

Выводы

Показана возможность использования генетического алгоритма для оптимизации АЧХ полосовых фильтров на ДР. При этом наилучшие результаты оптимизации 3-звенных фильтров получаются для полосы 1%. Для характеристики Чебышева получены лучшее минимальное затухание и более крутые скаты ветвей по сравнению с фильтрами Баттерворта. Приемлемая характеристика для несимметричных фильтров не была получена, ввиду использования расчетных соотношений только для 3-х ДР. Время на поиск коэффициентов связи в среднем составило 1-3 минуты.

Литература

1. http://www.basegroup.ru/library/optimization/ga_math/.
2. Сабанин В. Р., Смирнов Н. И., Репин А. И. Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации в управлении // Exponenta Pro. Математика в приложениях. - 2004. - № 3-4. - С. 78-85.
3. Ильченко М. Е., Трубин А. А. Электродинамика диэлектрических резонаторов, - К.: 2004. - 264 с.

Трубин А.А., Моховиков А.С. Оптимизация амплитудно-частотной характеристики трехзвенного полосового фильтра на диэлектрических резонаторах с помощью генетического алгоритма. Предложена программа поиска коэффициентов связи диэлектрических резонаторов, отвечающих необходимой АЧХ полосового фильтра. Программа основана на использовании генетического алгоритма.

Ключевые слова: *фильтр, диэлектрический резонатор, генетический алгоритм.*

Трубин О.О., Моховиков О.С. Оптимізація амплітудно-частотної характеристики трьохелементного смугового фільтру на діелектричних резонаторах за допомогою генетичного алгоритму. Запропоновано програму пошуку коефіцієнтів зв'язку діелектричних резонаторів, що відповідають необхідній АЧХ смугового фільтру, побудованого на цих ДР. Програма основана на генетичному алгоритмі.

Ключові слова: *смуговий фільтр, діелектричний резонатор, генетичний алгоритм.*

Trubin A., Mokhovikov A. Optimization of amplitude-frequency characteristic three elements band-pass filter with dielectric resonator by genetic algorithm. It's proposed the program that is searching the coupling coefficients of dielectric resonators answering to the necessary gain-frequency characteristic of band pass microwave filter. The program is based on a genetic algorithm.

Key words: *Band pass Filter, Dielectric Resonator, Optimization, Genetic algorithm.*

УДК621.39

ДОБРОТНОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ ОТКРЫТЫХ СФЕРОИДАЛЬНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ

Старков М.А.

В настоящее время широкое распространение получили открытые диэлектрические резонаторы (ОДР) различной формы: цилиндрические, прямоугольные, сферические и т. д. При этом строгие аналитические решения доступны лишь для узкого ряда одномерных структур (сфера, бесконечный цилиндр, бесконечная пластина). Представляет интерес анализ строгих решений в координатах, допускающих разделение переменных в волновом уравнении, в частности, в сфероидальных. При этом известные результаты

для сферических резонаторов (СР) являются частным случаем общего решения. Такая расширенная постановка задачи позволяет ответить на ряд принципиальных вопросов о влиянии формы ОДР на их основные параметры: взаимное расположение спектра, радиационная добротность, диаграмма собственного излучения и др. В частности, является ли диэлектрическая сфера оптимальной формой по излучению на основных типах колебаний или же существуют более совершенные структуры? Ответу на некоторые из этих вопросов и посвящена эта статья.

Теоретичні дослідження

Рассмотрим колебания основного типа H_{10r} в сплюснутом и вытянутом диэлектрических сфероидах, эксцентриситет которых близок к нулю, т. е. в окрестности диэлектрической сферы. Колебания этого типа представляют наибольший интерес для реализации частотно-избирательных устройств, поскольку минимизируют размеры ОДР на заданной частоте.

