. 7.29. Защита носового диэлектрического обтекателя самолета: 1 – обтекатель; 2 – полосовые молниеприемники; 3 – фюзеляж

При прохождении тока молнии через обшивку крыла может возникнуть опасное искрение в уплотнении между топливным баком и его крышкой. Такое искрение исключается с помощью конструктивных мер, обеспечивающих надежное электрическое соединение крышки с баком.

3. Вследствие малого удельного веса и высокой механической прочности в авиастроении все более широкое применение находят полимерные композиционные материалы (ПКМ), например, на основе борных или угольных волокон с эпоксидной матрицей. Из ПКМ выполняются полностью или частично створки шасси, кессон-баки крыла, горизонтальный стабилизатор, киль и др.

В отличие от диэлектрических материалов ПКМ обладают значительно меньшим удельным сопротивлением — порядка 10^{-5} Ом·м. Ток молнии, проходя по элементам конструкции из ПКМ, может нагревать их до температуры, при которой начнется деструкция связующего материала. Образующиеся газы не могут за короткое время диффундировать сквозь плотные слои материала, поэтому внутри него повышается давление, превышающее прочность сцепления отдельных слоев композита. В результате элементы конструкции из ПКМ могут расслаиваться и деформироваться. В случае контакта канала молнии с ПКМ возникает эрозия поверхности или прожог с расслоением материала.

Средством защиты элементов из ПКМ является тот или иной вид металлизации их поверхности, а также введение металлических структур в состав композиции материала. При этом в первом случае стимулируется разряд вдоль поверхности ПКМ, а во втором случае уменьшается удельное сопротивление материала. Оба пути приводят к уменьшению объемного энерговыделения и повышению молниестойкости элемента конструкции.

4. При прохождении тока молнии по самолету внутри него возникает быстро изменяющееся электромагнитное поле, вследствие чего в бортовых цепях возникают наведенные напряжения и токи, которые представляют опасность для оборудования, выполненного на микроэлектронной элементной базе. Защита такого оборудования рассмотрена в § 7.9.

Отметим, что каждый тип самолета подвергается подробным испытаниям на молниестойкость (см. гл. 9), на основании которых получает сертификат, свидетельствующий о соответствии его международным нормам защиты летательных аппаратов от молнии.

К транспортным средствам относятся также магистральные трубопроводы (газопроводы, нефтепроводы, водопроводы и др.). Трубопроводы состоят из отдельных секций, электрически изолированных друг от друга. Каждая секция снабжена системой катодной защиты от коррозии. Возникновение импульсов грозовых перенапряжений в линии электропитания или в линии анодного заземления может привести к выходу из строя станции катодной защиты и в конечном итоге – участка трубопровода, который она защищала.

Защита станции катодной защиты от грозовых перенапряжений осуществляется с помощью вентильных разрядников и варисторов [7.14]. Схема защиты показана на рис. 7.30. Дроссели, обладающие большим сопротивлением для токов молнии, способствуют надежному срабатыванию вентильных разрядников в анодной и катодной цепях.

При ударе молнии в трубопровод, даже расположенный ниже поверхности земли, по нему распространяются импульсы тока и напряжения. Как показывают расчеты (В.Я. Киселев, МЭИ), на расстоянии 1 км от точки удара напряжение снижает-

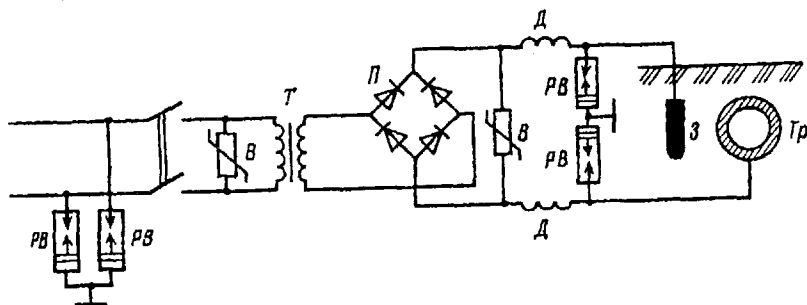


Рис. 7.30. Схемы защиты станции катодной защиты от грозовых перенапряжений: *T* – понижающий трансформатор; *П* – преобразователь; *Tr* – трубопровод; *З* – заземлитель; *Д* – дроссель; *В* – варистор; *РВ* – вентильный разрядник

ся в 5–10 раз, однако может составлять десятки киловольт. Для защиты изоляции между секциями трубопровода устанавливаются искровые разрядники взрывозащищенного исполнения.

