

Research of Lightning Protection Systems of Wind Power Plant

¹Potapenko A.N., ²Kumar Udaya, ³Shtifanov A.I., ¹Soldatenkov A.S.

¹Belgorod State Technology University n.a. V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

²Indian Institute of Science (IISc), Bangalore, India

³Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Abstract. The work is dedicated to the study of the influence of the wind turbine lightning protection system on the possibility of a lightning strike to the lightning rod, to the protected object and to the surface of the earth. The aim of the work is to study atmospheric electric fields for a complex object: a wind turbine, a thundercloud and a surface of the earth, in two versions - with and without a lightning protection system. This goal is achieved by constructing a mathematical model based on the Laplace equation of elliptic type and boundary conditions for calculating the electric flow function. Computational experiments over a wind turbine carried out in two basic configurations: using a rod-type lightning protection system and without it. The most significant result of the work is a mathematical model with boundary conditions that determines the rigid boundaries of the object of study and constant values at the free and symmetric boundaries for calculating the electric flow function, the method of finding the specific distribution of the lines of the flow function along the boundaries of the studied wind power installation, and the results of computational experiments. As a result, it was found that the applied numerical calculation method allows analyzing the features of the atmospheric electrostatic field near the pointed peaks. The proposed mathematical model makes it possible increasing of the efficiency of lightning protection of a power plant and can be used to simulate other objects using a rod type of lightning protection.

Keywords: mathematical modeling, lightning protection; wind turbine; computational experiment; lines of electric force, electrostatic field.

DOI: 10.5281/zenodo.3367052

Studiul sistemelor de protecție împotriva trăsnetului a centralelor eoliene

¹Potapenko A.N., ²Kumar U., ³Shtifanov A.I., ¹Soldatenkov A.S.

¹ Universitatea Tehnologică de Stat din Belgorod V. G. Shukhov, Belgorod, Rusia

² Institutul Indian de Știință, Bangalore, India

³ Universitatea Națională de Stat de Cercetare din Belgorod, Belgorod, Rusia

Rezumat. Lucrarea este dedicată studierii efectului sistemului de protecție împotriva trăsnetului a unei clădiri înalte amplasate separat, folosind exemplul unei turbine eoliene privind posibilitatea unui fulger în zonele caracteristice: tija circuitului de trăsnet, obiect protejat și suprafața pământului. Scopul lucrării este modelarea matematică a câmpurilor electrice atmosferice pentru o turbină eoliană pentru două cazuri: turnul este dotat cu paratrăsnet și fără paratresnet. Simularea se bazează pe un calcul numeric al fluxului intensității câmpului electrostatic și are ca obiectiv estimarea eficienței sistemului de protecție împotriva loviturii de trăsnet și a probabilității unui accident condiționat de lovitura de trăsnet. Obiectivul este atins prin construirea unui model matematic bazat pe ecuația Laplace de tip eliptic și anumite condiții de delimitare pentru calcularea funcției fluxului electric. Calculele au fost realizate pentru două configurații de bază - cu și fără un sistem de protecție de tip tijă. Lungimea tije terminalului a fost variabilă. Noutatea lucrării este determinată de modelul matematic și condițiile de limită propuse propus, cu anumite condiții de delimitare pentru calcularea funcției debitului electric, metoda determinării distribuției specifice a liniilor funcției fluxului la interfața instalației eoliene cu mediul și rezultatele calculului. S-au determinat dependențele evoluției probabilității loviturii de trăsnet în tijă în funcție de lungimea terminalului tije și a probabilității loviturii fulgerului în turbina eoliană. Modelul matematic permite analiza câmpului electric din apropierea vârfulor ascuțite a tijelor, suprafața solului, sporirea eficienței protecției împotriva trăsnetului a centralei eoliene și poate fi utilizat pentru modelarea altor obiecte, care folosec tipul de tijă de protecție împotriva trăsnetului.

Cuvinte-cheie: modelare matematică, protecție împotriva trăsnetului, instalație energetică eoliană, experiment numeric de calcul, linii de câmp, câmp electrostatic.

Исследование системы молниезащиты ветроэнергетической установки**¹Потапенко А.Н., ²Кумар У., ³Штифанов А.И., ¹Солдатенков А.С.**¹Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород, Россия²Индийский институт науки, Бангалор, Индия³Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия

