

Устройства сопряжения цифровых и аналоговых устройств

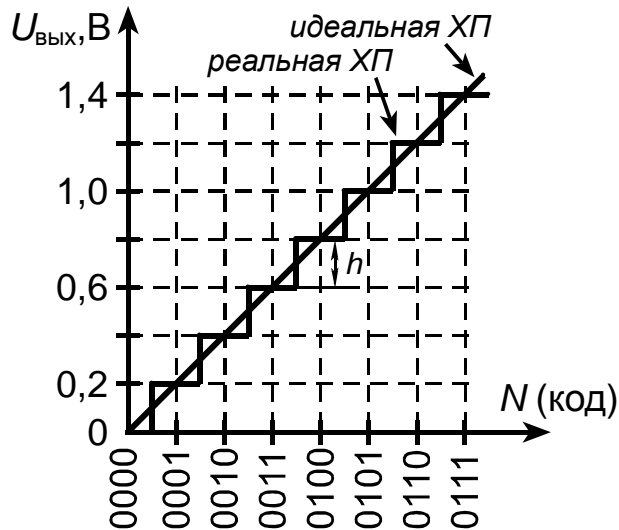
ЦАП – цифро-аналоговые преобразователи – устройства, предназначенные для преобразования дискретного (цифрового) сигнала в непрерывный (аналоговый) сигнал. Преобразование производится пропорционально двоичному коду сигнала.

DAC – Digital to Analog Converter

АЦП – аналого-цифровые преобразователи – устройства, предназначенные для преобразования непрерывных (аналоговых) сигналов в цифровые.

ADC – Analog to Digital Converter

Цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП)



Характеристика преобразования

	Цифровой сигнал (код)	Аналоговый сигнал ($U_{\text{вых}}, \text{В}$)
0	0000	0
1	0001	0,2
2	0010	0,4
3	0011	0,6
4	0100	0,8
5	0101	1,0
6	0110	1,2
7	0111	1,4

Характеристика преобразования –

$$U_{\text{вых}} = f(N)$$

Идеальная х-ка – линейная, всякое отклонение от нее влечет ошибки в преобразовании.

ЦАП

При последовательном возрастании значений входного кода N от 0 до 2^n-1 через единицу младшего разряда выходной сигнал образует ступенчатую функцию. В отсутствие аппаратных погрешностей средние токи ступенек расположены на идеальной характеристике, которой соответствует прямая линия.

Реальная характеристика преобразования может существенно отличаться от идеальной размерами и формой ступенек, а также расположением на плоскости координат. Для качественного описания этих различий существует ряд параметров.

Интервал значений выходной аналоговой величины называется **диапазоном**.

Интервал напряжения между двумя соседними напряжениями называется **ступенью квантования** (у идеальной ЦАП ступени квантования одинаковы):

$$h = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{b - 1},$$

где $b = 2^n$ – значение кода; n – число разрядов ЦАП; X_{\max} , X_{\min} – максимальное и минимальное значение аналоговой величины соответственно.

В данном случае

$$h = \frac{1,4 - 0}{7} = 0,2\text{В}$$

Основные параметры ЦАП:

1. N – разрядность.
2. Максимальный выходной ток.
3. Напряжение питания.
4. Величина опорного напряжения.
5. Разрешающая способность.
6. Уровни управляющего напряжения (ТТЛ или КМОП).

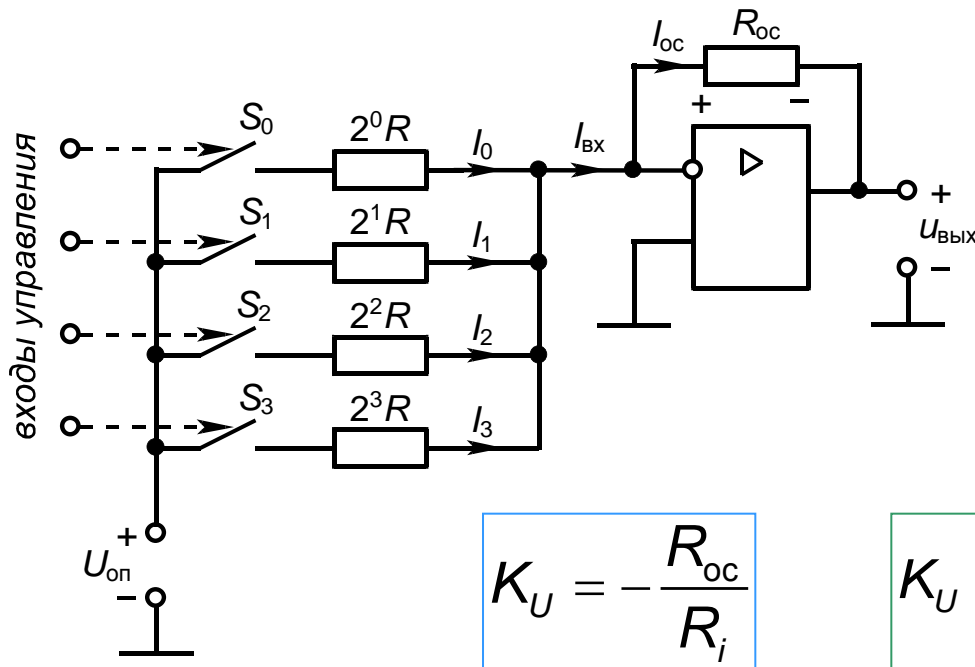
7. Погрешности преобразования (погрешность смещения нуля на выходе, абсолютная погрешность преобразования, нелинейность преобразования, дифференциальная нелинейность).
8. Время преобразования – интервал времени с момента предъявления (подачи) кода до момента появления выходного сигнала.
9. Время установления аналогового сигнала.

