

УДК 621.31.048

В.В. Князев, А.Ю. Чернухин

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков

## СОСТАВЛЯЮЩИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВОЛЬТ-СЕКУНДНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРОБОЯ ДЛИННОГО ВОЗДУШНОГО ПРОМЕЖУТКА

*Аннотация:* В статье рассмотрены аспекты оценки неопределенности результатов экспериментальных исследований процесса электрического пробоя длинного воздушного промежутка. Рассмотрены три варианта формы стержневого молниеприемника. Показано определяющее влияние времени запаздывания на результаты аттестации молниеприемников ESE типа. Предложено оценивать качество молниеприемников ESE типа с учетом сравнения с вольт-секундной характеристикой эталонного стержневого молниеприемника для воздушных одинаковых промежутков.

**Ключевые слова:** испытание ESE терминалов, неопределенность, электрический разряд, длинный воздушный промежуток, вольт-секундная характеристика.

### Введение

**Постановка проблемы.** Насыщенность производственной сферы и быта различными радиоэлектронными устройствами, зачастую выполняющих функции контроля и управления технологическими процессами, обуславливают необходимость повышения эффективности защиты объектов от явлений, сопровождающих молниевые разряды.

Основной систем молниезащиты зданий и сооружений от прямых ударов молнии являются металлические конструкции, в том числе: стержневые, тросовые и сеточные молниеприемники. Требования к устройству таких систем, основанные на учете оценки их защитных свойств, изложены в международном стандарте IEC 62305-3:2010 [1], который введен в действие на Украине как ДСТУ IEC 62305-3:2012. Однако, у таких систем молниезащиты есть коммерческие недостатки. К числу таковых можно отнести установку громоздких молниеприемников, прокладку токоотводов, монтаж разветвленного заземляющего устройства. Это влечет за собой не только материальные и временные затраты, но и портит внешний вид зданий и сооружений. Естественно, эти обстоятельства обусловили желание потребителей иметь устройства, которые лишены таких недостатков. Некоторые компании, специализирующиеся на производстве и монтаже систем молниезащиты, выпустили на рынок «активные» устройства, которые названы ESE терминалами. Практика их аттестации и правила применения регламентируются стандартом Франции NF C 17-102: 2011 [2]. Несмотря на резкую критику мирового научного сообщества, стандарт в 2011 году издан в новой (второй) редакции и гармонизирован рядом государств, что позволяет использовать ESE терминалы наравне с традиционными элементами молниезащиты.

Основной характеристикой ESE терминала является значение времени опережения. Время опережения определяется относительно стержневого молниеприемника. В работах [3 – 5] показана необходимость осуществлять сравнение с эталонным стержневым молниеприемником, что должно способствовать воспроизводимости результатов, полученных различными лабораториями. Доводы авторов, учтены в новой редакции стандарта NF C 17-102 [2]. Установлены параметры стандартного стержневого образца:

- материал: алюминиевый сплав;
- форма: стержень кругового сечения;
- диаметр стержня: – 28 мм;
- длина стержня: не менее 1 м;
- конец стержня конический высотой 0,1 м, радиус округления вершины 1 мм;
- площадь опоры не менее 400 см<sup>2</sup>.

Кроме того, введена оценка величины среднего квадратичного отклонения  $\sigma$  результатов измерения времени пробоя воздушного промежутка. Обусловлено, что для ESE молниеприемников значение  $\sigma_{ESE}$  должно удовлетворять неравенству  $\sigma_{ESE} < 0,8 \cdot \sigma_{ST}$ , где  $\sigma_{ST}$  характеризует стандартный образец.

Исследования, проведенные авторами на большом числе различных образцов ESE терминалов, показывают, что удовлетворительного совпадения (повторяемости) результатов аттестации, полученных в различных испытательных лабораториях, пока нет. Конечно, можно предположить, что не все лаборатории следуют профессиональной этике, но для этого нет достаточных оснований. В рамках данной работы предпринята попытка объяснить возможную объективную причину расхождений между результатами разных лабораторий.

**Анализ последних публикаций.** Публикации, касающиеся темы ESE терминалов, весьма противоречивы. Часть носит рекламный характер с описа-

нием уникальных защитных свойств терминалов, без должного научного обоснования. Другая часть – резко критикует положения стандарта [2] и отрицает потенциальные возможности ESE терминалов, основываясь на результатах фундаментальных исследований. Сравнительных натуральных испытаний ESE терминалов и традиционных стержневых молниеприемников Франклина пока не проведено. Большая часть научных публикаций рассматривает отдельные аспекты этой проблемы.

