

DOI: 10.12737/article_59cd0c6ab20472.63495895

¹Потапенко А.Н., канд. техн. наук, проф.²Кумар Удая, проф.,³Штифанов А.И., канд. техн. наук, доц.,¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова²Indian Institute of Science, Bangalore, India³Белгородский государственный национальный исследовательский университет

О МЕТОДЕ ОЦЕНИВАНИЯ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ МОЛНИЕЗАЩИТЫ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ*

apotapenko454@gmail.com

В статье приведен метод оценивания особенностей схемных решений распределенной внешней молниезащиты высокоэнергетических объектов. В основе метода лежит определение удельного распределения линий функций потока (ЛФП) при решениях краевых задач для систем молниезащиты (СМЗ) объектов, находящихся в электростатическом поле грозового облака. На основе математического моделирования и вычислительных экспериментов этот метод апробирован при исследованиях схемных решений для распределенной СМЗ высокоэнергетических объектов. Исследовались схемы внешних СМЗ как в виде составных молниеприемников типа «металл-изолятор-металл» (МИМ), так и схемы с распределенными металлическими молниеприемниками. На основе анализа результатов вычислительных экспериментов для краевых задач показано, что системы МИМ являются более эффективными в сравнении с металлическими молниеприемниками (результаты отличаются в десятки раз).

Ключевые слова: электростатическое поле, молниеприемники, молниезащита, математическое моделирование, вычислительный эксперимент.

Введение. Принято считать, что основу электрической природы молнии установили исследователи в 18 веке, а именно, американский Бенджамин Франклин (изобретатель «громоотвода», 1775 г.) и российские Михаил Ломоносов и Георг Рихман (погиб при экспериментах по изучению молнии, 1753 г.). Однако и в настоящее время, как заметил Константин Богданов, доктор биологических наук, кандидат физико-математических наук, относительно физики молнии и молниезащиты имеется больше вопросов, чем ответов.

Например, что касается «громоотвода» Франклина в виде «металлического заостренного стержня», находящегося над объектом защиты (ОЗ), т.е. строением, то в [1] (работе Э.М. Базеляна и Ю.П. Райзера) относительно Останкинской телебашни (высотой 540 м) отмечается следующее: «Молниеотвод не в состоянии защитить себя, – звучит анекдотически, но такова реальность!» Авторы работы [1] отмечают систематически проявляющийся эффект, связанный с ударами молний не только в вершину телебашни, а и в ее конструкцию, причем на уровнях до 200 м.

Если представить, что высота бетонной части телебашни с условной крышей порядка 385 м и эту часть можно условно считать ОЗ. Тогда выше ОЗ идет в основном металлическая антенная часть (155 м) с флагштоком на вершине. Согласно [1] антенную часть телебашни можно считать молниеприемником внешней СМЗ, которая

поражается молнией от вершины до нижней части, причем молниеприемник находится над ОЗ, т.е. является по Франклину «громоотводом» для строения. В этом случае Э.М. Базеляном и Ю.П. Райзером фактически зафиксирован эффект возможности попадания молнии в конструкцию молниеприемника, а не только в его вершину. Учитывая, что это не единичный факт, указывающий на существующие противоречия в рамках теоретических предположений об ударах молнии только в заостренные вершины молниеприемников с максимальной напряженностью поля на их остриях, однако на практике наблюдаются и другие случаи [1]. В целом продолжается создание как теоретической основы физических процессов возникновения и развития молнии, так и математических моделей для исследования различных аспектов молнии, в том числе и внешних СМЗ объектов.

