

Б.В. Прокофьев, М.А. Мартыненко
ФГУП "Научно Производственное Предприятие "ТОРИЙ"

Компактные волноводные трансформаторы сопротивлений

Исследованы и описаны возможные варианты построения компактных волноводных трансформаторов сопротивлений, предназначенных для использования в электровакуумных приборах СВЧ. Исследование выполнено на основе методов вычислительного эксперимента с применением программы H-WINDOW.

Ключевые слова: волноводный трансформатор сопротивлений, электровакуумный СВЧ прибор, ввод-вывод энергии, волноводный СВЧ-тракт.

Для согласования волноводных трактов различных сечений используют различные типы волноводных трансформаторов сопротивлений. Так, при небольших перепадах волновых сопротивлений часто применяют простейшие плавные клиновидные или пирамидальные переходы. Однако качество согласования плавного перехода сильно зависит от его длины. Если перепад волновых сопротивлений оказывается больше $1,5 \div 2,0$, то для получения согласования с коэффициентом отражения $|S_{11}|$ порядка 0,01 имеет смысл использовать ступенчатые трансформаторы сопротивлений. Классические волноводные трансформаторы сопротивлений в виде последовательности четвертьволновых ступенек описаны в специальной научно-технической и справочной литературе [1,2]. Ниже рассмотрены некоторые нестандартные конструкции ступенчатых волноводов, которые, в частности, можно рекомендовать для применения в устройствах ввода-вывода энергии некоторых видов электровакуумных приборов СВЧ, а также в измерительных волноводных трактах. Эти переходы отличаются крайне малыми габаритами, высоким качеством согласования и широкой полосой пропускания.

Исследование волноводных трансформаторов сопротивлений проводилось путем расчета их характеристик после проведения оптимизации размеров с помощью программы H-WINDOW, алгоритм которой описан в работе [3]. При оптимизации волноводных трансформаторов сопротивлений с применением метода симплексов Нелдера-Мида [4] использовалась одна из двух функций цели, приведенных в работе [5], одна из которых позволяет получить характеристику согласования, близкую к максимально плоской, а вторая – характеристику чебышевского типа. Типичные времена оптимизации одного варианта конструкции составляют $1 \div 3$ мин при числе переменных оптимизации $N \leq 16$.

Простейшим трансформатором сопротивлений является, как известно, одноступенчатый переход. Длина ступеньки в нем примерно равна четверти волноводной длины волны, а поперечные размеры ступеньки выбирают такими, чтобы ее волновое сопротивление $Z_{ст}$ удовлетворяло условию:

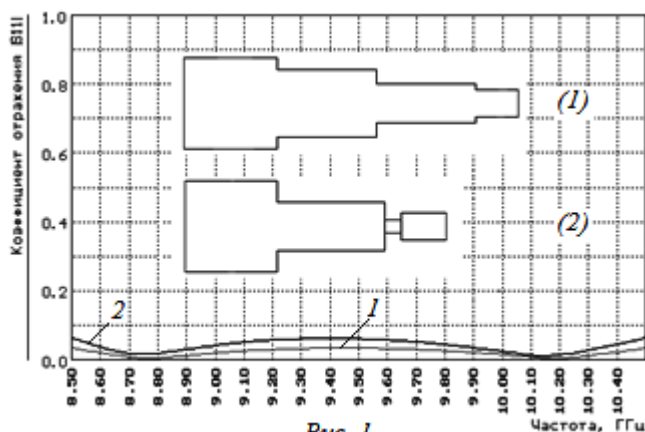
$$Z_{ст} = \sqrt{Z_1 Z_2},$$

где Z_1, Z_2 – волновые сопротивления передающих линий слева и справа от ступеньки.

