

Д. т. н. В. К. ШАКУРСКИЙ, д. т. н. В. В. ИВАНОВ,
Д. А. НАГАЕВ

Россия, Тольяттинский гос. университет, Тольяттинский
гос. университет сервиса
E-mail: Shakurskiy@mail.ru

Дата поступления в редакцию
29.10.2007 г.

Оппонент к. ф.-м. н. И. И. СОКОЛОВСКИЙ
(Ин-т «Трансмаг», г. Днепропетровск)

ЦИФРОВЫЕ ГЕНЕРАТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОВЫШЕННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ

Рассматривается реализация режима сверхчувствительности в цифровых автоколебательных системах с целью синтеза цифровых генераторных преобразователей повышенной чувствительности.

Одной из проблем, решаемых исследователями и разработчиками генераторных преобразователей и модуляторов с выходным ЧМ- или ФМ-сигналом, является увеличение их чувствительности к управляющему параметру.

Частота генерируемого сигнала в основном определяется нулевой точкой эквивалентной фазочастотной характеристики (ФЧХ) разомкнутой цепи автоколебательной системы при условии выполнения баланса амплитуд. Во всех широко известных структурах квазигармонических автоколебательных систем чувствительность нулевой точки ФЧХ к управляющему параметру имеет потенциальные ограничения. Авторами [1] был выявлен новый эффект, позволяющий реализовать чувствительность, которая в десятки и сотни раз может превышать указанные потенциальные значения. Данный эффект был назван эффектом сверхчувствительности автоколебательных систем. Эффект реализуется введением в автоколебательную систему дополнительного фильтра с инвертированным наклоном ФЧХ по отношению к типичному наклону.

Эффект объясняется следующим. При вычитании двух типичных ФЧХ с близким друг к другу наклоном и смещенных относительно друг друга, нулевая точка эквивалентной ФЧХ может находиться далеко от области частот, ограниченной нулевыми точками вычитаемых ФЧХ. При сложении типичных ФЧХ нулевая точка эквивалентной ФЧХ всегда находится в области частот, ограниченной нулевыми точками суммируемых ФЧХ [1, с. 15].

Для инвертирования ФЧХ разработана двухканальная структура [1, с. 28]. Выполненные исследования показали, что эффект сверхчувствительности реализуется в любой автоколебательной системе указанного класса. Условием устойчивой работы автоколебательной системы в режиме сверхчувствительности является типичный наклон эквивалентной ФЧХ разомкнутой цепи [2, 3]. На базе указанного эффекта разработаны генераторные аналоговые параметрические преобразователи повышенной чув-

ствительности с выходным ЧМ- и ФМ-сигналом, преобразователи девиации частоты и девиации фазы, модуляторы [1, 4].

Недостатком аналоговых преобразователей в режиме повышенной чувствительности является возрастание дополнительной погрешности при воздействии дестабилизирующих факторов. Избавиться от этого недостатка можно реализацией режима сверхчувствительности в цифровых автоколебательных системах. В цифровых генераторных преобразователях дополнительная погрешность равна нулю, но возникают другие проблемы, которые требуют проведения исследований. Это ступенчатость ФЧХ, проблема управления цифровой автоколебательной системой, проблема настройки заданной крутизны преобразования и другие.

Целью статьи является определение особенностей синтеза цифровых управляемых автоколебательных систем в режиме сверхчувствительности.

Рассмотрим реализацию цифровой автоколебательной системы с однопетлевой обратной связью в режиме сверхчувствительности, структура которой приведена на **рис. 1**. Система содержит полосный фильтр 1 с инвертированным наклоном ФЧХ, усилитель 2, нелинейный блок 3 и полосный фильтр 4 с типичной ФЧХ.

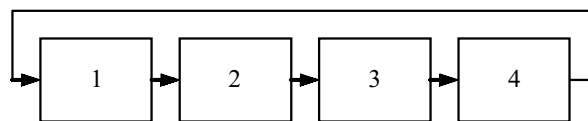


Рис. 1

Исследования автоколебательной системы проводились в среде Simulink математической системы MATLAB. Была разработана модель цифровой автоколебательной системы, которая приведена на **рис. 2**.