Аннотация. Работа посвящена исследованию влияния системы молниезащиты отдельно стоящего высотного сооружения на примере ветроэнергетической установки на возможность удара молнии в характерные зоны: стержень молниеприемника, защищаемый объект и поверхность земли. Целью работы является исследование атмосферных электрических полей для комплексного объекта: ветровая турбина, грозовое облако и поверхность земли, в двух вариантах – с применением системы молниезащиты и без нее. цель достигается за счет построения математической модели на основе уравнения Лапласа эллиптического типа и граничных условий для вычисления электрической функции потока. Проведены вычислительные эксперименты для установки в двух базовых конфигурациях – с применением системы молниезащиты стержневого типа и без неё, причем в конфигурации с применением системы молниезащиты варьировалась длина стержня молниеприемника. Наиболее существенным результатом работы является математическая модель с граничными условиями, которые определяют жесткие границы объекта исследования и константные значения на свободной и симметричной границах для вычисления электрической функции потока, методика нахождения удельного распределения линий функции потока вдоль границ исследуемой ветроэнергетической установки и результаты вычислительных экспериментов. В результате были найдены две зависимости в функции от длины стержня: первая - зависимость изменения количества эквипотенциальных линий функции потока, попадающих в стержень молниеприемника, и вторая - зависимость изменения количества эквипотенциальных линий функции потока, попадающих в ветровую турбину. Значимость полученных результатов состоит в определении эффективной длины молниеприемника для исследуемого объекта. Предложенная математическая модель позволяет анализировать атмосферное электростатическое поле вблизи остроконечных пиков и на поверхности земли рядом с защищаемым объектом, а также может быть применена для моделирования других объектов, использующих стержневой тип молниезащиты.

Ключевые слова: математическое моделирование, молниезащита, ветроэнергетическая установка, вычислительный эксперимент, силовые линии поля, электростатическое поле.

ВВЕДЕНИЕ

Исследованию физики разряда молний и различных систем защиты от удара молний посвящено большое количество работ, из которых можно выделить [1, 2], где рассматриваются вопросы классификации основных математических моделей, включая современные методы и методики расчета систем молниезащит.

В работах [3-7] авторами предлагаются нелинейные математические модели для исследования процессов образования молнии, встречного движения нисходящего лидера молнии и восходящего лидерного разряда. Например, в работе [4] представлены подходы к исследованию опор линий электропередач с учетом рельефа местности, в которой авторы представляют каналы разряда некоторым семейством линий в пространстве между грозовым облаком и объектами на поверхности земли, не учитывая возможность разветвления разряда молнии.

Развитием математических моделей, учитывающих разветвление молнии и

пригодных для исследования реального атмосферного электричества, являются, например, фрактальные подходы, представленные в [8].

В работе [9] представлен анализ различных эмпирических зависимостей и упрощенных методов организации защиты от молнии.

Однако рассмотренные подходы являются частными случаями и не предполагают количественного обобщения, что в целом не позволяет применять их на практике для строений и сооружений, значительно распределенных как по высоте, так и по площади [10].

Исследования, основанные на методе удельного распределения линий функций потока в области моделирования для сложных и распределенных объектов, представлены в работах [11, 12].

Известно, что два семейства кривых в потенциальном поле пересекаются под прямым углом и их уравнения, например, для плоской задачи имеют вид:

$$\begin{cases} \psi(x, y) = \text{const}, \\ \chi(x, y) = \text{const} \end{cases} \quad (1)$$

Из двух видов семейств (1) кривые, описываемые выражением $\psi(x, y) = \text{const}$ являются эквипотенциальными линиями, а соответственно ψ – потенциал. Тогда кривые $\chi(x, y) = \text{const}$ представляют собой силовые линии электростатического поля (сокращенно силовые линии), а функция χ – электрическая функция потока. Известно, что в двумерном пространстве в общем случае семейства (1) представляются в виде ортогональной криволинейной сетки [13].

Как и потенциал ψ , электрическая функция потока χ является относительной характеристикой поля, причём физический смысл имеет только разность её значений. Так как вектор напряженности поля E направлен по касательной к силовой линии (поверхности) электростатического поля, поэтому линейный поток напряженности поля через любой отрезок силовой линии равен нулю. Поэтому силовая линия поля характеризуются одним значением функции потока χ_i , причём каждая силовая линия в плоском или плоскопараллельном поле представляет собой соответственно линию или поверхность функции потока в виде $\chi(x, y) = \text{const}$.

Известно, что приращение потенциала $d\psi$ связано с нормальной составляющей напряженности поля зависимостью:

$$d\psi = -E_n dn. \quad (2)$$

Здесь знак минус означает, что падение ψ происходит в направлении силовой линии электростатического поля. Аналогично и для приращения $d\chi$:

$$d\chi = -E_n dl. \quad (3)$$

С учётом зависимостей (2) и (3), нормальная составляющая напряженности поля E_n определяется в виде:

$$\begin{cases} E_n = -d\psi/dn, \\ E_n = -d\chi/dl. \end{cases} \quad (4)$$

Следовательно, напряженность поля равна падению потенциала на единицу длины в

направлении силовой линии или увеличению электрической функции потока на единицу длины в направлении эквипотенциали.

Для определения компонентов поля E_x и E_y с учётом (4) записываются зависимости вида:

$$\begin{cases} E_x = -\partial\psi/\partial x = -\partial\chi/\partial y, \\ E_y = -\partial\psi/\partial y = -\partial\chi/\partial x. \end{cases} \quad (5)$$

На комплексной плоскости соотношения (5) аналогичны уравнениям Коши–Римана. В работе [13] показано, что для представления полной картины электрического поля на основе функции потока χ и потенциальной функции ψ необходимо решить уравнение Лапласа с использованием ортогональной прямолинейной сетки.

