

01;04
©1995 г.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ЛИДЕРНОГО РАЗРЯДА И МОЛНИЕПОРАЖАЕМОСТИ ИЗОЛИРОВАННЫХ И ЗАЗЕМЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Н.И.Петров, Г.Н.Петрова

Всесоюзный электротехнический институт
Высоковольтный научно-исследовательский центр,
143500, Истра-2, Московская область, Россия
(Поступило в Редакцию 13 января 1994 г.
В окончательной редакции 16 августа 1994 г.)

Предложена методика расчета вероятностей поражения изолированных и заземленных объектов и прорыва молнии на защищаемые объекты, учитывающая характеристики ветвления и искривления траектории молнии и встречного разряда с объектов. Методика основана на применении теории фракталов для моделирования траектории распространения лидерного разряда в разрядном промежутке с произвольной геометрией с учетом влияния полярности воздействующего напряжения. Исследовано рассеивание точек поражения на плоскости при наличии и отсутствии на ней стрелы. Проведено моделирование поражаемости наземных объектов разрядами длинной искры и молнии с учетом влияния полярности лидера и встречного разряда. Показано, что вероятность прорыва положительной молнии существенно больше по сравнению с отрицательной молнией. Исследована эффективность молниеотвода с изменяющейся высотой. Показано, что эффективность такого молниеотвода растет при уменьшении пороговой напряженности электрического поля, при которой он срабатывает.

Введение

В связи с развитием техники и широким оснащением ее высокочувствительной элементарной базой электроники все более остро встают вопросы повышения молниезащищенности различных объектов. Методика расчета зон защиты молниеотводов и вероятностей прорыва молнии на защищаемые объекты в настоящее время еще не разработана. Обычно пользуются зонами защиты молниеотводов, определенными экспериментально на лабораторных моделях. Однако определение вероятностных характеристик молниепоражаемости только на основе лабораторных испытаний является неполным. Все большее значение приобретает исследование молниепоражаемости на основе расчетных моделей, что позволяет имитировать широкий диапазон изменения параметров и требует меньше временных и материальных затрат.

Существуют две основные методики, используемые в настоящее время для расчетов вероятностей поражения объектов: электрогеометрическая и вероятностная [1,2]. Основы этих методов предлагались еще в ранних работах [3,4], посвященных оценке защитного действия молниеотводов. Однако обе эти методики распространяются только на нисходящие молнии и не учитывают случайного характера траектории распространения молнии.

При разряде молнии в наземные объекты большую роль играет продвижение встречных лидеров. Поэтому представляет интерес разработка расчетных методик, позволяющих учесть развитие встречных разрядных процессов. В настоящее время на основе математических моделей разработаны расчетные методики, позволяющие определить вероятность прорыва молнии в защитную зону [5,6]. В [7] предлагается метод непосредственного расчета поражения молнией наземных объектов, учитывающий влияние заряда, распределенного по каналу лидера. Критерием поражения объекта молнией является при этом развитие встречного лидера. Однако эти методики построены на основе большого количества допущений, в частности, они не учитывают угол наклона лидера относительно земли и характеристики его ветвления.

В [8] для моделирования искривления траектории молнии используется метод Монте-Карло. Однако эта модель содержит слишком много параметров и полученные результаты не всегда согласуются с известными экспериментальными данными. В частности, с увеличением перенапряжения в промежутке траектория лидера выпрямляется, что противоречит экспериментальным результатам и имеет место лишь в финальной стадии развития лидера.

В настоящей работе предлагается методика расчета вероятностей поражения изолированных и заземленных объектов и прорыва молнии на защищаемые объекты, учитывающая характеристики ветвления и искривления траектории молнии и встречного разряда с объектов. Методика основана на применении теории фракталов для моделирования траектории распространения лидерного разряда в разрядном промежутке с произвольной геометрией с учетом полярности воздействующего напряжения [9-13]. В отличие от существующих методик предлагаемая методика позволяет учитывать пространственно-временные изменения геометрии промежутка и распределения электрического поля в процессе ориентировки молниевоего разряда, что значительно расширяет круг рассматриваемых задач.

Методика расчета

В предлагаемой методике используются общепризнанные представления о лидерном разряде, включающие случайность как фундаментальное свойство лидерного разряда и влияние электрического поля, определяющего процесс распространения лидера. Особенность предлагаемой модели состоит в том, что эти два свойства лидерного разряда учитываются не по отдельности, а в тесной взаимосвязи друг с другом. Именно учет обратного влияния этих двух факторов друг на друга приводит к фрактальной структуре траектории пробоя.

Основными параметрами, характеризующими данную модель, являются E^* — критическая напряженность электрического поля, при

которой выполняются условия для распространения лидера; E_k — напряженность электрического поля в канале лидера; U_0 — потенциал электрода; H — длина промежутка; η — параметр, характеризующий чувствительность вероятности образования ступеньки лидера к напряженности электрического поля [11,12]. Напряженность электрического поля определяется из решения уравнения Пуассона с учетом внедренного пространственного заряда. Вероятности поражения объектов определяются из отношения числа попадания разрядов к общему числу разрядов.

Развитие встречных разрядных процессов определяется условием для распространения лидера противоположной к основному разряду полярности. Так, если критическая напряженность электрического поля E^* для положительного лидера равна $E_+^* = 5$ кВ/см, то для отрицательного лидера она принимается равной $E_-^* = 10$ кВ/см. В отличие от методик, в которых лидер распространяется в направлении наибольшего усиления электрического поля [14], в рассматриваемой модели направление распространения лидера может существенно отклоняться от силовых линий электрического поля. При этом вероятностный характер ориентировки лидера сохраняется вплоть до финальной стадии.

Физическая модель формирования траектории лидерного разряда

Одной из основных особенностей лидерного разряда является случайное поведение его траектории распространения. Известно, что траектория лидера представляет собой сложную искривленную и разветвленную картину и может существенно отклоняться от силовых линий электрического поля в разрядном промежутке. Случайность траектории вносит значительный вклад в разброс длины канала пробоя длинных промежутков, а также в ориентировку лидера в пространстве. Систематические исследования закономерностей появления искривлений и ветвлений траектории лидера в настоящее время отсутствуют. Попытки моделирования случайного распространения разряда на основе традиционных математических методов не привели к успеху. В последние годы стало известно, что разветвленные фигуры траекторий пробоя допускают описание как объекта нецелой размерности — фрактала [15,16]. Такой подход позволяет ввести количественные характеристики, определяющие внутренние свойства разряда, и объяснить ряд его особенностей, в частности, выявить закономерности появления разветвлений и искривлений канала. Модель, приводящая к фрактальной структуре электрического разряда, впервые была рассмотрена в [16]. В [17] эта модель использована для анализа фигур Лихтенберга, образующихся на поверхности стекла в элегазовой среде. В [9] стохастическая модель применялась для рассмотрения искривления и ветвления лидерного разряда в длинных промежутках. Были получены имитационные картины траекторий пробоя для различных значений воздействующего напряжения и изучены их статистические характеристики. В [10,13] фрактальный подход был предложен для моделирования траектории молниевых разрядов, а в [11] — для моделирования молниепоражаемости изолированных и заземленных объектов.

