
УДК 621.372

Ж. Ф. ПАЩЕНКО, канд. техн. наук, *А. И. ТЕРЕЩЕНКО*, д-р техн. наук,
Ю. В. ГУРТОВОЙ

**АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ КАРТИНЫ ТОКОВ,
ТЕКУЩИХ В СТЕНКАХ РЕГУЛЯРНЫХ ВОЛНОВОДОВ И РЕЗОНАТОРОВ**

Ядром системы автоматизированного проектирования является библиотека базовых элементов — совокупность программ, реализующих математические модели устройств СВЧ. В число этих

программ необходимо включать программы визуализации зависимостей параметров устройств СВЧ от их геометрических размеров. В работе [1] предложены принципы построения алгоритмов и программ визуализации зависимостей энергии, мощности потерь, добротности от размеров регулярных резонаторов, в работах [2; 3] показаны картины полей в некоторых типах волноводов. Наряду с этим необходимо иметь и картины токов, текущих в стенках волноводов и резонаторов.

Рассмотрим алгоритм и программу для визуализации картины токов, текущих в стенках регулярных волноводов и резонаторов.

Как известно, поверхностная плотность тока в каждой точке на внутренней стенке волновода или резонатора численно равна напряженности магнитного поля, касательного к рассматриваемой стенке, т. е. $I = |\vec{H}_t|$. При построении алгоритма и программы визуализации картины токов необходимо предусмотреть возможность получения картин распределения абсолютных значений плотностей токов и направлений их протекания. На АЦПУ ЭВМ такую картину можно напечатать, используя символы, которые по своему начертанию напоминают стрелку в том или ином направлении. Направление тока на каждом элементарном участке можно характеризовать углом φ , отсчитываемым от условно выбранного направления, как это показано на рис. 1. Здесь условно выбранное направление совпадает с направлением координатной оси OZ . Угол φ отсчитывается по часовой стрелке. При наличии только продольных токов φ может принимать значения 0 или π . В случае, если в стенках волноводов или резонаторов текут продольные и поперечные токи, φ определяется направлением и длиной векторов поперечных и продольных токов (например, для прямоугольного волновода \vec{I}_x, \vec{I}_y) и он может принимать любые значения от 0 до 2π .

Таким образом, ток в каждой точке стенки будет характеризоваться абсолютным значением поверхностной плотности тока $|\vec{I}|$ и направлением протекания — углом φ .

Для расчета токов, текущих в стенках волноводов и резонаторов с регулярными границами (математическое моделирование), вывод выражений несложен. Например, для прямоугольного волновода, в котором распространяется E -волна, значения токов в стенках

$$\begin{aligned} I_z^B &= D_{E\epsilon\epsilon_0} (n\pi/b) \sin(m\pi x/a) \cos(n\pi) \sin(\beta z - \pi/2); \\ I_z^H &= D_{E\epsilon\epsilon_0} (n\pi/b) \sin(m\pi x/a) \sin(\beta z - \pi/2); \\ I_z^I &= -D_{E\epsilon\epsilon_0} (m\pi/a) \sin(n\pi y/b) \sin(\beta z - \pi/2); \\ I_z^J &= -D_{E\epsilon\epsilon_0} (m\pi/a) \cos(m\pi) \sin(n\pi y/b) \sin(\beta z - \pi/2), \end{aligned} \quad (1)$$

где верхние индексы обозначают стенку волновода (В — верхняя, Н — нижняя, I — левая, J — правая); a, b — поперечные размеры волновода; β — постоянная распространения; D_E — коэффициент, определяемый из условия возбуждения волновода. Множитель

$\sin(\beta z - \pi/1)$ записан вместо часто употребляемого в теории $\exp(-j\beta z)$. Эта замена позволяет избежать работы с комплексными величинами, что существенно упростит программирование.

Определение направлений токов при распространении E -волн сводится к определению угла φ . Так как при E -волнах существуют только продольные токи, угол φ принимает только два значения: 0 или π рад. В выбранной системе отсчета при положительных значениях составляющих тока $I_z^B, I_z^H, I_z^L, I_z^\Pi$ считаем угол φ равным нулю, при отрицательных—равным π .

Если в прямоугольном волноводе распространяется H -волна, выражения для вычисления поверхностных плотностей токов, протекающих в стенках (рис. 1), имеют следующий вид: для верхней стенки

$$I_z^B = D_H \frac{\beta}{\mu\mu_0} \frac{m\pi}{a} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos(n\pi \sin(\beta z));$$

$$I_x^B = -D_H \frac{\pi^2}{\mu\mu_0} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right) \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos(n\pi) \sin(\beta z - \pi/2); \quad (2)$$

для нижней стенки

$$I_z^H = D_H \frac{\beta}{\mu\mu_0} \frac{m\pi}{a} \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \sin(\beta z); \quad (3)$$

$$I_x^H = -D_H \frac{\pi^2}{\mu\mu_0} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right) \cos(\beta z - \pi/2);$$

