

На правах рукописи



МЕЩЕРЯКОВ Виталий Евгеньевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
В ЗАДАЧАХ ОРИЕНТИРОВКИ МОЛНИИ**

Специальность: 05.09.05 «Теоретическая электротехника»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Вологда – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Вологодский государственный университет», г. Вологда, на кафедре «Электротехники».

Научный руководитель: Шишигин Сергей Леонидович
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Куприенко Василий Михайлович,
доктор технических наук, доцент,
«23 Государственный морской проектный институт» - филиал АО «31 Государственный проектный институт специального строительства», начальник отдела «Конструкционной защиты от электромагнитных воздействий».

Ярмаркин Михаил Кириллович, кандидат технических наук, доцент,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования «Петербургский энергетический институт повышения квалификации»,
заведующий кафедрой «Электроэнергетическое оборудование электрических станций, подстанций и промышленный предприятия».

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения» (ОАО «НИИПТ»),
г. Санкт-Петербург

Защита состоится «3» октября 2017 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.16 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29, ауд. 284.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «СПбПУ» www.spbstu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д212.229.16,
к.т.н., доцент



Журавлева Наталия Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований и степень ее разработанности. Удары молнии продолжают наносить огромный ущерб объектам промышленности, гражданской и военной инфраструктуры, несмотря на строгое соответствие проектных решений действующим стандартам молниезащиты.

В формировании российских стандартов РД 34.21.122-87 (далее РД) и СО-153-34.21.122-2003 (далее СО) определяющую роль сыграли экспериментальные данные А.А. Акопяна и расчеты статистическим методом, разработанным Э.М. Базеляном. В основу стандарта ВСП 22-02-07/МО РФ (далее ВСП) легли результаты крупномасштабных экспериментов по исследованию молниезащиты, проведенных под руководством В.М. Куприенко. Каждый новый стандарт сужал зоны защиты. Российские стандарты определяют зоны защиты только типовых молниеотводов, отсюда трудности в их применении.

В основе метода катящейся сферы (МКС) стандарта МЭК 62305 (далее МЭК) лежит построение зоны захвата – поверхности, все точки которой равноудалены от молниеотводов на дистанцию поражения $D=10I^{0.65}$, где I – амплитуда тока главного разряда молнии (далее ток молнии). Объект «окатывается» сферой радиуса D , а точки касания подвержены удару молнии. Метод прост, универсален, но имеет ограничения и не всегда адекватен.

Грозопоражаемость объекта (прогнозируемое число ударов молнии) зависит не только от надежности молниезащиты, но и от площади стягивания молнии. Этот параметр, установленный стандартом МЭК на основе наблюдений, исследован недостаточно.

Современный научный подход к решению задачи молниезащиты связан с методами моделирования ориентировки молнии, которые базируются на расчетах электростатических полей (ЭСП). Разработка подобных методов в России связана с именами Е.С. Колечицкого, В.П. Ларионова, А.С. Гайворонского, Г.В. Подпоркина и др. Среди иностранных исследователей отметим M. Vecerra, V. Cooray, L. Dellera, F.A.M. Rizk. Из большого числа ученых, внесших заметный вклад в разработку методов расчета ЭСП, выделим Е.С. Колечицкого.

В большинстве исследований принято, что лидер молнии движется вертикально вниз до момента возникновения встречного лидера, далее лидер меняет направление и поражает ближайшую точку объекта. Наведенный заряд объекта притягивает заряд лидера молнии, увеличивая площадь стягивания, но насколько, надо ли с ним считаться, в каких случаях – этот принципиальный вопрос остается открытым.

В работах Э.М. Базеляна показано, что при многообразии траекторий лидера молнии среднее направление совпадает с направлением силовых линий ЭСП. Фактически обосновано

вана модель усредненного лидера, движущегося по направлению силовых линий ЭСП, однако ранее она не исследовалась.

Новые идеи высказаны Г.Н. Александровым. Наведенный заряд объекта в поле развивающегося лидера молнии, по его мнению, определяющий параметр для расчета молниезащиты. Метод Г.Н. Александрова, как и МКС, основан на построении зоны захвата, но по более сложному критерию $-Q/q = const$, где Q –наведенный заряд объекта, q –заряда лидера молнии. Это задача синтеза ЭСП. К сожалению, данный метод не был доведен до логического завершения, а его положения требуют подтверждения.

Высокая трудоемкость – главный фактор, сдерживающий развитие и внедрение методов ориентировки молнии. Для объекта со сложной 3D геометрией даже однократный расчет ЭСП затруднителен, а повторить его при вариации положения лидера молнии надо многие тысячи раз. Стандартные методы и программы расчета ЭСП здесь неэффективны.

Целью работы является совершенствование методов расчета ЭСП в задачах ориентировки молнии, направленное на повышение производительности вычислений, и на этой основе исследование процессов электростатического притяжения (стягивания) лидера молнии наведенным зарядом наземного объекта с использованием модели усредненного лидера молнии.

