

Методика проектирования волноводных фильтров с параллельными индуктивными связями резонаторов для выходных каскадов мощных СВЧ усилителей

Аболдуев И. М., Аверкин А. С., Зубков А. М., Миннебаев В. М., Макеев А. М.

Рассмотрены физические принципы работы полосно-пропускающих волноводных фильтров с металлическими мембранами, расположенными в плоскости симметрии прямоугольного волновода перпендикулярно его широким стенкам. Приведена методика проектирования, спроектирован и реализован фильтр с двухпроцентной полосой пропускания в десятигигагерцовом диапазоне.

Введение

СВЧ усилители с выходной мощностью более 100 Вт часто должны иметь волноводный выход для сопряжения с антеннами радиолокационных, навигационных и связных станций. При этом могут предъявляться весьма высокие требования к форме амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) усилителя. Это, во-первых, малая рабочая полоса (менее 2%), во-вторых, высокие требования к подавлению паразитных сигналов в полосе заграждения (более 60 дБ). Удовлетворить этим требованиям помогает использование полосно-пропускающего фильтра (ППФ). Как правило, фильтр устанавливается на выходе СВЧ усилителя мощности, поэтому наряду с требованиями минимальных потерь в полосе пропускания необходимо удовлетворить требованиям его работоспособности при высоких уровнях проходящей мощности. В наибольшей степени всему комплексу технических требований удовлетворяют ППФ на волноводных резонаторах. Это объясняется высокой добротностью волноводных резонаторов и высокой электрической прочностью волноводных линий передачи. Данная работа посвящена проектированию волноводных фильтров с полосой пропускания 200 МГц в трёхсантиметровом диапазоне (ширина полосы составляет примерно 2% от центральной частоты ППФ).

1. Проектирование волноводного ППФ

На основании изучения литературных данных и исходя из требований к технологичности изготовления, выбран тип конструкции ППФ на полуволновых резонаторах с индуктивными связями, обеспечиваемыми металлическими мембранами, помещаемыми вдоль середины волновода (рис. 1).

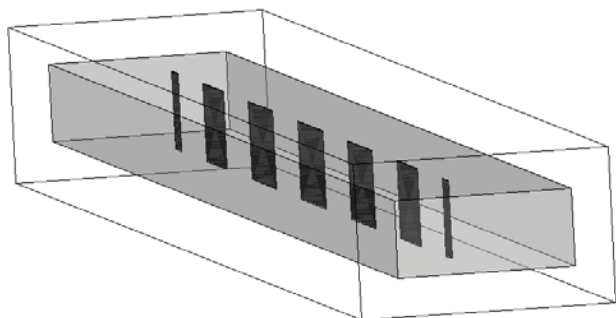


Рис. 1

Выбранный тип волноводного фильтра

Эквивалентная схема ППФ представлена на рис. 2.

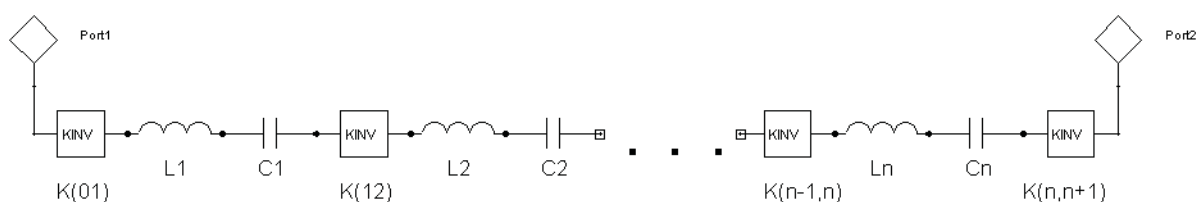


Рис. 2

Принципиальная электрическая схема ППФ

Последовательные L-C цепи реализуются как закороченные на конце полуволновые резонаторы. Тогда на центральной частоте ППФ ω_0 реактивные сопротивления [1-стр.183]:

$$X_0 = \omega_0 L = 1 / \omega_0 C = \frac{\pi Z_0}{2} \cdot \left(\frac{\lambda_{g0}}{\lambda_0} \right)^2, \quad (1)$$

где Z_0 - волновое сопротивление волновода на центральной частоте ППФ, λ_0 - длина волны в свободном пространстве на центральной частоте ППФ, λ_{g0} - длина волны в волноводе на центральной частоте ППФ.

