

КОРРЕКЦИЯ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛА СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С ДЕЛЬТА-СИГМА АЦП

Андрей Серов ¹⁾, Александр Шатохин ²⁾

¹⁾ НИУ «МЭИ» 111250, Москва, Красноказарменная ул. 14, e-mail: serov.an.iit@yandex.ru

²⁾ НИУ «МЭИ» 111250, Москва, Красноказарменная ул. 14, e-mail: sh1@yandex.ru

Резюме: В настоящее время ведущие производители интегральных микросхем выпускают дельта-сигма АЦП, ориентированные на применение в измерительном канале средств измерений показателей качества электроэнергии (СИ ПКЭ). Частотную характеристику такого АЦП определяет встроенный цифровой фильтр, как правило, со структурой „интегратор – гребенчатый фильтр”. Однако качество этого фильтра как фильтра нижних частот посредственное: фильтр имеет спад амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в полосе пропускания и относительно большую ширину переходной полосы.

В докладе рассмотрены два варианта метода коррекции АЧХ дельта-сигма АЦП, входящего в канал СИ ПКЭ. Первый вариант предполагает использование одного корректирующего цифрового фильтра, компенсирующего спад АЧХ дельта-сигма АЦП в полосе пропускания и уменьшающий ширину переходной полосы. Второй вариант предполагает использование двух корректирующих фильтров, один из которых компенсирует спад АЦП в полосе пропускания, а второй уменьшает ширину переходной зоны.

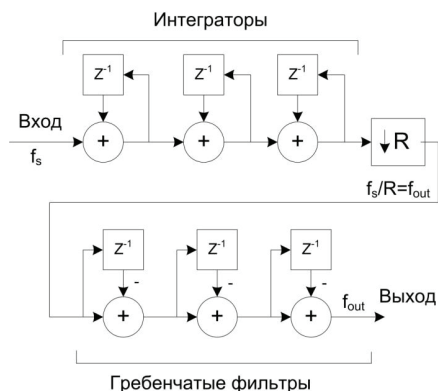
Ключевые слова: средства измерений показателей качества электроэнергии, дельта-сигма АЦП, коррекция частотной характеристики.

1. Введение

Качество электрической энергии количественно характеризуется рядом параметров – показателями качества электрической (ПКЭ). Для их измерения используются специальные средства измерений (СИ ПКЭ). Канал – индивидуальный тракт передачи измерительной информации – СИ ПКЭ содержит аналого-цифровой преобразователь (АЦП), преобразующий в код дискретизированные значения напряжения. В настоящее время в качестве такого АЦП ведущие производители интегральных микросхем предлагают многоканальные с одновременной выборкой дельта-сигма АЦП, имеющие от 16 до 24 двоичных разрядов.

Дельта-сигма АЦП представляет последовательное соединение дельта-сигма модулятора и цифрового низкочастотного фильтра-дециматора, который определяет частотную характеристику дельта-сигма АЦП и в значительной мере канала СИ ПКЭ. В качестве фильтра-дециматора обычно используется фильтр со структурой «интегратор – гребенчатый фильтр» (см. фиг. 1), английская аббревиатура которого СИС (Cascaded Integrator – Comb).

Главная ценность СИС фильтра – простота реализации: не требуются операции умножения. Однако качество этого фильтра как фильтра нижних частот посредственное. Во-первых, в полосе пропускания имеется спад амплитудно-частотной



Фиг. 1. Структура трехкаскадного СИС-фильтра

характеристики (АЧХ), во-вторых, относительно большая ширина переходной полосы.

В общем случае модуль комплексного коэффициента усиления N-каскадного СИС-фильтра имеет вид [1, 4]:

$$H(f) = \left| \frac{\sin \frac{\pi M f}{f_{out}}}{\sin \frac{\pi f}{R f_{out}}} \right|^N = \left| \frac{\sin \frac{\pi M f}{f_{out}}}{\sin \frac{\pi f}{f_s}} \right|^N, \quad (1)$$

где M – число задержек в гребенчатом фильтре

(обычно $M = 1$); R – коэффициент децимации; f – текущая частота; f_s и f_{out} – частота дискретизации соответственно на входе и выходе фильтра. Коэффициент усиления на нулевой частоте равен

$$H(0) = (RM)^N. \quad (2)$$

Далее будет использоваться нормированный $H(f)$:

$$H_{CIC}(f) = H(f)/H(0) \quad (3)$$

для $M = 1$.

