Микроконтроллеры

Преобразование информации в устройствах ввода / вывода

В устройствах ввода / вывода наблюдаются цифровые и аналоговые сигналы.

Аналоговый сигнал - это сигнал, описываемый некоторой непрерывной функцией X(t), причем сама функция X и аргумент t могут принимать любые значения.

Самым распространенным примером аналогового сигнала является результат измерения некоторого технологического параметра (температуры, давления, расхода, плотности и т. д.) или непрерывного управляющего воздействия на исполнительный механизм.

Преобразование сигналов

Сущность аналогового сигнала, непрерывное существование во времени, и принцип действия любой цифровой системы, квантование по времени и по уровню, вступают в противоречие.

Решение этого противоречия – движение аналогового сигнала в направлении цифровой системы.

Преобразование аналоговых сигналов в цифровые в цифровых системах выполняют **аналого-цифровые преобразователи (АЦП).**

Обратное преобразование - **цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП).**

Показатели, характеризующие процесс преобразования информации в АЦП и ЦАП:

- точность (погрешность);
- быстродействие.

Погрешность преобразователя включает в себя:

- **методическую** (погрешность метода или идеи заложенной в преобразование);
- **инструментальную** (погрешность используемого инструмента).

Преобразование сигналов

Методическая погрешность Δк обусловлена погрешностью квантования аналоговой величины *A* по уровню

$$\Delta к = A - N*h,$$

где *N* – числовой эквивалент преобразуемой величины;

h – шаг квантования.

В любом случае максимальная методическая погрешность будет меньше или равна половине единицы младшего разряда МР

$$|\Delta_к| \leq 0{,}5 \text{ МР}$$

Младший разряд МР в общем случае равен *h*. Из этого следует, что для повышения точности преобразования необходимо уменьшать *h*, что достигается увеличением разрядности преобразователя.

Преобразование сигналов

Инструментальная погрешность преобразователя включает:
- погрешность настройки;
- погрешность, связанную с временной нестабильностью;
- температурную погрешность.

Быстродействие ЦАП и АЦП ограничивается **динамическими погрешностями**, возникающими при квантовании аналоговой величины по времени (переходные процессы, время затухания и т. д.).
Динамическая погрешность определяет **время преобразования $T_п$**.
Время преобразования $T_п$ для ЦАП это время с момента поступления цифрового кода на вход преобразователя до установления выходной величины с заданной точностью.

Для АЦП время преобразования это время от пуска преобразователя до момента получения кода на его выходе.

Для АЦП важным параметром является **апертурное время $T_{ап}$** - время неопределённости выходной величины в момент преобразования (в общем случае $T_{ап} \approx T_п$).

Другим параметром, определяющим быстродействие преобразователя, является период квантования, интервал между двумя последовательными преобразованиями.

Микроконтроллеры

Цифро-аналоговые преобразователи

В основу цифро-аналоговых преобразователей положен принцип суммирования аналоговых величин, пропорциональных весам разрядов входного цифрового кода, разрядные коэффициенты которого равны «1».

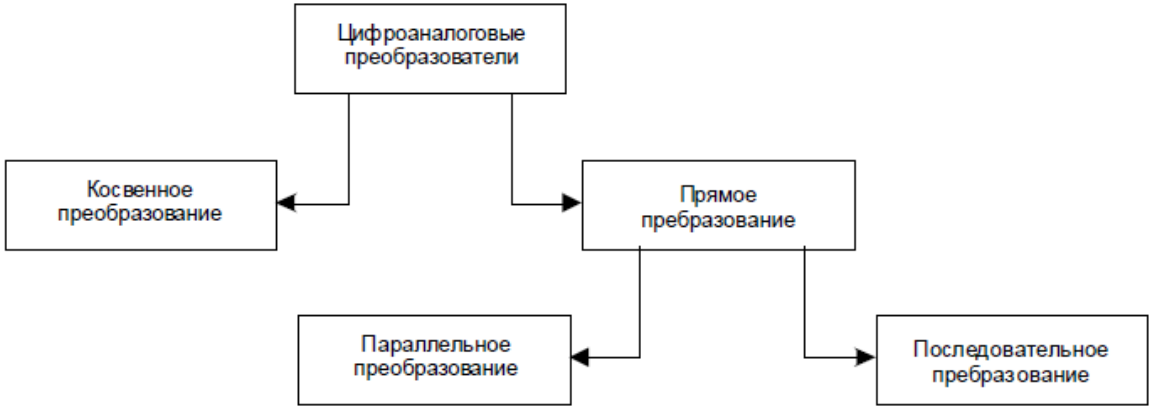
Пример.

Пусть входной цифровой код четырёхразрядный.

Пусть нулевому (младшему) разряду соответствует аналоговая величина 1 В, первому разряду – 2 В, второму – 4 В, третьему – 8 В.

Допустим, что входной код 1011, тогда результат преобразования согласно определению будет равен 11 В (8 + 2 + 1=11).

Ниже представлена краткая классификация ЦАП



Микроконтроллеры

Параллельные цифро-аналоговые преобразователи

Большинство цифро-аналоговых преобразователей, выпускаемых в настоящее время параллельного типа. Принцип действия этих ЦАП основан на суммировании эталонных токов (напряжений) соответствующих весам разрядов. Обычно суммирование токов (напряжений) производится с помощью операционного усилителя ОУ, напряжение, на выходе которого, пропорционально коду N

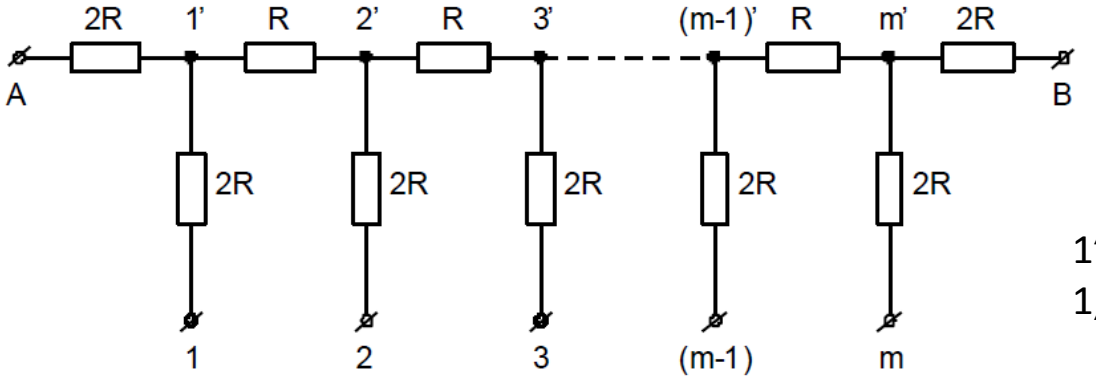
$$U_{вых} = R_{ос} N I_1$$

где $R_{ос}$ – сопротивление отрицательной обратной связи ОУ;

N – числовой эквивалент преобразуемого цифрового кода;

I_1 – эталонный ток первого разряда.

Среди преобразователей параллельного типа наиболее распространёнными являются цифро-аналоговые преобразователи на базе резистивных матриц R- 2R. Резистивная матрица R- 2R является, во-первых, высоко технологичной из-за ограниченного числа номиналов (всего два) резисторов, а во-вторых – идеальным делителем напряжения.



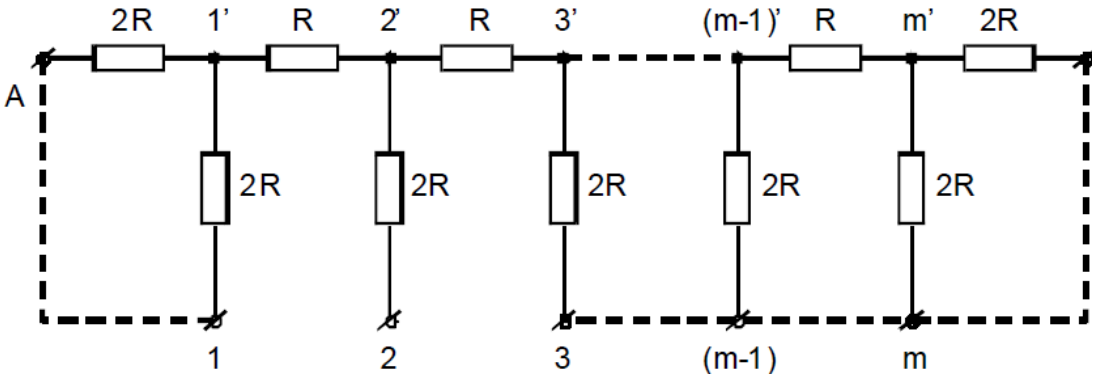
1', 2', 3',..., *(m-1)', m'* – узловые точки;

1, 2, 3,..., *(m-1),* m – разрядные входы

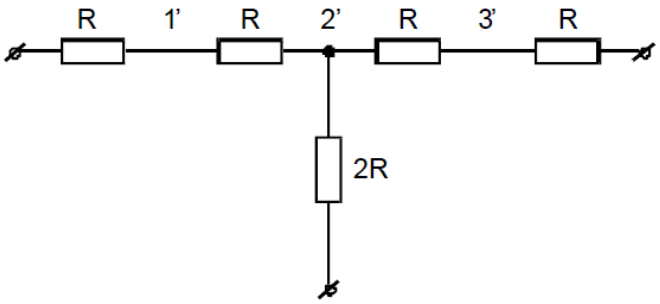
Основные свойства резистивной матрицы

- Свойство 1. Сопротивление от любой узловой точки (1’, 2’, 3’,…, *(m-1)’, m’)* во всех направлениях равно 2R.
- Свойство 2. Коэффициент передачи от узловой точки к узловой равен 1/2.
- Свойство 3. Коэффициент передачи от разрядного входа (1, 2, 3,…, *(m-1), m)* к соответствующей ему узловой точке (1’, 2’, 3’,…, *(m-1)’, m’)* равен 1/3.

Первое свойство легко доказывается, если предположить, что потенциалы во всех разрядных входах (1, 2, 3,…, *(m-1), m),* а также входах А и В одинаковые. Это предположение позволяет нам объединить эти входы.



