

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 589 388** ⁽¹³⁾ **C1**

(51) МПК

[H03M 1/34 \(2006.01\)](#)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: [2015100802/08](#), 12.01.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
12.01.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 12.01.2015

(45) Опубликовано: [10.07.2016](#) Бюл. № 19

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2433527 C1, 10.11.2011. SU 1368989 A1, 23.01.1988. SU 1181141 A1, 23.09.1985. WO 2012009796 A1, 26.01.2012. US 2014139365 A1, 22.05.2014. US 6144329 A, 07.11.2000. US 5189420 A, 23.02.1993.

Адрес для переписки:

394026, г. Воронеж, Московский просп., 14,
ГОУВПО "ВГТУ", патентный отдел

(72) Автор(ы):

Кожевников Алексей Александрович
(RU),

Беспалов Кирилл Петрович (RU),

Долгачев Александр Александрович (RU)

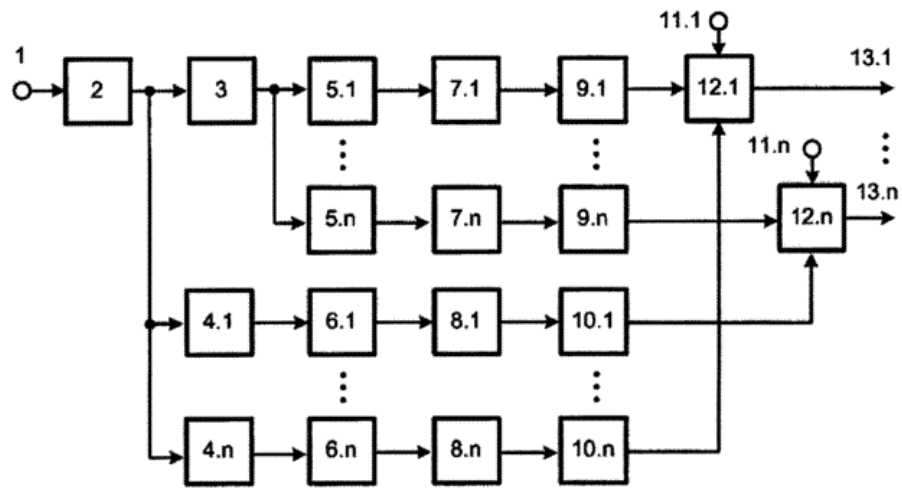
(73) Патентообладатель(и):

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Воронежский государственный
технический университет"** (RU)

(54) АЛИАСНЫЙ АНАЛОГО-ЦИФРОВОЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области измерительной и вычислительной техники и может быть использовано для преобразования аналоговых электрических сигналов в цифровой код. Техническим результатом является повышение точности преобразования. Устройство содержит блок слежения-хранения, генераторы, управляемые напряжением, аналого-цифровые преобразователи, спецпроцессоры быстрого преобразования Фурье, блоки максимальной амплитуды, блоки вычитания. 7 ил.



Фиг. 1

Изобретение относится к области измерительной и вычислительной техники и может быть использовано для быстрого преобразования аналоговых электрических сигналов в цифровой код в системах, функционирующих в модулярной системе счисления.

Известно устройство (аналог) (авт.св. СССР №1368989, МКИ Н03М 1/28, БИ №3, 1988 г.), содержащее блок определения остатка по наибольшему основанию СОК, аналогово-цифровые преобразователи, сумматоры, шифраторы, блоки коррекции, коммутаторы, одновибратор, регистр, аналоговую входную шину, шину коррекции, шину управления, выходную шину «ядро числа» и выходные шины остатков по соответствующим основаниям СОК. Недостаток - малая точность преобразователя.

Известно устройство (аналог) (авт.св. СССР №1181141, МКИ Н03М 1/28, БИ №35, 1985 г.), содержащее блок определения остатка по наибольшему основанию СОК, аналогово-цифровые преобразователи, блоки коррекции, входную шину, шину коррекции, выходные шины кодов по основаниям СОК, сумматоры, шифраторы, шины кодов оснований СОК. Недостаток - малая точность преобразователя.

Наиболее близким к заявляемому является изобретение (пат. 2433527 Российская Федерация, МПК⁷ Н03М 1/28, заявл. 12.04.2010; опубл. 10.11.2011), содержащее блоки слежения-хранения, аналогово-цифровые преобразователи, цифроаналоговые преобразователи, блоки вычитания, выходные шины кодов остатков в СОК, вход.

