

УДК 621.372.54.01

К РАСЧЕТУ ОДНОКОНТУРНОГО ФЕРРИТОВОГО ФИЛЬТРА

В. С. Қиреев, К. Г. Гудков

Дан анализ изложенных в литературе расчетов одноконтурных ферритовых фильтров. Показано, что расхождения между расчетными формулами, полученными разными авторами, являются следствием различного подхода к учету экранирующего действия диафрагмы. Приведен расчет элементов матрицы рассеяния одноконтурного ферритового фильтра.

Расчету характеристик одноконтурных ферритовых фильтров посвящен ряд работ, в которых использованы разные методы. Часть работ относится к расчету фильтров на диафрагмированных коаксиальных линиях или прямоугольных волноводах (рис. 1) [1-4]. Другие работы посвящены расчету фильтров на короткозамкнутых пересекающихся прямоугольных волноводах [4-11].

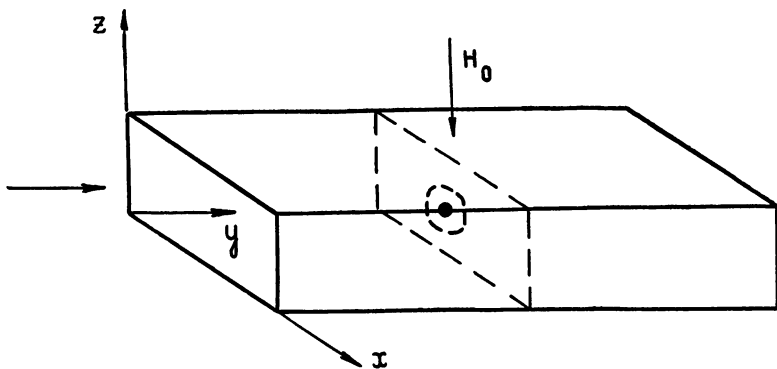


Рис. 1. Схема фильтра на диафрагмированном волноводе.

Расчетные формулы, полученные для обоих типов фильтров в работах [1-11], резко различаются, несмотря на то, что почти все основные допущения, принятые разными авторами, одинаковы.

Настоящая работа ставит перед собой цель выяснить причины этого различия и рассмотреть более строгий путь расчета одноконтурных ферритовых фильтров.

При расчете характеристик фильтра любым из известных методов необходимо определить:

- поле падающей волны в месте расположения ферритовой сферы,
- поле излучения в месте расположения сферы или на некотором расстоянии от нее.

Авторы всех указанных выше работ предполагали, что на сферу действует магнитное поле падающей волны, которое существует около короткозамыкающей стенки волновода. При решении второго вопроса поле излучения считалось таким же, какое имеет магнитный диполь, расположенный около короткозамыкающей стенки.

Авторы работ [7,9-11] считали, что в излучении участвует полный объем ферритовой сферы. Это привело к тому, что рассчитанный модуль коэффициента прохождения при резонансе имел вид

$$D = 4q/(1 + 4q), \quad (1)$$

где q — параметр, характеризующий излучение сферы в линию передачи и определяемый в случае прямоупольного волновода выражением

$$q = 4\pi M_0 v h / 2\Delta H a b. \quad (2)$$

Здесь $4\pi M_0$ — намагнитченность насыщения, v — объем сферы, h — постоянная распространения в волноводе, $2\Delta H$ — ширина полосы ферромагнитного резонанса, a , b — размеры широкой и узкой стенок волноводов.

В работах [1-6] для модуля коэффициента прохождения при резонансе получено выражение

$$D = 2q/(1 + 2q). \quad (3)$$

К этому результату авторы пришли вследствие предположения, что в волновод излучает та часть сферы, которая в нем находится. Поэтому при симметричном расположении сферы относительно плоскости диафрагмы в выражения для полей излучения вместо объема сферы v подставлялся объем половины сферы $v/2$. В ошибочности этого предположения можно убедиться, ознакомившись с работой [6], где сделано то же предположение при выводе выражения (30) для коэффициента передачи (прохождения) при несимметричном расположении сферы относительно плоскости диафрагмы. Из анализа этого выражения следует, что минимум резонансных потерь фильтра может быть получен при некотором смещении феррита относительно отверстия связи в направлении оси волновода. Следовательно, существует необратимость фильтра по затуханию, несмотря на то, что сфера находится в области линейной поляризации магнитного поля СВЧ.

Для подтверждения расчетных формул и правильности введения в расчетные соотношения половины объема сферы в работе [2] сравниваются теоретические и экспериментальные значения коэффициента поглощения κ и ширины полосы фильтра $2\Delta f$ для сферы с $2\Delta H = 110$ а/м и $d = 1,2$ мм. Эти данные приведены в таблице; здесь же для сравнения приведены значения κ и $2\Delta f$, рассчитанные по формулам других работ.

Из таблицы видно, что результаты эксперимента по измерению коэффициента поглощения, приведенные в работе [2], одинаково хорошо согласуются с расчетными формулами как работ [1-6] и [8], так и [7,9-11], где вообще не учитывается экранирующее действие диафрагмы.

