

*ПРЕОБРАЗОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНЫХ СИГНАЛОВ В ДИСКРЕТНЫЕ***В.И. КЛЮЧКО, Н.В. КУШНИР, А.С. МАТЯЖ, В.А. ЖУКОВ**

*Кубанский государственный технологический университет,
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2;
электронная почта: kushnir.06@mail.ru*

Информация для человека играет немаловажную роль, поэтому основной из задач человечества является обработка и упорядочивание данной информации. Хотя поступающую информацию можно хранить, передавать и обрабатывать как в виде непрерывных, так и в виде дискретных сигналов, на современном этапе развития информационной техники предпочтение отдается дискретным сигналам, поэтому сигналы, как правило, преобразуются в дискретные. С этой целью каждый непрерывный сигнал подвергается операциям квантования по времени (дискретизации) и по уровню. Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) предназначены для преобразования аналоговой величины в цифровой код. Другими словами, АЦП - это устройства, которые принимают аналоговые сигналы и генерируют соответствующие им цифровые. Суть преобразования аналоговых величин заключается в представлении некой непрерывной функции (например, напряжения) от времени в последовательность чисел, отнесенных к неким фиксированным моментам времени. Материалы статьи могут быть применены для подготовки бакалавров, изучающих такие дисциплины, как «Теория информации и сигналов» и «Информационные системы и технологии».

Ключевые слова: аналого-цифровые преобразователи, цифровой код, дискретизация, квантование.

Актуальность исследования. Тенденции становления прогрессивного мира таковы, что всё меньше времени проходит между научным открытием и его олицетворением. Особенно наглядно это видно в сфере информационных технологий. То, что практически год назад казалось невообразимым, уже сейчас активно употребляется и никого не поражает. Это касается и аналого-цифровых преобразователей (АЦП). В недалеком прошлом развитие вычислительной техники позволило оценить их потенциал. На данный момент же исследования в области АЦП продвигаются огромными шагами. Скорость технического прогресса так велика, что иногда некоторые исследования сходу не обретают практического внедрения. Случается, что очень перспективные исследования замораживаются в связи с отсутствием финансирования, или остаются на уровне сверхтехнологичной игрушки.

Аналого-цифровые преобразователи - это устройства, которые принимают аналоговые сигналы и генерируют соответствующие им цифровые. Иначе говоря, АЦП предназначены для преобразования аналоговой величины в цифровой код.

Суть преобразования аналоговых величин содержится в представлении некоторой непрерывной функции (к примеру, напряжения) от времени в последовательность чисел, отнесенных к некоторым фиксированным моментам времени [4].

Хотя поступающую информацию можно хранить, передавать и обрабатывать как в виде непрерывных, так и в виде дискретных сигналов, на современном этапе развития информационной техники предпочтение отдается дискретным сигналам, поэтому сигналы, как правило, преобразуются в дискретные. С данной целью каждый непрерывный сигнал подвергается операциям квантования по времени (дискретизации) и по уровню.

Дискретизация и квантование. Под *дискретизацией* понимают преобразование функции непрерывного времени в функцию дискретного времени, представляемую совокупностью величин, именуемых координатами, по значениям которых начальная непрерывная функция может быть восстановлена с заданной точностью. Роль координат нередко выполняют мгновенные значения функции, отсчитанные в определённые моменты времени.

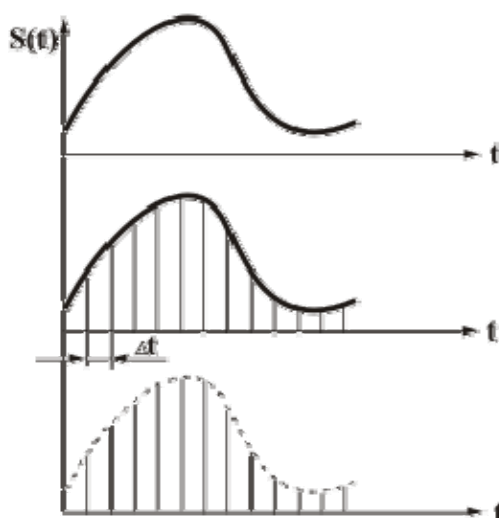


Рисунок. 1 - Принцип дискретизации.