ЦАП

Основными элементами ЦАП служат:

- резистивные матрицы (набор делителей с определенным ТКС, с определенным отклонением 2%, 5% и менее) могут быть встроены в ИМС;
- ключи (на биполярных или МОП-транзисторах);
- источник опорного напряжения.

Основной принцип преобразования



Принцип преобразования заключается в суммировании токов, пропорциональных весам двоичных разрядов, причем суммируются токи только тех разрядов, значения которых равны лог. 1.

Пусть на входы управления подан сигнал 0110, т.е. ключи S1 и S2 замкнуты.

$$I_{\text{ВХ}} = I_1 + I_2; \quad I_{\text{ВХ}} = I_{\text{ОС}}; \quad U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{РОС}} = -I_{\text{ОС}} \cdot R_{\text{ОС}}$$

$$K_U = -\frac{R_{\text{ОС}}}{R_i}$$

$$K_U = -\frac{R_{\text{ОС}}}{\frac{2R \cdot 4R}{2R + 4R}} = -\frac{R_{\text{ОС}} \cdot 6R}{8R^2} = -0,75 \frac{R_{\text{ОС}}}{R}$$

1 - ключ замкнут
0 - ключ разомкнут

$$U_{\text{ВЫХ}} = -U_{\text{ОП}} \cdot 0,75 \cdot \frac{R_{\text{ОС}}}{R}$$

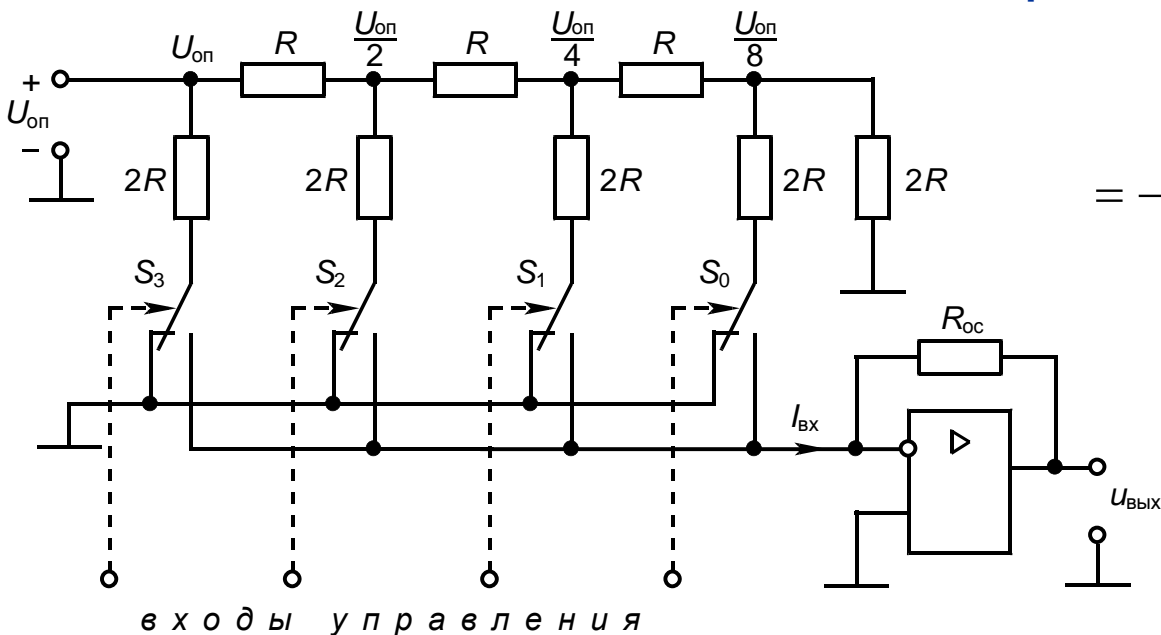
Достоинство: простота.

Недостатки:

1. Потребляемый ток от источника $U_{оп}$ зависит от кода на входе схемы. Изменение данного тока влияет на величину $U_{оп}$, а следовательно увеличивает погрешность преобразования.
2. Реализации схемы в интегральном виде препятствует существенное отличие сопротивлений весовых резисторов (в тысячи раз).
3. Дополнительные погрешности преобразования возникают, если сопротивления резисторов старших разрядов будут соизмеримы сопротивлением замкнутого ключа.

С учетом перечисленных недостатков данная схема ЦАП применяется при небольшом числе разрядов ($n < 8$).

R-2R-матрицы

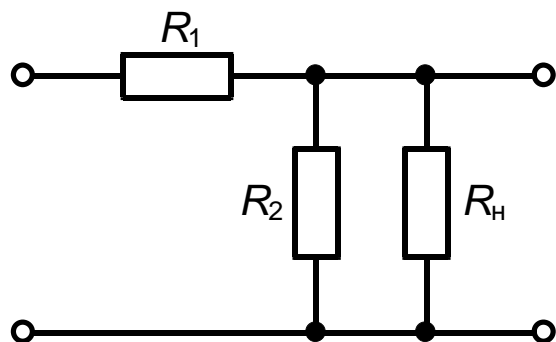


$$U_{\text{ВЫХ}} = -I_{\text{ВХ}} \cdot R_{\text{ОС}} =$$

$$= -U_{\text{ОП}} \frac{R_{\text{ОС}}}{16R} (8 \cdot S_3 + 4 \cdot S_2 + 2 \cdot S_1 + 1 \cdot S_0)$$

R-2R-матрицы применяются в ЦАП, выполненных по интегральной технологии.

