

# Перенапряжения и защита от перенапряжений

## ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

### МОЛНИЯ КАК ИСТОЧНИК ГРОЗОВЫХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

#### 12-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Молния представляет собой разновидность газового разряда при очень большой длине искры. Общая длина канала молнии достигает нескольких километров, причем значительная часть этого канала находится внутри грозового облака. Из-за того, что в облаке образуется несколько изолированных друг от друга скоплений зарядов (в нижней части облака скапливаются преимущественно заряды отрицательной полярности), молния обычно бывает многократной, т. е. состоит из нескольких единичных разрядов, развивающихся по одному и тому же пути, причем каждый разряд, так же как и разряд, получаемый в лабораторных условиях, начинается лидерным и завершается обратным (главным) разрядом. Скорость опускания лидера первого единичного разряда примерно равна  $1,5 \cdot 10^5$  м/с, скорости лидеров последующих разрядов достигают  $2 \cdot 10^6$  м/с, а скорость обратного разряда изменяется в пределах  $1,5 \cdot 10^7$ — $1,5 \cdot 10^8$  м/с, т. е. от 0,05 до 0,5 скорости света.

Канал лидера, как и канал всякого стримера, заполнен плазмой, следовательно, обладает определенной проводимостью. Верхним концом лидерный канал соединен с одним из заряженных центров в облаке, поэтому часть зарядов этого центра стекает в канал лидера. Распределение заряда в канале должно быть неравномерным, возрастая к его концу. Однако некоторые косвенные измерения позволяют предположить, что абсолютная величина заряда на головке лидера невелика и в первом приближении канал можно считать равномерно заряженным с линейной плотностью зарядов  $\sigma$  (рис. 12-1, а). Общий заряд в канале лидера в этом случае равен  $Q = \sigma l$ , где  $l$  — длина канала, причем обычно значение его составляет около 10% значения заряда, стекающего в землю во время единичного разряда молнии. В 70—80% всех случаев этот заряд имеет отрицательную полярность.

По мере продвижения канала лидера под действием создаваемого им электрического поля в земле происходит смещение зарядов, причем заряды, противоположные по знаку зарядам лидера (обычно это положительные заряды), стремятся расположиться как можно ближе к головке лидерного канала. В случае однородного грунта эти заряды скапливаются непосредственно под лидерным каналом. Если грунт неоднородный и основная его часть обладает большим удельным сопротивлением, заряды сосредоточиваются в участках с повышенной проводимостью (реки, грунтовые воды). При наличии заземленных возвышающихся объектов (молниеотводы, дымовые