На рисунке 1 показана наиболее распространенная равномерная дискретизация. Поначалу имеется непрерывный сигнал $S(t)$. Потом он подвергается разбиению на равные промежутки времени Δt . Вот эти промежутки "дельта тэ" и есть дискретные отсчеты, которые именуется периодами дискретизации. В итоге получается последовательность отсчетов (дискретных) с шагом в Δt . По сути в основе дискретизации непрерывных сигналов лежит возможность представления их, т. е. сигналов, в виде взвешенных сумм неких коэффициентов, обозначим их как a_i , по-другому именуемых отсчетами, и набора элементарных функций, обозначим их как $f_i(t)$, применяемых при восстановлении сигнала по его отсчетам.

Период дискретизации выбирается из условия:

$$\Delta t = 1/2F_{\text{в}},$$

где $F_{\text{в}}$ - максимальная частота спектра сигнала. Это выражение является теоремой Котельникова, которая гласит: Любой непрерывный сигнал можно абсолютно точно восстановить на выходе идеального полосового фильтра (ПФ) с полосой $F_{\text{в}}$, если дискретные отсчеты взяты через интервал $\Delta t = 1 / 2F_{\text{в}}$. А это означает, что частота дискретизации должна быть в два раза больше максимальной частоты сигнала. На практике, к примеру, это отлично иллюстрирует обычный Compact Disc (CD) либо, как его именуют, AudioCD. CD записывают с частотой дискретизации 44,1 кГц. А это означает, что наибольшая верхняя частота будет равна 22 кГц, чего, как считается, вполне достаточно для уха человека (помните, частотный спектр для уха человека равен 20...20 000 Гц).

Под квантованием понимают преобразование некой величины с непрерывной шкалой значений в величину, имеющую дискретную шкалу значений. Оно сводится к подмене любого мгновенного значения одним из конечного множества разрешенных значений, именуемых уровнями квантования.

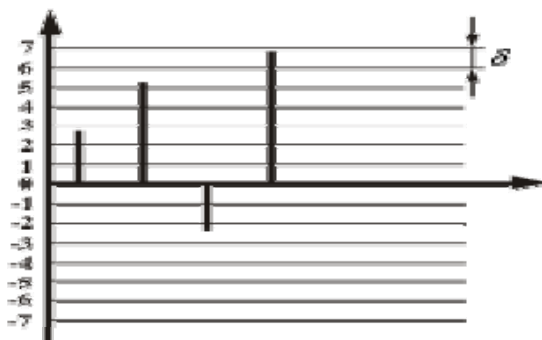


Рисунок 2 – Квантование.

На рисунке 2 изображено равномерное квантование. Одним из главных параметров является δ - шаг квантования. Соответственно, при равномерном квантовании шаг квантования одинаков. Итак, согласно определению вставляем отсчеты в подготовленную сетку. Первый (слева направо) отсчет находится ближе к уровню 3 (уровни квантования - по вертикальной оси). Второй - к 5-му уровню и т. п. Таким образом, вместо последовательности отсчетов получаем последовательность чисел, соответствующих уровням квантования [5].

При равномерном квантовании динамический диапазон выходит достаточно большим, а это не есть хорошо. Поэтому придумали так называемое неравномерное квантование, при котором динамический диапазон уменьшается. Шаг квантования δ будет различным при различных уровнях. При малых уровнях сигнала шаг небольшой, при больших он возрастает. На практике же неравномерное квантование фактически не используется. Вместо этого используют компрессоры, причем американцы пользуют μ -компрессоры, европейцы - А-компрессоры (греческая буква μ читается "мю"). Характеристика компрессора показана на рисунке 3.



Рисунок 3 - Амплитудная характеристика компрессора.

Для восстановления ужато́го динамического диапазона используют декомпрессор либо экспандер. Амплитудная характеристика экспандера обратна компрессору [1].