В сплюснутых сфероидальных координатах (ξ, η, φ) решение волнового уравнения при малых значениях параметра h для магнитных типов колебаний H_{10r} имеет вид [1]

$$H_{\xi} = \frac{1}{i\omega\mu_0 f \cdot (\xi^2 + \eta^2)} [j_1(z) + 0,02h^2 j_3(z)] \frac{dS(\eta)}{d\eta}$$

$$H_{\eta} = \frac{1}{i\omega\mu_0 f \cdot (\xi^2 + \eta^2)} \frac{d[j_1(z) + 0,02h^2 j_3(z)]}{dz} S(\eta)$$

$$E_{\varphi} = [j_1(z) + 0,02h^2 j_3(z)] S(\eta)$$

где ξ, η - сфероидальные координаты, f - полуфокусное расстояние, $S(\eta)$ - угловые сфероидальные функции, $z = h(\varepsilon^2 + 1)^{1/2} = \varepsilon^{1/2} k_0 f (\varepsilon^2 + 1)^{1/2} = \varepsilon^{1/2} k_0 b$, b - большая полуось сфероида, h - малый параметр, стремящийся к нулю, если форма сфероида приближается к сферической.

Для внешней области СР составляющие поля имеют аналогичный вид с учетом замены сферических функций Бесселя первого рода $j_l(z)$ на сферические функции четвертого рода $h_l^{(2)}(z/\varepsilon^{1/2})$, представляющие на бесконечности расходящиеся сферические волны.

Характеристическое уравнение, определяющее собственные резонансные частоты H_{10r} - колебаний может быть получено при выполнении граничных условий. Приравнивая тангенциальные составляющие поля на границе раздела $\xi = \xi_0$, получим

$$\frac{j_0(z) + 0,02h^2 \left[j_2(z) - \frac{2}{z} j_3(z) \right]}{j_1(z) + 0,02h^2 j_3(z)} = \frac{h_0^{(2)}\left(\frac{z}{\sqrt{\varepsilon}}\right) + \frac{0,02h^2}{\varepsilon} \left[h_2^{(2)}\left(\frac{z}{\sqrt{\varepsilon}}\right) - \frac{2\sqrt{\varepsilon}}{z} h_3^{(2)}\left(\frac{z}{\sqrt{\varepsilon}}\right) \right]}{\sqrt{\varepsilon} \left[h_1^{(2)}\left(\frac{z}{\sqrt{\varepsilon}}\right) + \frac{0,02h^2}{\varepsilon} h_3^{(2)}\left(\frac{z}{\sqrt{\varepsilon}}\right) \right]}$$

Для больших значений диэлектрической проницаемости аргумент сфе-

рических функций второго рода стремится к нулю, а сами функции могут быть представлены в виде $h_l^{(2)}(x) = 1 \cdot 3 \cdot (2l - 1) / x^{l+1}$. Учитывая, что решение ищется в области нулей функции $j_0(z)$, последнее выражение можно упростить

$$\frac{j_0(z) + 0,02h^2 \left[j_2(z) - \frac{2}{z} j_3(z) \right]}{j_1(z)} = \frac{h_0^{(2)}\left(\frac{z}{\sqrt{\varepsilon}}\right)}{\sqrt{\varepsilon} h_1^{(2)}\left(\frac{z}{\sqrt{\varepsilon}}\right)} - \frac{0,6h^2}{z^3} \quad (1)$$

Очевидно, что при $h \rightarrow 0$ уравнение сводится к хорошо известному для основного магнитного типа колебаний H_{101} в диэлектрической сфере [2]

$$\frac{j_0(z)}{j_1(z)} = \frac{h_0^{(2)}\left(\frac{z}{\sqrt{\varepsilon}}\right)}{\sqrt{\varepsilon} h_1^{(2)}\left(\frac{z}{\sqrt{\varepsilon}}\right)}$$

а в случае $\varepsilon \rightarrow \infty$

$$\frac{j_0(z) + 0,02h^2 \left[j_2(z) - \frac{2}{z} j_3(z) \right]}{j_1(z)} = -\frac{0,6h^2}{z^3}$$

