

Глава шестая

Электродинамические воздействия молнии на объекты

6.1. Электродинамическое воздействие импульсного магнитного поля, вызванного грозовым разрядом, на проводящие объекты

Ток главного разряда молнии, проходя по каналу или по проводникам (например, по поражаемому объекту или молниевотводу, заземлителю и т.д.), создает в окружающем пространстве мощное импульсное магнитное поле. Плотность энергии этого поля

$$W = \frac{BH}{2} = \mu_0 \frac{H^2}{2}, \quad (6.1)$$

где B и H – индукция и напряженность магнитного поля; μ_0 – магнитная постоянная.

Если в пространстве, где создано поле, имеется проводящий объект со стенкой или оболочкой, полностью или частично не пропускающей импульсное электромагнитное поле, то на стенку действует давление

$$p = \frac{\mu_0}{2} (H_1^2 - H_2^2), \quad (6.2)$$

где H_1 и H_2 – напряженности магнитного поля перед стенкой и за стенкой.

Для оценок эффектов проникновения поля через стенки служит глубина проникновения Δ . В случае плоской электромаг-

пешной волны

значение пропорционально квадрату напряженности магнитного поля, то представляет интерес проникновение поля за время, приблизительно равное времени нарастания тока главного разряда. Это означает, что круговая частота ω , входящая в (3.13), может быть определена по (3.14). Рассчитанные значения Δ для некоторых материалов приведены в § 3.2. Напомним, что для хорошо проводящих материалов глубина проникновения Δ составляет десятые доли миллиметра. При таких толщинах стенок объектов уже можно не считаться с проникновением поля.

Если объект находится на расстоянии x от оси провода с током молнии i , то напряженность магнитного поля определяется по закону полного тока:

$$H_1 = \frac{i}{2\pi x}. \quad (6.3)$$

При $H_1 > H_2$ можно записать

$$p \approx \frac{\mu_0 i^2}{8\pi^2 x^2}. \quad (6.4)$$

Зависимость давления p от расстояния x при $i=200$ кА приведена на рис. 6.1. Как видно из рисунка, давление может достигать больших значений, если объект расположен непосредственно вблизи провода с током молнии.

Отметим, что давление увеличивается в $\pi/2$ раз, если проводник с током изогнут в виде полуокружности, в центре которой помещен объект.

К сожалению, при рассмотрении воздействия импульсного магнитного поля тока молнии на объ-

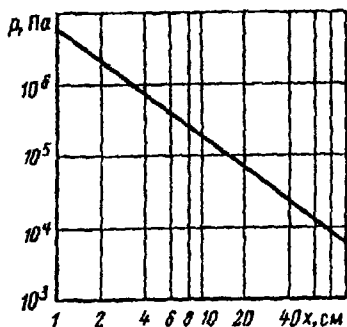


Рис. 6.1. Зависимость давления p от расстояния x между объектом и проводом с током молнии

ект приходится ограничиваться лишь определением давления, действующего на стенку. На вопрос, приведет ли это воздействие к деформации или разрушению стенки, ответить чрезвычайно трудно, так как для этого необходимо учесть размеры объекта, его размещение относительно провода с током, толщину стенки, свойства материала при кратковременном воздействии, нагрев стенки индуктированными в ней токами, форму импульса давления и многие другие факторы.

6.2. Электродинамические силы, действующие на проводники при прохождении по ним тока молнии

При рассмотрении данного вопроса проанализируем ряд простейших случаев.

Пусть ток молнии проходит по уединенному проводнику диаметром d . На поверхности проводника возникает магнитное поле напряженностью

$$H = \frac{i}{\pi d}. \quad (6.5)$$

Так как на оси проводника напряженность равна нулю, то на проводник действуют радиальные сжимающие силы. Давление, действующее нормально поверхности проводника:

$$p = \frac{\mu_0 i^2}{2\pi^2 d^2}. \quad (6.6)$$

Значение этого давления при токах молнии недостаточно для разрушения проводника. Однако если d составляет несколько миллиметров, то в сочетании с нагревом обжимающие электродинамические силы могут вызвать искривление проводника. При выполнении проводника в виде тонкостенной трубки электродинамические силы могут вызвать потерю устойчивости формы сечения трубки (ее схлопывание).

Рассмотрим удар молнии в плоский проводящий объект.

Как следует из гл. 4, плотность тока по опорной зоне канала может быть принята постоянной. Если ток в объекте равномерно распределяется в радиальных направлениях от места удара, то магнитное поле образуется лишь в полупространстве, где существует канал.

Давление магнитного поля в пределах опорной зоны

$$p = \frac{\mu_0 i^2}{8\pi^2 r_K^4} x^2, \quad (6.7)$$

где r_K – радиус опорной зоны; x – расстояние от оси канала.