Как показал анализ, эквивалентная схема расположенной посередине волновода мембраны представляет собой заземлённую индуктивность, помещённую между двумя отрезками волновода. Это соответствует одному из возможных вариантов практической реализации инверторов импедансов (K-инверторов на эквивалентной схеме рис. 2) [1-стр. 371]. Зная количество резонаторов в ППФ, требуемые величины K_{ij} для эквивалентной схемы рис. 2 можно рассчитать по заданным параметрам ППФ, используя формулы, приведённые в [1-стр. 367]. К сожалению, отсутствуют простые аналитические выражения, связывающие параметры эквивалентной схемы K-инвертора с размерами мембраны. Для нахождения этой связи необходимо использовать программы для ЭВМ, решающие задачу о распространении электромагнитных волн в волноводе при наличии мембран.

Требуемое для реализации ППФ с заданными параметрами количество резонаторов рассчитывается по формуле [2]:

$$n \geq \frac{\text{arch} \sqrt{\frac{10^{0.1A_z} - 1}{10^{0.1A_n} - 1}}}{\text{arch} \left[\frac{\text{Sin}(\pi \cdot \Delta f_z / f_0)}{\text{Sin}(\pi \cdot \Delta f_n / f_0)} \right]}. \quad (2)$$

Здесь A_z и A_n – вносимые фильтром потери в дБ на границе полосы заграждения и в полосе пропускания соответственно; Δf_n и Δf_z – ширины полос пропускания и заграждения; f_0 – центральная частота ППФ.

Практически после выбора по формуле (2) требуемого количества резонаторов для предварительного синтеза ППФ использовалась доступная в Интернете программа WAVEGUIDE FILTER TOOL фирмы Guided Wave Technology (Дания) [3]. Программа работает, используя разложения в ряды Фурье электрического и магнитного полей в волноводе, и осуществляет поиск коэффициентов для членов ряда Фурье таким образом, чтобы напряжённости полей удовлетворяли заданным начальным и граничным условиям.

Существует компромисс между числом учитываемых членов ряда и точностью расчёта. Разработчики программы называют члены разложения «модами» и соответственно метод расчёта – mode matching method (метод согласования мод). Используемая программа учитывает 13 мод, считает довольно быстро, позволяя проводить оптимизацию. Однако точность расчета не гарантируется. Поэтому окончательная корректировка размеров мембран фильтра и расстояний между мембранами производилась с помощью программы трёхмерного электромагнитного моделирования СВЧ узлов HFSS фирмы Ansoft (США) [4].

2. Результаты проектирования волноводного ППФ

Проектировался шестирезонаторный фильтр в трёхсантиметровом диапазоне частот. Заданная полоса пропускания $\Delta f_n = 200$ МГц. Использовался стандартный волновод с поперечными размерами 23 мм x 10 мм. Длина волны в волноводе на центральной частоте ППФ $\lambda_{g0} \approx 40$ мм.

Как и следовало ожидать, расстояния между соседними мембранами в волноводе оказались существенно меньше половины длины волны (14,6-14,7 мм). Недостающие отрезки волновода входят в эквивалентные схемы мембран с учётом К-инверторов [1-стр. 383]. Из технологических соображений выбрана толщина мембран, равная 50 мкм. Длины мембран, расположенных между соседними резонаторами, находятся в пределах 11,7-14,25 мм.

Расчитанные и измеренные АЧХ одного из фильтров с 6 резонаторами показаны на рис. 3.