Таблица 1

	Теоретические значения			Эксперимент
Работы	[7,9-11]	[1-6]	[8]	[2]
κ	0,39	0,485	0,485	0,42
$2\Delta f$ (МГц)	14,6	9,25	6,55	6,5

Экспериментальная величина $2\Delta f$, полученная в [2], лучше всего согласуется с расчетными формулами работы [8].

Таким образом, эксперимент по измерению коэффициента поглощения и ширины полосы резонансной кривой, результаты которого приведены в [2], не может служить подтверждением правильности полученных в этой работе расчетных соотношений.

В работе авторов настоящей статьи [8] были использованы те же предположения, что и в [7]. Однако для учета влияния диафрагмы на поле падающей волны и поле излучения в формулу (1) перед параметром q был введен коэффициент θ ($\theta < 1$), который по многочисленным измерениям оказался равным 0,25. Таким образом, эмпирическая поправка привела к следующему выражению для модуля коэффициента прохождения:

$$D = q/(1 + q). \quad (4)$$

Следовательно, ни одна из рассмотренных выше работ не дает достаточно строгого и точного расчета характеристик одноконтурных ферритовых фильтров рассматриваемых типов. Это касается и работ, где рассматриваются фильтры, в которых сферы расположены в области круговой поляризации магнитного поля СВЧ [4, 8, 10, 12, 13].

Приведем более строгий расчет характеристик фильтра на диафрагмированном волноводе. Как обычно, будем считать, что сфера является магнитным диполем с моментом Mv , где M — переменная намагниченность. Для решения задачи о возбуждении бесконечного прямоугольного волновода воспользуемся методом Вайнштейна [14]. Поперечная составляющая магнитного поля излучения сферы, находящейся на оси бесконечного волновода, может быть записана в виде

$$H_{n,x} = -j(4\pi v h/ab) M_x. \quad (5)$$

Картина поля магнитного диполя в волноводе изображена на рис. 2. Как следует из рис. 2, тонкая диафрагма с отверстием, проходящая через

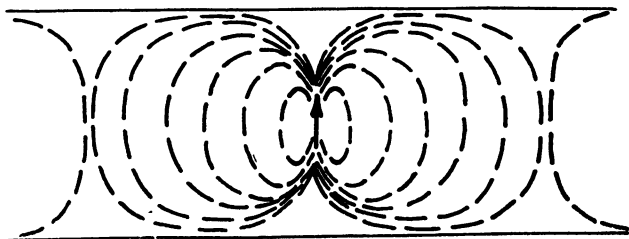


Рис. 2. Зависимость резонансных потерь фильтра от величины q .

1 — формула (1), 2 — формула (3), 3 — формула (8). Измерения проводились на частоте 9,4 ГГц. Диаметры ферритовых сфер лежат в пределах 0,7 ÷ 1,85 мм.
 $2\Delta H = 60 \div 200$ а/м.

центр сферы, не нарушит структуру поля излучения, так как плоскость диафрагмы параллельна магнитным силовым линиям поля излучения. Таким образом, поля излучения сферы в бесконечном волноводе и в одноконтурном фильтре (рис. 1) совпадают при одинаковой переменной намагниченности.

Поле падающей волны, возбуждающее феррит, определим с учетом того, что в центре отверстия, размеры которого много меньше длины волны, амплитуда магнитного поля вдвое меньше амплитуды поля, которое было бы в этом месте у стенки в отсутствие отверстия (см., например, [15]). Следовательно, если на вход фильтра поступает волна с амплитудой H_v , то в центре отверстия амплитуда волны будет также H_v .

При использовании метода самосогласованного поля исходное уравнение может быть записано в виде

$$M_x = \chi(H_{v,x} + H_{n,x}), \quad (6)$$

где χ — диагональный компонент тензора восприимчивости по отношению к внешнему полю. Далее, проводя простые вычисления, получим основные расчетные формулы для параметров одноконтурных ферритовых фильтров. Модули элементов матрицы рассеяния при резонансе могут быть записаны в виде

$$S_{11} = S_{22} = 1/(1 + q); \quad (7)$$

$$S_{12} = S_{21} = q/(1 + q) \quad (S_{12} = S_{21} = D). \quad (8)$$

Ширина полосы резонансной кривой фильтра на уровне 3 дб

$$2\Delta f = \gamma 2\Delta H (1 + q), \quad (9)$$

коэффициент поглощения

$$\kappa = 2q/(1 + 2q)^2. \quad (10)$$

Таким образом, выражения (4) и (8) совпадают. Следовательно, все выражения для параметров фильтра, полученные в работе [8], с учетом эмпирического коэффициента $\theta = 0,25$ совпадают с соответствующими выражениями, полученными путем строгого расчета в данной работе.

