### УДК 629.782.519.711

# ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ МОЛНИЕЗАЩИТ ОБЪЕКТОВ В ВИДЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2015 Т.А. Потапенко<sup>1</sup>, А.Б. Лоскутов<sup>2</sup>, А.Н. Потапенко<sup>1</sup>, А.И. Штифанов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова <sup>2</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

#### Поступила в редакцию 29.03.2015

В работе представлено исследование систем молниезащит объектов в виде ветроэнергетических установок на основе математического моделирования. Метод основан на расчёте силовых линий электростатического поля атмосферы в виде уравнений  $\mu_i$  = const с равным шагом. В схеме моделирования учитываются соотношения размеров исследуемого объекта с системой молниезащиты стержневого типа. Анализ расчётов проводится на основе учёта плотности распределения силовых линий по границам объекта с системой молниезащиты в исследуемой области. Представляются результаты численных расчётов и их сравнительный анализ.

Ключевые слова: математическое моделирование, силовые линии поля, электростатическое поле, ветроэнергетическая установка, стержневая молниезащита

Задачи, содержащие одно из граничных условий, заданное на бесконечности, относятся к относительно сложным внешним краевым задачам [1]. Все практически важные задачи, связанные с исследованием систем молниезащит (СМЗ) объектов в условиях грозовых облаков также относятся к внешним краевым задачам [2]. Одним из актуальных направлений этих исследований является развитие математических методов с использованием «инженерного» подхода, предназначенного для решения прикладных задач с позиции исследования и развития технологии молниезащиты, определения рациональных параметров для схем СМЗ электроэнергетических объектов, дальнейшего дизайна комбинированных молниеприёмников и др. С другой стороны такой подход необходим:

- для расширения существующих упрощённых расчётных методик типа метод катящейся сферы, метод конуса защиты, метод угла защиты и других [3 - 6];

- для перехода от различных эмпирических подходов на уровень математического

Штифанов Андрей Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики и автоматики. E-mail: shtifanov@bsu.edu.ru моделирования. Один из обзоров этих методов и эмпирических подходов с учётом их недостатков приведен в [7].

Цель работы: представление особенностей метода математического моделирования для исследования электроэнергетических объектов с СМЗ, находящихся между грозовым облаком и поверхностью земли, на основе расчёта потока напряжённости электростатического поля (силовых линий электростатического поля в виде семейства уравнений  $\mu_i$  = const с равным шагом) и учёта соотношений размеров исследуемого объекта с СМЗ стержневого типа.

Численные расчёты с распределенными молниеприемниками в виде башен с цилиндрическими стержнями относительно стартовой площадки, рассматривались в [8, 9]. За основу схемы моделирования принята типовая схема в виде некоторого прямоугольника, по углам которого установлены молниеприёмники. В центральной части схемы находятся технологическая мачта с ракетой-носителем, как представлено в обзоре [10]. Расчётная область расположена в плоскости, проходящей по диагонали исследуемой схемы от одного молниеприемника к другому через мачту с ракетой-носителем. В расчётах определяются атмосферные электростатические поля СМЗ стартовой площадки. Внешняя краевая задача сведена к внутренней.

В [2] на примере расчёта трёхмерной задачи показано, что внешнюю краевую задачу с минимальными погрешностями можно свести к внутренней в отличие от существующих подходов [11].

Потапенко Татьяна Анатольевна, научный сотрудник Центра высоких технологий. E-mail: konstituciya1@gmail.com

Лоскутов Алексей Борисович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроэнергетики, электроснабжения и силовой электроники. Еmail: loskutov@nntu.nnov.ru

Потапенко Анатолий Николаевич, кандидат технических наук, профессор кафедры электроэнергетики и автоматики. E-mail: potapenko@intbel.ru

В [12] решается внутренняя краевая задача, и исследуются молниеприёмники, находящиеся в центральной части ограниченной трёхмерной области, например, в виде куба. При этом считается, что верхняя горизонтальная плоскость этой области является облаком, а нижняя – поверхностью земли. Сравнительный анализ результатов решения внешней краевой задачи [2] с данными [12] показывает об имеющейся дополнительной возможности сведения внешней краевой задачи к внутренней с относительно минимальными погрешностями, что также применяется в работе.

