

## ЧИСЛЕННАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ФЕРРИТОВЫХ ВЕНТИЛЕЙ «СО СМЕЩЕНИЕМ ПОЛЯ»

Л. И. Громова, Е. П. Курушин

Ферритовые вентили «со смещением поля» известны давно [1] и получили широкое распространение в технике СВЧ [2, 3]. Однако их теория основана на рассмотрении самой простой электродинамической модели [2, 4], предполагающей полное заполнение прямоугольного волновода по высоте ферритовой пластиной поглощающим слоем. Обычно рассматриваются только волны типа квази- $H_{n0}$  и задача, по существу, является одномерной [4]. Естественно, что получить полную информацию из анализа такой модели затруднительно, и теория носит только качественный характер. Следующим шагом в приближении данной модели к реальной является учет ширины поглощающего слоя, которая в реальных конструкциях всегда меньше высоты ферритовой пластины и находится экспериментально. В данной работе впервые предложен метод и проведен расчет дисперсионных характеристик прямоугольного волновода, содержащего поглощающую полосу на ферритовом слое, параллельном узкой стенке волновода. Для расчета использована общая теория слоистых гиротропных структур [5-7]. Поперечное сечение рассматриваемого волновода представлено на рис. 1, слой поглотителя шириной  $w < b$  ( $b$  — размер узкой стенки волновода) расположен на пластине симметрично, имеет проводимость  $\sigma$ . Из общих электродинамических соображений следует, что такой слой связывает между собой различные типы волн волновода без поглощающего слоя. В рассматриваемой ситуации, как известно [7], можно в замкнутой аналитической форме получить выражения для матриц парциальных импедансов (или адмитансов) областей справа и слева (рис. 1) от токопроводящей полоски:

$$E_{m\tau}^{\pm} = Z_m^{\pm} [H_{m\tau}^{\pm} n], \quad H_{m\tau}^{\pm} = Y_m^{\pm} [E_{m\tau}^{\pm} n], \quad (1)$$

где  $E_{m\tau}^{\pm}$ ,  $H_{m\tau}^{\pm}$  — амплитуды Фурье касательных составляющих электромагнитных полей при  $y = y_2 \pm 0$ ,  $Z_m^{\pm} = (\hat{U}_m^{\pm})^{-1}$  — матрица импедансов,  $\hat{U}_m^{\pm}$  — матрица адмитансов областей  $y > y_2$  и  $y < y_2$ ,  $n$  — единичный вектор вдоль оси  $y$ . С учетом возникающего в поглощающем слое электрического тока можно записать граничное условие для фурье-составляющих полей при  $y = y_2$ :

$$[n, H_{m\tau}^+ - H_{m\tau}^-] = J_{m\tau}, \quad (2)$$

где  $J_{m\tau} = \sigma E_{m\tau}$  — фурье-составляющая поверхностного электрического тока. Полагая, что толщина поглощающего слоя меньше глубины проникновения поля в материал с проводимостью  $\sigma$ . Подставляя (2) в (1) и переходя, как обычно, от фурье-компонент полей к самим полям, получим векторное уравнение Фредгольма 2-го рода:

$$j_{\tau}(x) = \sigma \int_0^b \|\Gamma(x, x', h)\| j_{\tau}(x') dx', \quad (3)$$

где  $\|\Gamma(x, x', h)\|$  — двумерная тензорная функция Грина, конкретный вид компонент которой приведен в [7].

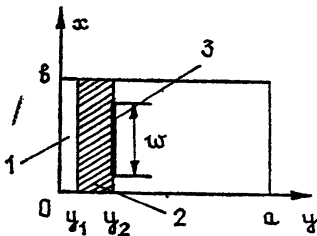


Рис. 1. Поперечное сечение волновода:  
1 — диэлектрический слой, 2 — ферритовая пластина, 3 — поглощающий слой.