1



2

Микроконтроллеры

Допустим, что цифровой код, управляющий ключами, имеет вид 00…001. Это означает, что только младший разрядный вход будет подключен к опорному источнику напряжения Uоп. Рассмотрим распределение потенциалов в узловых точках 1’, 2’, 3’,…, (m-1)’, m’.

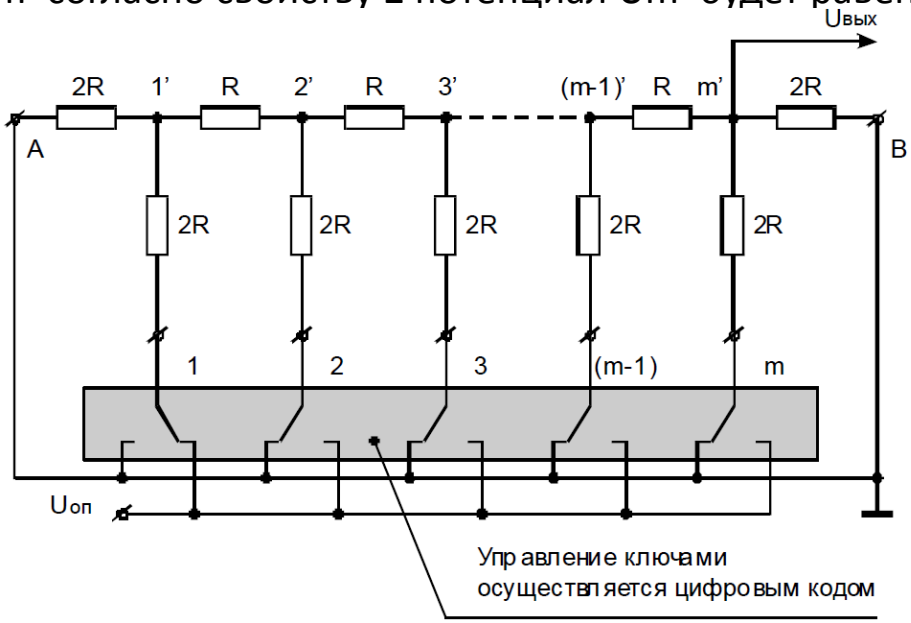
В узловой точке 1’ согласно свойству 3 потенциал U1’ будет равен

$$U_1^{'} = 1/3 * U_{on}$$

В узловой точке 2’ согласно свойству 2 потенциал U2’ будет равен $U_2^{'} = 1/3 * 1/2 * U_{on}$

В узловой точке 3’ согласно свойству 2 потенциал U3’ будет равен $U_1^{'} = 1/3 * 1/2 * 1/2 * U_{on}$

В узловой точке m’ согласно свойству 2 потенциал Um’ будет равен $U_1^{'} = 1/3 * (1/2)^{m-1} U_{on}$



Микроконтроллеры

Если управлять произвольным цифровым кодом, то выходное напряжение преобразователя, равное напряжению в узловой точке *m’* будет равно:

$$U_{вых} = U_{m'} = \frac{1}{3} * \frac{U_{оп}}{2^{m-1}} \sum_{i=1}^{i=m} a_i 2^{m-i} = \Delta U N$$

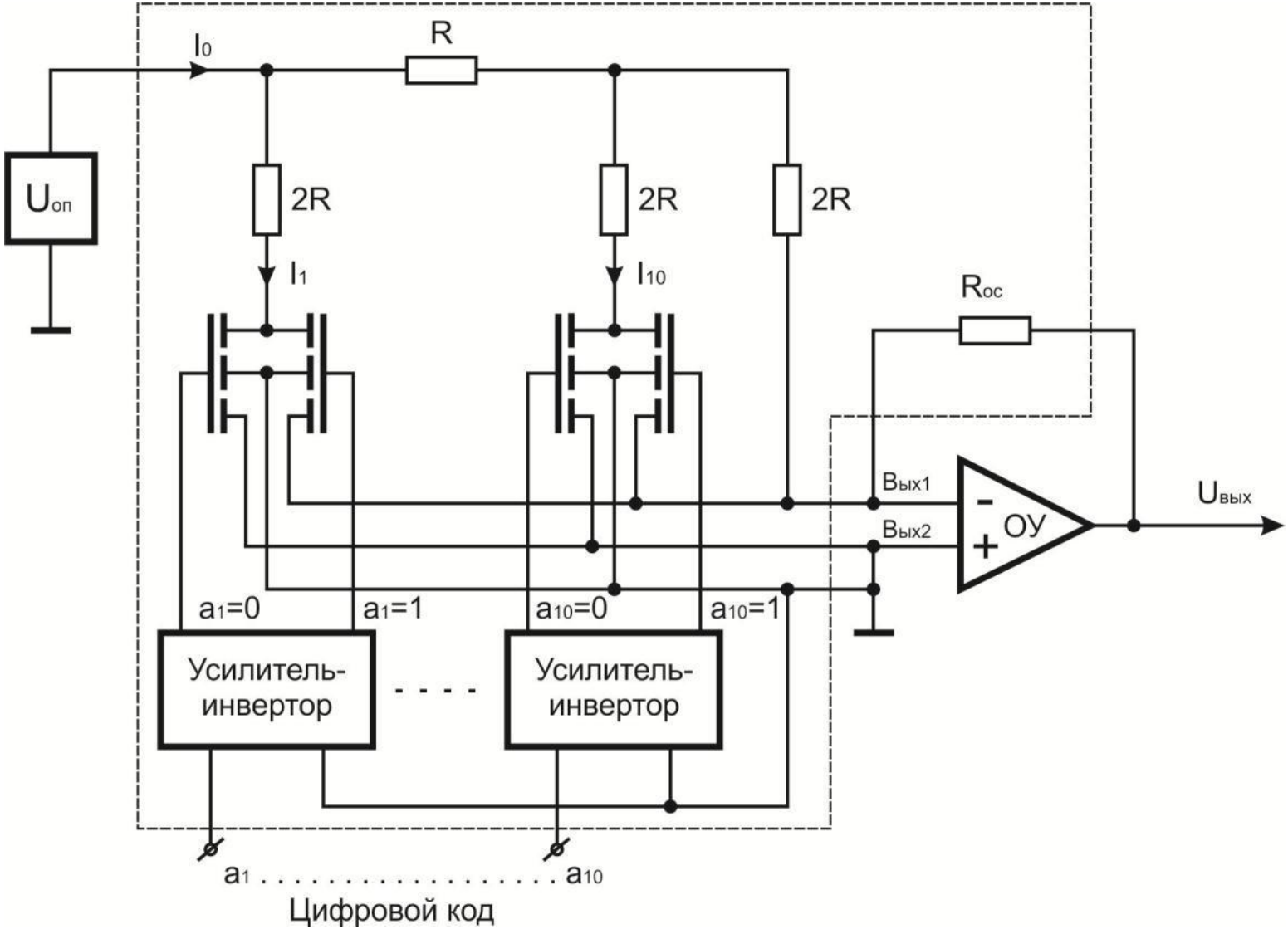
где

$\Delta U = \frac{1}{3} * \frac{U_{оп}}{2^{m-1}}$ величина дискретности выходного напряжения.

$$a_i = \begin{cases} 1 - разрядный_вход_подключен_к_U_{оп} \\ 0 - разрядный_вход_не_подключен_к_U_{оп} \end{cases}$$

N - числовой эквивалент преобразуемого цифрового кода.

Функциональная схема микросхемы К572ПА1



Микроконтроллеры

Последовательные цифро-аналоговые преобразователи

В задачах автоматизации часто встречаются задачи передачи оцифрованной информации на значительные расстояния с последующим преобразованием этой информации в аналоговый сигнал. В таких системах обычно используются двухпроводные линии связи, а все цифровые коды соответственно передаются в последовательном виде. Для преобразования последовательного кода в аналоговый сигнал могут быть использованы различные способы.

Первый основан на уже известных способах преобразования последовательного кода в параллельный (например, с помощью К555ИР8 – восьмиразрядного сдвигового регистра с последовательным входом и параллельными выходами) и последующим преобразованием в аналоговый сигнал известным способом.

Второй способ основан на использовании последовательных ЦАП.

Одним из распространенных последовательных ЦАП являются ЦАП, выполненные на основе устройств выборки и хранения. Рассмотрим подобный преобразователь

Последовательные цифро-аналоговые преобразователи

В схему входят два устройства выборки и хранения: входное УВХ1 и выходное УВХ2, ключи S1 – S4 и схема управления ключами.

Преобразование последовательного кода производится за n-тактов, где *n* – число разрядов последовательного кода. Последовательный код движется младшим разрядом вперёд.

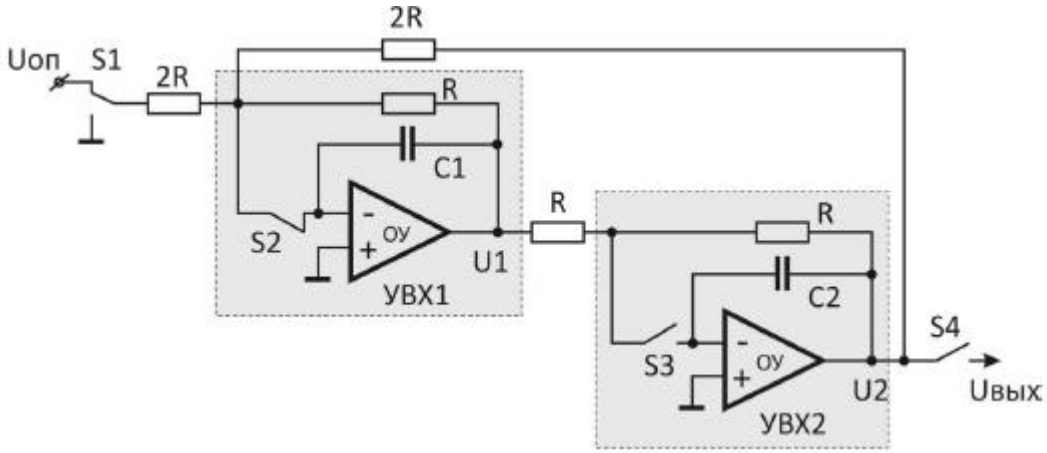
В первом полупериоде первого такта суммируется с $U_{вых}$ и делится на 2. В конце первого полупериода на выходе УВХ1 появляется напряжение

$$U_{1i} = \frac{1}{2} * \left(U_{on} a_i + U_{2(i-1)}\right)$$

где

U_{1i} - напряжение на выходе УВХ1 на текущем шаге;

$U_{2(i-1)}$ - напряжение на выходе УВХ2 на предыдущем шаге.



