

Д. А. НАГАЕВ, В. К. ШАКУРСКИЙ

## ЦИФРОВОЙ ГЕНЕРАТОРНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ВЫСОКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Представлен пример реализации программного модуля цифрового генераторного преобразователя в режиме высокой чувствительности. Рассматриваются вопросы выбора цифровых фильтров, выбора способа управления цифровым генератором, устойчивости генерируемых колебаний в режиме высокой чувствительности, ввода и вывода информации, линейности характеристики преобразователя. Приведены результаты компьютерного моделирования преобразователя.

*Ключевые слова:* программный модуль, цифровой фильтр, генераторный преобразователь, конечная импульсная характеристика.

Недостатками аналоговых генераторных преобразователей контролируемого физического параметра в частоту выходного сигнала являются наличие дополнительной погрешности, вызванной воздействием внешних и внутренних возмущающих факторов, и нелинейность характеристик преобразования. Использование режима высокой чувствительности увеличивает дополнительную погрешность преобразования [1, 2]. Исключить эти недостатки можно, если аналоговый управляемый генератор заменить цифровым. Однако при программной реализации автоколебательных систем возникают вопросы, которые требуют проведения дополнительных исследований. Это вопросы выбора цифровых фильтров, устойчивости

работы цифровой автоколебательной системы, ее управляемости, ввода в процессор информации и ее вывода, минимизации программных затрат и другие вопросы.

Цифровой генераторный преобразователь состоит из аппаратного и программного модулей. В аппаратном модуле контролируемый физический параметр преобразуется в управляющий, изменение которого вызывает соответствующее изменение частоты генерируемого периодического сигнала в программном модуле. Алгоритм работы программного модуля в общем случае определяется структурой соответствующей аналоговой автоколебательной системы.

В результате выполненных исследований разработан и реализован программный модуль цифрового генератора с однопетлевой обратной связью, обеспечивающий высокую чувствительность. Управление частотой генерируемого сигнала осуществляется внесением дополнительного фазового сдвига с помощью аппаратного модуля. Другие способы, например изменение порядка фильтров или изменение периода дискретизации, менее эффективны [3]. Структура программного модуля генераторного преобразователя приведена на рис. 1.

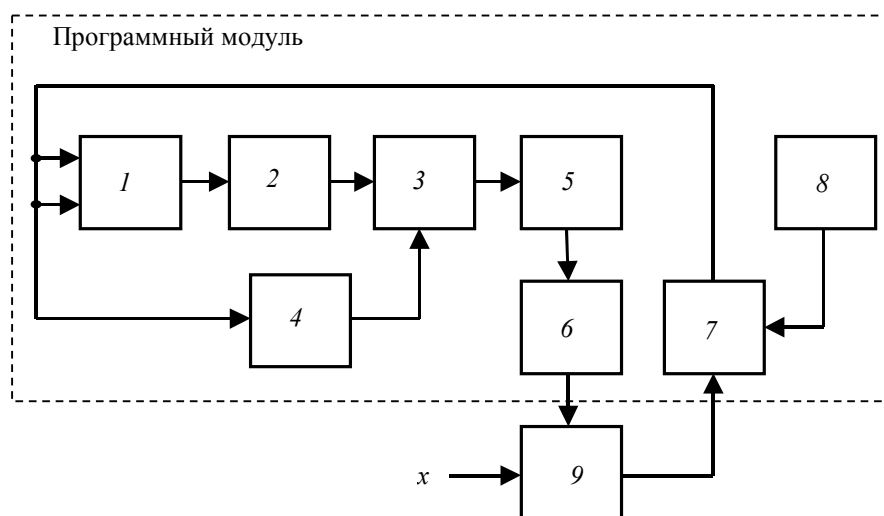


Рис. 1

В блоках 1 и 3 используются программы перемножения сигналов. Программы реализации цифровых фильтров используются в блоках 2, 4, 5, 7. В блоке 6 используется программа реализации нелинейного усилителя. Блоки 1—5 совместно реализуют полосовой цифровой фильтр с инвертированной эквивалентной фазочастотной характеристикой (ФЧХ), который необходим для реализации режима высокой чувствительности. Программа генерации сигнала раскачки реализуется в блоке 8.

Аппаратный модуль состоит из управляемого параметром  $x$  фазовращателя 9, с помощью которого в цифровой генератор вносится дополнительный фазовый сдвиг. Изменение дополнительного фазового сдвига приводит к смещению нулей эквивалентной ФЧХ цифрового генератора и соответственно к изменению частоты генерируемого сигнала. Выходной сигнал нелинейного усилителя 6, как и фазовращателя, имеет форму меандра. Это позволило исключить из аппаратного модуля аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи.