Уравнение (3) решалось численно проекционным методом [8]. При этом  $j_{\tau}(x)$  разлагается по некоторому ортонормированному базису, и в результате стандартной процедуры [8] уравнение (3) сводится к системе линейных алгебраических уравнений 2-го рода, условие совместности которой  $\Delta = 0$  ( $\Delta$  — определитель системы) и представляет искомое дисперсионное уравнение рассматриваемого волновода. Для аппроксимации поверхностного тока использовалась та же система базисных функций, что

и в [°]. Порядок определителя  $\Delta$  связан с числом членов  $N_1$  и  $N_2$  в разложениях продольного  $j_z$  и поперечного  $j_x$  токов и равен  $N_1 + N_2$ . Погрешность расчета зависит, кроме того, от числа слагаемых  $M$ , сохраняемых в выражениях компонент тензора  $\Gamma_{ij}(x, x', h)$  ( $i, j=1, 2$ ) [5]. Численно исследовались зависимости постоянных распространения  $h = h' + ih''$  ( $h' = \text{Re } h > 0$ ,  $h'' = \text{Im } h$ ) от частоты и величины постоянного магнитного поля  $H_0$  внутри феррита. Поскольку поглощающий слой связывает между собой разные типы волн волновода без слоя, классификация волн затруднительна. Удобнее всего оказывается проследить за изменением  $h$  в комплексной плоскости при изменении в широких пределах параметров ферритового материала и поглотителя, в том числе и их размеров.

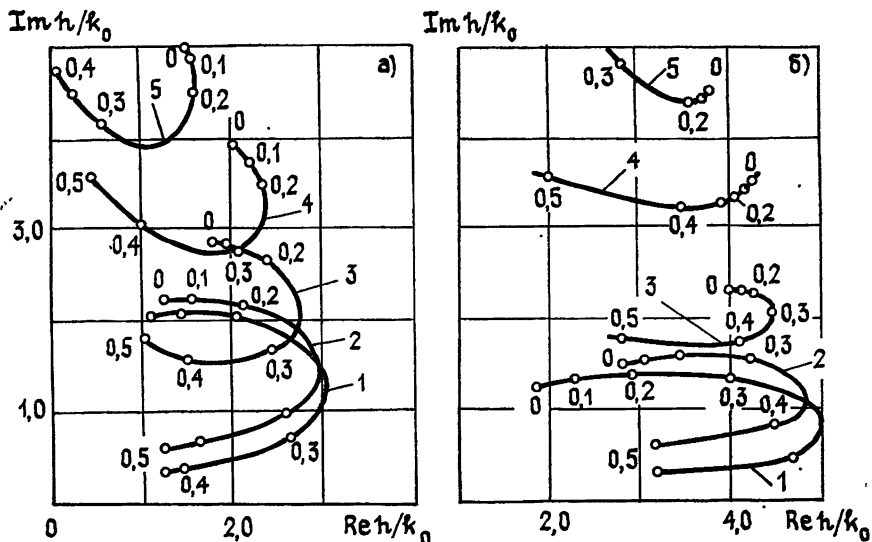


Рис. 2. Значения комплексной постоянной распространения ферритовой поверхностной волны при различных величинах  $\zeta = \omega_0/\omega$  (цифры 0—0,5 у кривых) и различных значениях поверхностного сопротивления.

Кривая 1 —  $R_{\square} = 400 \text{ Ом/см}^2$ , 2 —  $200 \text{ Ом/см}^2$ , 3 —  $80 \text{ Ом/см}^2$ , 4 —  $50 \text{ Ом/см}^2$ , 5 —  $20 \text{ Ом/см}^2$ ,  $k_0 a = \pi$ ,  $y_2 - y_1 = 0,15a$ ,  $\varepsilon = 10$ ,  $A = 0,8$ ,  $k_0 = 2\pi/\lambda$ ,  $\omega/b = 0,6$ , а)  $y_1 = 0,01a$ , б)  $y_1 = 0,03a$ .

Для решения рассматриваемой системы уравнений применен метод Ньютона, в качестве начального приближения взяты значения постоянных распространения  $h$ , полученные для волновода без поглощающего слоя, для которого дисперсионные уравнения имеют замкнутый аналитический вид, и значения  $h$  могут быть найдены с большой степенью точности. На рис. 2 представлены результаты расчета постоянной распространения для волны низшего типа, переходящей в пределе  $\sigma \rightarrow 0$  в ферритовую поверхностную волну (ФПВ) [2, 4]. Для удобства использования результатов на практике вместо  $\sigma$  введена величина поверхностного сопротивления  $R_{\square} = (\sigma t)^{-1}$ ,  $t$  — толщина слоя. Результаты получены для  $N_1 = N_2 = 5$ ,  $M = 25$ .

