

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Дисциплина «Метрология, стандартизация и сертификация»
для студентов направления подготовки 10.03.01 Информационная
безопасность**

Профиль «Организация и технология защиты информации»

Лекция №8

Тема: «Принципы построения цифровых измерительных приборов»

Учебные вопросы:

- 1) Принципы построения цифровых средств измерений.**
- 2) Аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи цифровых измерительных приборов**

ЛИТЕРАТУРА

Основная литература:

1. Метрология и радиоизмерения. Учебник для вузов/ В.И. Нефедов, В.И. Хахин, В.К. Битюков и др./Под ред. профессора В.И. Нефедова. – М.: Высшая школа, 2011. – 526 с.
2. Метрология и электрорадиоизмерения в телекоммуникационных системах/ В.И. Нефедов, В.И. Хахин, В.К. Битюков и др /Под ред. профессора В.И. Нефедова. – М.: Высшая школа, 2010. – 340 с.

Дополнительная литература:

1. Никифоров А.Д., Бакиев Т.А. Метрология, стандартизация и сертификация. – М.: Высшая школа, 2006. – 240 с.
2. Снытников А.А. Лицензирование и сертификация в области защиты информации. – М.: Гелиос АРВ, 2005. – 192 с.
3. Лаптиеv Э. И., Брюхонов В. А. Межрегиональная научно-практическая конференция "Метрологическое обеспечение испытаний и сертификации продукции и услуг" // Стандарты и качество, 2008г., №8, стр. 26-28.
4. Стандартизация и управление качеством продукции: Учебник для ВУЗов / В. А. Швандар, В. Пейджер: Панов, Е. М. Купряков и др.; под ред. В. А. Швандара. - М.: Юнити-Дана, 2009. - 487 с.
5. Шишкин И. Ф. Метрология, стандартизация и управление качеством. - М.: Издательство стандартов, 2007. - 342 с.

Актуальность лекции

Большое практическое значение для повышения удобства, точности и универсальности измерений имеет применение цифровых измерительных приборов.

Принцип действия цифровых измерительных приборов отличается от принципа действия аналоговых измерительных приборов. Основу их работы составляет аналого-цифровое преобразование входных сигналов, с последующим извлечением и определением измерительной информации. Знание принципа действия цифровых измерительных приборов имеет большое значение при современных измерениях.

Вопрос 1. Принципы построения цифровых средств измерений

Цифровым измерительным прибором (ЦИП) называется средство измерения, автоматически вырабатывающее дискретные сигналы измерительной информации, показания которого представлены в цифровой форме.

По виду измеряемых величин цифровые измерительные приборы подразделяются на:

- вольтметры и амперметры постоянного и переменного тока (напряжения);
- омметры и мосты постоянного и переменного тока;
- комбинированные приборы;
- измерители частоты, интервалов времени и фазового сдвига;
- специализированные ЦИП, предназначенные для определения времени срабатывания различных элементов и т.д.

Диапазон измеряемых посредством ЦИП величин обычно весьма широкий и разбивается на ряд поддиапазонов. Выбор нужного поддиапазона в процессе измерения производится вручную или автоматически. Измерение на выбранном поддиапазоне всегда осуществляется автоматически.

Основными классификационными признаками ЦИП принято считать вид измеряемой величины и способ преобразования, определяющие такие важные характеристики, как **точность и быстродействие**.

По виду входных физических величин ЦИП объединяют в следующие основные группы приборов для измерения:

- постоянного и переменного тока (напряжения);
- параметров R , L и C электрических цепей;
- временных параметров (частоты, периода, временного интервала, фазы).

Разновидностями ЦИП, входящих в упомянутые группы, являются средства измерений с микропроцессорами, виртуальные приборы на основе компьютеров и цифровые осциллографы.

Наиболее важными техническими характеристиками ЦИП, определяющими возможность их использования для конкретной измерительной задачи, являются: пределы измерения, цена деления, входное сопротивление, **быстродействие, точность, помехоустойчивость** и

Цену деления шкалы ЦИП можно определить по формуле

$$Z = X_{\max} / 10^m \quad (1)$$

где X_{\max} — максимальное значение предела измерения; m — число разрядов десятичного цифрового отсчета



Рисунок 1 – Иллюстрация определения цены деления цифрового измерительного прибора

На рисунке 1 представлены различные ЦИП, у которых имеется в данных режимах следующее максимальное значение предела измерения:

для вольтметра $X_{max} = 9,999 \text{ V}$; $Z = 9,999/10^4 = 9,999 \cdot 10^{-4} \text{ V}$.

