

01;04

Использование математического описания развития лидерного канала молнии для выбора параметров модельных экспериментов и средств молниезащиты

© М.М. Резинкина, В.В. Князев, В.И. Кравченко

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт „Молния“
Национального технического университета „Харьковский политехнический институт“,
61013 Харьков, Украина
e-mail: marinar@kpi.kharkov.ua

(Поступило в Редакцию 6 декабря 2006 г.)

Проведено сравнение данных модельных экспериментов и расчетов, полученных в результате использования разработанной авторами статистической модели процессов продвижения лидерного канала молнии к земле и ориентировки его на заземленные объекты. Разработаны рекомендации по выбору условий проведения модельных экспериментов, обеспечивающих адекватное воспроизведение электрофизических процессов ориентировки лидерного канала молнии на наземные объекты. С помощью расчетов распределения вероятности поражения молниями отдельных зон защищаемой молниеотводом области предложены возможные пути усовершенствования средств защиты.

PACS: 52.80.Mg

Введение

Поскольку нахождение защитных областей средств молниезащиты в естественных условиях сопряжено с рядом сложностей, их, как правило, определяют с помощью модельных экспериментов. Такие эксперименты были описаны в ряде литературных публикаций (см., например, [1–3]). Именно модельные эксперименты легли в основу действующих в настоящее время в странах СНГ нормативных документов по молниезащите [4]. Однако при использовании результатов модельных экспериментов возникает вопрос об адекватности проводимого физического моделирования процессам, сопровождающим развитие молний в естественных условиях. Для анализа и сравнения данных процессов может быть использовано их математическое моделирование. Существующие математические модели процессов распространения лидера молнии, как правило, носят качественный характер (см., например, [5–7]).

Наиболее приближенными к практике представляются модели, основанные на электрогеометрическом методе, положенном в основу стандарта МЭК [8]. Как отмечается в [9], данный метод предполагает наличие функциональной зависимости между дистанцией поражения R и током молнии в первом компоненте I_1 : $R(I_1)$. Однако при этом не учитывается ряд особенностей, присущих процессу продвижения лидера молнии, в частности, влияние распределения электрического поля на направление и скорость продвижения лидера молнии. Функциональная зависимость $R(I_1)$, косвенно связывающая ток молнии и потенциал ее лидерного канала, существенно отличается от приведенной, например, в [10, с. 185]. Причем, как отмечалось в [10, с. 217], для экспериментального определения зависимости $R(I_1)$ нет фактических данных, а теоретические оценки различных авторов отличаются в несколько раз.

Данная статья посвящена использованию предложенной авторами методики расчета вероятности поражения молний защищаемых объектов с учетом возможности появления молний с предельными уровнями потенциалов [11] для разработки критериев подобия между молнией, возникающей в естественных условиях, и модельными экспериментами, а также выбора параметров эффективных средств молниезащиты. При этом используется статистическая модель развития лидерного канала молнии при ориентировке его на наземные объекты [12]. Суть данной модели заключается в том, что процесс ориентировки лидера молнии полагается начавшимся, когда его стримерная зона касается земли, заземленного объекта или молниеотвода. В данной модели полагается, что удар произойдет в зону, которую первой достигнет один из конкурирующих искровых каналов, развивающихся в стримерной зоне от лидерного канала молнии во всех возможных направлениях к заземленным участкам, подсоединение к которым обеспечит образование гальванически замкнутой цепи. При этом учитываются процессы нелинейного изменения сопротивления искры по мере роста лидерного канала, сопротивление растеканию заземления, а также зависимость ускорения движения головки лидера от напряженности электрического поля.