Краткий обзор математических моделей и методик с учетом особенностей СМЗ для энергообъектов, в том числе, зданий и сооружений. К высокоэнергетическим объектам относятся ракеты-носители, находящиеся на стартовых площадках (столах) космодромов. Удары молний для них представляют большую угрозу, например, в [2] молния миновала центральный стержневой молниеприемник СМЗ, расположенный на высоте значительно превосходящей шаттл на пусковом устройстве, а ударила в стартовый стол (типа как в [1]). В другом случае удар молнии в

ракеты-носитель Falcon 9 (2016 г.) компании SpaceX с телекоммуникационным спутником привел к взрыву и это существенно затормозило продвижение проекта Internet.org, в рамках которого планировалось подключение к интернету более миллиарда людей, удаленных от цифровых сетей [3]. При этом взрыв ракеты-носителя, например, типа VLS-1 на старте космодрома Алкантара, Бразилия, (2003 г.), мгновенно превратил ракету в фрагменты, а пусковую систему в массу искореженного металла [4]. Эта авария приостановила развитие бразильской космической программы на многие годы [5].

Для исследований физики молнии и СМЗ следует отметить один из важных обзоров математических моделей, методов и методик [6] с учетом последних разработок в этой области. В обзорах [7, 8] по СМЗ для ракетно-космической техники представлены не только математические модели, но и особенности СМЗ, их характеристики, из которых следует выделить эффективные внешние СМЗ составного типа на базе МИМ.

В [9] отмечается, что для изучения нелинейных процессов, связанных с исследованиями ударов молний в объекты, разработаны и доступны математические модели, представленные в работах Ericsson, Dellera и Garbagnati, Pizk, Vecerra и Cooraу и др., в которых определяются лидерные каналы разрядов. В [9] также обобщены особенности нелинейных моделей и приведены примеры расчетов, выполненных авторами Dellera и Garbagnati для линий электропередач (ЛЭП), в которых траектории каналов разряда, представлены условно сходящимися линиями на ЛЭП с учетом рельефа местности. Для исследования реального атмосферного электрического разряда, т.е. разветвления молнии возможно применение, например, математических моделей на основе фрактальных подходов [10].

Вместе с тем на практике для определения зон защиты молниеотводов используются весьма упрощенные модели, а именно, электрогеометрические методы (по защитному углу), а также Rolling Sphere Model, т.е. на базе катящейся сферы. Эти подходы в основе многих стандартов, например, США [11] и других стран (в том числе, для РФ, но с некоторыми особенностями).

Упрощенные электрогеометрические методы, другие математические модели и методики, а также эмпирические зависимости рассмотрены, например, в [12, 13] с указанием их недостатков и ограничений. Например, отмечается, что в целом их невозможно применять на практике для строений, как распределенных на относительно большой площади земли, так и для высотных зданий и сооружений.

Анализ источников, например, [1, 6–13] и др. показал, что отсутствуют математические модели и результаты расчетов об определении особенностей внешних СМЗ на базе молниеприемников типа МИМ как для высокоэнергетических объектов, так и для других типов объектов. Вместе с тем при отсутствии в открытой печати данных математического или физического моделирования и др., следует заметить, что идет развитие этих внешних СМЗ с МИМ, причем их применение можно обнаружить на космодромах в США, Франции, Индии, на совместном российско-французском космодроме в Куру (Французская Гвиана) и др.

Цель работы связана с представлением метода оценивания схемных решений для распределенной внешней СМЗ (с применением молниеприемников типа МИМ или металлических) для высокоэнергетических объектов. За основу принимается подход [14, 15] (Потапенко А.Н., Кумара У. и др.), связанный с математическим моделированием и вычислительными экспериментами при решениях краевых задач для исследований распределенных СМЗ с различными типами молниеприемников.

Особенности предлагаемого метода на основе определения удельного распределения ЛФП при исследованиях СМЗ объекта в условиях грозового облака. Согласно современным представлениям [16] математическое моделирование и вычислительный эксперимент, позволяют исследовать объекты в условиях «виртуальной реальности». В целом это необходимо для познавательных исследований в рамках современных информационных технологий, а именно, для получения новых знаний, их накоплению (архивированию), а также для применения в других областях знаний, например, для процессов, совершенно различных по физической природе, но описываемых одинаковыми по форме уравнениями в частных производных.

