

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМ МОЛНИЕЗАЩИТ НА ОСНОВЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

© 2010 А.Н. Потапенко<sup>1</sup>, А.И. Штифанов<sup>2</sup>, Т.А. Потапенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Белгородский государственный технологический университет им.В.Г. Шухова

<sup>2</sup> Белгородский государственный университет

Поступила в редакцию 22.11.2010

Исследуется эффективность распределённых элементов систем молниезащит в виде стержневых молниеотводов, в том числе с учётом новых физических принципов действия, для подстанций электроэнергетических систем на основе математической модели с помощью вычислительных экспериментов. Представлены результаты исследований.

Ключевые слова: *распределённые молниеотводы, математическая модель, вычислительный эксперимент*

Разряды атмосферного электричества – весьма опасное явление в природе и при отсутствии систем молниезащит могут привести к повреждению или уничтожению зданий, электрооборудования, промышленных коммуникаций и др. Если рассмотреть атмосферный разряд с позиции молниезащиты с учетом применения молниеотвода, то чем скорее восходящий стример покинет стержень молниеотвода и устремится к облаку, тем скорее он достигнет нисходящего. Это условие возникновения электрического разряда между облаками и молниеотводами, которое важно с позиции устранения попадания молний в другие ближайшие высокие точки типа зданий, сооружений, электрооборудования и др. Если высота молниеотвода будет выше остальных объектов, тогда его восходящий стример определит место удара молнии. Основные системы молниезащит – стержневые молниеотводы, молниеотводы типа «пространственная сетка», тросовые молниеотводы, молниеотводы зонтикового типа с коронирующей системой электродов, молниеотводы с импульсными электромагнитными устройствами (ИЭУ) и др. Как показала практика для защиты электростанций и подстанций от прямых ударов молнии в основном

применяют распределённые стержневые молниеотводы (СМ) [1] или распределённые тросовые молниеотводы [2].

**Цель работы:** исследование эффективности распределённых элементов систем молниезащит в виде СМ, в том числе с учётом новых физических принципов их действия, для подстанций электроэнергетических систем на основе математической модели с помощью вычислительных экспериментов, причём без учёта остальных элементов систем молниезащит.

Схема модели подстанции в виде территории  $B_0$  с размерами  $l_1 \times l_2$  и с двенадцатью плотно расположенными объектами  $x_{11} - x_{34}$  при их максимальной высоте  $h$  с расположением СМ (молниеотводы отмечены (\*)) показана на рис. 1. При этом могут быть использованы СМ с расположенными в их верхней части изолированными ИЭУ, основанными на новых физических принципах их действия [3], а именно, с возможностью возбуждения ЭДС в ИЭУ при  $\text{grad } \psi$ . Схема для проведения вычислительных экспериментов с расположением СМ для защиты объектов (при разрезе вертикальной плоскостью  $AB$ ) показана на рис. 2 с возможностью определения поля распределения потенциала и электрической функции потока напряженности поля исследуемых объектов.

Постановка задачи. На основе анализа известных методов решения внешних краевых задач принимается метод инверсии для численного решения (МИЧР) этих краевых задач с применением уравнения эллиптического типа [4].

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

*Штифанов Андрей Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и вычислительной техники. E-mail: Shtifanov@bsu.edu.ru*

*Потапенко Татьяна Анатольевна, аспирантка. E-mail: ttwiggy@rambler.ru*

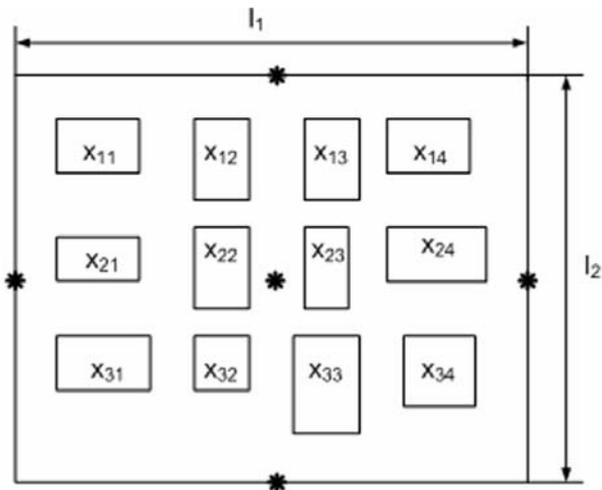


Рис. 1. Схема расположения СМ для защиты объектов

С учётом схемы на рис. 2 в вертикальной плоскости области  $B_1(x,z)$  определяется электрическое поле потенциала  $\psi$  относительно проводящей поверхности земли на основе уравнения Лапласа с учётом подхода [4]:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = 0; \quad (x,z) \in B_1(x,z). \quad (1)$$