Последовательные цифро-аналоговые преобразователи

Напряжение U_{1i} запоминается на конденсаторе *C1* УВХ1 (в режиме хранения ключ S2 разомкнут).

Во втором полупериоде первого такта ключ *S3* замыкается и напряжение с выхода УВХ1 подаётся на вход УВХ2. Таким образом, в конце первого такта напряжение на выходе УВХ2 равно напряжению на выходе УВХ1 ($U_{1i}= U_{2i}$). Стоит отметить, что в первом полупериоде первого такта $U_{2(i-1)}=0$.

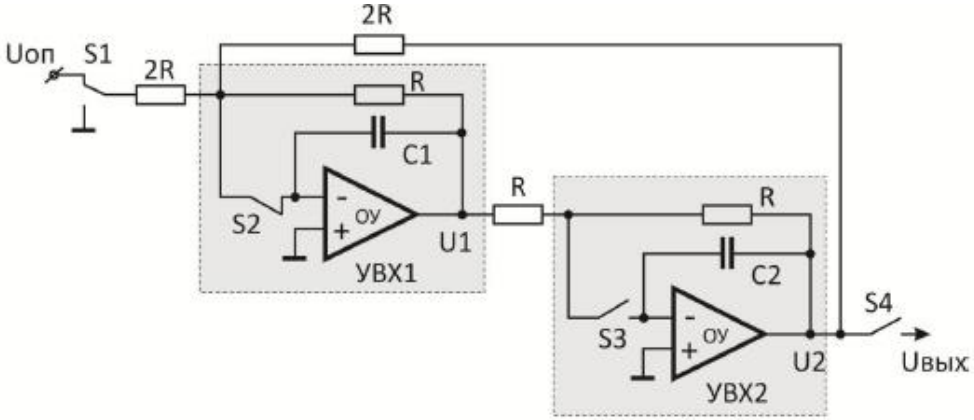
На следующем (*i+1*) такте процесс повторяется. С каждым тактом напряжение на конденсаторе *C2* изменяется в зависимости от того, чему равнялся разряд на текущем такте. В кон-це n-го такта конденсатор *C2* зарядится до напряжения

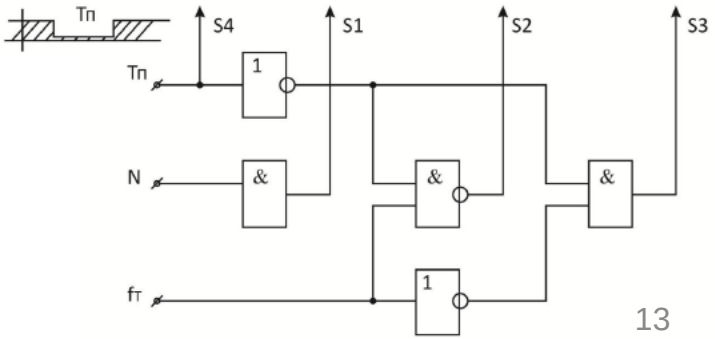
$U_{2n} = Uоп * N$,

где *N* - числовой эквивалент преобразуемого цифрового кода.

В конце *n*-го такта открывается ключ S4 и напряжение с U_{2n} выхода УВХ2 поступает на выход преобразователя.

Точность и быстродействие таких преобразователей практически полностью определяется качеством используемых УВХ.





Микроконтроллеры

Аналого-цифровые преобразователи

Преобразование аналоговой величины в цифровой код выполняют аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Процесс преобразования является, в общем случае, измерительным процессом. Преобразование происходит путём сравнения преобразуемой величины с набором эталонных величин, имеющих одинаковую природу с преобразуемой.

По способу преобразования АЦП можно разделить на:

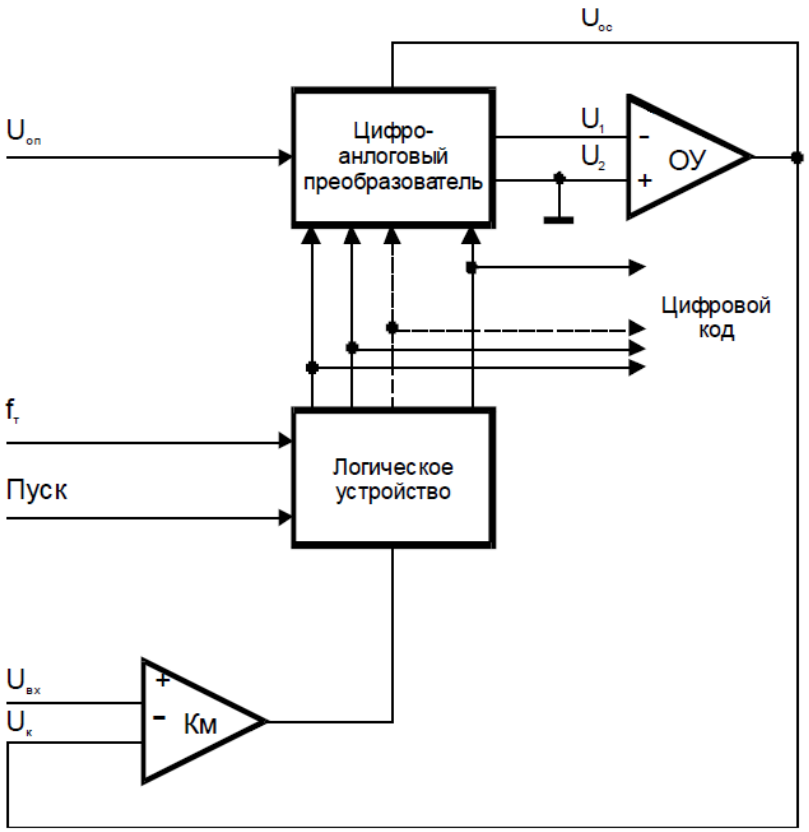
- последовательные;
- параллельные;
- последовательно-параллельные;
- с промежуточным преобразованием.

Аналого-цифровые преобразователи

Последовательные АЦП

Наибольшее распространение по ряду причин получили последовательные АЦП с ЦАП в цепи обратной связи.

Функциональная схема последовательного преобразователя.



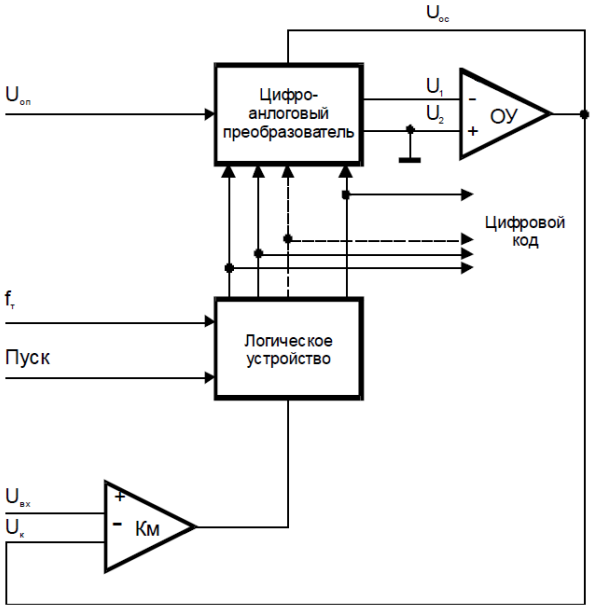
Обозначения на рисунке:

Км - компаратор;

ОУ - операционный усилитель.

Аналого-цифровые преобразователи

Последовательные АЦП



В основу работы преобразователя положен принцип сравнения выходного сигнала ЦАП (выход операционного усилителя ОУ1), который изменяется по закону, определённому видом логического устройства. При равенстве напряжений: входного (преобразуемого), подаваемого на положительный вход компаратора и напряжения обратной связи (выходного напряжения ЦАП), подаваемого на отрицательный вход, компаратор формирует сигнал, останавливающий процесс уравновешивания. В момент останова на выходе АЦП будет сформирован код N, соответствующий входному напряжению

$$U_{вх} = U_{оп} N / N_0$$

где *N* - числовой эквивалент кода;
$N_0 = 2m$ - максимальное число.

Статическая погрешность таких преобразователей определяется погрешностью компаратора и ЦАП. Рассмотрим подробнее принцип действия отдельных элементов преобразователя, за исключением ЦАП, который рассматривался в предыдущих разделах.

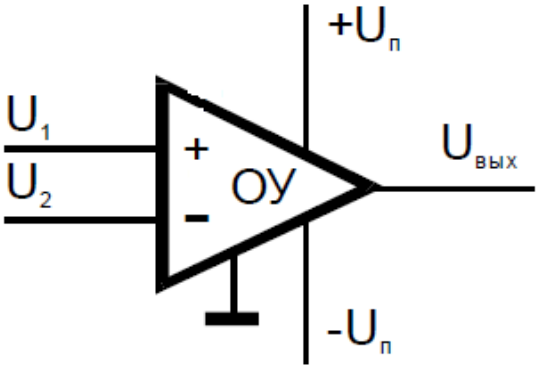
Аналого-цифровые преобразователи

Последовательные АЦП

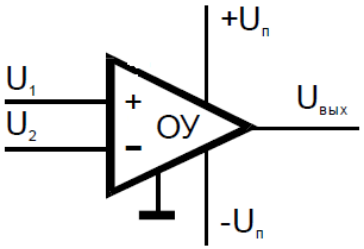
Компаратор

Согласно словарю по естественным наукам компаратор это средство сравнения, предназначенное для сличения мер однородных величин.