7.9. Защита электронного оборудования

Электронные устройства работают при напряжениях и токах, измеряемых соответственно в милливольтгах и микроамперах. Разница между величинами, характеризующими молнию и работу электронных устройств, составляет 9 порядков. Если испытательное напряжение изоляции обычной электропроводки принято равным 2 кВ при частоте 50 Гц, то для электронного оборудования допустимые напряжения существенно ниже. Представление о работоспособности электронных приборов дает разрушающая энергия. Если для резистора с проволочной намоткой значение ее при коротких импульсах (меньше 1 мкс) составляет 1 Дж и больше, то для элементов микроэлектроники разрушающая энергия составляет: для интегральных схем – 10^{-3} –1 мДж, транзисторов – 10^{-2} –1 мДж, полупроводниковых стабилитронов – 10^{-1} – 10^2 мДж и т.д. Поэтому защита электронного оборудования от электромагнитного влияния представляет собой сложную задачу.

Одним из основных средств молниезащиты электронных устройств является полное электромагнитное экранирование. При большой насыщенности электронным оборудованием экран (клетка Фарадея) может быть сделан для всего здания.

При прохождении тока по экрану в нем возникает падение напряжения, которое может быть опасным для электронного оборудования. Поэтому важной защитной мерой является выравнивание потенциалов, создание эквипотенциальных поверхностей, в результате чего исключаются токи в экранах. Однако разности потенциалов легко устраняются только при постоянном токе. При импульсных токах их можно уменьшить, но полностью исключить невозможно из-за разных индуктивных сопротивлений токопроводящих путей.

Если здание имеет стальной или железобетонный каркас, не пользующийся в качестве токоотвода, то для оценки электромагнитной обстановки в помещениях необходимо знать распределение тока молнии при прохождении его по каркасу здания. Для определения путей и характеристик растекания тока молнии по зданию разработана техника моделирования этого процесса [7.15].

Рост оснащенности авиационной техники электронными устройствами, повышение их роли в жизнеобеспечении летательного аппарата, а также все более широкое использование композиционных материалов приводит к возрастанию опасности воздействия электромагнитного поля молнии на бортовое электронное оборудование.

Для оценки электромагнитной обстановки внутри самолета и наведенных импульсов напряжения используется комплексный подход, сочетающий натурные и модельные испытания самолета с расчетными методами [7.16].

Расчеты позволяют, оценив электромагнитную обстановку, на стадии проектирования выбрать оборудование, места его размещения и меры защиты. При проведении испытаний расчеты помогают выбрать наиболее опасные пути растекания импульсного тока и контрольные точки для измерения электромагнитных наводок (см. также гл. 9).

Если уровень наводок в цепях электронных систем (как в зданиях, так и в летательных аппаратах) превышает допустимые для оборудования значения, то применяются защитные приборы, основные характеристики которых приведены в табл. 7.6 [7.17].

Защитные приборы могут применяться в различных комбинациях. На рис. 7.31 показана трехступенчатая схема защиты электронного оборудования.