Граничные условия для этой задачи следующие:

- на проводящей границе  $A_2$  (нижняя часть области  $B_1(x,z)$  п. 2 – п. 28):

$$\psi(x,z_0)=0, \quad (x,z_0) \in A_2; \quad (2)$$

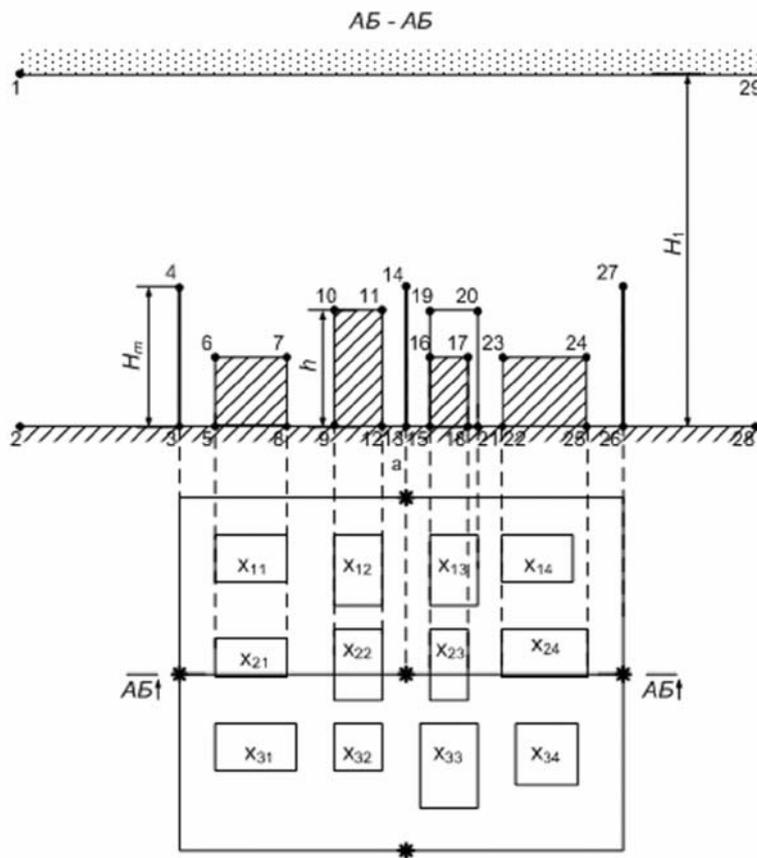


Рис. 2. Схема для вычислительных экспериментов с учётом СМ

- на границе полубесконечной области  $A_\infty$ :

$$\psi(\infty)=0; \quad (3)$$

- на границе  $A_1$  (верхняя часть исследуемой области  $B_1(x,z)$  от п.1 до п.29):

$$\psi(x,z_n) = \psi_A, \quad (x,z_n) \in A_1; \quad (4)$$

где  $B_1(x,z)$  – расчетная область, ограниченная  $A_1, A_2, A_\infty$ , причем  $A_\infty$  – условная граница на бесконечности слева и справа от исследуемой

области. Для выполнения расчетов в области  $B_1(x,z)$  введены некоторые внутренние границы  $A_3, A_4$  (от поз. 1 до поз. 2 и соответственно от поз. 28 до поз. 29, т.е. дополнительно введенные границы для решения задачи с использованием МИЧР для внешних краевых задач [4]), необходимые для выделения некоторой условно ограниченной области  $B_{A1}(x,z)$ . Принимаем, что часть выделенной области в виде  $B_{A1}(x,z)$ , входящей в состав  $B_1(x,z)$ , является основной, так как в ней задаются границы

