

IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 2000. – Vol. 42, № 1. – P. 54 – 65.

4 Бочков К. А., Рязанцева Н. В. Вероятностный метод определения уровней ЭМС микроэлектронных систем обеспечения безопасности // Испытания систем железнодорожной автоматики и телемеханики на безопасность и электромагнитную совместимость: Труды международного семинара / БелГУТ. – Гомель, 2001.–С. 20 – 29.

5 Бочков К. А., Рязанцева Н. В. Нормирование параметров ЭМС с учетом реальной электромагнитной обстановки // Испытания систем железнодорожной автоматики и телемеханики на безопасность и электромагнитную совместимость: Труды международного семинара / БелГУТ. – Гомель, 2001.–С. 35 – 42.

6 Кравченко В. И. Грозозащита радиоэлектронных средств. –

М.: Радио и связь, 1991. – 264 с.

7 Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения / Бейер М., Бек М., Мейер В. и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 553 с.

8 Orlandi A., Mazzeti C., Flisowski Z., Yarmarkin M. Systematic Approach for the Analysis of the Electromagnetic Environment Inside a Building During Lightning Strike // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. – 1998. – Vol. 40, № 4. – P. 521 – 535.

9 Кравченко В. И., Болотов Е. А., Летунова Н. И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / Под общ. ред. В. И. Кравченко. – М.: Радио и связь, 1987. – 255 с.

10 Надежность технических систем: Справочник / Под ред. И. А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 605 с.

Получено 13.11.2002

K. A. Bochkov, D. V. Komnatny. Determination of microelectronic railway automatic systems electrostatic discharge immunity by probabilistic method.

The article is considering the questions of adequacy rising of electrostatic discharge immunity testing of railway automatic systems. The probabilistic model of railway automatic systems electrostatic discharge immunity is proposed. The method of test points choosing with the help of proposed model is described.

Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. 2002. № 2(5)

УДК 537.2.001.24

В. С. МОГИЛА, кандидат технических наук; Д. В. КОМНАТНЫЙ, аспирант; Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

РАСЧЕТ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ЭКРАНА ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДОМ

Рассматривается метод численного расчета коэффициента экранирования прямоугольной, тонкой заземленной пластины конечных размеров в электростатическом поле системы точечных зарядов. Расчет производится методом граничных элементов. Такой способ обеспечивает меньшую размерность матрицы коэффициентов системы линейных уравнений и, следовательно, повышает обусловленность задачи. В работе выведены замкнутые приближенные выражения для поля прямоугольного, равномерно заряженного участка. Приведены результаты расчетов по предлагаемому методу.

При конструировании высоковольтных установок и радиоэлектронных приборов зачастую возникает необходимость определения экранирующего эффекта металлических заземленных пластин различной формы в поле одного или нескольких точечных источников электростатического поля.

Задача определения электростатического поля точечного заряда в присутствии проводящей пластины может быть решена аналитически в нескольких случаях, а именно: для проводящей полуплоскости, проводящей бесконечной плоскости, круглого диска, бесконечной полуплоскости с круглой диафрагмой или прямоугольной щелью [1, 2]. В важном для практики случае прямоугольной пластины аналитическое решение в литературе отсутствует.

В связи с этим сохраняет актуальность разработка численного метода определения экранирующего эффекта тонкой прямоугольной пласти-

ны. При этом принимаем, что толщина пластины пренебрежимо мала по сравнению с ее длиной и шириной. Для расчета поля тонкой незамкнутой оболочки во внешней области наиболее целесообразным является метод граничных элементов.

В поле сторонних зарядов на заземленной проводящей пластине индуцируются электрические заряды, которые распределяются таким образом, что потенциал экрана остается постоянным и, в данном частном случае, равным нулю. Поэтому можно записать следующее соотношение для потенциала экрана, созданного точечными зарядами и зарядом, индуцированным на экране [3]:

$$\sum_{n=1}^N \varphi_n + \varphi_{\text{и}} = 0, \quad (1)$$

где N – количество точечных зарядов; φ_n – потенциал n -ного точечного заряда, В; $\varphi_{\text{и}}$ – потенциал, созданный индуцированным зарядом, В.

Выразив значение потенциала поля индуцированных зарядов через поверхностную плотность наведенного заряда, в общем случае не одинаковую в различных точках экрана, можно записать интегральное уравнение относительно плотности индуцированного заряда [3]:

$$\int_S \frac{\sigma}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} dS + \sum_{n=1}^N \varphi_n = 0, \quad (2)$$

где σ – поверхностная плотность индуцированного заряда, Кл/м²; S – площадь экрана, м²; ϵ – диэлектрическая проницаемость; ϵ_i – диэлектрическая постоянная, Ф/м; r – расстояние между точками влияния и наблюдения, м.

