

М. И. БАРАНОВ, д-р техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;
В. И. ДОЦЕНКО, канд. техн. наук, вед. инж., НТУ «ХПИ»;
В. М. ЗИНЬКОВСКИЙ, зав. сектором, НТУ «ХПИ»;
Г. М. КОЛИУШКО, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;
О. С. НЕДЗЕЛЬСКИЙ, вед. инж., НТУ «ХПИ»;
А. А. ПЕТКОВ, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»;
Е. Г. ПОНУЖДАЕВА, зав. лабор., НТУ «ХПИ»;
С. С. РУДЕНКО, инженер, НТУ «ХПИ»;
В. Л. ЦЕХМИСТРО, техник, НТУ «ХПИ»

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОРАЖЕНИЯ ЗАЗЕМЛЕННОЙ ПЛОСКОСТИ И РАЗМЕЩЕННЫХ НА НЕЙ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ РАЗРЯДОМ В ДЛИННОМ ПРОМЕЖУТКЕ

В статье представлены результаты экспериментальных исследований поражения электрическим разрядом заземленной плоскости и размещенных на ней проводящих объектов. Даны электрические параметры генератора импульсов напряжения, имитирующего разряд молнии при длине разрядного промежутка до 3 м. Описана конструкция стержневого электрода с элементами индикации поражения стержня разрядом.

Ключевые слова: электрический разряд, вероятность поражения, молниеотвод.

Постановка проблемы. Усиление в настоящее время грозовой активности, которое связано с изменением климатических и экологических факторов среды обитания человека, стимулирует исследования вопросов молниезащиты объектов, подвергающихся воздействию прямых ударов молнии. Одним из направлений исследований такого рода является изучение распределения вероятности поражения различных объектов, находящихся на поверхности грунта. Несмотря на большой объем исследовательских работ, проведенных в данном направлении, задача надежной защиты объектов от прямого воздействия молнии не может считаться решенной, что требует дальнейших научных исследований и технических разработок.

Анализ публикаций. Одним из центральных направлений исследований в области молниезащиты является изучение вероятности поражения плоскости в системе электродов «стержень-плоскость», размещенного на плоскости объекта-стержня или системы из нескольких стержней [1-4] (защищаемый объект-стержень и стержни-молниеотводы).

В [1] приведены результаты испытаний в системе «стержень-плоскость»

и «стержень-стержень на плоскости». Приведены графики распределения мест поражения при следующих высотах заземленного стержня: 0; 5; 12; 17 и 53 см. Эксперименты проводились при положительной полярности апериодических импульсов 250/2500 мкс и 4000/6500 мкс.

В работе [2] получены вероятности поражения одиночного стержня при его смещении относительно вертикальной оси верхнего стержня. Исследования проведены при разрядных промежутках (РП) 5, 7,5 и 10 м, для которых высота стержней составляла 0,85, 1,25 и 1,7 м, а величина смещения 1,7, 2 и 2,5 м соответственно.

В [3] исследована эффективность молниезащиты стержневых молниеотводов при длинах РП до 15 м и высоте защищаемого объекта 1 и 2 м. Приведены зависимости вероятности поражения стержня, защищенного двумя молниеотводами, от расстояния между ними, а также стержня, защищенного одним молниеотводом, от величины воздушного промежутка. При проведении экспериментов в [2] и [3] использовался импульс напряжения положительной полярности с длиной фронта 3000 мкс.

В работе [4] представлены результаты экспериментальных исследований по поражению заземленной плоскости в системе электродов «стержень – плоскость» при длине РП равной 1,27 м. Эксперименты проводились в закрытом помещении при положительной полярности апериодических импульсов напряжения с временем нарастания 1000 мкс и временами пробоя в диапазоне 400-850 мкс. Проведен анализ статистических характеристик полученных результатов и их корреляции с геометрией моделирующей электродной системы.

Однако, учитывая статистический характер полученных результатов, а также ограниченность количества рассматриваемых моделей и объема экспериментов, имеющаяся информация не может считаться достаточной для усовершенствования методик и рекомендаций по повышению эффективности и надежности молниезащиты наземных объектов.

Целью настоящей статьи является расширение базы экспериментальных данных по статистическому распределению вероятности поражения заземленной проводящей плоскости и размещенных на ней проводящих объектов электрическим разрядом в длинном воздушном промежутке, имитирующим молнию.

