

### Література

1. Dielectric Filters and Diplexers // Catalog of the production firm T-CERAM. 2009. Ре-сурс доступу: [www.t-ceram.com/coaxial-resonators.htm](http://www.t-ceram.com/coaxial-resonators.htm)
2. Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т. Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи свя-ти. Т. 1. М.: 1971. – 444 с.
3. Chong-Yun Kang, Ji-Won Choi, Seok-Jin Yoon, Hyun-Jai Kim, Chang-Yub Parc. De- sign of monoblock dielectric filter using (PbCa)(FeNbSn)O<sub>3</sub> ceramics // Journal of materials science: Materials in electronics. No 10 (1999), pp. 661-666
4. Мірських Г.О., Андрусенко Є.М. Експериментальне дослідження монолітних діе- лектричних фільтрів з додатним характером зв'язку резонансних елементів // Вісник НТУУ "КПІ". Серія – Радіотехніка. Радіоапаратобудування. Вип. 38 – 2009 – С. 65 – 69.

*Боженко К.О., Андрусенко Є.М. Модель дворезонаторного монолітного металодіе- лектричного фільтру. Представлена математична модель дворезонаторного моно- літного діелектричного фільтру, яка описує його амплітудно-частотну характе- ристику як у смугі пропускання так і поза неї.*

**Ключові слова:** НВЧ фільтр, керамічні фільтри, діелектричні монолітні фільтри

*Боженко К.А., Андрусенко Е.Н. Модель двухрезонаторного монолитного металоди- электрического фильтра. Представлена математическая модель двухрезонаторного монолитного металодиэлектрического фильтра, которая описывает его амплитуд- но-частотную характеристику, как в полосе пропускания, так и за её пределами.*

**Ключевые слова:** СВЧ фильтр, керамические фильтры, монолитные фильтры

*Bogenko K.A., Andrusenko E.N. Model of the Two-Resonator Monolithic Metal-Dielectric Filter. Mathematic model of the two-resonator monolithic metal-dielectric filter are de- scribed. This model describes the amplitude frequency characteristic both in band-pass and stop-pass.*

**Key words:** UHF filter, ceramic filter, dielectric monolithic filter

УДК 621.372.413

## ОПТИМИЗАЦИЯ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХЗВЕННОГО ПОЛОСОВОГО ФИЛЬТРА НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРАХ С ПОМОЩЬЮ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

*Трубін А.А., Моховиков А.С.*

При конструировании высокочастотных фильтров с заданными полоса- ми пропускания в настоящее время широко применяется метод эквива- лентных схем, с помощью которого определяют коэффициенты связи ре- зонаторов по АЧХ. Недостаток этого метода заключается в ограниченно- сти набора заданных характеристик, невозможности оптимального синтеза фильтров с нестандартными параметрами, например, не симметричных. Применение современных методов оптимизации позволяет с единых пози- ций подойти к решению задачи синтеза фильтров. Среди известных мето- дов мултистарта, генетические алгоритмы (ГА) являются наиболее под- ходящими для решения подобных задач, отличаются простотой реализа- ции и приемлемой эффективностью. Кроме того, использование компью- терных программ, основанных на применении ГА, дает возможность вы- полнить поиск оптимальных параметров универсальным способом для разных типов фильтров, не зависимо от вида АЧХ .

В данной работе предложена программа для оптимизации параметров полосового фильтра на трех диэлектрических резонаторах и приведены результаты реализации АЧХ различных видов.

### **Теоретические основы метода**

Генетические алгоритмы предназначены для решения широкого класса задач оптимизации. В основе ГА лежит метод случайного поиска, основанный на аналогии между законами эволюции живых систем и алгоритмом выбора наилучшего значения целевой функции. Как известно, в процессе эволюции выживают наиболее приспособленные особи. Это приводит к тому, что приспособленность популяции возрастает, позволяя ей лучше выживать в изменяющихся условиях.

Любой организм может быть представлен своим фенотипом, который определяет то, чем является объект в реальном мире, и генотипом, который содержит всю информацию об объекте на уровне хромосомного набора. При этом каждый ген (элемент информации генотипа), имеет свое отражение в фенотипе. Т.о., для решения задачи необходимо представить каждый признак объекта в форме, подходящей для использования в генетическом алгоритме. Все дальнейшее функционирование механизмов ГА производится на уровне генотипа, позволяя обойтись без информации о внутренней структуре объекта, что и обуславливает его широкое применение. В наиболее часто встречающейся разновидности ГА для представления генотипа объекта применяются битовые строки. В этом случае каждому атрибуту объекта в фенотипе соответствует один ген в генотипе объекта. Ген представляет собой битовую строку, чаще всего фиксированной длины, которая представляет собой значение этого признака. Т.о., для того, чтобы определить фенотип объекта (то есть значения признаков, описывающих объект) необходимо знать значения генов, соответствующим этим признакам, то есть генотип объекта. При этом совокупность генов, описывающих генотип объекта, представляет собой хромосому. В некоторых реализациях ее также называют особью. Т.о., в реализации ГА хромосома представляет собой битовую строку фиксированной длины. При этом каждому участку строки соответствует ген. Длина генов внутри хромосомы может быть одинаковой или различной. Чаще применяют гены одинаковой длины.

