

АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ

УДК 621.396:621.391.82

В. С. МОГИЛА, кандидат технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель; Д. В. КОМНАТНЫЙ, кандидат технических наук, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, г. Гомель

РАСЧЕТ ПОГОННОЙ ЕМКОСТИ ЛИНИЙ СВЯЗИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

Обоснована необходимость внедрения метода расчета погонной емкости линий связи печатных плат с простым математическим аппаратом для проектирования микросистем железнодорожной автоматики. Показано, что таким методом может быть метод эквивалентных электродов. Описана методика сведения задачи расчета электрического поля к решению системы линейных алгебраических уравнений первой группы формул Максвелла. Метод проверен расчетом емкости провода квадратного сечения, размещенного над бесконечной проводящей плоскостью, численно и по точной формуле. Показано, что с увеличением числа электродов погрешность численного расчета убывает и достигает приемлемой величины. В качестве примера рассчитана емкость в модели линий связи печатной платы. Описаны свойства матрицы коэффициентов системы уравнений, которые позволяют сократить вычислительные трудности.

В целях замены выработавшего свой ресурс оборудования систем железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) и повышения безопасности движения поездов на железных дорогах повсеместно вводят в эксплуатацию микропроцессорные и микросистемные системы автоматики и телемеханики.

Разработка таких систем сделала актуальными для специалистов-разработчиков проблемы расчета и анализа устойчивости электронных технических средств ЖАТ к различного рода помехам. В частности, при рассмотрении воздействия импульсных помех, созданных электростатическим разрядом, на корпус устройства ЖАТ или на его плату необходимо знать первичные и вторичные параметры линий связи узлов этого устройства.

Как правило, в практике конструирования предполагается, что линии связи печатных плат представляют собой цепи с распределенными параметрами без потерь. Для расчета параметров таких линий достаточно вычислить их погонную емкость, а другие параметры легко рассчитывать по известной емкости. Конечными размерами линий связи пренебрегают и рассматривают двумерную задачу расчета электростатического поля. В силу того, что линии связи печатных плат содержат большое число проводников, расчет их погонной емкости возможен только численными методами [1].

В литературных источниках предложены весьма разнообразные численные методы. Так, в [1] применяют, во-первых, метод граничных элементов с прямоугольными элементами для расчета емкости плат печатного монтажа и круглыми – для

тканого монтажа. Во-вторых, используют метод конечных элементов в сочетании с аналогией электростатических полей и резистивных сеток. В [2] для выполнения тех же расчетов использован метод моментов. В статье [3] задачу расчета емкости в многопроводной линии с проводами круглого сечения, окруженными изоляцией, решают методом конечных элементов. Вариант метода конечных элементов приведен и в [4]. В работе [5] для расчета емкостных параметров линий связи печатных плат используется метод, сочетающий конечные и бесконечные элементы.

Для применения рассмотренных выше способов расчета емкости в инженерной практике от разработчиков аппаратуры автоматики и телемеханики требуется углубленное знание численных методов решения задач математической физики и электродинамики. Однако эти вопросы практически не затрагиваются учебными программами университетов транспорта. Поэтому необходим численный метод расчета электростатических полей, который отличается простотой математического аппарата и, таким образом, доступен инженерам, изучившим курс теоретических основ электротехники по программе вузов железнодорожного транспорта.

Таким методом может быть метод эквивалентных электродов, предложенный Д. Величковичем (Сербия) [6]. Аналогичный прием при разработке методов расчета электростатического поля использован Хабигером [7]. Метод эквивалентных электродов применяют для расчета плоскопараллельных полей, и заключается он в следующем.

Для расчета погонной емкости предполагают, что на проводники поданы потенциалы произвольной величины. Направляющие рассматриваемых в задаче проводников разделяют на небольшие прямолинейные участки. Принимают, что потенциал участка равен потенциалу круглого проводника (эквивалентного электрода), размещенного в центре участка, если равны линейные плотности зарядов участка и эквивалентного электрода. Показано [8], что это положение справедливо при

$$r = \frac{l}{4}, \quad (1)$$

где r – радиус эквивалентного электрода, м; l – длина участка, м.