для амперметра $X_{max} = 9,999 \text{ A}$; $Z = 9,999/10^4 = 9,999 \cdot 10^{-4} \text{ A}$.

для частотомера $X_{max} = 99,99 \cdot 10^6 \text{ Hz}$; $Z = 99,99 \cdot 10^6 / 10^4 = 99,99 \cdot 10^2 \text{ Hz}$.

для ваттметра $X_{max} = 999,9 \text{ kW}$; $Z = 999,9/10^4 = 999,9 \cdot 10^{-4} \text{ kW}$.

для варметра $X_{max} = 9,999 \text{ Mvar}$; $Z = 9,999/10^4 = 9,999 \cdot 10^{-4} \text{ Mvar}$.

Для каждого предела измерения цена деления постоянна и определяет максимально возможную разрешающую способность для данного типа ЦИП.

Разрешающая способность ЦИП — это изменение цифрового отсчета на единицу первого (младшего) разряда. Иногда под разрешающей способностью понимают значение цены деления младшего (для многопредельных приборов) предела ЦИП.

Быстродействие определяется максимальным интервалом времени, необходимым для выполнения одного полного цикла измерения (для ЦИП это время измерения и время индикации) или преобразования (для ДЦП) входной величины. Для ЦИП с равномерной временной дискретизацией этот интервал измерения определяется шагом дискретизации t , а быстродействие — количеством измерений (преобразований) в 1 с, т.е. значением $1/(t)$.

Помехоустойчивость ЦИП — способность сохранять необходимую точность измерения при наличии различных возмущающих воздействий (помех). Устранить влияние помех, появляющихся вместе с сигналом на входных зажимах ЦИП, полностью нельзя. Поэтому помехоустойчивость численно характеризуется степенью подавления помех на входе ЦИП.

