

---

---

# ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

---

---

УДК 681.586

В. В. ИВАНОВ, В. К. ШАКУРСКИЙ, М. В. ШАКУРСКИЙ

## СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ГЕНЕРАТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Рассматривается задача синтеза цифровых автоколебательных систем. Представлено решение задачи синтеза цифрового фильтра со смещаемой фазочастотной характеристикой.

*Ключевые слова:* цифровая автоколебательная система, баланс фаз, цифровой фильтр, амплитудно-частотная характеристика, фазочастотная характеристика.

Цифровые генераторные преобразователи состоят из аппаратного модуля, в котором происходит преобразование контролируемого физического параметра в управляющее воздействие, и программного модуля, представляющего собой виртуальную управляемую автоколебательную систему, преобразующую управляющее воздействие в изменение частоты генерируемого периодического сигнала [1, 2].

Основой автоколебательной системы являются цифровые фильтры (ЦФ) и обратные связи, необходимые для выполнения условий баланса амплитуд и баланса фаз. Частотный диапазон, способы управления и способы настройки генераторных преобразователей определяют свойства ЦФ.

Наиболее эффективный способ управления частотой генерируемого сигнала — внесение дополнительного фазового сдвига в автоколебательную систему, который изменяет условие баланса фаз. Следовательно, ЦФ должны иметь управляемую фазочастотную характеристику (ФЧХ). При этом амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) должна сохранять заданную полосу пропускания, в которой выполняется условие баланса амплитуд.

При настройке генераторного преобразователя в режиме повышенной чувствительности необходимо и смещать ФЧХ, и изменять ее крутизну.

Разрешающую способность цифровых генераторных преобразователей определяет количество отсчетов в „скользящей“ выборке сигнала. Например, при точности преобразования порядка долей процента, количество отсчетов должно составлять единицы и десятки тысяч. Обработка такого количества отсчетов требует увеличения интервала дискретизации, а это ограничивает частотный диапазон использования генераторных преобразователей. Необходимы быстрые алгоритмы цифровой фильтрации.

Как показывают исследования алгоритмов цифровой фильтрации, вышеперечисленным условиям удовлетворяют цифровые фильтры, которые синтезируются методом частотной выборки.

В основе метода частотной выборки лежит аппроксимация АЧХ фильтра рядом Котельникова, поэтому для реализации заданной АЧХ нужны элементарные цифровые фильтры (ЭЦФ), соответствующие элементам ряда: т.е. АЧХ элементарных ЦФ должны описываться функцией sinc, а ФЧХ должны быть линейной функцией.

Одним из способов синтеза ЭЦФ является использование „скользящего“ комплексного дискретного преобразования Фурье [3, 4]. В этом случае средняя частота каждого ЭЦФ равна соответствующей составляющей спектра „скользящей“ выборки сигнала, начиная с нулевой. Комплексные отсчеты спектра „скользящей“ выборки сигнала определяются выражением

$$X_{q,n} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_n e^{\frac{-2j\pi nq}{N}}, \quad (1)$$

где  $u$  — массив отсчетов входного сигнала;  $q$  — номер спектральной составляющей и соответственно номер ЭЦФ,  $N$  — количество отсчетов в выборке сигнала.

При смещении выборки на один отсчет исключается первое слагаемое с нулевой фазой в сумме (1) и добавляется одно новое. Все остальные слагаемые остаются неизменными, изменяются лишь их порядковые номера на единицу, что эквивалентно повороту суммарного вектора на угол  $2\pi nq/N$ . Таким образом, значение очередного вектора можно определить на основе значения предыдущего вектора. Умножение вектора на единичный вектор поворота с заданным углом  $\psi$  позволяет внести в ЭЦФ необходимое смещение по фазе, что приводит к смещению его ФЧХ. В результате математическая модель работы ЭЦФ принимает следующий вид:

$$U_{q,n} = 2 \left( \left( X_{q,n-1} e^{\frac{2j\pi q}{N}} - \frac{u_{n-N-1}}{N} e^{\frac{2j\pi q}{N}} + \frac{u_n}{N} e^{\frac{2j\pi q}{N}} \right) e^{j\psi q} \right). \quad (2)$$