Полоса пропускания одноступенчатого перехода зависит от соотношения величин Z_1, Z_2 . Согласование, близкое к идеальному, получается только на одной частоте, вне которой коэффициент отражения монотонно возрастает. Переходы с такой характеристикой

согласования используют для передачи мощности СВЧ на фиксированной частоте или в узкой полосе частот, обычно не превышающей нескольких процентов. Полосу пропускания перехода в Е-плоскости с одной согласующей ступенькой можно увеличить, превратив этот переход в неоднородный и сделав ширину ступеньки большей ширины входного и выходного волноводов [2]. При этом существует ширина ступеньки, при которой полоса пропускания получается максимальной. Достижимый эффект увеличения полосы пропускания объясняется уменьшением дисперсии волны в волноводной ступеньке, а существование оптимальной ширины ступеньки – тем, что дальнейшее увеличение ширины приводит к росту отражений на стыках ступеньки с входным и выходным волноводами. Эффект уменьшения волноводной длины волны H_{10} в прямоугольных волноводах при увеличении их ширины может быть использован и для сокращения продольных размеров трансформаторов сопротивления.

Общепринятый способ расширения полосы пропускания трансформаторов сопротивлений состоит в наращивании числа ступенек, длина которых примерно равна четверти волноводной длины волны. При этом сами волноводные трансформаторы сопротивлений порой определяют именно как последовательность четвертьволновых отрезков линии передачи, волновое сопротивление которых меняется по определенному закону [1]. Следствием подобного подхода к конструированию трансформаторов сопротивлений является неоправданно большая длина таких устройств из-за большого числа ступенек в тех случаях, когда требуется получить согласование в широкой полосе частот.



Между тем размеры переходов можно значительно сократить, если использовать комбинацию ступенек и диафрагм. Так, характеристику согласования, подобную характеристике двухступенчатого трансформатора, можно получить, заменив одну из ступенек резонансной диафрагмой. На рис. 1 представлены зависимости коэффициента отражения от частоты для однородного двухступенчатого трансформатора сопротивлений (1) и трансформатора, состоящего из одной ступеньки с диафрагмой (2). При несколько худшем качестве согласования длина такого перехода оказывается заметно меньше, чем у двухступенчатого перехода.

Для расширения полосы пропускания к описанному выше однородному трансформатору можно добавить еще одну ступеньку [6]. Оказалось, что если сделать такой трансформатор неоднородным, применив в нем ступеньки увеличенной ширины, то получается очень компактный переход, длина которого оказывается в 3-4 раза меньше длины классического четвертьволнового перехода с аналогичными характеристиками согласования. Так, неоднородный трансформатор, представленный на рис. 2, состоит всего из двух ступенек и диафрагмы и имеет длину всего около 27 мм при коэффициенте отражения $|S_{11}| \leq 0,02$ в полосе частот около 50%. Переход имеет следующие размеры ступенек:

$a_1 \times b_1 \times L_1 = 48,5 \times 19,4 \times 14,2 \text{ мм}^3$ (первая ступенька); $a_2 \times b_2 \times L_2 = 44,1 \times 13,5 \times 10,1 \text{ мм}^3$ (вторая ступенька); $a_3 \times b_3 \times L_3 = 34,2 \times 9,6 \times 2,5 \text{ мм}^3$ (диафрагма). Размеры сечений выходного и входного волноводов составляют соответственно: $a_0 \times b_0 = 40 \times 20 \text{ мм}^2$ и $a_4 \times b_4 = 40 \times 10 \text{ мм}^2$.

Отметим, что классический четвертьволновый трансформатор с близкой характеристикой коэффициента отражения должен иметь шесть ступенек при общей длине около 109 мм. Ступеньки этого трансформатора имеют следующие размеры:

$40 \times 19,34 \times 18,04 \text{ мм}^3$; $40 \times 17,69 \times 18,41 \text{ мм}^3$;

$40 \times 15,41 \times 18,49 \text{ мм}^3$; $40 \times 13,13 \times 18,35 \text{ мм}^3$;

$40 \times 11,39 \times 18,08 \text{ мм}^3$; $40 \times 10,37 \times 17,28 \text{ мм}^3$.

