

А. В. Захаров,

член-корреспондент НАН Украины М. Е. Ильченко

Прямая и обратная задачи в теории полосно-пропускающих фильтров с диссипативными потерями

Розв'язана задача визначення власної добротності резонаторів Q_u , які входять до складу смуго-пропускаючих фільтрів, за вимірними характеристиками цих фільтрів. Розв'язок ґрунтується на розрахунку коефіцієнта стоячої хвилі напруги або зворотних втрат, а також ширини смуги затримування і величини затухання в середині смуги пропускання фільтра. За цими даними визначається рівень пульсацій характеристики затухання і ширина смуги пропускання фільтра без втрат, що дозволяє застосовувати відомий вираз Кона для обчислення власної добротності резонаторів фільтра.

Полосно-пропускающие фильтры являются одними из основных элементов аппаратуры телекоммуникационных систем. Классическая теория этих фильтров была создана в первой половине прошлого столетия, она предполагает использование резонаторов с бесконечной добротностью. Наиболее важные положения этой теории содержатся в работе [1]. Резонаторы любого полосно-пропускающего фильтра имеют конечную собственную добротность Q_u , и в большинстве случаев необходимо знать, как она влияет на затухание в полосе пропускания. В этом заключается суть прямой задачи в теории фильтров с диссипативными потерями. Эта задача была решена С. Коном [2] и Г. Боде [3]. Они получили формулы, которые позволяют рассчитать потери в центре полосы пропускания и на ее краях по заданному значению добротности резонаторов Q_u .

В настоящее время в диапазоне СВЧ широко используются различные твердотельные полосно-пропускающие фильтры, резонаторы которых неотделимы друг от друга. Измерить добротность таких резонаторов прямыми методами не представляется возможным. В этих случаях особый интерес приобретает обратная задача — определение собственной добротности резонаторов Q_u , входящих в состав фильтра, по измеренным его характеристикам. Данная работа посвящена решению этой задачи.

Рассмотрим полосно-пропускающие фильтры с чебышевской (равнопульсирующей) характеристикой затухания [1]. Предположим, что надо построить N — резонаторный чебышевский фильтр с величиной пульсацій ΔL (дБ), который настроен на центральную частоту F_0 и обладает шириной полосы пропускания ΔF . В основе построения лежат нормированные значения элементов фильтров-прототипов нижних частот g_k . Заметим, что каждому уровню пульсацій $\Delta L = 0,01; 0,1; 0,2; 0,5$ дБ соответствует свой набор значений g_k и ширина полосы пропускания ΔF отсчитывает именно по этому уровню пульсацій. Если резонаторы полосно-пропускающего фильтра не имеют потерь, то затухание фильтра на частоте F_0 будет равно нулю для N -нечетных и равно ΔL — N -четных.

Если резонаторы имеют конечную собственную добротностью Q_u , то фильтр с нечетным N будет иметь потери в середине полосы пропускания, величина которых выражается формулой Кона [1, 2]:

$$IL_0(\text{дБ}) = \frac{4,343F_0 \sum_{k=1}^N g_k}{Q_u \Delta F}. \quad (1)$$

При четном числе резонаторов N к затуханию (1) надо добавить величину пульсаций ΔL . Формула (1) определяет приращение затухания на центральной частоте F_0 . В работе [3] показано, что приращение затухания на краях полосы пропускания будет больше, чем в ее середине. При величине пульсаций $\Delta L = 0,01$ дБ это превышение составит 1,73 раза, а при величине пульсаций $\Delta L = 0,5$ дБ — 2,66 раза. Так, если формула (1) даст приращение затухания в центре полосы пропускания 3 дБ, то на краях этой полосы приращение составит примерно 8 дБ при $\Delta L = 0,5$ дБ. В этом случае полоса пропускания, измеренная по уровню неравномерности (относительного затухания) 5 дБ, будет соответствовать полосе пропускания фильтра без потерь ΔF .