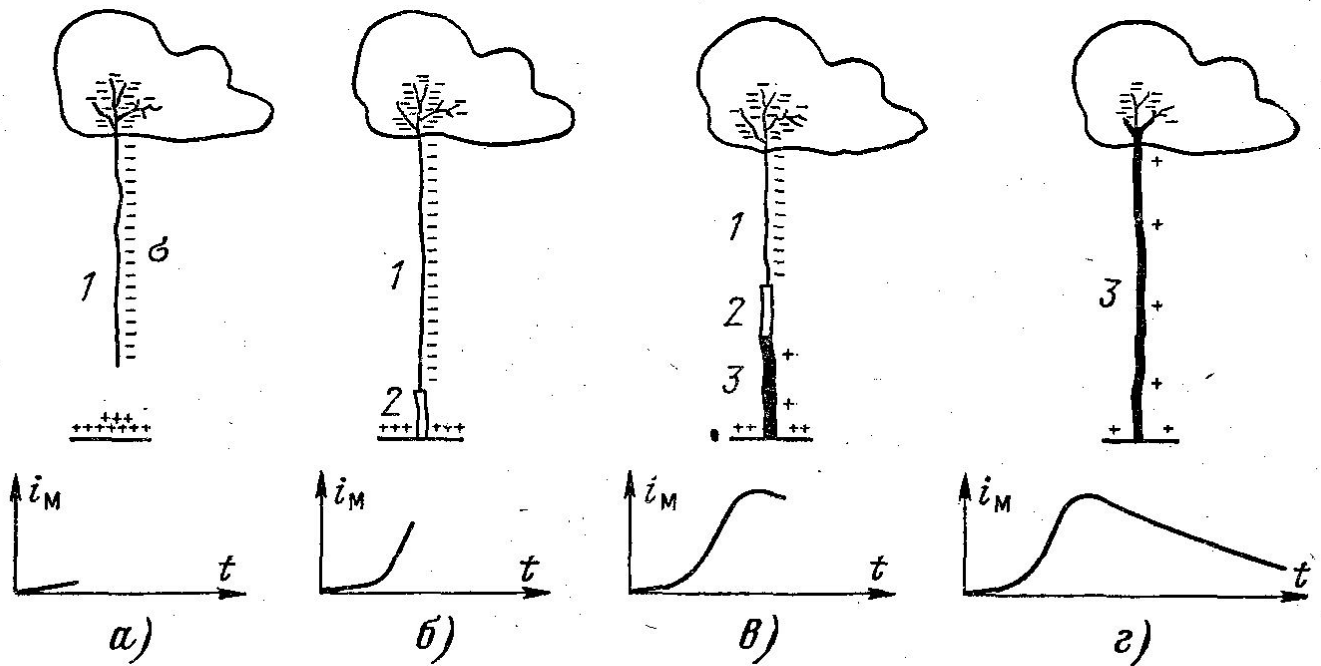


Рис. 12-1. Отдельные стадии развития обратного разряда и изменение во времени тока молнии.

*a* — последняя стадия лидерного разряда; *б* — возникновение зоны интенсивной ионизации вблизи поверхности земли; *в* — промежуточная стадия развития обратного разряда; *г* — заключительная стадия развития обратного разряда; 1 — канал лидера; 2 — зона перестройки канала; 3 — канал обратного разряда.

трубы, высокие здания, смоченные дождем деревья) заряды стягиваются к вершине объекта, создавая там значительную напряженность поля.

На первых стадиях развития лидерного канала напряженность электрического поля на его головке определяется собственными зарядами лидера и находящимися под облаком скоплениями объемных зарядов. Траектория движения лидера не связана с земными объектами. По мере опускания лидера все большее влияние начинают оказывать скопления зарядов на земле и возвышающихся объектах. Начиная с определенной высоты головки лидера (*высота ориентировки*), напряженность поля по одному из направлений оказывается наибольшей, и происходит ориентирование лидера на один из наземных объектов. Естественно, что при этом преимущественно поражаются возвышающиеся объекты и участки земли с повышенной проводимостью (*избирательная поражаемость*).

С очень высоких объектов навстречу лидеру развиваются встречные лидеры, наличие которых способствует ориентированию молнии на данный объект.

После того, как канал лидера достигнет земли или встречного лидера, начинается обратный разряд, во время которого канал лидера приобретает потенциал, практически равный потенциалу земли. На головке развивающегося вверх обратного разряда имеется область повышенной напряженности электрического поля, под действием которой происходит перестройка канала (рис. 12-1, б), сопровождающаяся увеличением плотности зарядов плазмы от  $10^{13}$ — $10^{14}$  до  $10^{19}$ — $10^{16}$   $1/\text{м}^3$ , благодаря чему проводимость канала увеличивается по крайней мере в 100 раз. Во время развития обратного разряда (рис. 12-1, в, г) через место удара проходит ток  $i_m = \sigma v$ , где  $v$  — скорость обратного разряда.

Процесс, происходящий при переходе лидерного разряда в обратный разряд, во многом аналогичен процессу замыкания на землю вертикального заряженного провода (рис. 12-2). Если заряженный провод замыкается на землю через сопротивление  $r$ , то ток в месте заземления равен:

$$i = \sigma v \frac{z}{r+z}, \quad (12-1)$$

где  $z$  — волновое сопротивление провода.