Опишем кратко модель пробоя. Распространение разряда рассматривается как дискретизированный процесс. Разрядный промежуток разбивается координатной сеткой со стороной квадрата, равной длине ступени $l_{ст}$. Точки координатной сетки, через которые проходит разряд, принимаются находящимися при потенциале U_0 , уменьшенном на величину падения напряжения вдоль канала. Величина падения напряжения определяется длиной канала и напряженностью электрического поля в канале E_k . Вероятность пробоя связи пропорциональна локальному электрическому полю в области фронта в степени η .

$$p \propto E^\eta, \quad \eta > 0. \quad (1)$$

На каждом шаге развития разряда потенциалы U_{ij} в узлах решетки определяются путем решения методом итераций уравнения Лапласа $\nabla^2 U = 0$ по формуле

$$U_{ij} = \frac{1}{4} (U_{i+1,j} + U_{i-1,j} + U_{i,j+1} + U_{i,j-1}). \quad (2)$$

Аналогичная процедура повторяется до тех пор, пока напряженность поля для всех возможных направлений развития разряда не уменьшится до такой величины, что все вероятности не станут равными нулю. Фрактальную размерность D можно определить, вычисляя число пробитых связей M , содержащихся в сфере радиуса R при различных R [15],

$$M(R) \propto \int \rho(r) r^{(d-1)} dr \propto R^D, \quad (3)$$

где d — размерность пространства.

Отсюда следует, что плотность распределения зарядов $\rho(r)$ удовлетворяет закону

$$\rho(R) \propto r^{-(d-D)}. \quad (4)$$

Геометрическая картина траектории разряда зависит от значений исходных параметров модели. Представляет интерес исследование характеристик разряда при изменении начальных параметров и сравнение полученных результатов с экспериментальными данными. Это позволило бы оценить степень соответствия предлагаемой модели реальной искре и молнии и определить возможности ее применения для решения практических задач.

Основные параметры, используемые в рассматриваемой модели, поддаются прямому измерению и в случае лабораторных промежутков хорошо известны из экспериментов. В частности, напряженность электрического поля в стримерной зоне положительного лидера составляет $E_{st} \cong 5$ кВ/см и практически не зависит от геометрии промежутка, параметров воздействующего напряжения и внешних условий [18]. Напряженность электрического поля в канале лидера может быть оценена из измерений напряжения пробоя. Ниже приводятся результаты исследования зависимостей характеристик разряда от выбора исходных параметров.

1) Влияние перенапряжения, формы воздействующего импульса на напряжения и геометрии промежутка. Одним из параметров, влияющих на формирование лидерного разряда и изменяющихся в широких пределах, является степень перенапряжения в промежутке. Степень перенапряжения определяется значением воздействующего напряжения U_0 . В зависимости от значения U_0 разряд может быть завершённым или незавершённым. При перенапряжении имеет место 100 %-ный пробой промежутка. В качестве примера рассмотрим разрядный промежуток с коаксиальной геометрией с элегазовым наполнением при атмосферном давлении. Напряженность электрического поля в канале принимается равной $E_k = 7$ кВ/см, критическая напряженность поля $E^* = 3.5$ МВ/м, протяженность ступени лидера $l = 2$ см, параметр $\eta = 0.25$. Имитационные картины пробоев, полученные по описанной выше схеме, представлены на рис. 1, а, б. Значения воздействующего напряжения равны $U_0 = 0.3$ и 0.8 МВ соответственно. Радиус внешнего электрода равен $R = 20$ см, радиус внутреннего электрода $r_0 = 2$ см. Из рисунков видно, что степень сложности картины, определяющая фрактальную размерность, возрастает с увеличением прикладываемого напряжения. Расчеты показывают, что количество пробитых ступеней растет с увеличением воздействующего напряжения. При отсутствии перенапряжения пробой может быть как завершённым, так и незавершённым, т.е. имеет вероятностный характер.

На рис. 1, в, г представлены траектории лидерных разрядов в воздушном промежутке сфера-плоскость длиной $H = 10$ м ($E_k = 0.05$ МВ/м, $E^* = 0.5$ МВ/м, $\eta = 0.25$). Как видно из рисунков, степень искривления возрастает с ростом прикладываемого напряжения. Кроме того, при дальнейшем росте перенапряжения появляются ветви канала пробоя. Количество ветвей также растет с увеличением степени перенапряжения. Таким образом, увеличение перенапряжения в промежутке приводит к росту степени искривления и ветвления канала пробоя.

Полученные картины и значения напряжений пробоя хорошо согласуются с экспериментальными данными. Увеличение количества ветвей разряда или фрактальной размерности с ростом прикладываемого напряжения было обнаружено также экспериментально в работе [19], где исследовался разряд на поверхности воды с точечного электрода.

Как правило, прикладываемое напряжение имеет импульсную форму. Поэтому практический интерес представляет исследование влияния крутизны фронта импульса на геометрическую форму траектории разряда и время формирования пробоя. Для учета крутизны импульса вводится параметр времени t , который изменяется дискретно с шагом $\Delta t = l_0/v_l$, где l_0 — длина ступени лидера, v_l — скорость лидера. Так, при длине ступени лидера $l_0 = 1$ м и скорости лидера $v_l = 2$ см/мкс получаем $\Delta t = 50$ мкс. По известной крутизне импульса напряжения находится приращение потенциала ΔU на каждом шаге времени Δt . При достижении потенциала U_0 в момент t_0 с высоковольтного электрода стартует лидер. Далее на каждом шаге удлинения лидера к потенциалу электрода прибавляется величина ΔU . Проведенные таким образом исследования показывают, что геометрическая картина траектории лидера зависит от крутизны импульса. Так, при пологом