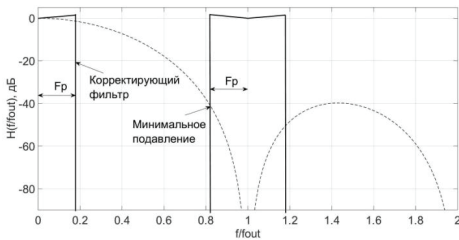
2. Коррекция АЧХ СИС-фильтра однокаскадным цифровым фильтром

Как отмечалось ранее, недостатками СИС-фильтра являются спад АЧХ в полосе пропускания и достаточно широкая переходная полоса. Эти недостатки ослабляются корректирующим фильтром (после которого может осуществляться прореживание обычно с небольшим коэффициентом децимации).

На фиг. 2 представлены АЧХ СИС-фильтра и идеального корректирующего фильтра. Как следует из рисунка H_{min} – минимальный нормированный коэффициент (минимальное подавление) в диапазоне частот вокруг первого нуля $H_{CIC}(f)$ – имеет место на частоте

$$f_{min} = f_{out} - F_p, \quad (4)$$

где F_p – ширина полосы пропускания корректирующего фильтра (определяется шириной полосы пропускания измерительного канала СИ ПКЭ). Можно заметить, что H_{min} зависит от F_p и крутизны спада АЧХ СИС-фильтра вблизи частоты f_{min} .



Фиг. 2. АЧХ корректирующего и СИС-фильтра

Определим связь между H_{min} , F_p и параметрами СИС-фильтра. Обычно выполняется соотношение:

$$\frac{\pi f_{min}}{R f_{out}} = \frac{\pi f_{min}}{f_s} \ll 1. \quad (5)$$

Тогда, используя (1-5), запишем

$$H_{min} = \left| \frac{\sin \pi \frac{F_p}{f_{out}}}{\pi \left(1 - \frac{F_p}{f_{out}}\right)} \right|^N \approx \left| \frac{F_p}{f_{out}} \right|^N \dots \quad (6)$$

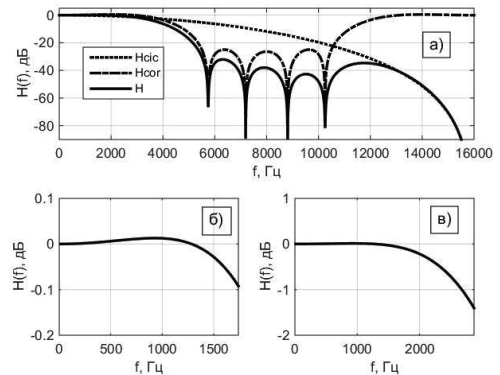
Последнее упрощение в выражении (6) получено при условии $\frac{\pi F_p}{f_{out}} \ll 1$, что тоже обычно выполняется. Формула (6) позволяет оценить H_{min} по трем параметрам, два из которых f_{out} и N – это параметры СИС-фильтра. В таблице 1 при $N = 3$; $F_p = 2875$ Гц представлены значения H_{min} в зависимости от f_{out} . Значение F_p определялось как произведение наибольшего номера гармоники (50) на максимальную частоту основной компоненты сетевого напряжения (57, 5 Гц). Из данных табл. 1 следует, что подавление в полосе задерживания достаточно велико только при малых отношениях F_p/f_{out} . На практике подавления будет меньше, так как реальный корректирующий фильтр имеет конечную переходную полосу.