Для достижения поставленной цели задачи исследования включали:

1. Разработку метод наведенного заряда, в основе которого модель усредненного лидера, быстродействующие алгоритмы расчета наведенного заряда, синтеза зоны захвата из условия $-Q/q = const$ и построения силовых линий ЭСП.
2. Формулировку задачи для исследования процессов электростатического притяжения (стягивания) лидера молнии наведенным зарядом наземного объекта.
3. Исследование процессов стягивания на модельных задачах.
4. Исследование закономерностей стягивания молнии наземным объектом в функции его высоты, размеров сечения, а также тока молнии и рельефа местности.
5. Расчеты зон защиты типовых молниеотводов с целью сравнения результатов с данными действующих стандартов молниезащиты.
6. Расчеты площади стягивания и грозопоражаемости реальных объектов.

Научная новизна представленной работы заключается в следующем:

1. Получено выражение для расчета относительного наведенного заряда наземного объекта в виде произведения двух векторов на основе аналитических преобразований с

блочной формой записи матрицы потенциальных коэффициентов, отличающееся быстроедействием при многократных изменениях положения лидера молнии.

2. Решена задача синтеза поверхности (зоны захвата молнии) по условию равного относительного наведенного заряда, определены условия единственности и существования решения.
3. Разработан новый подход к исследованию процессов стягивания молнии на основе анализа искажения силовых линий внешнего однородного ЭСП, проведенных из крайних точек зоны захвата. Этот подход не требует анализа всей области развития лидера молнии, что кардинально повышает быстроедействие, допускает исследование методами электростатики и применение аналитических решений.
4. Сформулирован критерий, определяющий степень влияния наведенного заряда на площадь стягивания молнии, – чем меньше наведенный заряд наземного объекта с учетом его зеркального изображения искажает внешнее ЭСП, тем меньше площадь стягивания, что дает теоретическое обоснование к выбору формы наземного объекта.
5. Получены новые данные о площади стягивания молнии с учетом рельефа местности.

Теоретическая значимость. Исследована модель усредненного лидера молнии, движущегося по направлению силовых линий ЭСП до зоны захвата молнии, позволяющая анализировать закономерности и проводить расчеты площади стягивания молнии методами электростатики.

Практическая значимость. Разработанный метод наведенного заряда может быть использован в практике проектирования молниезащиты. Результаты исследований могут быть востребованы в новых редакциях стандартов молниезащиты.

Методология и методы исследования. Основу методологии работы составляют положения теоретической электротехники и молниезащиты. Исследование базируется на численных методах анализа и синтеза ЭСП. Расчеты проводились с помощью программ в среде Mathcad и AutoCAD, разработанных автором, а также программы ЗУМ.

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Формула для расчета относительного наведенного заряда наземного объекта в поле лидера молнии.
2. Метод синтеза формы поверхности (зоны захвата) по условию равного относительного наведенного заряда или другому критерию, заданному вне ее.
3. Принцип расчета площади стягивания молнии на основе анализа искривления силовых линий внешнего однородного ЭСП наведенным зарядом наземного объекта.

4. Результаты расчета площади стягивания молнии в функции высоты и сечения объекта, тока молнии и рельефа местности.
5. Метод наведенного заряда и результаты его применения для построения зон защиты молниеотводов, расчета площади стягивания и грозопоражаемости наземного объекта.

Достоверность результатов обеспечивается корректным применением законов электростатики, использованием аналитических решений, сравнением с результатами расчета других авторов и данных стандартов молниезащиты.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях: 4 и 5 Росс. конф. по молниезащите (Санкт-Петербург 2014, 2016 гг),), на 2 и 3 Всеросс. НТК «Техно – ЭМС» (Москва 2015, 2016 гг), 9 Всеросс. форуме студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и инновации в технических университетах» (Санкт-Петербург 2015 г), на 7 и 8 Межд. НТК «ИНФОС» (Вологда 2013, 2015 гг), XII Всеросс. НТК «Вузовская наука региону» (Вологда 2014 г), III Межд. НТК «Перспективное развитие науки, техники и технологий» (Курс 2013 г), Межд. конф. студентов и аспирантов «Молодые исследователи – региону» (Вологда 2013, 2014 гг), науч. сессии студентов и аспирантов (Вологда, 2012-2014 г), XV НТК молодежи АО «Транснефть-Север» (Ухта 2014 г), 11 Межд. НПК студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия 2016» (Иваново), а также научных семинарах кафедры ТОЭ СПбГПУ, 23 Гос. морского проектного института, ООО «Стример», ОАО «НИИПТ».

Публикации. Основные научные и практические результаты диссертационной работы опубликованы в 19 печатных работах, в том числе в 3 статьях в изданиях из перечня ВАК, 1 учебном пособии. Получено Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Внедрение результатов. Результаты диссертационной работы выполнены по гранту №2838 ГУ1/2014 Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере и внедрены в практику проектирования молниезащиты ООО «Квадро Электрик» (г.Санкт-Петербург), филиал ООО «Энергостроймонтаж» «Высоковольтные сети и энергетические проекты» (г.Вологда).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, включающего 94 наименования и 3 приложений. Общий объем работы – 122 страницы, число рисунков – 34, число таблиц – 15.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели работы, показана новизна защищаемых научных положений, научная и практическая значимость.

В первой главе проанализированы модели ориентировки молнии, методы расчета ЭСП и сформулированы задачи диссертационного исследования.

Во второй главе решены научные задачи диссертационной работы, связанные с аналитическими исследованиями электростатического притяжения (стягивания) лидера молнии наведенным зарядом наземного объекта и разработкой метода наведенного заряда.

