

УДК 621.372

И.Н. БОНДАРЕНКО

Харьковский институт Военно-Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Украина

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ И МИКРОРЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ НА ФОРМИРОВАНИЕ АЧХ ВЫСОКОДОБРОТНЫХ РЕЗОНАТОРОВ СТОЯЧИХ ВОЛН

Рассмотрен процесс формирования амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) резонаторов стоячих волн как суперпозиции большого количества колебаний электромагнитной волны. Обсуждено влияние на АЧХ качества обработки рабочей поверхности резонаторов. Предлагается профилирование рабочих поверхностей как способ формирования АЧХ резонаторов стоячих волн

амплитудно-частотная характеристика, стоячая волна, резонатор, рабочая поверхность, переходной процесс, добротность, электромагнитное колебание

Постановка проблемы

Задача обработки быстроменяющихся сигналов для современной радиотехники и средств связи является одной из актуальнейших. Ее решение предполагает проведение анализа характера переходных процессов, происходящих во всех элементах радиотехнической системы. Очевидным также является то, что чем проще конструкция соответствующего радиотехнического устройства, тем меньше факторов, вызывающих искажения сигналов (разумеется, в том случае, если усложнения не связаны с компенсацией внесенных искажений).

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 — добротностью, частотами настройки и коэффициентами связи между контурами и внешними цепями.

Выделение нерешенной задачи

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.

Цель работы

Анализ процесса формирования АЧХ в резонаторах стоячих волн и обоснование метода формирования АЧХ заданной формы путем воздействия на резонансную кривую одиночного колебательного контура.

Основной материал

Сущность предлагаемого подхода 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 добротность колебательной системы (резонатора) определяется формулой

$$Q = \omega \frac{W_{зан}}{P_{рас}},$$

где ω — значение частоты (резонансной); $W_{зан}$ — энергия, запасенная в резонаторе на резонансной частоте

те, величина которой зависит от объема резонатора и характера (структуры) колебаний, возбуждаемых в резонаторе; $P_{рас}$ – мощность, рассеиваемая в резонаторе за период, которая зависит от структуры колебания, а также от значения поверхностного сопротивления материала стенок резонатора (объемные резонаторы с проводящими стенками), поверхностного сопротивления, потерь в диэлектрике, и потерь на излучение (металлодиэлектрические, полосковые и микрополосковые резонаторы), потерь в диэлектрике и потерь на излучение (диэлектрические резонаторы) и т. д.

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

$$Q_0 = \frac{\sqrt{\omega_p \mu_0} \int_V |H|^2 dv}{\sqrt{\frac{\mu_0}{2\sigma}} \int_S |H_\tau|^2 ds} = \frac{\omega_p \mu_0 \int_V |H|^2 dv}{R_n \int_S |H_\tau|^2 ds} = \frac{G}{R_n}, \quad (1)$$

где ω_p – резонансная частота; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; σ – проводимость материала стенок резонатора; $R_n = \sqrt{\omega_p \mu_0 / 2\sigma}$ – поверхностное сопротивление материала стенок резонатора;

$G = \omega_p \mu_0 \int_V |H|^2 dv / \int_S |H_\tau|^2 ds$ – 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 ($R_n \approx \omega^{1/2}$ – для нормальных металлов и

$R_n \approx \omega^2$ – 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 которых форма АЧХ определяется величиной и характером изменения реактивных сопротивлений (ωL 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 φ_1, φ_2 – изменение фазы сигнала при отражении от торцевых стенок резонатора; $\beta = 2\pi/\lambda_n = \omega/v_{фл}$ – постоянная распространения линии; $\lambda_n, v_{фл}$ – длина и фазовая скорость волны в линии; l – длина линии; $n = 1, 2, 3, \dots$

При зеркальном отражении от торцевых стенок условие резонанса – $l = n\lambda_n/2$.

В дальнейшем для простоты будем рассматривать полуволновый резонатор ($l = \lambda_n/2$).

Допустим, что на входе резонатора действует сигнал с частотой ω . 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 $\omega \neq \omega_0$, 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. Таким образом, при отклонении значения частоты от резонансного суммарный набег фаз в резонаторе уже не будет кратным 2π и, соответственно, амплитуда суммарного сигнала будет уменьшаться.

Для системы без потерь функция, описывающая характер изменения n -го колебания в резонаторе

$$\dot{S}(t, f) = e^{j2n\beta l}; \quad \text{реальная часть} \\ \text{Re } \dot{S}(t, f) = \cos 2n\beta l.$$

Если ввести дополнительное условие когерентности в течение времени наблюдения на всех частотах рабочего диапазона для внешнего сигнала, вводимого в резонатор, то функция, описывающая резонансную кривую, которая формируется за счет сложения колебаний, поступающих и существующих в полуволновом резонаторе, может быть записана следующим образом [3]:

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

Суммарный сигнал будет формироваться из разного количества сумм колебаний сигнала, которые произойдут за время наблюдения. Набег фазы каждого из них зависит от времени его существования в резонаторе и может меняться от 2π до $n \cdot 2\pi$.

Типичный график абсолютных значений функции $S(t, f)$ (3) приведен на рисунке. Резонансные кривые будут представлять собой систему из центрального максимума и большого числа боковых максимумов, количество, амплитуда, ширина и место расположения которых на оси частот зависит от количества колебаний в резонаторе. При увеличении числа n (или времени наблюдения) 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 $S(t, f)$. Таким образом будет формироваться постоянно меняющаяся во времени резонансная характеристика. Следовательно, при сделанных выше допущениях получается, что форма резонансной характеристики резонатора стоячей волны не является постоянной, а меняется в зависимости от времени наблюдения.