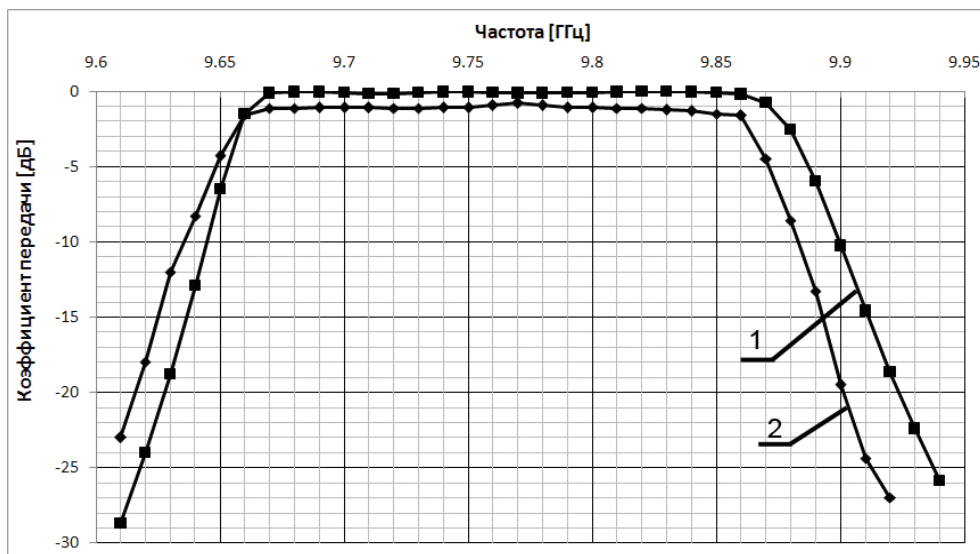


Рис. 3

АЧХ шестизвенного волноводного фильтра: 1 - расчёт, 2 - эксперимент

Как видно из рисунка, вносимые потери экспериментального фильтра в полосе пропускания примерно на 0,5 дБ выше расчётных значений (экспериментальная АЧХ измерена вместе с коаксиально-волноводными переходами, вносящими свои 0,5 дБ потерь). Ширина полосы пропускания экспериментального фильтра несколько ниже величины, полученной расчётным путём (по уровню -1 дБ - 202 МГц против расчётного значения 208 МГц). Полоса заграждения также уже: по уровню -20 дБ на 6 МГц. Центральная частота полосы пропускания экспериментального ППФ на 5 МГц ниже расчётной. Частотные отличия АЧХ экспериментального ППФ от результатов

моделирования не превышают 0,06% от центральной частоты и их можно объяснить некоторым уходом размеров волновода и мембран, возникшим при изготовлении ППФ. В таблицах 1 и 2 показано влияние этих размеров на характеристики фильтров, полученное путём моделирования работы фильтра с помощью программы HFSS.

Таблица 1

Влияние изменения размеров волновода на характеристики ППФ

Ширина волновода А (мм)	Высота волновода В (мм)	f_0 (ГГц)	Сдвиг частоты f_0 (МГц)	Полоса пропускания (МГц)
22.8	10	9.8365	+61.5	201
22.9	10	9.802	+27	204
23	10	9.775	0	210
23.1	10	9.7515	-23.5	211
23.2	10	9.7265	-48.8	215

Таблица 2

Влияние отклонений размеров мембраны на характеристики ППФ

Изменение длины всех перемычек мембраны фильтра (мм)	Изменение длины всех окон мембраны фильтра (мм)	f_0 (ГГц)	Сдвиг частоты f_0 (МГц)	Полоса пропускания (МГц)
-0,2	+0,2	9,733	-42	208
-0,1	+0,1	9,755	-20	210
-0,02	+0,02	9,7705	-4,5	207
0	0	9,775	0	210
+0,02	-0,02	9.78	5	208
+0,1	-0,1	9.7995	24	207
+0,2	-0,2	9.825	50	206

В таблице 1 не приведены изменения высоты волновода, поскольку её влияние на изменение параметров ППФ существенно слабее, чем ширины.

Из таблиц видно, что предъявляются весьма жесткие требования к точности соблюдения заданных размеров при изготовлении как волновода, так и мембран. Из таблицы 1 также следует возможный способ подгонки центральной частоты ППФ без существенного изменения формы АЧХ. Дело в том, что волновод фильтра состоит из двух половин, между которыми зажимаются мембраны. Если заранее делать волновод на 0,1-0,2 мм уже стандартной величины 23 мм, то центральную частоту ППФ можно подгонять к заданной величине, используя дополнительные калиброванные прокладки между двумя половинами волновода.