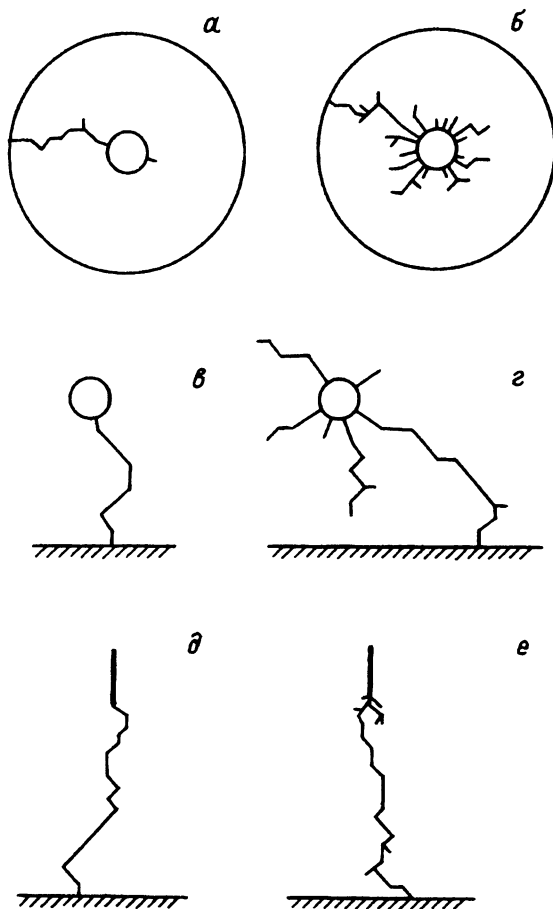


Рис. 1. Траектории лидерного разряда в промежутках с коаксиальной геометрией (а,б) и сфера-плоскость (в,г) при различных значениях действующего напряжения, траектория разряда при прямоугольной форме импульса напряжения (д) и при пологом фронте импульса напряжения (е).

фронте импульса напряжения лидер не может сразу продвинуться в глубь промежутка, а имеет место "лидерная" корона (рис. 1,е). В случае же прямоугольного импульса распространение лидера происходит сразу вглубь (рис. 1,д).

На траекторию лидера влияет также геометрия разрядного промежутка. Если в случае сферического электрода с большим радиусом имеет место "лидерная" корона с поверхности электрода, то в случае стрелевого электрода разряд стартует сразу. Этот эффект можно объяснить влиянием неоднородности поля на развитие лидера. Отметим, что в случае сферического электрода большого радиуса зарождение лидера всегда приводит к пробую, т.е. пробой происходит с перенапряжением.

2) Зависимость геометрической картины траектории разряда от напряженности электрического поля в канале E_k и критической напряженности поля E^* . При заданном потенциале элек-

трода U_0 потенциал на фронте лидера определяется напряженностью электрического поля в канале E_k . Величина выносимого в промежуток потенциала равна

$$U = U_0 - E_k I_k. \quad (5)$$

Из расчетов следует, что, увеличивая E_k , при сохранении значений параметров E^* , η , U_0 , L_s , мы получаем все более упрощенную картину траектории разряда вплоть до незавершенного разряда даже при достаточно больших значениях U_0 в промежутке. При уменьшении E_k сложность картины возрастает.

При уменьшении значения пороговой напряженности E^* (U_0 , E_k , η , $L_s = \text{const}$) сложность траектории разряда возрастает, поскольку увеличивается количество возможных направлений развития разряда.

3) Зависимость степени ветвления и искривления траектории лидера от параметра η . Параметр η связывает вероятность выбора направления распространения разряда p с напряженностью электрического поля E на фронте лидера $p \simeq E^\eta$. Параметр η отражает физические свойства процесса пробоя и зависит лишь от давления и состава газа. Как правило, значение η определяется из сравнения полученных имитационных картин с экспериментальными картинками траекторий пробоя. Так, в случае элегаза принимается $\eta = 1$ [17].

Исследования показывают, что при больших η траектория разряда имеет тенденцию к предпочтительному росту в направлении сильного поля. При малых η получаются разветвленные структуры, экранирующие внешнее поле.

4) Влияние объемного заряда. Различия между моделями Лапласа и Пуассона. В модели Лапласа при расчете траектории лидерного разряда заряд канала пробоя, искажающий электрическое поле, учитывается с помощью введения напряженности электрического поля в канале E_k . При этом потенциал находится из решения уравнения

$$\Delta\varphi = 0. \quad (6)$$

Если же кроме напряженности электрического поля в канале E_k учитывается дополнительный объемный заряд, то при расчете поля решается уравнение Пуассона

$$\Delta\varphi = -4\pi\rho. \quad (7)$$

Такая модель называется моделью Пуассона.

Расположенный на фронте лидера избыточный заряд усиливает поле и влияет на траекторию распространения лидера. При учете пространственного заряда на фронте лидера геометрическая структура траектории пробоя становится сложнее. Как следует из полученных результатов, увеличение пространственного заряда на фронте лидера влияет аналогично увеличению прикладываемого напряжения или уменьшению напряженности поля в канале.

Отметим, что учет пространственного заряда на фронте лидера соответствует учету влияния пространственного заряда стримерной зоны. При учете этого заряда напряжение пробоя промежутка уменьшается по сравнению с напряжением пробоя, полученным при использовании модели Лапласа, и становится ближе к реальным значениям пробивных напряжений.

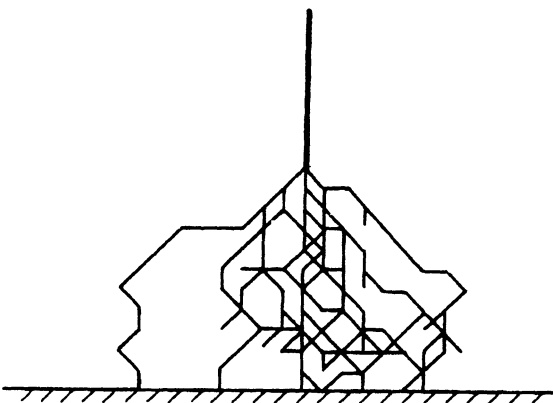


Рис. 2. Траектории разрядов в промежутке стержень-плоскость длиной $H = 10$ м при одинаковых исходных данных, наложенные друг на друга.