Известно, что именно ферритовая поверхностная волна определяет величину обратных потерь вентилей «со смещением поля», так как эта волна имеет максимальную величину  $E_z$  на поверхности феррита в области поглощающего слоя [2], при этом  $h'$  и  $h''$  должны быть максимальны. В отсутствие поглощающего слоя  $h'$  достигает максимального значения при  $\mu_{\perp} \approx 0$ ,  $\mu_{\perp} = \mu - \mu_a^2 \mu^{-1}$ ,  $\mu$  и  $\mu_a$  — диагональная и недиагональная компоненты тензора магнитной проницаемости феррита, он выбран в форме Полдера [2]. Значение  $\mu_{\perp} = 0$  достигается при внутреннем постоянном магнитном поле  $H_0$  в феррите и частоте  $\omega$ , соответствующих  $\zeta = \omega_0/\omega = 1 - A$ , где  $\omega_0 = \gamma H_0$ ,  $\gamma$  — гиромагнитное отношение,  $A = \omega_m/\omega$ ,  $\omega_m = 4\pi\gamma M_0$ ,  $4\pi M_0$  — намагниченность феррита.

Максимальное значение  $h'$  обеспечивает кроме того и максимальную амплитуду ФПВ при возбуждении на конце поглощающего слоя [10]. Поэтому представляется целесообразным проследить за линиями  $\mu_{\perp} \approx 0$  в комплексной плоскости в зависимости от  $R_{\square}$ . Эти результаты представлены на рис. 3. Размеры  $y_1$  и  $y_2$  выбирались близкими к наиболее часто встречающимся на практике [14]. На рис. 2 точками обозначены значения параметра  $\zeta$ , а на рис. 3 — значения поверхностного сопротивления  $R_{\square}$ . Отчетливо прослеживается существование оптимального значения величины

$R_{\square}$ , обеспечивающего максимум  $h'$  при достаточно больших значениях  $h''$ . Оно соответствует потерям около 7 дБ/см при выбранных размерах феррита. Этой величиной (без учета потерь на преобразование на конце поглощающего слоя [10]) и определяются габаритные размеры устройства, в частности его длина.

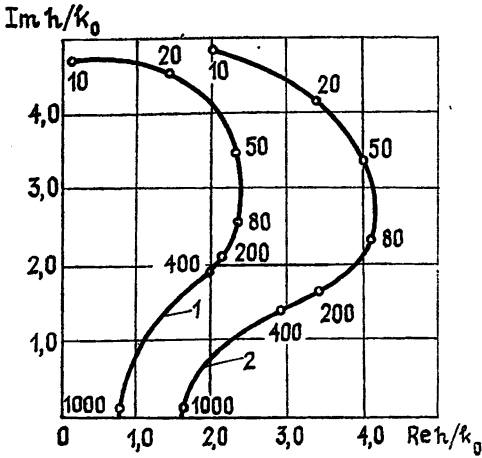


Рис. 3. Значения комплексной постоянной распространения ФПВ при различных величинах поверхностного сопротивления  $R_{\square}$  ( $\text{Ом}/\text{см}^2$ ) при  $\xi=0,2$ . Значения параметров те же, что и на рис. 2.

Кривая 1 —  $y_1 = 0,01a$ , 2 —  $y_1 = 0,03a$ ,  $k_0 a = \pi$ .

Полученные результаты объясняют экспериментально обнаруженный при исследовании вентиляей [2, 3, 11] факт существования оптимальной ширины  $w$  поглощающего слоя и величины поверхностного сопротивления. В таблице приведены данные, полученные при экспериментальном исследовании вентиляей в различных диапазонах, подтверждающие проведенные расчеты.

Т а б л и ц а

$f_0$ , ГГц	6,3	7,5	9,0	9,3	9,8	10,1	13,5	15,0
$a$ , мм	35	28,5	23	23	23	23	14,1	14,1
$b$ , мм	15	12,6	10	10	10	10	8	8
$w/b$	0,65	0,67	0,6	0,6	0,62	0,69	0,71	0,72
$(y_2 - y_1)/a$	0,150	0,142	0,147	0,126	0,13	0,149	0,124	0,13
$R_{\square}$ ( $\text{Ом}/\text{см}^2$ )	100	70—100	100	120—160	160	160—180	180	180—200

Исследования проводились на ферритовых материалах, имеющих величину  $A = 0,8 \pm 1,2$  (меньшее значение соответствует большим рабочим частотам  $f_0$  [11]). При этом параметры вентиляей были примерно одинаковыми: прямые потери  $P_{пр} < 0,5$  дБ, обратные потери  $P_{обр} > 20$  дБ, КСВН  $< 1,1$  в диапазоне частот  $f_0 \pm 5\%$  при длине поглощающего слоя  $L = 1,5 - 1,7 \lambda_0$ ,  $\lambda_0$  — длина волны в свободном пространстве. Оптимальная ширина  $w_0$  поглощающего слоя  $z$  лежит при этом значении  $A$  в пределах  $w_0 = 0,6 \pm 0,8 b$ ; толщина ферритовой пластины  $y_2 - y_1 = 0,12 \pm 0,15 a$ , а величина поверхностного сопротивления  $R_{\square}$  удовлетворяет условию подобия  $f_0 R_{\square}^{-1} = k_1 \Gamma$ ,  $k_1 = 60 \div 80 \text{ МГц} \cdot \text{см}^2 / \text{Ом}$  — постоянная величина.