Способен ли наведенный (лидером молнии) заряд наземного объекта исказить силовую линию внешнего ЭСП (заряженного облака) – этот принципиальный вопрос рассматривается на модельной задаче, имеющей аналитическое решение.

Пусть заземленный объект полусферической формы радиусом R находится в однородном ЭСП (рисунок 1). С учетом зеркального отображения имеем задачу о проводящем шаре с нулевым зарядом в однородном ЭСП с напряженностью E_0 . Ее аналитическое решение известно из курса ТОЭ – шар искажает картину поля, стягивая силовые линии, а напряженность ЭСП, обусловленная зарядом сферы убывает по закону $1/r^3$.

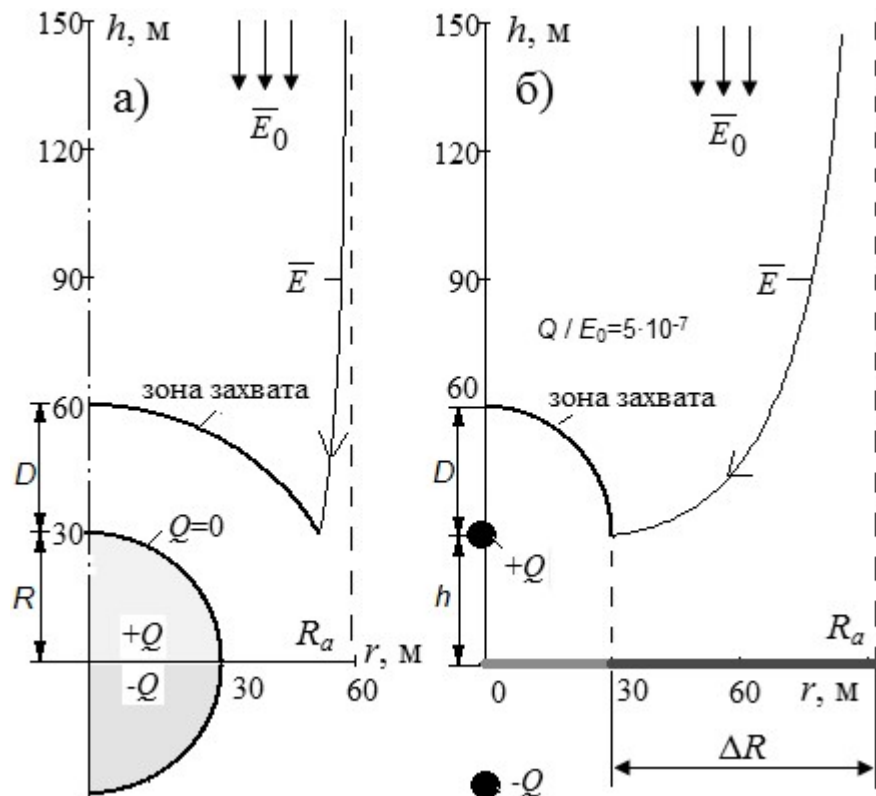


Рисунок 1 – Стягивание силовой линии однородного ЭСП с напряженностью E_0 , проведенной через крайнюю точку зоны захвата, к проводящему шару: а) незаряженному б) с зарядом Q

Пусть зона захвата построена по МКС, т.е. имеет сферическую форму радиусом $R+D$, где D – дистанция поражения. Построив силовую линию из крайней точки зоны захвата, видим (рисунок 1а), что незаряженная сфера очень незначительно искажает внешнее поле, а на высоте порядка $3R$ искажение отсутствует. Таким образом, какой бы большой заряд не наводил лидер на полусфере, независимо от радиуса сферы (высоты объекта

h) он компенсируется зеркальным зарядом, суммарный заряд равен нулю, поэтому полу-сфера мало искажает внешнее поле, почти не притягивая молнию до зоны захвата. Площадь стягивания получается немногим более площади проекции зоны захвата на поверхность земли. В первом приближении, этой модели соответствует большинство объектов, при $h/D < 1$.

Во втором варианте (рисунок 1б) шар 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 воздушной линии. С увеличением h компенсирующее действие зеркального заряда ослабевает, поэтому заряд Q способен существенно исказить силовую линию, а степень искажения зависит от соотношения Q / E_0 .

Таким образом, предложена методика расчета площади стягивания молнии на основе анализа искажения наведенным зарядом объекта силовой линией внешнего однородного ЭСП, проведенной через крайнюю точку зоны захвата. Для получения количественных результатов будем моделировать лидер точечным зарядом его головки и стержнем (криволинейным в общем случае) с постоянной плотностью заряда. Количественные параметры выберем по Г.Н. Александрову.