5) Статистические характеристики траектории лидерного разряда. В рассматриваемой модели распространение лидерного разряда происходит по случайной траектории даже при одинаковых начальных условиях. Это приводит к разбросу параметров траектории разряда. На рис. 2 представлены траектории разрядов при одинаковых начальных условиях, наложенные друг на друга. Видно, что пространство, занятое траекториями пробоев, имеет конусообразную форму. В качестве параметров, характеризующих траекторию разряда, могут быть рассмотрены длина траектории L и ее статистический разброс σ_L . Представляет интерес исследование зависимостей этих величин от начальных условий, в частности от длины промежутка и степени перенапряжения. Полезную информацию содержат также коэффициенты асимметрии κ_3 и эксцессии κ_4 , определяющие вид функции распределения $w(L)$ по длинам траекторий. Отметим, что коэффициент асимметрии κ_3 задает отклонение функции распределения от гауссовой формы, а коэффициент эксцессии κ_4 — форму кривой функции распределения в окрестности средней длины L . При $\kappa_4 > 0$ распределение $w(L)$ является более острым и узким, чем гауссовское. При $\kappa_4 < 0$, наоборот, более плоским, чем гауссовское. Расчеты показывают, что при увеличении длины промежутка средняя длина траектории L возрастает, а разброс σ_L не имеет явной зависимости от длины промежутка, причем функция распределения $w(L)$ по длинам траекторий имеет не гауссову, а асимметричную форму. В трехмерном случае средняя длина канала пробоя возрастает по сравнению с двумерным случаем вследствие появления пространственного искривления. Статистический разброс длины траектории при этом существенно не изменяется.

6) Рассеивание точек поражения на плоскости. Одной из характеристик разряда является рассеивание точек поражения на плоскости. В качестве примера рассмотрим разрядный промежуток стержень-плоскость в трехмерном случае (рис. 3,а). Распределение точек поражения при наличии на плоскости стержня на осевой линии промежутка представлено на рис. 3,б. Как видно, существует область (зона защиты молниеотвода), которая не поражается разрядами. На рис. 3,в представлена картина поражаемости плоскости при отсутствии стержня на ней. Функция распределения вероятностей точек поражения на плоскости (вероятность попадания разряда в круг с

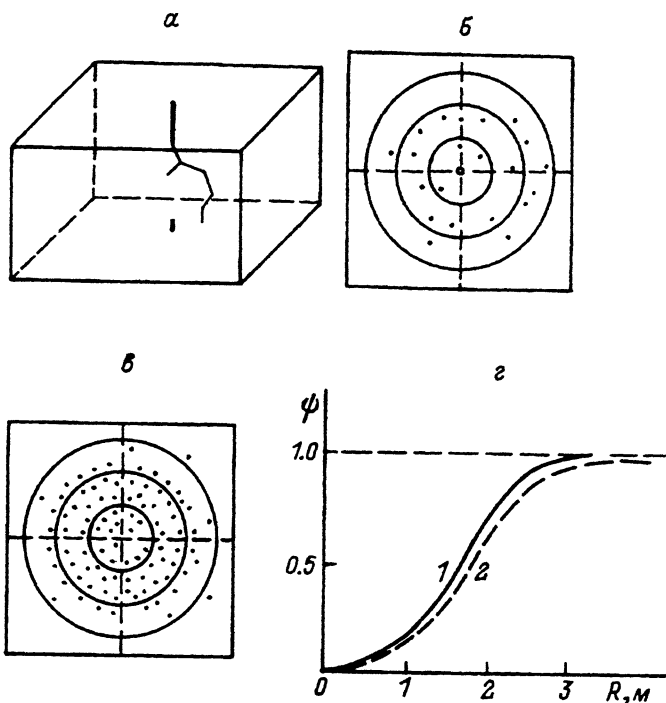


Рис. 3. Рассеивание точек поражения на плоскости $H = 6$ м
 а — траектория разряда в промежутке стержень–плоскость; б, в — разброс точек поражения на плоскости при наличии на ней стержня и при отсутствии стержня; г — функция распределения вероятностей точек поражения на плоскости: 1 — $U_0 = 1.5$, 2 — 1.6 МВ.

радиусом R) представлена на рис. 3, г. Из рисунка видно, что функция распределения вероятностей точек поражения ψ имеет гауссов вид. С ростом перенапряжения радиус рассеивания точек поражения на плоскости увеличивается (рис. 3, г). Отметим, что аналогичная картина имеет место в экспериментах [20].

Ориентировка лидера на заземленные объекты

Определение вероятностей прорыва молний на защищаемые объекты является основной задачей молниезащиты. Представляет практический интерес исследование вероятностей прорыва разрядов молнии на защищаемые объекты при различных значениях высоты молниеотвода и расстояния между объектом и молниеотводом. В лабораторных условиях такие эксперименты были проведены в [21]. Ниже приводятся результаты математического моделирования поражаемости наземных объектов лидерным разрядом.

1) Влияние полярности лидера и встречного разряда. Влияние полярности лидера на вероятность поражения объектов обусловлено различием условий для распространения положительной и отрицательной молний. Известно [18, 22], что напряженность электрического поля в стримерной зоне положительного лидера составляет $E_{st} \approx 5$ кВ/см, а напряженность поля в стримерной зоне от-

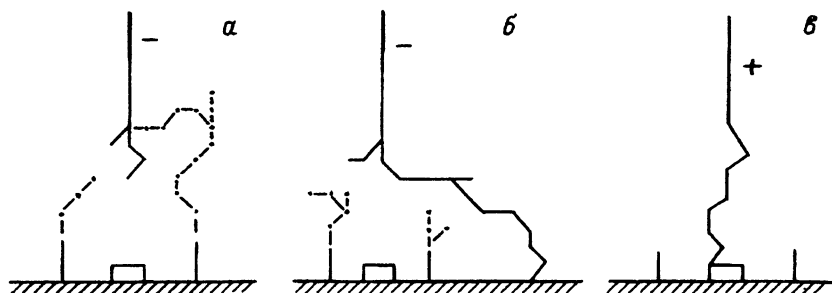


Рис. 4. Ориентировка отрицательного лидера (а,б) и положительного лидера (в) на защищаемый объект:

Сплошные линии — нисходящий разряд, пунктир — встречный (восходящий) разряд.