Оценку помехоустойчивости ЦИП обычно вычисляют по

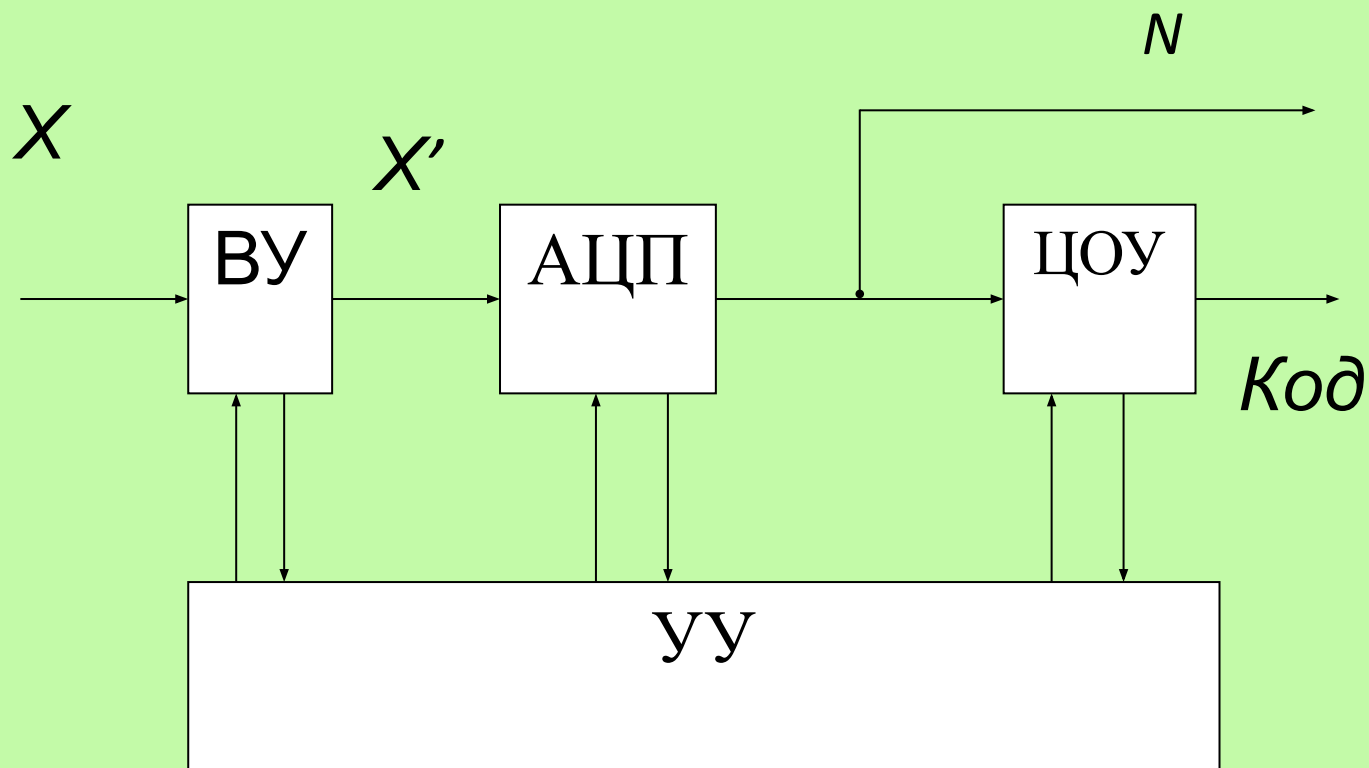


Рисунок 2 - Обобщенная структурная схема ЦАП

Обобщенная структурная схема ЦИП показана на рис. 2.

В цифровом приборе измеряемая величина x подается на *входное устройство (ВУ)*, предназначенное для выделения ее из помех и масштабного преобразования. *Аналого-цифровой преобразователь (АЦП)* преобразует величину x' в код N , который подается на *цифровое отсчетное устройство (ЦОУ)*, где индицируется в виде ряда цифр. Цифровые коды могут выводиться и во внешние устройства, например в компьютер для дальнейшей обработки или хранения. Управляет работой ЦИП *устройство управления (УУ)* путем выработки и подачи определенной последовательности командных сигналов во все функциональные узлы прибора.

По способу преобразования входного сигнала ЦИП условно делятся на приборы *прямого* и *уравновешивающего преобразования*. В ЦИП прямого преобразования отсутствует цепь общей отрицательной обратной связи (т.е. связь выхода с входом). Они обладают повышенным быстродействием, но прецизионные измерения возможны только лишь при высокой точности всех измерительных преобразователей, поэтому применяются редко. ЦИП уравновешивающего преобразования охвачен цепью общей обратной связи. Цепь отрицательной обратной связи представляет собой по существу циф-роаналоговый преобразователь (ЦАП) выходного дискретного сигнала в компенсирующую величину x_k одной физической природы с измеряемой величиной $x(t)$.

По характеру изменения во времени компенсирующей величины x_k ЦИП делят на приборы *развертывающего* и *следящего уравновешивания*. Примером ЦИП первого типа являются приборы, в которых значение компенсирующей величины в каждом цикле измерения возрастает от нуля