Материалы и результаты исследований. Экспериментальные исследования поражения плоскости и расположенных на ней объектов электрическим разрядом проводились на открытой площадке высоковольтного стенда, который обеспечивал создание в режиме холостого хода на его выходе апериодического импульса напряжения 205/1900 мкс с максимальным значением амплитуды до 1,2 МВ.

Суть экспериментов заключалась в формировании электрической искры в длинном (3 м) воздушном промежутке между стержнем и плоскостью и

фиксировании факта поражения искрой плоскости или расположенных на ней объектов. При поражении плоскости определялись координаты точки поражения. На рис. 1 показан план размещения основного высоковольтного оборудования испытательного стенда.

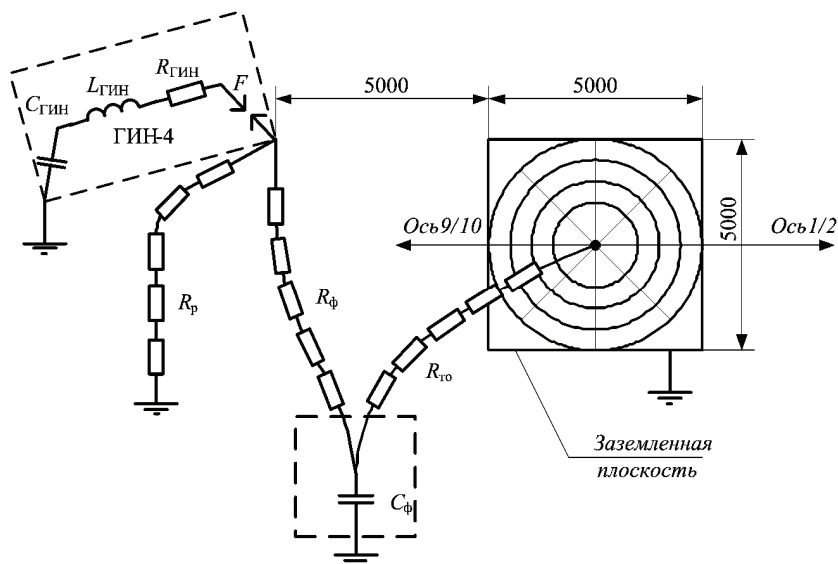


Рисунок 1 – План размещения основного высоковольтного оборудования испытательного стенда и ориентация координатной сетки мишени заземленной плоскости

Заземленная плоскость представляла собой квадратную платформу площадью $(5 \times 5) \text{ м}^2$ с плоской металлической поверхностью, заземленной на общий контур заземления установки. Над геометрическим центром платформы был подвешен металлический стержень с заостренным концом, выполненный из стального круглого проката диаметром 20 мм и длиной 0,75 м. Стержень подключен к выходу высоковольтной установки. Расстояние H между нижним концом стержня и центром плоскости (точка «0») в процессе проведения экспериментов сохранялось постоянным и равным 3 м. Конструкция заземленной плоскости обеспечивает вертикальную установку металлических стержней различной длины в точке с заданными координатами.

На плоскость накладывалась бумажная мишень с нанесенной полярной системой координат. Радиус внешней окружности составлял $R = 1,8 \text{ м}$. Попадание разряда в плоскость определялось точкой сквозного прожога бумажной мишени с фиксированием координат этой точки (расстояния до начала координат и номера одного из 16 секторов с углом $22,5^\circ$).

Эквивалентная электрическая схема разрядного контура испытательного стенда представлена на рис. 2.

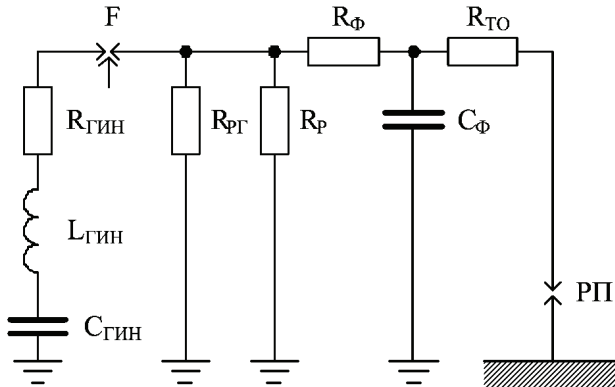


Рисунок 2 – Эквивалентная электрическая схема разрядного контура испытательного стенда:

$C_{ГИН}$, $L_{ГИН}$, $R_{ГИН}$ – емкость, индуктивность и активное сопротивление разрядной цепи стенда соответственно; F – эквивалент управляемого разрядника стенда; $R_{РГ}$ – основной разрядный резистор; $R_{Р}$ – дополнительный разрядный резистор; $R_{ТО}$ – токоограничивающий резистор; $R_{Ф}$ – резистор, формирующий фронт импульса; $C_{Ф}$ – емкость, формирующая фронт импульса; $ПП$ – разрядный промежуток; $ЗП$ – заземленная плоскость

Основные электрические параметры испытательного стенда представлены в табл. 1.