R-2R-матрицу называют **матрицей постоянного сопротивления**, независимо от кода, поданного на входы управления, входное сопротивление матрицы не меняется. Нагрузкой источника $U_{\text{оп}}$ является неизменное входное сопротивление матрицы и соответственно ток, потребляемый от $U_{\text{оп}}$ не зависит от кода на входах управления, следовательно величина $U_{\text{оп}}$ более стабильна.

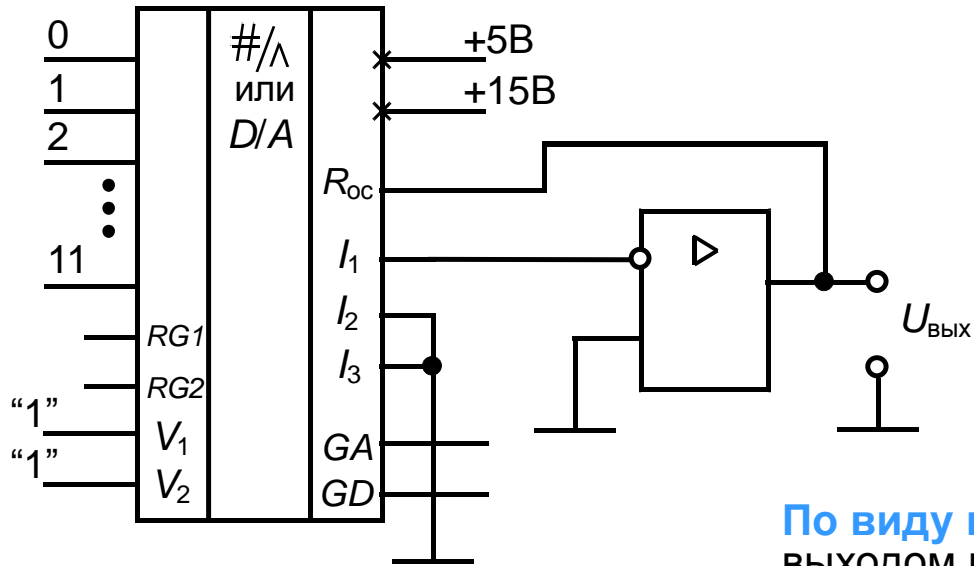


$$R_{\text{ВХ}} = R_1 + R_2 \parallel R_{\text{Н}} =$$

$$= R + R = 2R = \text{const}$$

Делитель – основной элемент матрицы.
Особенность: при подключению к делителю $R_{\text{Н}}$ его входное сопротивление должно быть равно $R_{\text{Н}}$. Это достигается при $R_1 = R$, $R_2 = 2R$, $R_{\text{Н}} = 2R$.

ЦАП



УГО ЦАП и схема подключения

Преобразователи с $R-2R$ и ключами на транзисторах применяются в качестве умножающих ЦАП (т.е. $U_{\text{вых}}$ пропорционально произведению $U_{\text{оп}}$ и входного цифрового кода).

Наиболее распространенными являются ЦАП серий ИМС: 572,594, 1108, 1118 и др.

Классификация ЦАП

По виду выходного сигнала: с токовым выходом и выходом в виде напряжения;

По типу цифрового интерфейса: с последовательным вводом и с параллельным вводом входного кода;

По числу ЦАП на кристалле: одноканальные и многоканальные;

По быстродействию: умеренного быстродействия и высокого быстродействия.

Отдельные ЦАП со встроенной $R-2R$ -матрицей применяются в качестве **цифровых потенциометров**.

Если вместо $U_{\text{оп}}$ использовать источник переменного сигнала (например, звукового), то изменяя код на входах управления ЦАП можно регулировать величину выходного напряжения.

Цифровой потенциометр осуществляет цифровую регулировку аналогового сигнала.

Названия: *Digipot*, *D-pot*, *DPOT*, цифровой резистор.

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП)

АЦП предназначены для преобразования аналоговых сигналов в цифровые.

Преобразование происходит дискретно, т.е. в определенные моменты называемые **точками отсчета**.

Количество отсчетов за единицу времени определяет частоту дискретизации (частота преобразования).

Частота дискретизации (F_g) – это частота взятия отсчетов непрерывного во времени сигнала при его дискретизации:

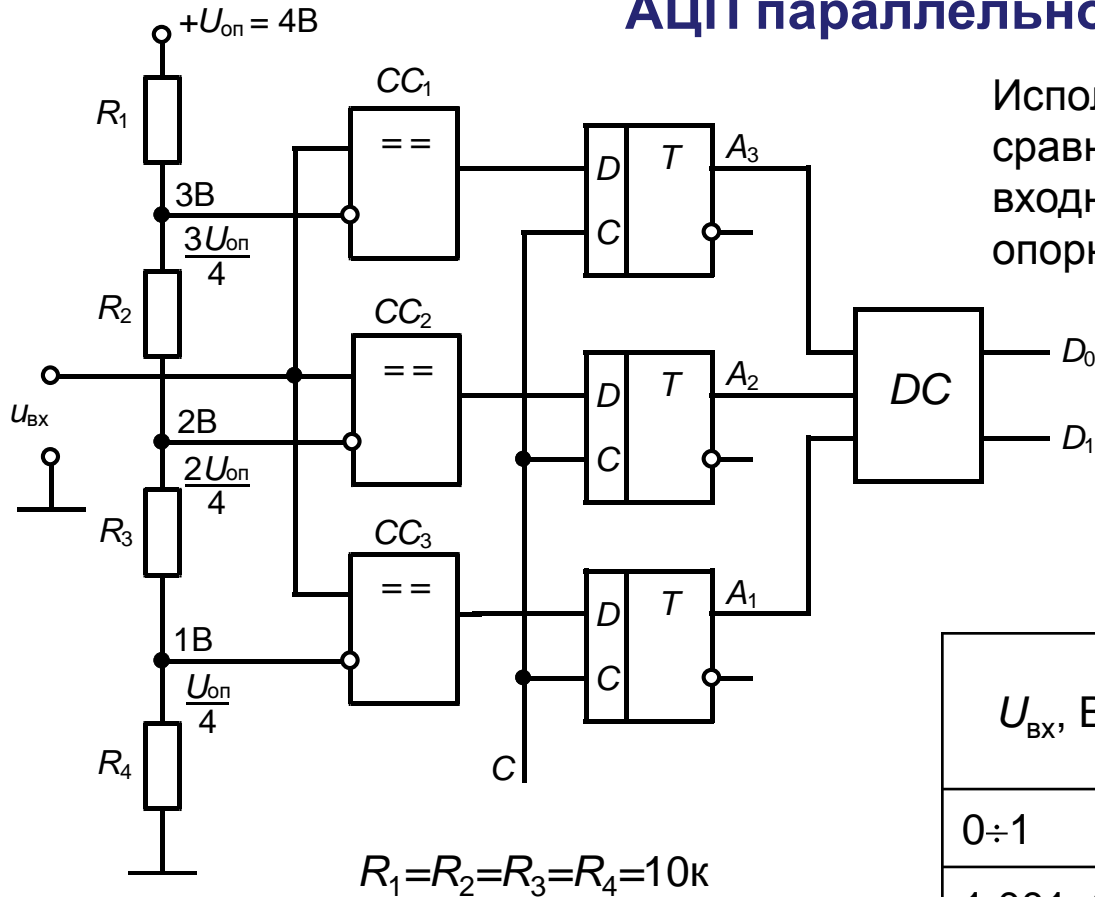
$$F_g = \frac{1}{T_{\text{отс}}}, \quad \text{где } T_{\text{отс}} \text{ – интервал времени между отсчетами (период дискретизации).}$$

Частота дискретизации определяет быстродействие АЦП.

По быстродействию АЦП делят на:

1. **АЦП параллельного преобразования** (параллельные АЦП) – быстродействующие АЦП, имеют сложное аппаратное использование
разрешение $N = 8-12$ бит, $F_g =$ десятки МГц ÷ единицы ГГц.
2. **АЦП последовательного приближения** (последовательного счета)
разрешение $N = 10-16$ бит, $F_g =$ десятки кГц ÷ до 10МГц. *УГО D-триггера*
3. **Интегрирующие АЦП**
разрешение $N = 16-24$ бит, $F_g =$ десятки ÷ сотни Гц.
4. **Сигма-дельта АЦП**
разрешение $N = 16-24$ бит, $F_g =$ сотни Гц ÷ единицы МГц.

АЦП параллельного действия



Вход С необходим для тактирования триггеров. Непосредственно к шифратору выходы компараторов подключать нельзя, т.к. если входное напряжение изменится, то может быть получен ошибочный результат.

Используется набор компараторов (схема сравнения - СС), каждый из которых сравнивает входное напряжение с индивидуальным опорным.

R_1, R_2, R_3, R_4 – прецизионный делитель

Принцип действия

С возрастанием входного напряжения компараторы последовательно устанавливают на своих выходах лог. 1. Данная информация записывается в триггеры и поступает на преобразователь кода, где преобразуется в двоичный код.

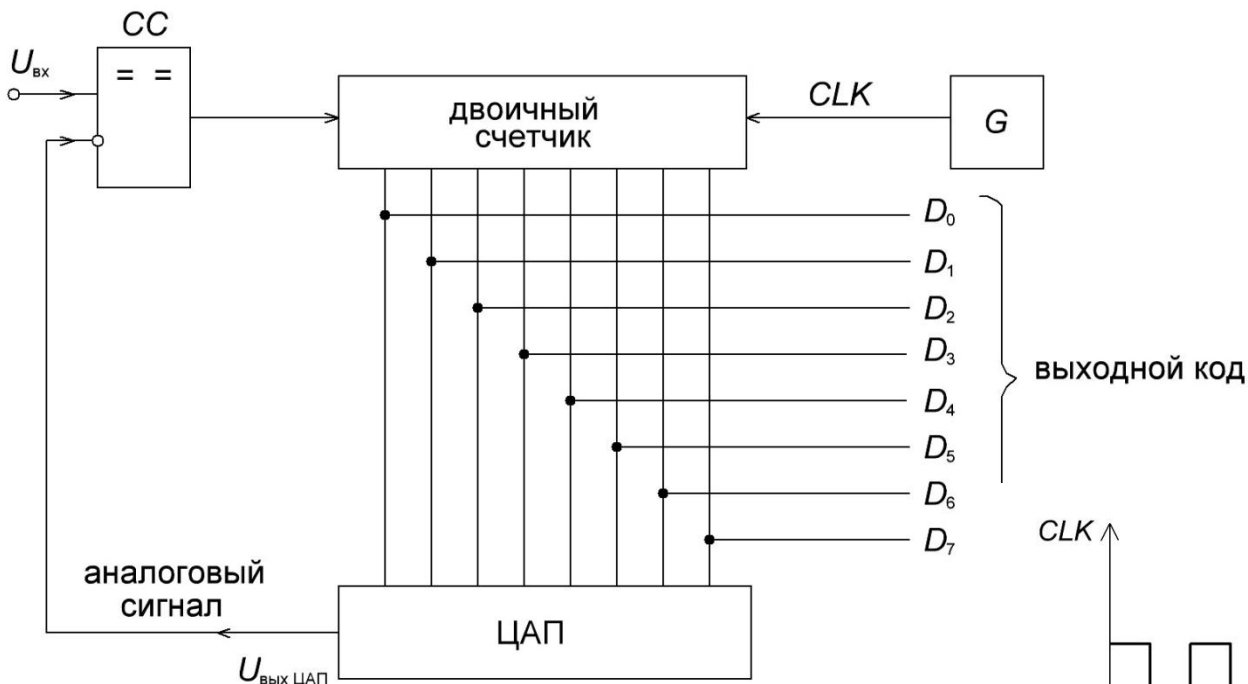
$U_{вх}$, В	Выходы компаратора			Выходы АЦП	
	A_3	A_2	A_1	D_1	D_0
$0 \div 1$	0	0	0	0	0
$1,001 \div 2$	0	0	1	0	1
$2,001 \div 3$	0	1	1	1	0
$3,001 \div 4$	1	1	1	1	1