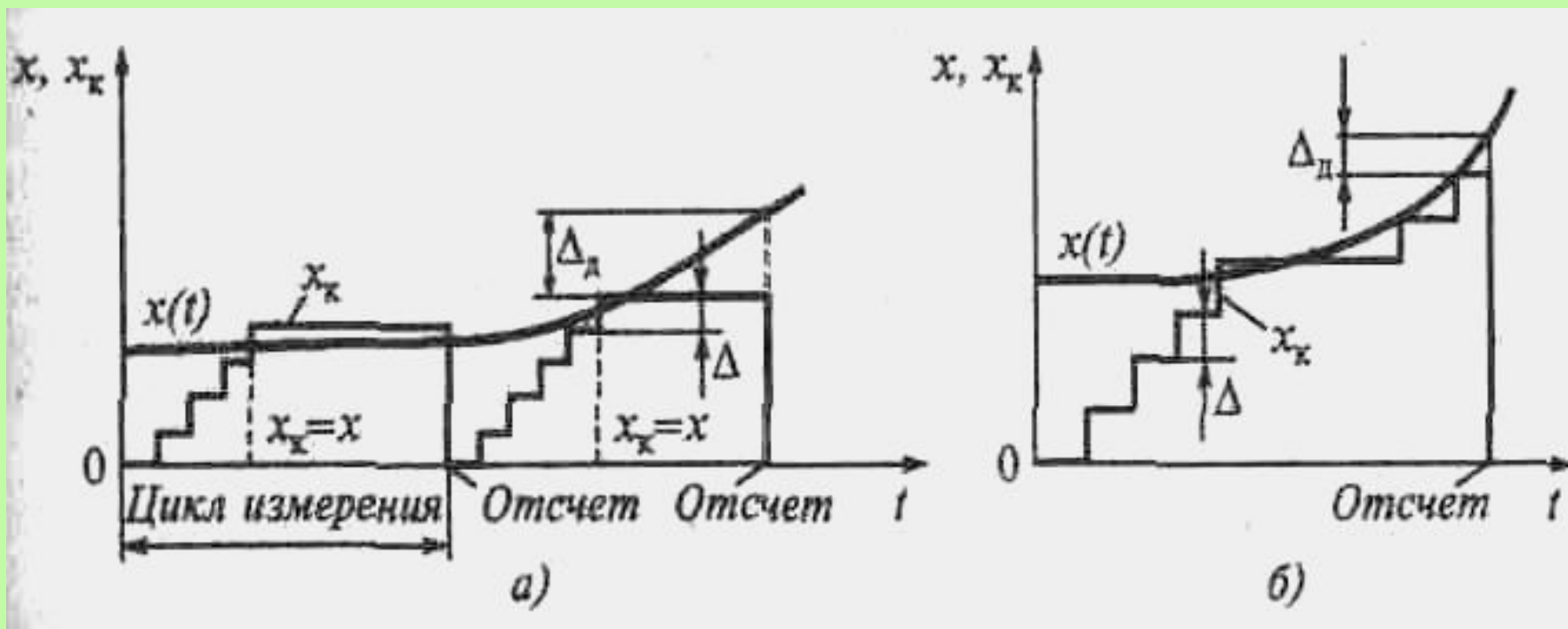


Рисунок 3 - Временные диаграммы к схемам ЦИП уравнивающего типа: а—развертывающего; б—следящего

При идентичности величин $x_k = x$ процесс уравнивания прекращается и фиксируется результат измерения, равный числу ступеней квантования компенсирующей величины. Отсчет показаний обычно производится в конце цикла изменения величины x_k . При этом возникает динамическая погрешность Δ_d , обусловленная изменением измеряемой величины $x(t)$ за интервал времени между моментами уравнивания и отсчета

В приборах следящего уравнивания (рис. 3, б) уровень компенсирующей величины не возвращается к нулю после достижения равенства с измеряемой величиной, а остается постоянным. При изменении x величина x_k соответственно обрабатывает (отслеживает) это изменение так, чтобы разность $x - x_k$ не превышала значения шага квантования Δ . Отсчет производится или в момент уравнивания, или по внешним командам. Следящее уравнивание сложнее в технической реализации, но при прочих равных условиях обеспечивает меньшую динамическую погрешность, которая не превышает шага квантования.

По виду выходного дискретного сигнала ЦИП и АЦП делятся на приборы с двоичной, десятичной и двоично-десятичной формами представления информации. Двоичная форма является самой экономичной и используется в основном для представления информации в системных АЦП.



Рисунок 4 - Упрощённая структурная схема цифрового вольтметра

Цифровые измерительные приборы уравнивающего преобразования представляют собой цифровые мосты постоянного (для измерения R) или переменного (для измерения R , L и C) тока. Сравнение измеряемой величины с образцовой чаще всего осуществляется путем уравнивания мостовой измерительной цепи, в одно из плеч которой включается исследуемый двухполюсник. В смежное плечо моста включается образцовый элемент, представляющий собой набор квантованных образцовых мер, соответствующих весовым коэффициентам разрядов используемого цифрового кода. Изменением параметров образцового двухполюсника добиваются равенства нулю напряжения в измерительной диагонали. Уравнивание моста может быть как следящим, так и

развертывающим

Цифровые вольтметры (ЦВ) являются наиболее распространёнными цифровыми приборами. Упрощённая структурная схема цифрового вольтметра представлена на рис. 4.

Входное устройство содержит делитель напряжения; в вольтметрах переменного тока оно включает в себя также преобразователь переменного тока в постоянный. АЦП преобразует аналоговый сигнал в цифровой, представленный цифровым кодом. Использование в АЦП двоично-десятичного кода облегчает обратное преобразование цифрового кода в десятичное число, отражаемое цифровым отсчётным устройством. Узлы схемы соединены с управляющим устройством.

Вопрос 2. Аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи цифровых измерительных приборов

2.1. Цифроаналоговые преобразователи

Принцип действия четырехразрядного цифроаналогового преобразователя иллюстрируется с помощью простейшей схемы на ОУ, представленной на рисунке 5.