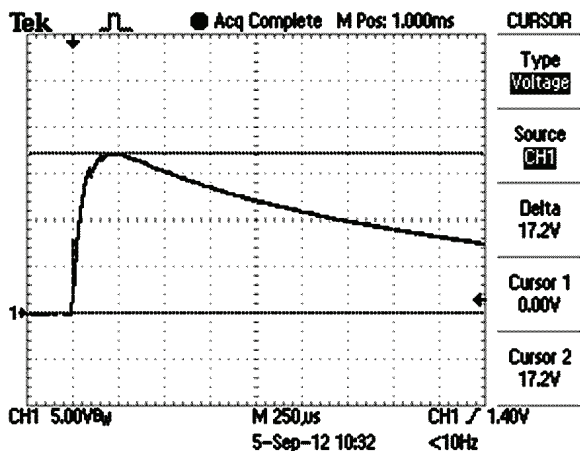
Полученные в экспериментах характерные осциллограммы импульса напряжения на $ПП$ испытательного стенда приведены на рис. 3.

Таблица 1 – Электрические параметры элементов разрядного контура

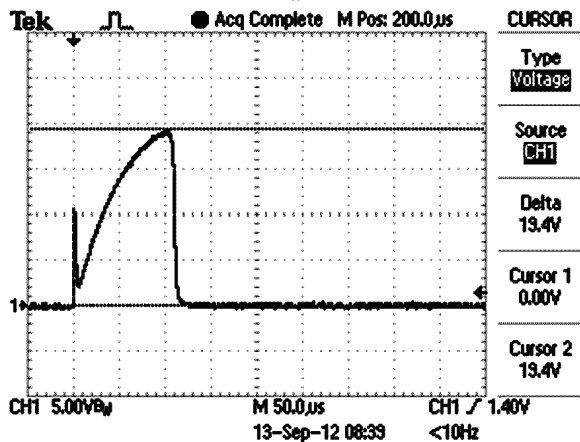
$C_{ГИН}$, нФ	$L_{ГИН}$, мкГн	$R_{ГИН}$, Ом	$R_{РГ}$, кОм	$R_{Р}$, кОм	$R_{Ф}$, кОм	$C_{Ф}$, нФ	$R_{ТО}$, кОм
125	100	4,5	440	33	5	13	4,6

В проведенной серии экспериментов по определению статистических характеристик пробоя длинного искрового воздушного промежутка использовались три модели системы электродов:

- «стержень – заземленная плоскость» без вертикальных стержней (модель № 1);
- «стержень – заземленная плоскость» с одним вертикальным стержнем, имитирующим молниеотвод (модель № 2);
- «стержень – заземленная плоскость» с двумя вертикальными стержнями: высокий стержень (ВС) с заостренным концом, имитирующий молниеотвод, и низкий стержень (НС) с закругленным концом, имитирующий защищаемый объект (модель № 3).



a



б

Рисунок 3 – Осциллограмма полного и срезанного импульсов напряжения на РП длиной 3 м: *a* – без пробоя промежутка, с максимальным напряжением $U_m = 923$ кВ; *б* – с пробоем в момент времени $t = 110$ мкс при напряжении $U_p = 1041$ кВ

В ходе проведения экспериментальных исследований статистического распределения поражения электрическим разрядом заземленной плоскости и элементов систем электродов в трех моделях было произведено 1820 разрядов имитатора молнии.

При проведении исследований на модели №1 было произведено 50 разрядов. На рис. 4 приведена функция распределения вероятности F поражения плоскости круга радиусом r .