В работах [6-8] экспериментально обосновано предложение в качестве альтернативного стандартного образца молниеприемника использовать стержень (обозначим его №1) квадратного сечения со стороной 12 мм и плоской вершиной. В тоже время, результаты сравнительных испытаний [9], свидетельствуют о некотором преимуществе эталонного образца (№2) по стандарту [2]. В работе [9] отмечено, что вызывает сомнение следующий факт: при разнице средних значений времени пробоя 68,3 мкс, что соответствует 13%, разница среднего напряжения пробоя составляет всего 1,2 кВ, что соответствует 0,2%. Известно, что вариация пробивных напряжений длинных воздушных промежутков может достигать 10%. Поэтому, разница в 0,2% представляется незначительной, обусловленной изменением условий окружающей среды (температуры, влажности и давления). Для проверки этого предположения, проведены исследования вероятности развития пробоя с каждого образца молниеприемника, при условии одновременного размещения образцов в испытательном поле (как показано на рис. 1).

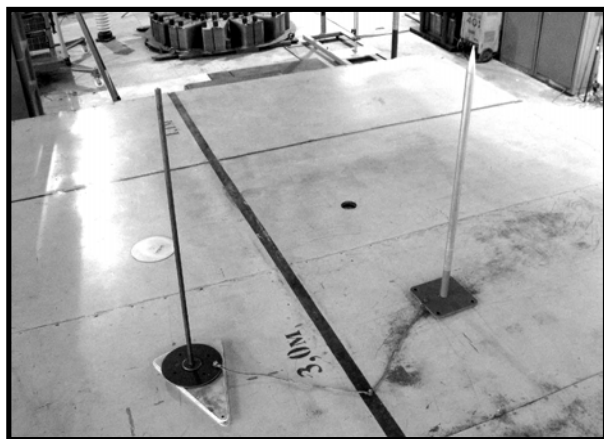


Рис. 1. Одновременное расположение исследуемых образцов в рабочем объеме (слева №1, справа №2)

После подачи 100 импульсов напряжения формой 360/8460 мкс, установлено, что в каждый из образцов произошло строго по 50 разрядов. Что полностью соответствует правилу «критического» радиуса молниеприемника [10]. Следовательно, по главному объективному параметру: вероятности разряда, оба образца одинаковые. Однако, этот вы-

вод порождает вопрос о степени корреляции среднего значения времени пробоя и вероятности перехвата молнии. Представляется логичным, демонстрировать эффективность ESE молниеприемника путем сравнительных одновременных испытаний с эталонным образцом.

Учитывая статистический характер параметров молниевых разряда, нельзя делать выводы только на основании результатов, полученных для одного конкретного варианта, как регламентируется в стандарте [2]. Необходимо сравнивать кривые вольт-секундных характеристик разрядных промежутков.

Имеющиеся противоречия в результатах экспериментов побудили провести исследование основных составляющих бюджета неопределенности таких измерений.

**Целью данной статьи** является определение основных составляющих бюджета неопределенности вольт-секундной характеристики электрического пробоя длинного стандартного воздушного промежутка.

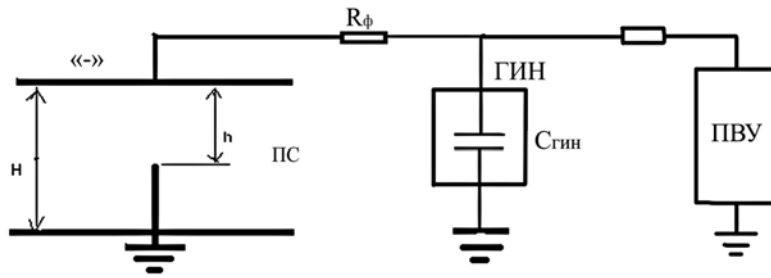
### Методика исследований

Вольт-секундную характеристику (ВСХ) используют для оценки напряжения пробоя разрядного промежутка. Порядок получения ВСХ при грозовом и коммутационном импульсах определяет ГОСТ 1516.2-97 [11]. Согласно этому стандарту производятся серии разрядов при различном напряжении, приложенном к длинному воздушному промежутку.

Исследование вольт-секундных характеристик разрядных промежутков стержень-плоскость осуществлено на высоковольтном испытательном стенде ВВС-1.2 НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ». Стенд ВВС-1.2 позволяет воспроизводить грозовые и коммутационные импульсы с временем нарастания фронта от  $1 \cdot 10^{-6}$  с до  $2 \cdot 10^{-3}$  с, и длительностью на уровне полуспада до  $1 \cdot 10^{-2}$  с напряжением до 1,2 МВ.