рицательного лидера равна $E_{st} \approx 10$ кВ/см. Это приводит к тому, что условия для развития встречного разряда с наземных объектов при отрицательной полярности нисходящей молнии облегчены. Поэтому отрицательная молния преимущественно ориентируется на наиболее возвышающийся над поверхностью земли объект. При положительной же полярности ориентировка молнии носит более случайный характер. Эффективность молниеотводов при этом резко падает. Так, вероятность прорыва положительной молнии в случае, представленном на рис. 4, в 3–5 раз больше по сравнению с отрицательной полярностью. Высота молниеотводов h_m принималась равной 20, 30, 40 м соответственно, расстояние x между молниеотводом и объектом изменялось от 10 до 40 м. Вероятность поражения объекта падает с увеличением высоты молниеотводов и растет при увеличении расстояния x . Так, при $h_m = 30$ м вероятность поражения объекта положительной молнией составила $P_0 = 0.27$ при $x = 20$ м и $P_0 = 0.55$ при $x = 30$ м. Соответствующие вероятности поражения отрицательной молнией составили лишь $P_0 = 0.054$ и 0.18 . Вероятность поражения объекта положительной молнией при $h_m = 40$ м и $x = 20$ м составила $P_0 = 0.208$. На рис. 4, а, б и в представлены типичные траектории разрядов молний отрицательной и положительной полярности соответственно. Из рисунков видно, что в случае отрицательной полярности существенную роль в ориентировке молнии играют встречные разряды с заземленных объектов. Поскольку вероятность прорыва отрицательных молний меньше по сравнению с положительной полярностью, то моделирование молниепоражаемости целесообразно проводить при положительной полярности разряда. Отметим, что необходимость различать защитное действие молниеотводов в отношении нисходящих и восходящих молний подтверждает также результаты наблюдений за поражаемостью молний Останкинской телебашни [23]. Однако это справедливо лишь при наличии молниеотводов или выступающих частей на объекте.

Известно, что лидер молнии реагирует на заземленные объекты лишь с некоторого критического расстояния — высоты ориентировки или так называемого расстояния поражения. Высота ориентировки зависит как от параметров молнии, так и геометрии объекта. В частности, развитие встречного разряда с объекта начинается значительно раньше в случае объектов с резко неоднородными выступающими частями.

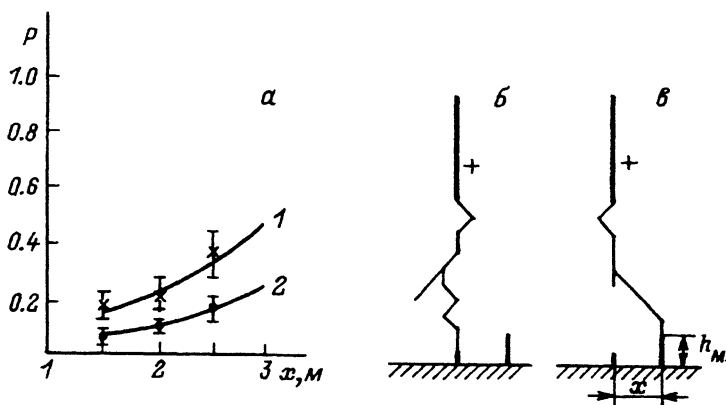


Рис. 5. Зависимости вероятностей прорыва разрядов на защищаемый объект от расстояния между объектом и молниеотводом (а) и характерные траектории разрядов (б, в):

а: h_m , м: 1 — 2, 2 — 3.

2) Расчет вероятностей прорыва разряда на защищаемые объекты. Практический интерес представляет исследование возможностей прорыва разрядов на защищаемые объекты при различных значениях высоты молниеотвода h_m и расстояния между объектом и молниеотводом x . На рис. 5, а представлены результаты расчетов вероятностей прорыва разрядов на защищаемый объект при положительной полярности воздействующего напряжения в промежутке стержень–плоскость длиной $H = 10$ м. Наземный объект моделировался вертикальным стержнем длиной 1 м, высота стержневого молниеотвода принималась равной 2 и 3 м (рис. 5, а, б). Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными, приведенными в [21].

Исследование эффективности динамического молниеотвода

В последние годы интенсивно ведутся исследования по повышению эффективности молниеотводов. В частности, на моделях экспериментально показано, что лазерная искра влияет на ориентировку лидера [24, 25]. Известен также метод искусственного инициирования молнии с помощью запуска малых ракет, тянущих за собой заземленные провода [26]. Этот метод может быть предложен для использования в системах молниезащиты. Представляет интерес определение оптимальных условий, при которых происходит инициирование разрядов молнии на молниеотвод с изменяющейся высотой h_m . В частности, необходимо выяснить, при какой высоте “выброса” молниеотвода и пороговой напряженности электрического поля для срабатывания молниеотвода достигается наибольшая эффективность такой системы молниезащиты.

Геометрическая схема объекта и динамического молниеотвода представлена на рис. 6. Вероятность попадания молнии в молниеотвод растет с увеличением высоты выдвижения молниеотвода h_m и зависит от пороговой напряженности электрического поля E_{th} для его срабатывания. Так, при $E_{th} = 1$ кВ/см вероятность перехвата молнии составила

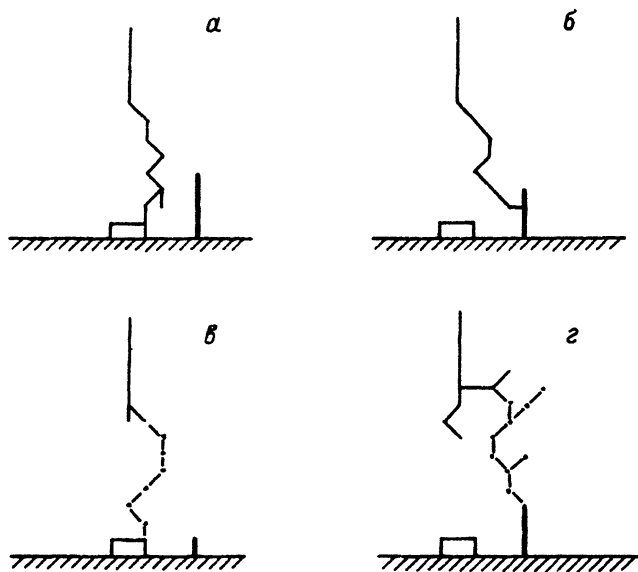


Рис. 6. Моделирование динамического молниеотвода с изменяющейся высотой: *а, б* — траектории разрядов при положительной полярности воздействующего напряжения; *в, г* — при отрицательной; пунктир — встречный разряд.

$P = 0.63$ при $h_m = 50$ м и $P = 0.80$ при $h_m = 100$ м. Типичные картины траекторий молнии при попадании в молниеотвод и в объект представлены на рис. 6. Заметим, что разряд поражает также боковую часть молниеотвода (рис. 6, б). Об этом свидетельствуют также наблюдения по поражению молнией Останкинской телебашни [23].

Исследования показывают, что эффективность рассматриваемого молниеотвода сильно зависит от значения пороговой напряженности электрического поля, при которой срабатывает молниеотвод.