Поскольку ширина главного максимума в рассматриваемом случае меняется с изменением $n=f \cdot t$ (t — время поддержания колебаний в резонаторе), то можно утверждать, что значение добротности, определяемое как $Q = f_p / 2\Delta f_p$, будет функцией частоты и времени $Q = F(f, t)$.

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

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

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 α , а при больших ее значениях форма огибающей будет слабо меняться при возрастании величины n (рис. 1).

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 ко-

торое амплитуда колебаний в резонаторе достигнет величины $A = (1 - 1/e)A_{\text{макс}}$ [4]. 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).

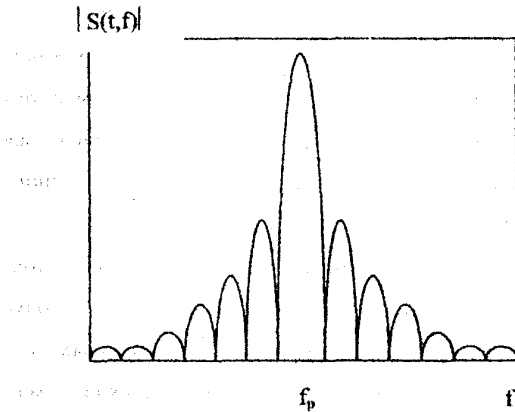


Рис. 1. Типичный график функции $|S(t, f)|$

Проведенное рассмотрение приводит нас к выводу о том, что если вести речь о характеристиках собственно резонатора, то таковыми могут быть только значение добротности на определенной частоте и значение резонансной частоты. Значение же полосы пропускания будет определяться соотношением геометрических размеров резонатора и рабочей длины волны, величиной активных потерь, а также характеристиками внешнего сигнала (в частности, его длительностью).

Экспериментальное исследование характеристик, описываемых соотношением (4), затруднено, поскольку, во-первых, используемые измерительные генераторы, как правило, не излучают сигналы, когерентные в рабочей полосе частот, а, во-вторых, изменения формы резонансной характеристики происходят за время порядка $2L/v_{\text{фаз}}$.

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 технологической изготовления и условий эксплуатации.

Известно, что рабочие поверхности волноводов и резонаторов должны быть обработаны по 8-10 классу чистоты обработки [5]. Это значит, что средняя высота неровностей $\sim 3,2$ и $\sim 0,8$ мкм на базовых длинах 0,8 и 0,25 мм, соответственно [6]. 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 $\Delta l = l \cdot \Delta f / f_p \sim 0,05$ 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 [7]:

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

где σ^2 — дисперсия величины l (по «правилу трех сигм» [7] можно определить величину σ , 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) зависит от величины σ . Поскольку величина σ достаточно мала, то влияние данного фактора, связанного с неоднозначностью величины l , на АЧХ будет проявляться в некотором расширении и сглаживании максимумов и минимумов характеристики $S(f, f)$. Также можно предположить, что указанный фактор будет сильнее влиять на искажения АЧХ высокочастотных резонаторов ($Q > 10^4$), чем низкочастотных ($Q \sim 10^2-10^4$).

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 и степени выраженности ее мод).

Следовательно, если искусственным образом (обработкой, например) создать условия для формирования функции распределения с несколькими мак-

симумами, 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 высотой - h). 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.

Выводы

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 создаваемые на основе принципов, изложенных в работах [8-10], 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.

Несмотря на определенные упрощения, принятые при введении формул (3) и (4), проведенное в работе рассмотрение процесса формирования АЧХ в резонаторах стоячих волн, позволяет выявить дополнительные возможности для анализа процесса установления колебаний в высокодобротных резонаторах, производить оценочный расчет ожидаемых АЧХ, а также проводить синтез избирательных устройств с улучшенными характеристиками на основе использования высокодобротных колебательных структур со стоячими волнами.

В тоже время необходимо отметить, что выявленные в работе особенности формирования АЧХ одиночных резонаторов и предлагаемые способы воздействия на них будет наиболее эффективно проявляться при добротности резонатора выше 10^4 .

Литература

1. Федоров И.Н. Основы электродинамики. М.: Высшая школа, 1980. - 399с.
2. Менде Ф.Ф., Бондаренко И.Н., Трубицын А.В. Охлаждаемые и сверхпроводящие резонансные системы. - К.: Наук. думка. 1976. - 272с.
3. Бондаренко И.Н. Уточнение формы резонансной кривой резонаторов стоячих волн. // Радиотехника. Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. Харьков. 2003. Вып. 131. - С.83-87.
4. Альтман Дж. Устройства сверхвысоких частот. М.: Мир, 1968. - 487с.
5. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. Т.1. М.: Высшая школа, 1970. - 440с.
6. Барановский М.А., Молочков А.В. Справочник токаря. Минск: Госиздат БССР, 1962. - 492с.
7. Щиголов Б.М. Математическая обработка наблюдений. М.: ГИФМЛ, 1962. - 344с.
8. Модель А.М. Фильтры СВЧ в радиорелейных системах. М.: Связь, 1967. - 352с.
9. Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Т.1. М.: Связь, 1971. - 440с.
10. Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Т.2. М.: Связь, 1971. - 496с.

Поступила в редакцию 30.09.03

Рецензент: д-р техн. наук, профессор Алешин Г.В., Харьковский институт Военно-Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, г. Харьков