ЭСП стержня. Лидер молнии и наземные объекты дробятся на стержневые элементы (эквивалентного диаметра). Полагаем, что заряд каждого элемента сосредоточен на оси, линейная плотность заряда элемента $q/l = \text{const}$. Выберем расчетную точку P в середине m -ого элемента. Потенциал в точке P , обусловленный зарядом стержня (рисунок 2),

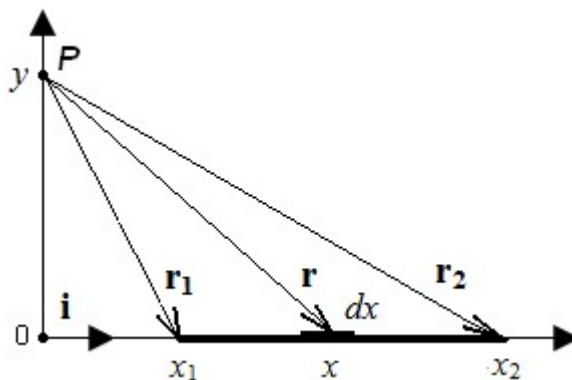


Рисунок 2 – К определению потенциального коэффициента стержня

равен

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon l} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{r} = \frac{q}{4\pi\epsilon l} \left| \ln \frac{x_2 + \sqrt{x_2^2 + y^2}}{x_1 + \sqrt{x_1^2 + y^2}} \right| = \frac{q}{4\pi\epsilon l} \left| \ln \frac{\mathbf{r}_2 \cdot \mathbf{i} + r_2}{\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{i} + r_1} \right| = \alpha q \quad (1)$$

где α – взаимный потенциальный коэффициент (по методу средней точки), \mathbf{i} – единичный орт. Векторная форма записи делает выражение (1) компактным и применимым для произвольного стержня в 3D пространстве. Аналогично записываются составляющие вектора напряженности, определенные дифференцированием (1) по координатным осям.

Расчет наведенного заряда. Разобьем объект (включая молниеотводы) на стержневые элементы малой длины. Вектор наведенного заряда элементов объекта \mathbf{Q} связан с зарядом лидера q (суммой заряда головки и заряда, распределенным по длине лидера) матричным уравнением $\mathbf{A}\mathbf{Q} + \mathbf{B}q = 0$, где \mathbf{A} – квадратная матрица потенциальных коэффициентов между элементами объекта; \mathbf{B} – вектор-столбец потенциальных коэффициентов между лидером (сферической головкой и цилиндрической частью) и объектом; объект заземлен. Тогда вектор наведенного заряда $\mathbf{Q} = -\mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}q$.

Взаимные потенциальные коэффициенты α_{ij} матрицы \mathbf{A} между j -м стержнем-источником и средней точкой i -ого стержня (метод средней точки) определены в (1). Аналогично находим взаимные потенциальные коэффициенты вектора \mathbf{B} (между лидером и элементами объекта). Вклад головки лидера в потенциальные коэффициенты вектора \mathbf{B} учитываем по известной формуле потенциала точечного заряда.

Относительный наведенный заряд объекта

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

где $\mathbf{C} = (C_1, C_2, \dots, C_N)$ – вектор-строка, i -ый элемент которого равен сумме i -ого столбца матрицы \mathbf{A}^{-1} , N – число элементов дискретизации объекта с молниеотводами.

Таким образом, получены расчетные выражения для наведенного заряда. Обращение матрицы \mathbf{A} и расчет вектора \mathbf{C} производится один раз, что обеспечивает высокую производительность вычислений при многократных изменениях положения лидера молнии.

Построение зоны захвата молнии. Зона захвата – это совокупность положений головки лидера, создающего равный относительный наведенный заряд объекта с молниеотводами $-Q/q = const$, рассчитываемый по (2). Исследованы два подхода.

Первый способ. Будем искать решение нелинейного уравнения $Q(x, y, z) = C$ на регулярной сетке узлов, где Q – наведенный заряд, C – заданная константа. Тогда для каждого узла с заданными координатами x, y определению подлежит координата z , что требует расчетов функции в пробных точках. Сетка может включать десятки и сотни тысяч узлов. Таким образом, процесс очень трудоемкий. Его реализация возможна только благодаря существенному ускорению вычислений по (2).

Второй способ. 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, $\alpha = 0.5(\alpha_k + \alpha_{k+1})$ для метода трапеций. Начальную точку z_0 выбираем над вершиной молниеотвода на дистанции поражения D , где имеет место перегиб функции, поэтому $\alpha_0 = 0$ – удачное приближение угла. Направление касательной (угла α) в конце шага прогнозируется, а затем уточняется на основе расчетов наведенного заряда (2). Процесс заканчивается, если расстояние до земли становится меньше, чем до объекта или молниеотводов.

Построение силовых линий ЭСП, необходимых для расчета площади стягивания молнии, также сводится к задаче Коши. Наведенный заряд объекта пересчитывается на каждом шаге.

В завершении Главы сформулирован метод наведенного заряда (МНЗ).

Этап 1. Строится зона захвата из условия $-Q/q = const$ с использованием (2). Начальная точка находится над молниеотводом на дистанции $D = 10I^{0.65}$, где I – ток молнии.

Этап 2. Строится зона защиты на основе принципа эквидистантности. Для каждой точки зоны захвата рассчитывается минимальное расстояние до молниеотводов a и до объекта b и в случае, если $a > b$, то разряд происходит в объект. Если разрядов в объект нет, то он считается защищенным с надежностью P_n , соответствующей вероятности появления молнии с током заданной величины на дистанции поражения D . Зона защиты – это совокупность точек, для которых $a = b$.