Таким образом, и при разряде молнии ток в месте удара будет равен  $\sigma v$  только при сопротивлении заземления, равном нулю. При сопротивлениях заземления, отличных от нуля, ток в месте удара уменьшается. Количественно определить это уменьшение довольно трудно, так как волновое сопротивление канала молнии можно оценить лишь грубо приближенно. Имеются основания предполагать, что волновое сопротивление канала молнии уменьшается при увеличении тока, причем среднее значение примерно равно 200—300 Ом. В таком случае при изменении сопротивления заземления объекта от 0 до 30 Ом ток в объекте изменяется всего на 10%. Такие объекты в дальнейшем мы будем называть хорошо заземленными и считать, что через них проходит полный ток молнии  $i_m = \sigma v$ .

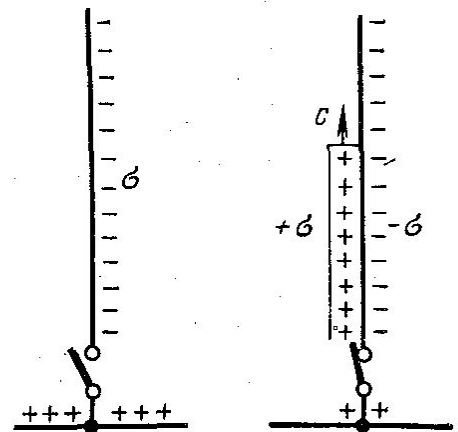


Рис. 12-2. Замыкание на землю вертикального заряженного провода (аналогия процессу перехода лидерного разряда молнии в обратный разряд).

## 12-2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ МОЛНИИ. ИНТЕНСИВНОСТЬ ГРОЗОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Основной количественной характеристикой молнии является ток, протекающий через пораженный объект, который характеризуется максимальным значением  $I_m$ , средней крутизной фронта

$a = \left(\frac{di_m}{dt}\right)_{\text{ср}}$  и длительностью импульса  $\tau_{\text{и}}$ , которая равна времени уменьшения тока до половины максимального значения.

В настоящее время наибольшее количество данных имеется по максимальным значениям тока молнии, измерение которой осуществляется простейшими измерительными приборами — магнитореги-

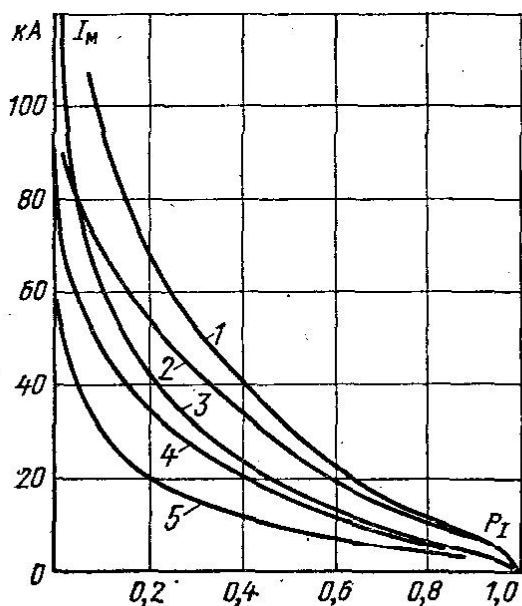


Рис. 12-3. Кривые вероятности токов молнии по рекомендациям различных авторов.

1 — по данным С. Шпора (Польша); 2 — по данным Льюиса и Фауста (США); 3 — по нормам, принятым в СССР; 4 — по рекомендациям Американского института инженеров-электриков; 5 — по данным измерений на американском небоскребе.

дуктивную катушку, можно измерить крутизну тока молнии с помощью магниторегистратора, помещенного внутри катушки.

Измерения показали, что токи молнии изменяются в широких пределах от нескольких килоампер до сотен килоампер, поэтому результаты измерения представляются в виде кривых вероятностей (функций распределения) токов молнии, на которых по оси абсцисс откладывается вероятность появления токов молнии с максимальным значением, превышающим значение, указываемое ординатой.