Сравнение характеристик согласования трансформатора из двух ступенек с диафрагмой (кривая 1) и трансформатора на основе четвертьволновых ступенек (кривая 2) приведено на рис. 3. Как следует из графика, найденная конструкция волноводного трансформатора благодаря применению ступенек с малой дисперсией имеет и лучшую характеристику согласования вблизи частоты отсечки входного и выходного волноводов. Однородный трансформатор Дж. Л. Маттея [7], состоящий из трех ступенек и трех емкостных диафрагм, при том же качестве согласования имеет полосу пропускания около 37% и длину, примерно равную 38 мм.

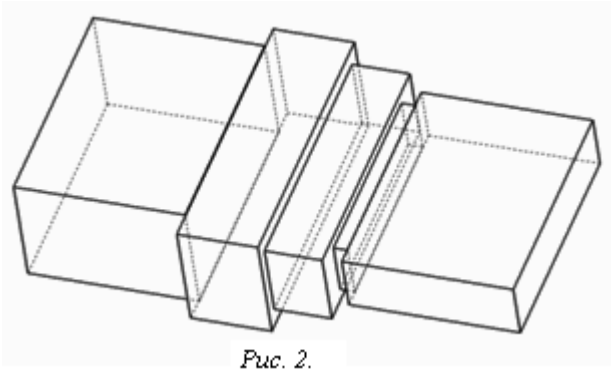


Рис. 2.

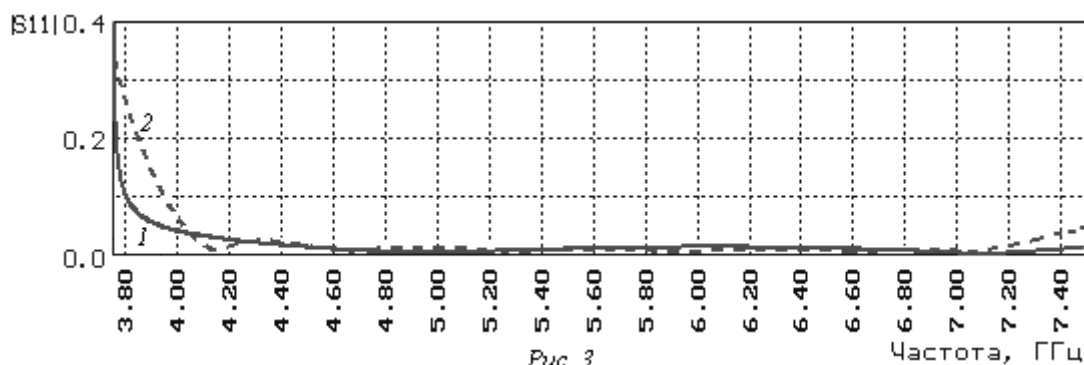


Рис. 3.

Согласующая резонансная диафрагма не всегда должна находиться на стыке с выходным волноводом меньшего сечения. Так, для перехода с сечения $23 \times 10 \text{ мм}^2$ на сечение $20 \times 5 \text{ мм}^2$ (рис. 6.6) оптимальным оказалось расположение диафрагмы на стыке двух ступенек: $a_1 \times b_1 \times L_1 = 24,60 \times 8,1 \times 8,7 \text{ мм}^3$ (первая ступенька); $a_2 \times b_2 \times L_2 = 18,6 \times 4,4 \times 1,5 \text{ мм}^3$ (диафрагма); $a_3 \times b_3 \times L_3 = 20,6 \times 5,5 \times 9,00 \text{ мм}^3$ (вторая ступенька). Рассчитанный коэффициент отражения для такого перехода имеет максимальное значение $|S_{11}|_{\text{макс}} \leq 0,02$ в полосе частот $8,35 \div 10,9 \text{ ГГц}$. Общая длина этого перехода составляет всего 19,2 мм. Между тем коэффициент отражения плавного перехода длиной 40 мм с линейной зависимостью поперечных размеров волновода от продольной координаты в той же полосе частот оказывается в 3 раза большим. Следует подчеркнуть, что широкополосность рассмотренных трансформаторов в значительной степени является следствием именно резкого уменьшения их длины путем принятия описанных мер, которые позволили уменьшить зависимость электрической длины ступенек от частоты.