Параллельные АЦП. Большая часть высокоскоростных осциллографов и некоторые высокочастотные измерительные приборы используют параллельные АЦП из-за их высокой скорости преобразования, которая может достигать 5Г (5×10^9) отсчетов/сек для стандартных устройств и 20Г отсчетов/сек для оригинальных разработок. Параллельные АЦП имеют разрешение до 8 разрядов, но встречаются также 10-ти разрядные версии.

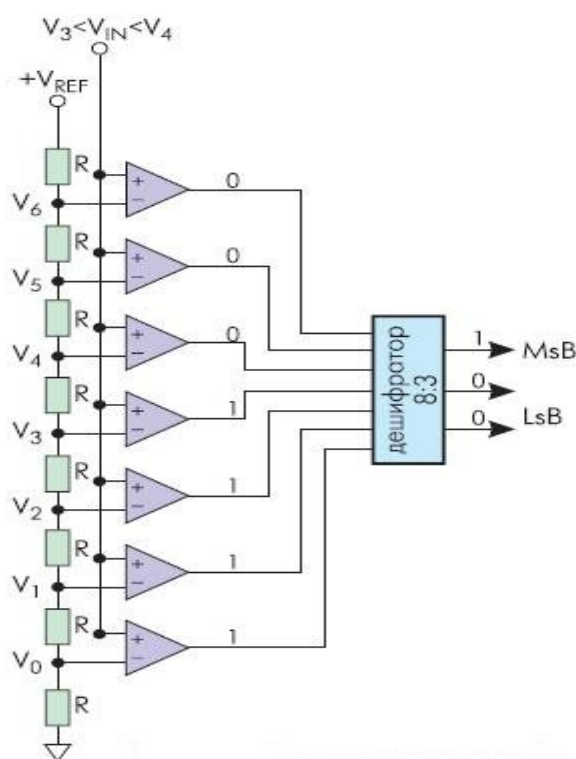


Рис. 4 - АЦП параллельного преобразования

На рисунке 4 изображена облегчённая блок-схема 3-х разрядного параллельного АЦП (для преобразователей с большим разрешением принцип работы сохраняется). В данном случае используется массив компараторов, каждый из которых сравнивает входное напряжение с индивидуальным опорным напряжением. Такое опорное напряжение для каждого компаратора формируется на интегрированном прецизионном резистивном делителе. Значения опорных напряжений начинаются со значения, равного половине младшего значащего разряда (LSB), и возрастают при переходе к каждому

<http://ntk.kubstu.ru/file/997>

следующему компаратору с шагом, равным $V_{REF} / 2^3$. В итоге для 3-х разрядного АЦП требуется $2^3 - 1$ или семь компараторов. А, к примеру, для 8-разрядного параллельного АЦП будет нужно уже 255 (или $(2^8 - 1)$) компараторов.

С повышением входного напряжения компараторы поочередно устанавливают свои выходы в логическую единицу вместо логического нуля, начиная с компаратора, отвечающего за младший значащий разряд. Можно представить преобразователь как ртутный термометр: с ростом температуры столбик ртути поднимается. На рисунке 4 входное напряжение попадает в интервал между V_3 и V_4 , таким образом, 4 нижних компаратора имеют на выходе "1", а верхние три компаратора - "0". Дешифратор конвертирует $(2^3 - 1)$ - разрядное цифровое слово с выходов компараторов в двоичный 3-х разрядный код.

Параллельные АЦП - довольно быстрые устройства, но они имеют свои недочёты. Из-за необходимости использовать большое количество компараторов параллельные АЦП потребляют значительную мощность, и их нецелесообразно использовать в приложениях с батарейным питанием [6].

Последовательные АЦП. Последовательные АЦП бывают последовательного счета и последовательного приближения.

АЦП последовательного счета. Этот преобразователь является типичным примером последовательных АЦП с единичными приближениями и состоит из компаратора, счетчика и ЦАП. На один вход компаратора поступает входной сигнал, а на другой - сигнал обратной связи с ЦАП.

Работа преобразователя начинается с прихода импульса запуска, который включает счетчик, суммирующий число импульсов, поступающих от генератора тактовых импульсов ГТИ. Выходной код счетчика подается на ЦАП, осуществляющий его преобразование в напряжение обратной связи U_{oc} . Процесс преобразования длится до того времени, пока напряжение обратной связи сравнивается с входным напряжением и переключится компаратор, который своим выходным сигналом прекратит поступление тактовых импульсов на счетчик. Переход выхода компаратора из 1 в 0 означает завершение процесса

преобразования. Выходной код, пропорциональный входному напряжению в момент окончания преобразования, считывается с выхода счетчика.

