

01; 04

© 1993

МОДЕЛИРОВАНИЕ МОЛНИЕПОРАЖАЕМОСТИ
ИЗОЛИРОВАННЫХ И ЗАЗЕМЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Н.И. П е т р о в, Г.Н. П е т р о в а

В связи с развитием техники и широким оснащением ее высокочувствительной элементной базой электроники все более остро ощущаются 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, определенных экспериментально на лабораторных моделях. Однако определение вероятностных характеристик молниепоражаемости только на основе лабораторных испытаний является не полным. 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 [1] и вероятностная [2]. Основы этих методов предлагались еще в ранних работах, посвященных оценке защитного действия молниеотводов [3, 4]. Однако обе эти методики распространяются только на нисходящие молнии и не учитывают случайного характера траектории распространения молнии.

В настоящей работе предлагается методика расчета вероятностей поражения изолированных и заземленных объектов и прорыва молнии на защищаемые объекты, учитывающая влияние случайности 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 [5, 6]. В [7] этот же метод был применен для моделирования внутриоблачных разрядов молнии, и была показана возможность моделирования молниепоражаемости наземных объектов.

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.

Напряженность поля E определялась из решения уравнения Пуассона с учетом внедренного пространственного заряда. Вероятности поражения объектов определяются из отношения числа по-

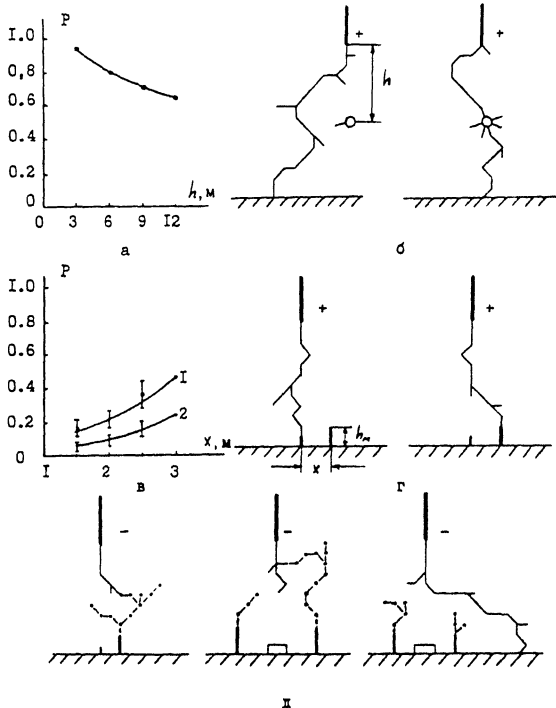


Рис. 1. Зависимости вероятностей поражения изолированного объекта (а) и прорыва разрядов на защищаемый объект (в) и характерные траектории разрядов (б, г, д): в - 1 - $h_M = 2$ м, 2 - $h_M = 3$ м; б и г - траектории при положительной полярности воздействующего напряжения; д - траектории при отрицательной полярности напряжения; сплошные линии - нисходящий разряд, пунктирные - встречный (восходящий) разряд. На рисунке (в) указаны доверительные интервалы вероятностей, полученных в эксперименте [8].

падения разрядов к общему числу разрядов при воздействующем напряжении, близком к 100%-ному разрядному напряжению.

Ниже приводятся результаты расчетов вероятностей поражения изолированных и заземленных объектов. На рис. 1, 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. 1, б. Отметим, что при увеличении степени перенапряжения в промежутке случайность траектории растет и вероятность поражения объекта уменьшается.

Практический интерес представляет исследование вероятностей прорыва разрядов на защищаемые объекты при различных значениях высоты молниеотвода h_m и расстояния между объектом и молниеотводом x . На рис. 1, в 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. 1, г). Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными, приведенными в [8]. При отрицательной полярности воздействующего напряжения существенное влияние на ориентировку лидера оказывают встречные разряды с молниеотвода и объекта (рис. 1, д). Вероятность прорыва разряда при этом существенно меньше по сравнению с положительной полярностью. Отметим, что о необходимости различить защитное действие молниеотводов в отношении нисходящих и восходящих молний показывают также результаты наблюдений за поражаемостью молнией Останкинской телебашни [9].