На рис. 3 приведены зависимости резонансных потерь фильтра от величины q , построенные в соответствии с выражениями (1), (3) и (8). Крестиками изображены резонансные потери фильтра, экспериментально полученные авторами настоящей статьи.

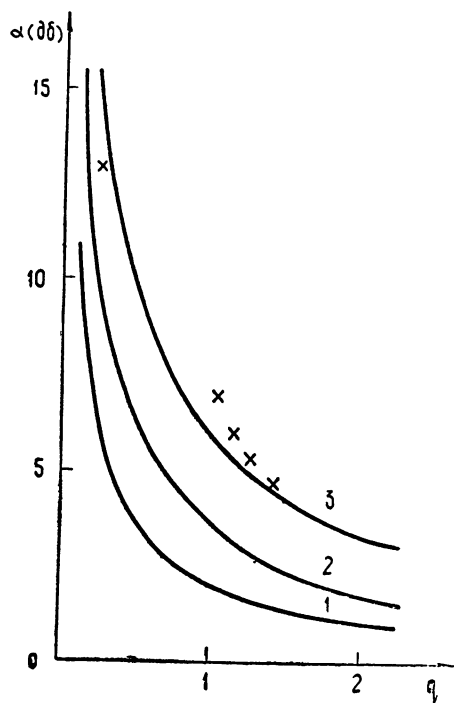


Рис. 3. Поле магнитного диполя в волноводе.

Аналогично могут быть рассчитаны характеристики фильтра на пересекающихся короткозамкнутых волноводах и фильтра с взаимными свойствами, когда ферритовая сфера расположена в области круговой поляризации магнитного поля СВЧ. Отметим, что амплитудные характеристики фильтров на диафрагмированном волноводе и пересекающихся короткозамкнутых волноводах совпадают. В обоих случаях для определения характеристик фильтра можно пользоваться формулами (7) — (10).

Таким образом, при расчете одноконтурных волноводных фильтров необходимо учитывать, что:

- 1) амплитуда поля падающей волны в месте расположения ферритовой сферы должна быть определена с учетом отверстия связи;
- 2) сфера, находящаяся в центре отверстия тонкой диафрагмы, излучает так же, как в бесконечном волноводе.

Полученные в данной работе расчетные формулы для характеристик одноконтурных ферритовых фильтров находятся в хорошем согласии с экспериментом.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Л. Микаэлян, М. М. Коблова, Ю. С. Лифанов, С. И. Данилин, Вопросы радиоэлектроники, сер. 12, Общетеchnическая, вып. 4, 2 (1966).
2. Г. Б. Богданов, А. Г. Черняков, Вопросы радиоэлектроники, сер. 6, Радиоизмерительная техника, вып. 3, 44 (1967)
3. Г. Б. Богданов, А. Г. Черняков, Радиотехника и электроника, 13, № 3, 416 (1967)
4. Г. Б. Богданов, Основы теории и применения ферритов в технике измерений и контроля, изд. Сов. радио, М., 1967
5. А. Л. Микаэлян, М. М. Коблова, Радиотехника и электроника, 7, № 10, 1835 (1962); Вопросы радиоэлектроники, сер. 12, Общетеchnическая, вып. 23, 3 (1962).
6. А. Л. Микаэлян, М. М. Коблова, Вопросы радиоэлектроники, сер. 12, Общетеchnическая, вып. 24, 11 (1963).
7. А. Г. Гуревич, Радиотехника и электроника, 8, № 5, 780 (1963)
8. К. Г. Гудков, В. С. Киреев, Вопросы радиоэлектроники, сер. 6, Радиоизмерительная техника, вып. 3, 100 (1966)
9. В. Г. Калина, Электронная техника, сер. 1, Электроника СВЧ, вып. 8, 168 (1966).
10. В. Г. Калина, Электронная техника, сер. 1, Электроника СВЧ, вып. 1, 123 (1968).
11. В. Г. Калина, Электронная техника, сер. 1, Электроника СВЧ, вып. 3, 68 (1968).
12. Г. Б. Богданов, А. Г. Черняков, Вопросы радиоэлектроники, сер. 6, Радиоизмерительная техника, вып. 1, 14 (1967).
13. Г. Б. Богданов, В. Е. Ведриган, Вопросы радиоэлектроники, сер. 6, Радиоизмерительная техника, вып. 1, 80 (1967)
14. Л. А. Вайнштейн, Электромагнитные волны, изд. Сов. радио, М., 1957.
15. H. A. Wheller, IEEE Trans. On Microw. Theory and Techn., MTT-12, № 2, 231 (1964).

Поступила в редакцию
3 мая 1971 г.,
после доработки
12 мая 1972 г.

CALCULATION OF A SINGLE-CIRCUIT FERRITE FILTER

V. S. Kireev, K. G. Gudkov

The analysis is given of the calculations of single-circuit ferrite filters given in the literature. It is shown that the differences between calculated formulas obtained by different authors are the result of different approaches of taking into account the shielding effect of the diaphragm. The calculation of the scattering matrix elements of a single-circuit ferrite filter is given.