Рассмотрим еще один практически важный случай, когда размер широкой стенки входного волновода меньше размера широкой стенки выходного волновода, а размер узкой стенки входного волновода превышает размер узкой стенки выходного волновода. Используя описанный подход, оказывается возможным отказаться от громоздких решений, основанных на каскадном включении двух переходов с последовательным изменением сначала одного, а затем другого размера. Простая конструкция из двух ступенек с диафрагмой применима и к этому случаю (рис. 4). Например, оптимальные размеры перехода для входного волновода сечением 48×24 мм² и выходного волновода 58×14 мм² составили: $a_1 \times b_1 \times L_1 = 55,34 \times 24,10 \times 19,93$ мм³ (первая ступенька); $a_2 \times b_2 \times L_2 = 67,83 \times 18,31 \times 13,68$ мм³ (вторая ступенька); $a_3 \times b_3 \times L_3 = 44,32 \times 11,77 \times 3,00$ мм³ (диафрагма). Общая длина L перехода равна всего 36,6 мм при ширине полосы пропускания около 40% по уровню коэффициента отражения $|S_{11}| \leq 0,02$ (рис. 5). Другие конструкции переходов, в том числе, решающие эту задачу путем увеличения на каждом стыке одного из поперечных размеров и уменьшения

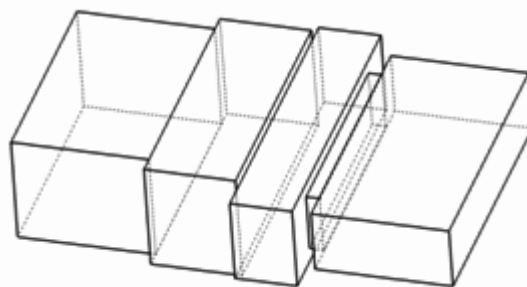


Рис. 4.

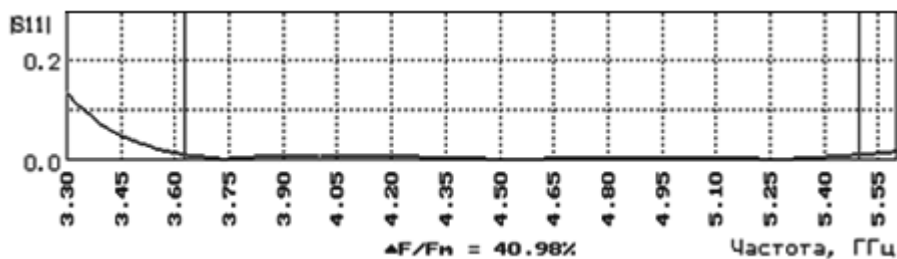


Рис. 5.

другого, оказываются более узкополосными и/или требуют использования большего числа ступенек. На рассмотренном примере можно убедиться и в том, что и при разной ширине входного и выходного волноводов использование ступенек увеличенной ширины также обеспечивает значительный выигрыш как в длине перехода, так и в ширине его полосы пропускания.

В приведенных выше примерах отношение сопротивлений согласуемых волноводов не превышает двух, хотя при необходимости получения согласования в более узкой полосе это отношение может быть увеличено. Если требуется получить высокое качество согласования в широкой полосе частот при больших отношениях сопротивлений по обе стороны трансформатора, то описанные методики согласования можно усовершенствовать, включив дополнительные ступеньки, согласованные емкостными диафрагмами в промежуток между первой и последней ступеньками в схеме перехода, представленной на рис. 2. В схеме такого трансформатора, показанной на рис. 6, выходной и входной волноводы имеют размеры 40×20 мм и 40×5 мм. Ступеньки и диафрагмы имеют следующие размеры: $a_1 \times b_1 \times L_1 = 52,46 \times 18,75 \times 15,41$ мм³; $a_2 \times b_2 \times L_2 = 45,14 \times 8,07 \times 1,00$ мм³; $a_3 \times b_3 \times L_3 = 45,14 \times 14,19 \times 6,79$ мм³; $a_4 \times b_4 \times L_4 = 38,11 \times 3,89 \times 1,00$ мм³; $a_5 \times b_5 \times L_5 = 38,11 \times 6,88 \times 8,50$ мм³; $a_6 \times b_6 \times L_6 = 33,70 \times 3,98 \times 1,00$ мм³. Общая длина трансформатора, таким образом, составляет 33,7 мм. При этом его коэффициент отражения $|S_{11}|$ не превышает 0,01 в полосе частот