При изготовлении СВЧ аппаратуры в качестве материала для волноводов часто используют дюралюминий с последующим электролитическим покрытием всех поверхностей сплавом олово-висмут. Удельное сопротивление этого сплава существенно выше, чем дюралюминия. Соответственно добротность волноводов ухудшается. Проводилось исследование влияния покрытия волноводов сплавом олово-висмут на характеристики ППФ. Результаты продемонстрированы рисунком 4. Как видно из рисунка, наличие сплава олово-висмут на внутренних стенках волновода существенно искажает характеристики ППФ. В основном эти искажения сводятся к непрогнозируемому сужению

полосы пропускания и к ухудшению прямоугольности АЧХ.

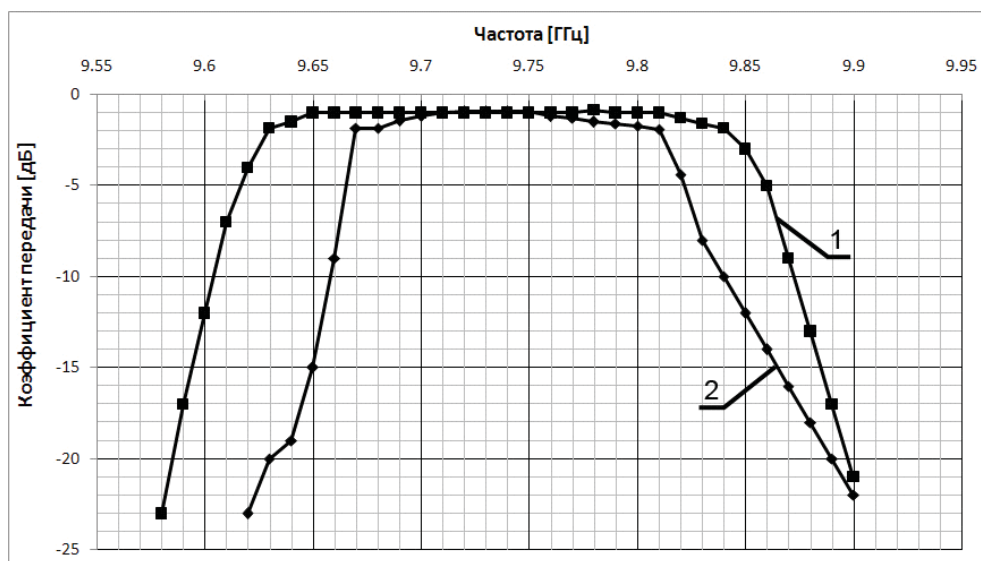


Рис. 4

Измеренные характеристики ППФ со стенками дюралюминиевого волновода, покрытыми сплавом олово-висмут (кривая 2) и после снятия покрытия (кривая 1)

Заключение

В результате проведённой работы опробована методика проектирования волноводных фильтров с металлическими мембранами, расположенными в плоскости симметрии прямоугольного волновода перпендикулярно его широким стенкам. Методика проектирования включает в себя следующие этапы:

1. расчёт необходимого количества резонаторов для обеспечения заданных характеристик ППФ;
2. синтез и оптимизация фильтра методом согласования мод;
3. моделирование работы фильтра с помощью программы трёхмерного электродинамического моделирования СВЧ узлов для уточнения размеров мембран и резонаторов ППФ. Обычно достаточно двух-трёх итераций для обеспечения заданных параметров АЧХ фильтра.

Методика проверена экспериментально при создании фильтра с полосой пропускания около 2% от центральной частоты в трёхсантиметровом диапазоне длин волн. Расхождение по центральной частоте ППФ между расчётом и экспериментом составило 0,061%, по полосам пропускания и заграждения – 3% от расчётной полосы пропускания. Предложен способ регулировки центральной частоты ППФ для более точной подгонки АЧХ к её заданным параметрам.

Показано, что популярное в технологии изготовления аппаратуры покрытие стенок волновода сплавом олово-висмут неприемлемо при создании узкополосных ППФ.

Литература

1. Д. Л. Маттей, Л. Янг, Е. М. Т. Джонс. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. - Москва, т. 1, 1971.
2. Современная теория фильтров и их проектирование / Под ред. Г. Темеша и С. Митра. - Москва, 1977.
3. Waveguide Filter Tool, the company "Guided Wave Technology", <http://www.guidedwavetech.com>
4. HFSS v12, the company "ANSOFT", User manual, 2009.