

одной из вершин треугольника; на практике удобно, чтобы при этой вершине лежал тупой угол. Ось  $y'$  направляется по нормали, к стороне треугольника, лежащей напротив вершины начала координат. Ось  $x'$  нормальна к оси  $y'$ . Тогда стороны треугольника будут иметь в локальной системе координат уравнения  $x' = k_3 y'$  и  $x' = k_4 y'$ , соответственно. Уравнения записаны так, чтобы при интегрировании двойного интеграла сведением к повторному, внешний интеграл имел своими пределами интегрирования числа.

Для граничного элемента  $S_i$  вводятся обозначения: центр граничного элемента  $Q_i$ , точка наблюдения  $M_j$ , произвольная точка на поверхности элемента  $M$ . Вводятся также следующие векторы  $\overline{M_j M} = \vec{\xi}$ ,  $\overline{Q_i M} = \vec{v}$ ,

$\overline{M_j Q_i} = \vec{\eta}$ . При этом  $\vec{\xi} = \vec{v} + \vec{\eta}$ . В качестве ортов локальной системы приняты единичные векторы  $\vec{a}$  и  $\vec{b}$ .

Тогда  $\vec{v} = x' \vec{a} + y' \vec{b}$ .

Следовательно,

$$\vec{\xi} = \vec{\eta} + x' \vec{a} + y' \vec{b}. \quad (2)$$

Расстояние  $R_{M_j M}$  выражается через скалярное произведение:  $R_{M_j M} = |\vec{\xi}| = \sqrt{(\vec{\xi}, \vec{\xi})}$ .

Принимая во внимание формулу (2), получаем выражение для скалярного произведения. В нем учитывается, что скалярное произведение ортов локальной системы координат  $(\vec{a}, \vec{b}) = 0$ . В результате  $(\vec{\xi}, \vec{\xi}) = (x' + p_1)^2 + \alpha$ ; где обозначается  $p_1 = (\vec{\eta}, \vec{a})$ ,  $p_2 = (\vec{\eta}, \vec{b})$ ,  $\alpha = (y' + p_2)^2 + |\vec{\eta}|^2 - p_1^2 - p_2^2$ . Что позволяет записать интеграл (1) в виде

$$I = \iint_{S_i} \frac{1}{\sqrt{(x' + p_1)^2 + \alpha}} dS_{Q_i} = \int_0^D \left[ \int \frac{k_4 y'}{k_3 y' \sqrt{(x' + p_1)^2 + \alpha}} dx' \right] dy', \quad (3)$$

где  $D$  – длина высоты граничного элемента, м.

Результат вычисления внутреннего интеграла таков

$$I_{in} = \ln \left( p_1 + k_4 y' + \sqrt{a_4 y'^2 + b_4 y' + |\vec{\eta}|^2} \right) - \ln \left( p_1 + k_3 y' + \sqrt{a_3 y'^2 + b_3 y' + |\vec{\eta}|^2} \right), \quad (4)$$

где введены обозначения  $a_3 = k_3^2 + 1$ ,  $b_3 = 2p_1 k_3 + 2p_2$ ,  $a_4 = k_4^2 + 1$ ,  $b_4 = 2p_1 k_4 + 2p_2$ .

Первообразная функции  $\ln(p + ky' + \sqrt{ay'^2 + by' + c})$  теоретически известна, но она столь громоздка, что ее практически невозможно применять при разработке программного обеспечения. Поэтому внешний интеграл рационально рассчитывать численными методами интегрирования, например методом Ромберга. Это достаточно просто реализовать современными технологиями программирования.

Таким образом, вычисление интеграла (1) в форме (3) и (4) существенно упрощается, так как не требуется численное интегрирование по площади граничного элемента. При этом допустимо применять встроенные алгоритмы численного интегрирования имеющихся программных продуктов, что значительно сокращает время на компьютерную реализацию прикладных задач. Тем самым заметно облегчается разработка математических моделей ЭМС реальных ТС СЖАТ. Математическое моделирование ЭМС методами теории поля, в свою очередь, повышает достоверность и адекватность результатов, что особенно необходимо для систем обеспечения безопасности движения поездов.

Кроме этого, необходимо отметить, что метод векторной алгебры дает возможность вычислять коэффициенты линейных алгебраических уравнений метода граничных элементов для элементов различной формы: треугольной, прямоугольной, и даже кольцеобразной с помощью единообразного подхода. Единообразие является достоинством методики на основе векторных соотношений, так как математическому аппарату метода придаются необходимые для инженерных приложений ясность и универсализм.