для левой стенки

$$I_z^L = D_H \frac{\beta}{\mu\mu_0} \frac{n\pi}{b} \sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \sin(\beta z); \quad (4)$$

$$I_y^L = -D_H \frac{\pi^2}{\mu\mu_0} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right) \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \sin(\beta z - \pi/2);$$

для правой стенки

$$I_z^\Pi = D_H \frac{\beta}{\mu\mu_0} \frac{n\pi}{b} \cos(m\pi) \sin\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \sin(\beta z); \quad (5)$$

$$I_y^\Pi = -D_H \frac{\pi^2}{\mu\mu_0} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2}\right) \cos(m\pi) \cos\left(\frac{n\pi}{b} y\right) \sin(\beta z - \pi/2).$$

При определении направления токов необходимо учесть, что в любой точке поверхности стенки волновода ток есть векторная сумма продольного и поперечного токов. Так, для широких стенок $I = \sqrt{I_z^2 + I_x^2}$, для узких $I = \sqrt{I_z^2 + I_y^2}$.

Направление тока в данной точке стенки волновода определяется углом $\varphi = \arccos|\bar{I}_z|/|\bar{I}|$. В зависимости от соотношений продольной \bar{I}_z и поперечной составляющих \bar{I}_x или \bar{I}_y вектор будет попадать в различные области изменения угла φ : $0 - \pi/2$; $\pi/2 - \pi$; $\pi - 3/2\pi$ и т. д. Формулы вычисления φ во всех возможных случаях сведены в табл. 1.

Таблица 1

I_x	$I_z > 0$	$I_z < 0$	$I_z = 0$
$I_x > 0$	$\varphi = \arccos(I_z/I)$	$\varphi = \pi - \arccos(I_z/I)$	$\varphi = \pi/2$
$I_x < 0$	$\varphi = 2\pi - \arccos(I_z/I)$	$\varphi = \pi + \arccos(I_z/I)$	$\varphi = 3\pi/2$
$I_x = 0$	$\varphi = 0$	$\varphi = \pi$	φ не определен

Распределение электрического и магнитного полей в поперечном сечении прямоугольного резонатора идентично распределению полей в сечении прямоугольного волновода. Следовательно, текущие в широких и узких стенках резонатора токи можно рассчитать, например, в случае возбуждения H -колебаний по формулам (2) — (5).

Кроме того, необходимо учесть токи, текущие в торцовых стенках резонатора. Для H -колебаний токи в торцовых стенках рассчитываются так:

$$\begin{aligned}
 I_x^{\Pi} &= D_H (\beta/\mu\mu_0) (n\pi/b) \cos(m\pi x/a) \sin(n\pi y/b); \\
 I_y^{\Pi} &= D_H (\beta/\mu\mu_0) (m\pi/a) \sin(m\pi x/a) \cos(n\pi y/b); \\
 I_x^{\text{З}} &= I_x^{\Pi} \cos(l+1)\pi, \quad I_y^{\text{З}} = I_y^{\Pi} \cos(l+1)\pi,
 \end{aligned} \quad (6)$$

где индексы Π , З обозначают переднюю и заднюю стенки резонатора. Суммарная плотность поверхностного тока равна векторной сумме продольной I_x и поперечной I_y составляющих: $I = \sqrt{I_x^2 + I_y^2}$. Направление протекания этого тока, т. е. угол φ определяется, как и для прямоугольного волновода. За начало отсчета угла φ следует принять ось OX . Формулы для вычисления φ в торцовых стенках прямоугольного резонатора сведены в табл. 2.

Таблица 2

I_x	$I_y > 0$	$I_y < 0$	$I_y = 0$
$I_x > 0$	$\varphi = 2\pi - \arccos \frac{I_x}{I}$	$\varphi = \arccos \frac{I_x}{I}$	$\varphi = 0$
$I_x < 0$	$\varphi = \pi + \arccos \frac{I_x}{I}$	$\varphi = \arccos \frac{I_x}{I}$	$\varphi = \pi$
$I_x = 0$	$\varphi = 3\pi/2$	$\varphi = \pi/2$	φ не определен

Разработанный комплекс программ для расчета и визуализации картин поверхностных токов, текущих в стенах регулярных волноводов и резонаторов, состоит из шести подпрограмм, написанных на языке Фортран и оформленных в виде подпрограмм типа SOUBROUTINE. Имена этих шести подпрограмм следующие: RWR, ROUND W, ROUND R, SUM, КАРТА 1, КАРТА 2. Из раз-

работанного набора подпрограмм можно сформировать два комплекса: для расчета прямоугольного волновода и резонатора, для расчета круглого волновода и резонатора. По своему назначению эти шесть подпрограмм делятся на две основные группы: общего назначения и специализированные.

