

**Мещеряков В.Е., Шишигин С.Л.**  
**Вологодский государственный университет, г. Вологда, Россия**  
**Тел.: 8-931-500-45-40, E-mail: mesheryakov\_1@mail.ru**

## РАСЧЕТ ГРОЗОПОРАЖАЕМОСТИ НАЗЕМНОГО ОБЪЕКТА ПО ЕГО НАВЕДЕННОМУ ЗАРЯДУ

Грозопоражаемость наземных объектов при заданной грозовой активности определяется надежностью молниезащиты и площадью стягивания молнии.

Объект считается защищенным от прямого удара молнии с заданной надежностью, если он находится внутри зоны защиты молниеотводов, которые строятся разными способами. Российские стандарты молниезащиты – РД 34.21.122-87 и СО-153-34.21.122-2003 устанавливают зоны защиты типовых молниеотводов, базируясь на экспериментальных данных А.А. Акопяна и расчетах статистическим методом, разработанным Э.М. Базеляном. Результаты современных крупномасштабных экспериментов по исследованию молниезащиты под руководством В.М. Куприенко повысили адекватность выбора молниеотводов и легли в основу норм ВСП 22-02-07/МО РФ. К сожалению, все российские стандарты содержат частные решения для отдельных молниеотводов, отсюда трудности с их практическим применением для объектов с множественными, нестандартными, разнотипными молниеотводами и зданиями. С этой задачей легко справляется метод катящейся сферы (МКС), рекомендованный стандартом МЭК 62305 (далее МЭК), однако его адекватность в ряде важных случаев обоснованно ставится под сомнение в работах ведущих российских ученых.

Площадь стягивания молнии – второй параметр, определяющий грозопоражаемость объекта. Площадь стягивания стержневого молниеотвода или башни высотой  $h$  равна  $\pi R_a^2$ , где  $R_a$  – радиус стягивания. Площадь стягивания здания с размерами основания  $a, b$  равна  $(a+2R_a)(b+2R_a)$ . Площадь стягивания воздушной линии длиной  $L$  равна  $2R_aL$ . Площадь стягивания сложного объекта получается объединением площадей стягивания его составляющих. В стандарте МЭК радиус стягивания принят  $R_a = 3h$  на основе наблюдений за сосредоточенными объектами разной высоты  $h$ . Рассмотренная методика определения площади стягивания включена и в российские нормы молниезащиты.

Проблема в том, что данные МЭК существенно различаются с данными РД 153-34.3-35.125-99 (далее РД-99), также полученными на основе наблюдений, и результатами расчетов по различным моделям ориентировки молнии, включая МКС, где радиус стягивания увеличивается не быстрее, чем  $h^{0.5}$ . Таким образом, значение  $R_a = 3h$ , принятое в стандарте МЭК, не кажется очевидным.

Площадь стягивания в МЭК и РД-99 соответствует среднему току молнии, поскольку получена на основе наблюдений. Тогда она будет заниженной в задачах электромагнитной совместимости, где расчетный ток молнии принимается в диапазоне от 100 до 200 кА (в зависимости от уровня защиты объекта). Необходимость учета тока молнии при расчете площади стягивания не вызывает сомнения.

Площадь стягивания зависит от окружения объекта и рельефа местности. В стандарте МЭК эти факторы учитываются эмпирическим коэффициентом  $C_d = 0,25-2$ , который выбирается проектировщиком на основании рекомендаций качественного характера. Например, для объекта на вершине холма (без указания уклона)  $C_d = 2$ , т.е. площадь стягивания всегда увеличивается в два раза. Если объект окружен объектами равной или меньшей высоты (без указания размера), то  $C_d = 0,5$ , т.е. окружение всегда перехватывает у объекта половину молний. Неясно как выбрать  $C_d$  в наиболее распространенном случае, когда объект окружен лишь частично.