Существует оптимальный момент времени срабатывания, определяемый величиной пороговой напряженности поля, при которой эффективность молниеотвода максимальна, причем запаздывание срабатывания сильно снижает эффективность молниеотвода. Эффективность молниеотвода растет при уменьшении пороговой напряженности электрического поля. Так, если при $E_{th} = 4$ кВ/см и $h = 100$ м молниеотвод перехватывает 70% разрядов, то при $E_{th} = 1$ кВ/см практически все разряды перехватываются молниеотводом.

Эффективность молниеотвода выше при отрицательной полярности молнии. В частности, при $E_{th} = 1$ кВ/см вероятность прорыва отрицательной молнии равна 5%, а вероятность прорыва положительной молнии составляет 30%.

Типичные траектории разрядов при положительной полярности представлены на рис. 6, а, б. Траектории при отрицательной полярности молнии обусловлены различной степенью развития встречного разряда с наземных объектов.

Ориентировка лидера на изолированные объекты

1) Расчет вероятностей поражения изолированных объектов. На рис. 7,а представлена зависимость вероятности поражения изолированного объекта от его расположения в разрядном промежутке стержень-плоскость длиной $H = 15$ м. Из рисунка видно, что вероятность поражения объекта падает с увеличением расстояния h между высоковольтным электродом и объектом. Типичные картины траекторий разряда представлены на рис. 7,б,в. Отметим, что с увеличением перенапряжения в промежутке степень случайности траектории разряда растет и вероятность поражения объекта уменьшается.

Аналогичные исследования проводились по моделированию молниепоражаемости летательных аппаратов. Вероятность поражения модели также падает при увеличении расстояния между высоковольтным электродом и моделью, причем вероятность поражения отрицательным лидером больше по сравнению с лидером положительной полярности. На рис. 7,г,д представлены траектории разрядов при отсутствии поражения и попадания в носовую часть модели летательного аппарата соответственно.

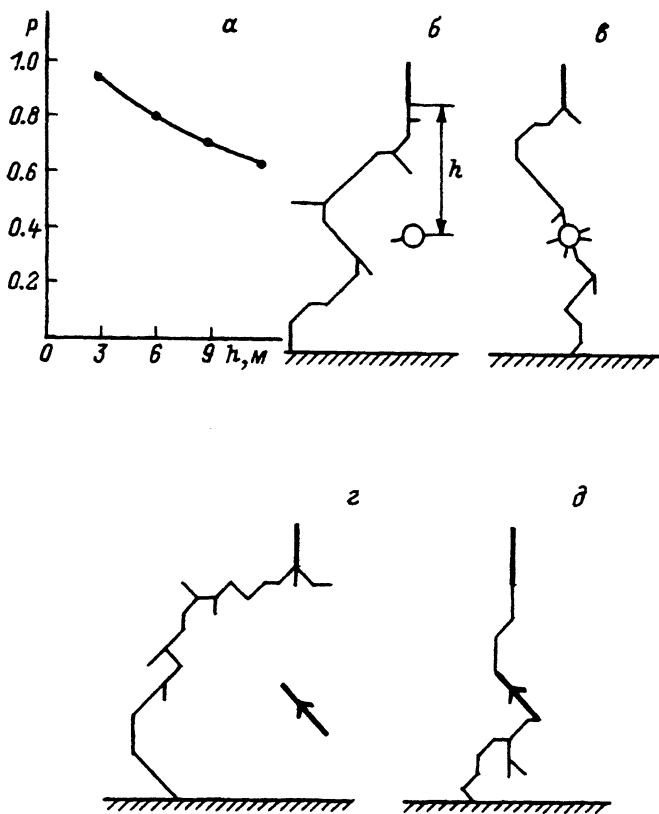


Рис. 7. Зависимость вероятности поражения изолированного объекта от расстояния h между высоковольтным электродом и объектом (а) и характерные траектории разрядов (б,в), траектории разрядов при моделировании молниепоражаемости летательных аппаратов (г,д).

Проведенные выше исследования показывают, что фрактальная модель описывает основные характерные свойства лидерного разряда. Имитационные картины пробоев, полученные по описанной выше схеме, воспроизводят основные характерные черты разряда: существование явления остановки разряда, возрастание степени разветвленности при увеличении прикладываемого напряжения, а также форму каналов, по которым происходит пробой. На траекторию разряда влияет изменение начальных условий. Исследования показывают, что геометрическая картина траектории пробоя наиболее чувствительна к изменению воздействующего напряжения U_0 , а изменение других параметров в пределах 20% существенного влияния на траекторию не оказывает.

Отметим, что фрактальность является более общим свойством лидерного разряда, чем просто случайность. Явление искривления и ветвления канала пробоя имеет универсальный характер и проявляется также в жидкостях и твердых диэлектриках. Физическая природа такого поведения может быть объяснена наличием нелинейности в системе. Известно [27], что нелинейность в динамических системах может привести к стохастической неустойчивости, имеющей фрактальную природу. Случайный выбор направления распространения лидера в рассматриваемой модели обусловлен внутренними свойствами самого лидера и имеет простое физическое обоснование. Действительно, процессу зарождения и распространения лидера всегда предшествует формирование стримерной зоны. Стримерная зона лидера представляет собой конусообразную область на фронте лидера, внутри которой условия для распространения лидера оказываются выполненными сразу во всех направлениях. Поскольку в пределах стримерной зоны отсутствует доминирующее направление для распространения лидера, то выбор направления происходит случайным образом. Этим можно объяснить существенное отклонение траектории лидера от силовых линий электрического поля в разрядном промежутке.

В работе приняты упрощающие допущения, такие как относительно грубое предположение о дискретном характере направления развития и пренебрежение пространственно-временной зависимостью электрического поля в канале. Это сильно упростило рассматриваемую модель. Однако такое упрощение позволило подробно исследовать влияние исходных параметров на траекторию разряда и выяснить основные закономерности появления искривлений и разветвлений, что может быть использовано при построении более полной физической модели. Улучшение возможностей рассматриваемой модели в смысле повышения чувствительности относительно пространственных и временных координат может быть легко достигнуто с помощью введения более мелкой координатной сетки и соответствующего увеличения времени вычисления на ЭВМ.

Фрактальные свойства лидерного разряда проявляются также в характеристиках электромагнитного излучения молнии. Эти особенности могут быть использованы при локации молнии и анализе экспериментальных данных.