Следует отметить, что для распределенных внешних СМЗ (в виде составных молниеприемников типа МИМ и обычных металлических) с объектами в рамках применения предложенного метода определялось удельное распределение ЛФП при решениях краевых задач. На этой основе оценивались различные схемные решения для внешней СМЗ. Расчет электростатических полей относительно грозового облака выполнялся на основе эллиптического уравнения относительно электрической функции потока μ (аналогичного уравнению Лапласа относительно потенциала ψ). За основу решения уравнения в частных производных был принят метод конечных разностей с учетом стандартных приемов и с использованием соответствующих процедур.

При этом для дискретной модели были разработаны разностные схемы, алгоритмы и программы для решения краевых задач с учетом граничных условий.

Главная особенность этого метода связана с определением удельного распределения ЛФП при решении краевой задачи. Это решение представим на упрощенном примере для двумерной области $D(x, y)$. Поле распределения μ определяется из уравнения вида:

$$\Delta \mu = 0. \quad (1)$$

Вместе с тем необходимо заметить, что граничные условия для вычисления поля μ из уравнения (1) и соответственно поля ψ из уравнения Лапласа существенно различаются, т.е. при расчетах функций μ и ψ отсутствует идентичность граничных условий. На базе поля функции потока μ определяются линии семейств $\mu(x, y) = \text{const}$ с заданным шагом, причем каждая из этих линий $\mu(x, y) = \text{const}$ для потенциальных полей начинается на одной из проводящих границ области $D(x, y)$ и заканчивается на другой проводящей границе $D(x, y)$ либо наоборот.

При определении ЛФП в виде $\mu_i(x, y) = \text{const}$ записываются граничные условия исследуемых схем моделей СМЗ с объектами в $D(x, y)$. В общем случае для расчета электростатического поля относительно μ между облаком и поверхностью земли считаем, что на грозовом облаке, т.е. на верхней границе G_i в $D(x, y)$, задается условие вида:

$$\partial \mu / \partial n = 0, (x, y) \in G_i \quad (2)$$

Тогда на поверхности земли, т.е. на нижней границе G_j в $D(x, y)$ также записывается граничное условие аналогичное (2), т.е. в виде:

$$\partial \mu / \partial n = 0, (x, y) \in G_j. \quad (3)$$

В этом случае считается, что границы G_i и G_j являются проводящими в $D(x, y)$, а также считается, что даже при наличии грозового облака в исследуемой $D(x, y)$ отсутствуют как коронные разряды, так и распределенные электрические заряды.

Затем на одной из границ, например, на G_k (перпендикулярной границам G_i и G_j в $D(x, y)$) записывается условие вида:

$$\mu(x, y) = \mu_{01}, (x, y) \in G_k. \quad (4)$$

Здесь $\mu_{01} = \text{const}$ для потенциальных полей и задается в относительных величинах.

Тогда на противоположной границе по отношению к G_k , т.е. на G_n условие следующее:

$$\mu(x, y) = 0, (x, y) \in G_n. \quad (5)$$

Границы G_k и G_n вводятся условно для ограничения области $D(x, y)$, т.е. для сведения внешней краевой задачи к внутренней, например, с учетом подхода [17, 18]. Этот метод не применим к внешним краевым задачам.

Вместе с тем при определении электростатического поля из уравнения Лапласа относительно ψ на проводящих границах G_i и G_j задаются граничные условия как в [19]:

$$\psi(x, y) = \psi_{k0}, \psi(x, y) = 0 \in G_i \text{ и } G_j, \quad (6)$$

Также вместо условий (4) и (5) относительно G_k и G_n для уравнения Лапласа по ψ задаются граничные условия также как в [19]

$$\partial \psi / \partial n = 0, (x, y) \in G_k \text{ и } G_n. \quad (7)$$

Граничное условие вида (7) для ψ в электрических полях – это условие не протекания тока (для электростатических полей название иное). Тогда из уравнения Лапласа при соответствующих граничных условиях определяются эквипотенциальные линии в виде семейства $\psi_i(x, y) = \text{const}$. Важно заметить, что линии семейств

$$\mu_i(x, y) = \text{const} \text{ и } \psi_i(x, y) = \text{const}, \quad (8)$$

в потенциальных полях ортогональны. Таким образом, для краевых задач, решаемых с использованием математического моделирования и вычислительного эксперимента граничные условия для нахождения функций μ и ψ должны различаться.