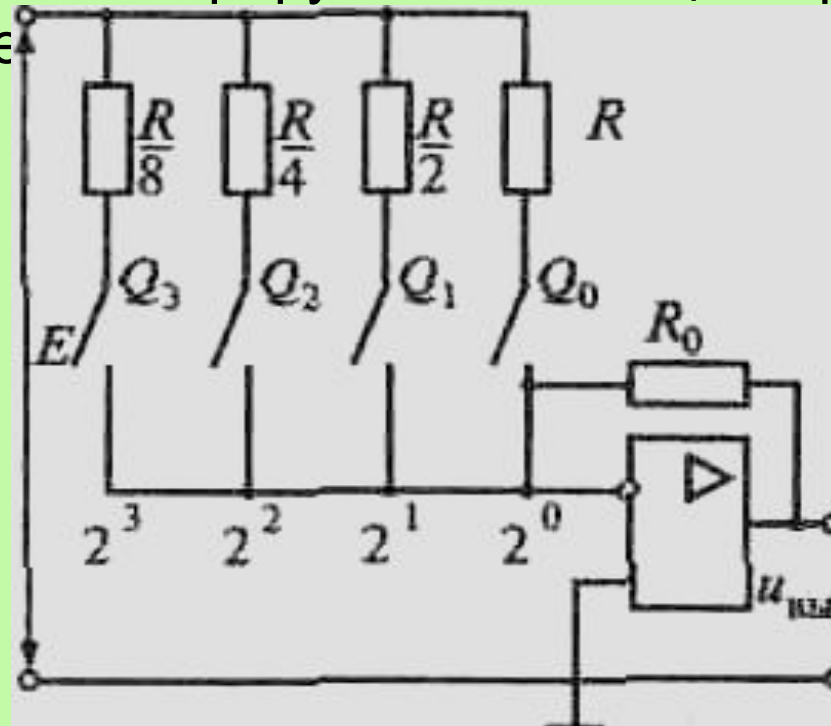


Рисунок 5 - Схема четырехразрядного ЦАП

В зависимости от поступившего кода цифрового сигнала подключаются резисторы с различными номиналами сопротивлений. В схеме ключи замыкаются только при поступлении на них команд, соответствующих логической единице. Коэффициенты усиления инвертирующего усилителя по входам 2^0 , 2^1 , 2^2 и 2^3 соответственно равны

$$\begin{aligned}K_0 &= -R_0 Q_0 / R; \\K_1 &= -2R_0 Q_1 / R; \\K_2 &= -4R_0 Q_2 / R; \\K_3 &= -8R_0 Q_3 / R.\end{aligned}\quad (2)$$

Здесь Q_0 , Q_1 , Q_2 , Q_3 — кодовые числа, принимающие два значения: либо 1 (ключ замкнут), либо 0 (ключ разомкнут).

Из формулы (2) следует, что четырехразрядный двоичный код преобразуется в выходное напряжение, изменяющееся по амплитуде от 0 до 15Δ (Δ — шаг квантования).

Например, двоичному числу 1001 соответствует напряжение $u_{\text{вых1}} = \Delta (1 \cdot 1 + 2 \cdot 0 + 4 \cdot 0 + 8 \cdot 1) = 9 \Delta$, а числу 1100 соответствует напряжение $u_{\text{вых2}} = 12 \Delta$.

Поскольку на вход резистивной матрицы подается постоянное напряжение E , то выходное напряжение ЦАП изменяется скачками при переключении кода цифрового сигнала. Сглаживание выходного сигнала осуществляется *фильтром низкой частоты (ФНЧ)*.

2.2 Аналого-цифровые преобразователи

По своей структуре аналого-цифровые преобразователи (АЦП) более сложны, чем ЦАП, причем последние часто являются основным узлом АЦП. В настоящее время существуют три различных метода построения схем АЦП:

- 1) последовательный,
- 2) параллельный,
- 3) последовательно-параллельный.

Последовательный (последовательного счета) метод построения АЦП (рис. 6) основан на подсчете числа суммирований опорного напряжения младшего разряда, необходимого для получения напряжения, равного входному.