Этап 3. Строится зона стягивания молнии. Из крайних точек зоны захвата строим силовые линии ЭСП, пока наблюдается их искривление, обусловленное наведенным зарядом объекта. Концы силовых линий (на одном уровне) объединяем в замкнутые контура, площадь которых дает площадь стягивания молнии S_a .

Этап 4. Рассчитывается грозопоражаемость наземного объекта по методике МЭЖ $N = p \cdot (6.7 \cdot T_d / 100) A_d \cdot 10^{-6} \cdot C_d$ [1/год], где $p = 1 - P_n$ – вероятность прорыва молнии (этап 2), $A_d = S_a$ – площадь стягивания (этап 3), T_d – число грозовых часов в данной местности, $C_d = 1$ поскольку расчеты площади стягивания производятся с учетом окружения объекта и рельефа местности.

В третьей главе решены практические задачи, посвященные расчетам площади стягивания молнии и зон защиты молниеотводов.

Влияние тока молнии на радиус стягивания стержневого молниеотвода.

Увеличение тока молнии (иначе увеличение заряда лидера) приводит к увеличению наведенного заряда объекта, что ведет к увеличению площади стягивания в МНЗ. При сравнении радиуса стягивания молниеотвода высотой 30 м при расчете разными методами видим (рисунок 3), что наименьшие значения дает МКС, наибольшие – формула Эриксона. Данные МНЗ имеют удовлетворительное совпадение с данными А.С. Гайворонского и МКС.

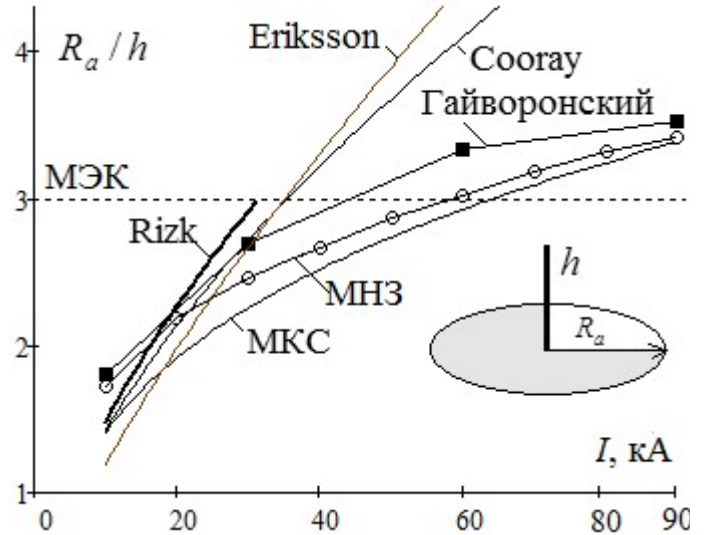


Рисунок 3 – Относительный радиус стягивания стержня высотой $h=30$ м в функции тока молнии

Зависимость площади стягивания молнии от диаметра молниеотвода. Увеличение диаметра (поперечного размера) молниеотвода увеличивает его наведенный заряд, что приводит к увеличению радиуса и площади стягивания.

Поперечный размер молниеотвода не самый значимый параметр – увеличение диаметра с 0.1 до 10 м (в 100 раз) приводит к увеличению площади стягивания только в 2 раза.

Влияние высоты стержневого молниеотвода на радиус стягивания. С увеличением высоты объекта относительный радиус стягивания R_a/h убывает, что согласуется с данными РД-99 и других исследователей (рисунок 4). Данные МЭК ($R_a/h=3$) применимы только для объектов высотой 20-30 м. Но и расчетные данные $R_a(h)$ могут потребовать корректировки, поскольку

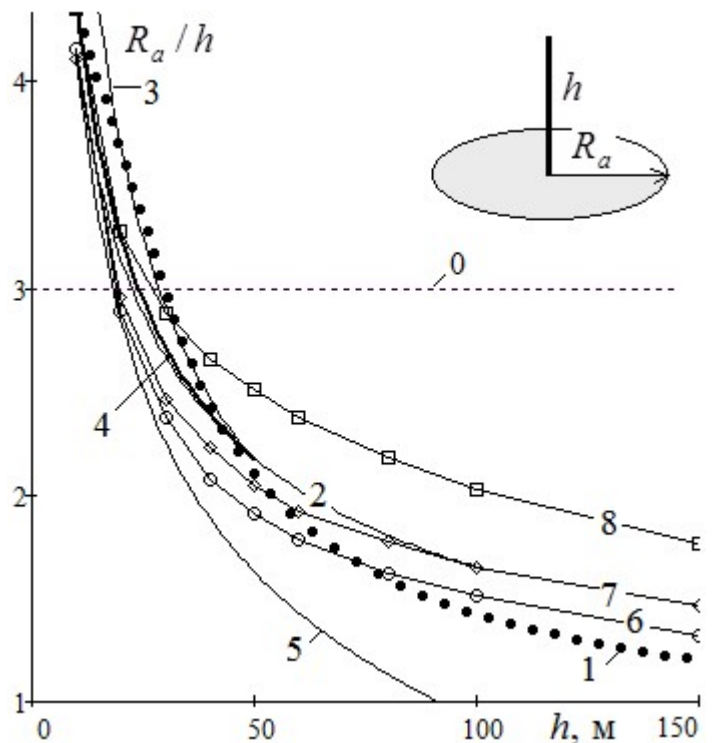


Рисунок 4 – Относительный радиус стягивания стержня при токе молнии 30 кА по данным: 0–МЭК, 1–РД-99, 2–Eriksson, 3–Rizk, 4–Cooray, 5–МКС; 6,7,8–МНЗ при диаметре стержня: 6– $d=0.1$ м, 7– $d=1$ м, 8– $d=10$ м

ку с увеличением высоты молниеотвода увеличивается поперечное сечение объекта и средние токи молнии, что увеличивает R_a .