В ГА за передачу признаков родителей потомкам отвечает оператор, определяющий скрещивание. Действует он следующим образом: из популяции выбираются две особи, называемые родителями; определяется (обычно случайным образом) точка разрыва; потомок определяется как конкатенация части первого и второго родителя. Для увеличения популяции, используется еще один, так называемый оператор мутации, который заключается в том, что с небольшой вероятностью инвертируется чаще всего 1 бит. Использовалась схема функционирования генетического алгоритма в его классическом варианте [1]:

1. В начальный момент времени  $t=0$  случайным образом формировалась начальная популяция, состоящая из  $k$  особей.  $B_0 = \{A_1, A_2, \dots, A_k\}$ .

2. Вычислялась приспособленность каждой особи заданному условию  $F_{A_i} = \text{fit}(A_i)$ ,  $i=1 \dots k$  и популяции в целом  $F_t = \text{fit}(B_t)$  ( $F_A$  – целевая функция).
3. Выбиралась особь  $A_c$  из популяции.  $A_c = \text{Get}(B_t)$
4. С определенной вероятностью (вероятностью кроссовера  $P_c$ ) выбиралась вторая особь из популяции  $A_{c1} = \text{Get}(B_t)$ , на которые воздействовал оператором кроссовера  $A_c = \text{Crossing}(A_c, A_{c1})$ .
5. С определенной вероятностью (вероятностью мутации  $P_m$ ) выполнялась операция мутации.  $A_c = \text{mutation}(A_c)$ .
6. С заданной вероятностью (вероятностью инверсии  $P_i$ ) выполнялась операторация инверсии  $A_c = \text{inversion}(A_c)$ .
7. Полученные хромосомы помещались в популяцию  $\text{insert}(B_{t+1}, A_c)$ .
8. Операции, начиная с пункта 3, выполнялись  $k$  раз. При этом, определялось условие увеличения значения текущего времени  $t = t + 1$ . Если определялось, что выполнено условие останова, то вычисления заканчивались, в противном случае осуществлялся переход на шаг 2.

Наибольшую роль в успешном функционировании алгоритма играет этап отбора родительских хромосом, осуществляемый при выполнении шагов 3 и 4. При этом возможны различные варианты. Наиболее часто используется метод отбора, называемый рулеткой. При использовании этого метода вероятность выбора хромосомы определяется ее приспособленностью, то есть  $P_{\text{Get}(A_i)} \sim \text{Fit}(A_i)/\text{Fit}(B_t)$ . Использование метода рулетки приводит к тому, что вероятность передачи признаков более приспособленными особями потомкам возрастает.

Другой часто используемый метод – турнирный отбор. Он заключается в том, что случайно выбирается несколько особей из популяции (обычно 2) и победителем выбирается особь с наибольшей приспособленностью.

В некоторых реализациях алгоритма применяется так называемая стратегия элитизма, которая заключается в том, что особи с наибольшей приспособленностью гарантировано, переходят в новую популяцию. Использование стратегии элитизма обычно позволяет ускорить сходимость ГА. Недостаток использования стратегии элитизма в том, что повышается вероятность попадания алгоритма в локальный оптимум.

Другой важный момент – определение критериев останова. Обычно в качестве них применяются или ограничение на максимальное число циклов функционирования алгоритма, или определение его сходимости, обычно путем сравнения приспособленности популяции на нескольких циклах и остановки при стабилизации этого параметра.

### Практические результаты

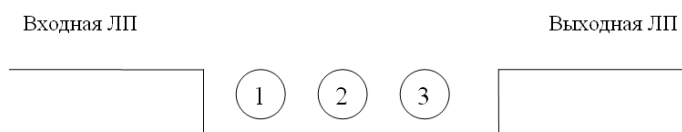


Рис. 1.

Для исследований был выбран фильтр, представляющий собой 3 последовательно размещенных диэлектрических резонатора (ДР), расположенных между входной и выход-

ной линиями передачи (ЛП) (см. рис.1).