Постановка задачи. Определяются электростатические поля ветроэнергетической установки (ВЭУ) с учётом данных [13, 14]. За основу принята схема моделирования ВЭУ с лопастями ротора длиной L<sub>0</sub>=60 м [14]. Однако для исследуемой области C(x,y) в отличие от расчёта трёхмерной задачи в [14], выбрана двумерная задача, причем одна из лопастей находится по оси в нижней части башни, а остальные две - в верхней части области C(x,y). Схема моделирования C(x,y) с ВЭУ, показана на рис. 1. В схеме моделирования учитывается подход [8, 9] с возможностью сведения внешней краевой задачи к внутренней путём расположения электроэнергетического объекта между верхней и нижней границами C(x,y), а на боковых границах C(x,y) задаётся условие вида *E<sub>n</sub>*=0 (*E<sub>n</sub>* – напряжённость электростатического поля по нормали к этим границам) [2]. Считается, что границы C(x,y)следующие:  $G_1$  – поверхность земли;  $G_5$  – башня ВЭУ;  $G_6$  – лопасть ротора;  $G_3$  – некоторая эквипотенциальная поверхность  $\psi_i = \text{const}$ , которая вводится в расчётную область вместо границы облака на основе [8, 9]). Согласно данным [8, 9] для замены границы облака некоторой эквипотенциалью  $\psi_i$ =const достаточно, чтобы  $\psi_i$ =const находилась на уровне порядка 3-х высот башни ВЭУ. Тогда боковые границы G<sub>2</sub> и G<sub>6</sub> искусственно ограничивают C(x,y) и находятся на равных расстояниях от башни ВЭУ. С учётом симметрии электроэнергетического объекта, вместо  $G_6$  в водится граница  $G_4$ , являющаяся также осью симметрии области C(x,y).

Распределение электрической функции потока µ определяется из уравнения Лапласа, представленного относительно µ в виде:

$$\Box \partial^2 \mu / \partial x^2 + \partial^2 \mu / \partial y^2 = 0; (x, y) \in C(x, y), \tag{1}$$

т.е. (1) – уравнение эллиптического типа относительно µ. На основе расчёта поля µ определяется семейство силовых линий с заданным шагом. Граничные условия задачи с учётом рис. 1 следующие (для ВЭУ без СМЗ):

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

$$\partial \mu / \partial n = 0, (x, y) \in G_1, G_3;$$
 (2)



**Рис. 1.** Схема моделирования области *С*(*x*,*y*) с ВЭУ

- на границах ВЭУ *G*<sub>5</sub> и *G*<sub>6</sub>:

 $\partial \mu / \partial n = 0, (x, y) \in G_5, G_6;$  (3)

- на границе  $G_2$  области C(x,y):

$$\mu(x,y) = \mu_0, (x,y) \in G_2;$$
 (4)

- на границе  $G_4$  области C(x,y):

Ļ

$$\mu(x,y) = 0, (x,y) \in G_4;$$
(5)

где C(x,y) – исследуемая область, ограниченная  $G_1 - G_6$ ;  $\mu_0 = \text{const.}$ 

К граничным условиям задачи для ВЭУ с СМЗ стержневого типа (стержень устанавливается на гондоле по  $G_4$ ) вместо уравнения (5) добавляются следующие:

- на одной части *G*<sub>4</sub> с СМЗ (при изменении длины стержня), т.е. на границе *G*<sub>41</sub>:

$$\partial \mu / \partial n = 0, (x, y) \in G_{41};$$
(6)

- на оставшейся части границы  $G_4$  выше СМЗ, т.е. на границе  $G_{42}$ :

$$\mu(x,y) = 0, (x,y) \in G_{42}.$$
(7)

Следовательно, для ВЭУ без СМЗ применяются уравнение (1) с граничными условиями (2) – (5), а для ВЭУ с СМЗ стержневого типа соответственно уравнение (1) с граничными условиями (2) – (4) и (6), (7).

**Результаты численных расчётов.** В [14] представлены инновационные технические решения и их исследования для ВЭУ с различными

типами СМЗ. Для качественного сравнения данных [14] с результатами расчётов по предлагаемому методу математического моделирования выбираем ВЭУ с СМЗ стержневого типа длиной L<sub>1</sub>=100 м, что существенно превышает применяемые стержни на гондоле ВЭУ, а также длину лопастей ротора ВЭУ. При численных расчётах поля функции потока и используется разностная сетка для уравнения (1) (сетка является регулярной прямоугольной ( $\Delta_x = \Delta_y = \Delta$ )) [15]. При численных расчетах задачи не учитываются размеры в сечениях лопастей ротора ВЭУ (см. рис. 1) и в сечениях СЗМ стержневого типа, так как они пренебрежимо малы по сравнению с шагом  $\Delta$  сетки по *x*, *y* (например, только длина лопастей в роторе ВЭУ 60 м).