Подпрограммы общего назначения можно использовать в составе обоих комплексов. К ним относятся подпрограммы вывода на печать результатов в удобном для пользователя виде — КАРТА 1, КАРТА 2, а также подпрограмма SUM, выполняющая векторное сложение при многомодовых режимах работы устройств СВЧ. Модуль КАРТА 1 предназначен для печати карт распределения абсолютных значений токов в виде линий постоянных зна-

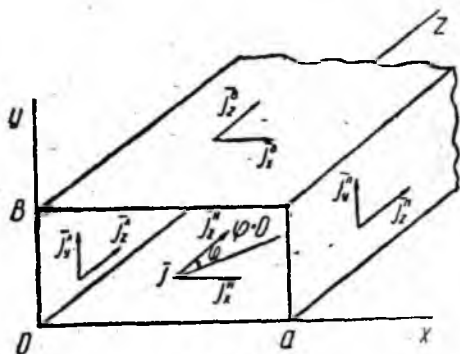


Рис. 1

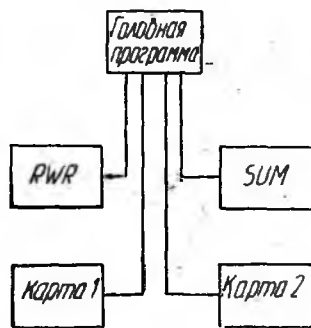


Рис. 2

чений, модуль КАРТА 2 — для печати карт направления токов в стенках устройств СВЧ (волноводов и резонаторов).

К специализированным можно отнести подпрограммы RWR, ROUND W, ROUND R, выполняющие расчет токов и их направлений в стенках регулярных устройств СВЧ и формирующие выходные данные (результаты расчета) в виде, пригодном для использования подпрограммами визуализации КАРТА 1, КАРТА 2. Модуль RWR предназначен для расчета токов I и их направлений (углов φ) в стенках заданного участка прямоугольного волновода и прямоугольного резонатора. Модуль ROUNDW выполняет расчет токов и их направлений в стенках круглого волновода, а модуль ROUND R рассчитывает токи в стенках круглого резонатора.

Структурная схема комплекса подпрограмм для расчета и визуализации картин токов в стенках прямоугольного волновода и резонатора изображена на рис. 2. Она включает в себя следующие модули: RWR, КАРТА 1, КАРТА 2, SUM. Стрелками на рис. 2 показана возможность вызова одного модуля другим. Работа комплекса начинается с вызова модуля RWR из головной программы пользователя. После работы модуля головная программа пользователя формирует фактические параметры для работы других подпрограмм и посредством обращения к ним выполняет поставленную задачу.

Аналогично работает комплекс подпрограмм для расчета и визуализации картины токов в круглом волноводе и резонаторе. Его структурная схема аналогична представленной на рис. 2 и включает модули ROUND R, ROUND W, SUM, КАРТА 1, КАРТА 2.

Одна из разработанных подпрограмм (SUM) показана на рис. 3. Обращение к подпрограмме имеет следующий вид:

CALL SUM (T1, T2, F1, F2, KX, KZ, FIGUR), где T1, T2 — входные массивы значений токов от первой и второй волн; F1, F2 — входные массивы направлений токов от первой и второй волн (входных массивов должно быть столько, сколько волн необходимо учесть в волноводе); KX — число разбиений по широкой или узкой стенке; KZ — число разбиений по длине; FIGUR может принимать текстовые значения 'П' или 'К' типа INTEGR*4, что соответствует построению прямоугольной или круглой карты. Массивы T2, F2 одновременно являются и выходными. В них заносятся суммарные значения токов и направлений результирующего тока.

Разработанный комплекс подпрограмм можно использовать для получения картин токов в стенках регулярных волноводов и резонаторов, работающих в одномодовом и многомодовом режимах. По полученным картинам токов определяют места введения элементов возбуждения нужных типов волн, устанавливают количество распространяющихся волн, их типы, амплитуды.

Полученные картины токов можно использовать в конструкторских разработках волноводных трактов, ответвителей и делителей мощности, измерительной аппаратуры СВЧ и других устройств.

Распечатки картин токов, текущих в стенках регулярных волноводов и резонаторов, будут приведены в последующих публикациях.

Список литературы: 1. Ж. Ф. Пашенко, Г. В. Письменный, А. И. Терещенко. Автоматизированное проектирование систем сильносвязанных резонаторов, содержащих токонесящие элементы. Часть 3. Разработка алгоритма и программ для расчета запасаемой энергии, мощности потерь и добротности регулярных резонаторов // Радиотехника. — 1984. — Вып. 70 —

С. 72—78. 2. Lee C. S., Lee S. W., Chuang S. L. Plot of modal field distribution in rectangular and circular waveguides // IEEE Trans. Microwave Theory and Techn.— 1985.— 33, 3.— P. 271—274. 3. Moller P., Macphie R. H. On the graphical representation of electric field lines in waveguide // IEEE Trans. Microwave Theory and Techn.— 1985.— 33, 3. P. 187—192.

Поступила в редколлегию 24.02.86.

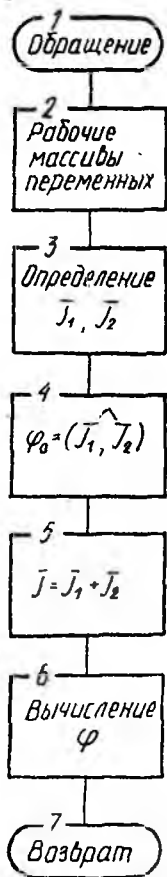


Рис. 3