Таким образом, действующие стандарты молниезащиты (как российские, так и международные) несовершенны. Развитие испытательного оборудования и новые экспериментальные данные о надежности молниезащиты не снимают проблемы массового проектирования, поскольку невозможно исследовать все частные случаи. Решение задач грозопоражаемости следует искать на основе компьютерного имитационного моделирования.

### 1. Методы моделирования ориентировки молнии

Эти методы призваны проследить траекторию молнии от заряженного облака (или с некоторой большой высоты) до наземного объекта или земли и усреднив результаты многих тысяч опытов получить статистические данные о надежности молниезащиты, площади стягивания молнии и грозопоражаемости объекта.

### 1.1. Ориентировка молнии

Лидер молнии развивается по случайной траектории, большую часть его пути наземные объекты не оказывают влияния на его траекторию. По мере приближения к земле начинается процесс ориентировки лидера молнии на наземные объекты, который объясняется двумя факторами.

Заряд лидера молнии индуцирует заряд на наземных объектах (наведенный заряд). Электростатическое притяжение (стягивание) заряда лидера наведенным зарядом объекта – первый этап ориентировки молнии, существенный для высоких объектов.

При дальнейшем приближении лидера электрическое поле вблизи объекта возрастает настолько, что создаются условия для возникновения и развития встречного лидера, который движется от объекта к лидеру молнии и перехватывает его. Встречный лидер возникает всегда (за исключением DAS систем), поэтому он является главным фактором ориентировки молнии. В большинстве расчетных моделей с возникновением встречного лидера отождествляется ориентировка лидера на объект.

### 1.2. Критерии возникновения встречного лидера

Критериями возникновения и устойчивого развития встречного лидера являются:

1. Расстояние от лидера до объекта равно дистанции поражения (электро-геометрическая модель, используется в МКС).
2. Потенциал вблизи объекта превышает пробивное напряжение.
3. Напряженность электрического поля вблизи объекта превышает разрядную напряженность.
4. Величина объемного заряда стримерной зоны вблизи объекта превышает критическое значение.

Можно показать, что наведенный заряд объекта также может быть использован в качестве критерия возникновения встречного лидера.

### 1.3. Модель лидера молнии

**Стохастическая модель.** Отрицательный лидер молнии движется ступенями. Направление движения каждой ступени – случайная величина, отсюда изломы в траектории лидера. В России разработка и применение данной модели для расчета молниезащиты связана с именем А.С. Гайворонского.

Стохастические модели наиболее адекватны, однако их реализация сопряжена с трудностями вычислительного характера. Построение траектории лидера молнии для большого массива стартовых точек требует огромного числа расчетов электрических полей, создаваемых зарядами лидера, грозового облака и наземных объектов, которые могут иметь сложную геометрию. Стохастические модели сегодня применимы только для простейших объектов – проводов и тросов ВЛ в двумерном приближении. Для расчета молниезащиты сложных объектов приходится прибегать к упрощенным моделям.

**Модель прямолинейного лидера.** Она наиболее распространена в настоящее время. Лидер представляется прямолинейным (вертикальным, реже наклонным) стержнем с линейной плотностью заряда  $\tau$ . Для учета локального усиления заряда вблизи головки в начало стержня добавляется точечный заряд.

Модель проста, но имеет три существенных недостатка: 1) теряя случайность, как основное свойство траектории молнии, она завышает расчетную надежность молниезащиты; 2) она не позволяет моделировать боковые разряды молнии в высотные объекты; 3) она не позволяет точно определить (занижает) площадь стягивания молнии.

**Модель усредненного лидера.** Лидер молнии развивается по случайной траектории, но направление усредненного (статистического) лидера молнии вертикально (при отсутствии наземных объектов), т.е. он движется по направлению силовых линий внешнего поля [1]. Наведенный заряд наземных объектов искажает силовые линии электрического поля грозового облака. Искажается и траектория усредненного лидера, что позволяет моделировать боковые разряды, а также находить площадь стягивания. Эта модель, как и предыдущая, завышает надежность молниезащиты, но этот недостаток устраним при нормировке расчетных данных с экспериментальными данными.