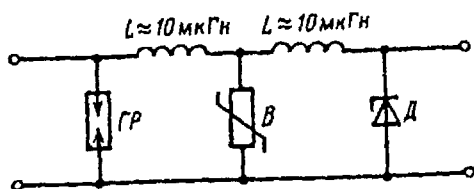


Рис. 7.31. Схема защиты электронного оборудования: ГР – газонаполненный разрядник; В – металлооксидный варистор; Д – полупроводниковый диод

Характеристики защитных приборов

Защитный прибор	Защитный уровень, В	Максимальный импульсный ток, кА	Время срабатывания, нс	Емкость, пФ	Ток утечки
Газонаполненный разрядник	65-12 000	60	Зависит от крутизны импульса	1-7	15 нА
Металлооксидный варистор	20-2000	25	25	40-15 000	0,2 нА
Полупроводниковый диод	3-200	0,2-1	0,01-25	8-12 000	100 нА - 5 мкА

7.10. Персональная защита от молнии

Здания и различного рода сооружения редко поражаются молнией, однако каждый удар ее в незащищенное здание может привести к значительным убыткам и представляет собой серьезную опасность для жизни людей. Особенно тяжелые последствия вызывают удары молнии во взрывоопасные и огнеопасные здания.

Ток молнии не представляет опасности для металлических проводников достаточного сечения или металлических частей здания, имеющих хорошее соединение между собой и с землей. Однако поражение молнией объектов, не имеющих электрического соединения с землей, или объектов из непроводящего материала (кирпича, бетона, камня, дерева и т.п.), вызывает пробой от точки удара молнии к земле. Образование канала разряда в толще непроводящего материала, сопровождающееся созданием высокого давления и температуры, приводит к разрушению элементов объекта, по которым проходит ток молнии. Известны многочисленные случаи повреждения по этой причине кирпичных дымовых труб, деревянных домов, деревьев, каменных башен и т.д. Соприкосновение канала молнии, имеющего

с весьма высокую температуру, с легковоспламеняющимися и горючими материалами или взрывоопасными смесями газов, паров и пыли вызывает пожар или взрыв.

Разряд внутри незащищенного здания опасен для жизни находящихся в нем людей. Разряд может произойти через тело человека, при этом ток разряда может оказаться смертельным.

Удары молнии в воздушные провода (электрические, телефонные, радиотрансляционные и др.) вызывают на этих проводах появление высоких потенциалов. Высокие потенциалы по проводам проникают в здания, вызывая разряды с электропроводки, штепсельных розеток, выключателей, телефонных аппаратов, репродукторов на землю или на заземленные элементы здания (водопроводные, отопительные или канализационные трубы). Такие разряды представляют серьезную опасность для людей. Большинство поражений людей связано с тем, что высокие потенциалы проникают в здания по воздушным проводам. Поэтому во время грозы опасно прикасаться к электропроводке, водопроводным кранам, пользоваться телефоном, если к домам и производственным постройкам подходят воздушные линии электроснабжения и связи.

В промышленные сооружения высокие потенциалы помимо воздушных проводов могут проникнуть по эстакадам, рельсовым путям и другим протяженным металлическим коммуникациям. Для взрывоопасных и пожароопасных сооружений представляет угрозу также проникновение потенциалов по подземным трубопроводам и кабелям, поскольку даже маломощные искры в таких сооружениях способны вызвать взрыв или пожар.

Гроза обычно сопровождается дождем. Застигнутые в открытой местности люди нередко стремятся укрыться от дождя под деревьями. Однако укрываться под деревьями, особенно высокими или отдельно стоящими, очень опасно. При ударе молнии в дерево возможен разряд с дерева на находящихся под ним людей. Поражение людей может быть вызвано и тем, что на поверхности земли в этом случае образуются высокие разности потенциалов. Ноги человека могут оказаться под некоторой разностью потенциалов (шаговым напряжением), и он будет поражен проходящим через его тело током. В открытой местности лучше

всего находиться на расстоянии 8–10 м от отдельно стоящих деревьев – в этом случае дерево будет служить защитой от молнии – или же укрываться в лощинах у подножья холмов.