Давление магнитного поля за пределами опорной зоны

$$p = \frac{\mu_0 i^2}{8\pi^2 x^2}. \quad (6.8)$$

Проинтегрировав выражение (6.7) по площади в пределах от 0 до r_K , а (6.8) – от r_K до координаты R , получим общую силу, действующую на круг радиусом R :

$$F = \frac{\mu_0 i^2}{16\pi} + \frac{\mu_0 i^2}{4\pi} \ln \frac{R}{r_K}. \quad (6.9)$$

Первый член в правой части уравнения (6.9) дает силу, действующую на объект в пределах опорной зоны. Как видно, эта сила не зависит от радиуса опорной зоны и при токе $i = 200$ кА равна 10^3 Н.

Зависимость силы F от радиуса круга R приведена на рис. 6.2, из которой видно, что с увеличением R до 10 см сила достигает порядка 10^4 Н.

Далее определим силу, действующую на проводник длиной l с током молнии i , расположенный на расстоянии h от проводящей

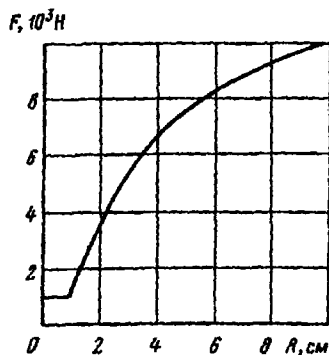


Рис. 6.2. Зависимость силы F , действующей на плоский объект, от радиуса круга R

плоскости. Считая провод тонким ($h \gg d$), можно рассчитать отталкивающую силу по формуле

$$F = \frac{\mu_0 i^2 l}{4\pi h}. \quad (6.10)$$

Если ток молнии или его часть протекает по разным параллельным длинным проводникам, то сила определяется по следующей формуле:

$$F = \frac{\mu_0 i_1 i_2 l}{2\pi a}, \quad (6.11)$$

где i_1 и i_2 – токи в проводниках, a – расстояние между проводниками.

При одинаковом направлении токов проводники притягиваются, при разных – отталкиваются. Первый случай соответствует разветвлению тока молнии, второй – протеканию тока молнии по зигзагообразно проложенному проводу, например, идущему от молниеприемника к заземляющему устройству.

Если ток молнии распределен по двум проводникам равномерно ($i_1 = i_2$; $i = i_1 + i_2$), то электродинамическое взаимодействие между проводниками максимально, а сила рассчитывается по формуле:

$$F = \frac{\mu_0 i^2 l}{8\pi a}. \quad (6.12)$$

При $i = 200$ кА, $l = 1$ м и $a = 0,1$ м получаем $F = 2 \cdot 10^4$ Н.

Сложнее определить электродинамические силы, действующие на изогнутые проводники с током молнии. При этом можно рекомендовать два подхода.

Первый основан на использовании формулы (6.11). При расчетах силы выделяется малый участок проводника s_1 , электродинамическое воздействие на который определяется. Затем рассчитывается индукция в месте расположения участка s_1 , создаваемая током, проходящим по остальной части проводника (заметим, что в этом случае $i_1 = i_2$). Затем путем интегрирования по s можно найти результирующую электродинамическую силу. Естественно, расчет как индукции, так и силы, в аналитическом виде возможен только в простейших случаях (для плоских контуров и

с математически заданными искривлениями), поэтому не требуют численные расчеты.

Следует отметить, что электродинамические силы всегда направлены так, чтобы при деформации контуров с токами или их взаимном перемещении под действием этих сил максимально возрастал объем, занятый полем. Это связано со стремлением системы к минимуму энергий. На использовании этого явления основан второй способ расчета электродинамических сил.

В общем случае электродинамическая сила в направлении x может быть выражена через индуктивность L :

$$F = \frac{i^2}{2} \frac{dL}{dx}. \quad (6.13)$$

Здесь dL/dx означает изменение индуктивности контура при перемещении участка контура (проводника) на расстояние dx .

При этом не обязательно рассматривать замкнутый контур. Можно ограничиться и отдельным участком контура и учесть изменение взаимной индуктивности M участка и контура при перемещении одного из них на dx , т.е. в формулу (6.13) вместо dL/dx можно подставить dM/dx .

Этот способ определения электродинамических сил может оказаться менее трудоемким, так как можно воспользоваться довольно презентативным справочным материалом по индуктивностям и взаимным индуктивностям проводников и контуров (см. например, [3.3]).

Более подробные сведения о расчетах электродинамических сил можно найти в специальной литературе, например в [6.2].

Следует отметить, что при сильно искривленных проводниках, например изогнутых под прямым и большим углом, электродинамические силы имеют тот же порядок величины, что и даваемый формулами (6.9), (6.11), (6.12). Приведенные оценки показывают, что силы могут достигать нескольких тонн на метр длины. В связи с этим возникают проблемы механической стойкости проводников с током молнии (спусков от молниеприемников, защитных шин, проводов заземлителей и т.д.). При решении этих проблем следует обратить особое внимание на те участки, где проводники располагаются вблизи токопроводящих поверхностей, расщепляются или изгибаются под большим углом.