На рис. 12-3 приведены кривые вероятности, полученные разными исследователями в различных странах мира. Все эти кривые имеют сходный характер, но довольно сильно отличаются друг от друга. Эти отличия определяются не столько климатическими условиями районов, где производились измерения токов молнии, сколько применявшейся методикой измерений и обработки опытных данных. В Советском Союзе при расчетах грозозащиты используется кривая 3, которой приблизительно соответствует экспоненциальный

прессованных в пластмассу. Магнитореги-страторы укрепляются вблизи возвышающихся объектов (молниеотводы, опоры линий передач) и располагаются вдоль силовых линий магнитного поля, которое возникает при прохождении тока молнии через объект. Так как для изготовления регистраторов применяются материалы, обладающие большой коэрцитивной силой, они сохраняют большую остаточную намагниченность. Измеряя эту намагниченность, можно с помощью градуировочных кривых определить максимальное значение намагничивающего тока. Измерения магнитореги-страторами не обеспечивают большой точности, однако этот недостаток частично компенсируется огромным количеством измерений, которые к настоящему времени исчисляются десятками тысяч.

Располагая вблизи от поражаемого объекта рамку, замкнутую на ин-

закон распределения вероятностей:

$$\left. \begin{array}{l} P_I = e^{-I_m/26} = 10^{-I_m/60} \\ \text{или} \\ \lg P_I = -I_m/60, \end{array} \right\} \quad (12-2)$$

где  $I_m$  — максимальное значение тока молнии, кА;  $P_I$  — вероятность того, что максимальное значение тока молнии больше  $I_m$ .

Для горных местностей ординаты кривой  $\mathcal{Z}$  уменьшаются в 2 раза, так как при малых расстояниях от земли до облаков молния возникает при меньшей плотности зарядов в скоплениях, т. е. вероятность больших токов уменьшается.

Значительно большие трудности представляет экспериментальное определение крутизны и длительности импульса тока молнии, поэтому количество экспериментальных данных по этим параметрам относительно невелико.

Длительность импульса тока молнии в основном определяется временем распространения обратного разряда от земли до облака и в связи с этим изменяется в относительно узких пределах от 20 до 80—100 мкс. Средняя длительность импульса тока молнии близка к 50 мкс, что и определило выбор стандартного импульса (см. § 2-9).

Крутизна тока молнии на фронте изменяется в столь же широких пределах, что и амплитуда тока молнии, поэтому результаты измерения крутизны оформляются в виде кривых вероятности. Полученные экспериментально кривые также близки к экспоненциальному закону распределения. Наибольшее распространение получила следующая эмпирическая формула:

$$\left. \begin{array}{l} P_a = e^{-a/15,7} = 10^{-a/36} \\ \text{или} \\ \lg P_a = -a/36, \end{array} \right\} \quad (12-3)$$

где  $a$  — крутизна тока молнии, кА/мкс.

Для практических целей часто бывает недостаточно знать по отдельности вероятности крутизны и максимальных значений тока молнии, необходимо иметь сведения о связи этих величин друг с другом. Такие сведения могут быть получены только из одновременных регистраций этих двух параметров, которых к настоящему времени имеется всего несколько сотен. Эти немногочисленные регистрации показывают, что крутизна имеет тенденцию возрастать при увеличении максимального значения тока молнии, однако эта тенденция довольно слабо выражена. В дальнейших расчетах (гл. 17) эти величины в первом приближении принимаются независимыми.

Заряд, стекающий в землю во время многократной молнии, изменяется в пределах от долей кулона до 100 Кл и более. Среднее значение этого заряда близко к 20 Кл. Заряд, спускаемый в землю во время гроз, по-видимому, играет существенную роль в поддержании отрицательного заряда земли.