унитарный код

двоичн. код
8

К1107ПВ3 – 6 разрядный АЦП параллельного действия

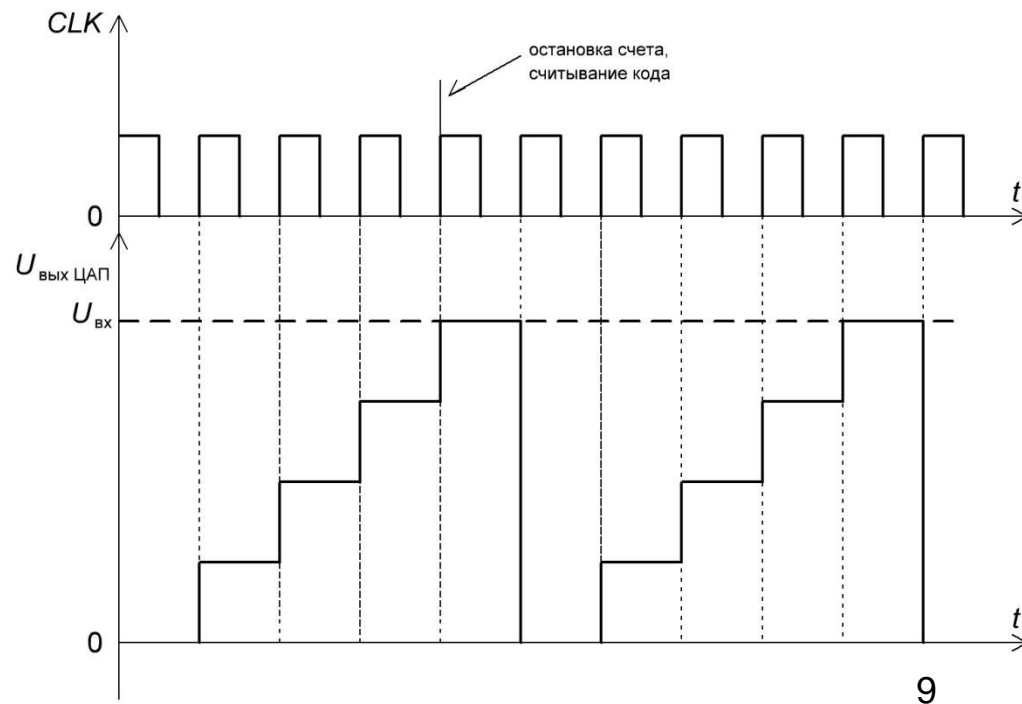
АЦП последовательного счета



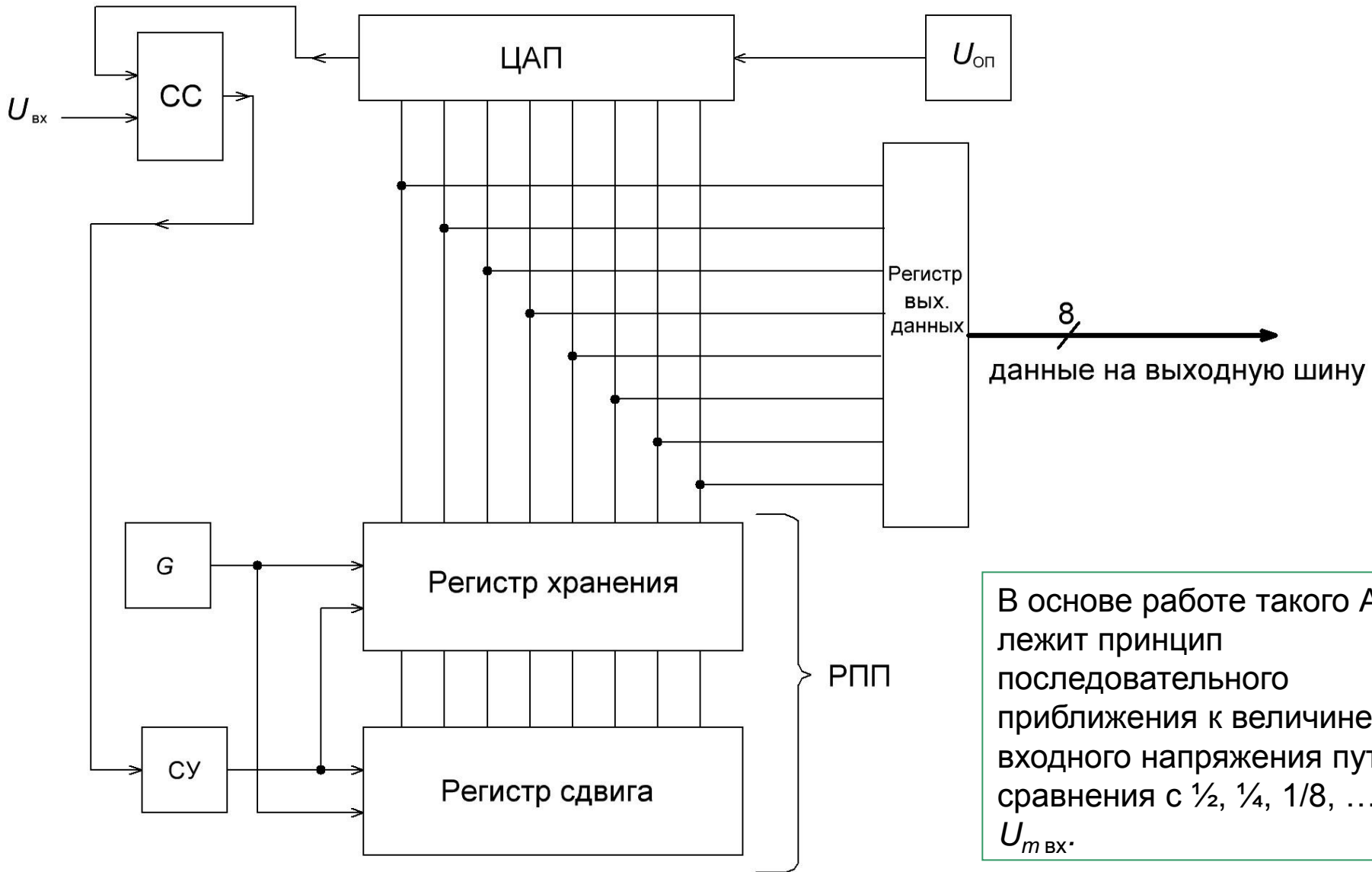
Принцип работы АЦП последовательного счета основан на возрастании напряжения на выходе внутреннего ЦАП.

G – генератор тактовых импульсов (тактовый генератор)