После переноса известного потенциала поля зарядов – источников поля в правую часть, уравнение (2) преобразуется:

$$\int_S \frac{\sigma}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r} dS = - \sum_{n=1}^N \varphi_n. \quad (3)$$

Для численного решения уравнения (3) пластина делится на прямоугольные граничные элементы. Плотность индуцированных зарядов в пределах граничного элемента принимается постоянной. Точки наблюдения размещаются в центрах тяжести граничных элементов. Тогда уравнение (3) преобразуется в систему линейных алгебраических уравнений:

$$\sum_i \sigma_i \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int_{S_i} \frac{1}{r_{QM}} dS = - \sum_{n=1}^N \varphi_n. \quad (4)$$

Коэффициенты при неизвестных системы уравнений (4) имеют вид

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \int_{S_i} \frac{1}{r_{QM}} dS, \quad (5)$$

где j – номер граничного элемента, содержащего точку наблюдения Q ; i – номер граничного элемента, содержащего точку влияния M .

Для вычисления интеграла в формуле (5) подынтегральное выражение раскладывается в ряд по полиномам Лежандра [4] (рисунок 1):

$$\frac{1}{r_{QM}} = \frac{1}{r_{QM_0}} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r_{MM_0}}{r_{QM_0}} \right)^n P_n(\cos \theta), \quad (6)$$

где r_{QM} – расстояние между точкой влияния M и точкой наблюдения Q , м; r_{QM_0} – расстояние между точкой наблюдения Q и центром тяжести граничного элемента M_0 , м; r_{MM_0} – расстояние между точкой влияния M и центром тяжести граничного элемента M_0 , м; $P_n(\cos \theta)$ – полином Лежандра степени n .

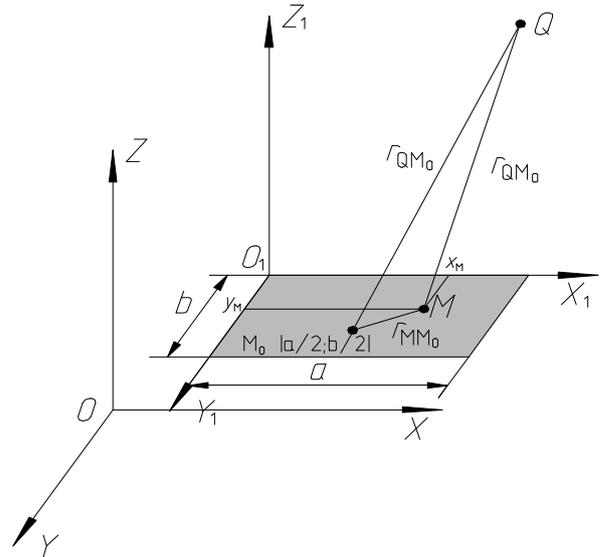


Рисунок 1 – Геометрические соотношения для одного граничного элемента

Можно показать, что ряд (6) является равномерно сходящимся [5] и для плоских элементов, как показано в [4], принимает вид

$$\frac{1}{r_{QM}} = \frac{1}{r_{QM_0}} - \frac{r_{MM_0}^2}{2r_{QM_0}^3} + \frac{3r_{MM_0}^4}{8r_{QM_0}^5} - \dots. \quad (7)$$

Если ограничиться тремя первыми членами ряда, то при почленном интегрировании (7) получается:

$$\int_{S_i} \frac{1}{r_{QM}} dS = \frac{S}{r_{QM_0}} - \frac{1}{2r_{QM_0}^3} \int_{S_i} r_{MM_0}^2 dS + \frac{3}{8r_{QM_0}^5} \int_{S_i} r_{MM_0}^4 dS. \quad (8)$$

После необходимых подстановок и преобразований получаем выражение для интеграла в (5):

$$\int_{S_i} \frac{1}{r_{QM}} dS = \frac{S}{r_{QM_0}} - \frac{1}{2r_{QM_0}^3} \times \left[\frac{2}{3} b \left(\frac{a}{2} \right)^3 + \frac{2}{3} a \left(\frac{b}{2} \right)^3 \right] + \frac{3}{8r_{QM_0}^5} \left[\frac{2}{5} \left(\frac{a}{2} \right)^5 b + \frac{2}{5} \left(\frac{b}{2} \right)^5 a \right], \quad (9)$$

где a – длина граничного элемента, м; b – ширина граничного элемента, м.

При совпадении точек влияния и наблюдения выражение (9) обращается в бесконечность. В [6] показано, что для равномерно заряженной прямоугольной пластины в точках, принадлежащих плоскости пластины справедлива формула

$$\int_S \frac{1}{r_{QM}} dS = |a-x| \left(\operatorname{Arsh} \frac{b-y}{a-x} + \operatorname{Arsh} \frac{y}{a-x} \right) + |b-y| \left(\operatorname{Arsh} \frac{a-x}{b-y} + \operatorname{Arsh} \frac{x}{b-y} \right) + |y| \left(\operatorname{Arsh} \frac{a-x}{y} + \operatorname{Arsh} \frac{x}{y} \right) + |x| \left(\operatorname{Arsh} \frac{b-y}{x} + \operatorname{Arsh} \frac{y}{x} \right), \quad (10)$$

где x, y – координаты произвольной точки, лежащей в плоскости пластины, м.