Комплексное значение выходного сигнала ЦФ определяется суперпозицией комплексных значений сигналов ЭЦФ:

$$U_n = \sum_q \left( K_q (-1)^q U_{q,n} \right), \quad (3)$$

где  $K_q$  — амплитудный коэффициент выходного сигнала соответствующего ЭЦФ; множитель  $(-1)^q$  необходим для согласования ФЧХ отдельных ЭЦФ.

Отсчеты выходного сигнала ЦФ определяются либо как действительная, либо как мнимая составляющие вектора (3):

$$u_{\text{вых},n} = \text{Re}(U_n), \quad u'_{\text{вых},n} = \text{Im}(U_n). \quad (4)$$

Это позволяет дополнительно смещать ФЧХ на угол  $\pi/2$ .

Для нулевого ЭЦФ выражение (1) преобразуется к виду

$$X_{0,n} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u_n. \quad (5)$$

Математическая модель работы нулевого ЭЦФ имеет следующий вид:

$$U_{0,n} = X_{0,n-1} - \frac{u_{n-N-1}}{N} + \frac{u_n}{N}. \quad (6)$$

Частотная характеристика ЭЦФ при использовании действительной составляющей комплексного выходного сигнала описывается выражением

$$S_q(\tilde{\omega}) = \left( \frac{-\tilde{\omega} \sin(-2\pi\tilde{\omega})}{\pi(\tilde{\omega}^2 - q^2)} - j \frac{\tilde{\omega} - \tilde{\omega} \cos(-2\pi\tilde{\omega})}{\pi(\tilde{\omega}^2 - q^2)} \right) e^{j\psi q}, \quad (7)$$

модуль которого является АЧХ, а аргумент — ФЧХ,  $\bar{\omega}$  — нормированная частота.

На рис. 1 приведены АЧХ и ФЧХ четвертого ЭЦФ ( $q = 4, \psi = 0$ ). Изменение угла наклона ФЧХ при неизменном интервале дискретизации достигается изменением количества отсчетов в „скользящем“ окне. Период единичной нормированной частоты равен времени получения этих отсчетов. Следовательно, при изменении угла наклона ФЧХ смещаются средние реальные частоты фильтров. Это усложняет настройку генераторных преобразователей. Для компенсации смещения средних частот необходимо смещать ФЧХ.