В нашем контексте компаратор - аналоговое устройство, предназначенное для сравнения непрерывно изменяющихся входных сигналов. На практике в качестве компаратора может выступать либо специализированное устройство, либо быстродействующий дифференциальный усилитель постоянного тока с большим коэффициентом усиления $K_{у,}$ с малым дрейфом и смещением нуля и логическим выходом. Входной каскад компаратора должен обладать способностью выдерживать большие синфазные и дифференциальные сигналы на входах, не насыщаясь, т.е. не попадая в режимы, из которых компаратор будет долго выходить. В некоторых моделях компараторов для повышения коэффициента усиления используют неглубокую положительную обратную связь.



Аналого-цифровые преобразователи



Последовательные АЦП

Компаратор

Выходной сигнал компаратора

$$U_{вых} = K_y(U_1 - U_2)$$

ввиду большого коэффициента усиления, достигающего нескольких тысяч, практически всегда ограничен величинами источников питания компаратора и поэтому может считаться логическим сигналом. По этой причине компаратор часто используют как элемент перехода от аналоговых к цифровым сигналам.

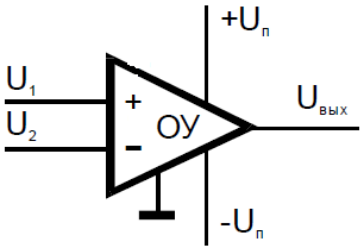
Согласование по уровню выполняется подбором соответствующих источников электропитания, например, если +Uп=5В, -Uп=0 (однополярное питание), то такой компаратор легко согласует аналоговую часть какого-либо устройства с цифровым устройством, выполненным на микросхемах серии ТТЛ или аналогичных. Иногда компаратор называют однобитным аналого-цифровым преобразователем.

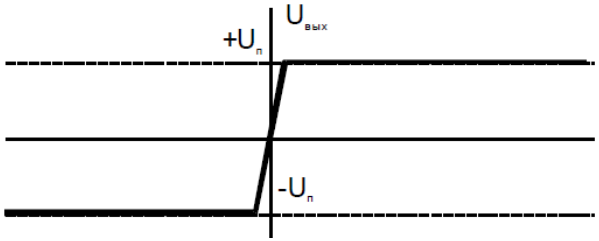
Аналого-цифровые преобразователи

Последовательные АЦП

Компаратор

Однако не стоит забывать о том, что при «нулевой» разности входных сигналов реальный компаратор, имеющий очень большой, но всё же конечный коэффициент усиления, работает в усилительном режиме, что является источником погрешности в АЦ преобразователях



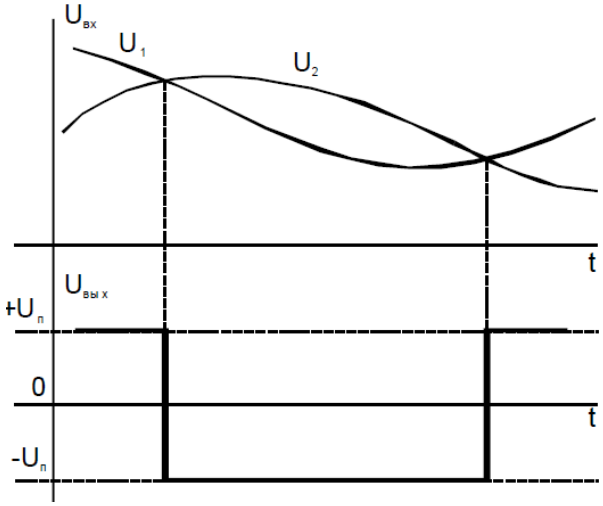


Принцип работы компаратора

Для того чтобы чувствительность была высокой, компаратор, должен иметь бесконечно большой коэффициент усиления. В этом случае процесс переключения можно считать релейным

Основная погрешность, вносимая компаратором в работу АЦП – **динамическая погрешность компаратора**.

Динамическая погрешность компаратора характеризуется временем переключения $t_п$. Это промежуток времени от начала сравнения до момента, когда выходное напряжение компаратора достигает противоположного логического уровня. Процесс смены логического уровня сопровождается переходным процессом, который в основном определяет время переключения $t_п$.



Аналого-цифровые преобразователи

Последовательные АЦП

Логические устройства

В зависимости от способа построения логического устройства (от способа уравновешивания) искомой величины различают следующие виды АЦП:

- АЦП развертывающего уравновешивания;
- АЦП следящего уравновешивания
- АЦП поразрядного уравновешивания

Аналого-цифровые преобразователи

Последовательные АЦП

АЦП развертывающего уравновешивания

Преобразователи данного типа в литературе часто встречаются под названием АЦП последовательного счёта.

Компенсирующее напряжение $U_к$ с выхода ЦАП подаётся на отрицательный вход компаратора и растёт от исходного значения $U_{к0}$ (в общем случае $U_{к0}$=0) до значения $U_к = U_{вх}$. Рост напряжения $U_{к0}$ происходит в каждом такте работы преобразователя на величину $\Delta U_к$, соответствующую младшему разряду цифрового кода

$$\Delta U_к = \frac{U_{ОП}}{2^{n-1}}$$

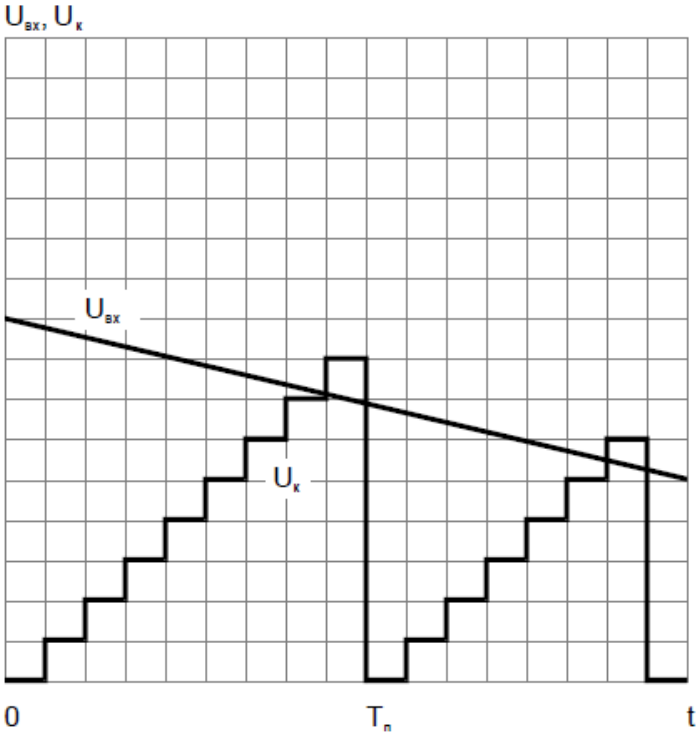
где

$U_{оп}$ – опорное напряжение цифро-аналогового преобразователя;

n – разрядность цифро-аналогового преобразователя.

В момент $U_к = U_{вх}$ процесс преобразования заканчивается.

В дальнейшем АЦП может работать либо в следящем режиме, либо вновь повторить процесс уравновешивания, начиная с $U_{к0}$.



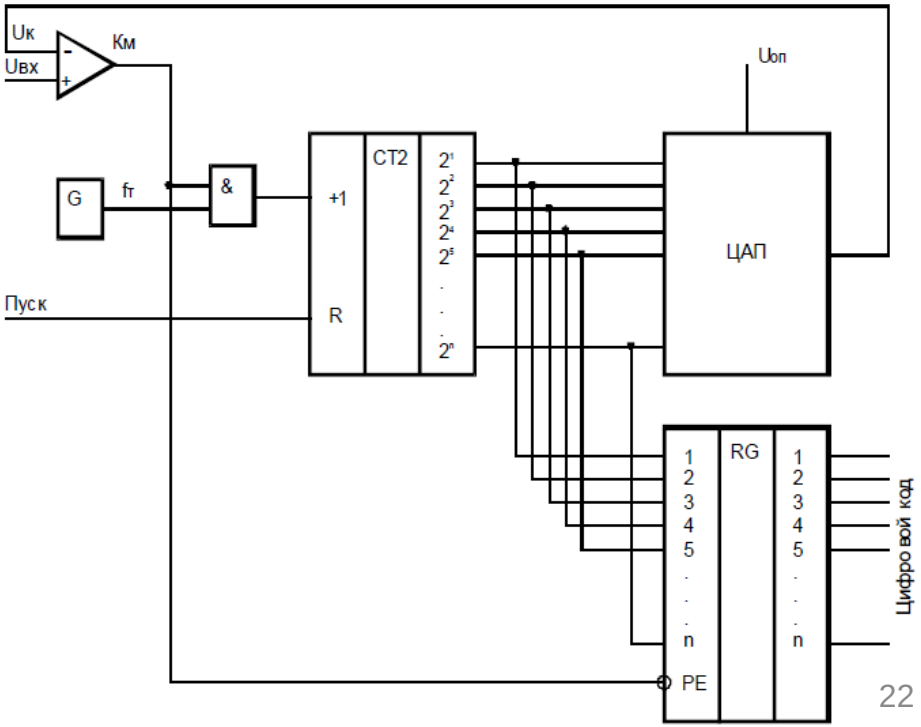
Аналого-цифровые преобразователи

Последовательные АЦП

АЦП развертывающего уравновешивания

Схема логического устройства может быть представлена двоичным счетчиком импульсов, на вход которого через схему совпадения поступают импульсы f_t от тактового генератора G.

Процесс преобразования начинается подачей кратковременного импульса «Пуск», который обнуляет двоичный счетчик, и, соответственно, компенсирующее напряжение принимает нулевое значение. До тех пор, пока компенсирующее напряжение с выхода ЦАП ниже, чем входное, на выходе компаратора Км стоит «единица», которая разрешает прохождению тактовых импульсов от генератора к двоичному счетчику. Изменение кодовых комбинаций на выходе счетчика ведёт к повышению компенсирующего напряжения и в момент времени, когда $U_{вх} = U_к$ компаратор срабатывает. На выходе – логический нуль, кодовая комбинация на его выходе фиксируется и записывается на выход буферного регистра RG.