Представленный в данной статье метод расчета может использоваться для различных схем молниезащиты объектов, в том числе ветровых турбин. Метод позволяет определять характеристики электростатического поля в заданной области на основе прикладных вычислительных экспериментов. В расчетах используется уравнение Лапласа относительно функции потока χ . В зависимости от функции χ или потенциала ψ , которые учитываются в краевой задаче, существуют различные формулировки граничных условий, связанных с уравнением Лапласа.

Применение метода удельного распределения линий функции потока χ позволяет, во-первых, расширить существующие методы и приемы, такие как метод скользящей сферы, метод защитного конуса, угол защиты и т.д. Во-вторых, он позволяет обеспечить переход от множества рассмотренных выше упрощенных подходов к математическому моделированию электростатического поля. Среди работ по молниезащите ветровых турбин следует отметить работу Le Pignon [14], в которой рассматриваются различные инновационные технические решения. Указанная работа является основой для сравнительного анализа результатов расчета, полученных в рамках предлагаемого способа.

Цель работы: математическое моделирование атмосферных электрических полей для ветровой турбины, расположенной между грозовым облаком и поверхностью

земли, в двух случаях – с системой молниезащиты и без нее, основанное на численном расчете потока напряженности электростатического поля; а также определение эффективности молниезащиты и объективной возможности удара молнии для ветряной турбины.

МЕТОДЫ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Общая постановка задачи. Электростатическое поле в области $D(x, y)$ для объекта Ω_0 (ветровая турбина в двух случаях – с приложенным молниеприемником и без него) определяется с учетом исходных данных Le Pironnes [14] и Soerensen [15]. За основу взята схема моделирования ветровой турбины с длиной лопасти ротора $L_0 = 60$ м. Для области $D(x, y)$, содержащей объект Ω_0 , решается двумерная краевая задача. На рисунке 1 показана вычислительная схема, в которой одна из лопастей турбины лежит в нижней части оси, а две другие – в верхней части области $D(x, y)$ относительно оси симметрии. При этом сам молниеприемник считается имеющим цилиндрическую форму.

Сведение внешней краевой задачи к внутренней с минимальными погрешностями показано в работах [16, 17] на примере расчета трехмерной задачи. Такой подход может быть распространен и на объект Ω_0 , который находится в центральной части области $D(x, y)$ относительно 2-х горизонтальных плоскостей: нижней частью облака и поверхностью земли. При этом боковые границы задаются условием $E_n = 0$, где E_n – напряженность электрического поля. В рамках вычислительного эксперимента предполагается, что границы области $D(x, y)$, представленные на рис. 1, следующие: G_1 – поверхность земли; G_5 – башня ветровой турбины; G_6 – лопасть ротора, соединенная с гондолой; G_3 – некоторая поверхность $\psi_{k0} = \text{const}$, которая вводится в расчётную область в качестве границы облака на основе [18]. При этом согласно данным [18, 19], для того, чтобы такая замена стала возможной, достаточно, чтобы область $\psi_{k0} = \text{const}$ находилась на высоте не менее 3-х высот башни ветровой турбины. С учётом симметрии электроэнергетического объекта

границы G_2 и G_4 ограничивают область $D(x, y)$ по бокам.

Распределение функции потока χ для исходной краевой задачи определяется из уравнения Лапласа эллиптического типа в следующем виде:

$$\frac{\partial^2 \chi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \chi}{\partial y^2} = 0, \quad (x, y) \in D(x, y). \quad (6)$$

Вместе с тем необходимо заметить, что граничные условия для вычисления потока χ или потенциала ψ из уравнения Лапласа существенно различаются, т.к. отсутствует идентичность граничных условий. В дальнейшем на основе рассчитанного поля χ силовые линии определяются с некоторым заданным интервалом.

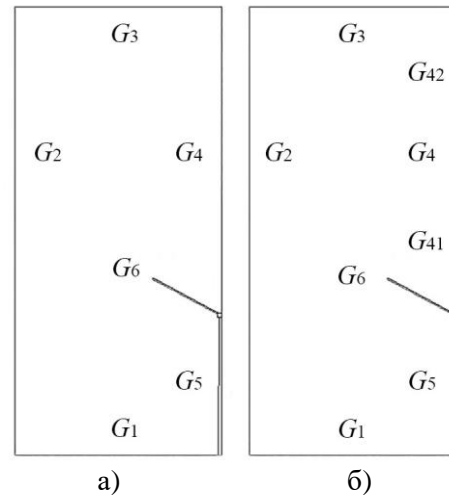


Рис. 1. Схема моделирования расчетной области $D(x, y)$ с ветровой турбиной без применения молниеприемника (а) и с молниеприемником (б).¹

Для первой задачи, содержащей ветровую турбину без применения молниеприемника (рис. 1, а), граничные условия определяются следующим образом:

- на границах G_1, G_3 области $D(x, y)$:

$$\frac{\partial \chi}{\partial n} = 0, \quad (x, y) \in G_1, G_3, \quad (7)$$

- на границах турбины G_5 и G_6 :

$$\frac{\partial \chi}{\partial n} = 0, \quad (x, y) \in G_5, G_6, \quad (8)$$

¹ Appendix 1

- на границе G_2 области $D(x, y)$:

$$\chi(x, y) = \chi_0 = \text{const}, \quad (x, y) \in G_2, \quad (9)$$

- на границе G_4 области $D(x, y)$:

$$\chi(x, y) = 0, \quad (x, y) \in G_4 \quad (10)$$

где $D(x, y)$ – исследуемая область, ограниченная $G_1 - G_6$; χ_0 – некоторая константа. Дифференцирование по нормали в граничных условиях (7) и (8) определяет жесткую границу области $D(x, y)$ на которой задается условие непротекания потока χ .

Для второй задачи, содержащей ветровую турбину с молниеприемником, расположенном на гондоле (рис. 1, б), вместо условия (10) добавляются следующие граничные условия:

- на нижней части G_4 , т.е. на границе G_{41} , где находится молниеприемник:

$$\frac{\partial \chi}{\partial n} = 0, \quad (x, y) \in G_{41} \quad (11)$$

- на оставшейся части границы G_4 выше молниеприемника (на G_{42}):

$$\chi(x, y) = 0, \quad (x, y) \in G_{42}. \quad (12)$$

Таким образом, для первой краевой задачи, содержащей ветровую турбину без применения молниезащиты, используются уравнение (6) с граничными условиями (7) – (10), а для второй задачи, содержащей ветровую турбину и молниеприемник, – уравнение (6) с граничными условиями (7), (8) и (11), (12).

В рамках данной работы предлагается исследование электростатического поля в области $D(x, y)$; при этом считается, что это поле относительно мало – такой подход действителен до появления коронного разряда в грозových облаках и при отсутствии электрических пространственных зарядов в атмосфере в границах исследуемой области.

Постановка задачи в дискретной области для ветровой турбины без молниеприемника. Принимая во внимание уравнение (6) и граничные условия (7) – (10) запишем систему уравнений в операторной форме для определения функции поля χ в

узлах (i, j) дискретной области $D_d(x, y)$ (рис. 1, а) в следующем виде:

$$W_h \chi^{(h)} = \begin{cases} W_{xx} \chi_{ij} + W_{yy} \chi_{ij} = 0, & (x_i, y_j) \in D_d(x, y); \\ W_n \chi_{ij} = 0, & (x_i, y_j) \in G_1, G_3, G_5, G_6; \\ \chi_{ij} = \chi_0, & (x_i, y_j) \in G_2; \\ \chi_{ij} = 0, & (x_i, y_j) \in G_4. \end{cases} \quad (13)$$

Здесь $W_{xx} = \frac{\partial^2}{\partial x^2}$, $W_{yy} = \frac{\partial^2}{\partial y^2}$, $W_n = \frac{\partial^2}{\partial n}$ –

конечно-разностные аппроксимации, соответствующие частным производным функции χ . Область $D_d(x, y)$ является дискретной с равномерной прямоугольной сеткой с шагом $\Delta_x = \Delta_y = h$. Для аппроксимации различных границ используется известный алгоритм Брезенхэма (Jack E. Bresenham) [20].

Постановка задачи в дискретной области для ветровой турбины с молниеприемником. По аналогии, учитывая уравнение (6) и граничные условия (7) – (10), дополненные (11) и (12), запишем систему уравнений в операторной форме для определения функции χ в узлах (i, j) дискретной области $D_d(x, y)$ (рис. 1, б) в следующем виде:

$$W_h \chi^{(h)} = \begin{cases} W_{xx} \chi_{ij} + W_{yy} \chi_{ij} = 0, & (x_i, y_j) \in D_d(x, y); \\ W_n \chi_{ij} = 0, & (x_i, y_j) \in G_1, G_3, G_{41}, G_5, G_6; \\ \chi_{ij} = \chi_0, & (x_i, y_j) \in G_2; \\ \chi_{ij} = 0, & (x_i, y_j) \in G_4. \end{cases} \quad (14)$$

В качестве численного метода определения распределения поля функции потока $\chi_{i,j}$ используется метод Либмана [21] с ускоряющим множителем; что обусловлено необходимостью оптимизации итерационного процесса из-за большой длительности расчетов. Функция потока χ в узлах (i, j) рассчитывается на границах G_i дискретной области $D_d(x, y)$ с учетом конечно-разностных аппроксимаций для граничных условий (7) – (10) или (7), (8) и (11), (12) в зависимости от решаемой задачи.

Результаты расчетов. Результаты вычислительного эксперимента представлены в относительных величинах путем нормирования размерных единиц следующим

образом: приведенная длина молниеприемника L^* нормируется длиной лопасти ветровой турбины ($L_0 = 60$ м).