Время преобразования АЦП этого типа является переменным и определяется входным напряжением. Его максимальное значение соответствует наибольшему входному напряжению и при разрядности двоичного счетчика N и частоте тактовых импульсов $f_{\text{такт}}$ равно

$$t_{\text{пр.макс}} = (2^N - 1) / f_{\text{такт}}$$

Например, при $N=10$ и $f_{\text{такт}}=1$ МГц $t_{\text{пр.макс}}=1024$ мкс, что обеспечивает максимальную частоту выборок порядка 1 кГц.

Статическая погрешность преобразования определяется суммарной статической погрешностью используемых ЦАП и компаратора. Частоту счетных импульсов необходимо выбирать с учетом окончания переходных процессов в них.

При работе без устройства выборки-хранения апертурное время совпадает со временем преобразования. Как следствие, результат преобразования чрезвычайно сильно зависит от пульсаций входного напряжения. При наличии высокочастотных пульсаций среднее значение выходного кода нелинейно зависит от среднего значения входного напряжения. Это означает, что АЦП данного типа без устройства выборки-хранения применимы для работы с неизменными или медленно изменяющимися напряжениями, которые за время преобразования изменяются не более, чем на значение кванта преобразования.

Таким образом, особенностью АЦП последовательного счета является маленькая частота дискретизации, достигающая нескольких кГц. Достоинством АЦП данного класса является сравнительная простота построения, определяемая последовательным характером выполнения процесса преобразования [7].

АЦП последовательного приближения. Когда необходимо разрешение 12, 14 либо 16 разрядов и не требуется высокая скорость преобразования, а определяющими факторами считаются низкая стоимость и невысокое

энергопотребление, то обычно используют АЦП последовательного приближения. Данный вид АЦП в большинстве случаев используется в различных измерительных устройствах и в системах сбора данных. В настоящий момент АЦП последовательного приближения позволяют измерять напряжение с точностью до 16 разрядов с частотой дискретизации от 100К (1×10^3) до 1М (1×10^6) отсчетов/сек.

Рисунок 5 показывает упрощенную блок-схему АЦП последовательного приближения. В основе АЦП этого вида лежит особый регистр последовательного приближения. Сначала цикла преобразования все выходы данного регистра устанавливаются в логический 0, кроме первого (старшего) разряда. Это формирует на выходе внутреннего цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) сигнал, значение которого равно половине входного диапазона АЦП. А выход компаратора переключается в состояние, определяющее разницу между сигналом на выходе ЦАП и измеряемым входным напряжением.

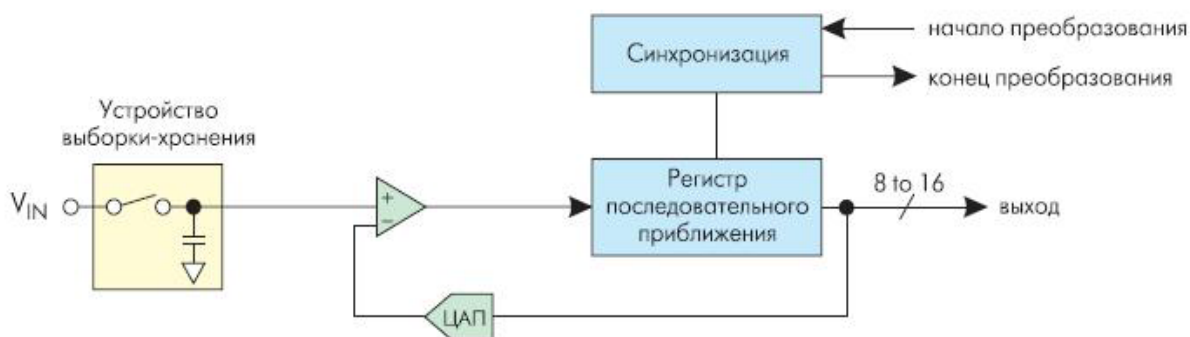


Рисунок 5 - упрощенная блок-схема АЦП последовательного приближения.