Для определения компонент напряженности поля E_x и E_y относительно функций ψ и μ записываются зависимости вида:

$$E_x = -\partial \psi / \partial x = -\partial \mu / \partial y; \quad (9)$$

$$E_y = -\partial \psi / \partial y = \partial \mu / \partial x, \quad (10)$$

причем $E_i = \text{grad } \psi = (\psi_{i+1} - \psi_i) / (r_{i+1} - r_i) = \Delta \psi / \Delta r$ (r – соответствующая координата). При этом $E_i = \text{grad } \mu$ практически не применяется.

Дополнительная особенность этого метода. Для решения краевых задач с учетом в исследуемой, например, области $c(x, y)$ реальных соотношений высот между грозовым облаком, поверхностью земли и объектами Ω_i возникает необходимость выполнить масштабирование. Известно, что в современных программных продуктах автоматизирован процесс наложения сетки на исследуемые Ω_i . Также предусмотрена возможность изменения шага сетки, например, в краевых областях (где напряженность электрического поля высокая) с применением значительно меньших тетраэдрических элементов (например, для метода конечных элементов).

Учитывая, что в исходной задаче имеется возможность определения линий семейства вида (8), тогда за основу принимается подход [20], при

котором они применяются как, например, показано на рис. 1, а для масштабирования.

В исследуемой области (см. рис. 1, а) выделяется некоторая область $abcd$ (обозначена пунктиром), подлежащая масштабированию (см. рис. 1, б), для более детального изучения объекта на основе применения ортогональной криволиней-

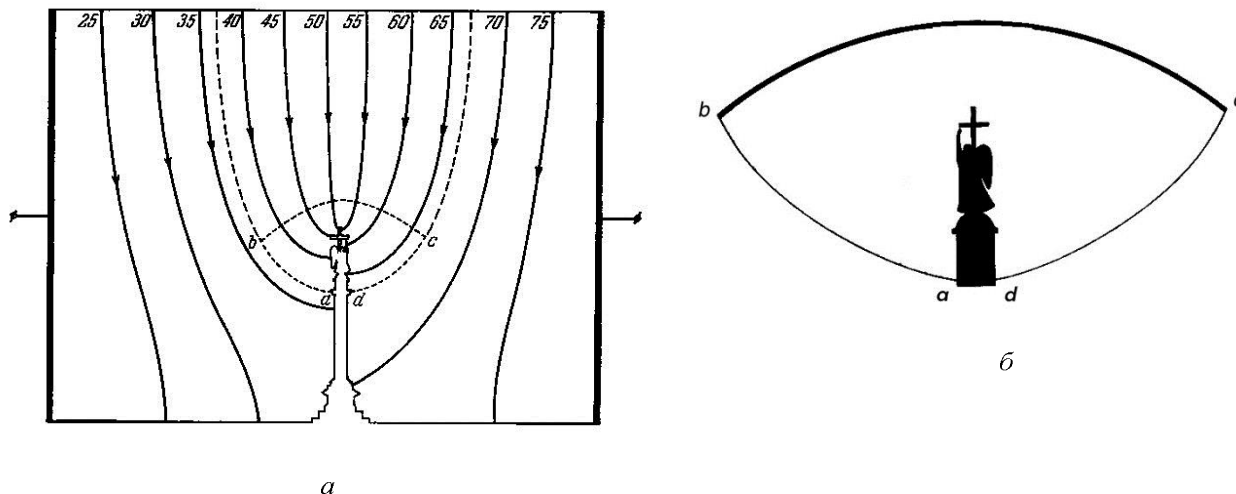


Рис. 1. Пример моделирования с использованием подхода [20]; определяются линии семейства $\mu_i(x, y) = \text{const}$ и $\psi_i(x, y) = \text{const}$ (а); выделяется новая область $abcd$ (б)