Недостаток прототипа - малая точность преобразователя, обусловленная ростом ошибки от каскада к каскаду в результате уменьшения в геометрической прогрессии единичного интервала квантования по отношению к интервалу неопределенности, формируемого шумом.

Задача, на решение которой направлено заявляемое устройство, состоит в повышении точности представления формы аналогового сигнала в цифровом виде.

Технический результат выражается в реализации иного подхода к аналого-цифровому преобразованию, позволяющему устранить операцию, наиболее негативно влияющую на точность.

Технический результат достигается тем, что в алиасный аналого-цифровой преобразователь, содержащий вход, блок слежения-хранения, n основных аналого-цифровых преобразователей, n выходных шин кодов остатков в системе остаточных классов, где n - число оснований системы остаточных классов, введены основной генератор, управляемый напряжением, n дополнительных генераторов, управляемых напряжением, n дополнительных аналого-цифровых преобразователей, n основных и n дополнительных спецпроцессоров быстрого преобразования Фурье, n основных и n дополнительных блоков максимальной амплитуды, n блоков вычитания и n шин

кодов оснований системы остаточных классов, при этом вход устройства объединен с входом блока слежения-хранения, выход которого соединен с входом основного и дополнительных генераторов, управляемых напряжением, при этом выход основного генератора, управляемого напряжением, соединен с входом основных аналого-

цифровых преобразователей, а выход i -го ($i = \overline{1, n}$) дополнительного генератора, управляемого напряжением, соединен с входом i -го дополнительного аналого-цифрового преобразователя, при этом выход i -го основного аналого-цифрового преобразователя соединен с входом i -го основного спецпроцессора быстрого преобразования Фурье, а выход i -го дополнительного аналого-цифрового преобразователя соединен с входом i -го дополнительного спецпроцессора быстрого преобразования Фурье, при этом выход i -го основного спецпроцессора быстрого преобразования Фурье соединен с входом i -го основного блока максимальной амплитуды, а выход i -го дополнительного спецпроцессора быстрого преобразования Фурье соединен с входом i -го дополнительного блока максимальной амплитуды, выход которого соединен с третьим входом i -го блока вычитания, первый вход которого объединен с i -й шиной кодов оснований системы остаточных классов, при этом выход i -го основного блока максимальной амплитуды соединен со вторым входом i -го блока вычитания, выход которого объединен с i -й выходной шиной кодов остатков в системе остаточных классов.

На фиг. 1 представлена структурная схема алиасного АЦП в код СОК.

На фиг. 2 приведена зависимость алиасной частоты в основной ветви от частоты гармоники основного ГУН.

На фиг. 3 приведена зависимость алиасной частоты в дополнительной ветви относительно частоты гармоники основного ГУН.

На фиг. 4 представлена таблица 1 с выборками АЦП в соответствии с номерами.

На фиг. 5 представлены спектры после БПФ в основной ветви и интерполяция к непоозиционному представлению по основаниям 3, 5 и 7.

На фиг. 6 представлены спектры после БПФ в дополнительной ветви и формирование на их основе признака четности.

На фиг. 7 представлена таблица 2 опорных напряжений параллельного АЦП и взвешивание на их основе соответствующего входного сигнала.

Сущность изобретения заключается в синтезе гармонического сигнала и естественной трансляции его спектра в первую зону Найквиста при дискретизации на элементарных аналого-цифровых преобразователях (АЦП) с частотами выборок, зависящими от значений оснований применяемой системы остаточных классов (СОК).

Построение прототипа по каскадному принципу приводит к тому, что синтез сигнала шума в первом каскаде, с уменьшением (без учета масштабирования) в разы единичного интервала квантования в следующем каскаде, во столько же раз увеличивает интервал неопределенности, на котором может быть зафиксировано ошибочное значение. Например, если взять основания СОК равными $p_1=3$, $p_2=5$, $p_3=7$, то в одном тракте прототипа диапазон рабочих напряжений может быть разбит на три - в первом каскаде, потом один квант первого каскада - уже на пять - во втором, и один квант из второго каскада - на семь - в третьем каскаде. Таким образом, сгенерированный в первом каскаде уровень шума остается постоянным (для простоты - без учета шума следующих каскадов), а единичный интервал квантования уменьшается в разы. Применение масштабирования приводит к обратной картине - интервал единичного квантования почти не меняется, а ошибка первого каскада растет в геометрической прогрессии. Устранить негативное влияние каскадного построения возможно через иной подход к аналого-цифровому преобразованию.