Аналого-цифровые преобразователи

Последовательные АЦП

АЦП развертывающего уравновешивания

Частота импульсов выбирается такой, чтобы в каждом такте выходное напряжение ЦАП устанавливалось с заданной точностью и происходило полное срабатывание компаратора (учитывалась динамическая погрешность устройства).

Максимальное время преобразования $T_{п\,мах} = N_{мах} / f_t$.

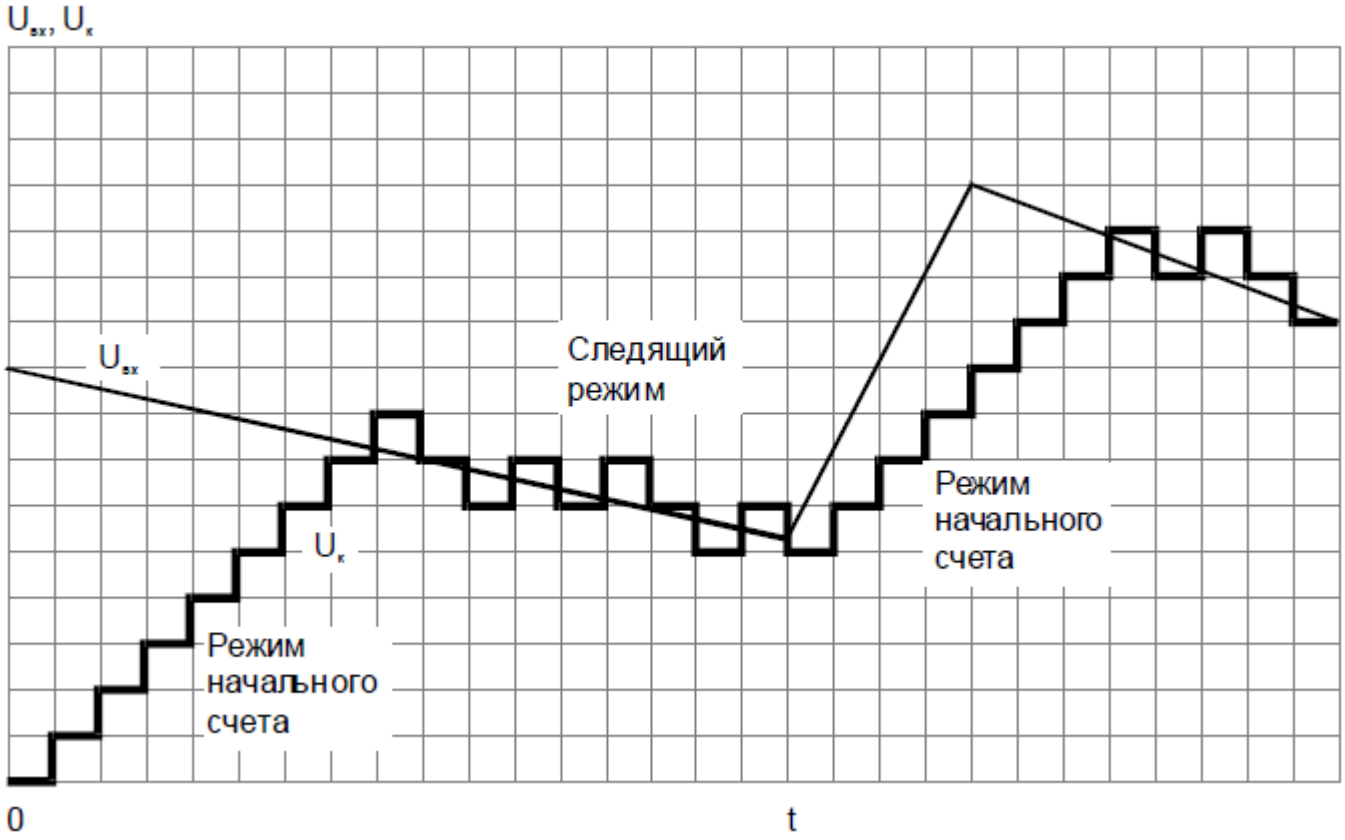
Время преобразования $T_п$ в АЦП развертывающего уравновешивания является величиной переменной и достигает своего максимального значения при максимальном входном сигнале, равном величине $U_{оп}$.

Аналого-цифровые преобразователи

Последовательные АЦП

АЦП следящего уравновешивания

На первом этапе АЦП следящего уравновешивания работает аналогично АЦП последовательного счета. При достижении значения компенсирующего напряжения величины $U_к = U_{вх}$ преобразователь начинает «следить» за входным сигналом.



Аналого-цифровые преобразователи

Последовательные АЦП

АЦП следящего уравновешивания

Логическое устройство в АЦП следящего уравновешивания может быть реализовано на базе реверсивного двоичного счётчика импульсов, который выполняет суммирование и вычитание импульсов в зависимости от состояния компаратора. Если $U_{вх} > U_к$, то импульсы сумми- руются и, соответственно, Uк увеличивается, и наоборот $U_{вх} < U_к$, то импульсы вычитаются и $U_к$ уменьшается.

В зависимости от скорости изменения $U_{вх}$ в АЦП следящего уравновешивания можно наблюдать следящий режим или режим начального счёта.

Если скорость изменения входного сигнала $U_{вх}$ не превышает скорости изменения компенсирующего сигнала $U_к$, то в любой момент времени входной сигнал $U_{вх}$ будет отличаться от компенсирующего $U_к$, на величину, соответствующую младшему разряду цифрового кода (шага квантования)

$$\Delta U_к = \frac{U_{ОП}}{2^{n-1}}$$

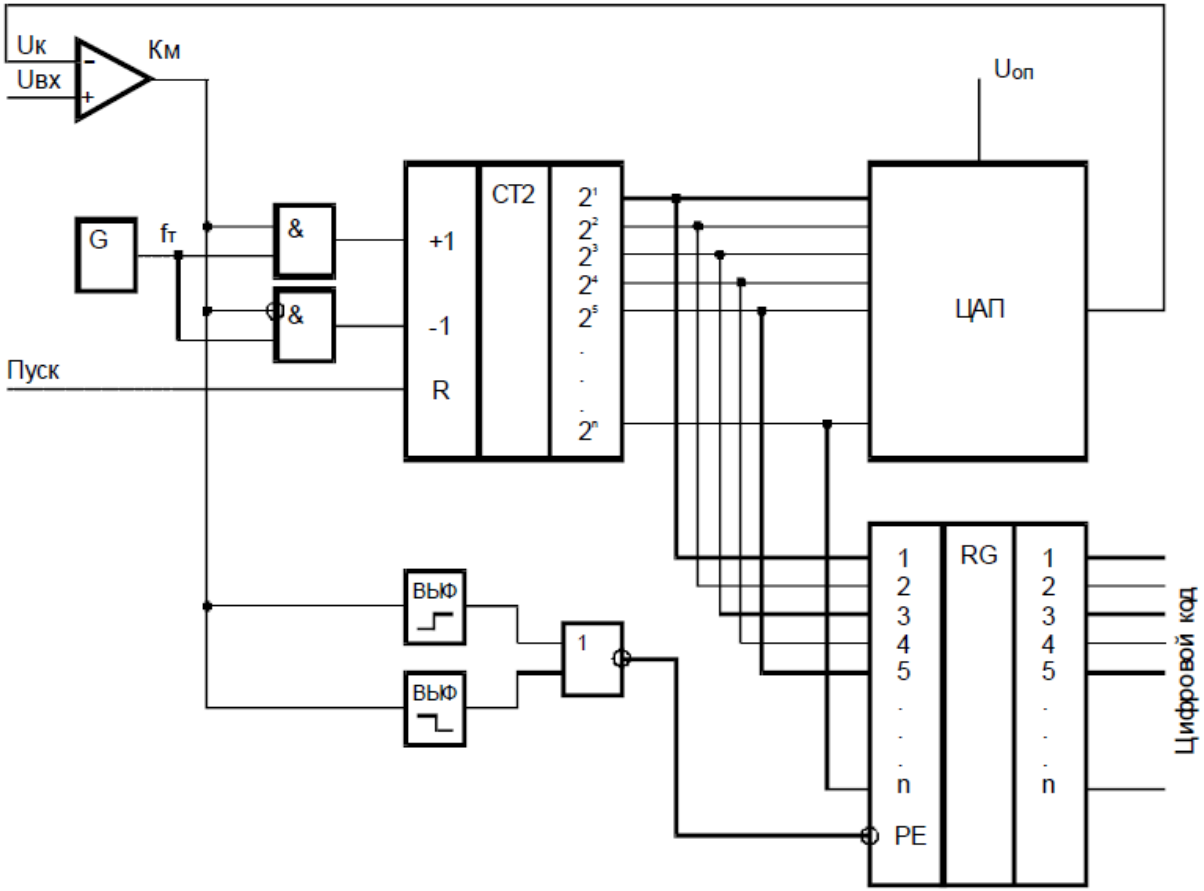
Время преобразования в данном случае равно времени следования тактовых импульсов f_t.

В режиме начального счёта работа АЦП следящего уравновешивания аналогична АЦП последовательного счета.

Микроконтроллеры

Аналого-цифровые преобразователи

Последовательные АЦП
АЦП следящего уравновешивания



Аналого-цифровые преобразователи

Последовательные АЦП

АЦП поразрядного уравновешивания

Процесс уравновешивания производится в направлении от старших разрядов к младшим. Компенсирующее напряжение изменяется по закону

$$U_к = U_{оп} \sum_{i=1}^{n} a_i 2^{-i}$$

где

n – число разрядов АЦП;

a_i – состояние i-го разряда.

При поразрядном уравновешивании в первом такте включается старший разряд с весом 2^{-1}. Затем происходит сравнение входного напряжения $U_{вх}$ с $½\ U_{оп}$. В случае, если $U_{вх} > ½\ U_{оп}$ разрядному коэффициенту a_1 присваивается «1», в противном случае «0».

На втором такте включается второй разряд с весом 2^{-2}.