УДК 621.396: 621.391.82

### РАСЧЕТ ЕМКОСТИ ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ СВЯЗИ РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ АППАРАТУРЫ ЖАТ МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ

Д. В. КОМНАТНЫЙ

Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого, Республики Беларусь

В целях повышения внутриаппаратурной ЭМС и снижения уровня паразитных наводок в оборудовании железнодорожной автоматики и телемеханики находят широкое применение развязывающие устройства: ре-

ле, оптоэлектронные пары, трансформаторы. Но для успешного функционирования указанных устройств требуется обеспечить низкий уровень паразитной гальванической емкостной связи между входными и выходными цепями каждого развязывающего устройства.

Вычисление указанной емкости наталкивается на следующие трудности. Во-первых, развязывающих устройств может быть достаточно много и размещены они вблизи друг от друга так, что наличие соседних устройств оказывает влияние на емкости между выводами каждого отдельного устройства. Во-вторых, эти устройства размещены в металлическом корпусе, влиянием которого на емкостные параметры пренебречь нельзя. Размеры корпусов развязывающих устройств невелики. Следовательно, провода вводов и корпуса устройств совместно с корпусом аппаратуры образуют электродинамическую систему с очень сложной геометрией, что затрудняет применение численных методов расчета емкости.

Упростить проведение расчетов позволяет метод эквивалентных электродов. В этом методе корпуса разделительных устройств прямоугольной формы заменяются сферическими эквивалентными электродами. Радиус сферы может быть определен из условия равенства площади поверхности корпуса и эквивалентного электрода или по эмпирической формуле, приведенной в монографии И. С. Гурвича. Соединительные провода конечных размеров разделяются на прямолинейные участки, которые, в свою очередь, также заменяются эквивалентными электродами. Предполагается, что электрические заряды эквивалентных электродов размещены в центрах электродов. Чтобы учесть наличие корпуса аппаратуры ЖАТ осуществляются отражения электрических зарядов эквивалентных электродов в стенках корпуса по известному правилу. Тогда для расчета потенциала поля эквивалентного электрода применима формула для потенциала поля точечного заряда, находящегося в заземленном прямоугольном параллелепипеде,

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left( \frac{1}{r^{(1)}} - \frac{1}{r^{(2)}} + \frac{1}{r^{(3)}} - \frac{1}{r^{(4)}} + \frac{1}{r^{(5)}} - \frac{1}{r^{(6)}} + \frac{1}{r^{(7)}} - \frac{1}{r^{(8)}} \right), \quad (1)$$

где  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная, Ф/м;  $\epsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;  $k, m, n$  – счетные переменные.

Расстояния до зарядов-отражений  $r^{(1)} - r^{(8)}$  вычисляются по следующим соотношениям:

$$\begin{aligned} r^{(1)} &= \sqrt{[x - (2ak + \xi)]^2 + [y - (2bm + \eta)]^2 + [z - (2cn + \zeta)]^2} \\ r^{(2)} &= \sqrt{[x - (2ak + \xi)]^2 + [y - (2bm + \eta)]^2 + [z - (2cn - \zeta)]^2} \\ r^{(3)} &= \sqrt{[x - (2ak + \xi)]^2 + [y - (2bm - \eta)]^2 + [z - (2cn - \zeta)]^2} \\ r^{(4)} &= \sqrt{[x - (2ak + \xi)]^2 + [y - (2bm - \eta)]^2 + [z - (2cn + \zeta)]^2} \\ r^{(5)} &= \sqrt{[x - (2ak - \xi)]^2 + [y - (2bm - \eta)]^2 + [z - (2cn + \zeta)]^2} \\ r^{(7)} &= \sqrt{[x - (2ak - \xi)]^2 + [y - (2bm + \eta)]^2 + [z - (2cn - \zeta)]^2} \\ r^{(6)} &= \sqrt{[x - (2ak - \xi)]^2 + [y - (2bm + \eta)]^2 + [z - (2cn + \zeta)]^2} \\ r^{(8)} &= \sqrt{[x - (2ak - \xi)]^2 + [y - (2bm - \eta)]^2 + [z - (2cn - \zeta)]^2} \end{aligned} \quad (2)$$

где  $x, y, z$  – координаты точки наблюдения, м;  $\xi, \eta, \zeta$  – координаты точки влияния (местоположения точечного заряда), м;  $a, b, c$  – размеры параллелепипеда по соответствующим осям, м.

Для отыскания величин неизвестных зарядов электродов составляется система линейных алгебраических уравнений на основании первой группы формул Максвелла:

$$[\alpha][q] = [\varphi], \quad (3)$$

где  $[\alpha]$  – матрица коэффициентов системы;  $[q]$  – матрица-столбец неизвестных зарядов электродов, Кл;  $[\varphi]$  – матрица-столбец известных потенциалов электродов, В.

Коэффициенты системы (3) (потенциальные коэффициенты) определяются на основе формулы (1). Внедиагональные коэффициенты  $\alpha_{ij}$  связывают потенциал в центре электрода  $i$  с зарядом электрода  $j$ . Диагональные коэффициенты  $\alpha_{ii}$  связывают потенциал электрода  $i$  с зарядом этого же электрода. Чтобы исключить особенность в формуле (1), при определении  $\alpha_{ij}$  потенциал электрода вычисляется в некоторой точке, принадлежащей поверхности электрода, в то время как его заряд по-прежнему предполагается размещенным в центре.

