

01:04

Метод расчета молниезащиты на основе электростатической модели стягивания лидера молнии

© С.Л. Шишигин, В.Е. Мещеряков

Вологодский государственный университет
E-mail: ctod28@yandex.ru

Поступило в Редакцию 15 сентября 2014 г.

Разработан метод молниезащиты, в котором стягивание лидера молнии к наземным объектам вызвано электростатическим взаимодействием заряда лидера с наведенным зарядом наземных объектов.

Прорывы молнии через систему молниезащиты наносят огромный ущерб объектам промышленности, несмотря на строгое соответствие проектных решений действующим нормативам. Реальность такова, что экспериментальные исследования физики молнии ограничены завершающей фазой лидерного процесса, они позволяют определить зоны защиты молниеотводов, но не объясняют эффекты стягивания молнии и избирательной поражаемости. Разработка расчетных методов затруднена сложным, недетерминированным характером процесса развития лидера молнии, наиболее перспективные методы имитационного моделирования далеки от внедрения в инженерную практику.

Специфика задач молниезащиты упрощает моделирование лидерного процесса, поскольку изучаются характеристики статистической (средней) молнии, случайные факторы отбрасываются. При экспериментальных исследованиях проводятся сотни опытов для одного положения высоковольтного электрода. В результате усредненный лидер движется по силовым линиям электрического поля — при многообразии траекторий среднее направление вертикально [1].

Наземные объекты стягивают молнию. По данным наблюдений площадь стягивания определяется размерами объекта (высотой прежде всего). Физическое объяснение механизма стягивания связано с электростатическим взаимодействием заряда лидера с наведенными зарядами наземных объектов [1,2].

В работе [2] выдвинута гипотеза, согласно которой в начальной фазе развитие лидера в направлении каждой силовой линии электростатического поля равновероятно. Тогда вероятность поражения молнией объекта с молниеотводами равна [2]

$$p_a = -\frac{Q}{q}, \quad (1)$$

где q — заряд лидера, Q — наведенный заряд объекта с молниеотводами. Интерес представляет поверхность $p_a = \text{const}$ (зона захвата), минимальное расстояние от которой до молниеотвода равно размеру стримерной зоны. Процесс стягивания лидера происходит до зоны захвата, поэтому ее площадь дает нижнюю оценку площади стягивания молнии. Далее, в завершающей (сквозной, final jump) фазе лидерного процесса действуют законы разряда в газах. Пробивная напряженность всех изоляционных промежутков принимается постоянной. Молния поражает объект, если минимальное расстояние от некоторой точки зоны захвата до объекта меньше, чем до молниеотводов, а эта точка относится к зоне прорыва молнии. Отношение площади зоны прорыва к общей площади зоны захвата дает вероятность выбора p_b . Вероятность прорыва молнии к объекту $p = p_a p_b$.

К сожалению, в [2] не удалось доказать обоснованность положения (1), которое мы рассматриваем как гипотезу. Разработка и исследование метода расчета молниезащиты на основе (1) — цель данной работы.

Для реализации метода требуется решить две задачи математической физики. Первая задача — определение наведенного заряда в (1) сводится к расчету электростатического поля лидера молнии с учетом 3D-объекта и молниезащиты произвольной формы. Расчет проводится тысячи раз для разных положений лидера молнии, поэтому стандартные методы здесь неэффективны или невозможны. Вторая задача — построение поверхности равного наведенного заряда (иначе равной частичной емкости между лидером и объектом) ранее не возникала. Ее можно отнести к обратным задачам математической физики.

Покажем метод многократного расчета электростатического поля сложной системы электродов при изменении положения источника. Пусть заряд лидера q сосредоточен в головке. Он связан с вектором наведенных зарядов элементов объекта \mathbf{Q} матричным уравнением

$$\mathbf{A}\mathbf{Q} + \mathbf{B}q = 0,$$

где \mathbf{A} — квадратная матрица потенциальных коэффициентов между элементами объекта с молниеотводами; \mathbf{B} — вектор-столбец взаимных потенциальных коэффициентов между лидером молнии и объектом с молниеотводами; объект и молниеотводы заземлены или их потенциал (рабочее напряжение) пренебрежимо мал по сравнению с потенциалом лидера.