Коэффициент передачи такого фильтра имеет вид:

$$T(\omega/\omega_0) = -2 \times k \times Q_D \times (b_1 / (Q_1 \times (\lambda_2 - \lambda_1) \times (\lambda_3 - \lambda_1)) - b_2 / (Q_2 \times (\lambda_2 - \lambda_1) \times (\lambda_3 - \lambda_2)) + b_3 / (Q_3 \times (\lambda_3 - \lambda_1) \times (\lambda_3 - \lambda_2)))$$

где  $Q_D = 5000$  - добротность диэлектрика,

$$Q_S = Q_S(\omega/\omega_0) = \text{Im}(\lambda_S) \times Q_D + \omega/\omega_0 + 2 \times i \times Q_D \times (\omega/\omega_0 - 1 - \text{Re}(\lambda_S)/2),$$

$\lambda_s = \lambda_s(k, k_{12}, k_{13}, k_{23})$  - корни уравнения, определяющего комплексные частоты связанных колебаний системы ДР

$$\lambda^3 - 2 \times i \times k \times \lambda^2 - \lambda \times k^2 - \lambda \times (k_{23})^2 - \lambda \times (k_{12})^2 - \lambda \times (k_{13})^2 + i \times k \times (k_{23})^2 + i \times k \times (k_{12})^2 - 2 \times k_{12} \times k_{13} \times k_{23} = 0;$$

$k$  - коэффициент связи крайних ДР с линией,  $k_{12}, k_{13}, k_{23}$  - коэффициенты взаимной связи между резонаторами,  $s=1,2,3$  [3].

АЧХ такого фильтра:  $L(\omega/\omega_0) = 20 \times \lg |T(\omega/\omega_0)|$ . Необходимо максимально приблизить эту характеристику к "оптимальной":

$$L_0(\omega/\omega_0) = \begin{cases} n_1 \times (\omega/\omega_0 - (\omega/\omega_0)_p), & \text{if } (\omega/\omega_0) < (\omega/\omega_0)_p \\ 0, & \text{if } (\omega/\omega_0)_p < \omega/\omega_0 < (\omega/\omega_0)_k \\ n_2 \times ((\omega/\omega_0)_k - \omega/\omega_0), & \text{if } (\omega/\omega_0) > (\omega/\omega_0)_k \end{cases},$$

где  $n_1$  и  $n_2$  - тангенсы углов наклона левой и правой ветвей АЧХ;  $(\omega/\omega_0)_p$ ,  $(\omega/\omega_0)_k$  - границы части АЧХ, параллельной оси  $\omega/\omega_0$ .

Программа выполнялась в среде Mathcad. В качестве основы использовался модифицированный ГА [2]. Аргументами программы являлась исследуемая на экстремум функция Sqr, точность алгоритма  $\varepsilon$ , количество переменных  $N$ , количество особей в популяции  $\mu$ , начальные границы переменных в виде матрицы  $D$  размером 4 строки на 2 столбца. Число  $N=4$  отвечало количеству коэффициентов связи. Значения  $\varepsilon=10^{-7}$  и  $\mu=10$  выбраны потому, что отношение "эффективность"/"затраченное время" для этих значений является наилучшим. Границы коэффициентов связи выбирались из физических соображений:

$$k \in (0;0,01), k_{12} \in (-0,01;0,01), k_{13} \in (-0,01;0,01), k_{23} \in (-0,01;0,01).$$

Брать большие граничные значения не было необходимости, поскольку вышеуказанные значения связи достаточны для обеспечения нужного результата. Отметим также, что, по построению, применяемый алгоритм сам находил решение за указанными пределами. Функция Sqr, исследуемая на минимум, была определена как сумма квадратов разностей  $L(\omega/\omega_0)$  и  $L_0(\omega/\omega_0)$  в заданных точках. Сами точки выбирались в зависимости от вида желаемой АЧХ. Для получения конкретной характеристики использовалась штрафная функция. Наилучшие результаты по оптимизации удалось получить для полосы пропускания, изменявшейся в пределах от 0.5% до 1%. На рис. 2, 3 приведены результаты поиска оптимальных значений коэффициентов связи для случаев гладкой характеристики АЧХ фильтра.

С помощью предложенного алгоритма можно синтезировать несимметричные АЧХ. Фильтры с такой характеристикой затухания применяются в диплексерах. При этом "скат" только одной ветви характеристики должен

быть крутым. Такие фильтры применяются в паре, причем один из них является “зеркальным отражением” второго относительно прямой  $\omega / \omega_0 = 1$ .