Отличительной чертой в модифицированной методике с учетом перехода от одной области к другой является следующее. Необходимо соблюдать условие, при котором верхняя линия из семейства $\psi_i(x, y) = \text{const}$ в исследуемой области $c(x, y)$ должна быть прямой. Это связано с необходимостью выделения некоторой части электростатического поля, где исключено влияние исследуемого объекта на верхнюю границу $\psi_{k0}(x, y) = \text{const}$, а также учитывается степень масштабирования. В этой связи вместо исходной $c(x, y)$ появляется новая область $C(x, y)$. Принципиальное отличие заключается в том, что вместо реальной верхней границы, например, в виде облака в $c(x, y)$ появляется новая $C(x, y)$ с верхней границей в виде некоторой прямой линии $\psi_{k0}(x, y) = \text{const}$ из семейства эквипотенциальных линий. Учитывая, что в потенциальных полях важны не их абсолютные значения, а соотношения этих функций, поэтому на границах $C(x, y)$ задаются в относительных величинах значения требуемых функций.

Таким образом, принципиальная особенность этого метода связана с необходимостью использования удельного распределения ЛФП в рамках решения краевой задачи для оценки схемных решений относительно распределенной молниезащиты высокоэнергетического объекта. Оценка схемных решений выполняется на основе сравнения результатов расчета удельного распределения ЛФП как для внешних СМЗ, так и для защищаемых объектов. Установлено, что чем

больше величина удельного распределения ЛФП на внешних СМЗ и чем меньше она на объекте защиты, тем выше эффективность исследуемого схемного решения.

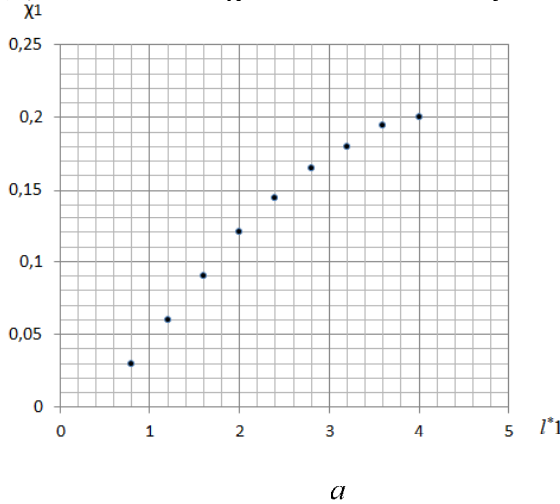
Основные примеры для 3-х вариантов краевых задач.

Вариант 1. В [14] представлены данные расчетов удельного распределения ЛФП для объекта защиты и одного из распределенных металлических СМЗ (см. рис. 2, а и рис. 2, б). Обозначения в вариантах следующие: 1) χ_{1i} – зависимость удельного распределения ЛФП для объекта защиты, как функция $\chi_{1i} = f(l_{1i}^*, H_{2k}^*)$; 2) χ_{3i} – зависимость удельного распределения ЛФП для молниеприемника СМЗ, как функция $\chi_{3i} = f(l_{1i}^*, H_{2k}^*)$.

Эти зависимости представлены в относительных величинах при изменениях дистанций l_{1i}^* между объектом защиты и молниеприемником. Высота объекта защиты $H_3^* = H_i / H_3 = 1$, высота молниеприемника СМЗ $H_{21}^* = H_i / H_3 = 2$, дистанция $l_{1i}^* = l_i / H_3$, причем H_3 – исходная высота объекта защиты принята за основу для нормирования; знак(*) – указывает на нормированные параметры или величины.