Тогда вектор наведенного заряда

$$\mathbf{Q} = -\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}q.$$

Подставляя его в (1), получим

$$p = \frac{-\sum_{i=1}^N Q_i}{q} = \sum_{i=1}^N \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B} = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^N A_{j,l}^{-1} \right) B_i = \sum_{i=1}^N C_i B_i = \mathbf{C}\mathbf{B}, \quad (2)$$

где $\mathbf{C} = (C_1, C_2, \dots, C_N)$ — вектор-строка, i -й элемент которого равен сумме i -го столбца матрицы \mathbf{A}^{-1} , N — число элементов дискретизации объекта с молниеотводами. Вектор \mathbf{C} вычисляется один раз, что обеспечивает высокую производительность вычислений при многократных изменениях положения лидера молнии.

Найдем потенциальные коэффициенты матрицы \mathbf{A} . Разобьем объект на стержневые элементы эквивалентного радиуса. Полагаем, что заряд каждого элемента сосредоточен на оси, линейная плотность заряда элемента $q/l = \text{const}$. Выберем расчетную точку P в середине m -го элемента. Потенциал в точке P , обусловленный зарядом k -го стержня (рис.1), равен

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{q}{4\pi\epsilon l} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{r} = \frac{q}{4\pi\epsilon l} \left| \ln \frac{x_2 + \sqrt{x_2^2 + y^2}}{x_1 + \sqrt{x_1^2 + y^2}} \right| \\ &= \frac{q}{4\pi\epsilon l} \left| \ln \frac{\mathbf{r}_2 \mathbf{i} + r_2}{\mathbf{r}_1 \mathbf{i} + r_1} \right| = \alpha q, \end{aligned} \quad (3)$$

где α — взаимный потенциальный коэффициент, \mathbf{i} — единичный орт. Собственный потенциальный коэффициент стержня радиусом R

$$\alpha = \frac{1}{2\pi\epsilon l} \ln \frac{l}{R}, \quad l \gg R.$$

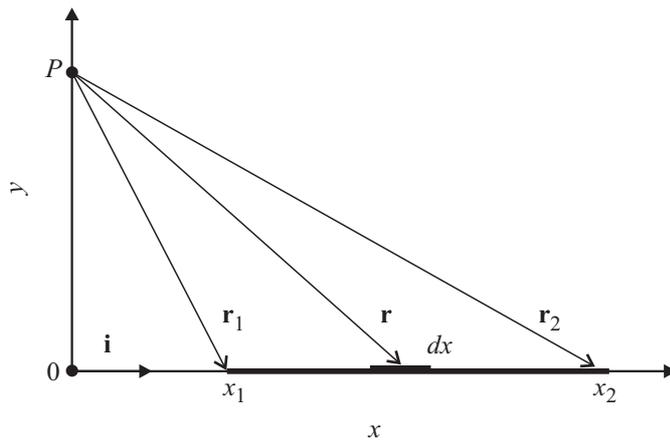


Рис. 1. К определению потенциального коэффициента стержня.

Найдем потенциальные коэффициенты матрицы **В**. В точечной модели лидера с зарядом q , сосредоточенным в головке, они очевидны. Потенциал точечного заряда равен

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon r} = \beta q,$$

где β — искомый потенциальный коэффициент. Покажем, что и более сложные модели лидера можно свести к точечной модели заряда, сосредоточенного в головке, что необходимо для применения (2).

Рассмотрим лидер стержневой формы длиной l и зарядом q . Плотность заряда возрастает по длине лидера [1,2], поэтому можно принять линейный закон ее изменения $\tau(x) = \tau(l)t$, где $t = x/l$, $\tau(l) = q/2l$. Разобьем лидер на n стержневых элементов. Плотность заряда каждого k -элемента постоянна в пределах элемента и равна $\tau_k = \tau_n t_k$, где $\tau_n = q/2l$ — плотность заряда в головке лидера, $t_k \in [0, 1]$. Тогда потенциал, создаваемый лидером в произвольной точке, равен

$$\varphi = \sum_{k=1}^n \tau_k \alpha_k = \tau_n \sum_{k=1}^n t_k \alpha_k = \frac{q}{2l} \sum_{k=1}^n t_k \alpha_k = \beta q,$$

где α_k определено в (3). Таким образом, форма записи потенциала заряженного стержня не изменилась по сравнению с точечным

зарядом (изменился потенциальный коэффициент β), что позволяет применить (2).