Модель фильтра с инвертированным наклоном ФЧХ приведена на **рис. 3**. Использовались цифровые полосные фильтры с конечной импульсной характеристикой (КИХ), т. к. они обладают линейными ФЧХ, что необходимо для получения линейных характеристик разрабатываемых преобразователей.

Наличие в модели фильтра с инвертированным наклоном ФЧХ смесителей приводит к жесткому возбуждению автоколебательной системы. Это потребовало введения блока раскачки (см. рис. 2). Для снятия характеристик используется частотомер и осциллограф. В обратную связь введен блок варь-

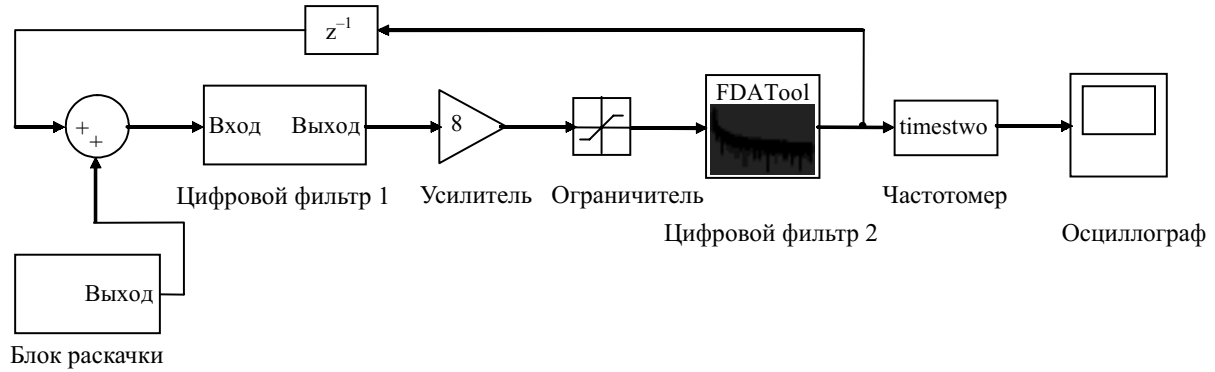


Рис. 2

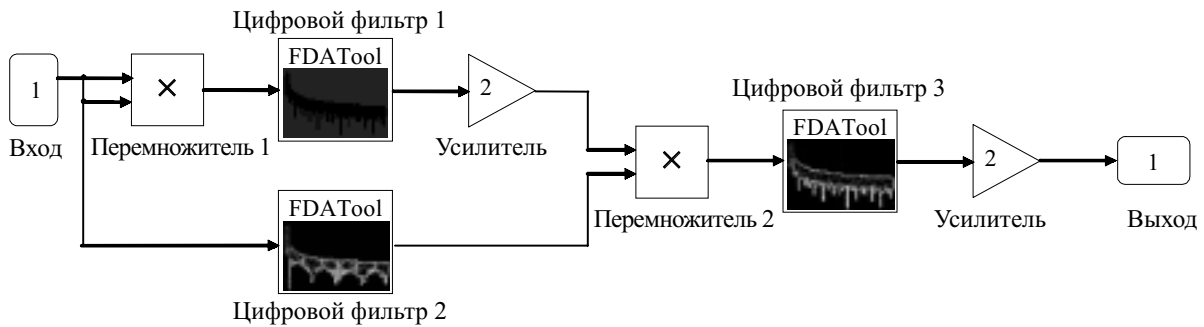


Рис. 3

руемой задержки, с помощью которого имитируется управление частотой генерируемого сигнала изменением величины вносимого фазового сдвига.