Таблица 1. Зависимость H_{min} от f_{out}

f_{out} , кГц	16	32	64
H_{min} , дБ	≈ -40	≈ -60	≈ -80

В дельта-сигма АЦП типа MAX11040K и MAX11060 встроен несложный корректирующий КИХ-фильтр восьмого порядка [2]. На фиг. 3 для этих АЦП представлены: $H_{CIC}(f)$, $H_{COR}(f)$ – АЧХ корректирующего фильтра и $H(f)$ – результирующая АЧХ.

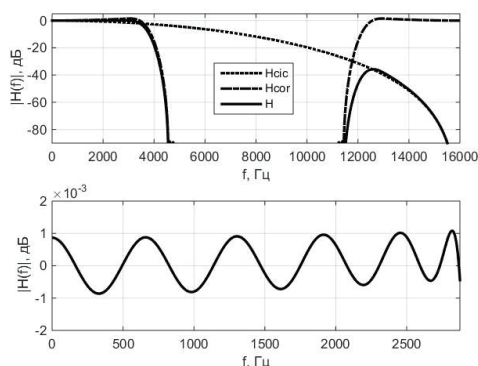
Верхняя часть фиг. 3а дает общее представление об АЧХ фильтров. Неравномерность $H(f)$ в полосе пропускания ($F_p = 2875$ Гц) изображена на фиг. 3б и 3в.



Фиг. 3 АЧХ дельта-сигма АЦП MAX11040K и MAX11060 при $f_{out} = 16$ кГц и $f_s = 3,072$ МГц

Данный АЦП имеет значение H_{min} , составляющее примерно -32 дБ. В полосе пропускания от 0 до 1740 Гц нормируется спад АЧХ не более 0,1 дБ ($\approx 1\%$). В полосе от 0 до 2875 Гц спад равен примерно 1,4 дБ ($\approx 14\%$), что требует дополнительной коррекции при измерении гармоник напряжения.

Многие дельта-сигма АЦП не имеют встроенного корректирующего цифрового фильтра (ЦФ). Для коррекции АЧХ таких АЦП можно выполнить цифровую фильтрацию программно. В качестве примера рассмотрим АЦП типа ADS131E0x [3]. Коррекция его АЧХ выполнена с помощью программно реализованного цифрового КИХ-фильтра 50 порядка. Коэффициенты этого фильтра рассчитаны с помощью функции `firseqfir` пакета MatLab. Результаты коррекции представлены на фиг. 4. Значение H_{min} равно примерно -36 дБ. В полосе пропускания неравномерность АЧХ составляет примерно 0,001 дБ ($\approx 0,01\%$), что позволяет создавать прецизионные СИ ПКЭ.



Фиг. 4 АЧХ дельта-сигма АЦП ADS131E0x ($H_{\Delta\Sigma}$), корректирующего фильтра (H_{COR}) и результирующая АЧХ (H) при $f_{out} = 16$ кГц и $f_s = 1,024$ МГц

Программная реализация рассмотренного ЦФ на современных 32-разрядных микроконтроллерах, например с ядром Cortex-M4F, занимает приблизительно 2% длительности шага дискретизации корректирующего фильтра при $f_{out} = 16$ кГц и системной частоте микроконтроллера 100 МГц.

3. Коррекция АЧХ СИС-фильтра двухкаскадным цифровым фильтром

В работе [4] предложено для компенсации спада АЧХ СИС-фильтра в полосе пропускания

строить корректирующий фильтр на основе КИХ-фильтра второго порядка. Функция передачи этого фильтра $H_2(z)$ и модуль комплексного коэффициента передачи $H_2(\omega)$ имеют вид:

$$H_2(z) = a + b z^{-1} + a z^{-2} \quad (7)$$

и

$$H_2(\omega) = |2a \cos \omega + b|, \quad (8)$$

где a и b – коэффициенты фильтра; $\omega = 2\pi f / f_{out}$.

Рассматриваемый ЦФ хорошо компенсирует спад АЧХ однокаскадного СИС-фильтра. В случае N -каскадного СИС-фильтра используется N каскадно включенных ЦФ второго порядка.