Генератор *G* вырабатывает прямоугольные импульсы, которые подсчитывает счетчик и в соответствии с кодом на выходе счетчика ЦАП меняет (увеличивает) напряжение на входе схемы сравнения (СС). Как только напряжение на инвертирующем входе компаратора чуть превысит $U_{вх}$, компаратор выдает сигнал, останавливающий счетчик и можно считывать код $D_7 \div D_0$.



АЦП последовательного приближения

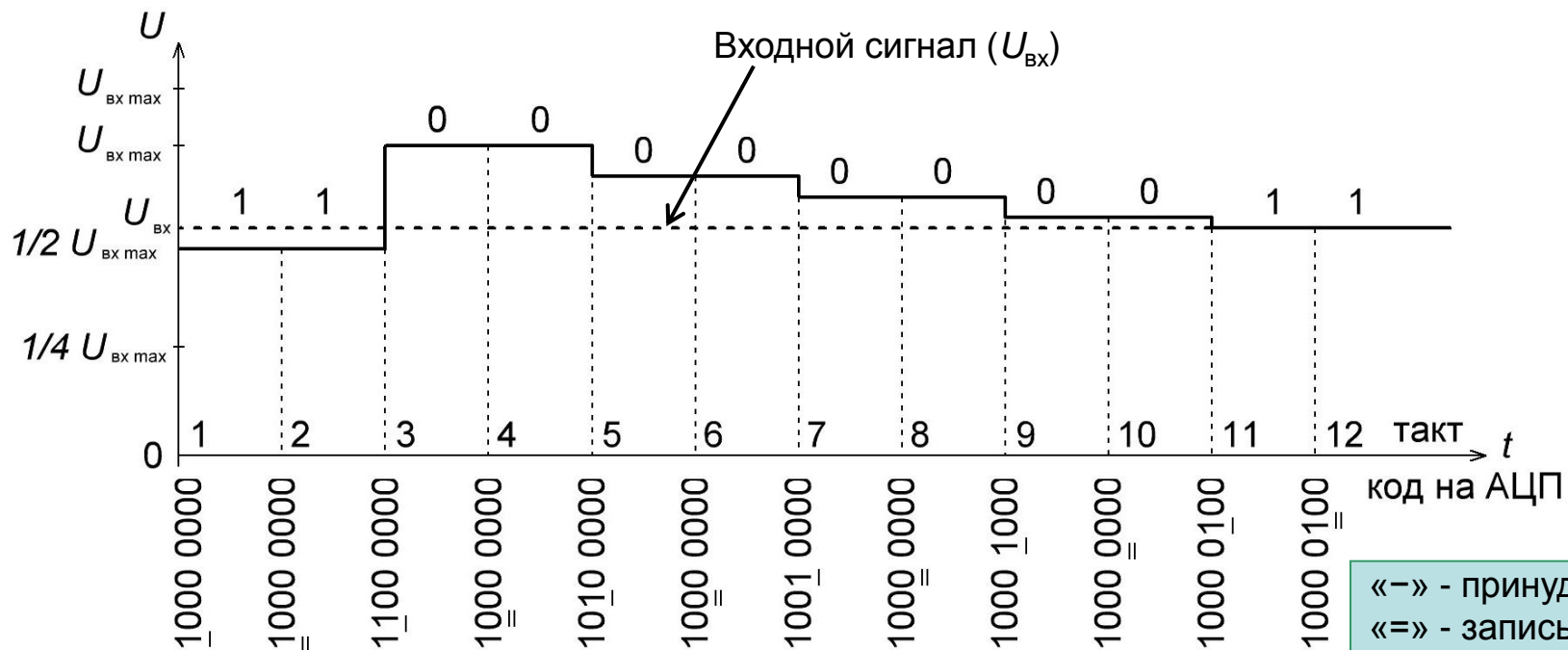


СС – схема сравнения (компаратор)