### 1.4. Заряд лидера молнии

Разные исследователи приводят весьма разные величины зарядов лидера: линейной плотностью заряда  $\tau$  и точечного заряд  $q$  головки лидера.

В работе [2]

$$\tau = \sqrt{\frac{I}{156}} \cdot 10^{-3}, \quad q = 9\tau \cdot 2r,$$

где  $I$  – ток молнии [кА],  $r$  – радиус стримерной зоны (4-40 м),  $\tau$  [Кл/м],  $q$  [Кл].

В работе [3, стр.14, 15, 17, 31]

$$\tau = \left(0.27 + 1.23 \frac{H}{3000}\right) \cdot 10^{-3}, \quad q = 2\tau l, \quad l = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0 E_{str}}, \quad H = I \cdot 10^3 / 8.7,$$

где  $I$  – ток молнии, кА,  $l$  – средняя длина стримеров, м,  $H$  – длина лидера, м,  $E_{str} = 800 \cdot 10^3$  кВ/м – средняя напряженность отрицательного стримера,  $\tau$ , Кл/м,  $q$ , Кл.

Этот перечень можно продолжить. Констатируем, что различие между различными вариантами весьма существенное (в два и более раза). Отсутствие единой позиции допустимо для научных исследований, но нежелательно для инженерных расчетов и невозможно для нормативных документов.

## 2. Метод Г.Н. Александрова (метод наведенного заряда)

Метод наведенного заряда (МНЗ) развивает идеи Г.Н. Александрова [3], согласно которым наведенный заряд наземного объекта может быть использован как для расчета зон защиты молниеотводов и надежности молниезащиты, так и площади стягивания молнии объектов произвольной формы, с учетом его окружения и рельефа местности.

Расчет по МНЗ включает три этапа. На первом этапе определяется зона захвата молнии наземными объектами. На втором этапе строится зона защиты молниеотводов и определяется вероятность прорыва молниезащиты. На третьем этапе находим площадь стягивания молнии.

Реализация первого и второго этапа приведена в [4], а также рассматривалась на прошлой конференции [5]. В настоящей работе мы остановимся на исследовании процессов стягивания молнии наведенным зарядом наземного объекта.

### 2.1. Притяжение (стягивание) лидера молнии наведенным зарядом наземного объекта

Электростатическое взаимодействие заряда лидера с наведенным зарядом объекта существует до возникновения встречного лидера. Вопрос насколько оно существенно.

При количественном анализе [1, стр.224] выясняется, что наведенный заряд объекта на высоте ориентировки создает напряженность на 2–3 порядка меньше, чем напряженность заряженного облака, поэтому не влияет на ориентировку молнии. На этом основании электростатическое взаимодействие не рассматривается даже для высотных объектов, радиус стягивания которых по действующим нормам молниезащиты составляет многие сотни метров, когда еще нет условий для возникновения встречного лидера.

Полагаем, что исследование процессов стягивания следует проводить при несколько иной, чем в [1] постановке, а именно исследовать искажение электростатического поля заряженного облака наведенным зарядом объекта до достижения лидером зоны захвата.

Пусть в отсутствии наземных объектов усредненный лидер движется вертикально вниз, тогда площадь стягивания равна площади проекции зоны захвата на горизонтальную плоскость. Наведенный заряд искажает траекторию лидера, увеличивая площадь стягивания, для нахождения которой строим силовые линии из крайних точек зоны захвата. Построение продолжается пока максимальная кривизна силовых линий не становится малой величиной. Это происходит на высоте ориентировки, которая определяется автоматически. Через концы силовых линий проводим замкнутый контур, который дает площадь стягивания.

Исследование процессов стягивания молнии начинаем с модельной задачи с известным аналитическим решением.

