

УДК 621.319.7

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В УСТРОЙСТВАХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

А.Н. Токарев, Г.В. Очкур

Представлен один из способов расчета и моделирования электростатического поля в устройствах автоматизированных технических систем энергетических предприятий, принцип действия которого основан на электрогидродинамическом (ЭГД) эффекте при различных напряжениях, подаваемых на систему электродов. Метод конечных элементов позволяет наиболее точно описать систему электродов, без аналитических упрощений. Моделирование электростатического поля выполнено для электрогидродинамического устройства автоматизированных систем, ЭГД-эффект которого основан на системе электродов «игла – трубка», являющейся осесимметричной. Общий анализ распределения электростатического поля показал, что максимальные значения E устанавливаются на концах трубки. Зависимости напряженности от радиуса трубки $E(R)$ и расстояния между электродами $E(\lambda)$ являются полиномиальными, а зависимость напряженности от длины трубки $E(l)$ – экспоненциальная.

Ключевые слова: электростатическое поле; электрогидродинамический преобразователь; технические системы энергетических предприятий.

ЭНЕРГЕТИКАЛЫК ИШКАНАЛАРДЫН АВТОМАТТАШТЫРЫЛГАН ТЕХНИКАЛЫК СИСТЕМАЛАРЫНЫН ТҮЗҮЛҮШТӨРҮНДӨГҮ ЭЛЕКТРОСТАТИКАЛЫК ТАЛААНЫ МОДЕЛДӨӨ

А.Н. Токарев, Г.В. Очкур

Бул макалада иштөө принциби электроддор системасына берилүүчү ар кандай чыңалууда электрогидродинамикалык натыйжага негизделген энергетикалык ишканалардын автоматташтырылган техникалык системаларынын түзүлүшүндөгү электростатикалык талааны эсептөө жана моделдөө ыкмаларынын бири берилди. Акыркы элементтер ыкмасы электроддор системасын аналитикалык жөнөкөйлөтүүсүз, бир кыйла так сүрөттөөгө мүмкүндүк берет. Электростатикалык талааны моделдөө электрогидродинамикалык натыйжасы осесимметриялык болуп эсептелген «ийне – түтүкчө» электроддор системасына негизделген автоматташтырылган системалардын электрогидродинамикалык түзүлүшү үчүн аткарылган. Электростатикалык талааны бөлүштүрүүгө жалпы талдоо жүргүзүү көрсөткөндөй, E максималдык мааниси түтүкчөнүн аягында белгиленет. Түтүкчөнүн радиусунун чыңалуусуна $E(R)$ жана электроддор ортосундагы аралыкка $E(\lambda)$ жараша полиномиалдык, ал эми түтүкчөнүн узундугунан $E(l)$ чыңалуунун көз карандылыгы – экспоненциалдык болуп эсептелет.

Түйүндүү сөздөр: электростатикалык талаа; электрогидродинамикалык өзгөрткүч; энергетикалык ишканалардын техникалык системалары.

MODELING OF THE ELECTROSTATIC FIELD IN DEVICES OF AUTOMATED TECHNICAL SYSTEMS ENERGY ENTERPRISE

A.N. Tokarev, G.V. Ochkur

The article presents one of the methods for calculating and modeling the electrostatic field in devices of automated technical systems of energy enterprises, the principle of operation of which is based on the electrohydrodynamic effect at various voltages applied to the electrode system. The finite element method allows the most accurate description of the electrode system, without analytical simplifications. Modeling of the electrostatic field is performed for the electrohydrodynamic device of automated systems, the EGD effect of which is based on the “needle – tube” electrode

system, which is axisymmetric. A General analysis of the distribution of the electrostatic field showed that the maximum values of E are set at the ends of the tube. The dependence of the intensity on the radius of the tube $E(R)$ and the distance between the electrodes $E(\lambda)$ are polynomial, and the dependence of the intensity on the length of the tube $E(l)$ is exponential.