Если частота отсчетов АЦП меньше удвоенной максимальной частоты сигнала, то возникает эффект биения и наложение спектров (алиасинг, - от английского «aliasing»). Спектр алиасных биений всегда располагается в полосе частот от 0 до $f_i/2$, где f_i - частота дискретизации элементарного АЦП. Данный процесс является прямым следствием теоремы Котельникова или (в иностранной литературе) критерия Найквиста (Аналого-цифровое преобразование: [пер. с англ.] / Под ред. Уолта Кестера. - М.: Техносфера. - 2007. - 1016 с.). Полосы частот от $(N-1) \cdot f_i/2$ до $N \cdot f_i/2$ образуют зоны Найквиста, где N - номер зоны. Зависимость алиасной частоты (f_a) от линейно изменяющейся частоты входного гармонического сигнала можно представить следующим образом (фиг. 3). Для квантования уровня входного сигнала его сначала необходимо преобразовать в гармонический с частотой

$$f = F \cdot \frac{U_{вх}}{E} + f_H,$$

где F - диапазон рабочих гармонических частот, который синтезируется генератором, управляемым напряжением (ГУН), f_H - начальная частота ГУН, E - диапазон рабочих напряжений АЦП, $U_{вх}$ - преобразуемый уровень входного сигнала. Далее синтезированная гармоника сворачивается по частоте, согласно фиг.3, на

i ($i = \overline{1, n}$) элементарных АЦП, работающих с частотой выборки

$$f_i = F \cdot \frac{2 \cdot p_i}{P},$$

$$P = \prod_{i=1}^n p_i$$

где p_i - количество уровней квантования алиасного АЦП, p_i - основания применяемой СОК, а n - количество оснований СОК. На этом работа с аналоговым сигналом прекращается и начинается анализ данных в цифровом виде, заключающийся в формировании амплитудно-частотной характеристики, определении частоты с максимальной амплитудой и четности исходной полосы Найквиста, что позволяет реализовать код в СОК. Таким образом устраняется межкаскадная геометрическая прогрессия ошибки и, соответственно, повышается точность преобразования.

Дополнительным эффектом является упрощение конструирования алиасного устройства по сравнению с прототипом, т.к. отпадает необходимость применения специализированных по основаниям СОК элементарных АЦП, место которых могут занимать обычные позиционные. Другим дополнительным эффектом является возможность выбора полосы частот ГУН в зависимости от прикладной области алиасного АЦП, позволяющая отстроиться от электромагнитного излучения внешнего источника, наиболее влияющего в качестве шума.

Показанный на фиг. 1 алиасный АЦП содержит вход 1, блок слежения-хранения 2, основной 3 и дополнительные 4.1-4.n генераторы, управляемые напряжением (ГУН), основные 5.1-5.n и дополнительные 6.1-6.n аналого-цифровые преобразователи (АЦП), основные 7.1-7.n и дополнительные 8.1-8.n спецпроцессоры быстрого преобразования Фурье (БПФ), основные 9.1-9.n и дополнительные 10.1-10.n блоки максимальной амплитуды, шины кодов оснований системы остаточных классов 11.1-11.n, блоки вычитания 12.1-12.n, выходные шины кодов остатков в СОК 13.1-13.n.

Вход устройства 1 объединен с входом блока слежения-хранения 2, выход которого соединен с входом основного 3 и дополнительных 4.1-4.n ГУН, при этом выход основного ГУН 3 соединен с входом основных АЦП 5.1-5.n, а выход i -го дополнительного ГУН 4.1-4.n соединен с входом i -го дополнительного АЦП 6.1-6.n, при этом выход i -го основного АЦП 5.1-5.n соединен с входом i -го основного спецпроцессора БПФ 7.1-7.n, а выход i -го дополнительного АЦП 6.1-6.n соединен с входом i -го дополнительного спецпроцессора БПФ 8.1-8.n, при этом выход i -го

основного спецпроцессора БПФ 7.1-7.n соединен с входом i-го основного блока максимальной амплитуды 9.1-9.n, а выход i-го дополнительного спецпроцессора БПФ 8.1-8.n соединен с входом i-го дополнительного блока максимальной амплитуды 10.1-10.n, выход которого соединен с третьим входом i-го блока вычитания 12.1-12.n, первый вход которого объединен с i-й шиной кодов оснований системы остаточных классов 11.1-11.n, при этом выход i-го основного блока максимальной амплитуды 9.1-9.n соединен со вторым входом i-го блока вычитания 12.1-12.n, выход которого объединен с i-й выходной шиной кодов остатков в системе остаточных классов 13.1-13.n.