Например, для 8-разрядного АЦП последовательного приближения (рис. 5) выходы регистра при этом устанавливаются в "10000000". Если входное напряжение меньше половины входного диапазона АЦП, тогда выход компаратора примет значение логического 0. Это дает регистру последовательного приближения команду переключить собственные выходы в состояние "01000000", что в соответствии с этим приведет к изменению выходного напряжения с ЦАП, подаваемого на компаратор. Если при этом выход компаратора по-прежнему оставался бы в "0", то выходы регистра

переключились бы в состояние "00100000". Но на этом такте преобразования выходное напряжение ЦАП меньше, чем входное напряжение (рис. 6), и компаратор переключается в состояние логической 1. Это предписывает регистру последовательного приближения сохранить "1" во втором разряде и подать "1" на третий разряд. Описанный алгоритм работы затем снова повторяется до последнего разряда. Таким образом, АЦП последовательного приближения потребуется один внутренний такт преобразования для каждого разряда, либо N тактов для N-разрядного преобразования.

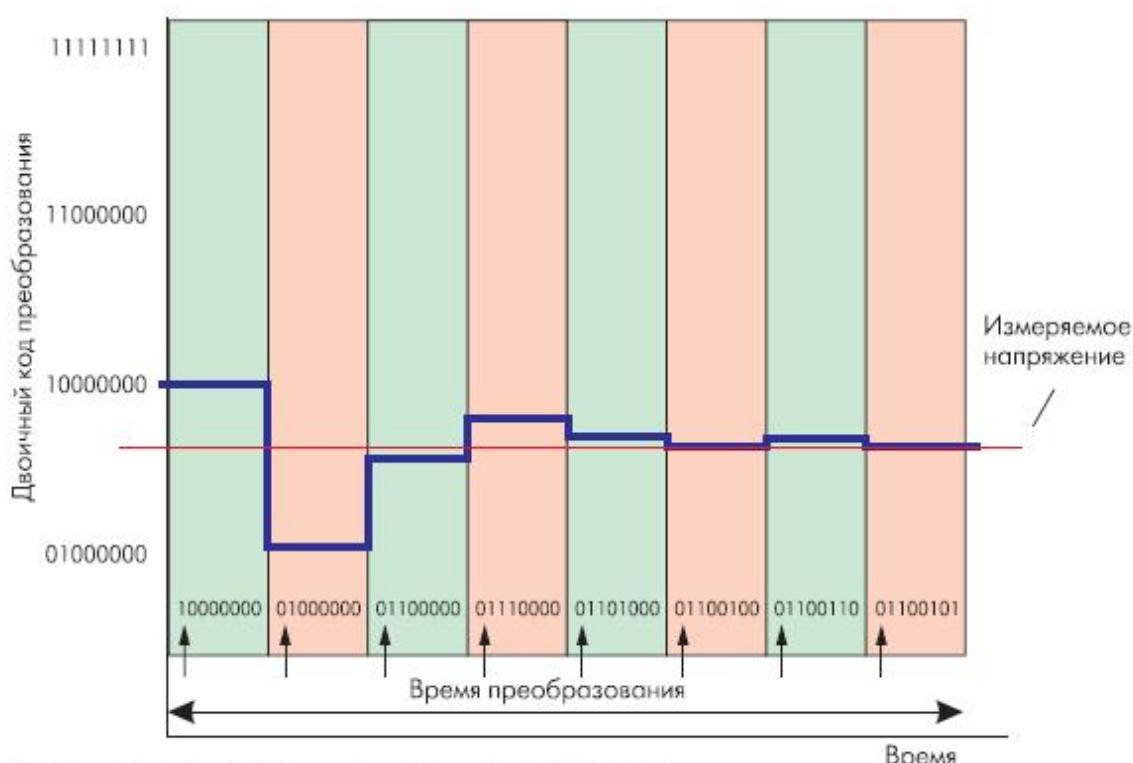


Рисунок 6 - Преобразования выходного напряжения.