Для дискретных областей  $C_d(x,y)$  при решениях задач для ВЭУ с СМЗ и без СМЗ во внутренних узлах сетки выполняется условие сходимости итерационного метода Гаусса-Зейделя. В узлах области  $C_d(x,y)$  функция потока µ<sub>*i i*</sub> рассчитывается с помощью численного метода, например, ускоренного метода Либмана [16] (в отечественной литературе также называется методом верхней релаксации) на основе Лапласа в конечно-разностных уравнения аппроксимациях по аналогии, как в задачах [8, 9, 17, 18]. На границах  $G_i$  дискретной  $C_d(x,y)$ рассчитываются функции потока  $\mu$  в узлах (*i*,*j*) с учетом конечно-разностных аппроксимаций для соответствующих условий: (2) - (5) или (2) - (4)и (6), (7) с учётом решаемой задачи.

Постановка задачи в дискретной области  $C_d(x,y)$  для ВЭУ без СМЗ. Для этой краевой задачи с учётом уравнения Лапласа и граничных условий (2)–(5) требуемые уравнения в операторной форме для определения функции потока  $\mu$  в узлах (i,j) дискретной области  $C_d(x,y)$  следующие:

$$W_{h}\psi^{(h)} \equiv \begin{cases} W_{xx}\mu_{ij} + W_{yy}\mu_{ij} = 0, (x_{i}, y_{j}) \in C_{d}(x, y); \\ W_{n}\mu_{ij} = 0, (x_{i}, y_{j}) \in G_{1}, G_{3}, G_{5}, G_{6} \\ \mu_{ij} = \mu_{0}, (x_{i}, y_{j}) \in G_{2}; \\ \mu_{ij} = 0, (x_{i}, y_{j}) \in G_{4}. \end{cases}$$
(8)

Здесь  $W_{xx} = \partial/\partial x^2$ ,  $W_{yy} = \partial^2/\partial y^2$ ,  $W_{zz} = \partial^2/\partial z^2$ ,  $W_n = \partial/\partial n$ – производные функции  $\mu$ , которые представляются конечно-разностными аппроксимациями. Область  $C_d(x,y)$  является дискретной с регулярной прямоугольной сеткой. Для аппроксимации различного вида границ применяется известный алгоритм Брезенхэма.

Результаты расчёта атмосферного электростатического поля в области C(x,y) с ВЭУ в виде силовых линий  $\mu_i$ =const с равным их шагом  $\Delta\mu$  без применения СМЗ показаны на рис. 2*a*; с применения СМЗ стержневого типа показаны на рис. 2*б*.



**Рис. 2.** Результаты численных расчётов атмосферного электростатического поля в *C*(*x*,*y*): *a* – при отсутствии СМЗ; *б* – с СМЗ стержневого типа

На основе полученных результатов рассмотрим особенности исследования ВЭУ с СМЗ при их нахождении между поверхностью земли и некоторой эквипотенциалью  $\psi_i$ =const, введённой в расчётную область вместо облака [8, 9, 17, 18]. Для этого определим плотность распределения  $\chi_i$  силовых линий атмосферного электростатического поля в исследуемой области C(x,y) с ВЭУ для задач:

– без применения СМЗ относительно: 1) ВЭУ; 2) поверхности земли (ПЗ);

- с применением СМЗ стержневого типа относительно: 1) ВЭУ; 2) ПЗ; 3) СМЗ.