Работа алиасного АЦП (фиг. 1) начинается с запоминания уровня аналогового сигнала, поступающего на вход 1, в блоке слежения-хранения 2. Далее вычисление

остатка по основанию p_i осуществляется в i -м ($i = \overline{1, n}$) основном и дополнительном тракте по аналогичной схеме. Вначале входной уровень преобразуется ГУН в частоту гармонического сигнала по формуле

$$f = F \cdot \frac{U_{\text{вх}}}{E} + f_{\text{н}},$$

где F - диапазон рабочих гармонических частот, который синтезируется генератором управляемым напряжением (ГУН), $f_{\text{н}}$ - начальная частота ГУН, E - диапазон рабочих напряжений АЦП, $U_{\text{вх}}$ - преобразуемый уровень входного сигнала. Здесь $f_{\text{н}} = f_{\text{min}}$ для основного ГУН 3 и $f_{\text{н}} = f_{\text{min}} + f_i/4$ для дополнительных ГУН 4.1-4.n, где для простоты минимальная частота $f_{\text{min}} = 0$. Частота гармоники дополнительных ГУН 4.1-4.n зависит через f_0 от частоты выборки дополнительных АЦП 6.1-6.n. Но частота выборки i-го основного 5.i и дополнительного 6.i ($i = \overline{1, n}$) АЦП одинакова:

$$f_i = F \cdot \frac{2 \cdot p_i}{P},$$

$$P = \prod_{i=1}^n p_i$$

где $\prod_{i=1}^n p_i$ - количество уровней квантования алиасного АЦП, p_i - основания применяемой СОК, а n - количество оснований СОК. Далее гармоника сворачивается на основных 5.1-5.n (фиг. 2) и дополнительных 6.1-6.n (фиг. 3) АЦП, при этом алиасную частоту можно определить из выражения

$$f_a = (-1)^{\left[\frac{2 \cdot f}{f_i}\right]} \left(f - \frac{f_i}{2} \cdot \left[\frac{2 \cdot f}{f_i} \right] - \frac{f_i}{4} \right) + \frac{f_i}{4}.$$

Здесь (и далее) математическая операция в квадратных скобках подразумевает как результат целую часть числа.

Т.к. для БПФ необходимо 2^K (K - целое положительное) выборок, при том, что основания СОК p_i - взаимно простые, то должно выполняться условие:

$$2^K \geq 2 \cdot p_n > \dots > 2 \cdot p_1.$$

Зная алиасные частоты и частоты дискретизации, можно определить значения всех 2^K выборок каждого i-го основного (5.1-5.n) и дополнительного (6.1-6.n) АЦП:

$$v_m = \left[\frac{A}{E_i} \cdot 2^L \cdot \left\{ \sin \left(2\pi \cdot m \cdot \frac{f_a}{f_i} \right) + 1 \right\} \right] - \left[\frac{A}{E_i} \cdot 2^L \right],$$

где A - амплитуда гармоник от ГУН (3 и 4.1-4.n), E_i - диапазоны измеряемых АЦП

(5.1-5.n и 6.1-6.n) напряжений, номер выборки $m = \overline{(0, 2^K - 1)}$, L - разрядность АЦП 5.1-5.n и 6.1-6.n. Полученные на АЦП (5.1-5.n и 6.1-6.n) выборки передаются спецпроцессорам БПФ 7.1-7.n и 8.1-8.n, на выходе которых формируется по $2^{K-1} + 1$ значений, соответствующих линиям амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в

первой зоне Найквиста. В блоках максимальной амплитуды 9.1-9.n и 10.1-10.n на основе полученных значений АЧХ производится интерполяция максимума спектра к непозиционному виду: в основных (9.1-9.n) по основанию p_i , а в дополнительных (10.1-10.n) по основанию 2. Как результат основной (9.1-9.n) блок выдает число в диапазоне от 0 до p_i-1 , а дополнительный (10.1-10.n) - «1», если максимум спектра расположен в левой половине первой зоны Найквиста, и «0» - в правой половине, i -я

основная и i -я дополнительная ветки сходятся на блоке вычитания $12.i$ ($i = \overline{1, n}$), где в зависимости от признака четности номера зоны Найквиста производится («1» от блока 10.i) или не производится («0» от блока 10.i) операция вычитания полученного в основной ветке числа из p_i-1 . Значение p_i подается по шинам кодов оснований системы остаточных классов 11.1-11.n. Таким образом, на выходной шине 13.1-13.n формируется окончательный код в СОК.