Молниеотвод на вершине холма.

С увеличением уклона холма площадь стягивания возрастает практически линейно (рисунок 5), в то время как по МЭК площадь стягивания удваивается независимо от уклона. Для варианта (рисунок 5) двукратное увеличение площади стягивания имеет место при угле 7° . Таким образом, рельеф местности существенно влияет на площадь стягивания.

Во второй части Главы 3 рассчитаны зоны защиты молниеотводов. Для сравнения с действующими нормами молниезащиты ставится задача выбора высоты молниеотводов для защиты объектов разных размеров с различной надежностью.

Для одиночного молниеотвода МНЗ, российские нормы (РД, СО, ВСП) и МКС стандарта МЭК дают близкие результаты. Высота двойного молниеотвода по МКС больше, чем по российским нормам и МНЗ. МКС не учитывает взаимное влияние молниеотводов, отсюда избыточные решения. Молниеотводы, выбранные по МНЗ, ниже молниеотводов по ВСП, но выше, чем по СО и РД. Максимальная погрешность составляет 37% по сравнению с ВСП и 32% (с другим знаком) относительно СО и РД. Погрешности носят систематический характер. Эти выводы справедливы и для четырехкратного молниеотвода.

Зона защиты молниеотвода на склоне холма в настоящее время строится относительно перпендикуляра, проведенного из вершины молниеотвода на поверхность земли, т.е. смещена вверх холма. Аналогичный результат, обусловленный несимметрией наведенного заряда холма относительно молниеотвода, дает МНЗ.

МНЗ применим для высотных объектов. С увеличением высоты происходит плавное расширение зоны защиты и зоны стягивания молнии, что объясняется увеличением наве-

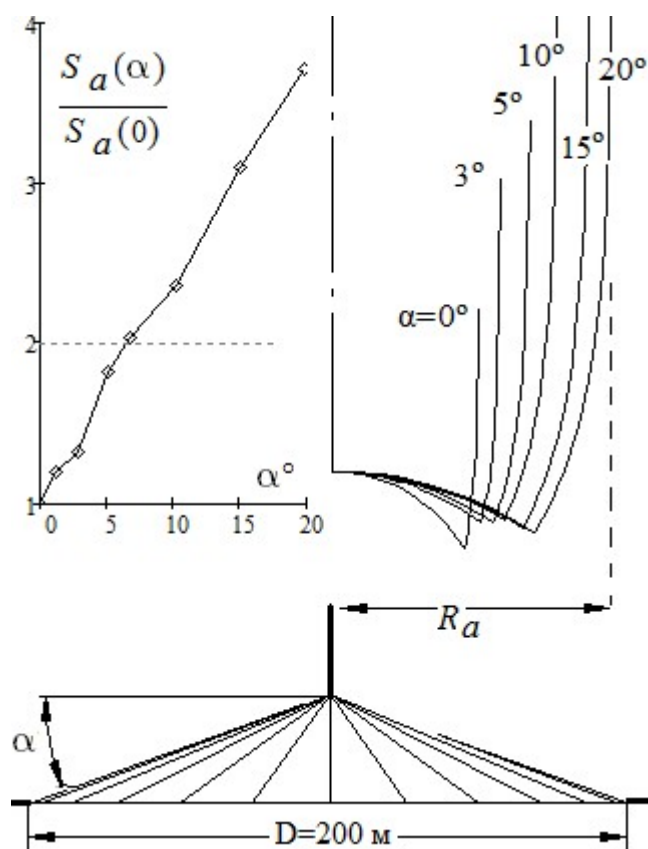


Рисунок 5 – Радиус и площадь стягивания молниеотвода высотой 30 м, диаметром 0.2 м на вершине холма (конус) с уклоном α при токе молнии 10 кА

денного заряда объекта. Для Останкинской башни зона защиты на уровне земли по МНЗ (рисунок 6) близка к данным РД (зона Б) при токе молнии 10 кА.

При среднем токе молнии 30 кА радиус стягивания Останкинской башни составляет 500 м, что при 25 грозовых часах дает грозопоражаемость (нисходящими молниями) 1.3 в год. Этот результат не противоречит данным наблюдений.

В результате построения зоны защиты типового резервуара РВСП 50000 четырехкратным молниеотводом показано, что резервуар (и зона выхлопа газов) защищен по РД (зона А), СО и стандарту ОАО «Транснефть» (РД-91.020.00-КТН-276-07) с надежностью $P_n=0.99$. По ВСП резервуар защищен только на уровне $P_n=0.9$ (без зоны выхлопа). Близкий результат получаем и по МНЗ при $P_n=0.91$.