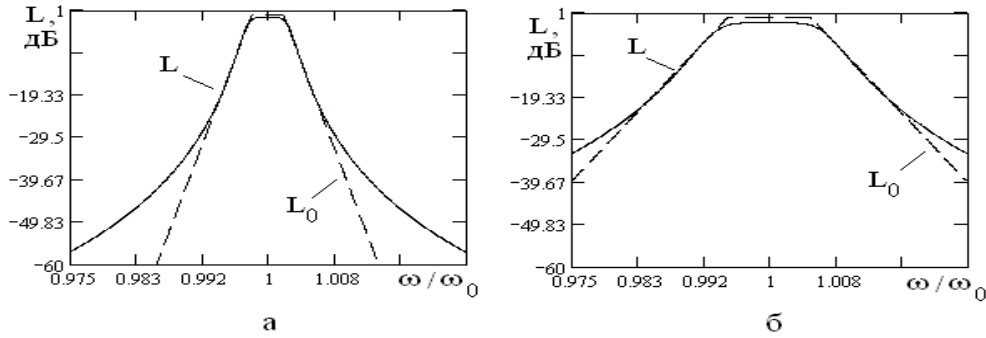


Рис. 2. Результаты расчетов фильтра с максимально плоской характеристикой  
 а -  $\delta\omega / \omega_0 = 0,5\%$ ,  $k = 5.471 \times 10^{-3}$ ,  $k_{12} = 4.035 \times 10^{-3}$ ,  $k_{13} = 2.36 \times 10^{-7}$ ,  $k_{23} = 3.951 \times 10^{-3}$   
 б -  $\delta\omega / \omega_0 = 1,5\%$ ,  $k = 14.836 \times 10^{-3}$ ,  $k_{12} = 12.691 \times 10^{-3}$ ,  $k_{13} = -1.21 \times 10^{-5}$ ,  $k_{23} = -7.58 \times 10^{-3}$

Для полосы пропускания 1% получены АЧХ, показанные на рис.3,4.

Найдя характеристику одного несимметричного фильтра, вторую, дуальную к первой, можно получить, изменив знаки нечетного количества коэффициентов связи.

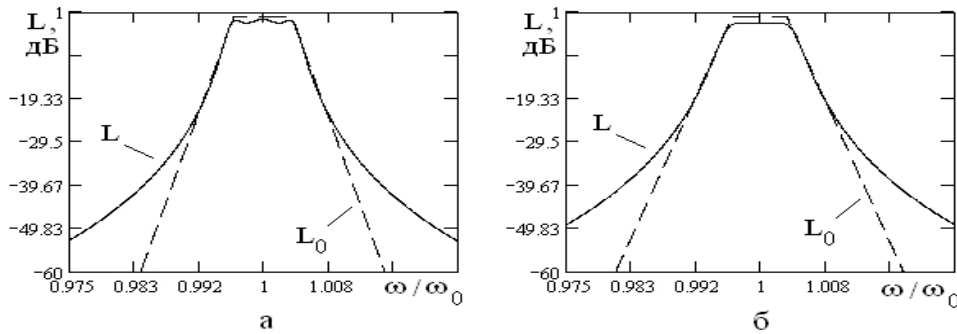


Рис. 3.

- а - характеристика Чебышева для полосы пропускания 1% :  $L_{\max} = -0,7$  дБ,  
 $k = 4.174 \times 10^{-3}$ ,  $k_{12} = 5.314 \times 10^{-3}$ ,  $k_{13} = -2.686 \times 10^{-7}$ ,  $k_{23} = 6.356 \times 10^{-3}$   
 б - характеристика Баттерворта для полосы пропускания 1% :  $L_{\max} = -0,7$ ,  
 $k = 6.409 \times 10^{-3}$ ,  $k_{12} = -4.495 \times 10^{-3}$ ,  $k_{13} = -1.21 \times 10^{-5}$ ,  $k_{23} = -7.58 \times 10^{-3}$ .

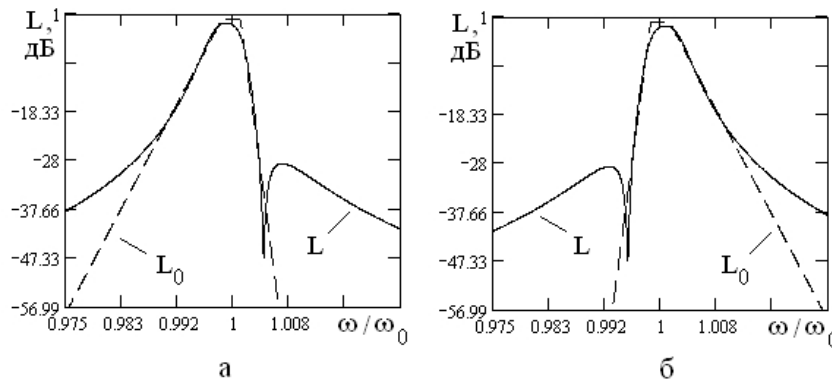


Рис. 4. Характеристики пропускания не симметричных фильтров

## 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/](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