ляются, зачастую, уникальными установками, доступ к которым ограничен. Для замены таких генераторов используются радиолокационные установки, для работы с которыми требуются открытые площадки. При этом необходимо обеспечивать безопасность находящейся в окрестностях полигона микроэлектронной аппаратуры.

Немаловажным обстоятельством является и то, что исследование нового вида электромагнитных угроз – электромагнитных импульсов преднамеренного воздействия – ведется на основе уже достаточно изученного электростатического разряда методами энергетического подхода к расчету распространения помехового излучения и на базе условий эквивалентности импульсов.

УДК 621.396:621.391.82

РАСЧЕТ ПОЛОСКОВЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Д. В. КОМНАТНЫЙ
Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь

При разработке аппаратуры современных микроэлектронных и микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и телемеханики возникают новые проблемы электромагнитной совместимости. Необходимо обеспечить помехозащищенность узлов этой аппаратуры, что достигается использованием полосковых печатных плат. В этих платах диэлектрический слой, содержащий линии связи, экранирован сверху и снизу металлическими экранами. Вместе с тем, требуется исключить возникновение помех в линиях связи таких плат. Для решения этой задачи требуется анализ распространения сигналов по линиям связи путем решения уравнений идеальной длинной линии. Расчет первичных параметров такой линии, от которых зависят коэффициенты уравнения линии, осуществляется путем определения погонной емкости проводников линий связи методами электростатики.

Так как конструкция платы является сложной электродинамической системой, расчет поля в ней выполняется численными методами. Среди численных методов в трудах Л. Н. Кечиева наиболее проработан метод граничных элементов. Он основан на численном решении интегрального уравнения для электростатического поля в печатной плате

$$u(x,y)=\int_S G(x_M,x_Q,y_M,y_Q)\sigma(x_Q,y_Q)dxdy, \quad (1)$$

где u – потенциал, В; x, y – координаты точки наблюдения M и точки влияния Q, м; G – функция Грина задачи; σ – плотность электрического заряда, Кл/м.

Для численного решения интегрального уравнения (1) границы проводников линии связи разделяются на граничные элементы. Предполагается, что плотность заряда элемента постоянная. Тогда интегральное уравнение (1) сводится к системе алгебраических линейных уравнений вида

$$u(x,y)=\sum_{i=i}\sum_{j=1}^{N}\sigma(x_Q,y_Q)\int_o^{d_j} G(x_M,x_Q,y_M,y_Q)dxdy, \quad (2)$$

где i, j – счетные переменные; N – число граничных элементов, d_j – длина граничного элемента j, м.

Геометрические параметры граничного элемента вычисляются по формулам:

$$x_Q=x_{\text{н}j}+t\cos\theta_j,\ y_Q=y_{\text{н}j}+t\sin\theta_j,\ d_j=\sqrt{(x_{\text{н}j}-x_{\text{к}j})^2+(y_{\text{н}j}-y_{\text{к}j})^2},$$

$$\cos\theta_j=\frac{x_{\text{к}j}-x_{\text{н}j}}{d_j},\sin\theta_j=\frac{y_{\text{к}j}-y_{\text{н}j}}{d_j}, \quad (3)$$

где $x_{\text{н}j}$, $y_{\text{н}j}$ – координаты начала граничного элемента, м; $x_{\text{к}j}$, $y_{\text{к}j}$ – координаты конца граничного элемента, м; t – параметр; θ_j – угловой параметр граничного элемента, рад.

Функция Грина для рассматриваемой электродинамической системы известна и имеет вид

$$G(x_M,x_Q,y_M,y_Q)=\frac{1}{\pi\varepsilon_a}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n}\sin\left(\frac{n\pi y_Q}{2d}\right)\sin\left(\frac{n\pi y_M}{2d}\right)\exp\left(-\frac{n\pi}{2d}(x_M-x_Q)\right), \quad (4)$$

где ε_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость диэлектрика платы, Ф/м; n – счетная переменная функции Грина; d – толщина слоя диэлектрика, м.