Общий алгоритм вычисления компенсирующего напряжения на последующем шаге, кроме первого, следующий:

- если на предыдущем шаге величина разрядного коэффициента равна «1», то напряжение соответствующее текущему разряду прибавляется к напряжению предыдущего шага.
- если на предыдущем шаге величина разрядного коэффициента равна «0», то напряжение соответствующее текущему разряду вычитается из напряжения предыдущего шага.

Аналого-цифровые преобразователи

Последовательные АЦП

АЦП поразрядного уравновешивания

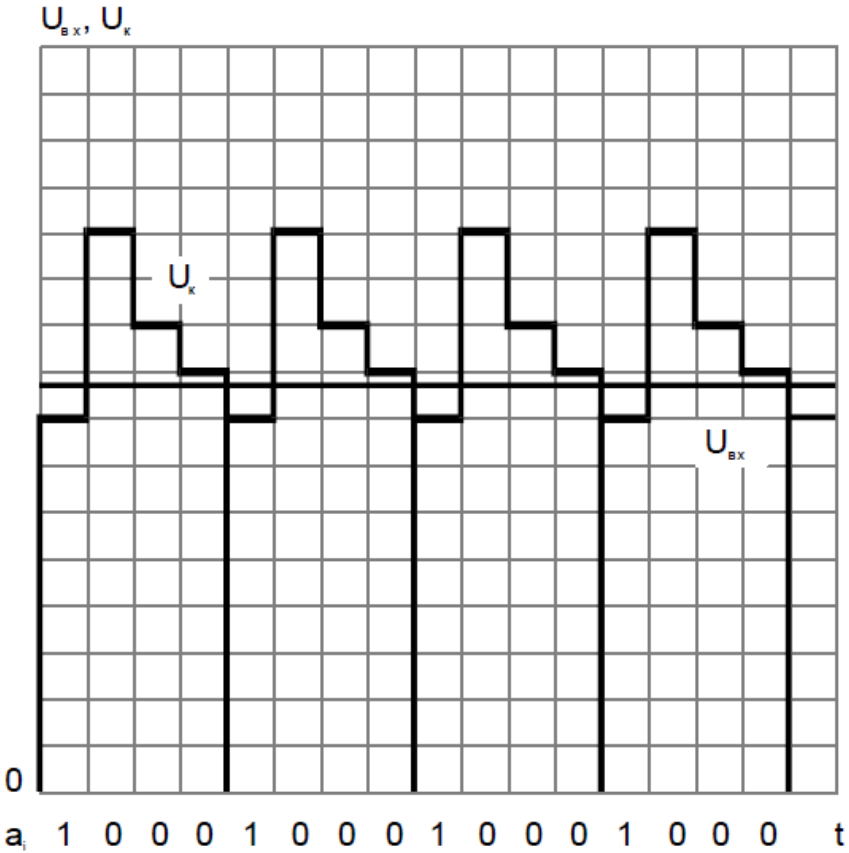
В результате входное напряжение будет уравновешено компенсирующим напряжением

$$U_{вх} = U_к = U_{оп} \sum_{i=1}^{n} a_i 2^{-i} = U_{оп} N$$

где

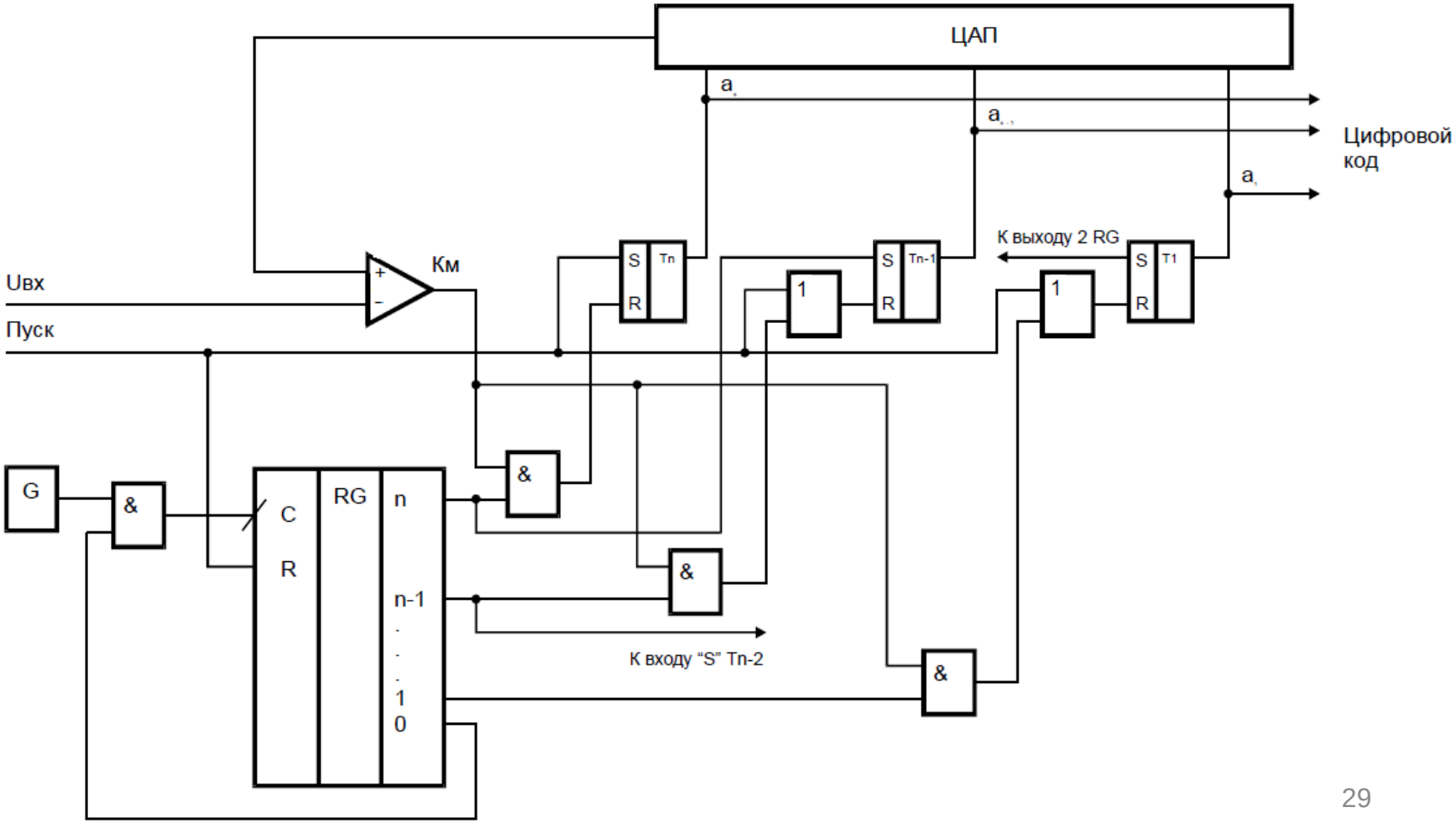
N – цифровой эквивалент двоичного кода.

Длительность цикла в таких преобразователях не зависит от величины входного напряжения, а определяется только разрядностью преобразователя n и частотой тактового генератора.



Аналого-цифровые преобразователи

Последовательные АЦП
АЦП поразрядного уравновешивания



Аналого-цифровые преобразователи

Параллельные АЦП

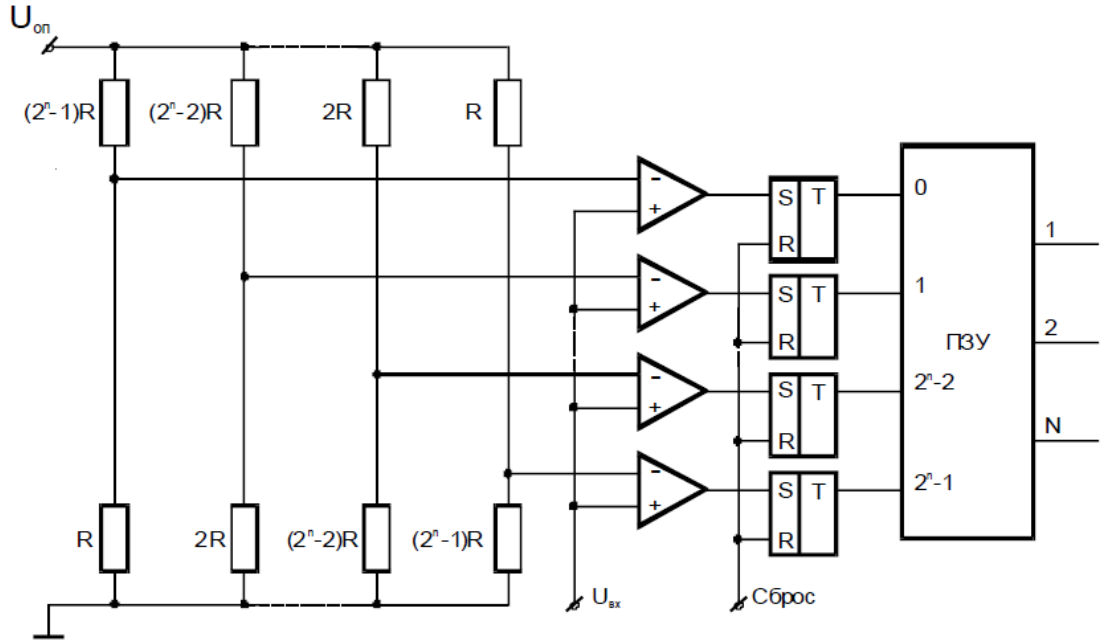
В параллельных АЦП метод преобразования заключается в одновременном сравнении входной аналоговой величины $U_{вх}$ с (2^n-1) опорными напряжениями с помощью (2^n-1) компараторов. Код, образуемый на выходах компараторов, представляет собой нормальный единичный код.

Десятичное число	Единичный нормальный код
0	0000000
1	0000001
2	0000011
3	0000111
4	0001111
5	0011111
6	0111111
7	1111111
8	-

Аналого-цифровые преобразователи

Параллельные АЦП

Опорные напряжения в количестве (2^n-1) формируются с помощью резистивного делителя. Эти напряжения подаётся вместе с входным напряжением на (2^n-1) компараторов. На выходе компараторов, у которых $U_{вх} > U_{оп\ i}$ формируется сигнал, соответствующий «1», в противном случае «0».