Перейдем к задаче построения поверхности равного наведенного заряда (равной частичной емкости) электрода произвольной формы в поле точечного источника. Интерполяционные методы на некоторой сетке узлов здесь неэффективны из-за высокой трудоемкости. Воспользуемся методами построения картины электростатического поля на основе решения задачи Коши [3].

Будем искать каркас искомой поверхности на совокупности вертикальных плоскостей (сечений). В каждой плоскости выберем двумерную локальную систему координат XOY , которую совместим с комплексной плоскостью. К задаче Коши приводит уравнение касательной к контуру при заданной координате начальной точки

$$\frac{dz}{dt} = \tau = e^{j\alpha}, \quad z(0) = z_0,$$

где z — комплексные координаты искомого контура; t — параметр, имеющий смысл длины; τ — направление касательной; α — угол наклона касательной. Решение задачи Коши производится по шаговому алгоритму

$$z_{k+1} = z_k + he^{j\alpha},$$

где h — длина шага (с автоматическим изменением), $\alpha = 0.5(\alpha_k + \alpha_{k+1})$ для метода трапеций. Начальную точку z_0 выбираем над вершиной молниеотвода на расстоянии D . Здесь обычно имеет место перегиб функции, поэтому $\alpha_0 = 0$ — удачное приближение начального угла. Шаговый процесс заканчивается, если расстояние до земли становится меньше, чем до объекта или молниеотводов, что составляет специфику задачи.

Расстояние D (от вершины молниеотвода до начальной точки z_0 зоны захвата) определяется по известной эмпирической формуле $D = 10I^{0.65}$, полученной экспериментально в разрядном промежутке „стержень–стержень“ и закрепленной в стандарте МЭК 62305-3 (далее МЭК), где I — максимальный ток молнии.

Исследуем достоверность метода. Для невысокого объекта (пластины на поверхности земли), который не искажает траекторию молнии, наведенный заряд пропорционален его площади. По данным наблюдений вероятность поражения поверхности земли также пропорциональна площади, что подтверждает (1).

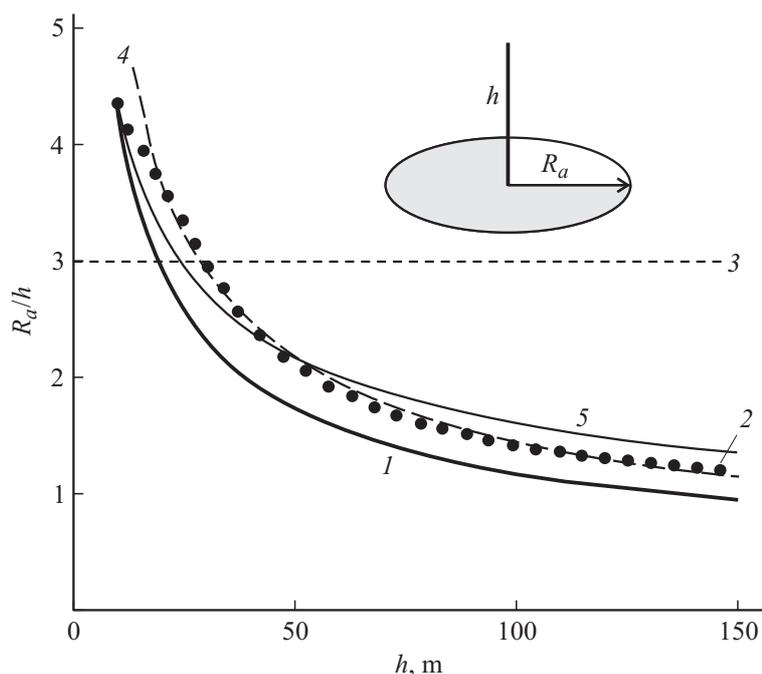


Рис. 2. Относительный радиус стягивания стержня при токе молнии 30 кА по данным: 1 — настоящей работы; 2 — РД, 3 — МЭК, 4 — [4], 5 — [5].