исследуемых объектов от п. 1 до п. 29. В рассматриваемом случае  $B_{A1}(x,z)$  имеет форму прямоугольника. Для реализации метода МИЧР необходима дополнительная область  $B_{A1}^*(x,z)$  с учетом вида основной области  $B_{A1}(x,z)$  для того, чтобы часть области  $B_1(x,z)$ , находящаяся между границами  $A_3, A_4$  и  $A_\infty$ , отобразилась на область  $B_{A1}^*(x,z)$ . При этом в центре области  $B_{A1}^*(x,z)$ , присваивается значение, совпадающее со значением потенциала  $\psi$  на бесконечности. При этом считаем, что области  $B_{A1}(x,z)$  и  $B_{A1}^*(x,z)$  соприкасаются по границам  $A_3, A_4$  [4]. В области  $B_{A1}(x,z)$  параметры следующие:  $h$  – максимальная высота объекта;  $H_1$  – высота от поверхности земли до верхней границы заряженного облака;  $H_m$  – высота СМ, рассчитанная в соотношении не менее  $0,2h$  [5]. Вычислительные эксперименты выполнялись на основе метода конечных разностей с применением универсальной прямоугольной равномерной сетки с учётом особенностей исследуемых задач, которые проводились в

прямоугольной области на базе ускоренного метода Либмана [6].

При исследованиях распределенных СМ систем молниезащит определяются поля потенциала  $\psi$  и эквипотенциальных поверхностей в виде уравнений  $\psi_i = \text{const}$ , а также поверхности равных напряженностей электростатического поля в виде уравнений  $E_i = \text{const}$ . Расчёты ведутся в безразмерном виде, а именно, потенциалы  $\psi_{ai}^* = \psi_i / \psi_A$ ; где  $\psi_A$  – базовые значения потенциалов на границах исследуемой области, а компоненты напряженности поля в виде  $E_x^* = -\partial \psi^* / \partial x^*$ ;  $E_y^* = -\partial \psi^* / \partial y^*$ . Аналогично записываются безразмерные параметры для других величин. При вычислительных экспериментах для СМ за основу принимается исходное внешнее однородное поле с напряженностью  $E_0 = \text{const}$  как в [7]. Типовые результаты расчета согласно уравнениям (1) – (4) для схемы с СМ при разрезе в вертикальной плоскости  $AB$  (рис. 2), проходящей через объекты подстанции ( $x_{21} - x_{24}$ ), показаны на рис. 3 в виде уравнений  $E_i = \text{const}$ .

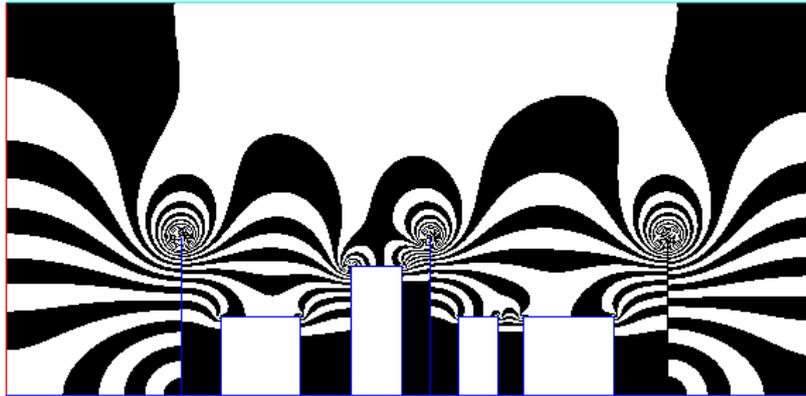


Рис. 3. Результаты расчета в виде уравнений  $E_i = \text{const}$  при  $H_{m0}^* = H_m/h = 1,22$

Следует отметить, что представленные результаты выполнялись с точностью  $\varepsilon^* = 0,001$ . Типовые результаты расчетов поверхностей равных напряженностей электростатического

поля в виде уравнений  $E_i = \text{const}$  с учётом того, что СМ имели относительную величину  $H_m^* = 1,66$ , показаны на рис. 4.