Расчет вероятности попадания высоковольтной искры в заземленные электроды

Как отмечалось в [9], в основу существующих нормативных документов, регламентирующих выбор параметров средств молниезащиты (см., например, [4]), положены обширные лабораторные исследования под

руководством А.А. Акопяна в 1930–1940 гг. [1]. В этих экспериментах H (высота расположения высоковольтного электрода, имитирующего лидерный канал молнии) и h (высота заземленной модели молниеотвода) выбирались неизменными, причем для стержневых молниеотводов $H/h = 20$. При проведении экспериментов на высоковольтный электрод подавались импульсы положительной полярности $1.5/1000 \mu\text{s}$, максимум которых был близок к 50%-ному пробивному напряжению. Для определения зон защиты варьировалось R — расстояние по горизонтали между высоковольтным и заземленным электродами. Было обнаружено, что при $R \leq 3.5h$ все разряды поражают молниеотвод, а при $R > 3.5h$ часть из них поражает землю на расстоянии от молниеотвода, большем $1.6h$. Данное расстояние принято радиусом защиты на уровне земли. Однако в данных экспериментах высота расположения высоковольтного электрода не менялась, значит не моделировалось наличие молний, несущих к земле различные потенциалы и имеющих различные радиусы стримерной зоны.

Разработанная модель, описывающая процессы движения лидерного канала высоковольтного разряда [11], была использована для численного описания модельных экспериментов по исследованию поражаемости искровым разрядом стержня на плоскости [13]. Условия эксперимента были следующими: высоковольтный стержневой электрод располагался на высоте $H = 5 \text{ m}$ от заземленной плоскости, на которой располагался второй стержневой электрод высотой h . Оси обоих электродов совпадали. Разрядное напряжение при проведении экспериментальных исследований равнялось $U_0 = 1.62 \text{ MV}$, использовались колебательные импульсы $4000/6500 \mu\text{s}$. В экспериментах фиксировалось место пробоя: он происходил в заземленный электрод или в определенное место на заземленной плоскости. Причем, как видно из приведенных результатов экспериментов [13], для заземленных электродов всех высот существует некоторая „мертвая зона“: круг радиусом R на поверхности заземленной плоскости с центром в точке ее пересечения с осью стержневых электродов, разряды в которую практически не попадают.

При проведении расчетов полагалось, что все разряды, которые должны попасть в данную зону, будут перехвачены заземленным стержневым электродом. Вероятность попадания разряда в заземленный электрод $\Phi(h)$ рассчитывалась как отношение количества разрядов в окружающую его зону $r < R$ к полному числу возможных разрядов. При расчетах полагалось, что максимальный разброс времен до пробоя отдельных искр в стримерной зоне лидера высоковольтного разряда не превышает ε . Результаты экспериментальных данных по величине вероятности попадания разряда в заземленный электрод $\Phi_{\text{exp}}(h)$ [13] и проведенных расчетов при соответствующих параметрах разрядной системы приведены ниже.

Как видно, экспериментальные и расчетные данные имеют хорошее совпадение, за исключением электродной системы с $h = 0.53 \text{ m}$. В этом случае для того

$h, \text{ m}$	$R, \text{ m}$	ε	$\Phi(h)$	$\Phi_{\text{exp}}(h)$ [13]
0.53	0.75	0.25	0.89	0.84
0.17	0.6	0.1	0.68	0.63
0.12	0.6	0.1	0.32	0.44
0.05	0.6	0.1	0.156	0.2

чтобы добиться совпадения с экспериментом, в расчетах пришлось использовать другую, нежели принятую в модели [11], величину максимального разброса времен до пробоя отдельных искр в стримерной зоне лидера высоковольтного разряда, при которой пробой еще полагается возможным, — $\varepsilon = 0.25$, а не 0.1. Результатом расчетов с $\varepsilon = 0.1$ является $\Phi(h) = 1$, т.е. 100%-ное попадание высоковольтного разряда в заземленный стержневой электрод. Этот результат кажется более достоверным, чем полученный в [13] $\Phi_{\text{exp}}(h) = 0.84$, исходя из следующего.