Keywords: electrostatic field; electrohydrodynamic Converter; technical systems of energy companies.

В автоматизированных технических системах энергетических предприятий нашли применение технические устройства (усилители, преобразователи и т. п.), принцип действия которых основан на электрогидродинамическом эффекте, рассмотренные, например, в работах [1–3]. Важнейшим фактором, определяющим статические и динамические характеристики подобного типа устройств, является характер распределения электростатического поля в рабочей зоне.

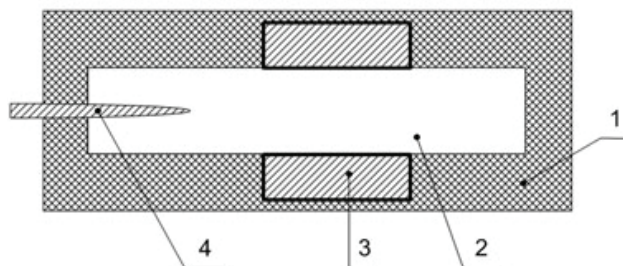
Для решения задач моделирования электростатического поля между системой заряженных проводников в диэлектрической среде технических устройств используют метод подобия. Метод конечных элементов (МКЭ) позволяет наиболее точно описать систему электродов, без аналитических упрощений. В любом аналитическом решении делают допущения (форму электродов аппроксимируют к канонической), например, истинную форму иглы заменяют на гиперболический цилиндр, что в некоторых случаях не совсем точно отображает картину происходящего и соответственно дает ориентировочный расчет. Поверхность проводника всегда является эквипотенциальной, в любой ее точке потенциал имеет постоянное значение, то есть вектор \vec{D} постоянен на поверхности проводников и нормален к ним, что, очевидно, соответствует равномерному распределению заряда по поверхности проводника. Точно так же в общем случае не может быть задана поляризация диэлектрика, поскольку она является функцией самого искомого поля. Вектор поляризации \vec{P} может быть вычислен после того, как найдено поле в любой точке диэлектрика, который в процессе решения задачи трактуется как среда, обладающая диэлектрической проницаемостью ϵ .

Моделирование электростатического поля выполнено для электрогидродинамического устройства автоматизированных систем, ЭГД-эффект которого основан на системе электродов «игла – трубка», являющейся осесимметричной. В данном техническом устройстве присутствуют две среды с разной диэлектрической проницаемостью: трансформаторное масло $\epsilon_1 = 2,3$ и оргстекло $\epsilon_2 = 4$. Исходя из этого, рассматриваются два вида граничных условий, а именно, условие Дирихле и условие Неймана.

$$\begin{aligned} & \left[\frac{U_{i-2j}^{(k+1)}}{h_y^4} - \frac{2U_{i-1j-1}^{(k+1)}}{h_x^2 h_y^2} + \left(\frac{4}{h_x^4} + \frac{4}{h_x^2 h_y^2} \right) U_{ij-1}^{(k+1)} - \frac{2U_{i+1j-1}^{(k+1)}}{h_x^2 h_y^2} - \frac{U_{i-1j}^{(k+1)}}{h_x^4} + \left(\frac{4}{h_x^4} + \frac{4}{h_x^2 h_y^2} \right) U_{i-1j}^{(k+1)} \right] - \\ & - \left[\left(\frac{4}{h_x^4} + \frac{4}{h_x^2 h_y^2} \right) U_{i+1j}^{(k)} - \frac{2U_{i-1j+1}^{(k)}}{h_x^2 h_y^2} - \frac{U_{i+2j}^{(k)}}{h_x^4} + \left(\frac{4}{h_x^4} + \frac{4}{h_x^2 h_y^2} \right) U_{ij+1}^{(k)} - \frac{2U_{i+1j+1}^{(k)}}{h_x^2 h_y^2} - \frac{U_{ij+2}^{(k)}}{h_y^4} \right] + f_{ij} = \quad (1) \\ & = \left(\frac{6}{h_x^4} - \frac{8}{h_x^2 h_y^2} + \frac{6}{h_y^4} \right) U_{ij}^{(k+1)} \end{aligned}$$

В расчётном уравнении поля для U , удовлетворяющего краевым условиям в каждом уравнении, связывающих вместе не более тринадцати неизвестных, было получено конечное уравнение МКЭ для расчёта поля в рассматриваемой системе электродов (1).