Все же, работа АЦП последовательного приближения имеет особенность, связанную с переходными процессами во внутреннем ЦАП. Теоретически, напряжение на выходе ЦАП для каждого из N внутренних тактов преобразования должно устанавливаться за одинаковый промежуток времени. Хотя, данный промежуток в первых тактах значительно больше, нежели в последних. Поэтому время преобразования 16-разрядного АЦП последовательного приближения более, чем в два раза превышает время преобразования 8-разрядного АЦП данного типа [8].

Последовательно-параллельные АЦП. Следующими видами аналого-цифровых преобразователей, занимающих промежуточное место между высокоскоростными параллельными АЦП и более распространенными АЦП последовательного приближения, считаются последовательно-параллельные АЦП. Рассмотрим работу последовательно-параллельного АЦП на примере восьмиразрядного АЦП. Структурная схема этого АЦП приведена на рисунке 7.

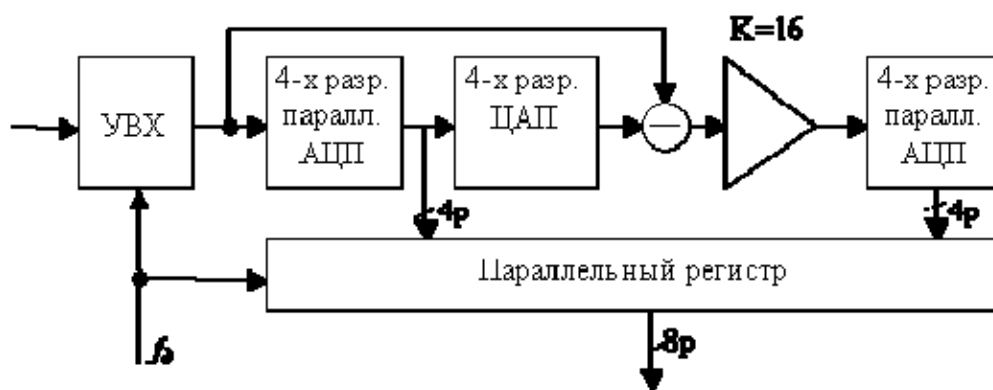


Рисунок 7 - Структурная схема восьмиразрядного последовательно-параллельного АЦП.

В схеме восьмиразрядного последовательно-параллельного АЦП используются два параллельных четырехразрядных АЦП. Второй аналого-цифровой преобразователь описывает ошибку квантования, выделяемую с помощью цифро-аналогового преобразователя и аналогового вычитателя. Если бы мы преобразовывали входной сигнал в цифровую форму без погрешности, то на выходе АЦП (а потом и на выходе цифро-аналогового преобразователя) мы бы получили конкретную копию входного сигнала, но это не так. Поэтому на выходе аналогового вычитателя формируется сигнал ошибки преобразования.

Для того чтобы в схеме можно было бы использовать одинаковые АЦП, сигнал ошибки преобразования первого аналого-цифрового преобразователя усиливается в 16 раз. В результате уровень сигнала на входе второго АЦП равен уровню сигнала на входе первого АЦП, а значит можно использовать схему, полностью идентичную первому аналого-цифровому преобразователю. Следует отметить, что вычитатели обычно выполняют с использованием

операционных усилителей, поэтому обычно в составе последовательно-параллельного преобразователя используется усиливающий вычитатель.

В результате усложнения схемы есть некое преимущество. Так как разрядность параллельных преобразователей снижена в два раза, то для их реализации в случае, приведенном на рисунке 1, требуются лишь $2 * 15 = 30$ компараторов. Для реализации восьмиразрядного АЦП, как это уже упоминалось в предыдущей главе, нам бы понадобилось 255 компараторов. Другими словами успех по сложности реализации схемы составляет практически в 10 раз! Сейчас давайте оценим, во сколько же раз мы проиграли в быстродействии? До того как у нас появится возможность сформировать на выходе восьмиразрядный двоичный код, нужно чтоб сигнал был преобразован в цифровую форму первым АЦП, опять преобразован в аналоговую форму цифро-аналоговым преобразователем. Потом должен быть сформирован и усилен сигнал ошибки, и этот сигнал обязан быть снова оцифрован. В следствие описанных действий время преобразования входного аналогового сигнала возрастает, как минимум, в 4 раза. Важна формулировка — время преобразования, а не тактовая частота. Как определено раньше, время преобразования в параллельном АЦП в несколько раз больше периода тактовой частоты (частоты дискретизации аналогового сигнала). Все это время сигнал на входе преобразователя не должен изменяться. Это означает, что в составе последовательно-параллельного АЦП обязано присутствовать прибор выборки и хранения.