Согласно данным [13], для рассматриваемого эксперимента анализ электронно-оптических разверток разряда показал, что длина лидерного канала разряда к началу сквозной фазы составляет $L_1 = 2.5–3.7 \text{ m}$. В соответствии с литературными данными (см., например, [10]), эта величина должна равняться $L_1 = U_1/E_1 = 1.62[\text{MV}]/0.5[\text{MV/m}] = 3.34 \text{ m}$ (где U_1 — напряжение на лидере, примерно равное напряжению на высоковольтном электроде U_0 , при котором происходит пробой; E_1 — напряженность, при которой развивается лидер положительной полярности [10]). Таким образом, кратчайшие расстояния между головкой лидерного канала и вершиной заземленного электрода L_{el} , а также между головкой лидерного канала и заземленной плоскостью электрода L_0 к началу сквозной фазы составляют: $L_{\text{el}} = H - h - L_1 \sim 1.97–0.77$ и $L_0 = H - L_1 \sim 2.5–1.3 \text{ m}$ соответственно. Поскольку к началу сквозной фазы расстояние от головки лидерного канала до стержня превышает расстояние до плоскости не менее чем на 30%, пробой в плоскость не представляется вероятным.

На основе сравнения проведенных расчетов с известными экспериментальными данными по высоковольтному пробую длинных разрядных промежутков можно предложить правила, выполнение которых позволит увеличить степень подобия между модельными экспериментами и разрядом молнии.

1. Соблюдение геометрического подобия между молниеотводом и защищаемыми объектами в модельных и натуральных экспериментах; использование стержня в качестве высоковольтного электрода, имитирующего лидерный канал молнии (эти условия известны, см., например, [1], и приводятся здесь лишь для общности перечня).

2. Длина разрядного промежутка должна быть не меньше, чем длина стримерного канала высоковольтного разряда для условий проведения экспериментов. Если моделируется выбор молнией объекта поражения при так называемом „последнем ударе“ (last stroke), рас-

стояние между исследуемым объектом и высоковольтным электродом должно равняться радиусу стримерной зоны: $R_S = U/E_1$ (где U — напряжение на высоковольтном электроде, имитирующем лидерный канал молнии; E_1 — напряженность, при которой развивается лидер: $E_1 = 5 \text{ kV/cm}$ для лидеров положительной полярности и 10 для отрицательной). Это позволит исключить влияние на процесс ориентировки разрядной искры скорости ее продвижения, которая в условиях естественной молнии может быть на порядок больше, чем при лабораторных испытаниях [10], перейдя сразу к сквозной фазе развития пробоя, как в естественных условиях ориентировки лидерного канала молнии.

3. При проведении модельных экспериментов должно соблюдаться соотношение по сравнению с реальными средствами молниезащиты: $h_0/R_S|_{\text{real}} = h_0/R_S|_{\text{labor}}$, где h_0 — высота объекта; R_S — длина стримерной зоны.

4. Для того чтобы смоделировать наличие молний с различным потенциалом, имеющих различную длину стримерной зоны, а значит, и различную высоту ориентировки на наземные объекты, необходимо изменять расстояние между заземленным и высоковольтным электродами, увеличивая или уменьшая при этом величину подаваемого на промежуток напряжения. Изменение же высоты исследуемого заземленного электрода при неизменных расстоянии до высоковольтного электрода и напряжении на разрядном промежутке, используемое обычно в модельных экспериментах, лишь меняет соотношение между расстоянием, проходимым лидерным каналом искры до начала сквозной фазы, и длиной стримерной зоны.