Для определения коэффициентов a и b составляют систему из двух уравнений, используя (2) и две точки: $\omega = 0$ и $\omega = \omega_p$. В первой точке $H_2(0) = 1$. Второй точке соответствует наибольший спад АЧХ СИС-фильтра в полосе пропускания. Чтобы скомпенсировать этот спад, следует положить $H_2(\omega_p) = 1/H_{CIC}(\omega_p)$. В результате система уравнений имеет вид

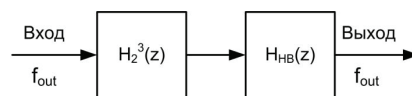
$$\begin{cases} 2a + b = 1 \\ 2a \cos \omega_p + b = 1/H_{CIC}(\omega_p) \end{cases}$$

Решая систему уравнений, найдем

$$a = \frac{1 - 1/H_{CIC}(\omega_p)}{2(1 - \cos \omega_p)}, \quad (9)$$

$$b = 1 - 2a. \quad (10)$$

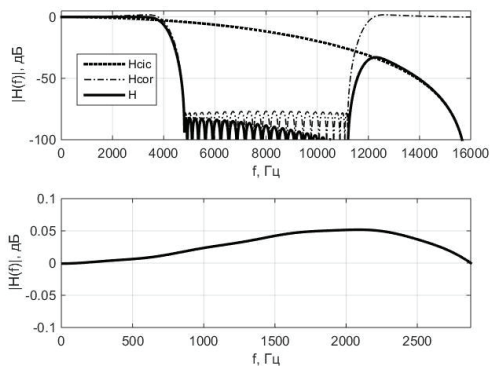
Структура двухкаскадного корректирующего фильтра показана на фиг. 5. Первый каскад корректирующего ЦФ – это три каскада ЦФ второго порядка с функцией передачи вида (7). Второй каскад – полуполосный фильтр, служащий для уменьшения переходной полосы корректирующего ЦФ. Выбор этого фильтра обусловлен его линейной ФЧХ и относительно меньшим числом умножений, т.к. нечетные коэффициенты этого фильтра равны нулю.



Фиг. 5 Структура двухкаскадного корректирующего фильтра

Результаты коррекции с помощью двухкаскадного ЦФ применительно к АЦП типа ADS131E0x изображены на фиг. 6. Параметры: f_{out} , f_s и F_p – выбраны те же, что и в пункте 2. Коэффициенты полуполосного ЦФ 46 порядка рассчитаны с помощью функции `firhalfband`

пакета MatLab. Значение $H_{mi,n}$ равно примерно -32 дБ. В полосе пропускания неравномерность АЧХ составляет не более 0,05 дБ ($\approx 0,5\%$), в полосе задержания подавление не хуже -80 дБ, что позволяет создавать прецизионные СИ ПКЭ, т.к. неравномерность в полосе пропускания смещена в область высокочастотных гармоник.



Фиг. 6 АЧХ дельта-сигма АЦП ADS131E0x (HCIC), двухкаскадного корректирующего фильтра (HCOR) и результирующая АЧХ (H) при $f_{out} = 16$ кГц и $f_s = 1,024$ МГц

4. Заключение

На основании изложенного материала можно сделать следующие выводы:

1. Дельта-сигма АЦП имеют неудовлетворительную АЧХ для создания прецизионных СИ ПКЭ.

2. Приемлемая коррекция их АЧХ может быть

выполнена КИХ-фильтром относительно небольшого порядка, реализованного программно или аппаратно.

3. Хотя однокаскадный корректирующий фильтр приводит к меньшей неравномерности АЧХ в полосе пропускания, но использование в двухкаскадном корректирующем фильтре полуполосного ЦФ позволяет понизить нагрузку на микроконтроллер при программной реализации корректирующего ЦФ.

5. Литература

[1] **Е. В. Hogenuer**. An economical class of digital filters for decimation and interpolation. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, ASSP-29(2):155–162, 1981.

[2] <http://www.maximintegrated.com>

[3] <http://www.ti.com>

[4] **G. Jovanovic Dolecec and F. Javier Torres**. Compensated CIC-Cosine Decimation Filter. ECTI Transactions on Computer and Information Technology, Vol. 4, No. 1, May 2010, pp. 8-14.

