

## О НЕКОТОРЫХ ВОЗМОЖНОСТЯХ ФОРМИРОВАНИЯ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ В ОБЪЕМНЫХ РЕЗОНАТОРАХ СТОЯЧИХ ВОЛН

БОНДАРЕНКО И.Н.

(радиотехника)

На основании представления процесса формирования амплитудно-частотных характеристик объемных резонаторов стоячих волн как суперпозиции большого числа колебаний возбуждающей электромагнитной волны предлагается воздействовать на этот процесс с помощью профилирования рабочих поверхностей резонатора.

Основными факторами, определяющими частотную избирательность различных устройств, являются амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) их элементов. Предполагается, что АЧХ одиночного колебательного контура полностью определяется его добротностью, а АЧХ связанных контуров – добротностями, частотами настройки и коэффициентами связи между контурами и внешними цепями.

Для формирования АЧХ заданной формы необходимо, как правило, использование нескольких связанных контуров, что ведет к усложнению конструкции устройства в целом, необходимости введения дополнительных регулировок и настроек, а также к снижению значений добротности резонансных элементов и, соответственно, к уменьшению крутизны скатов АЧХ.

В этой связи представляется актуальной разработка методов формирования АЧХ заданной формы путем воздействия на резонансную кривую одиночного колебательного контура.

Целью работы является обоснование метода воздействия на АЧХ одиночного объемного колебательного контура с помощью профилирования его рабочих поверхностей.

Сущность предлагаемого метода заключается в том, что процесс формирования АЧХ в объемном резонаторе рассматривается как суперпозиция большого числа колебаний возбуждающей электромагнитной волны, условия сложения которых будут существенно (в пределах полосы частот, занимаемой АЧХ) зависеть от характеристик отражающих поверхностей.

Известно, что собственную добротность объемного резонатора с воздушным или вакуумным заполнением и стенками из хорошо проводящего материала можно найти с помощью следующего соотношения [1,2]:

$$Q_0 = \frac{\sqrt{\omega_p \mu_0} \int_V |\dot{H}|^2 dv}{\sqrt{\frac{\mu_0}{2\sigma}} \int_S |\dot{H}_\tau|^2 ds} = \frac{\omega_p \mu_0 \int_V |\dot{H}|^2 dv}{R_{\text{п}} \int_S |\dot{H}_\tau|^2 ds} = \frac{G}{R_{\text{п}}}, \quad (1)$$

где  $\omega_p$  – резонансная частота;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума;  $\sigma$  – проводимость материала стенок резонатора;  $R_{\text{п}} = \sqrt{\omega_p \mu_0 / 2\sigma}$  – поверхностное сопротивление материала стенок резонатора;

$$G = \omega_p \mu_0 \int_V |\dot{H}|^2 dv / \int_S |\dot{H}_\tau|^2 ds - \text{геометрический фактор,}$$

зависящий от геометрии и размеров резонатора, а также от структуры электромагнитных полей (вида колебаний).

Анализируя (1) при  $\omega = \omega_p \pm \Delta\omega$ ,  $0 < \Delta\omega < \Delta\omega_p$  и  $\Delta\omega \ll \omega_p$  ( $\Delta\omega_p$  – полуширина полосы пропускания резонатора), можно прийти к выводу, что значения добротности объемного резонатора на частотах, лежащих в полосе пропускания, не отличаются от его добротности на резонансной частоте. Действительно, величина  $G$  практически не меняется, а значение поверхностного сопротивления слабо зависит от частоты ( $R_{\text{п}} \approx \omega^{1/2}$  – для нормальных металлов и  $R_{\text{п}} \approx \omega^2$  – для сверхпроводников [2]).

Следовательно, выражение  $f(x) = (1+x^2)^{-1/2}$  ( $x = Q_0 \Delta\omega / \omega_p = \Delta\omega / \Delta\omega_p$ ), полученное из рассмотрения условий резонанса в колебательном контуре с сосредоточенными параметрами ( $R, C, L$ ), при которой форма АЧХ определяется величиной и характером изменения реактивных сопротивлений ( $\omega L$  и  $1/\omega C$ ), в данном случае не совсем применимо.

Поскольку большинство объемных резонаторов являются резонаторами стоячих волн, то, по видимому, их резонансная характеристика будет зависеть от условий интерференции колебаний на резонансной частоте и частотах, лежащих вблизи неё.

Рассмотрим условия резонанса в одномерном резонаторе стоячих волн (из объемных резонаторов к этому типу можно отнести, например, резонаторы на отрезках коаксиальных линий, возбуждаемых на волнах ТЕМ).