РПП – регистр последовательных приближений

СУ – система управления

АЦП последовательного приближения



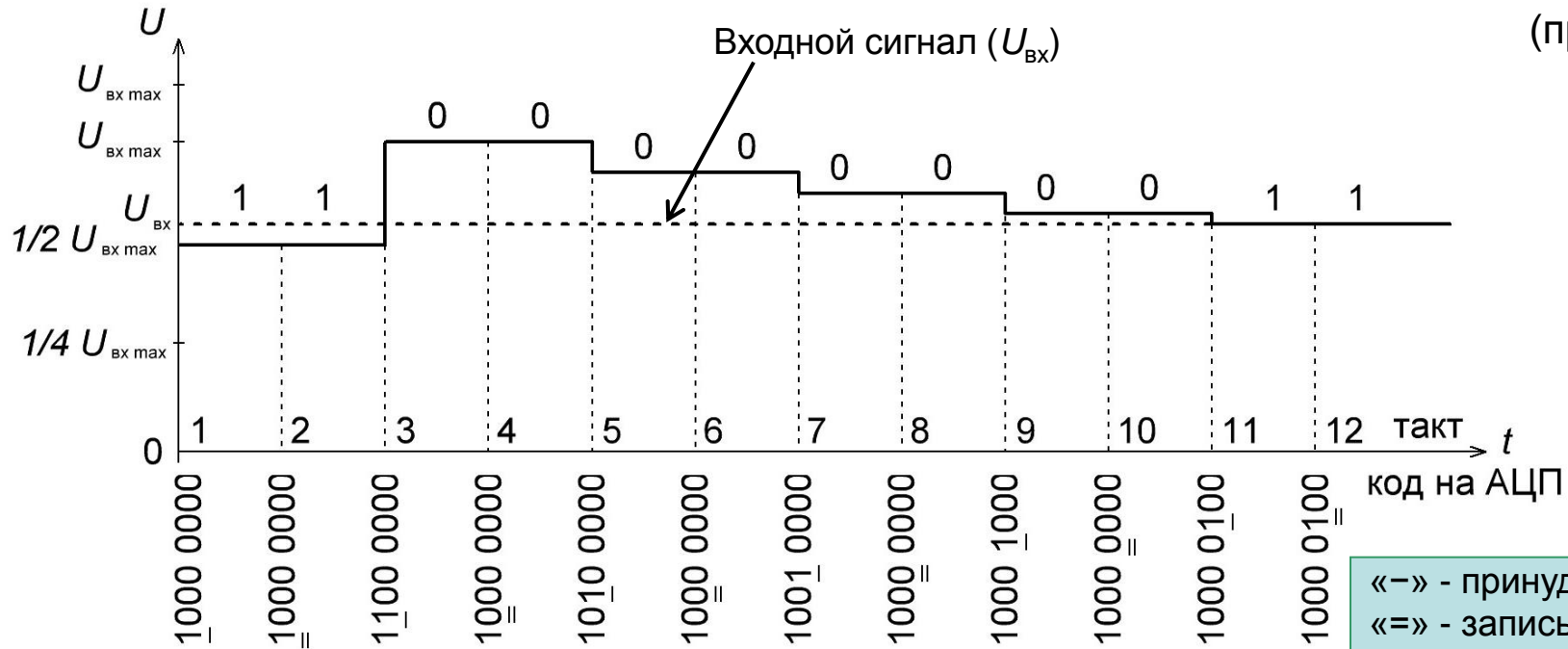
В основе лежит специальный регистр последовательного приближения. В начале цикла преобразования на всех выходах этого регистра установлены лог. 0, за исключением старшего разряда, в который принудительно записана лог. 1. В результате на выходе ЦАП устанавливается напряжение, равное $\frac{1}{2}U_{вх max}$, и на выходе схемы сравнения появляется результат сравнения $U_{выхЦАП} = \frac{1}{2}U_{вх max}$ и $U_{вх}$.

Если $U_{вх} > U_{выхЦАП}$, то на выходе СС = 1. Если $U_{вх} < U_{выхЦАП}$, то на выходе СС = 0.

Это состояние записывается в старший разряд регистра сдвига и регистра хранения (РПП) во втором такте. Третьим тактовым импульсом принудительно записывается «1» в следующий более младший разряд.

АЦП последовательного приближения

(продолжение)



Этот код с выхода РПП подается на ЦАП, который выдает соответствующее напряжение $3/4 U_{вх \max}$, которое сравнивается с $U_{вх}$ (на СС) и результат записывается в тот же разряд четвертым тактовым импульсом. Далее процесс продолжается до тех пор, пока не будут проанализированы все разряды.

Время преобразования АЦП последовательного приближения:

$$t_{пр} = 2nT_G,$$

где T_G – период следования импульсов генератора; n – разрядность АЦП.

Такие АЦП уступают по быстродействию АЦП параллельного типа, однако они более дешевые и потребляют меньшую мощность. Пример: 1113ПВ1.