С целью ограничения числа учитываемых отражений, отраженные заряды, координаты которых выходят за пределы некоторой заранее выбранной области, не рассматриваются.

После решения системы уравнений (3) по найденным значениям электрических зарядов эквивалентных электродов может быть вычислена емкость гальванической связи и оценено влияние этих паразитных каналов проникновения помех на уровень ЭМС исследуемого устройства.

Так как при реализации этого метода не требуется дискретизация границ электродинамической системы, то он оказывается проще, нежели любой другой численный метод. Вместе с тем достигается необходимый компромисс между точностью расчета и отображением сложности конструкции реального ТС ЖАТ. Поэтому предлагаемый метод может найти применение для решения задач ЭМС систем обеспечения безопасности движения поездов, где требуется строгое и адекватное решение проблемы ЭМС.

УДК 656.25

## ИМИТАЦИЯ В ПАКЕТЕ PSPICE НЕИСПРАВНОСТЕЙ КОМПОНЕНТОВ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА БЕЗОПАСНОСТЬ

А. А. КОРОЛЕВ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В последнее время микроэлектронные системы стали все чаще применяться в системах управления ответственными технологическими процессами, таких как управление движением поездов, химическое производство, авиационные системы и другие. К таким системам предъявляются дополнительные требования по обеспечению функциональной безопасности, то есть к способности системы не подвергать опасности человеческую жизнь, экономику и окружающую среду при возникновении в ней неисправностей.

Численные показатели функциональной безопасности являются очень малыми величинами. Учитывая относительно небольшое количество таких систем, подтвердить эти показатели статистическими методами практически невозможно. В связи с этим основным способом подтверждения соответствия микроэлектронных систем требованиям функциональной безопасности являются испытания и моделирование поведения системы при отказах элементов. Такой подход регламентирован международными (IEC 61508), европейскими (EN 50126, EN 50129), российскими (ОСТ 32.146, ОСТ 32.41) и белорусскими (РД РБ БЧ 19.055, РД РБ БЧ 19.057) нормативными документами.

В данных нормативных документах определен следующий алгоритм анализа соответствия системы требованиям функциональной безопасности. Определяется перечень учитываемых неисправностей элементов, который формируется на основе соответствующих документов. Каждая неисправность из перечня последовательно вносится в схему, и выполняется анализ поведения системы по следующим критериям:

- нарушение условий безопасности классифицируется как опасный отказ;
- регистрация неисправности и блокировка системы классифицируется как защитный отказ;
- остальные случаи классифицируются как маскируемый отказ, допускающий накопление неисправностей и требующий дальнейшего анализа.

Выполняется расчет вероятности возникновения кратных неисправностей и, в случае если эта вероятность больше допустимой, имитируются кратные неисправности (на практике двукратные неисправности имитируются всегда, трехкратные – только в случае накопления отказов или при возникновении зависимых отказов). Система считается выдержавшей испытания, если не обнаружено ни одного опасного отказа. Как видно из алгоритма, при проведении анализа необходимо вносить различные неисправности в структуру устройства. Имитация неисправностей на реальном устройстве (например, перемычками) затруднительна, так как этот способ очень затратен в виду разрушающего характера испытаний. Поэтому одним из основных способов анализа является компьютерное моделирование в пакетах *Pspice*.

Внесение отказов в схему производится вручную. Это приводит к появлению ряда сложностей и проблем. Большое количество элементов и значительное число видов неисправностей для каждого элемента приводит к тому, что анализ занимает длительное время. Значительная часть работы имеет рутинный характер, что приводит к повышению вероятности человеческой ошибки.

В связи с этим возникает необходимость автоматизации анализа устройств на безопасность. Для решения этой задачи необходимо в первую очередь создать обобщенную методику внесения неисправностей элементов в описание электрической схемы.

Все модели электронных компонентов во входном языке *Pspice* подразделяются на 2 группы: встроенные модели и макромодели. Встроенные модели описаны на поведенческом уровне и не могут быть изменены. На основе таких моделей могут быть созданы отдельные экземпляры электронных компонентов путем задания соответствующих параметров.

Макромодель представляет собой структурное описание компонента в виде связей отдельных элементов, описанных встроенными моделями, либо также представляющих собой макромодели.

Наиболее распространенным на данный момент методом имитации неисправностей компонентов в пакете *Pspice*, не зависящим от типов их моделей, является включение в схему описания нового компонента. Так, например, для имитации обрыва вывода элемента в разрыв цепи этого вывода включается модель резистора, имеющего сопротивление порядка сотен мегаом, а включение модели резистора сопротивлением порядка