Тем не менее, как и в случае с параллельным аналого-цифровым преобразователем, быстродействие всей схемы в целом может быть увеличено за счет применения конвейерной обработки. Достаточно разбить алгоритм преобразования на несколько этапов, которые могут выполняться одновременно [3].

В цифровой части преобразователя разбиение на этапы производится с помощью параллельных регистров. В аналоговой части для данной цели служат устройства выборки и хранения. И на регистры и на устройства выборки и

хранения подается тактовая частота аналого-цифрового преобразователя. Данная частота совпадает с частотой дискретизации входного аналогового сигнала.

Структурная схема восьмиразрядного последовательно-параллельного преобразователя, использующая принцип конвейерного преобразования сигнала, приведена на рисунке 8.

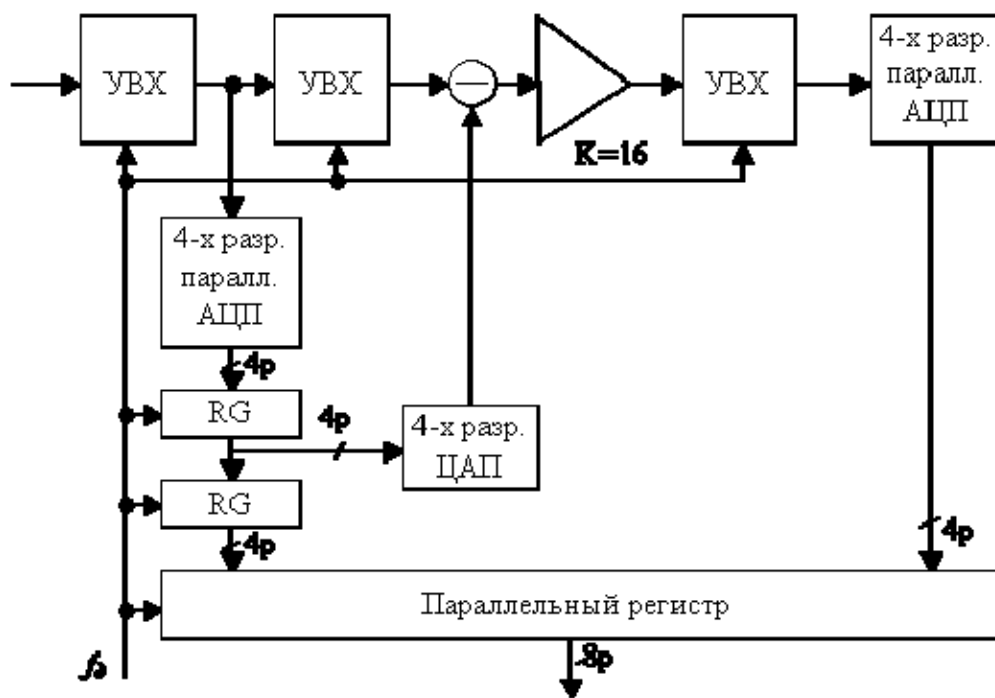


Рисунок 8 - Структурная схема конвейерного восьмиразрядного последовательно-параллельного АЦП.

В структурной схеме (рис. 8), пока осуществляется преобразование в цифровую форму сигнала ошибки, формируется сигнал ошибки следующего отсчета сигнала. Пока формируется сигнал ошибки следующего отсчета сигнала, осуществляется формирование старших 4 разрядов выходного кода. Единственная трудность состоит в том, что нужно совместить сформированные старшие и младшие разряды во времени. Это осуществляется за счет задержки старших разрядов в цифровой линии задержки, собранной на параллельных регистрах.