Цифровой генератор обладает жестким возбуждением из-за наличия в нем перемножителей, поэтому его возбуждение осуществляется с помощью блока раскачки 8. В установленном режиме гармонический сигнал с выхода цифрового фильтра 7 поступает на перемножитель 1 и цифровой фильтр 4. Фильтр 2 выделяет сигнал с удвоенной частотой. Перемножитель 3 и фильтр 5 нужны для выделения сигнала с разностной частотой. Фазовый сдвиг сигнала в фильтре 4 больше, чем суммарный фазовый сдвиг в фильтрах 2 и 5, поэтому общий фазовый сдвиг сигнала на выходе фильтра 5 изменяет свой знак. Эквивалентная ФЧХ блоков 1—5 получает противоположный наклон по сравнению с типичным наклоном отдельных

фильтров. Эквивалентная ФЧХ разомкнутой цепи автоколебательной системы является суммой типичной ФЧХ фильтра 7 и нетипичной (инвертированной) ФЧХ блоков 1—5.

Для получения линейной зависимости изменения частоты генерируемого сигнала от величины дополнительного фазового сдвига нужны фильтры с линейной ФЧХ. Этому требованию удовлетворяют цифровые фильтры с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтры). Жесткие требования к форме амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) КИХ-фильтра не предъявляются. Это позволяет упростить форму импульсной характеристики и использовать значения отсчетов  $\pm 1$ .

На рис. 2 показано, как преобразуется форма огибающей импульсной характеристики  $h(k)$  цифрового фильтра. На рис. 3 показано, как при этом преобразуется форма АЧХ  $H(f)$  фильтра. В результате уменьшается необходимый объем памяти процессора для хранения отсчетов импульсной характеристики, а из структуры цифрового фильтра исключаются блоки умножения. Следует учитывать уменьшение полосы пропускания фильтра, ФЧХ остается линейной.

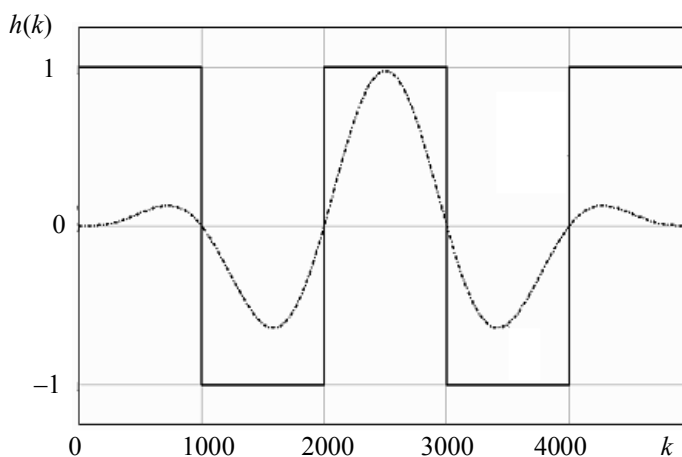


Рис. 2

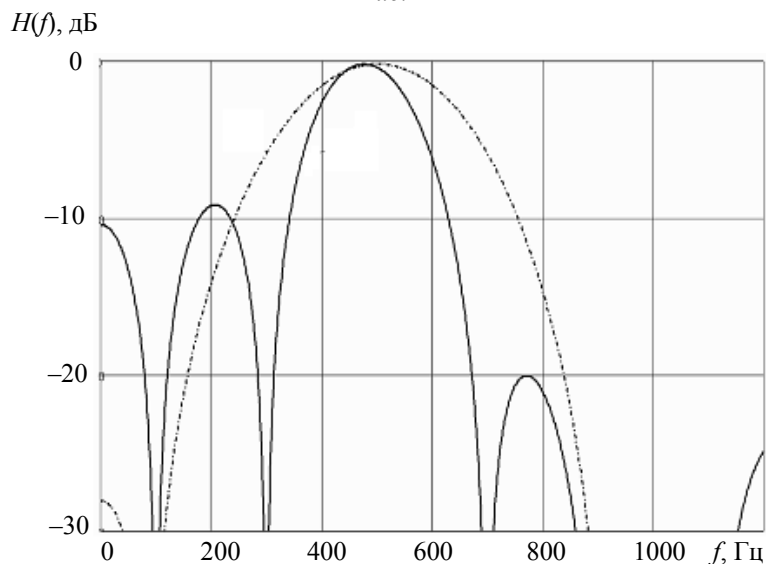


Рис. 3

ФЧХ цифрового КИХ-фильтра является дискретной функцией:

$$\varphi(f) = (-\pi R T_d) f = (-\pi R T_d) \frac{n}{T_d} = -\pi R n, \quad (1)$$

где  $R$  — порядок фильтра (количество отсчетов импульсной характеристики),  $T_d$  — период дискретизации,  $n$  — отношение периода дискретизации к периоду сигнала (принимает целые значения).

Частота генерируемого сигнала определяется уравнением баланса фаз:

$$\varphi_2(2f) - \varphi_4(f) + \varphi_5(f) + \varphi_7(f) + \varphi_9(x) = -2\pi m, \quad (2)$$

где  $m = 0, 1, 2 \dots$  — порядковый номер нуля эквивалентной ФЧХ генератора. Индексы слагаемых в (2) соответствуют номеру блока (рис. 1).