Анализ показывает (см. рис. 2), что зависимость удельного распределения ЛФП для объекта защиты χ_{1i} меньше чем χ_{3i} в представленном диапазоне изменения l_{1i}^* . Однако при увеличении дистанции l_{1i}^* более чем $l_{1i}^* = 4$ величины χ_{1i} и χ_{3i} стремятся к некоторому условному пересечению

за счет нелинейностей. Также из анализа зависимостей на рис. 2 следует, что, например, при минимальном значении $\chi_{1min} = 0,03$ ($l_{1i}^* = 0,8$) наблюдается, что значение $\chi_{3i} = 0,67$, т.е. $\chi_{3i} > \chi_{1i}$, причем более чем в 20 раз при $l_{1i}^* = 0,8$. Однако при максимальном значении $\chi_{3max} = 0,735$ ($l_{1i}^* = 1,6$) наблюдается $\chi_{1i} = 0,09$, т.е. также удельное



распределения ЛФП для СМЗ имеет зависимость $\chi_{3i} > \chi_{1i}$, но в пределах до 8 раз (за счет нелинейности). При дальнейшем увеличении дистанции l_{1i}^* более чем $l_{1i}^* = 1,6$ величина χ_{3i} начинает стремительно уменьшаться. Эти данные необходимо учитывать при проектировании систем молниезащит.

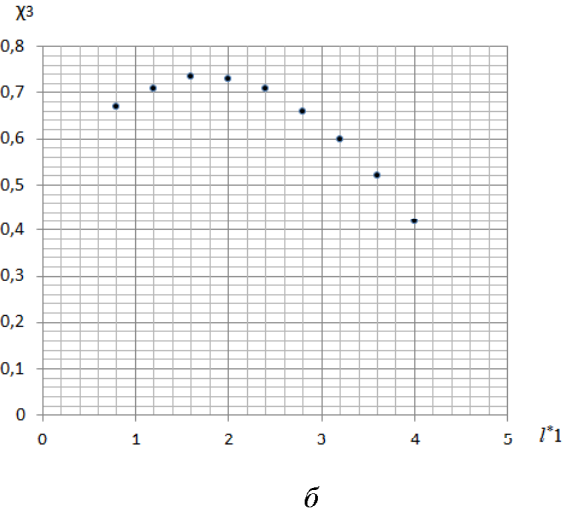


Рис. 2. Изменения удельного распределения ЛФП (χ) при $H_{21}^* = const$ и $l_{1i}^* = var$ для χ_{1i} — объекта защиты (а) и для χ_{3i} — молниеприемника СМЗ (б)

Вариант 2. В случае, если увеличить высоту молниеприемника СМЗ до величины $H_{22}^* = 3$ [14]. (Например, при условии $H_3 = 50$ м исследуемая модель будет в пределах высот $H_{22}^* = H_i / H_3 = 3$, что характерно для двух основных молниеприемников ($H_{22} = 150$ м) на новом космодроме Восточный). Тогда значение χ_{3max} увеличится до $\chi_{3i} = 0,87$ ($l_{1i}^* = 1,6$), а значение для объекта защиты уменьшится до $\chi_{1i} = 0,045$, т.е. при $H_{22}^* = 3$ соблюдается условие $\chi_{3i} > \chi_{1i}$, но уже в пределах до 19 раз. Сравнение этих данных с результатом при $H_{21}^* = 2$ показывает, что увеличение высот молниеприемников СМЗ естественно приводит к увеличению зависимости удельного распределения ЛФП χ_{3i} и соответственно к уменьшению зависимости удельного распределения ЛФП χ_{1i} , т.е. в целом приводит к повышению эффективности исследуемой схемы.

Вариант 3. Вместе с тем, если исследовать внешнюю СМЗ в виде составных молниеприемников типа МИМ [15]. Тогда в условиях как для варианта 1, но при этом высота каждого элемента составного молниеприемника следующая. Высота нижней части (решетчатая металлическая башня) $H_{023}^* = 1,6$; высота средней части (изолятор цилиндрического типа) $H_{022}^* = 0,3$ и высота верхней части (металлический заземленный стержень) $H_{021}^* = 0,1$, т.е. в целом высота $H_{21}^* = H_{023}^* + H_{022}^* + H_{021}^* = 2$ (как в варианте 1). В этом варианте значение χ_{3max} увеличится до $\chi_{3max} =$