Пример.

Рассмотрим алиасный АЦП по основаниям СОК $p_1=3, p_2=5, p_3=7$ (т.е. $n=3$, ($i = \overline{1, 3}$))

$$P = \prod_{i=1}^3 p_i = 105$$

. Такой алиасный АЦП содержит вход, блок слежения хранения 2, основной 3 и три дополнительных ГУН 4.1-4.3, по три АЦП, спецпроцессора БПФ и блока максимальной амплитуды в основной (соответственно 5.1-5.3, 7.1-7.3, 9.1-9.3) и дополнительной (соответственно 6.1-6.3, 8.1-8.3, 10.1-10.3) ветке. Плюс к этому алиасный АЦП содержит по три шины кодов оснований СОК 11.1-11.3, блока вычитания 12.1-12.3 и выходных шин кодов остатков 13.1-13.3.

Пусть на вход устройства 1 поступил уровень сигнала $U_{вх.}=3,2$ В, который запоминается в блоке слежения-хранения 2. Поскольку частоты гармоник с дополнительных ГУН 4.1-4.3 привязаны к частотам выборки АЦП 6.1-6.3, то рассчитаем сначала частоты выборок по известной формуле. Пусть диапазон рабочих гармонических частот $F=1000$ кГц, тогда частоты выборок основных 5.1-5.3 и дополнительных 6.1-6.3 АЦП есть:

$$f_1 = 1000 \cdot 2 \cdot 3 / 105 = 57.14 \text{ кГц},$$

$$f_2 = 1000 \cdot 2 \cdot 5 / 105 = 95.24 \text{ кГц},$$

$$f_3 = 1000 \cdot 2 \cdot 7 / 105 = 133.33 \text{ кГц}.$$

Теперь можно вернуться к гармоникам ГУН. Пусть диапазон преобразуемых алиасным АЦП напряжений - от 0 до 5 В, т.е. $E=5$ В, тогда частоты гармоник ГУН при входном уровне сигнала $U_{вх.}=3,2$ В будут равны (по № ГУН):

$$f(3) = 1000 \cdot 3.2 / 5 = 640 \text{ кГц},$$

$$f(4.1) = 640 + 57.14 / 4 = 654.29 \text{ кГц},$$

$$f(4.2) = 640 + 95.24 / 4 = 663.81 \text{ кГц},$$

$$f(4.3) = 640 + 133.33 / 4 = 673.33 \text{ кГц}.$$

Рассчитаем алиасные частоты во всех трактах (по № АЦП):

$$\begin{aligned}
f_a(5.1) &= (-1)^{\lfloor 2 \cdot 640 / 57.14 \rfloor} \cdot (640 - \lfloor 2 \cdot 640 / 57.14 \rfloor \cdot 57.14 / 2 - 57.14 / 4) + 57.14 / 4 = \\
&= (-1)^{22} \cdot (640 - 628.54 - 57.14 / 4) + 57.14 / 4 = 11.46 \text{ кГц}; \\
f_a(5.2) &= (-1)^{\lfloor 2 \cdot 640 / 95.24 \rfloor} \cdot (640 - \lfloor 2 \cdot 640 / 95.24 \rfloor \cdot 95.24 / 2 - 95.24 / 4) + 95.24 / 4 = \\
&= (-1)^{13} \cdot (640 - 13 \cdot 95.24 / 2 - 95.24 / 4) + 95.24 / 4 = 14 \cdot 95.24 / 2 - 640 = 26.68 \text{ кГц}; \\
f_a(5.3) &= (-1)^{\lfloor 2 \cdot 640 / 133.33 \rfloor} \cdot (640 - \lfloor 2 \cdot 640 / 133.33 \rfloor \cdot 133.33 / 2 - 133.33 / 4) + 133.33 / 4 = \\
&= (-1)^9 \cdot (640 - 9 \cdot 133.33 / 2 - 133.33 / 4) + 133.33 / 4 = 10 \cdot 133.33 / 2 - 640 = 26.65 \text{ кГц}; \\
f_a(6.1) &= (-1)^{\lfloor 2 \cdot 654.29 / 57.14 \rfloor} \cdot (654.29 - \lfloor 2 \cdot 654.29 / 57.14 \rfloor \cdot 57.14 / 2 - 57.14 / 4) + 57.14 / 4 = \\
&= (-1)^{22} \cdot (654.29 - 22 \cdot 57.14 / 2 - 57.14 / 4) + 57.14 / 4 = 25.75 \text{ кГц}; \\
f_a(6.2) &= (-1)^{\lfloor 2 \cdot 663.81 / 95.24 \rfloor} \cdot (663.81 - \lfloor 2 \cdot 663.81 / 95.24 \rfloor \cdot 95.24 / 2 - 95.24 / 4) + 95.24 / 4 = \\
&= (-1)^{13} \cdot (663.81 - 13 \cdot 95.24 / 2 - 95.24 / 4) + 95.24 / 4 = 14 \cdot 95.24 / 2 - 663.81 = 2.87 \text{ кГц}; \\
f_a(6.3) &= (-1)^{\lfloor 2 \cdot 673.33 / 133.33 \rfloor} \cdot (673.33 - \lfloor 2 \cdot 673.33 / 133.33 \rfloor \cdot 133.33 / 2 - 133.33 / 4) + 133.33 / 4 = \\
&= (-1)^{10} \cdot (673.33 - 10 \cdot 133.33 / 2 - 133.33 / 4) + 133.33 / 4 = 6.68 \text{ кГц}.
\end{aligned}$$