Представляет интерес исследование рассеивания точек поражения на плоскости. В качестве примера рассмотрим разрядный промежуток стержень—плоскость в 3-х мерном случае (рис. 2, а). На рис. 2, б представлена проекция траектории разряда на плоскость. Распределение точек поражения при наличии на плоскости стержня на осевой линии промежутка представлена на рис. 2, в. Как видно из рисунка, существует область (зона защиты молниеотвода), которая не поражается разрядами. На рис. 2, г представлена картина поражаемости плоскости при отсутствии стержня на ней. Функция распределения вероятностей точек поражения на плоскости (вероятность попадания разряда в круг с радиусом R) представлена на рис. 2, д. Из рисунка видно, что функция вероятностей точек поражения Ψ имеет симметричное распределение гауссового вида. С ростом перенапряжения радиус рассеивания точек поражения на плоскости увеличивается (рис. 2, д). Отметим, что аналогичная картина имеет место в экспериментах [10]. Параметрами, характеризующими траекторию лидерного разряда, являются также ее средняя длина \bar{L} и статистический разброс σ_L . Полезную информацию содержат коэффициент асимметрии α_3 и коэффициент эксцессии α_4 , определяющие вид функции распределения по длинам траекторий $\omega(L)$. Результаты расчетов показывают, что средняя длина траектории \bar{L} растет с увеличением длины промежутка H , а статистический разброс длины траектории σ_L при этом не имеет явной зависимости от длины промежутка, причем функция распределения $\omega(L)$ по длинам траекторий в заданном промежутке имеет не гауссову, а асимметричную форму. Этим, по-видимому, обусловлено отклонение от нормального закона кривой эффекта (распределения разрядных напряжений) в длинных промежутках [11]. Моделирование молниепоражаемости объектов в лабораторных условиях имеет ряд недостатков, связанных как с ограниченными возможностями изменения параметров лидера и высоковольтной уста-

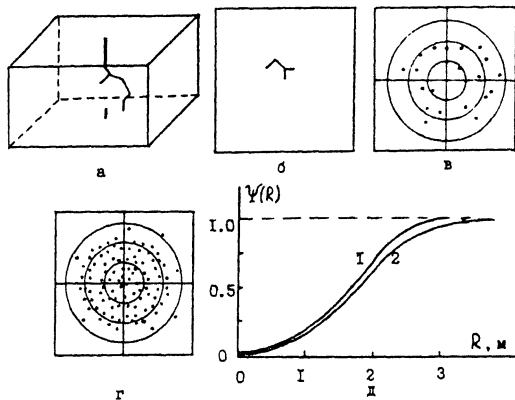


Рис. 2. Рассеивание точек поражения на плоскости: $H = 6$ м: а – траектория разряда в промежутке стержень–плоскость, б – проекция траектории разряда на плоскость, в – разброс точек поражения на плоскости при наличии на ней стержня, г – разброс точек поражения на плоскости при отсутствии стержня, д –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

новки 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 лидера 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.

Исследования показывают, что рассматриваемая модель достаточно полно отражает основные особенности ориентировки лидерного разряда. Сравнение результатов расчета с экспериментальными 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 [12].

Таким образом, 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 раз-

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

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] G o l d e R.H. // J. Franklin. Inst. 1967. V. 283. N 6. P. 451-477.
- [2] Б а з е л я н Э.М. // Электричество. 1967. № 7. С. 64-69.
- [3] А к о п я н А.А. // Труды ВЭИ. 1940. В. 36. С. 94-158.
- [4] Б е л я к о в А.П. // Электричество. 1940. № 7. С. 37-41.
- [5] P e t r o v N.I., P e t r o v a G.N.//Abstracts of European Conf. on Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases. St.-Peterburg. 1992. P. 362-363.
- [6] П е т р о в Н.И., П е т р о в а Г.Н. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. В. 3. С. 14-18.
- [7] P e t r o v N.I., P e t r o v a G.N.//Proceed 9th Int. Conf. on Atmospheric Electricity. St.-Peterburg. 1992. V. 3. P. 675-679.
- [8] А л е к с а н д р о в Г.Н., К а д з о в Г.Д. // Электричество. 1987. № 2. С. 57-60.
- [9] Б а з е л я н Э.М., Г о р и н Б.Н., Л е в и т о в В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты. Гидрометеопиздат, 1978. 223 с.
- [10] В о л к о в а О.В., К о р я в и н А.Р. // Электричество. 1991. № 5. С. 52-55.
- [11] Б а з е л я н Э.М., Р а ж а н с к и й И.М. Искровой разряд в воздухе, Новосибирск: Наука, 1988. 164 с.
- [12] П е т р о в Н.И., П е т р о в а Г.Н.//Тез. докл. У1 конф. по физике газового разряда. Казань. 1992. С. 105-106.

Поступило в Редакцию
17 февраля 1993 г.