Модель фильтра с инвертированным наклоном ФЧХ строится по двухканальной схеме. Второй канал работает на удвоенной частоте входного сигнала. Для этого используется перемножитель 1. С помощью перемножителя 2 и фильтра 3 выделяется сигнал с основной частотой. Если фазовый сдвиг в фильтрах 2 больше, чем суммарный фазовый сдвиг в фильтрах 1 и 3, то результирующий фазовый сдвиг в данной модели фильтра меняет знак по сравнению с типичным фильтром. Вариацией наклонов ФЧХ фильтров 1, 2 и 3 можно получить эквивалентную ФЧХ с типичным наклоном, с нулевым наклоном и с инвертированным наклоном.

Определим возможные частоты генерируемых колебаний. Уравнение баланса фаз для структуры автоколебательной системы рис. 2 имеет вид

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_{\text{вн}} = -2\pi n, \quad (1)$$

где φ_1, φ_2 — фазовые сдвиги в фильтрах;
 $\varphi_{\text{вн}}$ — вносимый фазовый сдвиг;
 $n = 1, 2, 3, \dots$

Используем выражение для ФЧХ цифрового КИХ-фильтра

$$\varphi(f) = -\frac{\pi R}{F_d} f,$$

где R — порядок фильтра;
 F_d — частота дискретизации.

Запишем также выражение для ФЧХ блока задержки

$$\varphi(f) = -\frac{2\pi r}{F_d} f,$$

где r — количество интервалов между выборками, на время которых происходит задержка ($r \geq 1$).

Подставим их в (1) и получим выражение для частоты генерируемых сигналов:

$$f = \frac{n}{\frac{R_1}{F_{d1}} - \frac{R_2}{2F_{d2}} + \frac{R_3}{2F_{d3}} + \frac{R_4}{2F_{d4}} + \frac{r}{F_{d5}}}. \quad (2)$$

Условием устойчивости колебаний является положительный знак знаменателя (2). Для увеличения чувствительности необходимо минимизировать знаменатель.

Выполненные исследования компьютерной цифровой модели показали, что порядок фильтров (количество выборок КИХ) и частоту дискретизации следует использовать для настройки автоколебательной системы. При этом полоса фильтра определяется отношением частоты дискретизации к порядку фильтра. С учетом ступенчатого характера ФЧХ увеличение разрешающей способности в полосе фильтра требует увеличения частоты дискретизации и соответствующего увеличения порядка фильтров.

Наиболее эффективным способом управления частотой генерируемого сигнала является внесение в цепь обратной связи автоколебательной системы варьируемого частотонезависимого фазового сдвига. Управляющий фазовращатель может быть вне процессора, реализующего автоколебательную систему.

Вводя в уравнение баланса фаз управляемый фазовый сдвиг фазовращателя $\pm\varphi(x)$, получим выражение для характеристики преобразования фазового сдвига в частоту генерируемого сигнала:

$$f(x) = \frac{n \pm \frac{\varphi(x)}{2\pi}}{\frac{R_1}{F_{d1}} - \frac{R_2}{2F_{d2}} + \frac{R_3}{2F_{d3}} + \frac{R_4}{2F_{d4}} + \frac{r}{F_{d5}}} \quad (3)$$

Выполненные эксперименты на компьютерных моделях подтверждают сделанные выводы. Например, при крутизне эквивалентной ФЧХ фильтра 1 (рис. 1) $S_{\varphi 1} = \pi \cdot 6,75 \cdot 10^{-3}$ и крутизне эквивалентной ФЧХ фильтра 4 $S_{\varphi 2} = \pi \cdot 9 \cdot 10^{-3}$ получена характеристика, приведенная на рис. 4, где фазовый сдвиг — в градусах, а частота — в герцах.

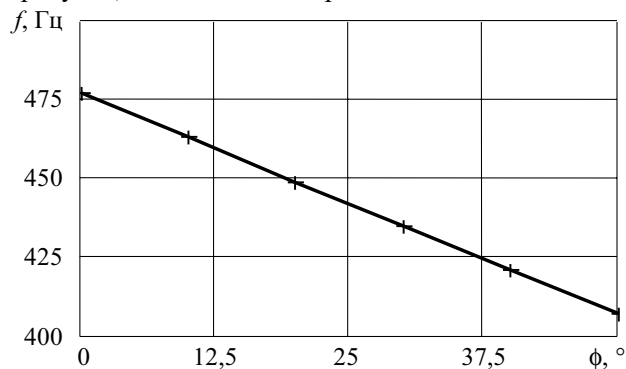


Рис. 4

Характеристика получена варьированием вносимой задержки, величина которой затем пересчитывалась в фазовый сдвиг на частоте генерируемого сигнала. Характеристика имеет ступенчатый характер (на рис. 4 она аппроксимирована линией).