Была спроектирована математическая модель технического устройства – ЭГД-установки, максимально приближенная к реальным условиям, представленная на рисунке 1.



1 – диэлектрик; 2 – жидкий диэлектрик; 3 – трубка; 4 – игла.

Рисунок 1 – Геометрическая модель блока ЭГД-установки

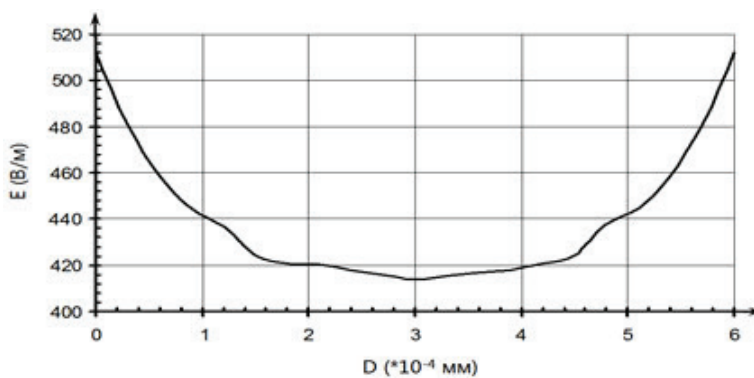


Рисунок 2 – Распределение E по контуру D на конце трубки

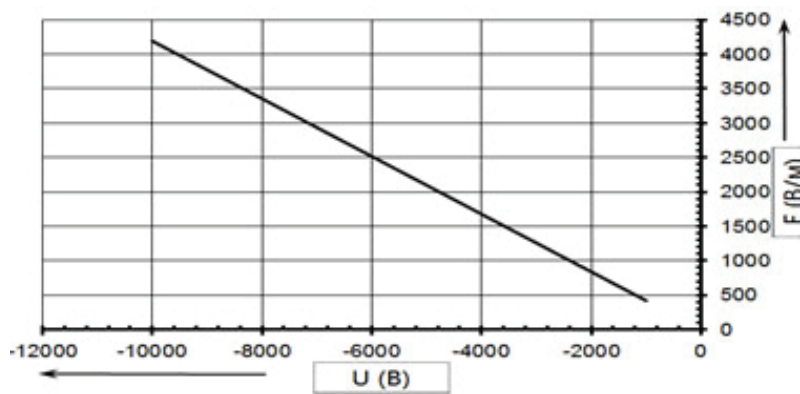


Рисунок 3 – Зависимость E(U_{нр})

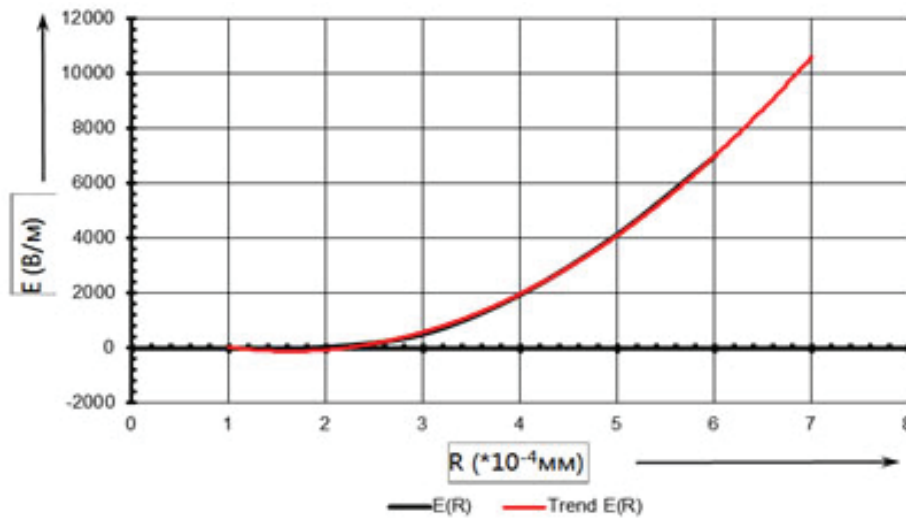


Рисунок 4 – Зависимость E(R)