После этого для системы круглых проводов записывают первую группу формул Максвелла [9]:

$$[\varphi] = [\alpha][\tau]. \quad (2)$$

Так как проводники печатных плат размещены над большими заземленными плоскостями (корпус прибора или экран печатной платы), то потенциальные коэффициенты эквивалентных электродов

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2h_i}{r_i}; \quad (3)$$

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{b_{ij}}{a_{ij}},$$

где h_i – высота проводника над заземленной плоскостью, м; a_{ij} – расстояние между проводниками, м; b_{ij} – расстояние между i -м проводником и отражением j -го проводника, м; ϵ – диэлектрическая проницаемость среды.

Потенциалы эквивалентных электродов принимаются равными потенциалам исходных проводников. Поэтому первая группа формул Максвелла представляет собою систему линейных алгебраических уравнений для неизвестных зарядов эквивалентных электродов. Эта система может быть решена известными методами.

Погонная емкость проводника m вычисляется по формуле [10]

$$C_m = \frac{\sum_i \tau_i \quad i \in m}{\varphi_m}, \quad (4)$$

где C_m – рабочая емкость проводника номер m , Ф; φ_m – потенциал проводника, В.

Для проверки предложенного метода был выполнен расчет емкости провода квадратного сечения, расположенного над поверхностью земли (рисунок 1). Для такого провода известна формула погонной емкости [11]

$$C = \frac{4\pi\epsilon}{\ln\left(v^2 - \frac{2v}{v-1}\right)}, \quad (5)$$

$$v = 1,695 \frac{d}{a},$$

где a – сторона квадрата, м; d – удвоенная высота центра квадрата над поверхностью земли, м.

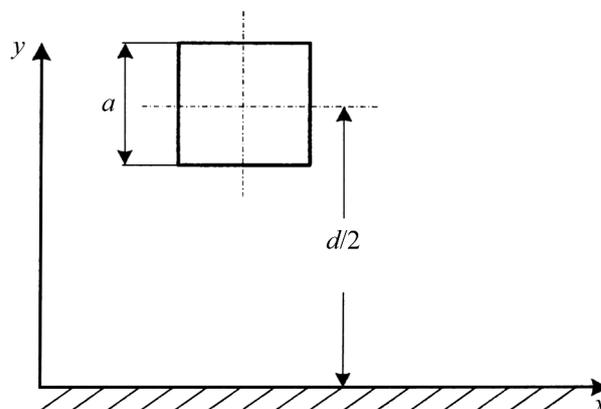


Рисунок 1 – Провод квадратного сечения над поверхностью земли

Для расчетов были приняты значения $a = 0,02$ м и $d = 0,22$ м. По формуле (5) была вычислена емкость провода $1,904 \cdot 10^{-11}$ Ф/м. При разбиении каждой из сторон квадрата на 100 участков и расчете методом эквивалентных электродов было получено то же значение емкости с точностью до третьего знака после запятой. Для проверки устойчивости метода был построен график относительной погрешности расчета емкости методом эквивалентных электродов при увеличении числа участков разбиения, показанный на рисунке 2. Из графика видно, что погрешность расчета убывает и достигает практически допустимого значения.

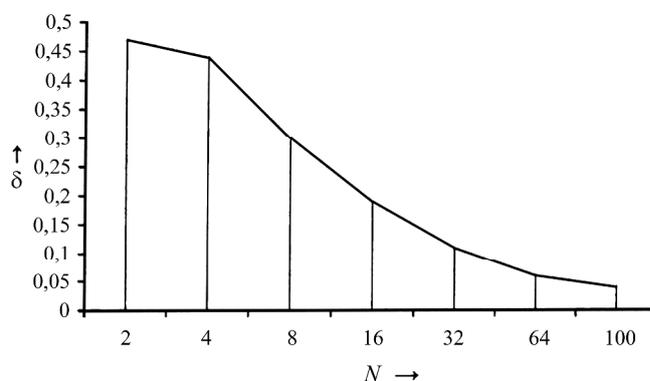


Рисунок 2 – Зависимость относительной погрешности расчета емкости от числа участков на стороне электрода

В качестве примера авторами рассчитана погонная емкость одного из проводников в системе, показанной на рисунке 3. Подобные системы проводников используют в качестве моделей линий

связи микросхемных узлов. Для расчета было принято, что $l_1 = 0,01$ м, $l_2 = 0,015$ м, $d = 0,005$ м, $h = 0,05$ м. В результате расчетов найдена емкость первого проводника, равная $2,399 \cdot 10^{-11}$ Ф/м.