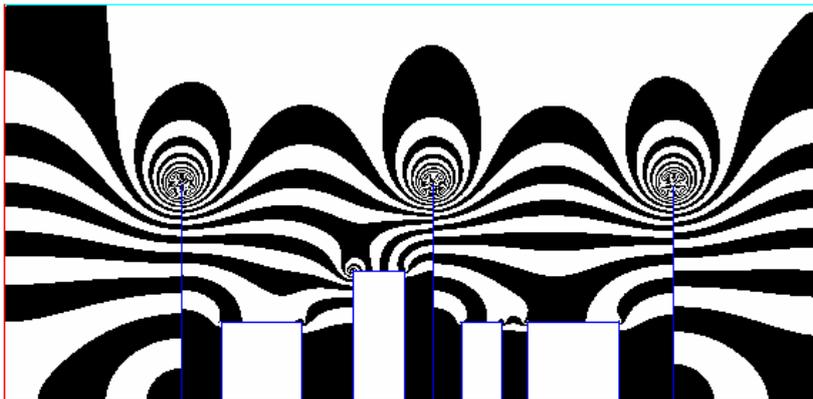


Рис. 4. Результаты расчета в виде уравнений  $E_i = \text{const}$  при  $H_{m1}^* = 1,66$

Сравнительный анализ полученных результатов, представленных на рис. 3 и рис. 4 показал следующее:

1. Максимальная напряжённость  $E_{mэ}^*$  на верхних концах распределенных СМ при  $H_{m0}^*=1,22$  с изменениями относительных величин от 938,36 до 1077,13 увеличивается при  $H_{m1}^*=1,66$  с изменениями относительных величин от 1404,96 до 1438,62, т.е. при увеличении высоты молниеотводов  $H_m^*$  в 1,36 раза в среднем пропорционально увеличивается и максимальная напряжённость поля  $E_{mэ}^*$  с 1007,74 до 1420,87, т.е. в 1,4 раза.

2. Для технологических объектов подстанции при увеличении высоты СМ от  $H_{m0}^*$  до  $H_{m1}^*$  наблюдается следующее:

- с высотой объектов меньшей  $h$  и с увеличением  $H_{mi}^*$  напряженность поля  $E_{m11}$  в среднем уменьшается с 168,30 до 134,87, т.е. 1,25 раза;
- с высотой объектов равной  $h$  и с увеличением  $H_{mi}^*$  напряженность поля  $E_{m12}$  в среднем уменьшается с 557,40 до 382,13, т.е. в 1,46 раз.

Следует отметить, что при вычислительных экспериментах с учётом относительного шага  $\Delta E^* \approx 33,66$  при расчётах распределения поверхностей равных напряженностей электрического поля было установлено, что максимальная напряжённость поля  $E_{mэ}^*$  находится на верхних концах крайних СМ систем молниезащит (см. рис. 1) в сравнении центральным СМ

Вычислительные эксперименты (рис. 5) по определению напряженности поля для одного СМ с расположенным на нём изолированного ИЭУ, основанного на новом физическом принципе действия, а именно, с возможностью возбуждения ЭДС в сравнении для СМ без ИЭУ показали возможность увеличения напряженности поля в пределах до 20% [8] и это частично совпадает с полученными результатами в этой работе.

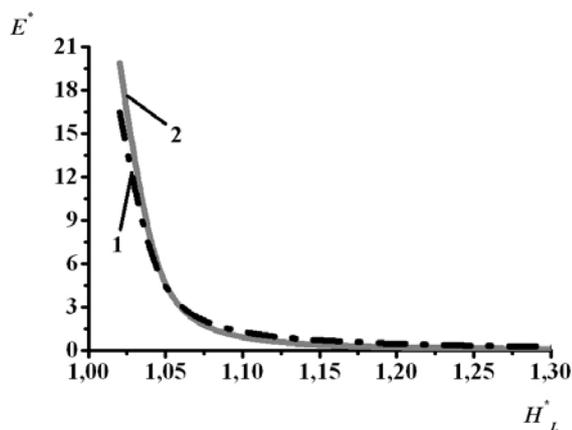


Рис. 5. Распределение  $E^* = f(H_L^*)$  по вертикали: 1 – СМ без ИЭУ; 2 – СМ с ИЭУ

Сравнительный анализ на основе полевых испытаний, выполненных сотрудниками французской компании INDELEC, для устройств типа Prevelectron 2 (СМ с ИЭУ) и одиночного стержня показал преимущества молниеотводов этого типа [3]. Однако в литературных источниках идут весьма острые дискуссии относительно эффективности СМ с применением ИЭУ (молниеотвод типа Prevelectron) [9].