Площадь стягивания стержневого молниеотвода высотой h представляет собой круг радиусом R_a . В стандарте МЭК $R_a = 3h$, $h < 150$ м. По российскому стандарту РД 153-34.3-35.125-99 (далее РД) радиус стягивания увеличивается не быстрее, чем $h^{0.45}$. Данные МЭК и РД получены на основе наблюдений. Зависимости, полученные расчетным путем, $R_a = 2.57I^{0.615}h^{0.422}$ [4] и $R_a = 2.27I^a h^{0.46}$ [5], где $a = 0.5h^{0.05}$, I — максимальный ток молнии (кА) практически совпадают с РД при среднем токе молнии $I = 30$ кА (рис. 2). Расчеты по новому методу также согласуются с РД (рис. 2) и данными [4,5] в диапазоне токов до 30 кА, который используется в задачах молниезащиты.

Сопоставим результаты расчета по новому методу с современными экспериментальными данными [6], положенными в основу норматива

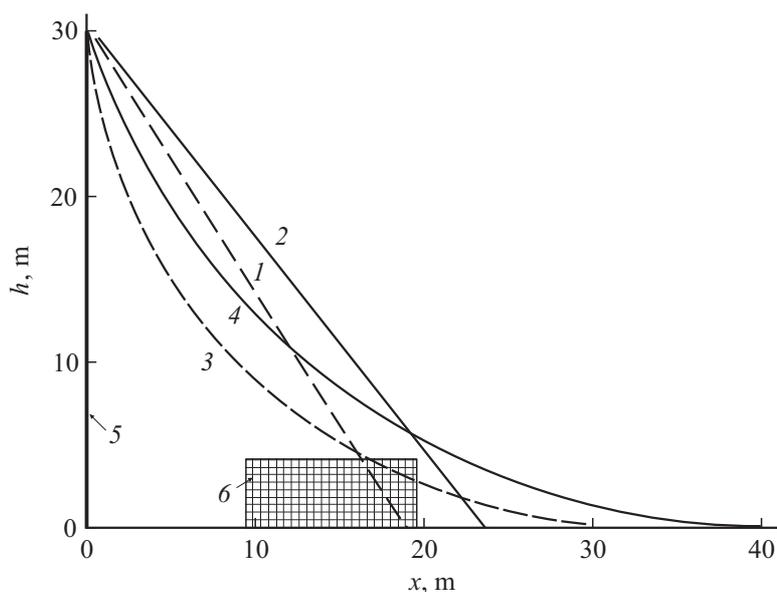


Рис. 3. Зоны защиты молниеотвода (5) по данным: ВСП (1, 2) и настоящей работы (3, 4) при отсутствии (1, 3) и наличии (2, 4) защищаемого объекта (6) размерами $10 \times 10 \times 4$ м для II уровня молниезащиты.

по молниезащите ВСП 22-02-07/МО РФ/ (далее ВСП). В них впервые зафиксированы факты существенного изменения зоны защиты молниеотводов при внесении защищаемого объекта, которые подтверждаются нашими расчетами (рис. 3).

Сравнение с другими расчетными методами молниезащиты показало, что во всех решенных задачах разработанный метод дает результаты внутри диапазона данных, полученных по методу катящейся сферы, рекомендованному МЭК, и вероятностному методу [1], принятому в России.

Таким образом, имеем основание считать, что положение (1) обосновано для усредненного лидера молнии и может быть использовано в инженерных методах расчета молниезащиты. Механизм стягивания обусловлен взаимодействием заряда лидера с наведенным зарядом объекта и его окружения.

Список литературы

- [1] *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
- [2] *Александров Г.Н.* Молния и молниезащита. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 280 с.
- [3] *Шишигин С.Л.* // Электричество. 2004. № 3. С. 53.
- [4] *Farouk A.M. Rizk* // IEEE Trans. on Electromagnetic compatibility. 2010. V. 52. N 3. P. 664.
- [5] *Cooray V., Vecerra M.* // 30th Int. Conf. on Lightning Protection. Cagliari, Italy. 2010. P. 1062.
- [6] *Куприенко В.М.* // Электричество. 2012. № 9. С. 39.