Инновационные технические решения при исследовании ветровых турбин с различными типами молниезащиты представлены в работе [14]. Для качественного сравнения указанных в ней данных с результатами расчетов по предлагаемому методу математического моделирования были выбраны следующие длины молниеприемников:

- $L_{11}^* = 0.1$, т.е. $L_{11} = 6$ м;
- $L_{12}^* = 1.0$, т.е. $L_{12} = 60$ м;

- $L_{13}^* = 1.67$, т.е. $L_{13} = 100$ м.

Значения от L_{11}^* до L_{13}^* значительно превышают типичные высоты молниеприемников, применяемых для защиты гондол ветровых турбин, однако такой подход предложен в [14]. Размеры лопастей ветровых турбин и молниеприемников в сечениях (см. рис. 1) не учитываются, так как они незначительны по сравнению с высотой ветрогенератора.

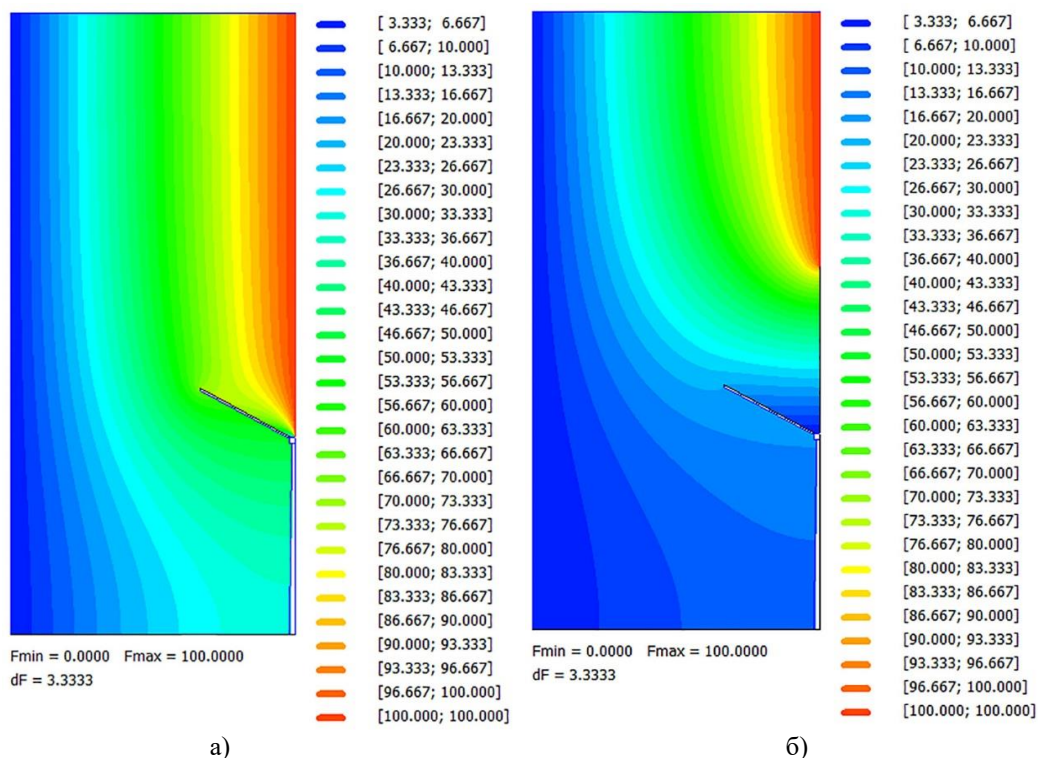


Рис. 2. Результаты расчета атмосферных электрических полей для ветровой турбины в области $D(x, y)$ без молниеприемника (а) и с молниеприемником (б).²

Пример расчета атмосферного электростатического поля в области $D(x, y)$, содержащей ветровую турбину без применения системы молниезащиты стержневого типа, представлен на рис. 2, а в виде силовых линий $\chi_k = \text{const}$ с равными интервалами $dF = \Delta\chi = 3.33$. dF – это шаг приращения значений, попавших в эквипотенциальную линию. Например, если количество эквипотенциальных линий n_k равно 30, то $F_{\text{max}}/n_k = 100/30 = 3.33$. Расчет с молниеприемником представлен на рис. 2, б. Во всех случаях при моделировании на

границе G_4 функция $\chi(x, y) = F_{\text{min}} = 0$, на границе G_2 : $\chi(x, y) = \chi_0 = F_{\text{max}} = 100$. В квадратных скобках указан диапазон значений, попавших в конкретную эквипотенциальную линию с определенным цветовым оттенком. Расчет выполнялся с применением программного обеспечения собственной разработки. Рассчитанные значения удельного распределения линий $\chi_k = \text{const}$ вдоль границ элементов представлены в относительных единицах:

$$\chi_k^* = 100 \left(\frac{n_k}{n_0} \right), \quad (15)$$

² Appendix 1

где n_k – количество линий $\chi_k = \text{const}$, входящих в элемент (связанных с исследуемым элементом) ветровой турбины, поверхности земли и молниеприемника в области $D(x, y)$, n_0 – общее число линий.