Формулу (1) можно использовать для определения добротности резонаторов Q_u , если известны другие величины, входящие в это выражение. Для этого достаточно поменять местами IL_0 и Q_u :

$$Q_u = \frac{4,343F_0 \sum_{k=1}^N g_k}{IL_0 \Delta F}. \quad (2)$$

Для измерения ширины полосы ΔF следует определить уровень затухания, на котором измерять эту полосу. В рассмотренном выше примере эти измерения необходимо было выполнять по уровню относительного затухания 5 дБ. На практике полосу пропускания часто измеряют по уровням 1 или 3 дБ. В этих случаях измеренная полоса пропускания будет меньше, чем ΔF в (2), а вычисленные значения собственной добротности резонаторов будут завышены. Иными словами, уровень затухания, на котором следует измерять ширину полосы пропускания ΔF в (2), является неопределенным. Кроме того, для вычисления суммы коэффициентов g_k в (2) необходимо знать уровень пульсаций, которому соответствуют эти коэффициенты. Приведенные две особенности и составляют основную сложность обратной задачи — определения Q_u резонаторов по измеренным характеристикам полосно-пропускающего фильтра.

Чтобы воспользоваться выражением (2), необходимо знать коэффициенты g_k и ширину полосы пропускания ΔF фильтра без потерь, которые соответствуют определенному уровню пульсаций ΔL . Этот уровень можно приблизительно определить по анализатору цепей. Однако диссипативные потери сглаживают пульсации, и эти измерения будут иметь большую погрешность.

Заметим, что влиянию диссипативных потерь меньше подвержены характеристики отражения фильтра: коэффициент стоячей волны напряжения КСВН и обратные потери RL . Поэтому их целесообразно использовать для решения рассматриваемой задачи. КСВН и RL связаны между собой и с уровнем пульсаций ΔL соотношениями [4]

$$RL(\text{дБ}) = 20 \lg \frac{\text{КСВН} - 1}{\text{КСВН} + 1}, \quad (3)$$

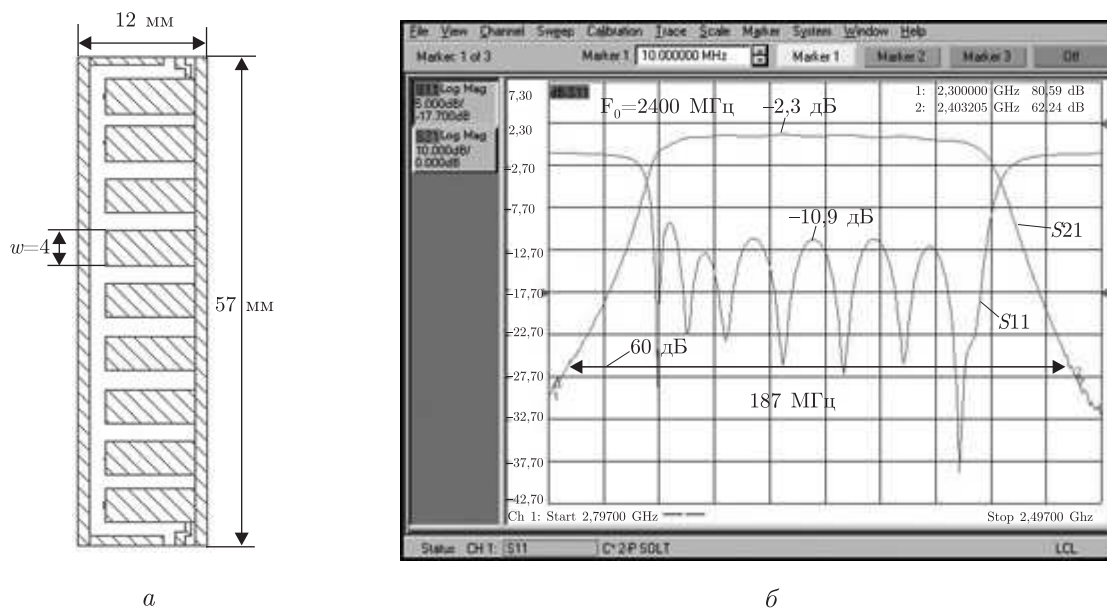


Рис. 1

$$\Delta L(\text{дБ}) = 10 \lg \frac{(\text{КСВН} + 1)^2}{4\text{КСВН}}. \quad (4)$$