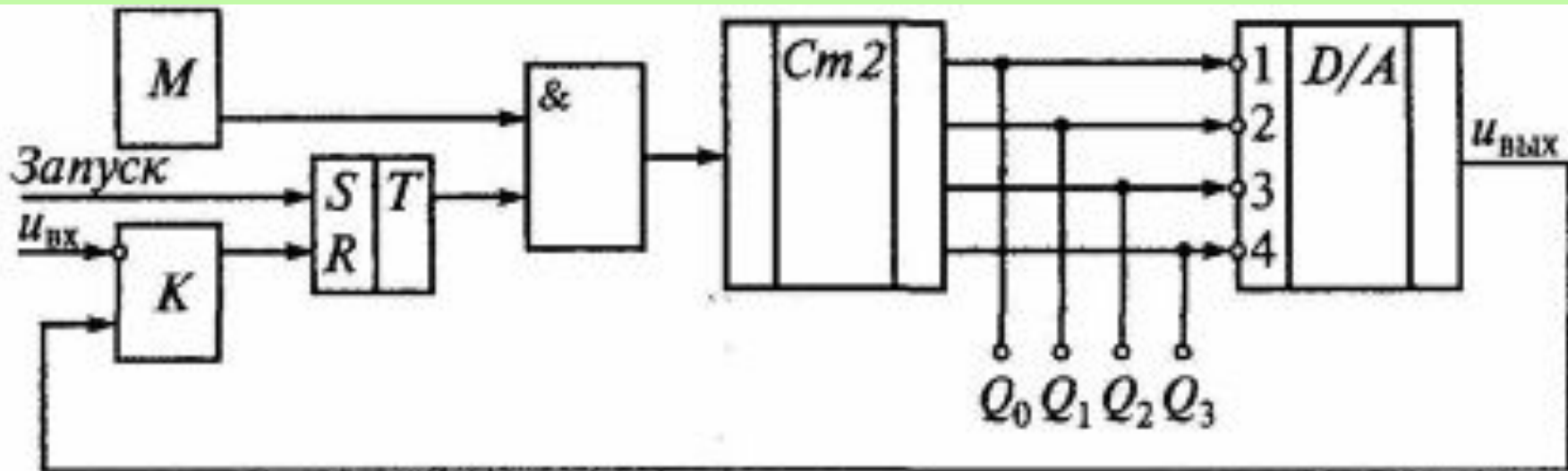


Рисунок 6 - Упрощенная структурная схема АЦП последовательного счета

При этом k -разрядный двоичный код одного отсчета определяется в схеме за 2^k интервалов дискретизации.

В описанном АЦП значения выходного цифрового кода в процессе преобразования многократно изменяются, поэтому он обладает низким быстродействием.

Действие *параллельных* (по методу считывания) n -разрядных АЦП основано на использовании 2^{n-1} компараторов (рис. 8).