Сигналы с выхода (2^n-1) компараторов через (2^n-1) фиксирующих триггеров подаётся преобразователь нормального единичного кода в двоичный. Наиболее простым решением задачи преобразования кодов является использование постоянных запоминающих устройств (ПЗУ). При этом нормальный единичный код выступает в качестве адреса для получаемого в качестве преобразования двоичного кода.

Достоинство - высокое быстродействие. Время преобразования Тп достигает 10÷100 нс.

Недостаток - высокие аппаратурные затраты

По этой причине параллельные АЦП выпускают малоразрядными (4÷5 разрядов), а затем объединяют для получения требуемой разрядности

Аналого-цифровые преобразователи

Интегрирующие АЦП

Интегрирующие АЦП относятся к классу преобразователей с промежуточным преобразованием. По способу преобразования интегрирующие АЦП являются разновидностью АЦП последовательного счёта и характеризуются повышенной точностью.

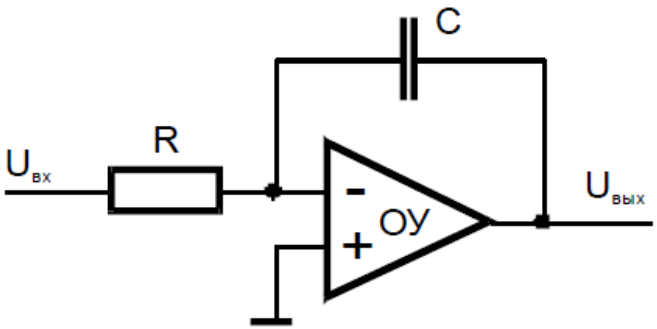
Сущность метода, используемого в данных АЦП, заключается в преобразовании путём интегрирования входного сигнала во временной интервал, а затем измерения временного интервала также методом интегрирования. Именно поэтому данный метод называется методом двойного интегрирования.

Выходное напряжение интегратора

$$U_{вых} = -\frac{1}{T}\int U_{вх}(t)dt$$

где T – постоянная времени интегрирования $T=RC$;

Знак «-» означает отрицательную обратную связь.



В случае, если быстродействие преобразователя много больше, чем скорость изменения входного сигнала, то на время преобразования входной сигнал можно считать постоянным ($U_{вх}$ – *const*) и, следовательно,

$$U_{вых} = -\frac{1}{T}U_{вх}t$$

где t – время интегрирования.

Аналого-цифровые преобразователи

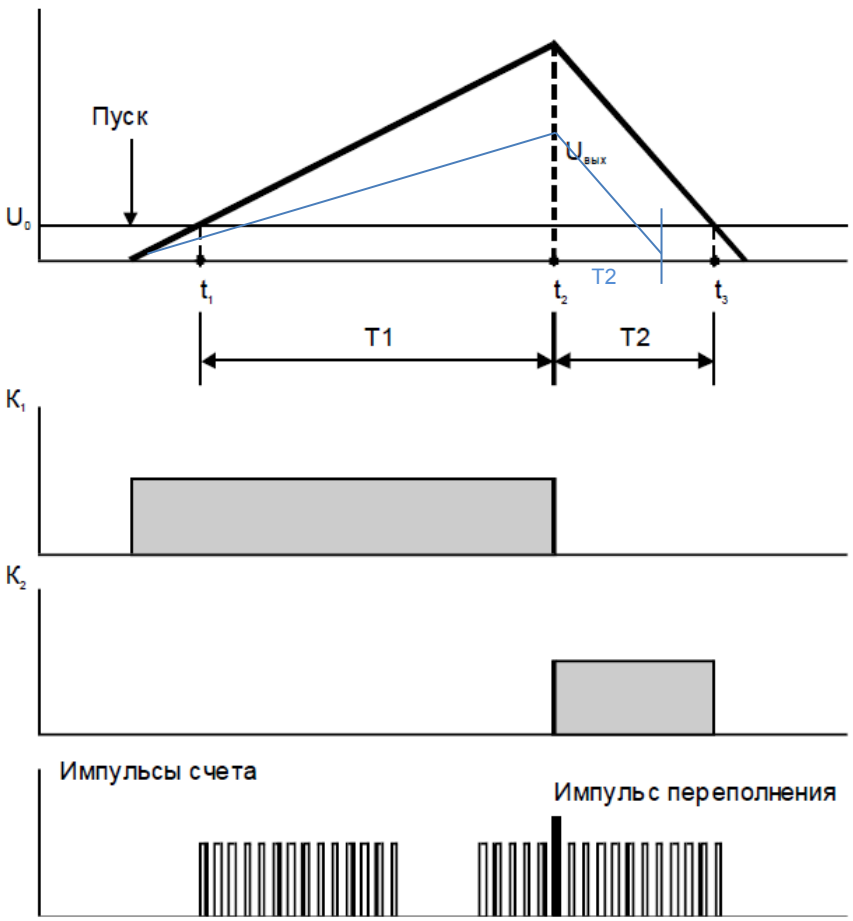
Интегрирующие АЦП

Основная идея

На отрезке Т1 входной сигнал интегрируется (заряд конденсатора). Чем меньше по величине этот сигнал, тем меньше угол наклона прямой.

Обратный процесс (процесс разряда) всегда идёт постоянным по величине (опорным) значением в течение Т2.

Подобные схемы (идеи) широко используются для преобразования уровня напряжения в длительность импульса и об этом мы ещё поговорим.



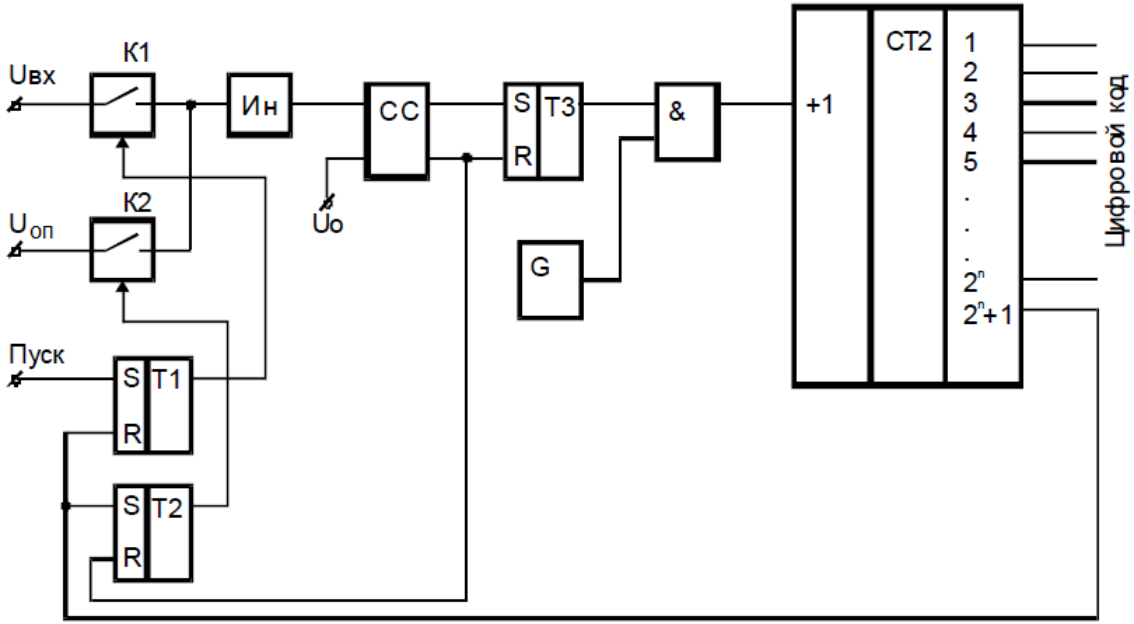
Аналого-цифровые преобразователи

Интегрирующие АЦП

Процесс преобразования начинается по сигналу «ПУСК». Триггер Т1 взводится и подключает входное напряжение через ключ К1 к интегратору Ин.

При $U_{вх}>U_0$ со схемы совпадения СС на вход S Т3 подаётся «1», триггер взводится и разрешает прохождение импульсов частотой *f* от генератора G через схему совпадения И к двоичному счетчику. С приходом каждого импульса выходная кодовая комбинация счетчика увеличивается.

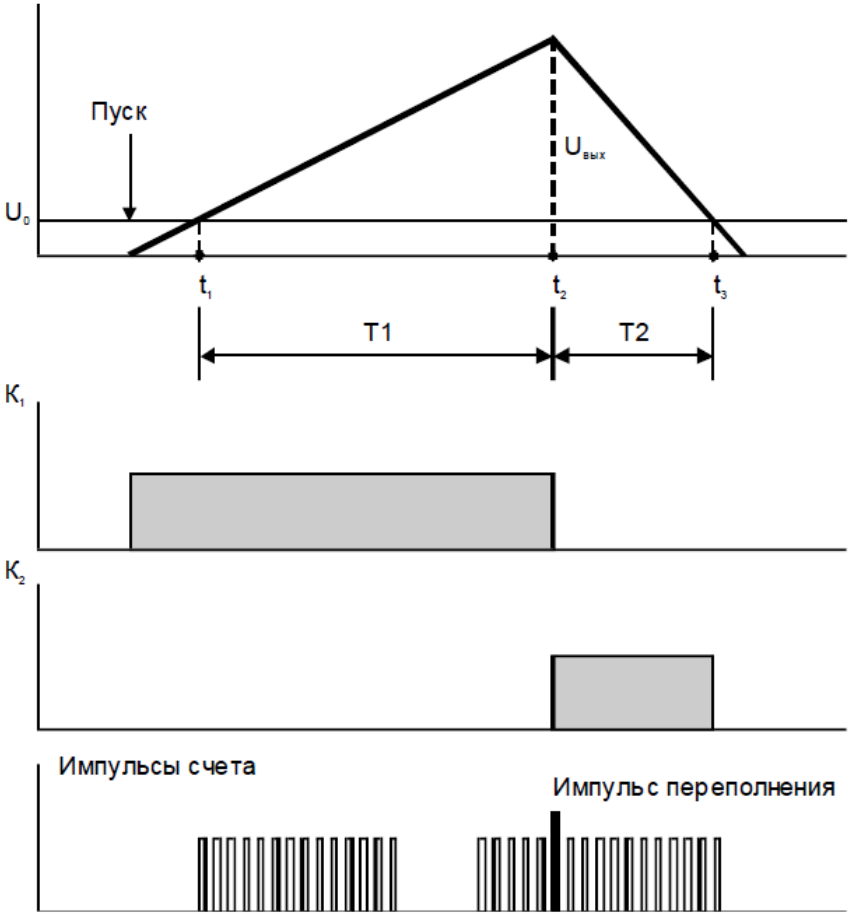
В момент, когда счетчик переполняется и на выходе уславливаются все нули, а с выхода (2^n+1) сигнал переполнения поступает на Т1 и Т2. Т1 сбрасывается и отключает $U_{вх}$ от Ин. Т2 взводится и подключает $U_{оп}$ к Ин через К2. $U_{оп}$ противоположное по знаку $U_{вх}$. Когда напряжение на выходе Ин равно U_0, СС сбросит Т2. К2 разомкнётся и отключит $U_{оп}$ от Ин.