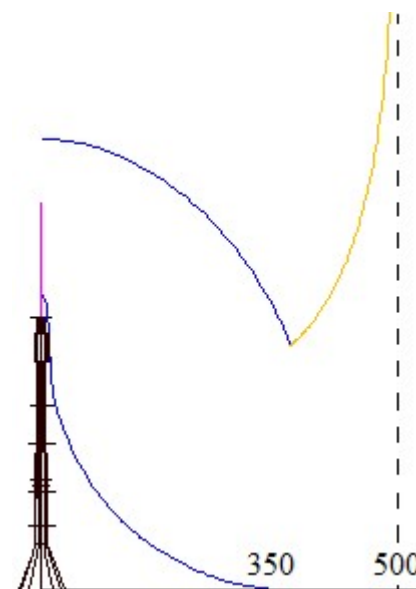


Рисунок 6 – Зоны защиты, захвата и стягивания Останкинской башни при токе молнии 30 кА

Резервуар обладает большим наведенным зарядом, способным существенно исказить (стянуть) силовую линию ЭСП вблизи резервуара. Показано, что молнии с малыми токами (малой дистанцией поражения) могут вызывать боковые удары, следовательно, быть более опасными, чем сильные молнии, которые перехватываются молниеотводами.

Молниезащита нефтехранилища «Конда» до аварии августа 2009 г., вызванного ударом молнии, была выполнена тросовыми (незамкнутыми) молниеотводами по РД (зона А). Расчеты по МНЗ допускают возможность бокового удара молнии в резервуар с очень малым током (до 3 кА). Использование замкнутой тросовой защиты повышает надежность, но приводит к увеличению площади стягивания молнии.

В Заключение подведены итоги диссертационной работы. **В Приложении А** приведены зоны защиты действующих стандартов молниезащиты. **В Приложении Б** приведена Mathcad-программа расчета зоны захвата и зоны стягивания молнии. **В Приложении В** представлены Акты о внедрении результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Разработан метод наведенного заряда, позволяющий исследовать процессы электростатического притяжения (стягивания) лидера молнии наземными объектами. В основе метода модель усредненного лидера молнии, предложенная Э.М. Базеляном, и принцип построения зоны захвата молнии по критерию равного относительного наведенного заряда, предложенный Г.Н. Александровым. Проведенные исследования подтвердили

правомочность этого критерия, а его физический смысл понятен в модели усредненного лидера, движущегося по направлению силовых линий ЭСП. Тогда, по законам электростатики, чем больше наведенный заряд объекта, тем больше силовых линий с лидера молнии замыкается на зоне захвата вокруг объекта.

Расчет наведенного заряда сложного объекта при изменении положения лидера молнии, производится сотни тысяч раз. Стандартные подходы к расчету ЭСП здесь невозможны. Совершенствование методов анализа и синтеза ЭСП, в виде вывода формулы для расчета наведенного заряда, исследования алгоритмов синтеза 3D поверхности (зоны захвата) по условию, заданному вне ее, условий единственности и существования, а также способа построения силовых линий при изменяющемся заряде источника, позволили добиться вычислительной эффективности, необходимой для решения практических задач.

Предложен новый принцип исследования зоны стягивания молнии, исключаящий анализ всей расчетной области, что вновь повышает быстродействие. Силовые линии ЭСП проводятся только через крайние точки зоны захвата до тех пор, пока заметно их искажение наведенным зарядом наземного объекта. Верхние концы силовых линий замыкаются, образуя контур (контура), что позволяет определить площадь стягивания молнии.

Способен ли наведенный заряд объекта влиять на ориентировку лидера молнии – один из центральных вопросов молниезащиты. Исследование процессов стягивания, выполненное на модельных задачах, показало, что для наземных объектов ограниченной высоты $h < D$ (D – дистанция поражения) электростатическое притяжение незначительно, им можно пренебречь. Это объясняется тем, что наведенный заряд объекта в значительной мере компенсируется зеркальным зарядом. Для высоких объектов $h > D$ подобной компенсации не происходит, поэтому электростатическое притяжение лидера следует учитывать. Для резервуаров опасны молнии с малыми токами, поскольку весьма значительный наведенный заряд при $h > D$ способен существенно исказить силовую линию, что приводит к боковым разрядам.

Исследовано влияние высоты молниеотвода, его диаметра, тока молнии и рельефа местности на площадь стягивания. Полученные результаты сопоставлены с данными нормативных документов и данными других исследователей. Подтверждена сильная зависимость радиуса и площади стягивания от высоты объекта и тока молнии. Влияние поперечных размеров молниеотвода существенно слабее, но с ним надо считаться для высоких объектов. Рельеф местности сильно влияет на площадь стягивания молниеотвода на вершине холма, но является незначительным для молниеотвода на склоне холма.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Публикации в ведущих научных журналах из перечня ВАК

1. Шишигин, С.Л. Методы расчета молниезащиты на основе электростатической модели стягивания лидера молнии / С.Л. Шишигин, В.Е. Мещеряков // Письма в ЖТФ. – 2015. – №6 Том 41. – С. 34 – 41.
2. Шишигин, С.Л. Расчет зон защиты стержневых молниеотводов методом наведенного заряда / С.Л. Шишигин, В.Е. Мещеряков, Д.С. Шишигин // Электричество. – 2015. – №8. – С. 4 – 9.
3. Шишигин, С.Л. Расчет площади стягивания молниеотводов методом наведенного заряда / С.Л. Шишигин, В.Е. Мещеряков, Д.С. Шишигин // Электричество. – 2016. – №6. – С. 10 – 15.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

4. Мещеряков, В.Е. Компьютерная программа ALL ZONES: свид. о гос.рег.№2016616781. – Заявка 2016614199. Дата поступления 25 апреля 2016 г. Зарег. 20 июня 2016 г.