Подчеркнем, что равенство (4) является приближенным. Оно становится точным в случае отсутствия потерь. В табл. 1 приведены значения, характеризующие взаимосвязь между КСВН, RL и величиной пульсаций ΔL , рассчитанные по формулам (3), (4).

Зная КСВН или обратные потери, находим величину пульсаций ΔL . Значения элементов прототипа g_k в (2) определяются автоматически этой величиной пульсаций.

Следующий шаг заключается в определении ширины полосы пропускания ΔF , соответствующей установленному уровню пульсаций ΔL . Как отмечалось выше, определить значение ΔF прямыми измерениями весьма проблематично. Поэтому целесообразно измерить полосу задерживания фильтра ΔF_z и от нее перейти к полосе пропускания ΔF . Название “полоса задерживания” носит условный характер. По существу, это полоса пропускания, отсчитываемая по уровню больших затуханий (30–60 дБ), что делает ее нечувствительной к влиянию диссипативных потерь в резонаторах. Измеренное значение ΔF_z у фильтра с потерями будет практически таким же, как у фильтра без потерь. В [1] и ряде других работ приведены чебышевские характеристики затухания фильтров с различным уровнем пульсаций. Эти характеристики устанавливают связь между полосой пропускания ΔF и полосой задерживания ΔF_z фильтров без потерь, которые могут иметь различное число резонаторов. Измерив полосу задерживания, легко определить и полосу пропускания ΔF .

На рис. 1, а изображена топология внутреннего проводника 9-резонаторного полосно-пропускающего фильтра полосковой конструкции, разработанного для телекоммуника-

Таблица 1. Соответствие между различными характеристиками фильтров

КСВН	1,1	1,2	1,4	1,5	1,6	1,8	2	2,5	3
ΔL , дБ	0,01	0,036	0,12	0,18	0,24	0,37	0,51	0,88	1,25
RL , дБ	-26,44	-20,83	-15,56	-13,98	-12,74	-10,88	-9,54	-7,36	-6,02

ционной системы. Фильтр выполнен на подложках толщиной 2 мм из диэлектрического материала Al_2O_3 (Alumina, поликор) с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_r = 9,7$. Подложки металлизировались медью методом вакуумного напыления, толщина металлизации 10 мкм. После совмещения топологических рисунков верхней и нижней подложек, эти подложки прижимались друг к другу, а их торцы пропаивались между собой. Толщина образованной полосковой конструкции $b = 4$, толщина центрального проводника $t = 20$ мкм, $t/b = 0,005$, ширина проводников четвертьволновых резонаторов $w = 4$ мм. Размеры фильтра $57 \times 12 \times 4$ мм.

На рис. 1, б представлены частотные характеристики этого фильтра на анализаторе цепей. Центральная частота полосы пропускания фильтра $F_0 = 2400$ МГц, потери на центральной частоте $IL_0 = 2,3$ дБ, ширина полосы задерживания $\Delta F_3 = 187$ МГц по уровню затухания 60 дБ, уровень обратных потерь $RL = -10,9$ дБ.

По этим данным требуется определить добротность полосковых резонаторов шириной 4 мм на частоте 2400 МГц. Данному уровню обратных потерь соответствует уровень пульсаций $\Delta L = 0,37$ дБ (см. табл. 1). Мы располагаем справочными данными значений g_k для величины пульсаций $\Delta L = 0,5$ дБ и $\Delta L = 0,2$ дБ. Первоначально примем первое из этих значений, для него сумма коэффициентов g_k 9-резонаторного фильтра, согласно [1], равна 16,84.