Проведенные исследования показывают, что рассматриваемая модель достаточно полно отражает также основные особенности ориентировки лидерного разряда. Сравнение результатов расчета с экс-

периментальными данными показывает их хорошее согласие. Модель позволяет учитывать временные изменения параметров разряда и геометрии промежутка, в частности, исследовать влияние формы импульса воздействующего напряжения на траекторию разряда.

Предлагаемая методика позволяет учесть характеристики ветвления и искривления канала молнии как на больших расстояниях от поверхности земли, так и вблизи нее. В зависимости от начальных параметров грозового облака и лидера степень ветвления и искривления канала молнии изменяется и возможны случаи поражения нескольких точек на поверхности земли одним и тем же разрядом молнии. Аналогичные случаи наблюдаются и в природе, когда один и тот же разряд молнии поражает сразу несколько точек на поверхности земли [28].

Одним из важных вопросов при моделировании молниепоражаемости является выбор критерия поражения. Обычно в качестве критерия поражения заземленного объекта выбирается условие развития встречного разряда. Полученные в настоящей работе результаты моделирования показывают, что инициирование встречного лидера с объекта не является критерием его поражения, поскольку имеют место случаи (рис. 4, б), когда встречный разряд развивается, а объект не поражается. В реальных условиях такие случаи также наблюдаются,

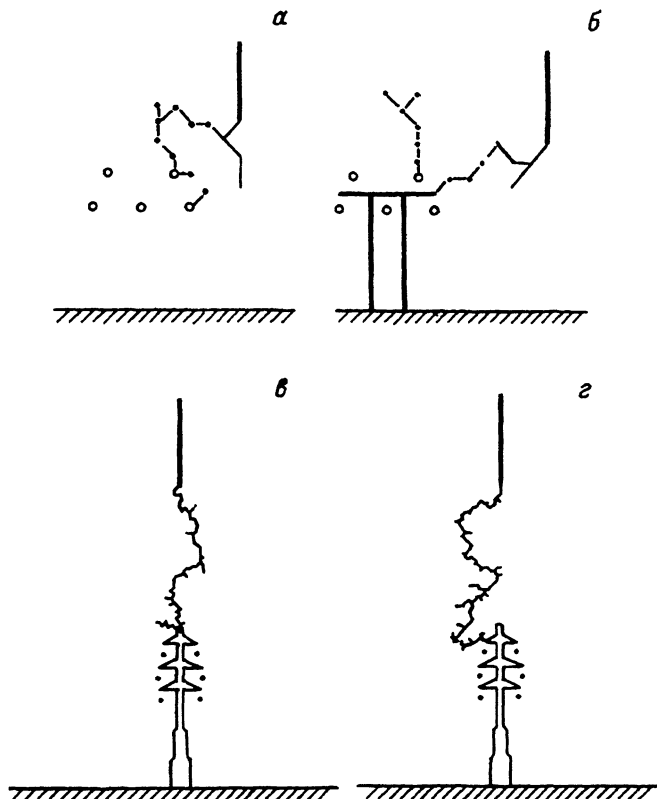


Рис. 8. Моделирование ориентировки молнии на линии электропередачи.

а — траектория разряда при попадании в грозозащитный трос; б-г — при попадании в опору.

в частности, в [29] приводится фотография встречного лидера с мачты высотой 60 м при попадании молнии на землю вблизи мачты. Отметим, что роль встречных разрядов резко возрастает при ориентировке молнии на объекты, находящиеся под потенциалом противоположной к молнии полярности. На рис. 8 представлены траектории разрядов при ориентировке молнии на линии электропередач. Из рисунков видно, что встречные разряды перехватывают молниевый разряд, причем степень их развития зависит от характеристик искривления и ветвления канала молнии. Исследования показали, что вероятность прорыва молнии на провода зависит от бокового смещения канала молнии относительно оси линии электропередачи.

Важным является также учет полярности молнии. Моделирование показывает, что вероятность прорыва молний положительной полярности на защищаемые объекты выше по сравнению с отрицательными молниями. Известно, что большинство разрядов молнии (около 90%) имеет отрицательную полярность. Однако при отрицательной полярности молнии существенным является развитие встречного разряда с возвышающихся объектов. Разряд при этом, как правило, ориентируется на наиболее высокий объект. В случае же положительной молнии встречный разряд, как правило, отсутствует и ориентировка положительной молнии происходит случайным образом вплоть до поверхности земли. Хотя доля положительных молний мала по сравнению с отрицательными молниями, вероятность прорыва положительных молний существенно выше, чем отрицательных. Поэтому положительные молнии более опасны. Эти особенности необходимо учитывать также при экспериментальном моделировании молниепоражаемости в лабораторных условиях. Отметим, что моделирование молниепоражаемости объектов в лабораторных условиях имеет ряд недостатков, связанных как с ограниченными возможностями изменения параметров лидера и высоковольтной установки в широких пределах, так и с трудностями выбора оптимального масштаба моделирования вследствие отсутствия физических критериев ориентировки искры и молнии. В частности, с ростом перенапряжения степень случайности траектории молнии растет. При этом вероятность поражения объекта уменьшается. Однако в лабораторных промежутках стержень-плоскость рост перенапряжения приводит к увеличению длины стримерной зоны лидера и соответственно к росту вероятности поражения объекта. Поэтому испытания целесообразно проводить не в промежутках стержень-плоскость, а в промежутках с большим радиусом электродов, где длина стримерной зоны практически не зависит от степени перенапряжения.

Для многих практических задач молниезащиты важным является определение вероятности поражения в зависимости от амплитуды тока обратного удара молнии i_0 . Так, расстояние поражения, или высота ориентировки, r_s , обычно представляется в виде зависимости от тока i_0 [1]: $r_s = 10i_0^{0.65}$ м, i_0 [кА]. В рассматриваемую модель также может быть введена функция распределения по амплитудам токов молнии. Известно, что амплитуда тока молнии связана с параметрами молнии в лидерной стадии и определяется величиной внедренного объемного заряда. В [30] из условия устойчивого распространения лидера были получены следующие функциональные зависимости между током i_l , потенциалом φ_l , скоростью v_l , длиной стримерной зоны l_{st} лидера и током i_0 :

$$i_l \propto \varphi_l^{3/2} \propto v_l^3 \propto l_{st}^{3/2} \propto i_0. \quad (8)$$

С другой стороны, расстояние поражения коррелирует с длиной стримерной зоны лидера $r_s \simeq l_{st}$. О такой зависимости свидетельствуют также экспериментальные результаты [20]. Тогда из (8) следует $r_s \propto i_0^{2/3}$, что хорошо согласуется с приведенной выше экспериментальной зависимостью.