Прочие работы по теме диссертации

5. Шишигин, С.Л. Ориентировка молнии и молниезащита по Г.Н. Александрову / С.Л. Шишигин, В.Е. Мещеряков // IV Международная конференция по молниезащите.: сборник докладов. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2014 с.34 - 42.
6. Шишигин, С.Л. Расчет площади стягивания молнии по наведенному заряду наземного объекта / С.Л. Шишигин, В.Е. Мещеряков // V Международная конференция по молниезащите.: сборник докладов. – СПб., 2016 с.373-380.
7. Мещеряков, В.Е. Расчет грозопоражаемости наземного объекта по его наведенному заряду / В.Е.Мещеряков, С.Л. Шишигин // Труды III Всероссийской НТК «Техно-ЭМС 2016» М.: Грифон, 2016 – с.17-20.
8. Мещеряков, В.Е. Совершенствование методов расчета молниезащиты / В.Е.Мещеряков // Труды II Всероссийской НТК «Техно-ЭМС 2015» М.: Грифон, 2015 – с.29-31.
9. Мещеряков, В.Е. Имитационное моделирование грозопоражаемости наземных объектов / В.Е. Мещеряков // Наука и инновации в технических университетах: мат. 9 Всеросс. форума студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: Изд-во Политех.ун-та, 2015 –с.29.
10. Шишигин, С.Л. Модель ориентировки молнии в задачах молниезащиты / С.Л. Шишигин, В.Е. Мещеряков // Информатизация процессов формирования открытых систем на основе САПР, АСНИ, СУБД и систем искусственного интеллекта: Материалы 8-й межд. научно-технической конференции – Вологда: ВоГУ, 2015 - с.218-221.

11. Мещеряков, В.Е. Анализ и совершенствование методик молниезащиты / В.Е.Мещеряков // Перспективное развитие науки, техники и технологий: материалы 3-й Межд. науч.-практ. конф. Юго-Зап. гос. ун-т. В 3 томах, Том 2, Курск, 2013. - с.345 – 348.
12. Шишигин, С.Л. Расчет молниезащиты электрической подстанций / С.Л. Шишигин, В.Е. Мещеряков // Вузовская наука - региону: материалы XII Всероссийской научно-технической конференции.- Вологда: ВоГУ, 2014 - с. 15-17.
13. Мещеряков, В.Е. Анализ и совершенствование систем молниезащиты / В.Е.Мещеряков // Материалы региональной научной конференции VIII ежегодной научной сессии аспирантов и молодых ученых: в 2-х т. /Мин-во образования и науки РФ; Вологод. гос. ун-т. – Вологда: ВоГУ, 2014 – Т.1: Технические науки. Экономические науки. – с.24-28.
14. Мещеряков, В.Е. Расчет молниезащиты объекта с учетом его наведенного заряда / В.Е.Мещеряков // Молодые исследователи – регионам: материалы международной научной конференции. В 3-х т. – Вологда: ВоГУ, 2014. – Т. 1.с.131-133.
15. Мещеряков, В.Е. Повышение надежности молниезащиты объектов ОАО «ТРАНС-НЕФТЬ» / В.Е.Мещеряков // XV научно-техническая конференция молодежи АО «Транснефть-Север»: мат.конф. – Ухта: УГТУ, 2014 - с.31 - 32.
16. Мещеряков, В.Е. Компьютерное моделирование системы молниезащиты на объектах энергетики / В.Е.Мещеряков // Материалы VII ежегодной научной сессии аспирантов и молодых ученых: в 2-х т. – Вологда: ВоГУ, 2013 – Т.1: технические науки с.61-65.
17. Шишигин, С.Л. Методы имитационного моделирования в задачах молниезащиты / С.Л. Шишигин, В.Е. Мещеряков, Д.С. Шишигин // Информатизация процессов формирования открытых систем на основе САПР, АСНИ, СУБД и систем искусственного интеллекта: Материалы 7-й межд. науч.-техн. конференции – Вологда: ВоГТУ, 2013 с.218-221.
18. Мещеряков, В.Е. Зона защиты молниеотвода с учетом заряда защищаемого объекта / В.Е.Мещеряков // Молодые исследователи – регионам: материалы международной научной конференции. В 2-х т. – Вологда: ВоГТУ, 2013. – Т. 1.с.152-153.
19. Мещеряков, В.Е. Методы расчета зон защиты молниеприемников / В.Е.Мещеряков // Материалы VI ежегодной научной сессии аспирантов и молодых ученых по отраслям наук: в 2-х т. – Вологда: ВоГТУ, 2012. – Т. 1: Технические науки. - с.102-106.
20. Шишигин, С.Л. Зоны защиты молниеотводов: учебное пособие / С.Л. Шишигин, Мещеряков В.Е.;М-во обр. и науки РФ, Вологод.гос.ун-т. – Вологда: ВоГУ, 2016. – 79 с.