Поскольку для БПФ необходимо 2^K (K - целое положительное) выборок, то для выполнения условия достаточно, чтобы $K=4$, т.к. максимальное основание $p_n=7$. Определим 2^K выборок по известной формуле для каждого АЦП 5.1-5.3 и 6.1-6.3 для простоты взяв начальную фазу алиасных биений равной нулю, при амплитуде $A=2$ В, равенстве всех диапазонов преобразуемых АЦП напряжений $E_i=5$ В, равенстве разрядности всех АЦП (5.1-5.n и 6.1-6.n) $L=5$ (таблица 1 на фиг. 4). Покажем для примера расчет v_1 для АЦП 5.1:

$$\begin{aligned}
v_1(5.1) &= [\{\sin(2\pi \cdot 1 \cdot 11.46 / 57.14) + 1\} \cdot 2^5 \cdot 2 / 5] - [2^5 \cdot 2 / 5] = [1.95 \cdot 12.8] - [12.8] = \\
&= [24.9] - [12.8] = 12.
\end{aligned}$$

Полученные на АЦП (5.1-5.3 и 6.1-6.3) выборки передаются спецпроцессорам БПФ 7.1-7.3 и 8.1-8.3, на выходе которых формируется по девять значений, соответствующих линиям АЧХ в первой зоне Найквиста. В блоках максимальной амплитуды 9.1-9.3 и 10.1-10.3 на основе полученных значений АЧХ производится интерполяция максимума спектра к непозиционному виду: в (9.1-9.3) по основанию p_i , а в дополнительных (10.1-10.3) по основанию 2. Алгоритм интерполяции может быть разным, но в данном случае удобно исходить из площади фигуры под кривой спектра в соответствующей непозиционной полосе частот, поскольку такой подход нагляден. Согласно фиг. 5, на выходах основных блоков максимальной амплитуды формируются следующие значения: (9.1) - 1, (9.2) - 2, (9.3) - 2. Согласно фиг. 6, на выходах дополнительных блоков максимальной амплитуды формируются значения: (10.1) - 0, (10.2) - 1, (10.3) - 1. Окончательное формирование кода СОК происходит на блоках вычитания (12.1-12.3): $\alpha_1=1$, $\alpha_2=(5-1)-2=2$, $\alpha_3=(7-1)-2=4$. Таким образом, код в СОК по основаниям $p_1=3$, $p_2=5$, $p_3=7$ равен 1, 2, 4.

Проверим полученный результат. Рассмотрим параллельный АЦП (Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: Пер. с англ. - Изд. 6-е. - М.: Мир, 2003. - 704 с, рис. 9.49) (без смещения нуля на $1/2$ младшего разряда), состоящего из делителя опорных напряжений, компараторов, количество которых $P=3 \cdot 5 \cdot 7=105$, и шифратора. Измеряемое напряжение равно 3,2 В. Получив таблицу опорных напряжений (таблица 2 на фиг. 7), кратных $E/105$, где $E=5$ В, обнаруживаем, что компараторы с 1-го по 67-й установятся в «1», а все остальные в «0». Следовательно,

на выходе шифратора установится код, десятичное представление которого равно 67. Целые остатки от деления числа 67 на 3, 5 и 7 соответственно равны 1, 2 и 4.