Сведения об авторах:

Серов Андрей Николаевич, НИУ «МЭИ» – вычислительные машины системы и сети (2006). Старший преподаватель (2011); НИУ «МЭИ», ИИТ, АВТИ. Измерение больших токов и мощности.

Шатохин Александр Алексеевич, НИУ «МЭИ» – вычислительные машины системы и сети (1973). К.т.н. (1985), доцент (1986); НИУ «МЭИ», ИИТ, АВТИ. Цифровая обработка сигналов.

FREQUENCY RESPONSE CORRECTION OF THE POWER QUALITY MEASURING INSTRUMENT CHANNEL CONTAINING DELTA SIGMA ADC

Serov A. N.¹⁾, Shatokhin A. A.²⁾

¹⁾NRU «MPEI», 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st. 14, e-mail serov.an.iit@yandex.ru

²⁾NRU «MPEI», 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st. 14, e-mail sh1@yandex.ru

Abstract: Now the manufacturers of integrated chips let out delta sigma ADC, focused on application in the measuring channel of power quality measuring instruments (PQ MI). The frequency characteristic of such ADC determines the built-in digital filter, as a rule, with structure "cascaded integrator comb". However, quality of this filters as filter of the lower frequencies the mediocre: the filter has recession of the frequency response (FR) in a pass-band and rather big width of a transitional band.

In the report, two options of a FR correction method of delta-sigma ADC containing in the PQ MI channel are considered. The first option assumes use of one correcting digital filter compensating recession of delta-sigma ADC FR in a pass-band and reducing width of a transitional band. The second option assumes use of two correcting filters one of which compensates recession of ADC in a pass-band, and the second reduces width of a transitional band.

Keywords: power quality measuring instruments, delta-sigma ADC, correction of the frequency response.

References:

[1] **E. B. Hogenauer.** An economical class of digital filters for decimation and interpolation. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, ASSP-29(2):155–162, 1981.

[2] <http://www.maximintegrated.com>

[3] <http://www.ti.com>

[4] **G. Jovanovic Dolecec and F. Javier Torres.** Compensated CIC-Cosine Decimation Filter. ECTI Transactions on Computer and Information Technology, Vol. 4, No. 1, May 2010, pp. 8-14.

КОРЕКЦИЯ НА АМПЛИТУДНО-ЧЕСТОТНАТА ХАРАКТЕРИСТИКА НА КАНАЛА НА СРЕДСТВАТА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА КАЧЕСТВОТО НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГИЯТА С ДЕЛТА-СИГМА АЦП

Андрей Серов ¹⁾, Александр Шатохин ²⁾

¹⁾ НИУ «МЭИ» 111250, Москва, Красноказарменная ул. 14, e-mail: serov.an.iit@yandex.ru

²⁾ НИУ «МЭИ» 111250, Москва, Красноказарменная ул. 14, e-mail: sh1@yandex.ru

Резюме: В момента водещи производители на интегрални микросхеми произвеждат делта-сигма АЦП, насочени за използване в измервателния канал на средствата за измерване на показателите на качеството на електроенергията (СИ ПКЕ). Честотната характеристика на такова АЦП се определя от вградения цифров филтър, като правило със структура "интегратор - гребенчат филтър". Обаче, качеството на такъв филтър като нискочестотен филтър е посредствено: филтърът има спад на амплитудно-честотната характеристика (АЧХ) в лентата на пропускане и относително голяма широчина на преходната лента.

В доклада са разгледани два варианта на метод за коригиране на АЧХ на делта-сигма АЦП, входящ в канала на СИ ПКЕ. Първият вариант предполага използването на един коригиращ цифров филтър, компенсиращ спада на АЧХ на делта-сигма АЦП в лентата на пропускане и намаляващ широчината на преходната лента. Вторият вариант предполага използване на два коригиращи филтъра, единият от които компенсира спада на АЦП в лентата на пропускане, а вторият намалява ширината на преходната лента.

Ключови думи: средства за измерване на показатели на качеството на електроенергия, делта-сигма АЦП, корекция на честотна характеристика.