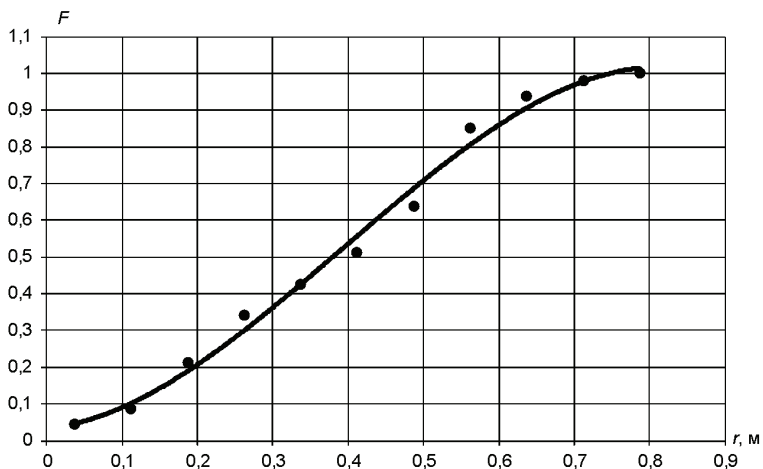


Рисунок 4 – График функции распределения вероятности поражения круга радиусом r

При проведении исследований на модели № 2 (рис. 5) попадание разряда в молниеотвод на плоскости фиксировалось визуально двумя наблюдателями под углом обзора 90° относительно друг друга.

В процессе отработки экспериментов были использованы два типа молниеотвода высотой 0,15 и 0,3 м. Расстояние R до центра мишени принимало ряд значений: 0, 0,15, 0,5, 0,7, 1,1, 1,2, 1,3 м и 0, 0,3, 1,0, 1,4, 1,7 м соответственно. Молниеотводы устанавливались по радиусу, разделяющему сектора № 9 и № 10.

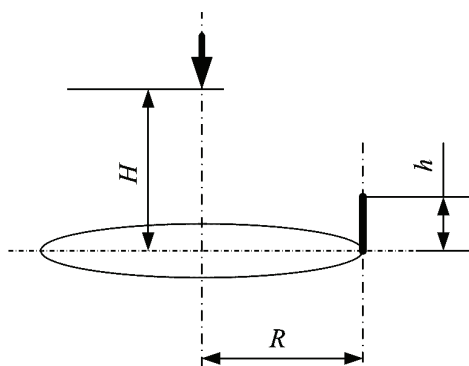


Рисунок 5 – Схема расположения стержня, имитирующего молниеотвод в модели №2

По результатам проведенных экспериментов была построена зависимость вероятности поражения молниеотвода q от расстояния его установки R (рис. 6). Общее количество разрядов для молниеотвода высотой $h = 0,15$ м составило 430, а для молниеотвода высотой $h = 0,3$ м – 390.

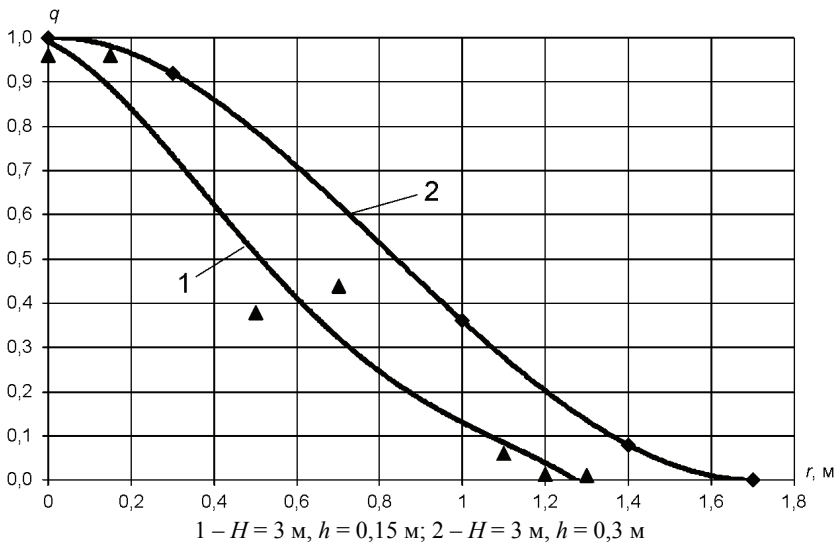


Рисунок 6 – График вероятности поражения молниеотвода для модели № 2

В процессе отработки экспериментов на модели № 3 (рис. 7) НС всегда располагался в центре мишени, а ВС устанавливался на расстоянии R от центра по радиусу секторов №9 и №10. Высота ВС составляла $h = 0,3$ м. В качестве НС было использовано два стержня с высотой h_1 , равной 0,15 и 0,2 м. При этом расстояние R от центра мишени до ВС принимало значения 0,15, 0,3, 0,7, 1,1, 1,4, 1,7 м и 0,5, 0,1, 0,15, 1,1, 1,4, 1,7 м соответственно. Общее количество разрядов для объектов высотой $h_1 = 0,15$ м составило 450 и для объектов высотой $h_1 = 0,3$ м – 500.