Для вытянутых диэлектрических сфероидов электромагнитные поля получаются путем замены координат $\xi \rightarrow -i \xi$, $h \rightarrow i h$

$$H_\xi = \frac{1}{i\omega\mu_0 f (\xi^2 - \eta^2)} [j_1(z) - 0,02h^2 j_3(z)] \frac{dU(\eta)}{d\eta}$$

$$H_\eta = \frac{1}{i\omega\mu_0 f (\xi^2 - \eta^2)} \frac{d[j_1(z) - 0,02h^2 j_3(z)]}{dz} U(\eta)$$

$$E_\varphi = [j_1(z) - 0,02h^2 j_3(z)] U(\eta)$$

Соответствующее характеристическое уравнение примет вид

$$\frac{j_0(z) - 0,02h^2 \left[j_2(z) - \frac{2}{z} j_3(z) \right]}{j_1(z)} = \frac{h_0^{(2)}\left(\frac{z}{\sqrt{\varepsilon}}\right)}{\sqrt{\varepsilon} h_1^{(2)}\left(\frac{z}{\sqrt{\varepsilon}}\right)} + \frac{0,6h^2}{z^3} \quad (2)$$

которое в предельном случае $\varepsilon \rightarrow \infty$

$$\frac{j_0(z) - 0,02h^2 \left[j_2(z) - \frac{2}{z} j_3(z) \right]}{j_1(z)} = \frac{0,6h^2}{z^3}$$

Уравнения (1) и (2), носящие комплексный характер, определяют комплексные резонансные частоты магнитных типов колебаний H_{10r} [2]

$$z = x - i y = \varepsilon^{1/2} (\omega' - i \omega'') b / c_0$$

где действительная часть определяет частоту собственных колебаний, а мнимая – постоянную затухания. Результаты решения уравнений (1) и (2) для различных значений диэлектрической проницаемости в диапазоне зна-

чений коефіцієнта сжатия $c = a/b = \xi/(\xi^2 + 1)^{1/2}$ от 0,9 до 1,1 представлены в табл 1.

Значения корней уравнений $z = \varepsilon^{1/2} k_0 f (\varepsilon^2 + 1)^{1/2}$ рассчитаны для $\varepsilon = 40, 80, 150, \infty$. При фиксированной поперечной полуоси b уменьшение коэффициента сжатия приводит к увеличению резонансной частоты, причем скорость увеличения растет в области сплюснутых сфероидов, что свидетельствует о возрастании влияния продольного размера a . Тем не менее, в области коэффициента сжатия близким к единице основное влияние на резонансную частоту оказывает поперечный размер. Так для СР при $\varepsilon = 150$ изменение поперечного размера на 5 % приводит к изменению частоты на 4 %, в то время как изменение продольного размера приводит к изменению резонансной частоты на 1%. Это связано с большей концентрацией электромагнитного поля в экваториальной плоскости.

Таблица 1

ε	$c = a/b$				
	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10
∞	3,2012	3,1722	3,1415	3,1094	3,0755
150	3,1816	3,1526	3,1219	3,0897	3,0558
80	3,1663	3,1372	3,1065	3,0743	3,0404
40	3,1380	3,1088	3,0779	3,0455	3,0115

Значения радиационная добротности, определяемые соотношением $Q = x/y = \omega'/2\omega''$ представлены в табл. 2. Анализ данных показывает, что для больших значений диэлектрической проницаемости степень сжатия СР оказывает малое влияние на его радиационную добротность. Так, значения Q изменяются в пределах 0,3 % для $\varepsilon = 150$ и 0,7 % для $\varepsilon = 40$ при изменении коэффициента сжатия c на 20 %, что свидетельствует о малом влиянии формы ОДР на излучение основного (дипольного) типа колебаний H_{101} .