Молниеприемники поочередно устанавливались в пространстве между двумя параллельными металлическими плоскостями, размерами 4 x 5,5 м, на нижнюю заземленную плоскость. На верхнюю плоскость подавался импульс напряжения от генератора импульсных напряжений (ГИН) отрицательной полярности формой 880/8280 мкс. Уровень зарядного напряжения изменялся ступенчато. Расстояние (H) между плоскостями при испытаниях было 1,80 м, вершина стержня находилась на расстоянии  $h=1,0$  м от верхней потенциальной плоскости (рис. 2).

Поскольку, отсекающего разрядника на выходе ГИН нет, то на верхней потенциальной плоскости в процессе заряда ГИН (около 2 мин.) и, естественно, непосредственно перед разрядом присутствует постоянное отрицательное напряжение, формирующее электрическое поле в промежутке, что соответствует требованиям стандарта [2].



$$H = 1,8 \text{ м}, h = 1 \text{ м}, C_{\text{гин}} = 31 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}, C_{\text{плоск}} = (200 \div 250) \cdot 10^{-12} \text{ Ф}, R_{\phi} = 630 \cdot 10^3 \text{ Ом}$$

Рис. 2. Схема испытаний

### Результаты исследований

Испытания проведены при таких атмосферных условиях: давление  $(744 \pm 4)$  мм.рт.ст.; температура  $(23 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ , относительная влажность  $(70 \pm 3)\%$ . В соответствии с методикой, описанной в ГОСТ 1516.2-97 [11], проведены испытания трех разрядных промежутков, различающихся стержневым электродом: №1 - квадратное сечение  $12 \times 12 \text{ мм}^2$ ; №2 – заостренный, круглое сечение, диаметр 10 мм; №3 – сечение в виде правильного шестиугольника, диаметр описанной окружности 19 мм.

В процессе испытаний варьировалось зарядное напряжение ГИН ( $U_{\text{зар}}$ ), однозначно связанное с уровнем потенциала, подаваемого на верхний электрод. Измерение параметров испытательного импульса напряжения и времени пробоя осуществлялось одновременно с помощью высоковольтного емкостного делителя и датчика электрического поля. Формы зарегистрированных сигналов по обоим измерительным трактам совпадали (расхождение не превышало 3%).

На рис. 3 представлены совмещенные осциллограммы серии импульсов, которые иллюстрируют разброс времени пробоя в зависимости от уровня приложенного к промежутку напряжения. Естественно, чем выше уровень напряжения, тем быстрее достигается пробой.

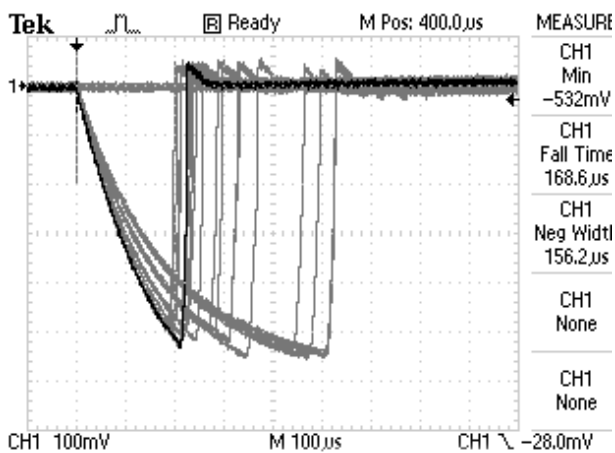


Рис. 3. Осциллограмма серии разрядных импульсов

По результатам испытаний построены вольт-секундные характеристики для всех исследуемых вариантов стержней – молниеприемников. В качестве примера на рисунке 4 представлена вольт-секундная характеристика для стержня квадратного сечения  $12 \times 12 \text{ мм}^2$ . Пунктирная линия соответствует зависимости времени пробоя от уровня приложенного напряжения (разрядного напряжения ГИН). Сплошная линия характеризует значение напряжения на разрядном промежутке, которое меньше разрядного напряжения ГИН, вследствие падения напряжения на разрядном резисторе. Видно, что значение напряжения на разрядном промежутке практически не зависит от времени. Факт важный, поскольку, свидетельствует о том, что для коммутационных импульсов скорость нарастания слабо влияет на значение разрядного напряжения.