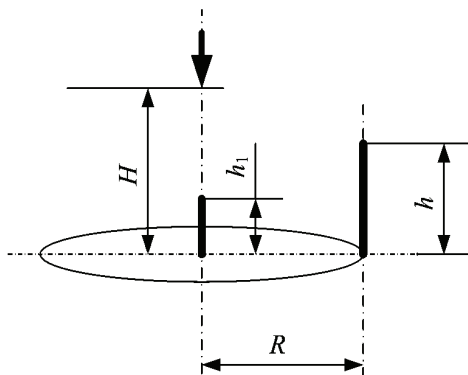


Рисунок 7 – Схема расположения стержней, имитирующих объект и молниеотвод в модели № 3

Поскольку при близком расположении стержней, имитирующих молниеотвод и объект, было визуально трудно определить в какой из стержней попал разряд, то каждый стержень конструктивно имел токопроводящий элемент, разрушающийся (с видимым разрушением) при прохождении по нему тока разряда. После каждого попадания разряда в стержень разрушающийся элемент (РЭ) требовал замены.

Конструкция стержня с РЭ показана на рис. 8.

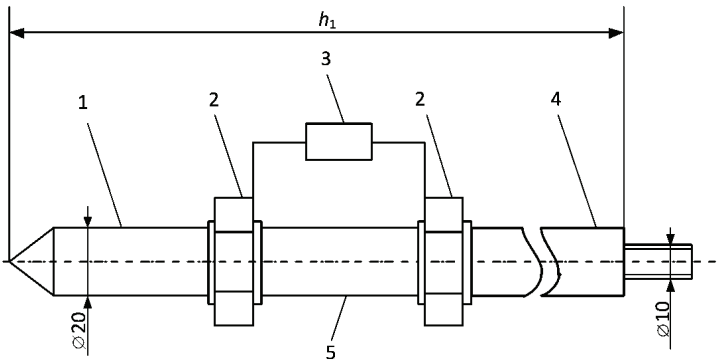


Рисунок 8 – Конструкция стержневого молниеотвода с РЭ:

1 – металлический наконечник; 2 – элементы крепления РЭ; 3 – РЭ (резистор С2-23-10 Ом-0,25 Вт); 4 – металлический стержень; 5 – фторопластовая соединительная муфта

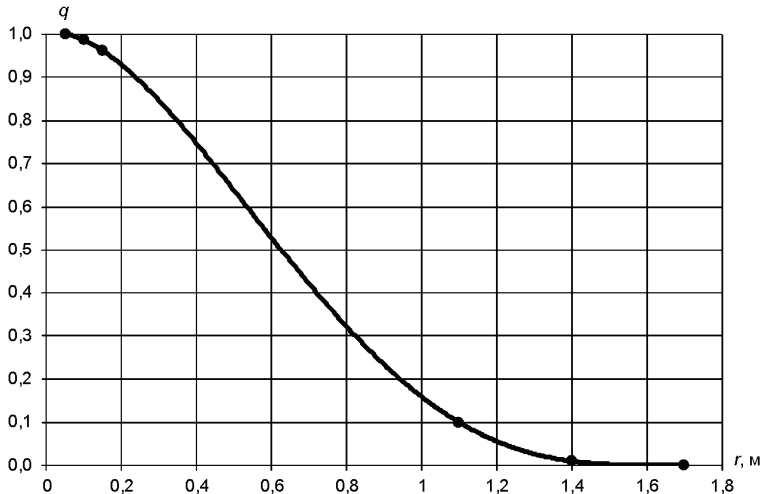


Рисунок 9 – График вероятности поражения молниеотвода для модели №3 при $H = 3000$ мм, $h = 300$ мм, $h_1 = 150$ мм

В результате обработки экспериментальных данных были получены распределения вероятности поражения молниеотвода q для объектов различной высоты h_1 (рис. 9, 10).

