

УДК 621.372.64

## **СИНТЕЗ ЗАГРАЖДАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ С ПЕРЕСТРАИВАЕМЫМИ ПАРАМЕТРАМИ**

**Докт. техн. наук, проф. БОНДАРЕНКО А. В.,  
кандидаты техн. наук, доценты РЕЗНИЧЕНКО В. В., МОЖАР В. И.,  
БОНДАРЕНКО А. А.**

*Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет,  
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,  
Белорусский национальный технический университет*

Синтез заграждающих фильтров – задача, имеющая широкое применение в приборостроении, акустике, радиотехнике, других областях науки и техники. Поэтому создание устройств с универсальными характеристиками является актуальной задачей, имеющей практическое значение.

Классический подход к решению задачи проектирования предполагает синтез по низкочастотному прототипу с использованием частотного преобразования вида

$$p = \frac{s}{s^2 + \omega_0^2}$$

и дальнейшей реализацией схемной функции одним из известных методов.

В [1, 2] предлагается подход, при котором развивается метод преобразования частоты

$$p = s - j\omega_0, \quad (1)$$

позволяющий осуществлять сдвиг амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) цепи по оси частот  $\omega_0$ .

Главной проблемой этого метода является реализация схемных функций с комплексными коэффициентами. Для полосовых фильтров было найдено ее решение, заключающееся в использовании уравнения

$$F(s - j\omega_0) + F(s + j\omega_0) = 2\operatorname{Re}\{F(s - j\omega_0)\}, \quad (2)$$

где  $F(s)$  – схемная (системная) функция низкочастотного фильтра прототипа.

Ограничения, связанные с применением этого метода, сводились к

$$\omega_0 > \omega_n, \quad (3)$$

где  $\omega_n$  – частота пропускания низкочастотного фильтра прототипа.

Использование этого метода для синтеза заграждающих фильтров – основа реализации поставленной задачи.

Согласно методу, изложенному в [1], в качестве базового прототипа для реализации заграждающего фильтра используем высокочастотный фильтр, который в свою очередь можно получить согласно стандартному преобразованию частоты из низкочастотного. Схемная функция  $F(s)$  позволяет осуществить переход к описанию этого фильтра с помощью уравнений состояния с матрицами  $A, B, C, D$ .

Преобразование частоты (1) согласно [1] приводит к системе уравнений:

$$SX(S) = A_1X(S) + B_1U(S); \quad (4)$$

$$Y(S) = C_1X(S) + D_1(S), \quad (5)$$

где  $A_1 = \begin{bmatrix} A & -I\omega \\ I\omega & A \end{bmatrix}$ ;  $B_1 = \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix}$ ;  $C_1 = [C \quad jC]$ ;  $D_1 = D$ , которая является описанием устойчивой системы.

Реализация подобных уравнений затруднена, так как необходима реализация комплексной единицы  $j$ . В [2] показано, что искомым вектор состояния составляет

$$X(s) = [X_1^T(s), X_2^T(s)]^T,$$

где  $X_1(s)$ ,  $X_2(s)$  отражают вещественные и мнимые составляющие вектора  $X(s)$ . Справедливо, что

$$C_1 X(s) = 2C_2 X_1(s). \quad (6)$$

При этом сохраняется ограничение (3), связанное с соотношением (2), так как происходит наложение отрицательных и положительных частотных областей амплитудных характеристик.

Обычно синтез фильтров осуществляется по нормированным частотным характеристикам. Для перехода к необходимым (заданным) частотам произведем денормирование и введем параметр

$$q = \frac{\omega_0}{\omega_s},$$

где  $\omega_s$  – граничная частота.

Тогда уравнения (4), (5) с учетом (6) примут вид:

$$\frac{S}{\omega_s} X_1 = AX_1 + BU - IqX_2; \quad (7)$$

$$\frac{S}{\omega_s} X_2 = AX_2 + IqX_1; \quad (8)$$

$$Y = 2CX_1 + DU. \quad (9)$$

Они являются основой для реализации заграждающих фильтров с перестраиваемыми характеристиками.

Рассмотрим иллюстративный пример.