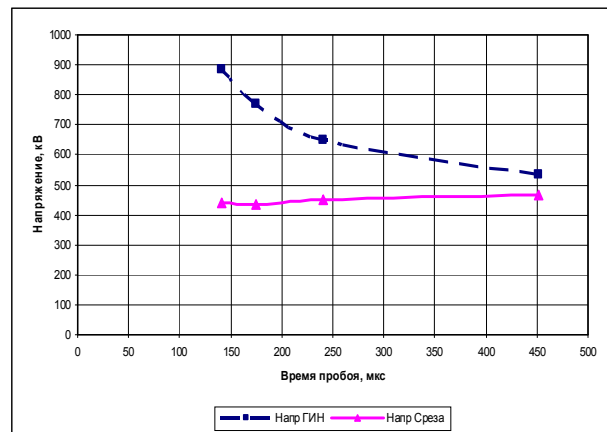


Рис. 4. Вольт-секундная характеристика разрядного промежутка при использовании стержня квадратного сечения  $12 \times 12 \text{ мм}^2$

Однако, разброс значений времени пробоя промежутка, отсчитываемого от начала процесса подачи напряжения, сильно зависит от скорости нарастания.

В табл. 1 представлены результаты оценки среднеквадратичного отклонения значения времени пробоя промежутка для исследуемых образцов молниеприемников. Каждый результат получен по 10 опытам.

Таблиця 1  
Среднеквадратичное отклонение, мкс

U <sub>зар</sub> / U <sub>раз</sub> , кВ	Молниеприемник		
	№1	№2	№3
45 / 532	27.32	20.61	54.58
55 / 650	11.48	71.39	8.24
65 / 767	7.16	7.42	2.99
75 / 887	3.58	8.98	1.96

Данные, приведенные в табл. 1, показывают, что для всех вариантов молниеприемников разброс значений времени достижения пробоя существенно снижается по мере возрастания разрядного напряжения. Например, для квадратного стержня уменьшение почти в 10 раз: с 27,32 мкс при 532 кВ до 3,58 мкс при 887 кВ. Следовательно, для уменьшения неопределенности измерений времени опережения целесообразно испытания ESE терминалов проводить при импульсах напряжения с фронтом около 200 мкс.

### Выводы

Основная составляющая неопределенности результатов измерения времени опережения является составляющей категории «А». Она обуславливается статистическим разбросом времени пробоя разрядного промежутка, зависящим от уровня напряжения, подаваемого на промежуток.

Для уменьшения неопределенности измерений времени опережения целесообразно испытания ESE терминалов проводить при импульсах напряжения с фронтом около 200 мкс.

### Список литературы

1. IEC 62305-3: 2010. Protection against Lightning - Part 3: Physical damage to structures and life hazard.
2. NF C 17-102: 2011. Lightning protection. Protection of structures and open areas against lightning using early streamer emission air terminals.

Поступила в редколлегию 4.04.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.В. Руженцев, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

### СКЛАДОВІ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВОЛЬТ-СЕКУНДНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПРОБОЮ ДОВГОГО ПОВІТРЯНОГО ПРОМІЖКУ

В.В. Князев, О.Ю. Чернухін

У статті розглянуті аспекти оцінки невизначеності результатів експериментальних досліджень процесу електричного пробоя довгого повітряного проміжку. Розглянуті три варіанти форми стрижневого блискавкоприймача. Показаний визначальний вплив часу запізнювання на результати атестації блискавкоприймачів ESE типу. Запропоноване оцінювати якість блискавкоприймачів ESE типу з урахуванням порівняння з вольт-секундною характеристикою еталонного стрижневого блискавкоприймача для повітряних однакових проміжків.

**Ключові слова:** випробування ESE терміналів, невизначеність, електричний розряд, довгий повітряний проміжок, вольт - секундна характеристика.

### COMPONENT UNCERTAINTIES ARE A VOLT - SECOND DESCRIPTIONS OF A LONG AIR INTERVAL ELECTRIC DISCHARGE

V.V. Kniaziev, O.U. Chernukhin

The aspects of estimation of the uncertainties of experimental researches results of process of long air interval electric discharge are considered in the article. Three variants of form of cored lightning terminal are considered. Considerable contributions of delay time on the results of ESE terminals attestation is show. Authors proposes to estimate quality of ESE terminals taking into account comparing to volt-second description of standard cored lightning terminal for air identical intervals.

**Keywords:** test of ESE terminals, uncertainties, electric discharge, long air gap, volt-second description.