Результаты численных расчётов для этих задач сведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Плотность распределения линий  $\mu_i$ =const в *C*(*x*,*y*), т.е. с учётом их количества (*n<sub>i</sub>*), приходящихся на исследуемые элементы *C*(*x*,*y*)

Элементы С(х,у)	ВЭУ без СМЗ		ВЭУ с СМЗ	
	$n_i$	$\chi_i$ (%)	$n_i$	χ <sub>i</sub> (%)
ВЭУ	28,5	71,25	3,5	8,75
П3	11,5	28,75	3,5	8,75
CM3	-	-	33	82,5

Сравнительный анализ данных на рис 2 и в табл. 1 показывает, что в условиях применения СМЗ стержневого типа для ВЭУ плотность распределения  $\chi_i$  уменьшается на электроэнергетическом объекте приблизительно на 60% по сравнению с ВЭУ без СМЗ. Полученные результаты качественно совпадают с данными [14]. Для выявления оптимальной высоты стержня необходимо проводить дальнейшие исследования. Например, если стержень будет равен 30 м (т.е. 0,5 лопасти), то плотность распределения линий  $\mu_i$ =const уменьшится в пределах 45% по сравнению с ВЭУ без СМЗ. В отличие от [14] также установлено, что на поверхности земли вблизи ВЭУ наблюдается изменение плотности распределения  $\chi_i$  по сравнению с ВЭУ без СМЗ.

Аналогичные результаты получены при расчётах атмосферных электростатических полей СМЗ стартовой площадки с учётом топологии СМЗ относительно объекта защиты [8, 9]. Они показали, что при уменьшении дистанции L<sub>i</sub> между СМЗ и объектом защиты плотность распределения  $\chi_i$  существенно уменьшается на объекте защиты, но при этом увеличивается на СМЗ. Это подтверждается данными [19] о СМЗ стержневого типа для ракеты-носителя типа «Антарес». До момента старта «Антарес» стержневые молниеприёмники на стартовой площадке находятся на минимальной дистанции от объекта защиты [19]. Однако при старте ракетыносителя стержневые молниеприёмники перемещаются на некоторое расстояние для исключения воздействия высокоскоростных и высокотемпературных газовых потоков на элементы СМЗ. В этом случае топология СМЗ относительно объекта защиты соответствует типовой схеме [10].

В [8, 9] также установлено изменение плотности распределения  $\chi_i$  на поверхности земли при изменении дистанции  $L_i$  между СМЗ и объектом защиты. Полученные результаты теоретических исследований этой работы и [8, 9] дают возможность объяснять известные данные [20] относительно удара молнии в нижнюю часть стартовой площадки с шаттлом, а не в СМЗ с высотой существенно превышающей объект защиты.

На основе полученных результатов установлено, что имеется возможность исследовать особенности применения стержневого молниеприёмника, устанавливаемого на гондоле ВЭУ, т.е. по границе  $G_4$ . С инженерной точки зрения изготовление такого стержня затруднительно, как отмечено в [14]. Однако проблема может быть решена с применением новых технологий и материалов для этого типа молниеприёмника. В этом случае также упрощается задача заземления этого стержня.

#### Выводы:

1. Установлена возможность применения для ВЭУ с СМЗ или без этой системы защиты метода математического моделирования на основе расчёта силовых линий электростатического поля в виде уравнений  $\mu_i$  const с равным шагом. Это позволяет исследовать как особенности технологий молниезащиты, так и определять рациональные параметры этих схем.

2. Анализ технических решений основан на расчёте плотности распределения силовых линий  $\mu_i$ =const в исследуемой области, т.е. на определении их количества, приходящихся на элементы в этой области.

3. Предлагаемый метод позволяет анализировать, как особенности атмосферного электростатического поля вблизи остроконечных вершин, так и исследовать эти поля на поверхности земли относительно объектов защиты. С теоретической точки зрения это позволяет объяснять существующие данные об ударах молний не в верхние части СМЗ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- 1. *Smythe, W.R.* Static and Dynamic Electricity. 3-nd Edition, Revised Printing. Taylor &Francis, New York, Toronto, London. 1989. 623 p.
- Potapenko, T.A. Research of 3-Dexterior boundary problems related to electric fields in atmosphere by inversion method / T.A. Potapenko, E.A. Kanunnikova, A.N. Potapenko // J. Electric Power Systems Research. 2014. V. 113. P. 10-14.
- 3. *Golde, R.H.* (Ed.), Lightning. Vol. II: Lightning Protection, Academic Press. New York. 1977. 352 p.
- 4. *Lee, R.H.* Protection zone for buildings against lightning strokes using transmission line protection practice // IEEE Trans. Ind. Appl. IA-14, 1978. P. 465-469.
- 5. *Lee, R.H.* Lightning protection of buildings // IEEE Trans. Ind. Appl. IA-15, 1979. P. 236-240.
- Eriksson, A.J. The incidence of lightning strikes to power lines // IEEE Trans. Power Delivery PWRD-2, 1987. P. 859-870.
- 7. *D'Alessandro, F.* Collection Volume Method' for the placement of air terminals for the protection of structures against lightning / *F.D'Alessandro, J.R. Gu*mley // J. of Electrostatics. 2001. No. 50. P. 279-302.
- 8. Потапенко, Т.А. Некоторые особенности моделирования систем молниезащит на космодромах / Т.А. Потапенко, В. Курей, А.Н. Потапенко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14, №4(5). С. 1386-1390.
- 9. Потапенко, Т.А. Возможный подход для оценки систем молниезащит ракет-носителей на космодромах / Т.А. Потапенко, В. Курей, А.Н. Потапенко // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Т. 14, №4(5). С. 1380-1385.
- 10. *Kumar, U.* Lightning protection of satellite launch pads / In a book: Lightning Protection. Series: IET Power and Energy Series, 58. Edited by *V. Cooray.* – London:

Institution of Engineering and Technology. 2010. P. 789-819.

- 11. Дыльков, М.И. Метод инверсии для численного решения внешних краевых задач для уравнений эллиптического типа: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Белгород, 2004. 140 с.
- 12. *Резинкина, М.М.* Расчет трехмерных электрических полей в системах, содержащих тонкие проволоки // Электричество. 2005. № 1. С. 44-49.
- 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.
- Le Pironnec, F. Electrostatic Field and Lightning Zoning analysis of a windmill: Study of current and innovative protection strategies / F. Le Pironnec, J. Aspas-Puertolas // International Conference on Lightning Protection (ICLP). Shanghai, China. 2014. P. 659-666.

- 15. *Самарский, А.А.* Теория разностных схем. М.: Наука, 1977. 656 с.
- Сипайлов, Г.А. Электрические машины (специальный курс) / Г.А. Сипайлов, Е.В. Кононенко, К.А. Хорьков М.: Высш. шк., 1987. 287 с.
- 17. Potapenko, T.A. Features of Numerical Solution of Electrostatic Field for Studying Objects Placed Between Cloud and Earth Surface / T.A. Potapenko, V. Cooray, A.N. Potapenko / XII SIPDA International Symposium on Lightning Protection (SIPDA). Belo Horizonte, Brazil. 2013. P. 118-121.
- Potapenko, T.A. Features of estimating of lightning protection and grounding electrode based on the family of lines of force in electric field / T.A. Potapenko, A.I. Shtifanov, A.N. Potapenko / International Conference on Lightning Protection (ICLP). Shanghai, China. 2014. P. 1786-1792.
- 19. https://ru.wikipedia.org/wiki
- 20. NASA. Facts AC 321/867-2468. Lightning and Space Program. FS-1998-08-16-KSC. 1998.

## STUDYING OF LIGHTNING PROTECTION OF THE OBJECTS IN A VIEW OF WIND MILLS BY MATHEMATICAL MODELING

© 2015 T.A. Potapenko<sup>1</sup>, A.B. Loskutov<sup>2</sup>, A.N. Potapenko<sup>1</sup>, A.I. Shtifanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Belgorod State Technology University named after V.G. Shukhov <sup>2</sup> Nizhny Novgorod State Technical University

The work presents study of the lightning protection of the object in a view of wind mill on the basis of mathematical modeling. The method is based on the calculation of the force lines of electrostatic atmospheric field in the form of equations  $\mu_i$  = const with regular step. The size ratios of studying objects with lighting rod in the modeling scheme are taken into account. Analysis of calculations is carried out on the basis of distribution rate of electric force lines by the borders, belonging to the objects and LPS in the area under study. The results of numerical calculations and their comparative analysis are presented.

Key words: mathematical modeling, field power lines, electrostatic field, wind power unit, rod lightning protection

Tatiana Potapenko, Research Fellow of the High Technologies Center. E-mail: konstituciya1@gmail.com Aleksey Loskutov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Power Industry, Power Supply and Power Electronics. E-mail: loskutov@nntu.nnov.ru Anatoliy Potapenko, Candidate of Technical Sciences, Professor at the Department of Electrical Engineering and Automatics. E-mail: potapenko@intbel.ru Andrey Shtifanov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Electrical Engineering and Automatics. E-mail: shtifanov@bsu.edu.ru