Следует отметить сильное влияние величины  $y_1$  на вещественную часть постоянной распространения  $h'$  (рис. 2), это самым существенным образом сказывается и на распределении энергии по типам волн при преобразовании на конце поглощающего слоя [10]. В результате численного анализа можно считать наиболее целесообразным значение  $y_1 = 0,04 \pm 0,05 a$ . Полученные соотношения вместе с известными из работ [3, 10] могут быть положены в основу инженерного проектирования ферритовых вентиляей со смещением поля.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Weisbaum S., Seidel H. — BSTJ, 1956, № 7, p. 677.
2. Микаэлян А. Л. Теория и применение ферритов на сверхвысоких частотах. — М.: Госэнергоиздат, 1963. — 663 с.
3. Столяров А. К. — В сб.: Современные проблемы антенно-волноводной техники. — М.: Наука, 1967, с. 158.
4. Столяров А. К., Анапьева В. П. — Вопросы радиоэлектроники. Сер. 12, 1964, вып. 10, с. 57.
5. Курушин Е. П., Неганов В. А. — Радиотехника и электроника, 1980, 25, № 7, с. 1330.
6. Курушин Е. П., Неганов В. А., Нефёдов Е. И. — Изв. вузов — Радиофизика, 1982, 35, № 3, с. 785.
7. Курушин Е. П., Нефёдов Е. И. Электродинамика анизотропных волноводящих структур. — М.: Наука, 1983. — 220 с.
8. Никольский В. В. — Изв. вузов — Радиофизика, 1977, 20, № 1, с. 5.
9. Колотилин А. И., Курушин Е. П., Неганов В. А. — Изв. вузов — Радиофизика, 1982, 25, № 4, с. 474.
10. Громова Л. И., Курушин Е. П. — Радиотехника и электроника, 1968, 13, № 9, с. 1716.
11. Бочкарев А. И., Курушин Е. П., Неганов В. А. Труды учебных институтов связи. — Л.: ЛЭИС, 1981, 102, с. 127.

Куйбышевский государственный  
педагогический институт

Поступила в редакцию  
3 января 1985 г.

---

## ИНСТРУКЦИЯ ПО СОСТАВЛЕНИЮ РЕФЕРАТОВ

1. В реферате кратко излагается основное содержание статьи. Реферат должен дать читателю представление о характере освещаемой работы, оригинальности постановки вопроса, методике проведения исследования и его основных результатов.

2. Реферату должно предшествовать библиографическое описание в следующем виде: название статьи, фамилия и инициалы автора, название журнала, где помещается статья. Текст реферата начинается непосредственно с изложения существа работы без повторения заголовка. Форма изложения материала не обязательно должна повторять форму изложения оригинальной статьи.

3. Если оригинал содержит большое количество цифровых данных, их следует обобщить и систематизировать.

4. Средний объем реферата 1,5—2 страницы машинописного текста, отпечатанного через два интервала на белой писчей бумаге обычного формата (30×21) в двух экземплярах с полем 4 см с левой стороны.

5. Таблицы, схемы, графики и пр. могут быть включены в том случае, если они отражают основное содержание работы или сокращают текст реферата. Сообщение о наличии в реферируемой работе таблиц, схем, графиков, фотографий, карт, рисунков необходимо давать в конце реферата. Например, табл. 2, илл. 10.

6. Формулы приводятся только в том случае, если они необходимы для понимания статьи. Громоздкие математические выражения помещать не следует. Формулы и буквенные обозначения вписываются черными чернилами во второй экземпляр. Вписывание формул и буквенных обозначений, а также исправление замеченных опечаток в первом экземпляре не делается.

7. В конце реферата в квадратных скобках указывается название учреждения или предприятия, в котором автор реферируемой работы (если эти данные приводятся в статье) провел работу. Подпись автора и дату написания реферата следует ставить в левом нижнем углу на обоих экземплярах реферата.

---