Фильтр Баттерворта 2-го порядка обладает схемной функцией для нормированного НЧ-прототипа вида

$$F(s) = \frac{1}{s^2 + 1,4s + 1}.$$

Переход к ВЧ-фильтру дает

$$F(s) = \frac{s^2}{s^2 + 1,4s + 1}.$$

Матрицы  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  для уравнений (7)–(9) примут вид:

$$A = \begin{bmatrix} -1,4 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad C = [1,4 \quad 1]; \quad D = 1.$$

Реализация перестраиваемого фильтра в системе MathLab представлена на рис. 1, где за счет умножений меняются параметры  $\omega_s$  и  $q$ . Переменная по входу 2 определяет параметр  $q$ , а по входу 4 –  $\omega_s$ .

Структура фильтра на рис. 1 является типовой. Поэтому, используя каскадирование, легко получить с ее помощью фильтры с различными характеристиками более высоких порядков.

Важно отметить, что получаемые обладают свойством арифметической симметрии.

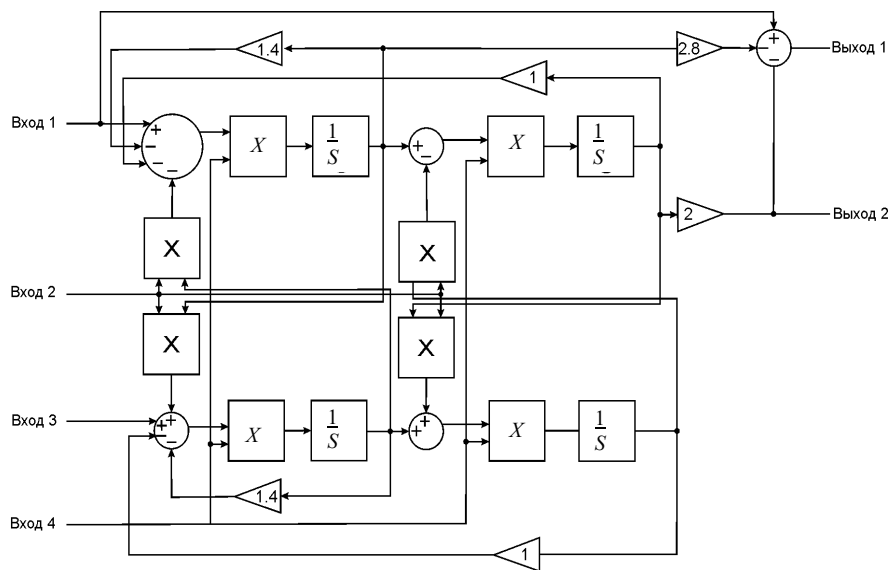


Рис. 1

Амплитудно-частотная характеристика, полученная в результате моделирования при  $\omega_s = 5$ ;  $q = 20$ , представлена на рис. 2.

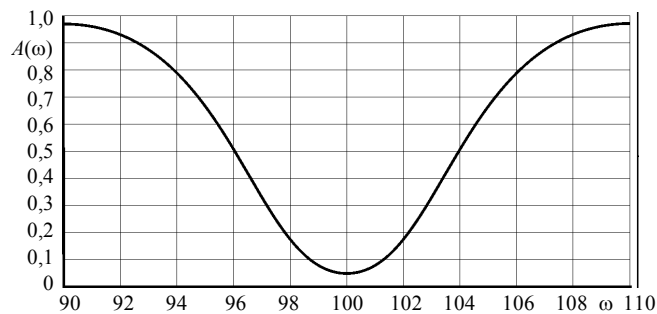


Рис. 2

### ВЫВОДЫ

1. Предложенный метод позволяет по типовым нормируемым схемным функциям синтезировать заграждающий фильтр, обладающий арифметически-симметричной амплитудно-частотной характеристикой.

2. Фильтры предложенной структуры легко перестроить на заданную частоту и добротность, что позволяет разрабатывать универсальный модуль, с помощью которого можно получить любую заданную характеристику.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаренко, А. В. Синтез полосового фильтра с помощью схемной функции с комплексными коэффициентами / А. В. Бондаренко, В. В. Резниченко, В. И. Можар // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2005. – № 4. – С. 47–52.

2. Бондаренко, А. В. Преобразование частоты для синтеза полосовых фильтров / А. В. Бондаренко, В. В. Резниченко // Реконструкция: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. – СПб., 2005. – Ч. 2. – С. 130–134.

Представлена кафедрой  
электротехники и электроники

Поступила 12.02.2009