### 2.2. Проводящий шар в однородном электростатическом поле

Вариант 1. Пусть заземленный объект полусферической формы радиусом  $R$  находится в однородном электростатическом поле. С учетом зеркального отображения имеем задачу о проводящем шаре с нулевым зарядом в однородном поле с напряженностью  $E_0$ . Ее аналитическое решение известно из курса ТОЭ – шар искажает картину поля, стягивая силовые линии, а максимум напряженности на вершине шара равен  $3E_0$ .

Установлено, что незаряженная сфера очень незначительно искажает внешнее поле, а на высоте порядка  $3R$  искажение практически отсутствует. Таким образом, какой бы большой заряд не наводил лидер на полусфере, независимо от радиуса сферы (высоты объекта) он компенсируется зеркальным зарядом, суммарный заряд равен нулю, поэтому полусфера мало искажает внешнее по-

ле, почти не стягивая молнию до зоны захвата. Площадь стягивания получается немногим более площади проекции зоны захвата на поверхность земли, т.е. близка к минимальной для данной дистанции поражения (тока молнии). В первом приближении, этой модели соответствует большинство невысоких объектов.

**Вариант 2.** Сфера малого радиуса с зарядом  $Q$  (точечный заряд) расположен на высоте  $h$  в однородном поле. В первом приближении подобная модель применима для молниеотвода (его вершины), а двумерный вариант задачи соответствует тросу (проводу) воздушной линии.

Установлено, что с увеличением  $h$  компенсирующее действие зеркального заряда ослабевает, поэтому заряд  $Q$  способен существенно исказить силовую линию, стягивая силовые линии с все большей площади. Процессы стягивания определяются не абсолютным, а относительным зарядом лидера  $Q / E_0$ , где  $E_0$  – напряженность электрического поля облака вблизи земли, поэтому есть основание полагать, что площадь стягивания не слишком сильно зависит от выбранной модели лидера (п.1.4). Действительно, увеличение заряда лидера  $Q$  означает увеличение заряда облака и создаваемой этим зарядом напряженности  $E_0$ .

### 3. Расчет площади стягивания наземных объектов

В работе исследовано влияние высоты и поперечного сечения наземного объекта, тока молнии и рельефа местности. Результаты сравнивались с данными стандарта МЭК, РД-99, а также результатами других исследователей.

Установлено, что высота объекта и ток молнии – два основных фактора, определяющих наведенный заряд и площадь стягивания. В меньшей мере на величину наведенного заряда влияют размеры поперечного сечения. Рельеф местности искажает силовые линии внешнего поля даже в отсутствие объекта. Площадь стягивания молниеотвода на вершине холма увеличивается пропорционально уклону холма. Окружение объекта также существенно влияет на площадь стягивания. Учитывать эти и другие факторы с помощью эмпирических поправочных коэффициентов, как сделано в стандарте МЭК, вряд ли целесообразно при наличии современных компьютерных программ, таких как программа ЗУМ [6].

### Литература

1. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. – М.: Физмалит, 2001. – 320 с.
2. Ларионов В.П., Колечицкий Е.С., Шульгин В.Н. Расчет вероятности прорыва молнии сквозь тросовую защиту. – Электричество. – 1981. – №5. – С. 19–23.
3. Александров Г.Н. Молния и молниезащита. Ин-т электрофизики и электроэнергетики РАН. – М.: Наука, 2008. – 274 с.
4. Шишигин С.Л., Мещеряков В.Е., Шишигин Д.С. Расчет зон защиты стержневых молниеотводов методом наведенного заряда. – Электричество. – 2015. – № 8. – С. 4–9.
5. Мещеряков В.Е. Совершенствование методов расчета молниезащиты. Труды II Всероссийской НТК «Техно-ЭМС 2015». – М.: Грифон, 2015. – С. 29–31.
6. Шишигин Д.С. AUTOCAD приложение для расчета молниезащиты и заземления объектов электроэнергетики. – Автоматизация в промышленности. – 2014. – № 9. – С. 28–32.