После подстановки (3) в (2) линейные алгебраические уравнения системы приобретают вид

$$u(x, y) = \sum_{i=i} \sum_{j=1}^{N} \sigma(x_Q, y_Q) \int_{o}^{d_j} G(x_M, x_{\text{н}j} + t\cos\theta, y_M, y_{\text{н}j} + t\sin\theta_j) dt. \quad (5)$$

Подстановка (4) в (5) показывает, что для вычисления коэффициентов уравнений (5) требуется взять следующие интегралы. Внедиагональные элементы матрицы коэффициентов уравнения (5) связывают потенциал в точке наблюдения M с плотностью электрического заряда в точке влияния Q, которые принадлежат разным граничным элементам. Для вычисления внедиагональных коэффицентов

$$\int \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{2d}(y_{\text{н}j} + t\sin\theta_j)\right) \sin\left(\frac{n\pi y_M}{2d}\right) \exp\left(-\frac{n\pi}{2d}(x_M - (x_{\text{н}j} + \sin\theta_j))\right) dt. \quad (6)$$

При введении обозначений $\frac{n\pi}{2d} y_{\text{н}j} = a$, $\frac{n\pi}{2d}\sin\theta_j = b$, $\frac{n\pi}{2d} x_{\text{н}j} - \frac{n\pi}{2d} x_M = f$, $\frac{n\pi}{2d}\cos\theta_j = c$ интеграл (6) сводится к интегралу

$$\int \sin(a + bt)\exp(ct + f)dt. \quad (7)$$

Диагональные элементы связывают потенциал в точке наблюдения с зарядом, распределенным по граничному элементу, к которому эта точка принадлежит. Для вычисления диагональных коэффициентов необходимо взять интеграл

$$\int \frac{1}{n} \sin\left(\frac{n\pi}{2d}(y_{\text{н}i} + t\sin\theta_i)\right) \sin\left(\frac{n\pi y_M}{2d}\right) \exp\left(-\frac{n\pi}{2d}(x_M - (x_{\text{н}i} + \sin\theta_i))\right) dt. \quad (8)$$

При введении обозначений $\frac{n\pi}{2d} y_{\text{н}i} = a$, $\frac{n\pi}{2d}\sin\theta_i = b$, $\frac{n\pi}{2d} x_{\text{н}i} - \frac{n\pi}{2d} x_M = f$, $\frac{n\pi}{2d}\cos\theta_i = c$ интеграл (8) сводится к интегралу (7). При этом не возникает исключений, связанных с тем, что подынтегральное выражение оказывается равным бесконечности.

Интеграл (7) может быть найден аналитически методом интегрирования по частям. В результате получается

$$\int \sin(a + bt)\exp(ct + f)dt = \frac{-1}{b + c} e^{ct+f} \cos(bt + a) + \frac{c}{b^2 + bc} \exp(ct + f)\sin(bt + a).$$

Система линейных алгебраических уравнений (5) относительно неизвестных плотностей электрических зарядов граничных элементов может быть составлена с достаточной для практики точностью при удержании пяти слагаемых в функции Грина (4).

Приведенные в докладе расчетные соотношения метода граничных элементов для анализа полосковой линии позволяют сделать выводы.

При расчете полосковой печатной платы методом граничных элементов не возникают исключения. Диагональные и внедиагональные элементы матрицы коэффициентов системы линейных алгебраических уравнений вычисляются по формулам одного вида. При этом существуют аналитические выражения для необходимых интегралов. Численное интегрирование не требуется. Это облегчает составление программ для реализации метода граничных элементов на компьютере.

Функция Грина задачи получена так, что в ней учитываются электрические заряды, индуцированные на металлических экранах платы. Следовательно, не требуется вводить на этих экранах сетку граничных элементов, что сокращает размерность задачи. С другой стороны, предполагается, что края платы не оказывают влияния на электростатическое поле в диэлектрике платы, а само поле плоскопараллельное. Как показывает практика, такое предположение не вносит значительных погрешностей.