Используя соотношение (1), получим

$$f(x) = \frac{2\pi m + \varphi_9(x)}{(2R_2 + R_5 + R_7 - R_4)T_d}. \quad (3)$$

Первое слагаемое в (3) определяет среднюю частоту характеристики преобразования, а второе — крутизну характеристики преобразования фазового сдвига в частоту генерируемого сигнала. Наличие в знаменателе разности слагаемых позволяет его минимизировать и соответственно увеличивать чувствительность преобразователя.

Условием устойчивости колебаний генерируемого сигнала является типичный наклон эквивалентной ФЧХ генератора, чему соответствует положительный знак знаменателя (3).

Для получения линейной характеристики преобразования контролируемого параметра  $x$  в частоту генерируемого сигнала необходимо, чтобы характеристика аппаратного модуля  $\varphi_9(x)$  была линейной и не зависящей от частоты генерируемого сигнала в рабочем диапазоне частот.

Соотношение (3) описывает дискретную функцию. Изменение частоты генерируемого сигнала происходит, если вносимый дополнительный фазовый сдвиг приводит к смещению генерируемого сигнала не меньше чем на  $T_d$ . Следовательно, период дискретизации определяет разрешающую способность преобразователя и погрешность дискретизации.

Для ввода и вывода генерируемого сигнала используются логические входы и выходы числового процессора, в котором реализуется программный модуль. Изменение состояния логических уровней учитывается программой. Компьютерное моделирование цифрового генераторного преобразователя, выполненное в среде моделирования динамических процессов Simulink, показало соответствие теоретической характеристики (3) характеристикам и результатам моделирования.

В качестве примера на рис. 4 приведены фрагменты характеристик преобразователя,

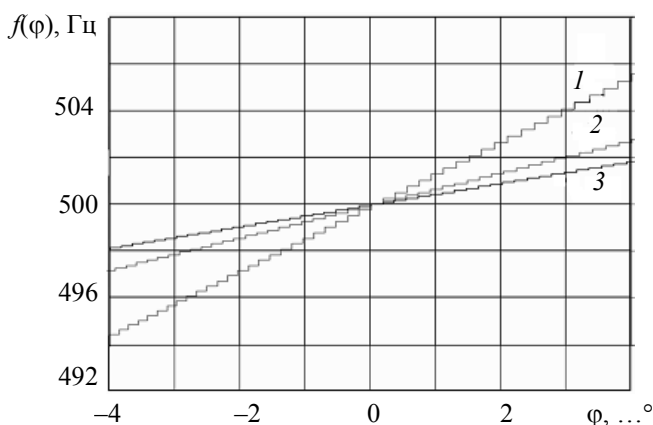


Рис. 4

полученные при моделировании. Характеристики получены при следующих условиях: порядок фильтра 2 (см. рис. 1) равен 800, фильтра 4 — 3200, 5 — 800. Варьировался порядок фильтра 7, период дискретизации оставался постоянным. Кривая 1 получена при порядке 1200 фильтра 7, кривая 2 при — 1600, кривая 3 — при 2000. Данные значения порядков фильтра 7 выбраны из условия несмещенности средней частоты 500 Гц. При всех других промежуточных значениях порядка фильтра 7 из-за изменения наклона ФЧХ варьируются и значения частот, для которых фазовый сдвиг кратен  $2\pi$ . Это требует перестройки остальных фильтров.

значения частот, для которых фазовый сдвиг кратен  $2\pi$ . Это требует перестройки остальных фильтров.

Результаты исследования компьютерной модели преобразователя позволили написать программу на языке Delphi, реализующую данный цифровой генераторный преобразователь в режиме реального времени.

Таким образом, цифровые генераторные преобразователи позволяют исключить дополнительную погрешность из-за воздействия на автоколебательную систему возмущающих факторов и получить стабильные линейные характеристики преобразования.

Приведенные результаты получены в рамках научно-исследовательской работы, выполненной по плану фундаментальных исследований университета, поддержанных госбюджетным финансированием.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В. В., Шакурский В. К.* Анализ свойств управляемого генератора в режиме повышенной чувствительности // *Электросвязь*. 2004. № 4. С. 43—51.
2. *Иванов В. В., Шакурский В. К.* Увеличение чувствительности генераторных параметрических преобразователей // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2005. Т. 49, № 7. С. 47—51.
3. *Шакурский В. К., Иванов В. В.* Генераторные преобразователи девиации фазы повышенной чувствительности // *Вестн. СГАУ*. 2006. № 3. С. 13—16.

#### *Сведения об авторах*

*Дмитрий Анатольевич Нагаев*

— Тольяттинский государственный университет, кафедра электроснабжения и электротехники; ст. преподаватель;  
E-mail: dandandan@tltsu.ru

*Виктор Константинович Шакурский*

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

Рекомендована кафедрой  
электроснабжения и электротехники

Поступила в редакцию  
06.03.08 г.