5. Известно, что процесс ориентировки лидерного канала молнии на наземные объекты происходит следующим образом: имеющий высокий потенциал лидер опускается на определенную высоту над землей, а затем начинается продвижение стримеров в стримерной зоне. Таким образом, при рассмотрении процессов, сопровождающих „последний удар“, можно полагать, что потенциал лидерного канала молнии неизменен. Для того чтобы учесть это явление в модельных экспериментах, необходимо, чтобы напряжение на высоковольтном электроде, имитирующем лидерный канал, не претерпевало существенных изменений. Это, в свою очередь, означает, что длительность нарастания напряжения на высоковольтном электроде должна быть существенно меньше (желательно на порядок и более), чем длительность развития процесса пробоя в рассматриваемой разрядной системе, а полная длительность импульса испытательного напряжения должна превышать длительность процесса продвижения лидерного канала по разрядному промежутку.

6. Расстояние между высоковольтным электродом и заземленной плоскостью должно не более чем в 10 раз превышать высоту заземленного стержневого электрода, имитирующего молниеотвод или защищаемый объект, иначе вероятности попадания разряда в данный электрод или плоскость вблизи него становятся практически равными.

7. В том случае, когда проводятся лабораторные экспериментальные исследования по способности средств молниезащиты генерировать встречный лидерный канал, необходимо убедиться, что подаваемое на промежуток высокое напряжение достаточно для возникновения у заземленного электрода напряженности поля, необходимой для появления лидера. При этом расстояние между генерирующим восходящий лидер заземленным электродом и высоковольтным электродом должно быть больше, чем сумма предполагаемой длины лидера и радиуса его стримерной зоны.

Расчет вероятности попадания молнии в заземленные электроды

При определении вероятности поражения молнией будем использовать N — прогнозируемое для данной географической области число прямых ударов молнии в год в объект площади S_0 (см., например, [3]):

$$N \approx N_m S_0,$$

где $N_m = n_1 n_2$ — среднее количество ударов молнии в год на 1 km^2 в данной географической зоне; n_1 — число грозных часов в году; $n_2 \approx 0.1$ — среднее удельное число ударов в течение одного грозного часа на площади в 1 km^2 ; $S_0 [\text{km}^2]$ — площадь объекта.

Для исследуемой защищаемой зоны молниеотвода с помощью модели, описанной в [11], рассчитаем размеры области S_i , с которой в нее может произойти прорыв молнии определенной амплитуды I_i . Зная P_i (вероятность появления молнии с током, меньшим I_i [14]) и просуммировав все N_{ij} ударов молнии с амплитудой I_i , лидеры которых могут возникнуть на площади ΔS_j , получим выражение для прогнозируемого числа ударов молнии в исследуемую область в год:

$$N_0 = N_m \sum_i^M \sum_j^K \Delta S_j (P_{i+1} - P_i) N_{ij}, \quad (1)$$

где ΔS_j — площадь одной из K элементарных площадок, на которые разбита исследуемая область; M — число интервалов, на которое разбит диапазон возможного изменения тока молнии, причем $\sum_{i=1}^M (P_{i+1} - P_i) = 1$;

$$N_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если молния с амплитудой тока} \\ & I_{i+1} \leq I \leq I_i \text{ ударила в площадку } \Delta S_j, \\ 0, & \text{если не ударила.} \end{cases}$$

Для расположенной в той же местности зоны, площадь которой совпадает с площадью исследуемой области S_0 , количество прогнозируемых ударов молнии N_b определяется в соответствии с [3]: $N_b = N_m S_0$. Если использовать эту величину как базовую, можно определить, какова относительная вероятность попадания

молнии в исследуемый объект:

$$P^* = \frac{N_0}{N_b} = \frac{1}{S_0} \sum_i^M (P_{i+1} - P_i) \sum_j^K \Delta S_j N_{ij}. \quad (2)$$

Зная P^* , можно найти прогнозируемое среднегодовое количество ударов молнии в интересующий объект при его расположении в определенной географической зоне $N_0 = P^* N_m S_0$ и оценить риск попадания в него молнии в соответствии с [15].