Аналого-цифровые преобразователи

Интегрирующие АЦП

К этому моменту на выходе счетчика будет записан код, являющийся цифровым эквивалентом входного аналогового сигнала.



Покажем это

Цифровой код на выходе счетчика в момент времени t3

$$N = \frac{T_2}{\tau}$$

где

T_2 – время интегрирования $U_{оп}$;

τ – период тактовой частоты генератора.

Найдём связь между временным интервалом T_2 и напряжением $U_{вх}$.

В момент времени t_2, когда интегрирование входного напряжения $U_{вх}$ заканчивается на выходе интегратора устанавливается напряжение $U_{вых}$, равное

$$U_{вых} = -\frac{1}{T} U_{вх} T_1$$

где T_1- время интегрирования $U_{вх}$.

Аналого-цифровые преобразователи
Интегрирующие АЦП

С другой стороны

$$U_{вых} = -\frac{1}{T} U_{оп} T_2$$

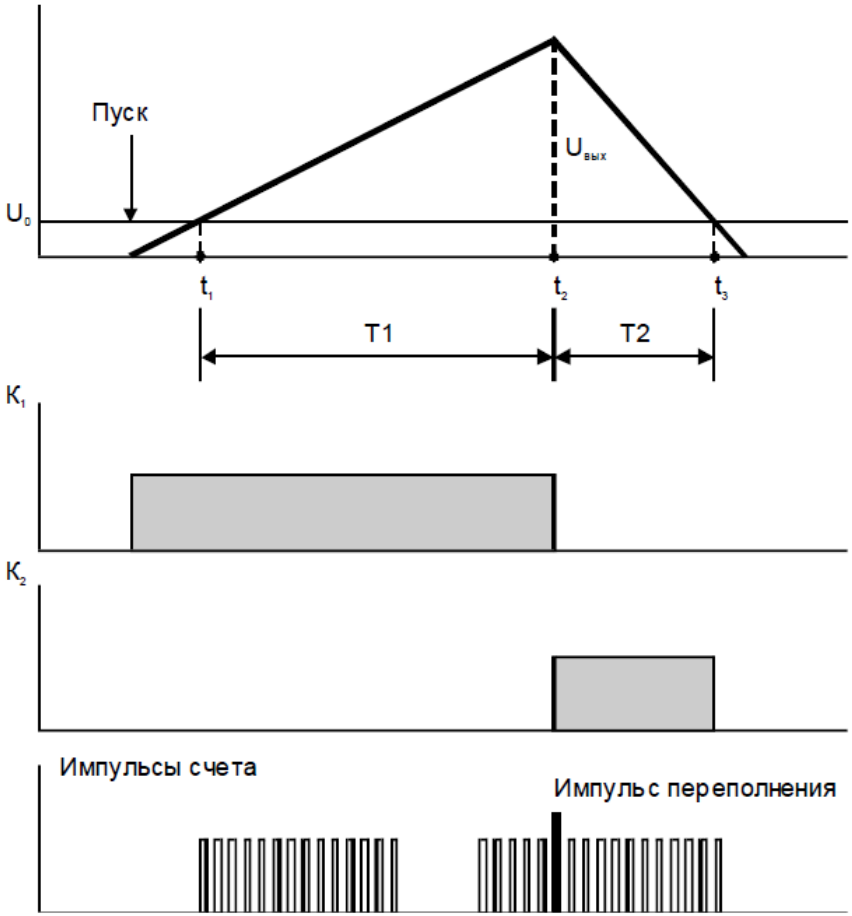
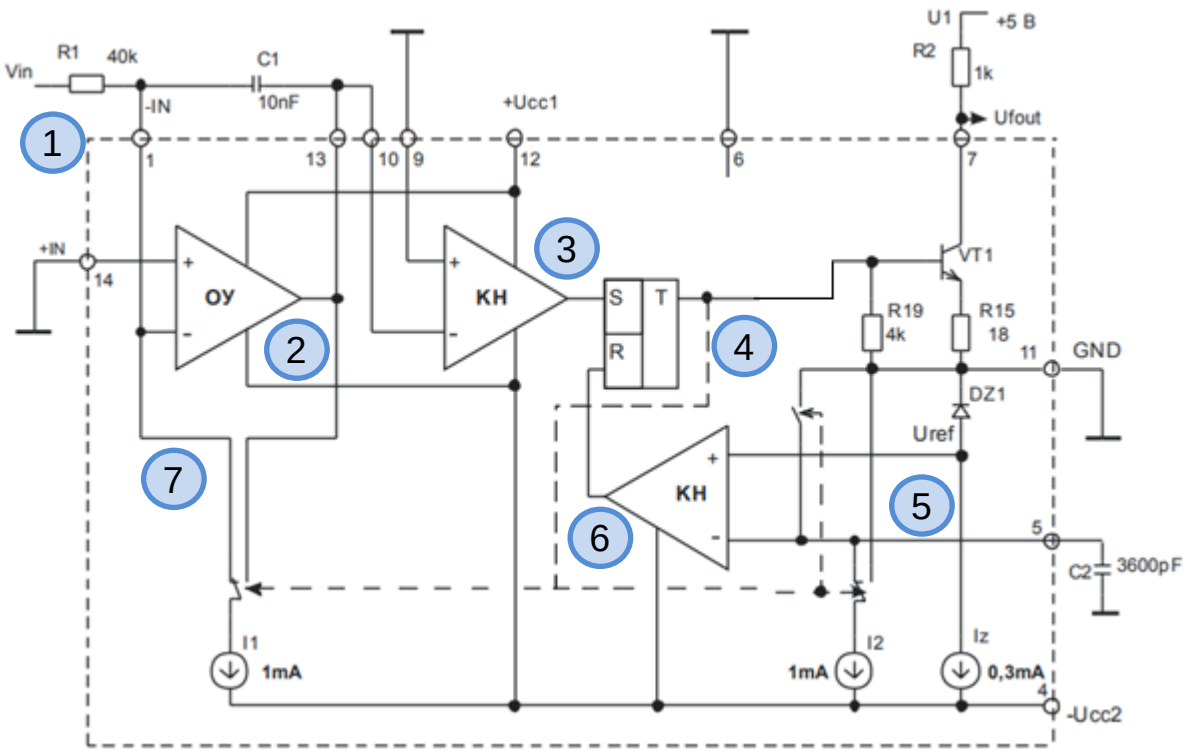
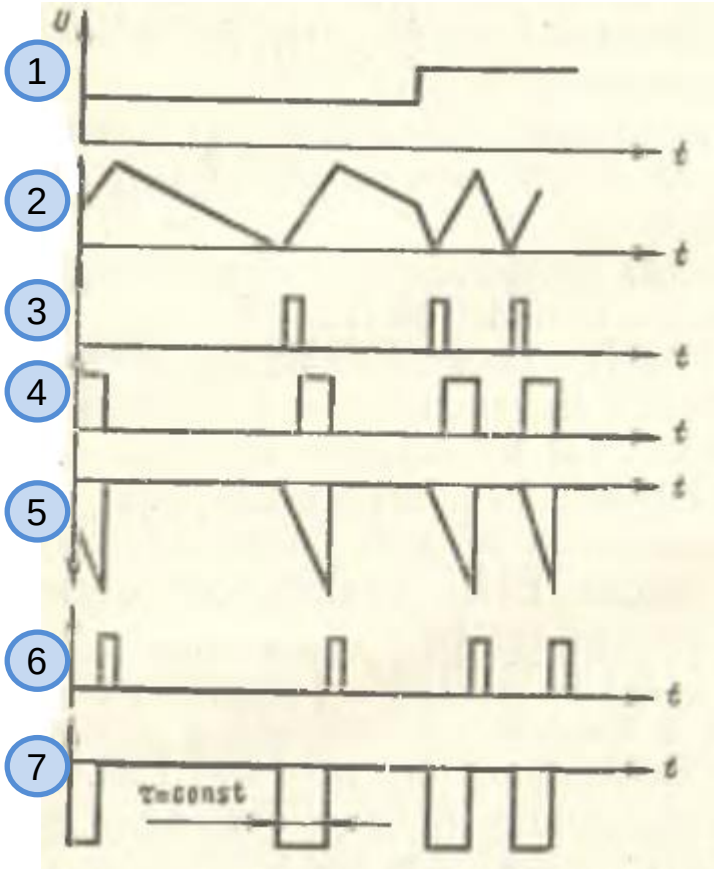
где T_2- время интегрирования $U_{оп}$.
Из чего следует

$$T_2 = \frac{U_{вх} T_2}{U_{оп}}.$$

Следовательно код, сформированный на выходе

$$N = \frac{T_2}{\tau} = \frac{U_{вх} T_1}{U_{оп} \tau} = \frac{U_{вх}}{U_{оп}} 2^n$$

где
n – число разрядов в счетчике.
Достоинства АЦП с двойным преобразованием относят достаточно высокую точность за счет использования одних и тех же узлов при интегрировании, что позволяет компенсировать ошибки.
Недостаток ….



Преобразователь напряжение - частота