Недостатком рассматриваемого в докладе метода является необходимость вычисления сумм громоздких выражений вида (6) и (8). Но этот недостаток искупается указанными выше достоинствами, сокращающими вычислительную сложность метода.

Поэтому можно сделать общий вывод. Применение полосковых печатных плат в конструкциях аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики повышает помехозащищенность узлов этой аппаратуры к внешним и внутриаппартурным электромагнитным помехам. Исключение помех в линиях связи таких плат при проектировании является исследованной задачей и может быть достигнуто. Метод граничных элементов позволяет рассчитать первичные параметры линий связи, при этом вычислительные трудности сравнительно ниже, чем при расчете линий связи печатных плат других конструкций. Следовательно, полосковые печатные платы являются предпочтительными в конструкциях аппаратуры железнодорожной автоматики и телемеханики. Их проектирование не вызывает принципиальных затруднений и может быть осуществлено на практике без неприемлемых затрат труда и времени.

УДК 656.259.12

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЙ РЕЛЬСОВОЙ ЛИНИИ

Д. Д. МЕДВЕДЕВ
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

Рельсовая цепь (РЦ) является основным элементом всех современных систем автоматики и телемеханики по регулированию движения поездов на железных дорогах и выполняет функции датчика информации о свободности и целостности рельсового пути, а также телемеханического канала связи между проходными светофорами и между путевыми и локомотивными устройствами [1].

В настоящее время при разработке и проектировании РЦ широко применяется микроэлектронная элементная база [2, 3], позволяющая применять современные методы обработки сигналов.

Эксплуатируемые в настоящее время на Белорусской железной дороге приемники тональных рельсовых цепей сравнивают амплитуду огибающей сигнала с некоторым фиксированным порогом. При этом если величина огибающей входного воздействия превышает порог ограничения обнаружителя, принимается решение о свободном и исправном состоянии контролируемой рельсовой линии [1]. В противном случае рельсовая линия считается занятой подвижным составом, либо неисправной [2].

Для решения задачи достоверной классификации состояний рельсовых линий необходимо, наряду с развитием существующих РЦ, создавать новые классификаторы состояний рельсовых линий (КСРЛ), позволяющие существенно расширить функциональные возможности рельсовых цепей при воздействии возмущающих факторов, организовать классификатором диагностику и прогнозирование состояния элементов рельсовой линии как первичного датчика информации и добиться относительной инвариантности классификатора к возмущающим воздействиям.

Наиболее перспективными для решения подобных задач представляются методы адаптивной обработки выходного сигнала рельсовой линии, методы распознавания образов с элементами самоотбора сложности полинома решающих функций, а также методы инвариантности с принципом многоканальности [4].

При построении КСРЛ, рассчитанных на работу при повышенной проводимости изоляции, и в условиях воздействия комплекса помех, хорошие результаты дает использование математического аппарата обнаружения разладки случайного процесса [4]. Разладкой случайного процесса называется скачкообразное изменение его свойств, происходящее в неизвестный момент времени или не происходящий вовсе [5]. Различают положительную и отрицательную разладки. Применительно к контролю состояний рельсовых линий под положительной разладкой понимают скачкообразное изменение амплитуды сигнала контроля в момент освобождения рельсовой линии подвижным составом. Отрицательная разладка заключается в скачкообразном ее снижении, происходящей под действием поездного шунта, либо при нарушении целостности рельсовых нитей [4].

С точки зрения аппаратной реализации метода обнаружения разладки случайного процесса, наиболее простым и математически обоснованным является алгоритм кумулятивных сумм с отражающим экраном [4]. Он представляет собой последовательный анализ Вальда. Правило обнаружения разладки строится на сравнении на h-м шаге решающей статистики S_h с фиксированным порогом $U_{пв}$. Решающая статистика рассчитывается по формуле