Таким образом, метод эквивалентных электродов можно использовать для расчета рабочей погонной емкости проводников узлов микросхемного оборудования железнодорожной автоматики. Достоинствами описанного метода, кроме простоты математического аппарата, являются отсутствие особых точек и хорошие свойства матрицы коэффициентов системы линейных уравнений, а именно: коэффициенты ее положительны, имеется диагональное преобладание, матрица симметрична. Эти особенности матрицы облегчают численную реализацию методов решения системы линейных алгебраических уравнений (2) на ЭВМ.

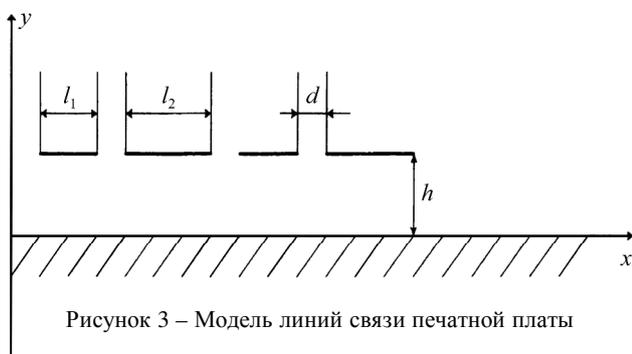


Рисунок 3 – Модель линий связи печатной платы

Список литературы

1 Кечиев, Л. Н. Расчет электрической емкости в конструкциях РЭС: учеб. пособие / Л. Н. Кечиев, И. В. Цырин. – М. : Московский ин-т электронного машиностроения, 1990. – 96 с.

Получено 16.02.2007

V. S. Mogila, D. V. Komnatny. Self-capacitance calculation of printed circuit board transmission lines by equivalent electrode method.

The necessity of adaptation PCB lines stray capacitance calculation method with simply body of mathematics for microelectronic railway automatic systems design is substantiated in this article. It is shown, that equivalent electrode method can be such method. The methods of electric field calculation task reduction to the solution of linear algebraic system of equations are described. The examination of the method is realized by square cross-section conductor capacitance calculation by numerical method and according exact formulae. It is shown, that numerical calculation error decrease when number of electrode is increased. As example, PCB lines model calculation is executed. The system of equations coefficient matrix properties, which allow to reduce calculation difficulties, is described also.

2 Газизов, Т. Р. Компьютерное моделирование электромагнитных влияний в соединениях двухслойных диэлектрических печатных плат / Т. Р. Газизов // Thirteenth International Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility / Wroclaw Polytechnic Institute. – Wroclaw : WPI, 1996. – P. 230–234.

3 Feliziani, M. Capacitance matrix calculation of a wire conductor line : A new FEM approach / M. Feliziani, F. Muradei // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 1998. – Vol. 40, No. 3. – P. 230–234.

4 Characterization of Crosstalk noise in Submicron CMOS Integrated Circuits: An Experimental View / J.-Y. Fournious [and oth.] // IEEE Transactions on electromagnetic compatibility. – 1998. – Vol. 40, No. 3. – P. 271–280.

5 Khan, R. L. Considerations on modeling crosstalk on printed circuit boards / R. L. Khan, G. I. Costache // 1987 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility / IEEE. – N. Y. : IEEE Publishing Service, 1987. – P. 279–281.

6 Velichkovich, D. M. Rectangular coax with axial slit and with rectangular or circular center conductor / D. M. Velichkovich, Z. J. Mancic, D. G. Zuklic // International Symposium on Electromagnetic Compatibility / University of Rome “La Sapienza”. – Milan, 1998. – P. 384–389.

7 Комнатный, Д. В. Решение второй основной задачи электростатики методом последовательных приближений / Д. В. Комнатный // Сб. науч. тр. аспирантов и магистрантов. Вып. 2 / Белорус. гос. ун-т. трансп. ; под ред. В. И. Сенько. – Гомель : БелГУТ, 2002. – С. 90–99.

8 Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники: Электромагнитное поле / Л. А. Бессонов. – М. : Высшая школа, 1978. – 220 с.

9 Колечицкий, Е. С. Расчет электрических полей устройств высокого напряжения / Е. С. Колечицкий. — М. : Энергоатомиздат, 1983. – 168 с.

10 Полосковые платы и узлы / Е. П. Котов [и др.]. – М. : Сов. радио, 1979. – 247 с.

11 Иоссель, Ю. Я. Расчет электрической емкости / Ю. Я. Иоссель, И. С. Кочанов, М. Г. Струнский – М. : Энергия, 1969. – 240 с.