Как показывают последние расчеты распределения вероятности поражения молнией защищаемой зоны, наличие в этой зоне выступающих над землей объектов приводит к изменению картины распределения вероятностей, причем число прогнозируемых прорывов в такие объекты, как правило, превышает среднее для данной местности в отсутствие данных объектов. Существуют объекты, попадание молнии в которые должно быть исключено, поскольку это может привести к техногенным катастрофам или существенным материальным потерям. В случае вытянутых объектов (рис. 1) можно применить молниеотвод с загнутой над объектом вершиной. Причем верхний край молниеотвода должен находиться над наивысшей точкой объекта. Рассчитанное распределение относительных вероятностей P^* для этого случая приведено на рис. 2. При этом $h = 10$, $h_0 = 10$, $L_0 = 3$ м, угол наклона верхней части молниеотвода $\alpha = \pi/4$.

Для исключения попадания молнии в обычные объекты необходимо применять несколько молниеотводов. Причем для объектов достаточно большой площади желательно применять либо тросовые молниеотводы, либо молниеотводы с загнутыми вершинами. Предпочтительной представляется индивидуальная защита отдельных объектов, особо важных с точки зрения негативных последствий в случае попадания в них молнии, наряду с защитой больших территорий, на которых располагается ряд подобъектов (например, высоковольтные подстанции). Как отмечается в [12], при рассмотренных геометрических параметрах, прогнозируемое в год число ударов молнии в объект, находящийся внутри

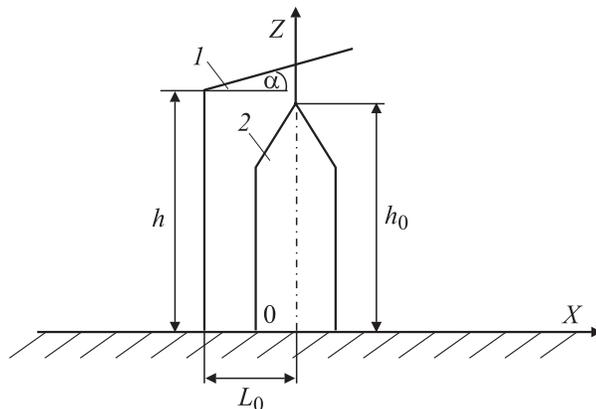


Рис. 1. Пример расчета системы „молниеотвод с загнутой вершиной (1), вытянутый защищаемый объект (2)“.

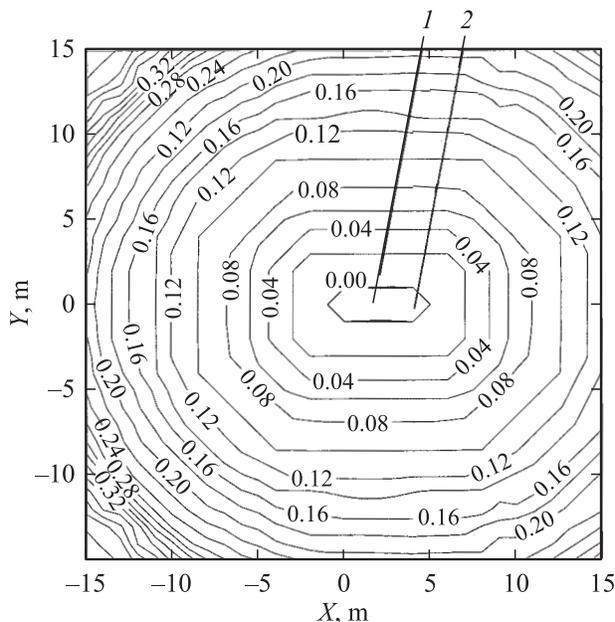


Рис. 2. Линии $P^* = \text{const}$ — величины, пропорциональной количеству прогнозируемых ударов молнии в год ($N = P^* S_0 N_m$) в области вокруг молниеотвода (1), расположенного в зоне его защиты объекта (2).