Дальнейшее улучшение модели возможно с помощью учета пространственно-временных изменений параметров лидера. В частности, в финальной стадии ориентировки могут быть важными процессы взаимодействия объемного заряда стримерной зоны лидера с наведенным зарядом объекта [31,32].

Возможности варьирования параметров модели в широких пределах позволяют использовать рассматриваемую методику для решения разнообразных задач молниезащиты. В частности, эта модель может быть использована при определении вероятностей поражения и оптимизации параметров линий электропередач и подстанций [33].

Заключение

Таким образом, степень сложности геометрической картины траектории лидерного разряда и ее фрактальная размерность возрастают с увеличением прикладываемого напряжения. При увеличении напряженности электрического поля в канале степень искривления и ветвления траектории разряда уменьшается. При уменьшении критической напряженности электрического поля сложность траектории разряда возрастает. Напряжение пробоя промежутка при учете объемного заряда стримерной зоны уменьшается по сравнению с напряжением пробоя, полученным при использовании модели Лапласа, и становится ближе к реальным значениям пробивных напряжений.

Предлагаемая математическая модель позволяет вычислять вероятности поражения изолированных и заземленных объектов и вероятности прорыва разрядов на защищаемые объекты. Модель учитывает влияние перенапряжения, полярности воздействующего напряжения, геометрии разрядного промежутка и объекта, случайности траектории распространения лидера и встречного разряда с объекта. Установлено, что вероятность прорыва положительной молнии на защищаемые объекты существенно больше по сравнению с отрицательной молнией. Из рассматриваемой модели следует, что молния поражает не только вершину молниеотвода, но и его боковую часть, т.е. зона защиты не начинается от вершины молниеотвода.

Полученные результаты представляют практический интерес и могут быть использованы при моделировании молниепоражаемости летательных аппаратов и наземных объектов (нефтехранилищ, линий электропередач, подстанций и т.п.), в частности при определении высоты ориентировки разрядов молнии и оптимизации параметров линий электропередач.

В заключение авторы благодарят Г.А. Александрова и М.В. Костенко за полезные обсуждения результатов работы.

- [1] Golde P.H. Lightning. Academic Press, 1977.
- [2] Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты. М.: Гидрометеиздат, 1978. 223 с.
- [3] Акопян А.А. // Тр. ВЭИ. 1940. № 36. С. 94-158.
- [4] Беляков А.П. // Электричество. 1940. № 7. С. 37-41.
- [5] Колечицкий Е.С., Ларионов В.П., Шульгин В.Н. // Электричество. 1981. № 5. С. 19-23.
- [6] Артемьев А.С., Новиков А.Н., Рожавская С.Н. и др. // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1986. № 2. С. 35-42.
- [7] Колечицкий Е.С. // Изв. АН. Энергетика. 1993. № 1. С. 131-138.
- [8] Gaivoronsky A., Karasyuk K. // Proc. 9th Intern. Conf. on Atmos. Electricity. 1992. Vol. 3. P. 655-658.
- [9] Петров Н.И., Петрова Г.Н. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 3. С. 14-18.
- [10] Petrov N.I., Petrova G.N. // Proc. 9th Intern. Conf. on Atmos. Electricity. 1992. Vol. 3. P. 675-679.
- [11] Петров Н.И., Петрова Г.Н. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. Вып. 6. С. 25-29.
- [12] Petrov N.I., Petrova G.N. // Proc. 8th Intern. Symp. on High Voltage Eng. Yokohama (Japan), 1993. Vol. 4. P. 101-104.
- [13] Петров Н.И., Петрова Г.Н. // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 4. С. 41-49.
- [14] Курилов В.А. // Изв. вузов. Энергетика. 1978. № 11. С. 24-30.
- [15] Feder J. Fractals. New York: Plenum Press, 1988.
- [16] Niemeyer L., Piotronero L., Wiesmann H.I. // Phys. Rev. Lett. 1984. Vol. 52. N 12. P. 1033-1036.
- [17] Femia N., Niemeyer L., Tucci V. // J. Phys. D. 1993. Vol. 26. P. 619-627.
- [18] Chernov E.N., Lupeiko A.V., Petrov N.I. // Proc. 7th Intern. Symp. on High Voltage Eng. Dresden, 1991. Vol. 4 P. 141-144.
- [19] Токарев А.В., Энгельшт В.С. // Тез. докл. V Всесоюз. конф. по физике газового разряда. Омск, 1990. С. 202-203.
- [20] Волкова О.В., Корявкин А.Р. // Электричество. 1991. № 5. С. 52-55.
- [21] Александров Г.Н., Кадзюв Г.Д. // Электричество. 1987. № 2. С. 57-60.
- [22] Les Renardieres Group. Electra. 1981. N 74. P.67-216.
- [23] Горин Б.Н., Левитов В.И., Шкилев А.В. // Электричество. 1972. № 2. С. 24-29.
- [24] Асиновский Э.И., Василяк Л.М., Нестеркин О.П. Электрический разряд вдоль лазерной искры. Препринт ИВТАН. № 5-214. М., 1987. 48 с.
- [25] Miki M., Shindo T., Aihara Y., Wada A. // Proc. 10th Intern. Conf. on Gas Discharges and Their Applications. Swansea, 1992. Vol. 2. P. 584-587.
- [26] Hubert P. et al. // J. Geophys. Res. 1984. Vol. 89. P. 2511-2521.
- [27] Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику: от маятника до турбулентности и хаоса. М.: Наука, 1988. 368 с.
- [28] Nagai Y., Edano Y., Kawamata S. // Proc. 8th Intern. Symp. on High Voltage Eng. Yokohama (Japan), 1993. Vol. 3. P. 245-248.
- [29] Anderson R.B., Eriksson A.J., Kroninger H. et al. // Proc. Intern. Conf. on Lightning and Power Systems. London, 1984. P. 57-60.
- [30] Petrov N.I. // Proc. 8th Intern Symp. on High Voltage Eng. Yokohama (Japan), 1993. Vol. 4. P. 65-68.
- [31] Chernov E.N., Lupeiko A.V., Petrov N.I. // J. Phys. III. 1992. Vol. 2. P. 1359-1365.
- [32] Лупейко А.В., Петров Н.И., Чернов Е.Н. // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 1. С. 171-175.
- [33] Костенко М.В., Ефимов Е.В., Зарги И.М., Гумерова Н.И. Анализ надежности гроззащиты подстанций. Л.: Наука, 1981.