Основная задача математической модели – определить характер изменения напряженности на конце трубки при различных расстояниях между электродами, радиусах трубки и напряжениях на игле.

Для определения опорной точки E построен график её распределения по контуру D (диаметр) на конце трубки, который показан на рисунке 2, на котором видно, что максимальные значения E устремляются на концах трубки. Ввиду того, что система осесимметрична, она была проанализирована только в верхней полуплоскости, отсюда опорная точка имеет координаты: $(\lambda+L, R)$.

Постоянные значения: $\lambda = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$; $R = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$; $l = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $r_0 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$; $e_1 = 2,3$; $e_2 = 4$. Для объективности представления и достоверности были взяты крайние и последовательные значения $U_{\text{иг}}$. Ввиду неоднородности крайних значений $U_{\text{иг}}$ на графике, представленном на рисунке 3, показан диапазон от -1000 В до -10000 В . E линейно зависима от $U_{\text{иг}}$. Таким образом, значение E при $U_{\text{иг}} = -1 \text{ В}$ является пересчётным коэффициентом и с его помощью можно рассчитать напряжённость при любом значении $U_{\text{иг}}$, при условии неизменности других параметров.

При тех же самых постоянных значениях и $U = -1000 \text{ В}$ была построена зависимость напряжённости от радиуса трубки (рисунок 4). Линия тренда описывается уравнением $y = 371,92x^2 - 1213,7x + 877,94$. Данная зависимость является полиномиальной. Она справедлива до $R = 13 \cdot 10^{-4} \text{ м}$, так как при превышении данного предела напряжённость на игле стремится к нулю. Так как радиусы трубки и кривизны иглы связаны между собой пропорциональным соотношением [4], на основе данной зависимости можно судить о характере изменения напряжённости при изменении радиуса кривизны иглы.

Зависимость напряжённости от длины трубки $E(l)$ описывается уравнением $y = 100197e^{-0,5371x}$. Данная зависимость экспоненциальная.

Зависимость напряжённости от расстояния между электродами $E(\lambda)$ описывается уравнением: $y = -1,8788x^5 + 38,756x^4 - 303,36x^3 + 1157,9x^2 - 2423,5x + 3172,7$. Данная зависимость полиномиальная.

Полученные зависимости позволяют синтезировать устройства автоматизированных технических систем энергетических предприятий, основанных на электрогидродинамическом эффекте с желаемыми характеристиками. При этом главными аспектами метода конечных элементов являются:

- для повышения точности расчёта необходимо брать больше узлов, используя возможности ПЭВМ;
- для достоверности расчётов необходимо знать физику рассчитываемого процесса;
- необходимо задавать геометрию модели максимально приближённо к реальному объекту.

Литература

1. *Апфельбаум М.С.* Теоретические модели электрогидродинамических насосных эффектов / М.С. Апфельбаум // Электронная обработка материалов. 1991. № 5. С. 29–35.
2. *Денисов А.А.* Электрогидро- и электрогазодинамические устройства автоматики / А.А. Денисов В.С. Нагорный. Л.: Машиностроение, 1979. 288 с.
3. *Нагорный В.С.* Электрофлюидные преобразователи / В.С. Нагорный. Л.: Судостроение, 1987. 252 с.
4. Краткий курс математического анализа: учебник для вузов / А.Ф. Бермант, И.Г. Араманович. СПб., 2005. 736 с.