УДК 621.385

А. Г. ЛИТВИНОВ, П. В. НЕШМОНИН, В. К. ПИРОЖЕНКО, канд. техн. наук

К ЗАДАЧЕ СИНТЕЗА ГРЕБЕНЧАТОЙ ЗАМЕДЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ

Одной из наиболее распространенных в электронике СВЧ является гребенчатая замедляющая система. Анализ ее проводится, как правило, методом «сшивания полей» на границах частичных областей, который позволяет получать результаты с любой точностью. Последняя зависит от числа учитываемых членов ряда. Однако при таких расчетах необходимо сначала задавать геометрические размеры, затем производить расчет характеристик и сравнивать их с требуемой. Чтобы получить хорошее совпадение этих характеристик, приходится неоднократно корректировать задаваемые размеры, каждый раз повторяя расчеты.

Для ускорения расчетов представляется целесообразным решить обратную задачу — задачу синтеза, т. е. по заданным характеристикам определить геометрию системы. Опишем способ определения геометрии гребенчатой замедляющей системы по заданной дисперсионной характеристике.

Исходным, как и в случае прямой задачи, является дисперсионное уравнение гребенчатой замедляющей системы, полученное методом сшивания полей на границах частичных областей. В целях упрощения отработки методики решено было ограничиться приближением одной волны, хотя рассмотренный способ не налагает никаких ограничений на вид дисперсионного уравнения.

Дисперсионное уравнение гребенчатой замедляющей системы в приближении одной волны имеет вид [1]

$$\frac{d}{l}(\gamma h)\,\mathrm{th}\left[\frac{w}{h}(\gamma h)\right]=\left(\frac{\sin\frac{\beta l}{2}}{\frac{\beta l}{2}}\right)^2 kh\,\mathrm{tg}\,kh. \qquad (1)$$

Здесь d — период системы; l — ширина резонатора; h — его высота; w — высота пространства взаимодействия; k — волновое число; β — фазовая постоянная; $\gamma=\sqrt{\beta^2-k^2}$. Данное уравнение получено для бесконечно широкой гребенки. Переход к системе конечной ширины p можно осуществить известным методом [1].

При решении прямой задачи геометрические размеры d, l, h, w заданы. Уравнение (1) определяет связь только между переменными β и k (коэффициентом замедления и длиной волны). Решение уравнения (1) в этом случае затруднений не вызывает. В задаче синтеза исходной является зависимость β от k, но нужно найти четыре, а для ограниченной гребенки — пять параметров этого уравнения, при которых оно опишет требуемую характеристику.

Для реализации данной задачи предлагается выбрать на дисперсионной характеристике соответствующее число точек (для бесконечно широкой системы — четыре, для системы конечной ширины — пять) и для каждой точки из соотношения (1) получить уравнение с конкретными значениями β, k. В результате образуется полная система нелинейных уравнений относительно неизвестных геометрических размеров.

В случае гребенчатой системы, используя дисперсионную характеристику, можно сразу определить ее период, а также ширину. Действительно, коротковолновая граница полосы пропускания определяется набегом фазы на одном периоде системы $\varphi=\pi$. Но $\varphi=\beta d=\frac{2\pi}{\lambda}k_з d$ (2), где λ — длина волны; $k_з$ — коэффициент замедления. Подставляя в (2) значения λ, $k_з$, соответствующие $\varphi=\pi$, находим $d=(\lambda/2k_з)_\pi$ (3). Здесь индекс π означает, что данное отношение вычисляется для значений λ, $k_з$, соответствующих коротковолновой отсечке. Для длинноволновой отсечки гребенки конечной ширины p [1] $p=(\lambda_n/2)_0$ (4), где n — число вариаций поля по ширине системы; индекс «0» означает, что λ соответствует точке характеристики при $k_з=0$.

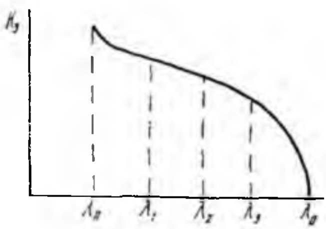
На практике представляет интерес случай $n=1$. Тогда $p=(\lambda/2)_0$ (5).