Результаты расчетов значений n_k и χ_k^* по полученным данным (рис. 2) для $L_{10}^* = 0$ (молниеприемник отсутствует), и $L_{1\text{max}}^* = L_{13}^*$ (молниеприемник максимальной длины)

представлены в табл. 1, а найденные значения χ_k^* в области $D(x, y)$ при различных $L_{1k}^* = \text{var}$ сведены в табл. 2.

На основе результатов численных расчетов построим две зависимости (рис. 3):

1) $\chi_1^* = F(L_{1k}^*)$ – зависимость изменения количества эквипотенциальных линий функции потока, попадающих в стержень молниеприемника от длины стержня;

Таблица 1³.

Результаты расчетов n_k и χ_k в области $D(x, y)$ с L_{10}^* и $L_{1\text{max}}^*$ ⁴

Элементы $D(x, y)$ (elements in $D(x, y)$)	Ветровая турбина без молниеприемника (wind turbine without applied lightning air termination)		Ветровая турбина с молниеприемником (wind turbine with lightning air termination)	
	n_k	$\chi_k, \%$	n_k	$\chi_k, \%$
Ветровая турбина (wind turbine)	28.5	71.25	3.5	8.75
Поверхность земли (earth surface)	11.5	28.75	3.5	8.75
Молниеприемник (lightning air termination)	0	0	33.0	82.5

Таблица 2⁵.

Результаты расчетов для χ_k в области $D(x, y)$ с различными $L_{1k}^* = \text{var}$ ⁶

Элементы $D(x, y)$ (elements in $D(x, y)$)	$\chi_k^*, \%$			
	$L_{10}^* = 0$	$L_{11}^* = 0.1$	$L_{12}^* = 1.0$	$L_{13}^* = 1.67$
Ветровая турбина (wind turbine)	71.25	34.75	12.5	8.75
Поверхность земли (earth surface)	28.75	26.5	13.75	8.75
Молниеприемник (lightning air termination)	0	38.75	73.75	82.5

2) $\chi_2^* = F(L_{1k}^*)$ – зависимость изменения количества эквипотенциальных линий функции потока, попадающих в ветровую турбину с молниезащитой от длины стержня.

Сравнительный анализ результатов моделирования на рис. 3 в области $D(x, y)$, показал следующее:

1. Установлено, что исследуемая основная функциональная зависимость $\chi_k^* = F(L_{1k}^*)$ для ветровой турбины и молниеприемника имеет нелинейный характер.

2. Функция потока χ_2^* для ветровой турбины (с системой молниезащиты и без неё) уменьшается от 71.25 ($L_{10}^* = 0$) до 8.75 ($L_{1\text{max}}^*$). В первом приближении это изменение носит убывающий

экспоненциальный характер.

3. Функция потока χ_1^* молниеприемника, расположенного на гондоле ветровой турбины, наоборот, увеличивается от нуля при $L_{10}^* = 0$ до 82.5 при $L_{1\text{max}}^*$. Приблизительно, это изменение также может быть представлено в виде возрастающей экспоненциальной характеристики.

4. Увеличение функции потока χ_1^* определяет увеличение эффективности перехвата разряда молнии молниеприемником [11, 12]. Тогда как уменьшение функции потока χ_2^* указывает на непосредственно снижение объективной возможности удара молнии в ветровую турбину (включая лопасти).

Рассматриваемые зависимости $\chi_1^* = F(L_{1k}^*)$ и $\chi_2^* = F(L_{1k}^*)$ имеют тенденцию к относительно крутому изменению на начальном отрезке от 0 до $L_{11}^* = 0.1$, а затем становятся более пологими. Следовательно, эффективность перехвата молнии системой молниезащиты начинает проявляться сразу в начальной части графика $\chi_1^* = F(L_{1k}^*)$, а значение χ_1^* увеличивается от 0 до 38.75. При этом значение χ_2^* уменьшается до 34.75. В

общем, исследуемые зависимости при $L_{11}^* = 0.1$ практически сближаются, и с увеличением значения L_{1k}^* эффективность молниезащиты продолжает увеличиваться, а объективная возможность попадания молнии в ветряную турбину соответственно уменьшается. Таким образом, длина молниеприемника может быть определена из указанных расчетных зависимостей как точка их пересечения.

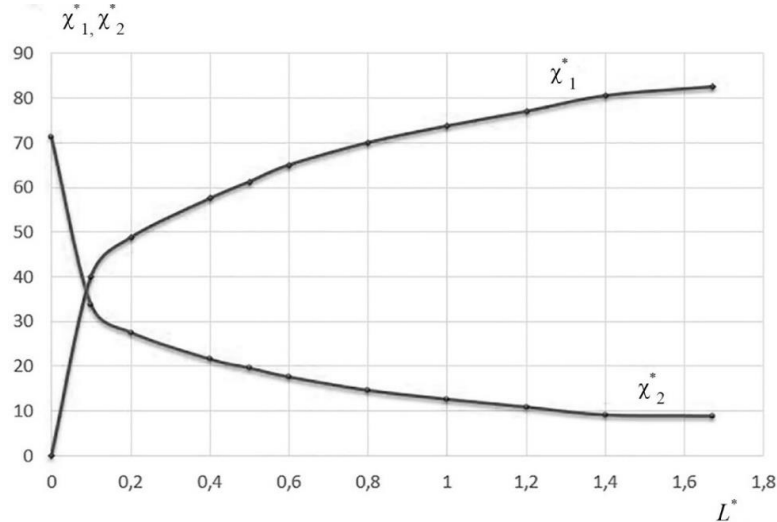


Рис. 3. χ_1^* – зависимость изменения количества эквипотенциальных линий функции потока, попадающих в стержень молниеприемника от длины стержня; χ_2^* – зависимость изменения количества эквипотенциальных линий функции потока, попадающих в ветроэнергетическую установку с молниезащитой от длины стержня.⁷