Выполнены аналогичные исследования других цифровых автоколебательных систем в режиме повышенной чувствительности, например с двухпетлевой обратной связью, с комбинационным взаимодействием трех сигналов некратных частот [5, 6].

По результатам исследований можно сделать следующие выводы.

Линейные ФЧХ цифровых фильтров проходят через начало координат, поэтому смещение нулевых точек ФЧХ приводит к одновременному изменению их крутизны и наоборот. Это усложняет про-

цедуру настройки цифровых генераторных преобразователей.

Ступенчатость ФЧХ цифровых фильтров приводит к дискретности характеристики преобразователя. Увеличение чувствительности преобразователя требует увеличения разрешающей способности и должно сопровождаться увеличением порядка фильтров и увеличением частоты дискретизации. Возрастает объем операций на каждом интервале между выборками. В свою очередь это снижает быстродействие и ограничивает диапазон частот генерируемых сигналов.

В структуре цифровой автоколебательной системы в цепи обратной связи необходим элемент задержки как минимум на один интервал между выборками. Это обеспечивает устойчивость автоколебаний.

Наклон эквивалентной ФЧХ автоколебательной системы должен быть типичным. В противном случае возникает эффект частотной неустойчивости. В процессе возбуждения автоколебаний происходит смещение частоты в сторону границы полосы фильтра. Нарушается баланс амплитуд и происходит срыв автоколебаний.

Полученные результаты позволяют говорить о перспективности данного нового класса цифровых генераторных преобразователей.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Иванов В. В., Шакурский В. К. Генераторные, фазовые и частотные преобразователи и модуляторы.— М.: Радио и связь, 2003.
2. Иванов В. В., Шакурский В. К. Эффект преобразования в комбинационном генераторе девиации частоты сигнала синхронизации // Радиотехника.— 2004.— № 4.— С. 37—40.
3. Иванов В. В., Шакурский В. К. Анализ свойств управляемого генератора в режиме повышенной чувствительности // Электросвязь.— 2004.— № 7.— С. 43—51.
4. Иванов В. В., Шакурский В. К. Увеличение чувствительности генераторных параметрических преобразователей // Изв. вузов. Приборостроение.— 2005.— № 7.— С. 47—51.
5. Иванов В. В. Частотно-фазовые преобразователи повышенной чувствительности // Там же.— 2005.— № 9.— С. 13—17.
6. Иванов В. В., Нагаев Д. А. Цифровые генераторные преобразователи сигналов с угловой модуляцией // Изв. Самарского научного центра РАН.— 2006.— Спец. выпуск.— С. 31—34.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

Гадзиковский В. И. Методы проектирования цифровых фильтров.— М.: Горячая линия—Телеком, 2007.— 416 с.

Рассмотрены методы математического синтеза одномерных скалярных вещественных нерекурсивных цифровых фильтров (ЦФ) и эвристического синтеза рекурсивных ЦФ. Разработаны алгоритмы синтеза одномерных скалярных комплексных ЦФ (нерекурсивных и рекурсивных). Изложены методики расчёта разрядности коэффициентов и операционных устройств одномерных скалярных и векторных ЦФ, а также требуемого быстродействия вычислителя, что необходимо для выбора элементной базы — сигнального процессора (DSP). Приведены примеры моделирования процессов цифровой фильтрации.

Для научных работников и инженеров, занимающихся проектированием систем цифровой обработки сигналов и цифровым моделированием технических систем, а также для студентов и аспирантов радиотехнических специальностей вузов.