В приведенной на рисунке 8 схеме выходной отсчет входного сигнала появится только через три тактовых импульса. Все последующие отсчеты

входного аналогового сигнала будут появляться с каждым очередным тактовым импульсом [2].

Выводы: последовательно-параллельный АЦП способен осуществлять преобразование сигнала с большей разрядностью по сравнению с параллельным АЦП. Но он обладает наименьшим быстродействием, примерно равным времени задержки параллельного АЦП. Последовательно-параллельные АЦП способны формировать цифровой поток данных со скоростью несколько сотен миллионов отсчетов в секунду.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЦП - Аналого-цифровые преобразователи

CD - Compact Disc

ЛИТЕРАТУРА

1. Микушин А.В., Сажнев А.М., Сединин В.И. Цифровые устройства и микропроцессоры. СПб, БХВ-Петербург, 2010. – 832 с.
2. Угрюмов Е. П. Цифровая схемотехника. СПб, БХВ-Петербург, 2004.-528 с.
3. Шило В. Л. Популярныe цифровые микросхемы. М, Радио и связь, 1987. – 352 с.
4. Аналого-цифровые преобразователи - [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://naf-st.ru/articles/digit/adc>
5. Преобразование непрерывных сигналов в дискретные [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.studfiles.ru/preview/1874506>
6. Устройство и принцип действия АЦП - [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/05_03/stat_adc.htm
7. Аналого-цифровые преобразователи. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://xreferat.com/38/86-1-analogo-cifrovye-preobrazovateli.html>
8. Вольфганг Райс, Как работают аналого-цифровые преобразователи. . – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.efo.ru/doc/Silabs/Silabs.pl?2089>

REFERENCES

1. Mikushin A.V., Sazhnev A.M., Sedinin V.I. Tsifrovye ustroystva i mikroprotssory. SPb, BKHV-Peterburg, 2010. – 832 s.
2. Ugryumov E. P. Tsifrovaya skhemotekhnika. SPb, BKHV-Peterburg, 2004. 528 s
3. Shilo V. L. Populyarnye tsifrovye mikroskhemiy. M, Radio i svyaz, 1987-352 s.
4. Analogo-tsifrovye preobrazovateli [Elektronnyy resurs] – Rezhim dostupa: <http://naf-st.ru/articles/digit/adc>
5. Preobrazovanie nepreryvnykh signalov v diskretnye [Elektronnyy resurs] – Rezhim dostupa: <http://www.studfiles.ru/preview/1874506>
6. Ustroystvo i printsip deystviya ATsP - [Elektronnyy resurs] – Rezhim dostupa: http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/05_03/stat_adc.htm
7. Analogo-tsifrovye preobrazovateli. – [Elektronnyy resurs] – Rezhim dostupa: <http://xreferat.com/38/86-1-analogo-cifrovye-preobrazovateli.html>
8. Wolfgang Rays, Kak rabotayut analogo-tsifrovye preobrazovateli. . – [Elektronnyy resurs] – Rezhim dostupa: <http://www.efo.ru/doc/Silabs/Silabs.pl?2089>

*TRANSFORMATION OF CONTINUOUS SIGNALS IN DIGITAL***V.I. KLYUCHKO, N.V. KUSHNIR, A.S. MATYAZH, V.A. ZHUKOV**

*Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072,
e-mail: kushnir.06@mail.ru*

Information for the person plays an important role, so the main task of mankind is to process this information and ordering. Although the incoming data can be stored, transmitted and processed in a continuous and in the form of digital signals, at the present stage of development of information technology preferred binary signals so that the signals are generally converted to digital. To this end, each continuous signal is subjected to time operations quantization (sampling) and the level. Analog-to-digital converters (ADCs) designed for converting the analog value into a digital code. In other words, the ADC - are devices which take analog signals and generating corresponding digital signals. The essence of the transformation of analog values is to present some continuous function (eg, voltage) from time to time in the sequence of numbers assigned to certain fixed points in time. Article Submissions may be used for preparation of bachelors studying such disciplines as "Theory of information and signals" and "Information systems and technology."

Key words: analog-to-digital converters, digital code, sampling, quantization.