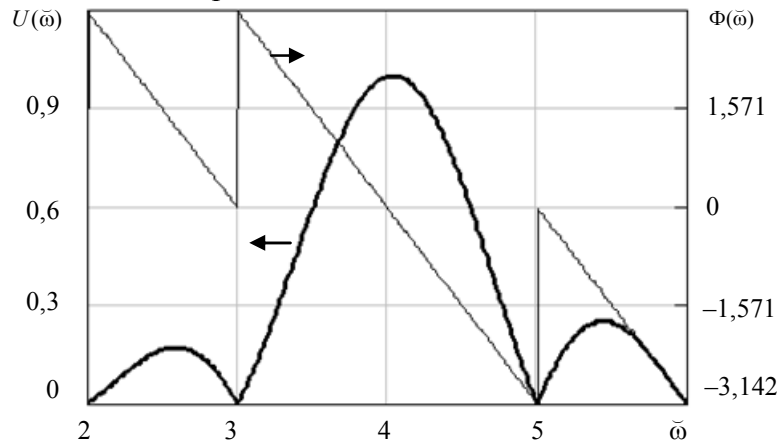


Рис. 1

В генераторных преобразователях необходимо синтезировать ЦФ с большим подавлением сигнала вне полосы пропускания, чем у ЭЦФ, и с расширенной полосой пропускания, чтобы максимально использовать участок  $\pm\pi$  ФЧХ. Это достигается дополнительным введением двух соседних ЭЦФ с определенными амплитудными коэффициентами. Например, добавив к четвертому ЭЦФ с единичным амплитудным коэффициентом третий и пятый с амплитудными коэффициентами 0,41 и 0,44, получим частотные характеристики, приведенные на рис. 2 ( $\psi = -0,2$  для всех ЭЦФ). Таким образом, подавление сигнала вне полосы пропускания увеличилось, ФЧХ сместилась на заданный угол и полоса пропускания стала шире, что позволяет максимально использовать область  $\pm\pi$  ФЧХ при соответствующем выборе коэффициентов усиления в цепи обратной связи автоколебательной системы. Очевидно, что ЦФ, состоящий из трех ЭЦФ, является оптимальным.

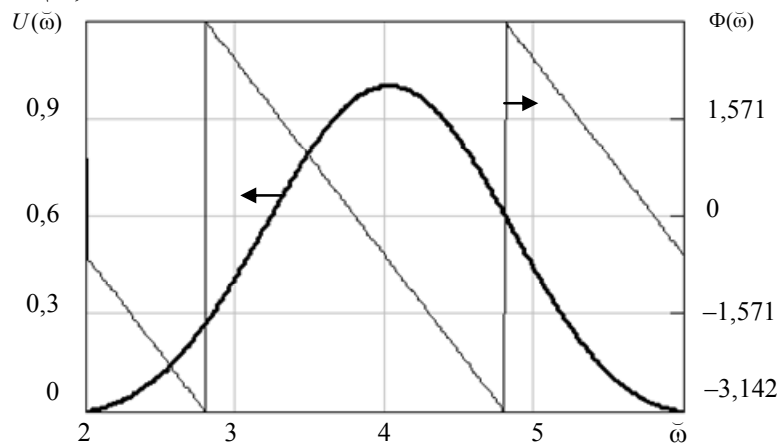


Рис. 2

В генераторных преобразователях повышенной чувствительности, при реализации фильтра с инвертированной ФЧХ, используется блок выделения постоянной составляющей. Его функцию выполняет нулевой ЭЦФ, частотные характеристики которого совпадают с приведенными на рис. 2.

Таким образом, использование метода частотной выборки и прямого „скользящего“ комплексного дискретного преобразования Фурье позволяет синтезировать цифровой фильтр, обладающий необходимым быстродействием и широкими возможностями для независимого смещения фазочастотных характеристик, что необходимо при настройке генераторных преобразователей.

Приведенные результаты получены в рамках НИР, выполняемой по плану фундаментальных исследований Поволжского государственного университета сервиса, поддерживаемых госбюджетным финансированием.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шакурский В. К., Иванов В. В. Увеличение чувствительности генераторных параметрических преобразователей // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 7. С. 47—51.
2. Шакурский В. К., Нагаев Д. А. Цифровой генераторный преобразователь повышенной чувствительности // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 1. С. 45—49.
3. Шакурский В. К., Шакурский М. В. Математическая модель цифровых фильтров, реализуемых методом частотной выборки // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2011. № 2(16). С. 94—96.
4. Заявка № 2011122036/08. Цифровой фильтр со смещаемой фазочастотной характеристикой / В. К. Шакурский, М. В. Шакурский. Решение о выдаче патента РФ на полезную модель от 24.06.2011.

#### Сведения об авторах

**Виктор Васильевич Иванов**

— д-р техн. наук, доцент; Поволжский государственный университет сервиса, кафедра информационного и электронного сервиса, Тольятти; E-mail: Ivanov@tolgas.ru

**Виктор Константинович Шакурский**

— д-р техн. наук, профессор; Тольяттинский государственный университет, кафедра электроснабжения и электротехники; E-mail: Shakurskiy@mail.ru

**Максим Викторович Шакурский**

— Поволжский государственный университет сервиса, кафедра информационного и электронного сервиса, Тольятти; зав. лабораторией; E-mail: M.Shakurskiy@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
информационного и электронного  
сервиса ПВГУС

Поступила в редакцию  
29.12.11 г.