Полученный характер изменения зависимости $\chi_k^* = F(L_{1k}^*)$ на поверхности земли вблизи ветровой турбины отличается от данных, приведенных в [14], что согласно материалам [11, 12] позволяет объяснить известный пример [22], касающийся удара молнии в нижнюю часть стартовой площадки космического челнока, а не в систему молниезащиты, как предполагалось при проектировании, и это при том, что молниеприемник имел высоту, значительно превышающую защищаемую конструкцию.

Важно отметить, что на основе определения χ и напряженности поля можно вычислить плотность распределения электрического заряда $\sigma_{j\Omega}$ по стержню, по поверхности земли и под облаком, а также определить другие линейные электрические параметры исследуемого объекта. По максимальному значению E_m^* можно

оценивать, например, вероятную точку попадания молнии в объекты или оптимизировать расположение молниеприемников. Таким образом, на основании полученных результатов подтверждается возможность применения стержневого молниеприёмника, устанавливаемого на гондоле ветровой турбины, так как с увеличением χ_1^* для молниеприемника соответственно уменьшается χ_2^* для ветровой турбины, что в свою очередь определяет эффективность молниезащиты, снижает объективную возможность удара молнии в защищаемый объект, и подтверждается данными [14], хотя с инженерной точки зрения изготовление такого стержня затруднено. Однако эта проблема может быть решена с использованием современных технологий и материалов.

⁷ Appendix 1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования энергетической установки на примере ветровой турбины в двух случаях – с применением системы молниезащиты стержневого типа и без неё, показали следующее:

1. Установлена возможность применения для ветроэнергетической установки с системой молниезащиты или без нее метода математического моделирования на основе расчёта силовых линий электростатического поля в виде уравнений $\chi_k = \text{const}$ с равным шагом. Это позволяет исследовать как особенности технологий молниезащиты, так и определять их рациональные параметры.

2. Анализ численных результатов расчета удельного распределения функций потока показал, что для молниеприемника, расположенного на гондоле турбины, необходимо выполнить расчёт зависимости χ_1^* , которая увеличивается от нуля до некоторого значения. Используя данную зависимость можно повысить эффективность молниезащиты рассматриваемого объекта. Для ветровой турбины (без молниеприемника и вместе с ним) должна быть рассчитана зависимость χ_2^* . Она уменьшается по экспоненциальному закону, что характеризует снижение объективной возможности попадания молнии в установку. Полученные зависимости χ_1^* и χ_2^* в начальной части графиков характеризуются резким увеличением и уменьшением, что указывает на эффективность применения молниеприемника даже при относительно небольшой длине, например, при 6 м для лопасти длиной 60 м.

3. Для ветровой турбины с системой молниезащиты проблема заземления значительно упрощается, так как оно может быть реализовано минуя конструкцию ветровой турбины. Это обеспечивает защиту от молнии систем управления и силового оборудования, расположенных в ее корпусе.

4. Установлено, что применяемый метод позволяет анализировать особенности атмосферного электростатического поля вблизи остроконечных пиков и исследовать поле на поверхности земли рядом с защищаемым объектом, а также позволяет объяснить известные данные об ударе молнии не в верхнюю часть системы молниезащиты, а в нижнюю или же вообще в поверхность земли.

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

APPENDIX 1 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1)

¹**Fig. 1.** Modelling scheme of the computational area $D(x, y)$ with wind turbine without applied lightning air termination (a) and with applied lightning air termination (b). G_1 – earth surface line; G_5 – the wind turbine tower; G_6 – a rotor blade, connected to the nacelle; G_2 and G_4 – boundaries of symmetry; G_3 – replacing of the cloud boundary.

²**Fig. 2.** The calculation results of the atmospheric electric fields for wind turbine in $D(x, y)$ without lightning air termination (a) and with lightning air termination (b). F_{\min} – value of $\chi(x, y) = 0$ on G_4 boundary; F_{\max} – value of $\chi(x, y) = \chi_0$ at the boundary G_2 ; $dF = \Delta\chi$ – interval of lines $\chi_k = \text{const}$.

^{3,4}**Table 1.** Computational data for n_k and χ_k in the area $D(x, y)$ with L_{10}^* and $L_{1\max}^*$.

^{5,6}**Table 2.** Computational data for χ_k in the area $D(x, y)$ with various $L_{1k}^* = \text{var}$.