В результате неопределенными остаются высота резонатора h, ширина l и высота пространства взаимодействия w. Для их нахождения из (1) получаем систему трех уравнений

$$\frac{d}{l}\gamma_m\,\mathrm{th}(w\gamma_m)=\left(\frac{\sin\frac{\beta_m l}{2}}{\frac{\beta_m l}{2}}\right)k_m\,\mathrm{tg}\,k_m h. \qquad (6)$$

где $m = 1, 2, 3$, а значения γ_m, β_m, k_m определяются в трех точках дисперсионной характеристики для значений λ_1, λ_2, λ_3 (рисунок). Система уравнений (6) справедлива во всех точках, если $k_з > 1$. В противном случае соответствующие уравнения системы необходимо записать для быстрых волн.

Алгоритм нахождения геометрических размеров рассматриваемой замедляющей системы в общем виде выглядит следующим образом. Сначала проводится анализ системы: имеет ли она конечную ширину или же бесконечна. В первом случае определяется длинноволновая отсечка и по соотношению (5) находится ширина системы. Затем по дисперсионной характеристике определяются координаты λ_π и соответствующее значение $k_з$ для коротковолновой отсечки (рисунок). По этим данным, используя выражение (3), вычисляется период структуры. На следующем этапе вводятся в программу значения λ_m, $k_{зm}$, $m = 1, 2, 3$ для характерных точек дисперсионной зависимости (рисунок). Выбор значений целесообразно производить для точек, определяющих границы и центральную длину волны рабочей полосы замедляющей системы. Эти данные служат исходными для вычисления волновых чисел k_m, фазовых постоянных β_m, а также поперечных собственных чисел γ_m. После определения значений k_m, β_m, γ_m во всех трех точках на основании (6) формируется система трех трансцендентных уравнений с тремя неизвестными — искомыми геометрическими размерами рассчитываемой замедляющей системы l, h, w.



Для решения системы нелинейных уравнений приемлем ряд итерационных методов, к числу которых относятся методы Ньютона, Стефенсона и другие [2], программы реализации которых входят в математическое обеспечение ЕС. Однако в результате решения тестовой задачи обнаружилось, что подпрограммы SNEN, SNES, реализующие соответственно методы Ньютона и Стефенсона, не дают однозначных результатов. Это объясняется по-видимому тем, что в систему уравнений (6) входят периодические функции и решение ее в связи с этим неоднозначно. Задать ограниченную область поиска корней системы уравнений в подпрограммах SNEN, SNES нельзя. В результате проведенного поиска программ решения систем нелинейных уравнений выбрана подпрограмма NSO1A [3], имеющая ограничения по определению области существования корней. Использование подпрограммы NSO1A дало положительные результаты, что и позволяет рекомендовать ее для решения данной задачи. По окончании решения системы уравнений (6) на печать выводятся значения λ, k в опорных точках, а также найденные геометрические размеры замедляющей системы d, p, l, h, w.

В качестве тестовой задачи было решено произвести расчет гребенчатой замедляющей системы, данные о которой представлены на рис. VII.8,б [1]. Исходные данные для ввода в программу получены из приведенных дисперсионных характеристик Конечными результатами расчета являются геометрические размеры тестовой структуры. Расчет, проведенный по описанной методике, позволил определить геометрические размеры тестовой замедляющей системы, совпадающие с приведенными в работе [1] с погрешностью не более 2 %. Расхождение результатов объясняется погрешностью определения исходных данных по приведенной дисперсионной характеристике, а также использованием дисперсионного уравнения, полученного в приближении одной волны.

Рассмотренная методика расчета геометрии замедляющих систем принципиально не накладывает никаких ограничений на вид дисперсионного уравнения, поэтому возможно повышение точности вычисления геометрических размеров при использовании более высоких приближений в дисперсионном уравнении. Кроме того, предложенный способ определения геометрических размеров замедляющей системы по ее дисперсионной характеристике можно применять при расчете геометрии других типов замедляющих систем.

Список литературы: 1. *Силин Р. А., Сазонов В. П.* Замедляющие системы.— М. : Сов. радио, 1966.— 632 с. 2. *Березин И. С., Жидков Н. П.* Методы вычислений.— М. : Наука, 1966.— Т. 1.— 642 с. 3. *Powel M. J.* A FORTRAN subroutine for solving sistems of nonlinear algebraic equation // Numerical methods for nonlinear algebraic equation. New York.— 1970.— P. 87—161.

Поступила в редколлегию 18.06.86