0,875 ($l_{1i}^* = 1,6$), а величина χ_{1i} , для объекта защиты уменьшится до $\chi_{1i} = 0,035$, т.е. соблюдается условие $\chi_{3i} > \chi_{1i}$, но уже в пределах до 25 раз. Сравнение данных варианта 3 с результатами при $H_{21}^* = 2$ (вариант 1) показывает, что в исследуемых условиях это приводит к увеличению зависимости удельных распределений ЛФП для СМЗ и уменьшению χ_{1i} для объекта, причем без увеличения высоты молниеприемника (для варианта 3 отношение χ_{3max} / χ_{1i} стремится к 25, а для варианта 1 отношение χ_{3max} / χ_{1i} к 8 раз), т.е. в целом повышается эффективность исследуемой схемы. Следует заметить, что вариант 3 в сравнении с вариантом 2 имеет практически одинаковые результаты по эффективности, но вариант 3 позволит дать значительную экономию затрат, например, для космодрома Восточный как по металлоемкости для каждой конструкции внешней СМЗ, так и по расходам на фундаменты для каждой СМЗ и др.

Выводы. Предлагаемый метод, основанный на решениях краевых задач, позволит дополнить существующие электрогеометрические методы в случаях, где они не дают однозначную оценку, а для других случаев, например, позволит получить единственное решение в виде оценки исследуемых схем внешней СМЗ с молниеприемниками типа МИМ для высокоэнергетических объектов в условиях грозового облака. Выделенные основные особенности предлагаемого метода по

определению электростатического поля относительно электрической функции потока и удельного распределения ЛФП для внешних СМЗ с объектом позволят существенно упростить процесс освоения этого метода. На примерах показаны особенности применения методики анализа при оценках схемных решений распределенной молниезащиты объекта в условиях грозового облака.

Развитие этого метода даст возможность расширить его применение для объектов энергетики (ЛЭП, подстанций, ветроэнергетических установок и др.), для зданий и сооружений, для телекоммуникационных систем и др.

**Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках международного научного проекта №17-58-45155.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит, 2001. 320 с.
2. NASA Facts AC 321/867-2468, Lightning and Space Program, FS-1998-08-16-KSC, August 1998.
3. Ракету Falcon 9 взорвала шаровая молния? – URL: http://paranormal-news.ru/news/raketu_falcon_9_vzorvala_sharovaja_molnija/2016-09-27-12679 (дата обращения 01.03.2017).
4. Лантратов К. Бразильская ракета взорвалась на старте // Коммерсантъ (25 августа 2003), с. 11.
5. 50 лет бразильского освоения космоса – URL: <http://genby.livejournal.com/420452.html> (дата обращения 01.03.2017).
6. Rakov V.A., Rachidi F. Overview of Recent Progress in Lightning Research and Lightning Protection, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. 2009. Vol. 51. №3. Pp. 428-442.
7. Kumar U. Lightning Protection of Satellite Launch Pads, in Lightning Protection, edited by V. Cooray, IEE Power and Energy Series 58, United Kingdom: IET, 2010. P. 789–819.
8. Kumar U., Nagabhushana G.R. Analysis of Lightning Protection System for Indian Satellite Launch Pad, National Interagency coordination group Lightning Conference, Orlando, Florida, USA, 2000. 12th April.
9. Malgesini R., Fenomeni di fulminazione diretta ed indiretta di linee elettriche: modellazione e sperimentazione in laboratorio, Rapporto RSE 09004921 – URL: http://www.rseweb.it/documenti.page?RSE_originalURI=/documenti/documento/2822&RSE_manipulatePath=yes&country=ita#sthash.CenPpSEj.dpuf (дата обращения 01.03.2017).
10. Yazhong Xu, Mingli Chen, Striking distance calculation for flat ground and lightning rod by a 3D self-organized Leader Propagation Model, 2012 International Conference on Lightning Protection, Vienna, Austria, 2012.
11. NFPA 780: Standard for the Installation of Lightning Protection Systems, 2004. 108 p.
12. D'Alessandro F.A., Gumley J.R., 'Collection Volume Method' for the placement of air terminals for the protection of structures against lightning, // Electrostatics. 2001. № 50. P. 279–302.
13. Preventing Direct Lightning Strikes, Rev. B - Carpenter, et al. - March 2014. – URL: <http://www.lightningprotection.com/> (дата обращения 01.09.2017).
14. Потапенко А.Н., Кумар У., Потапенко Т.А., Штифанов А.И. Исследование распределенной молниезащиты стартовых площадок космодромов на основе вычислительного эксперимента // Фундаментальные исследования. 2015. № 11-4. С. 727–734.
15. Штифанов А.И., Потапенко А.Н., Потапенко Т.А., Кумар У. Вычислительные эксперименты с возможностью определения основных особенностей составных молниеприемников // Фундаментальные исследования. 2015. № 11-6. С. 824–831.
16. Плохотников К.Э. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент: методология и практика // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. 2009. Т. 13. № 1-4. С. 5–32.
17. Potapenko T.A., Kanunnikova E.A., Potapenko A.N. Research of 3-D Exterior boundary problems related to electric fields in atmosphere by inversion method // Electric Power Systems Research. 2014. Vol. 113. P. 10–14.
18. Potapenko T.A., Kanunnikova E.A., Potapenko A.N. Research of 3-D Exterior Boundary Problems Related to Electric Fields in Atmosphere by Inversion Method // 2012 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria. 2012.
19. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: В 3- т. Учебник для вузов. Том 3. 4-е изд. СПб.: Питер, 2003. 377 с.
20. Рязанов Г.А. Опыты и моделирование при изучении электромагнитного поля. М.: Наука, 1966. 208 с.