⁷**Fig. 3.** χ_1^* – changes in the probable hits of lightning into the rod lightning collector from the length of a rod; χ_2^* – changes in the probable hits of lightning into a wind power plant with lightning protection from the length of a rod.

Литература (References)

- [1] Rakov V.A., Uman M.A., Review and evaluation of lightning return stroke models including some aspects of their application, IEEE Transactions Electro-magnetic Compatibility, vol. 40, 1988, pp. 403-426.
- [2] Rakov V.A., Rachidi F. Overview of Recent Progress in Lightning Research and Lightning Protection, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 51, 2009, pp. 428-442.
- [3] Eriksson A. J. An improved electrogeometric model for transmission line shielding analysis, IEEE Trans. 1987. Vol. PWDR-2. pp. 871–877.
- [4] Deller L., Garbagnati E. Lightning strike simulation by means of the Leader Progression Model: Part I: Description of the model and evaluation of exposure of freestanding structures. IEEE Trans. Power Delivery, PWRD-5, 1990, pp. 2009–2022.
- [5] Deller L., Garbagnati E. Lightning strike simulation by means of the Leader Progression Model Part II: Exposure and shielding failure evaluation of overhead lines with assessment of application graphs, IEEE Trans. Power Delivery, PWRD-5, 1990. pp. 2023–2029.

- [6] Rizk F. Modeling of lightning incidence to tall structures Part I: Theory, IEEE Trans. Power Delivery, PWRD-9, 1994. pp. 162–171.
- [7] Becerra M., Cooray V. A self-consistent upward leader propagation model // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2006. – Vol. 39, № 16. – P. 3708–3715.
- [8] 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 (ICLP), Vienna, Austria, 2012, pp. 1–5.
- [9] 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.
- [10] Preventing Direct Lightning Strikes, Rev. B - Carpenter, et al. - March 2014. – URL: <http://www.lightningprotection.com/> (accessed 01.09.2017).
- [11] Potapenko A.N., Kumar U., Potapenko T.A., Shtifanov A.I., The research of distributed lightning protection of the space-launch complex on the basis of simulation experiment (in Russian), J. Fundamental Research, no11-4, 2015, pp.727-734.
- [12] Shtifanov A.I., Potapenko A.N., Potapenko T.A., Kumar U., Computational experiments with the ability to determine the general features of the composite lightning air terminations (in Russian), J. Fundamental Research, no 11-6, 2015, pp. 1137-1144.
- [13] Demirchyan K.S., Neyman L.R., Korovkin N.V., Chechurin V.L. Theoretical foundations of electrical engineering, Volume 2. - 4th ed. / Peter, 2003. P. 576.
- [14] Le Pironnec, F., Aspas- Puertolas J. Electrostatic Field and Lightning Zoning analysis of a windmill: Study of current and innovative protection strategies, 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP). Shanghai, China, 2014, pp. 659-666.
- [15] Soerensen T. Lightning protection of wind turbines / In a book: Lightning Protection. Series: IET Power and Energy Series, 58. Edited by V. Cooray. London: Institution of Engineering and Technology. 2010. P. 681-722.
- [16] Potapenko T.A., Kanunnikova E.A., Potapenko A.N., Research of 3-Dexterior boundary problems related to electric fields in atmosphere by inversion method, J. Electric Power Systems Research, v. 113, 2014. P. 10 – 14.
- [17] Rezikina M. M., Calculation 3-D electric fields in systems contained thin wire, J. Electricity, No. 1, 2005. P. 44–49.
- [18] Ryazanov G.A., Experiments and modeling during research of electromagnetic field, Nauka publishing, Moscow, 1966. P. 208.
- [19] Potapenko T.A., Cooray V., Potapenko A.N., Features of Numerical Solution of Electrostatic Field for Studying Objects Placed Between Cloud and Earth Surface, XII SIPDA International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), Belo Horizonte, Brazil, 2013. P. 118-121.
- [20] David F. Rogers. Procedural Elements for Computer Graphics, McGraw Hill, 1986.
- [21] Binns K.J., Lawrenson P.J., Analysis and computation of electric and magnetic field problems, Pergamon Press, Oxford, 1963. P. 376.
- [22] NASA. Facts AC 321/867-2468. Lightning and Space Program. FS-1998-08-16-KSC. 1998.

Сведения об авторах.



Потапенко Анатолий Николаевич, кандидат технических наук, профессор кафедры электроэнергетики и автоматики. Область научных интересов: системы молниезащиты, E-mail:

potapenko@intbel.ru



Кумар Удай, профессор высоковольтной лаборатории электротехнического факультета. Область научных интересов: системы молниезащиты. E-mail:

uday@hve.iisc.ernet.in



Штифанов Андрей Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных и робототехнических систем. Область научных интересов: системы управления. E-mail:

shtifanov@bsu.edu.ru



Солдатенков Алексей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики и автоматики. Область научных интересов: системы управления распределенными объектами. E-mail:

aser-08@inbox.ru