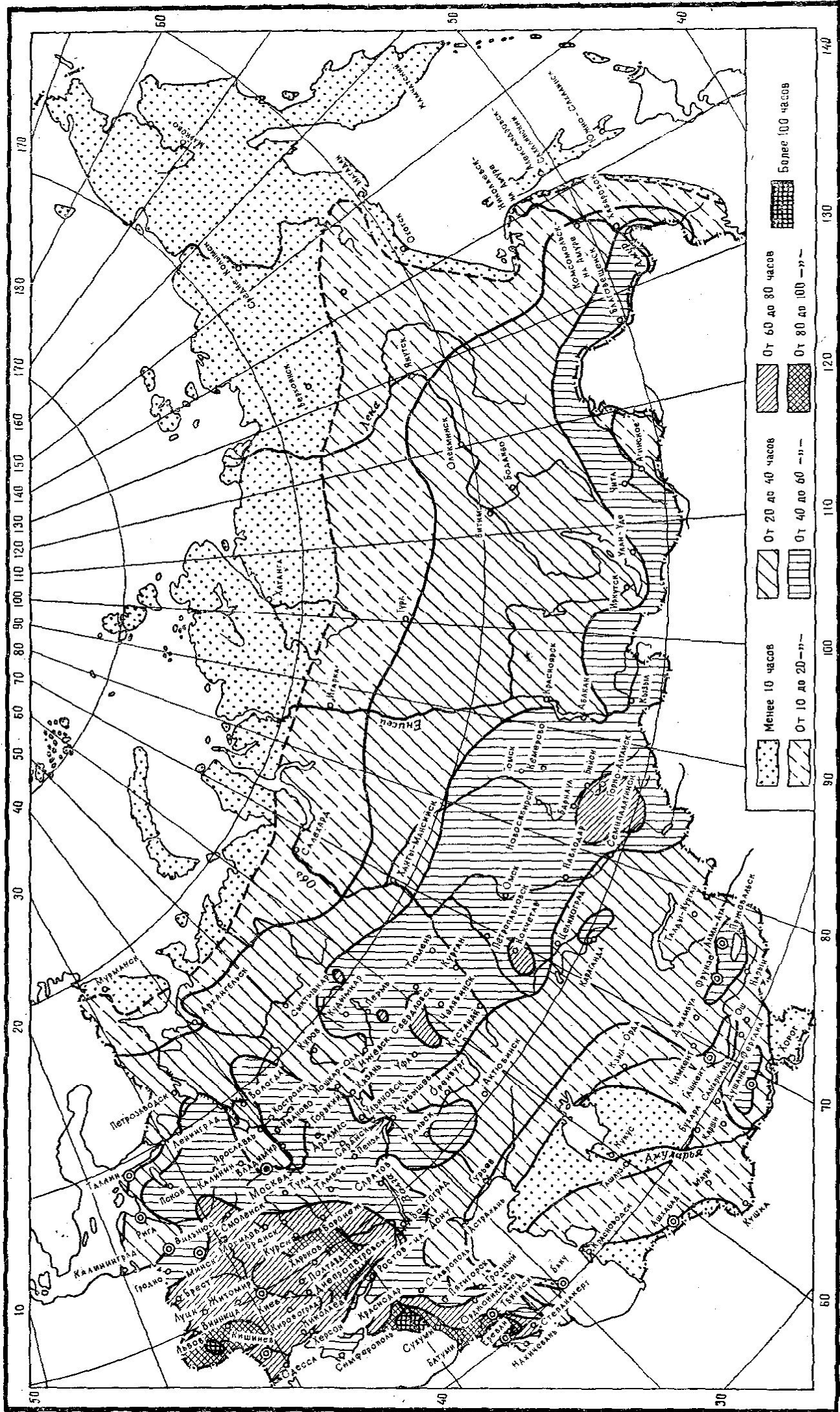


Рис. 12-4. Карта грозовой деятельности территории Советского Союза (среднегодовая продолжительность гроз в часах).