Подстановка в выражение (10) координат центра граничного элемента в локальной системе координат x_1, O_1, y_1 (см. рисунок 1) приводит к выражению

$$\int_S \frac{1}{r_{QM}} dS = 2a \operatorname{Arsh} \frac{b}{a} + 2b \operatorname{Arsh} \frac{a}{b} \quad (11)$$

Рассчитав значения зарядов граничных элементов, можно проанализировать коэффициент экранирования. Коэффициент экранирования в точке области, защищенной экраном, определяется отношением потенциала неискаженного поля к потенциалу в той же точке при наличии экрана.

Для проверки предлагаемого метода вычислений был выполнен расчет экрана, находящегося в поле точечного заряда, значение которого $1 \cdot 10^{-6}$ Кл. Вычисление значений коэффициентов системы линейных алгебраических уравнений (4) и ее решение проводились с помощью программного средства MathCAD PLUS 6.0 фирмы MathSoft Ink. По результатам расчета были построены:

– график распределения потенциала на прямой, находящейся под экраном, при наличии и отсутствии экрана (рисунок 2);

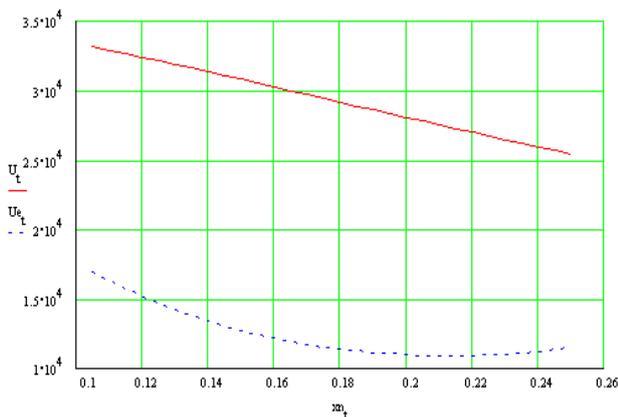


Рисунок 2 – Распределение потенциала в области, защищенной экраном

– график изменения коэффициента экранирования вдоль прямой (рисунок 3).

На рисунках 2 и 3 обозначено: U_i – потенциал в исследуемой области при отсутствии экрана, U_{ei} – при его наличии.

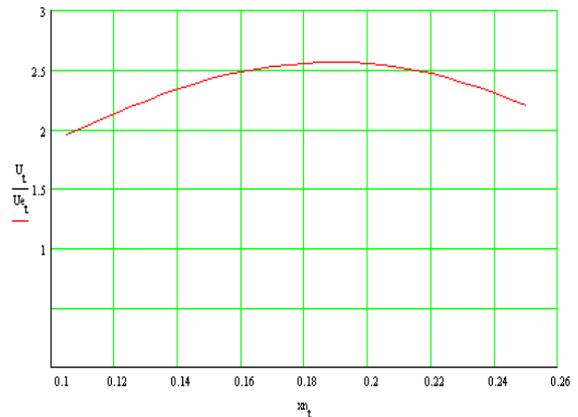


Рисунок 3 – Значения коэффициента экранирования в области под экраном

Расчеты на ЭВМ показали, что при небольшом количестве граничных элементов можно получить достаточно точное решение задачи. Как видно на рисунке 2, потенциал в исследуемой области при наличии экрана в среднем в два раза меньше потенциала в той же области, определенного в отсутствие экрана. Это позволяет сделать вывод о возможности расчетов прямоугольных экранов предлагаемым методом.

Список литературы

- 1 Лебедев Н. Н., Скальская И. П., Уфлянд Я. С. Сборник задач по математической физике. – М.: Физматгиз, 1955. – 420 с.
- 2 Иосель Ю. Я., Кленов Г. Э. Расчет стационарного электрического поля точечных источников тока с плоскими экранами // Электричество – 1983. – № 9. – С. 47–49.
- 3 Лебедев Н. Н. Специальные функции и их приложения – М.–Л.: ГИФИЛ, 1963. – 358 с.
- 4 Демирчан К. С., Чечурин В. Л. Машинные расчеты электромагнитных полей. – М.: Высшая школа, 1986. – 240 с.
- 5 Кошляков Н. С., Глинер Э. Б., Смирнов М. М. Уравнения в частных производных математической физики. – М.: Высшая школа, 1970 – 712 с.
- 6 Иосель Ю. Я., Кочанов И. С., Струнский М. Г. Расчет электрической емкости. – М.: Энергия, 1969. – 240 с.

Получено 11.11.2002

V. S. Mogila, D. V. Komnatny. Calculation of rectangular electrostatic screen by numeric method.

Method of numerical calculation of shielding coefficient of rectangular thin grounded plate with final dimensions in electrostatic field of point charge system is considered in this article. The calculation is based on the boundary element method. Such method reduces matrix size and raises conditionality of the task. Approximate closed expressions for the field of uniformly charged rectangular has been derived. The results of calculation made according to the proposed method are given.