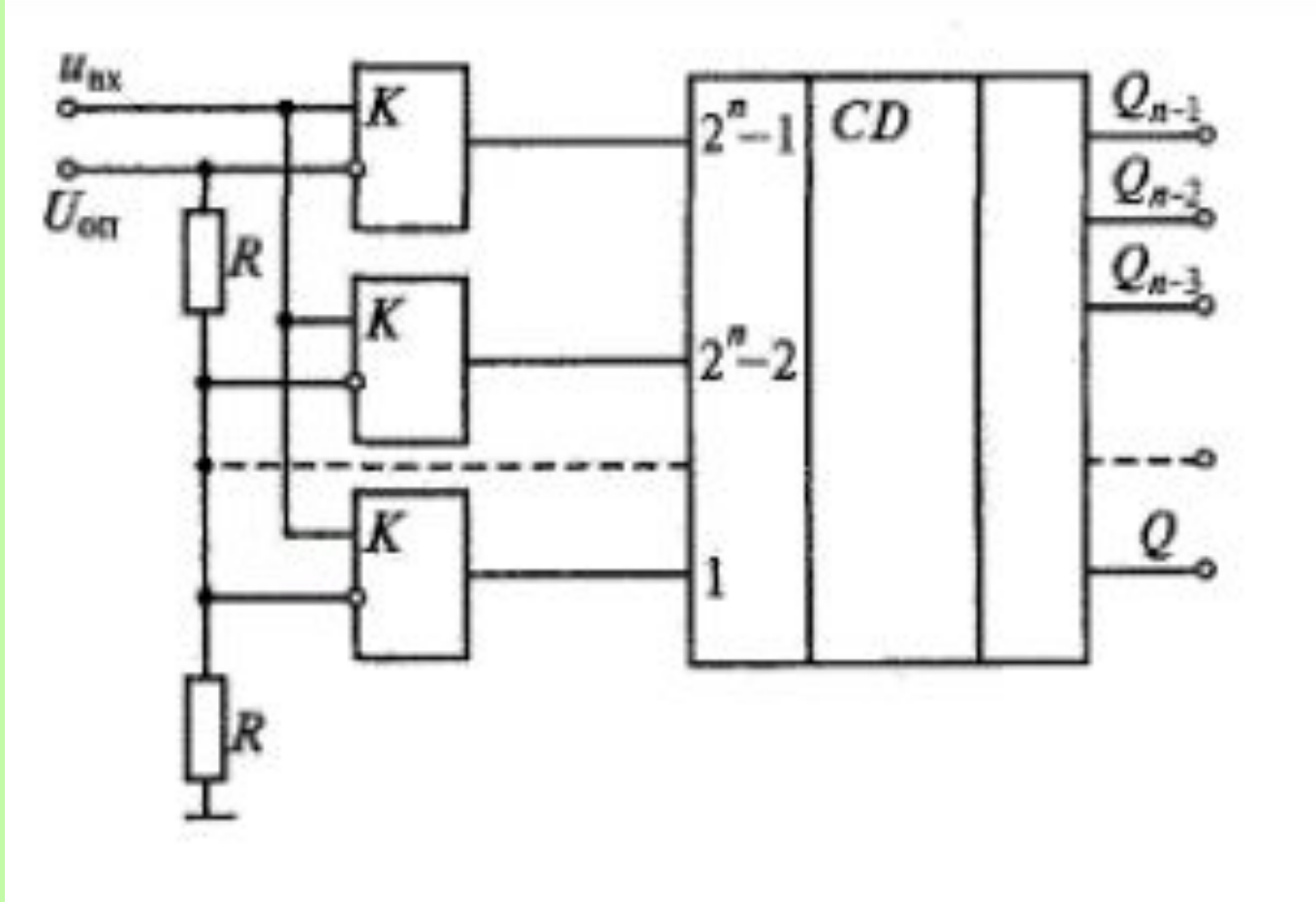


Рисунок 8 - Структурная схема параллельного АЦП

Неинвертирующие входы операционных усилителей компараторов объединены, и на них подается непрерывный сигнал, а к каждому инвертирующему входу подключено индивидуальное опорное напряжение, снимаемое с резистивного делителя. Разность между опорным напряжением двух соседних компараторов равна шагу квантования $\Delta = U_{оп} / 2^n$. Компараторы, у которых входное напряжение превысит соответствующее опорное напряжение, вырабатывают логическую 1, а остальные — логический 0. Информация с выходов компараторов поступает на шифратор *CD*, который преобразует ее в двоичный код.

Параллельные схемы обладают наибольшим быстродействием среди других типов АЦП. Однако для повышения точности измерений и уменьшения мощности шумов квантования в параллельных АЦП требуется увеличение числа компараторов.

В последовательно-параллельных схемах АЦП используется сочетание методов последовательного и параллельного преобразования сигналов, что существенно увеличивает быстродействие последовательных преобразователей и уменьшает объем параллельных.

На рис. 9 показана структурная схема шестизначного аналого-цифрового преобразователя данного типа, в которой используются два трехразрядных параллельных АЦП, один трехразрядный ЦАП и вычитающее устройство ВУ.