Таблица 2

ε	$c = a/b$				
	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10
150	311,92	311,52	311,26	311,08	311,00
80	127,90	127,50	127,45	127,34	127,25
40	49,80	49,70	49,58	49,50	49,43

В то же время исследование показало, что при сжатии сфероида ($c < 1$) происходит некоторое увеличение добротности, что обуславливает более широкое использование сплюснутых структур на практике.

Что касается вытянутых сфероидов, то наблюдается монотонное уменьшение добротности, достигающее минимума в случае бесконечного цилиндра с собственным типом колебаний H_{011} . Таким образом, диэлектрическая сфера не является оптимальной резонансной структурой, несмотря на относительную простоту анализа в сферических координатах.

Важным вопросом при исследовании ОДР является минимизация массогабаритных характеристик резонаторов, настроенных на фиксированную частоту. Примем в качестве показателя оптимальности отношение резонансной частоты исследуемой структуры ω' к частоте диэлектрической сферы ω'_c того же объема с тем же значением диэлектрической проницаемости. Чем меньше этот показатель, тем выше массогабаритные характе-

ристики ОДР. Так, в случае сплюснутых и вытянутых сфероидов, приравнявая $V=(4/3)\pi b^2 a = V_c = (4/3)\pi a c^3$, получим $\omega'/\omega'_c = (a_c/b) (z/z_c) = c^{1/3}(z/z_c)$, где z и z_c – корни соответствующих уравнений.

Из табл.3 видно, что показатель увеличивается при вытягивании резонатора и при переходе к диэлектрическому цилиндру будет стремиться к бесконечности. В то же время при увеличении эксцентриситета массогабаритные характеристики улучшаются на 0, 7 % при изменении c на 5 % и на 1, 6 % при изменении c на 10 %.

Таблица 3

ε	$c = a/b$				
	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10
∞	0,9838	0,9926	1,00	1,0060	1,0106
150	0,9839	0,9927	1,00	1,0059	1,0104
80	0,9841	0,9928	1,00	1,0058	1,0102
40	0,9843	0,9929	1,00	1,0057	1,0100

Таким образом подтверждается предположение, что оптимальные показатели могут быть достигнуты в области сплюснутых СР.

Литература

1. Старков М. А. Осесимметричные колебания сфероидальных открытых диэлектрических резонаторов. – Радиотехника и электроника, 1983, т. 28, № 5.
2. Gastine M., Courtois L., Dormann J.L. Electromagnetic resonances of free dielectric spheres. — IEEE Trans., 1967, v. MTT-15, № 12.

Старков М.О. Добротність випромінювання відкритих сфероїдальних діелектричних резонаторів. Проведені теоретичні дослідження сферичних діелектричних резонаторів та отримані співвідношення для визначення їх добротності випромінювання
Ключові слова: сферичний діелектричний резонатор, добротність діелектричного резонатора

Старков М.А. Добротность излучения открытых сфероидальных диэлектрических резонаторов. Проведены теоретические исследования сфероидальных диэлектрических резонаторов и получены соотношения для определения их добротности излучения
Ключевые слова: сферический диэлектрический резонатор, добротность диэлектрического резонатора

Starkov M.A. Quality radiating open spherical resonators. Theoretical investigation of the sphere dielectric resonator are realized and their quality radiating is calculated.
Key words: spherical dielectrical resonator, quality dielectrical resonator

УДК538.114

ВРАХУВАННЯ НЕУЗГОДЖЕНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ ДОСЛІДЖЕНІ СТРУКТУРИ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ В МІКРОСМУЖКОВІЙ ЛІНІЇ МЕТОДОМ ФМР

Осінов А. М., Комарова О. П.

Електромагнітні поля в мікросмужковій лінії характеризуються складною будовою, значну частку якої складають поздовжні складові електричного і магнітного полів. На сьогоднішній день числові дослідження проводяться з використанням таких програмних пакетів як Microwave Office, Microwave Studio т.ін. Різноманітність числових методів, що мають різну точність, зумовлює необхідність експериментальних досліджень, які б їх