Предположим, что в резонаторе отсутствуют потери, а сам резонатор представляет собой линию, закрытую на концах торцевыми крышками.

Условие резонанса для такой системы:

$$\varphi_1 + \varphi_2 + 2\beta l = 2\pi n, \quad (2)$$

где  $\varphi_1, \varphi_2$  – изменение фазы сигнала при отражении от торцевых стенок резонатора;  $\beta = 2\pi/\lambda_{\text{л}} = \omega/v_{\text{фл}}$  – постоянная распространения линии;  $\lambda_{\text{л}}, v_{\text{фл}}$  – длина и фазовая скорость волны в линии;  $l$  – длина линии;  $n = 1, 2, 3, \dots$

При зеркальном отражении от торцевых стенок условие резонанса –  $l = n\lambda_{\text{л}}/2$ .

В дальнейшем для простоты будем рассматривать полуволновый резонатор ( $l = \lambda_{\text{л}}/2$ ).

Допустим, что на входе резонатора действует сигнал с частотой  $\omega$ . При  $\omega = \omega_p$  за время  $t = T$  ( $T$  – период колебания), электромагнитная волна дважды пройдет по резонатору с отражением от обеих стенок и сложится в фазе со следующим колебанием, поступившим в резонатор. В последующий период произойдет сложение уже удвоенного значения с вновь поступившим колебанием, и т. д. При  $\omega \neq \omega_p$  каждое последующее колебание будет алгебраически складываться с предыдущими поскольку набег фазы за период будет в этом случае определяться отношением  $2l/\lambda$ , а для каждой составляющей –  $2nl/\lambda$ , где  $n$  – соответствующее количество колебаний.

Для системы без потерь функция, описывающая характер изменения  $n$ -го колебания в резонаторе  $\dot{S}(t, f) = e^{j2n\beta t}$ ; реальная часть -  $\text{Re}\dot{S}(t, f) = \cos 2n\beta t$ .

Функция, описывающая резонансную кривую, которая формируется за счет сложения колебаний, поступающих и существующих в полуволновом резонаторе, может быть записана следующим образом:

$$S(t, f) = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \cos \frac{2\pi k l \lambda_p}{\lambda} = \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \cos \frac{2\pi k f}{f_p}. \quad (3)$$

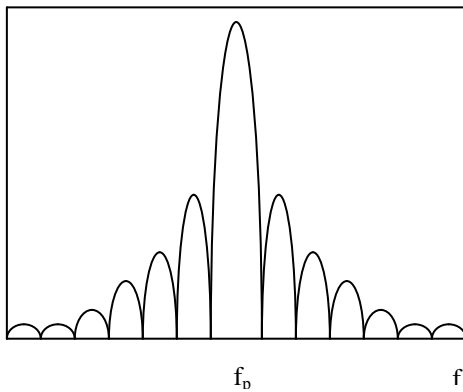
Типичный график абсолютных значений функции  $S(t, f)$  (3) приведен на рисунке. При увеличении числа  $n$  амплитуда центрального максимума будет расти, его ширина уменьшаться, амплитуды боковых максимумов будут уменьшаться, их количество расти. В качестве резонансной кривой в данном случае следует, по-видимому, принять огибающую графика функции  $S(t, f)$ .

Влияние активных потерь в резонаторе на форму его резонансной кривой можно учесть путем введения некоторой постоянной затухания  $\alpha$ , которая характеризует потери в сигнале за время одного колебания. Тогда (3) трансформируется к такому виду:

$$\begin{aligned} S(t, f) &= \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n e^{-(n+1-k)\alpha} \cos \frac{2\pi k l \lambda_p}{\lambda} = \\ &= \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n e^{-(n+1-k)\alpha} \cos \frac{2\pi k f}{f_p}. \end{aligned} \quad (4)$$

Характер изменения функции  $S(t, f)$  (4) по сравнению с  $S(t, f)$  (3) остается тем же, с той лишь разницей, что амплитуды максимумов будут существенно зависеть от величины  $\alpha$ , а при больших ее значениях форма огибающей будет слабо меняться при возрастании величины  $n$ .

$|S(t, f)|$



Типичный график функции  $|S(t, f)|$

По-видимому, окончательно сформировавшаяся резонансную характеристику можно считать тогда, когда мощность потерь в резонаторе за период станет равной мощности поступающего внешнего сигнала, т. е. после окончания переходных процессов установления колебаний в резонаторе. Обычно эта величина характеризуется временем  $\tau = Q/\pi f$ , за которое амплитуда колебаний в резонаторе достигнет величины  $A = (1 - 1/e)A_{\text{макс}}$  [3]. Для достижения  $A \approx 0,95A_{\text{макс}}$  необходимо время  $t \approx 3\tau$ . При реальных значениях

добротности объемных резонаторов  $\sim 10^3$  это соответствует  $t \approx 10^3 T$  или  $n \sim 10^3$  в (3) и (4).