Информация об авторах

Потапенко Анатолий Николаевич, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры электроэнергетики и автоматики.

E-mail: apotapenko454@gmail.com

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кумар Удая, профессор.

E-mail: uday@hve.iisc.ernet.in

High Voltage Lab, Dept. of Electrical engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, INDIA

CV Raman Rd, Bengaluru, Karnataka 560012, INDIA

Штифанов Андрей Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем управления.

E-mail: shtifanov@bsu.edu.ru

Белгородский государственный национальный исследовательский университет (НИУ «БелГУ»).

Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85.

Поступила в августе 2017 г.

© Потапенко А.Н., Кумар У., Штифанов А.И., 2017

Potapenko A.N., Kumar U., Shtifanov A.I.

**ABOUT THE METHOD FOR ESTIMATION OF CIRCUIT SOLUTIONS
FOR DISTRIBUTED LIGHTNING PROTECTION OF HIGH-ENERGY OBJECTS**

The article presents a method for estimating the features of circuit solutions for distributed external lightning protection of high-energy objects. The method is based on determining the appanage distribution of the flow function lines (FFL) for solving boundary value problems for lightning protection systems (LPS) for objects in the electrostatic field of a thunderstorm cloud. On the basis of mathematical modeling and computational experiments, this method was tested in the study of circuit solutions for distributed LPS high-energy objects. The circuits of external LPSs were studied both in the form of composite lightning receivers of the metal-insulator-metal type (MIM) and circuits with distributed metallic lightning receivers. An analysis of the results of computational experiments for boundary value problems has shown that MIM systems are more efficient (the results differ in dozens of times) under conditions of lightning interception.

Keywords: electrostatic field, lightning receivers, lightning protection, mathematical modeling, computational experiment

Information about the author

Potapenko Anatoliy Nikolaevich, Ph.D., Professor

E-mail: apotapenko454@gmail.com

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kumar Udaya, Professor, High Voltage Lab, Dept. of Electrical engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, INDIA

E-mail: uday@hve.iisc.ernet.in

CV Raman Rd, Bengaluru, Karnataka 560012, INDIA

Shtifanov Andrei Ivanovich, Ph.D., Assistant professor.

E-mail: shtifanov@mail.ru

Belgorod National Research University, Belgorod,

Russia, 308015, Belgorod, Pobedy 85 st.

Received in August 2017

© Potapenko A.N., Kumar U., Shtifanov A.I., 2017