декларируемой в [4] зоны защиты молниеотвода, при наличии молниеотвода составляет $0.18 \cdot 10^{-4} N_m$ (где $N_m = n_1 n_2$ — среднее количество ударов молнии в год на 1 km^2 в данной географической зоне; n_1 — число грозových часов в году; $n_2 \approx 0.1$ — среднее удельное число ударов в течение одного грозového часа на площади в 1 km^2) и $0.762 \cdot 10^{-3} N_m$ при его отсутствии. Таким образом, хотя из-за наличия молниеотвода вероятность поражения молнией защищаемого объекта снижается в 42 раза, уменьшить вероятность поражения его молнией ниже среднего уровня для данной местности, как можно было бы ожидать для объекта в защитной зоне молниеотвода, не удастся (прогнозируемое число ударов в год в площадь, занимаемую рассматриваемым объектом, составляет порядка $10^{-8} N_m$). Данное обстоятельство следует учитывать при расчете прогнозируемого количества разрядов молнии в защищаемые объекты.

Выводы

1. Проведенное сравнение экспериментальных данных по характеру поражения высоковольтным разрядом стержневого молниеотвода с результатами расчетов при помощи разработанной авторами статистической модели продвижения высоковольтного лидерного канала [11] показало их удовлетворительное совпадение. Таким образом, предложенная авторами модель пригодна для описания электрофизических процессов, сопровождающих как разряд молнии в естественных условиях, так и модельные эксперименты данного явления, что позволяет использовать эту модель для корректного переноса

данных о зонах защиты, полученных из модельных экспериментов, на условия реальной молниезащиты.

2. На основе проведенных расчетов параметров стохастических процессов, сопровождающих высоковольтный пробой, а также продвижение лидерного канала молнии, предложены рекомендации по выбору условий проведения модельных экспериментов, обеспечивающих адекватное описание ими процесса ориентировки лидерного канала молнии на наземные объекты.

3. С помощью разработанной математической модели, описывающей продвижение лидерного канала молнии, рассчитано распределение вероятности попадания молнии в окрестности объекта, защищенного индивидуальным молниеотводом.

Список литературы

- [1] Акоюн А.А. // Тр. ВЭИ. 1940. Вып. 36. С. 94–159.
- [2] Стекольников И.С. Молния. М.–Л.: Изд-во АН СССР, 1940. 327 с.
- [3] Техника высоких напряжений / Под ред. М.В. Костенко. М.: Высш. шк., 1973. 527 с.
- [4] РД 34.21.122-87. Инструкция по устройству молниезащиты зданий и сооружений. М.: Энергоатомиздат, 1989.
- [5] Дульзон А.А., Лопатин В.В., Носков М.Д. и др. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 4. С. 48–53.
- [6] Petrov N.I., Petrova G.N., D'Alessandro F. // IEEE Trans. of Diel. and Electr. Ins. 2003. Vol. 10. Iss. 4. P. 641–654.
- [7] Agoris D.P., Charalambakos V.P., Pyrgioty E., Grzybowski S. // 26th Int. Conf. on Lightning Protection. Cracow (Poland), 2002. P. 270–274.
- [8] IEC6 1024-1. Int. Standard „Protection of structures“. Part 1: General Principles. 1990.
- [9] Ларионов В.П. Основы молниезащиты. М.: Знак, 1999. 103 с.
- [10] Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 319 с.
- [11] Резинкина М.М., Князев В.В., Кравченко В.И. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 9. С. 44–51.
- [12] Резинкина М.М., Князев В.В., Кравченко В.И. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 1. С. 63–68.
- [13] Волкова О.А., Корявин А.Р. // Электричество. 1991. № 5. С. 52–55.
- [14] IEC6 1312-1. Int. Standard „Protection against lightning electromagnetic impuls“. Geneve: IEC, 1995. 81 p.
- [15] IEC6 1662. Techn. report „Assessment of the risk of damage due to lightning“. Geneva, 1995. 109 p.