При расчете характеристик объемного резонатора обычно считают, что его линейные размеры определяют значение резонансной частоты, а форма резонансной кривой может зависеть от размеров, в том случае, когда значение добротности резонатора меняется в зависимости от его объема (запасенная энергия меняется пропорционально объему, а потери – пропорционально площади рабочих поверхностей).

В то же время для реальных резонаторов их геометрические размеры являются функцией технологий изготовления и условий эксплуатации.

Известно, что рабочие поверхности волноводов и резонаторов должны быть обработаны по 8-10 классу чистоты обработки [4]. Это значит, что средняя высота неровностей  $\sim 3,2$  и  $\sim 0,8$  мкм на базовых длинах 0,8 и 0,25 мм, соответственно [5]. Поскольку размеры большинства резонаторов значительно превышают соответствующие базовые длины, то можно утверждать, что те размеры, которые используются при расчете характеристик резонатора, представляют собой некоторое усредненное значение.

Проведем для выбранного полуволнового резонатора грубую оценку влияния изменений его размеров на значение резонансной частоты. Допустим, что резонансная частота нашего резонатора  $f_p \sim 3$  ГГц. Тогда его линейный размер составляет  $l \sim 5 \cdot 10^{-2}$  м, а изменению резонансной частоты на величину  $\Delta f \sim 3 \cdot 10^3$  Гц будет соответствовать изменение длины  $\Delta l = l \Delta f / f_p \sim 0,05$  мкм.

На основании проведенных оценок, а также соотношения (4), можно утверждать, что процесс формирования АЧХ будет носить статистический характер, при котором длину резонатора  $l$  можно считать равной  $l_p$  с некоторой степенью вероятности. Можно предположить, что вероятность отклонения величины  $l$  от  $l_p$  будет оцениваться нормальным законом. Тогда для плотности вероятности можно записать следующее [6]:

$$p(l) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(l-l_p)^2}{2\sigma^2}}, \quad (5)$$

где  $\sigma^2$  – дисперсия величины  $l$  (по «правилу трех сигм» [6] можно определить величину  $\sigma$ , зная класс чистоты обработки поверхности -  $3\sigma \sim \Delta l_{\text{макс}}$ ).

Выражение (5) можно переписать как закон распределения плотности вероятности резонанса на частотах, близких к  $f_p$ :

$$p(f) = \frac{1}{\sigma_f \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma_f^2}}, \quad (6)$$

где  $\sigma_f = \Delta l_{\text{макс}} f_p / 3l_p$  – дисперсия величины  $f$ , зависящая от  $\Delta l_{\text{макс}}$ , которая, в свою очередь, будет определяться качеством обработки поверхности.

Таким образом, процесс формирования АЧХ описывается соотношением (4), в котором  $\lambda_p = l \cdot p(l)$ .

Закон нормального распределения имеет один максимум, а ширина кривой, описывающей распределение плотности вероятности (гауссова кривая) зави-

сит от величины  $\sigma$ . Поскольку величина  $\sigma$  достаточно мала, то влияние данного фактора, связанного с неоднозначностью величины  $l$ , на АЧХ будет проявляться в некотором расширении и сглаживании максимумов и минимумов характеристики  $S(t, f)$ . Также можно предположить, что указанный фактор будет сильнее влиять на искажения АЧХ высокодобротных резонаторов ( $Q > 10^4$ ), чем низкодобротных ( $Q \sim 10^2-10^4$ ).

Закон распределения плотности вероятности для значений размеров резонатора в принципе может иметь не один, а несколько максимумов. Это приведет к тому, что главный максимум АЧХ резонатора, который, собственно, главным образом и характеризует резонансную кривую, будет расширяться или даже приобретать дополнительные максимумы, степень выраженности которых зависит от соответствующей функции распределения плотности вероятностей (т. е. количества степени выраженности ее мод).

Следовательно, если искусственным образом (обработкой, например) создать условия для формирования функции распределения с несколькими максимумами, то можно, соответственно, изменить и форму АЧХ резонатора.

Для одномерного резонатора стоячих волн этого можно достичь профилированием торцевой поверхности, причем разность высот профиля должна превышать средний размер шероховатости, определяемый классом чистоты обработки поверхности, и не превышать величины, которая может привести к возникновению в резонаторе нежелательных видов колебаний. Площадь поверхности, занимаемая тем или иным размером профиля, будет определяться степенью требуемого выделения того или иного максимума в АЧХ резонатора.