4,6÷7,3 ГГц (45%) и, следовательно, трансформатор с запасом перекрывает рабочую полосу частот стандартного волновода сечением 40×20 мм². Эквивалентные по величине коэффициента отражения и полосе частот классические трансформаторы сопротивлений должны иметь не менее пяти четвертьволновых ступенек при общей длине около 76 мм.

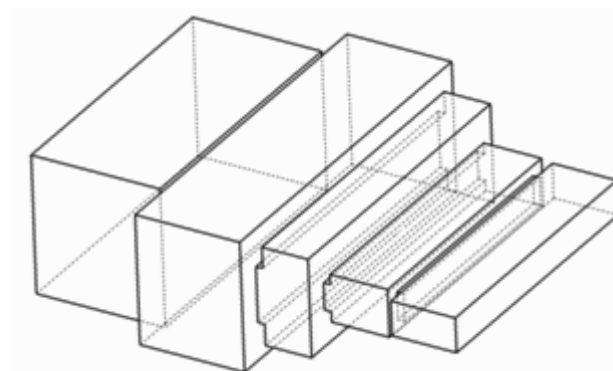


Рис. 6.

Таким образом, с помощью вычислительного эксперимента найдены конструкции самых коротких широкополосных волноводных трансформаторов сопротивлений из числа известных к настоящему времени. Подобные трансформаторы наиболее эффективны в дециметровом диапазоне длин волн, в котором четвертьволновые и плавные трансформаторы оказываются слишком громоздкими и неудобными в работе, а также во всех случаях, когда размеры и вес этих устройств принципиально важны для разработчиков волноводных трактов.

Библиографический список

1. Фельдштейн, А. П. Справочник по элементам волноводной техники / А.П. Фельдштейн, Явич Л. Р., Смирнов В. П. – М.: Советское радио, 1967.
2. Matthaei, G. L. Microwave filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures / G. L. Matthaei, L. Young, E. M. T. Jones. – Dedham, MA: Artech House, 1980.
3. Прокофьев, Б. В. Расчёт матриц рассеяния баночных окон сложной конфигурации для волноводных вводов (выводов) энергии ЭВП СВЧ / Б. В. Прокофьев // Электронная техника. – Сер.1. Электроника СВЧ. – 1991. – Вып.3(437). – С. 4-9.
4. Банди, Б. Методы оптимизации / Б. Банди. – М.: Радио и связь. – 1988.
5. Иванов, В. Н. Расчет и конструирование волноводного окна для пучково-плазменного прибора СВЧ / В. Н. Иванов, Б. В. Прокофьев // Высоковольтная вакуумно-плазменная электроника. Сб. научных трудов / Отв. ред. В.И.Переводчиков. – М.: ФГУП ВЭИ. – 2008. – С. 155-158.
6. Пат. 4041420 США, МКИ H01p 5/08, Кл. США 333/35. / Shunted Stepped Waveguide Transition / H. J. Riblet ; заявлено 30.06.76 ; опубл. 09.08.77.
7. Matthaei, G. L. Tables of Chebyshev Impedance-Transforming Networks of Low-Pass Filter Form / G. L. Matthaei //Proc. of the IEEE. – Vol.52. No.8. – August 1964. – P. 939-963.