

Для дальнейших расчетов принято, что  $U = 6000 \text{ В}$ ,  $\alpha_1 = 9,324 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$ ,  $\alpha_2 = 3,871 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$ .

Амплитудно-частотный спектр импульса на выходе фильтра  $S(\omega)_{\text{вых}}$  рассчитывается по формуле

$$S(\omega)_{\text{вых}} = S(\omega)H(\omega).$$

По приведенной формуле был рассчитан и построен амплитудно-частотный спектр импульса на выходе фильтра.

Анализ этого спектра показал:

- паразитные резонансы в полосе пропускания фильтра отсутствуют;
- полоса частот импульса на выходе снизилась на четыре порядка по сравнению с полосой частот импульса на входе фильтра;
- скорость снижения АЧХ на частоте среза выше, чем у Т-образного фильтра Баттерворта из ранее опубликованной работы;
- полоса частот, в которой энергия помехи снижается до пренебрежимо малого значения фильтра Папаулиса – Фукада и фильтра Баттерворта, одинакова.

Результаты анализа позволяют заключить, что рассматриваемый фильтр Папаулиса – Фукада осуществляет подавление сверхширокополосной импульсной помехи, снижая ее активную полосу частот и, соответственно, энергию помехи. Энергия помехи является параметром, от которого непосредственно зависят последствия воздействия помехи на узлы рецептора помех. При превышении некоторого уровня энергии помехи, определяемого типом элементной базы, происходят отказы и сбои рецептора. Таким образом, снижая энергию помехи, фильтр осуществляет защитные свойства.

Фильтр Папаулиса – Фукада имеет некоторые преимущества перед фильтром Баттерворта, а именно: отсутствие паразитных резонансов и более высокую скорость снижения АЧХ на частоте среза. Но полоса частот, в которой спектр выходного импульса спадает до пренебрежимо малых значений, одинакова у обоих фильтров. По этой характеристике рассматриваемые фильтры не имеют преимуществ один перед другим.

Проектирование схем защиты от сверхширокополосных импульсных помех на основе фильтра Папаулиса – Фукада несколько проще, так как в этом случае применяется простейшая П-образная схема. Ее расчет легко выполняется методом денормирования параметров базового фильтра. В то же время фильтры Баттерворта первоначально разрабатывались как фильтры разделения сигналов. Поэтому приведенные в литературных источниках методы синтеза фильтров Баттерворта сложнее. Они основаны на расчете параметров аппроксимации АЧХ фильтра полиномами Баттерворта.

Отличительной чертой фильтра Папаулиса – Фукада являются ослабленные требования по согласованию нагрузки со схемой фильтра, следовательно, фильтр сохраняет свои свойства в полосе частот импульсных помех.

Поэтому допустимо сделать вывод, что фильтры Папаулиса – Фукада могут найти применение при разработке схем помехоподавления для современных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики и телемеханики. Использование фильтров эффективно для цепей со сравнительно низкочастотными сигналами.

УДК 621.315.2

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ РАСЧЕТА НЕКОАКСИАЛЬНЫХ ЛИНИЙ СВЧ**

*Д. В. КОМНАТНЫЙ, Д. С. КОЛЕСНИК, Д. Ю. СУХАНОВ*

*Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Республика Беларусь*

В современных системах железнодорожной автоматики и телемеханики широкое применение находят СВЧ-сигналы и аппаратура для их обработки. В частности, в СВЧ-диапазоне работают радары систем технического зрения локомотивов, системы передачи управляющей информации на борт высокоскоростного подвижного состава. Указанная аппаратура содержит значительное число линий передачи. Среди них имеются некоаксиальные линии передачи, которые представляют собой две неконцентрические заземленные оболочки в виде круглых цилиндров. Между цилиндрами размещается передающий проводник в виде полосы или сегмента круга. Представляет интерес расчет емкостных

параметров такой линии. Эти параметры вычисляются путем расчета электростатического поля в линии. Предполагается, что электростатическое поле линии является плоскопараллельным.

В докладе предлагается использовать для решения поставленной задачи численный метод эквивалентных электродов. Метод основан на разбиении поверхности электродов на граничные элементы. Электрический заряд граничного элемента принимается постоянным в пределах элемента. Принимается, что потенциал электростатического поля граничного элемента равен потенциалу электростатического поля круглого провода (эквивалентного электрода) с центром, совпадающим с центром граничного элемента. Показано [1], что такое соотношение потенциалов обеспечивается при равенстве периметров граничного элемента и эквивалентного электрода и при равенстве электрических зарядов граничного элемента и эквивалентного электрода.

Линейные плотности электрических зарядов эквивалентных электродов находятся путем решения системы линейных алгебраических уравнений, составленных на основе первой группы формул Максвелла

$$[\alpha][\tau] = [\varphi], \quad (1)$$

где  $[\alpha]$  – квадратная матрица потенциальных коэффициентов,  $[\tau]$  – матрица-столбец линейных плотностей электрических зарядов эквивалентных электродов,  $[\varphi]$  – матрица-столбец заданных потенциалов эквивалентных электродов.

Для составления системы (1) требуются выражения для потенциальных коэффициентов. Так как в конструкции рассматриваемой линии имеются две заземленные цилиндрические оболочки, то потенциальные коэффициенты рационально определять методом инверсии в круге. Тем не менее, наличие двух оболочек крайне затрудняет инверсию в них. Поэтому в докладе предлагается разместить сетку граничных элементов на передающем проводнике и на внутренней оболочке. Наличие внешней оболочки учитывается путем инверсии зарядов эквивалентных электродов в этой оболочке.