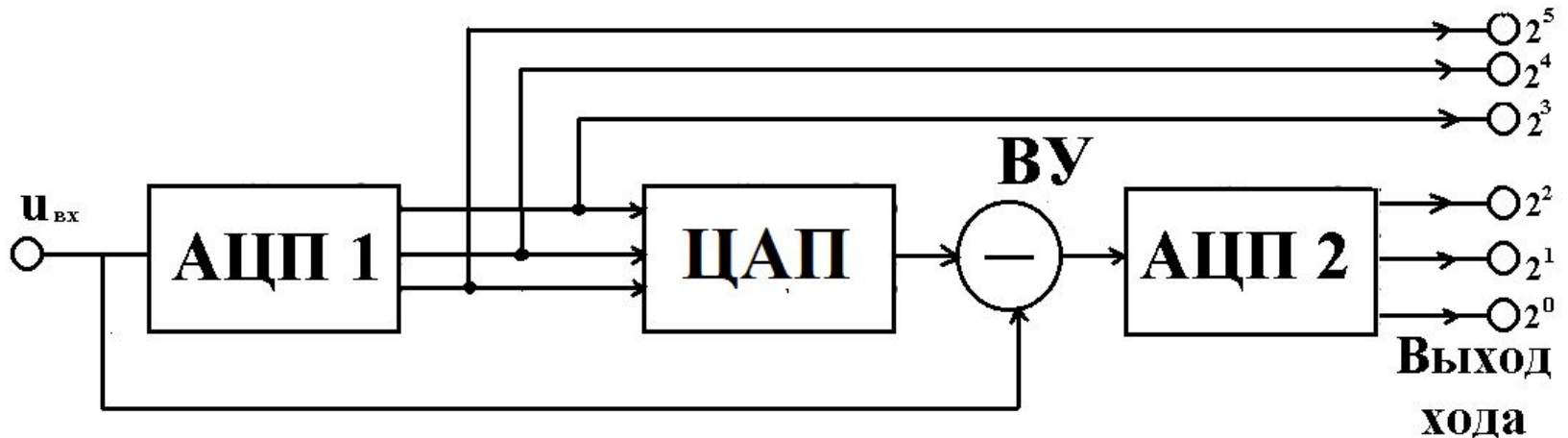


Рисунок 9 - Структурная схема последовательно-параллельного АЦП

Аналого-цифровой преобразователь формирует из входного напряжения три старших разряда выходного кода, соответствующие значениям 2^3 , 2^4 , и 2^5 . Эти разряды поступают на вход трехразрядного ЦАП, в котором они вновь преобразуются в аналоговое напряжение, отличающееся от входного напряжения $u_{\text{вх}}$ на величину погрешности преобразования схемы АЦП1. Аналоговое напряжение с выхода схемы ЦАП подается на вычитающее устройство ВУ, где оно вычитается из входного напряжения $u_{\text{вх}}$. Полученное разностное напряжение подается на АЦП2, в котором оно преобразуется в три младших цифровых разряда 2^2 , 2^1 и 2^0 выходного кода преобразователя.

Перспективным направлением развития ЦИП является применение микропроцессоров, которые обеспечивают управление процессом измерения, самодиагностику, автоматическую градуировку по заданной программе, а также первичную обработку результатов измерения (линеаризацию функции преобразования, коррекцию погрешностей, сжатие данных, т.е. уменьшение избыточности измеряемой информации). В настоящее время элементной базой ЦИП являются аналоговые и цифровые интегральные микросхемы, что позволяет достигнуть высокого быстродействия и малых габаритных размеров приборов. Применение интегральных микросхем большой степени интеграции значительно расширило функциональные возможности ЦИП и повысило их надежность при одновременном снижении потребления энергии. Многие ЦИП имеют автоматический выбор пределов измерения, повышающий точность измерения при большом динамическом диапазоне входного сигнала. Большинство ЦИП могут выполнять операции интегрирования и фильтрации, что значительно повышает

В последние годы получили применение *аналого-дискретные измерительные приборы* (АДИП). В отличие от ЦИП в них используют *квазианалоговые отсчетные устройства*, в которых роль указателя выполняет светящаяся полоса или светящаяся точка, меняющие дискретно свою длину (полоса) или положение (точка) относительно шкалы. Квазианалоговые отсчетные устройства управляются кодом. Такие приборы сочетают в себе достоинства аналоговых приборов (аналоговые отсчетные устройства) и ЦИП (код на выходе).

В настоящее время сформировалось новое направление в метрологии и электроизмерительной технике - компьютерно-измерительные системы (КИС) и их разновидность - виртуальные приборы. О подобных измерительных устройствах будет рассказано позже.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение цифрового измерительного прибора и поясните их характеристики точность и быстродействие.
2. Охарактеризуйте цифровые измерительные приборы по виду измеряемых величин. Поясните их характеристики цена деления и разрешающая способность.
3. Приведите обобщенную структурную схему цифрового измерительного прибора и поясните принцип его работы.
4. Приведите упрощенную структурную схему цифрового вольтметра и поясните принцип его работы.
5. Приведите упрощенную структурную схему и поясните принцип действия четырехразрядного цифроаналогового преобразователя.
6. Приведите упрощенную структурную схему и поясните принцип действия АЦП последовательного счета.
7. Приведите упрощенную структурную схему и поясните принцип действия параллельного АЦП.
8. Приведите упрощенную структурную схему и поясните принцип действия последовательно-параллельного АЦП.

ЗАДАНИЕ СТУДЕНТАМ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

- 1) Рассмотреть и законспектировать основные области применения в средствах измерений АЦП и ЦАП.
- 2) Рассмотреть и законспектировать основные характеристики вариантов АЦП и ЦАП.