Наиболее часто используемые резонаторы стоячих волн представляют собой, как правило, полуволновые замкнутые отрезки прямоугольных или круглых волноводов. В таких резонансных системах значение резонансной частоты будет определяться в общем случае всеми размерами резонатора (для призматического резонатора: размером широкой стенки –  $a$ , узкой –  $b$ , и длиной –  $l$ ; для цилиндрического: радиусом –  $R$  и длиной –  $l$ ). Процесс формирования АЧХ таких резонаторов может быть также представлен как формирование суперпозиции большого числа колебаний какого-то конкретного типа электромагнитной волны, возможной в прямоугольном волноводе сечением  $a \times b$  или круглом радиуса  $R$ . В таком случае шероховатость рабочей поверхности и неоднозначность значения линейного размера резонатора также будет приводить к размытию максимума резонансной характеристики, а профилирование соответствующих поверхностей – к изменению формы АЧХ.

Предложенные в работе подходы позволяют: более детально рассмотреть переходные процессы в резонаторах стоячих волн и связать их с формированием АЧХ, изучить характер изменения за время переходных процессов сигнала, проходящего через высокодобротный резонатор, разработать методы синтеза фильтрующих устройств на основе одиночных высокодобротных резонаторов с заданными АЧХ.

Существующие в настоящее время фильтры СВЧ создаются на основе принципов, изложенных в работах [7-9], являются, как правило, многоэлементными

и, соответственно, обладают всеми недостатками, упомянутыми в начале статьи. Предложенный путь построения устройств с заданными АЧХ ведет к значительному упрощению их конструкции и улучшению основных характеристик по избирательности за счет сохранения высокой добротности на рабочих частотах.

Таким образом, проведенное в работе рассмотрение процесса формирования АЧХ в резонаторах стоячих волн позволяет выявить дополнительные возможности для анализа процесса установления колебаний в высокодобротных резонаторах и синтеза избирательных устройств с улучшенными характеристиками.

**Литература:** 1. Федоров И.Н. Основы электродинамики. М.: Высшая школа, 1980. 399с. 2. Менде Ф.Ф., Спицын А.И. Поверхностный импеданс сверхпроводников. К.: Наукова думка, 1985. 240с. 3. Альтман Дж. Устройства сверхвысоких частот. М.: Мир, 1968. 487с. 4. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. Т.1. М.: Высшая школа, 1970. 440с. 5. Барановский М.А., Молочков А.В. Справочник токаря. Минск: Госиздат БССР, 1962. 492с. 6. Щиголов Б.М. Математическая обработка наблюдений. М.: ГИФМЛ, 1962. 344с. 7. Модель А.М. Фильтры СВЧ в радиорелейных системах. М.: Связь, 1967. 352с. 8. Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Т.1. М.: Связь, 1971. 440с. 9. Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Т.2. М.: Связь, 1971. 496с.

Поступила в редколлегию

**Рецензент:** д-р техн. наук Менде Ф.Ф.

**Бондаренко Игорь Николаевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры авиационных средств связи Харьковского института ВВС. Научные интересы: криогенная радиофизика, техника СВЧ, системы радиосвязи. Адрес: Украина, 61165, Харьков, ул. Клочковская, 228, каф. №306, тел. 30-82-16.

УДК 621.372

**Деякі можливості формування амплітудно-частотної характеристики в об'ємних резонаторах стоячих хвиль/** І.М. Бондаренко// Радіоелектроніка та інформатика. 2003. №00. С. 00-00.

Розглянутий процес формування амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) резонаторів стоячих хвиль як суперпозиція великої кількості коливань електромагнітної хвилі. Обговорений вплив на АЧХ якості обробки робочої поверхні резонаторів. Запропоноване профілювання робочих поверхонь як засіб формування АЧХ резонаторів стоячих хвиль.

Л.1. Бібліогр.: 9 назв.

UDC 621.372

**About some opportunities of shaping of an amplitude-frequency characteristic in cavity resonators of standing waves /I.N. Bondarenko//Radioelektronika i informatika. 2003. №00. P. 00-00.**

The process of shaping of an amplitude-frequency characteristic (AFC) of resonators of standing waves as a superposition of a multitude of oscillations of an electromagnetic wave surveyed. The influence on AFC of quality of handling of an effective area of resonators argued. Usage of a profiling of effective areas as an expedient of shaping AFC of resonators of standing waves is offered.

Fig.1. Ref.: 9 items.