Тогда собственные потенциальные коэффициенты эквивалентных электродов получены с использованием известных выражений для координат инверсии заряда [2] и определяются по формуле

$$\alpha_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_a} \left[ \ln\left(\frac{1}{r_e}\right) - \ln \frac{R_0}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \frac{1}{\sqrt{\left(x_i - \frac{R_0^2 x_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}\right)^2 + \left(y_i - \frac{R_0^2 y_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}}\right)^2}} \right], \quad (2)$$

взаимные потенциальные коэффициенты – по формуле

$$\alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_a} \left[ \ln \frac{1}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}} - \ln \frac{R_0}{\sqrt{x_j^2 + y_j^2}} \frac{1}{\sqrt{\left(x_i - \frac{R_0^2 x_j}{\sqrt{x_j^2 + y_j^2}}\right)^2 + \left(y_i - \frac{R_0^2 y_j}{\sqrt{x_j^2 + y_j^2}}\right)^2}} \right], \quad (3)$$

где  $\alpha_{ii}$  – собственный потенциальный коэффициент, м/Ф;  $\alpha_{ij}$  – взаимный потенциальный коэффициент, м/Ф;  $\epsilon_a$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, Ф/м;  $r_e$  – радиус эквивалентного электрода, м;  $x_i, x_j, y_i, y_j$  – координаты эквивалентного электрода номер  $i$  и номер  $j$ , м;  $R_0$  – радиус внешней оболочки, м.

Для проверки предлагаемого метода был осуществлен расчет тестовой модели некоаксиальной линии СВЧ с радиусом внешней оболочки 80 мм, радиусом внутренней оболочки 20 мм и передающим проводником в виде полуокружности радиусом 40 мм. Потенциал передающего проводника был принят 1 В. Формирование системы уравнений (1) с потенциальными коэффициентами (2) и (3) и ее решение осуществлялось в среде MathCAD 2015. Для проверки результатов решения рассчитывался потенциал в контрольной точке на поверхности внутренней оболочки и в контрольной точ-

ке на поверхности проводника. Контрольные точки были выбраны так, чтобы они не совпадали с центрами эквивалентных электродов при любой густоте сетки электродов. Так исключался сбой программы при попытке деления на нуль.

*Результаты тестовых расчетов.*

Ленгмюровские колебания отсутствуют. С ростом густоты сетки рассчитанный потенциал в контрольных точках монотонно приближается к заданному. При 128 эквивалентных электродах потенциал в точке на заземленной внутренней оболочке составил 0,0041 В, а в контрольной точке на передающем проводнике – 0,718 В. Погрешность может быть сокращена при дальнейшем увеличении густоты сетки.

При этом размерность системы линейных алгебраических уравнений была достаточно малой, чтобы не происходило переполнения памяти компьютера или замедления расчета. Следовательно, размещение эквивалентных электродов на внутренней оболочке линии не вызывает затруднений при реализации метода.

Условие равенства нулю потенциала внешней оболочки обеспечивается при инверсии зарядов эквивалентных электродов в этой оболочке автоматически.

Таким образом, по докладу допустимо сделать вывод, что метод инверсии в круге позволяет получить потенциальные коэффициенты для эквивалентных электродов, находящихся внутри заземленной цилиндрической оболочки. Метод эквивалентных электродов позволяет вычислить дискретное распределение линейной плотности электрических зарядов по поверхности передающего проводника. Полученное решение удовлетворяет граничным условиям задачи. Знание линейной плотности заряда позволяет вычислить рабочую емкость передающего проводника по известным соотношениям. При этом метод обеспечивает приемлемую для практики погрешность расчета, не приводит к вычислительным трудностям, прост в реализации.

Поэтому предложенный метод эквивалентных электродов может использоваться для анализа работы и проектировании некоаксиальных линий СВЧ в инженерной практике. В частности, он может найти применение при проектировании СВЧ трактов приемопередатчиков радиооборудования современных систем интервального регулирования и оборудования горочной централизации.

#### Список литературы

- 1 Александров, Г. Н. Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды / Г. Н. Александров. – Л. : Энергоатомиздат, 1989. – 360 с.
- 2 Шимони, К. Теоретическая электротехника / К. Шимони. – М. : Мир, 1964. – 713 с.

УДК 656.259.12

## ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ШУНТОВОГО РЕЖИМА СТАНЦИОННЫХ ТОНАЛЬНЫХ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ

*Д. Д. МЕДВЕДЕВ, С. И. ХОМЕНКО, И. О. ЖИГАЛИН*

*Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

Тональные рельсовые цепи (ТРЦ) в настоящее время являются самыми распространенными устройствами контроля рельсовой линии (КРЛ). Устройства КРЛ обеспечивают информацию о состоянии рельсовой линии в нескольких режимах – нормальном, шунтовом и контрольном.

Для шунтового режима неблагоприятны такие значения параметров рельсовой цепи, при которых остаточное напряжение на входе путевого приемника получается максимальным и шунтирующее воздействие колесных пар ослабевает: минимальное сопротивление рельсов, максимальное сопротивление изоляции и максимальное напряжение источника питания [1, 2].

Количественную оценку работы ТРЦ в шунтовом режиме осуществляют с помощью коэффициента чувствительности  $K_{\text{шн}}$  к нормативному шунту  $R_{\text{шн}}$ . Надежность работы ТРЦ в шунтовом режиме характеризуется абсолютной шунтовой чувствительностью и коэффициентом чувствительности к нормативному поезвному шунту [2].