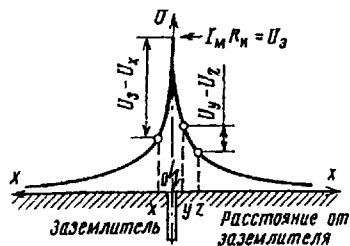


Рис. 7.32. Измененис потенциала поверхности земли вблизи заземлителя при прохождении через него тока молнии

Сопротивление «самозаземления» молнии, т.е. переходное сопротивление между каналом молнии и землей, в средней полосе оценивается значением 30 Ом. В общем случае, когда имеется заземлитель с импульсным сопротивлением R_n , непосредственно на псм возникает наиболее высокий потенциал $U_3 = I_M R_n$. По мере удаления от заземлителя потенциал на поверхности земли снижается (рис. 7.32), причем вблизи заземлителя очень резко.

Резкое падение потенциала вблизи заземлителя опасно для людей, оказавшихся поблизости от него во время удара молнии. Если человек стоит на некотором расстоянии x от заземлителя и касается токоотвода, то он оказывается под разностью потенциалов $U_3 - U_x$, называемой напряжением прикосновения. Человек подвергается опасности, если он даже и не касается токоотвода, но ноги его находятся на разных расстояниях y и z от заземлителя (во время ходьбы). В этом случае ноги человека попадают под разность потенциалов $U_y - U_z$, которая называется шаговым напряжением.

Напряжения прикосновения и шаговое зависят от сопротивления заземления и могут быть снижены до безопасных значений только при очень малом сопротивлении заземления, которое трудно сделать. Поэтому не рекомендуется пребывание людей во время грозы в непосредственной близости (до 5 м) от заземлителя, в частности, как уже отмечалось, не следует укрываться под отдельно стоящими высокими деревьями. В целях безопасности людей заземлители должны располагаться возможно дальше (на расстоянии больше 5 м) от проезжих дорог и тротуаров или же ограждаться. Токоотводы должны быть удалены от входов в здание.

Уменьшение напряжений прикосновения и шагового может быть достигнуто с помощью применения специальных типов заземлителей — так называемых заземляющих контуров (см. § 7.4). Заземляющий контур состоит из забитых в землю стержней, соединенных полосой, или же только из полос, которые располагаются по контуру защищаемого объекта, образуя многоугольник. Если расстояние между противоположными сторонами контура заземления велико, то внутри контура дополнительно помещаются на расстоянии порядка 2 м друг от друга выравнивающие полосы, которые электрически соединяются с контуром. Примерное распределение потенциалов по поверхности земли внутри контура без выравнивающих полос представлено на рис. 7.33 кривой А. Кривая Б дает распределение потенциалов при применении выравнивающих полос. В последнем случае внутри контура шаговое напряжение и напряжение прикосновения существенно снижаются.

Для уменьшения шагового напряжения с внешней стороны контура применяется укладка на постепенно увеличивающейся глубине дополнительных полос, которые соединяются с контуром заземления. Благодаря этим полосам уменьшение потенциала земли в направлении от контура идет более полого (рис. 7.34) и шаговое напряжение снижается, однако зона высоких потенциалов земли при этом возрастает.

Средством первой помощи людям, пораженным молнией, является искусственное дыхание.

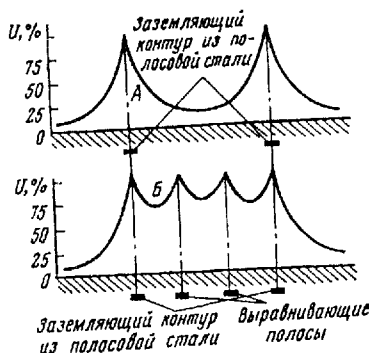


Рис. 7.33. Распределение потенциалов на поверхности земли при стекании с заземляющего контура тока

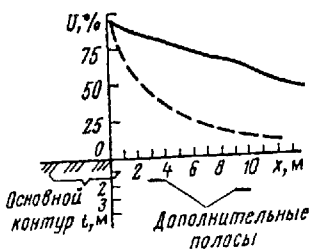


Рис. 7.34. Снижение шагового напряжения за пределами контура заземления с помощью дополнительных полос (штриховая линия — без полос)