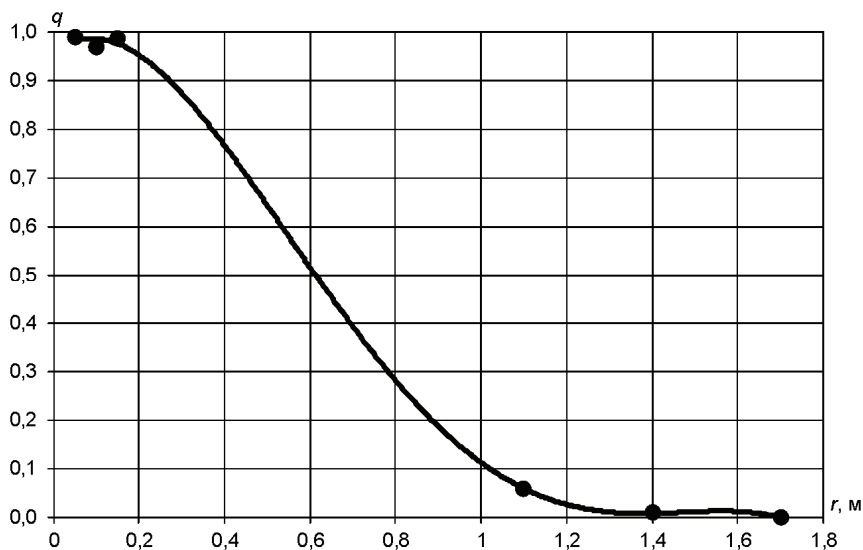


Рисунок 10 – График вероятности поражения молниеотвода для модели №3 при $H = 3000$ мм, $h = 300$ мм, $h_1 = 200$ мм

Выводы

1. Определена функция распределения вероятности поражения длинной искрой заземленной плоскости.

2. Получено распределение вероятности поражения молниеотводов в зависимости от расстояния до вертикальной проекции потенциального электрода при наличии защищаемого объекта и без него.

3. Разработана и прошла испытания конструкция штыревого электрода с разрушающимся элементом, позволяющая надежно регистрировать факт попадания разряда в электрод.

Полученные в работе опытные результаты совместно с результатами ранее опубликованных экспериментов позволят усовершенствовать методики расчета зон молниезащиты зданий и сооружений с учетом современных требований к ее эффективности и надежности.

Список литературы: 1. Волкова О.В. Поражаемость искровым разрядом стержня на плоскости / О.В. Волкова, А.Р. Корявин // Электричество. – 1991. – № 5. – С. 52-55. 2. Об ориентировке канала длинной искры / Г.Н. Александров, В.Л. Иванов, Э.М. Базелян, Е.С. Садыхова // Электричество. – 1973. – № 3. – С. 63-66. 3. К вопросу об оценке защитного действия молниеотводов / Г.Н. Александров, М.М. Зеленецкий, В.Л. Иванов и др. // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1970. – № 3. – С. 48-54. 4. Экспериментальное исследование поражения плоскости длинной

искрой / Г.М. Колишко, П.Н. Мельников, О.С. Недзельский и др. // Вісник НТУ «ХП». Тематичний випуск «Техніка та електрофізика високих напруг». – Х.: НТУ «ХП», 2012. – № 21. – С. 146-153.

Поступила в редколлегию 18.03.2013

УДК 551.594.221 : 621.319.53

Экспериментальные исследования поражения заземленной плоскости и размещенных на ней объектов электрическим разрядом в длинном промежутке / М. И. Баранов, В. И. Доценко, В. М. Зиньковский, Г. М. Колишко, О. С. Недзельский, А. А. Петков, Е. Г. Понуждаева, С. С. Руденко, В. Л. Цехмистро // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2013. – № 27 (1000). – С. 11-20. – Бібліогр.: 4 назв.

У статті представлені результати експериментальних досліджень ураження електричним розрядом заземленої площини та розташованих на ній струмопровідних об'єктів. Наведені електричні параметри генератора імпульсів напруги, що імітує розряд блискавки при довжині розрядного проміжку до 3 м. Описана конструкція стрижневого електрода з елементами індикації враження стрижня розрядом.

Ключові слова: електричний розряд, вірогідність ураження, блискавковідвід.

The results of the experimental researches of the hites the ground plane and some conductive objects on it by the electrical discharges are presented in this article. The electrical parameters of the pulls voltage generator, which imitates lightning in the long gapes up to 3 m are given. The construction of the rod electrode with special element which indicates the hite the rode by discharge is described.

Keywords: electrical discharge, probability of discharge, air terminal.