По графикам чебышевских характеристик затухания [1] определяем, что у 9-резонаторного фильтра с величиной пульсаций 0,5 дБ и уровнем заграждения 60 дБ отношение $\Delta F_3/\Delta F = 1,5$. Зная ΔF_3 , находим полосу пропускания фильтра без потерь, соответствующую уровню пульсаций 0,5 дБ: $\Delta F = \Delta F_3/1,5 \approx 125$ МГц.

Подставляя найденное значение ΔF (125 МГц), сумму коэффициентов g_k (16,84), а также F_0 (2400 МГц) и IL_0 (2,3 дБ) в выражение (2), определяем величину собственной добротности резонатора этого фильтра $Q_u \approx 610$. Для величины пульсаций $\Delta L = 0,2$ дБ сумма g_k равна 15,62, а ширина полосы пропускания $\Delta F = \Delta F_3/1,55 \approx 120$ МГц. Подстановка этих значений в исходную формулу дает значение добротности $Q_u \approx 590$. Поскольку у рассматриваемого фильтра величина пульсаций $\Delta L = 0,37$ дБ занимает промежуточное значение между 0,5 и 0,2 дБ, то и величина добротности также будет иметь промежуточное значение $Q_u = 600$ МГц.

Таким образом, путем решения обратной задачи определена собственная добротность резонаторов Q_u полосно-пропускающего фильтра твердотельной полосковой конструкции. Процедура определения Q_u резонаторов рассмотрена для фильтров с чебышевскими характеристиками затухания. Но она применима и к другим типам фильтров, которые имеют таблицы значений элементов прототипов g_k и графики характеристик затухания. Фильтры могут содержать простые резонаторы — четвертьволновые и полуволновые, а также резонаторы сложной формы [5].

Решение задачи определения собственной добротности резонаторов основано на измерении коэффициента стоячей волны напряжения или обратных потерь, ширины полосы задерживания и величины затухания в середине полосы пропускания фильтра. По этим данным определяется уровень пульсаций характеристики затухания и ширина полосы пропускания фильтра без потерь, что позволяет использовать известное выражение Кона для расчета собственной добротности резонаторов фильтра.

1. Матей Г. Л., Янг Л., Джонс Е. М. Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Т. 1. — Москва: Связь, 1971. — 440 с.
2. Cohn S. B. Dissipation loss in multiple-coupled-resonator filters // Proc. IRE. — 1959. — 47. — P. 1342–1348.

3. Бодэ Г. Теория цепей и проектирование усилителей с обратной связью / Пер. с англ. / Под ред. А. А. Колосова и Л. А. Мееровича. – Москва: Изд-во иностр. лит., 1948. – 641 с.
4. Hong J.-S. Lancaster M. J. Microstrip filters for RF/microwave application. – New York: Wiley, 2001. – 471 p.
5. Ильченко М. Е., Захаров А. В., Сызранов В. А. Построение фильтров из отрезков линий передачи с заданным распределением полос пропускания и полюсов затухания // Докл. АН Украины. – 1993. – № 10. – С. 112–117.

Научно-исследовательский институт
телекоммуникаций при НТУ Украины
“Киевский политехнический институт”

Поступило в редакцию 14.04.2010

A. V. Zakharov, Corresponding Member of the NAS of Ukraine **M. Yu. Ilchenko**

Direct and inverse tasks in the theory of lossy bandpass filters

Resonator's unloaded quality factor Q_u was determined by measured performances of a lossy bandpass filter. The solution is based on the measured voltage standing wave ratio or return loss and the stopband width. By the measured data, we can calculate the passband ripple (ΔL) and the band width (BW) of a lossless filter. Cohn's expression is used to calculate the unloaded quality factor of resonators.