#### Выводы:

1. Исследования, связанные с определением напряженности поля СМ с изолированными ИЭУ, расположенными в их верхней части, с учётом схемы на рис. 1, показали некоторое совпадение результатов с данными [8]. Это связано с тем, что на верхних концах распределенных СМ существует значительный диапазон изменения относительных величин максимальной напряженности поля  $E_{mэ}^*$ , который зависит от места расположения СМ по отношению к объектам подстанции, а это влияет на определение эффективности молниеотводов с применением ИЭУ.

2. Из анализа полученных результатов для распределённых СМ на территории подстанции следует, что при увеличении высоты молниеотводов  $H_m^*$  в 1,36 раза максимальная напряженность поля  $E_{mэ}^*$  на верхних концах распределенных СМ систем молниезащит увеличивается, но при этом на объектах подстанции в их верхних угловых зонах напряженность поля  $E_{mi}$  снижается. Следовательно, чем больше относительная высота СМ по отношению к объектам, тем больше уменьшение  $E_{mi}$  на этих объектах, а это важно для проектирования распределённых элементов систем молниезащит.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Юриков, П.А. Защита электростанций и подстанций 3-500 кВ от прямых ударов молнии / П.А. Юриков. – М.: Энергоиздат, 1982. 88 с.
2. <http://www.siemens.com/hvds> (High Voltage Direct Current Transmission – Proven Technology for Power Exchange).
3. <http://www.prevelectron.ru>.
4. Дыльков, М.И. Метод инверсии для численного решения внешних краевых задач для уравнений эллиптического типа: дис. канд. физ.-мат. наук: 05.13.18 / М.И. Дыльков. – Белгород, 2004. 140 с.
5. Базелян, Э.М. Физика молнии и молниезащиты / Э.М. Базелян. – М.: Физматлит, 2001. 320 с.
6. Сипайлов, Г.А. Электрические машины (специальный курс) / Г.А. Сипайлов, Е.В. Кононенко, К.А. Хорьков. – М.: Высш. шк., 1987. 287 с.
7. Резинкина, М.М. Расчет трехмерных электрических полей в системах, содержащих тонкие проволоки // Электричество. 2005. №1. С. 44-49.

8. *Потапенко, А.Н.* Численное моделирование электрических полей в системах «электрод – поверхность земли» для элементов молниезащит / *А.Н. Потапенко, Е.А. Канунникова, М.И. Дыльков* // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2008. №11-12. С. 72-78.
9. *Базелян, Э.М.* Молниезащита высоких сооружений // Известия РАН. Энергетика. 2005. №3. С. 55-74.

## RESEARCH OF THE ARRANGED ELEMENTS IN LIGHTNING PROTECTION SYSTEMS ON THE BASIS OF COMPUTING EXPERIMENTS

© 2010 A.N. Potapenko<sup>1</sup>, A.I. Shtifanov<sup>2</sup>, T.A. Potapenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Belgorod State Technological University named after V.G. Shuhov

<sup>2</sup> Belgorod State University

Efficiency of the arranged elements of lightning protection systems in the form of lightning rods, including in view the new physical principles of operation, for substations of electric power systems on the basis of mathematical model by means of computing experiments is examined. Results of researches are presented.

Key words: *arranged lightning rods, mathematical model, computing experiment*

---

*Anatoliy Potapenko, Candidate of Technical Sciences, Professor at the Department of Electrical Engineering and Automation. E-mail:*

*potapenko@intbel.ru*

*Andrey Shtifanov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Computer Science and Computing Machinery.*

*E-mail: Shtifanov@bsu.edu.ru*

*Tatiana Potapenko, Post-graduate Student. E-mail: ttwiggy@rambler.ru*