Интегрирующие АЦП

В основе принципа работы интегрирующего АЦП лежат два основных принципа:

1. Преобразование входного напряжения в частоту или в длительность (время) импульсов

$$U_{\text{вх}} \rightarrow f \text{ (ПНЧ – преобразователь напряжение-частота)}$$

2. Преобразование частоты или длительности (времени) в цифровой код

$$f \rightarrow N; T \rightarrow N.$$

Основную погрешность вносят ПНЧ.

Главным элементом интегрирующего АЦП является **интегратор**, который строится на ОУ.

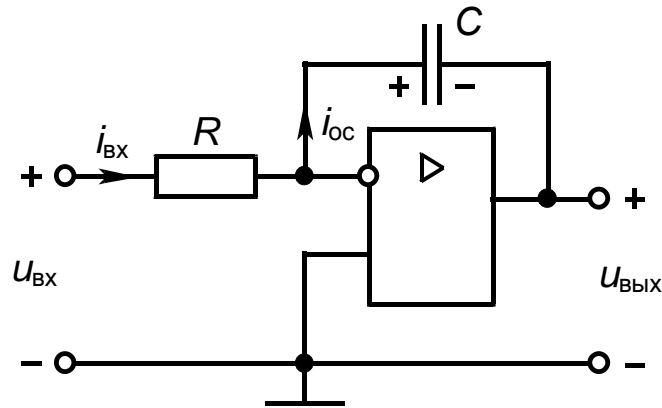


Схема интегратора

Считая ОУ идеальным, определим выходное напряжение:

$$u_{\text{вых}}(t) = -u_C(t).$$

Известно, что $i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt}$; \Rightarrow

$$u_C(t) = U_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_C(t) dt; \Rightarrow u_{\text{вых}}(t) = - \left[\frac{1}{C} \int_0^t i_C(t) dt + U_C(0) \right]$$

т.к. $i_C(t) = i_{\text{ос}}(t)$, а $i_C(t) = i_{\text{ос}}(t) = \frac{u_R(t)}{R}$.

С учетом $u_R(t) = u_{\text{вх}}(t)$ получаем

$$u_{\text{вых}}(t) = - \frac{1}{RC} \int_0^t u_{\text{вх}}(t) dt + U_{\text{вых}}(0),$$

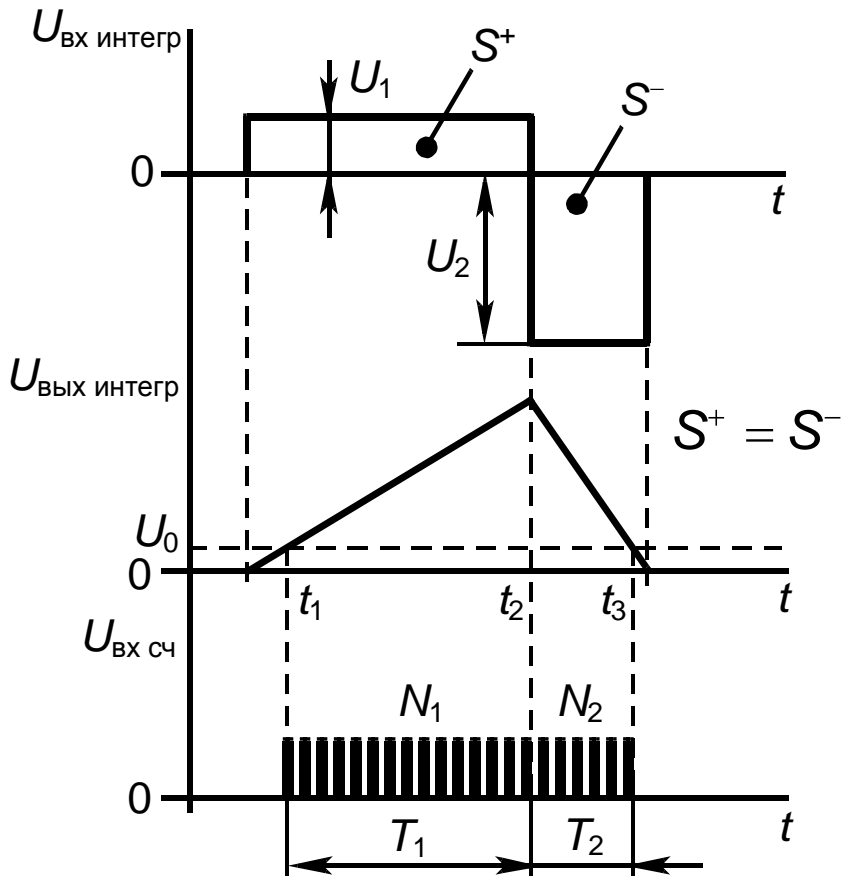
Интегрирующие АЦП



Сигналы с элемента $\&$ подсчитывает счетчик. Происходит заполнение интервала t_1-t_2 импульсами до переполнения счетчика. Сигналом со счетчика триггер T_1 сбрасывается, а T_2 устанавливается, \Rightarrow кл.1 размыкается, а кл.2 замыкается. На вход интегратора подается сигнал, противоположный по знаку $U_{\text{вх}}$, \Rightarrow происходит «разинтегрирование» интегратора и $U_{\text{вых интегр}}$ линейно падает и по достижении уровня U_0 компаратор (СС) выдает лог. 0.

Счетчик останавливает счет, а триггер T_2 сбрасывается.

Интегрирующие АЦП



Так как $S^+ = S^- \Rightarrow S^+ = S^- = U_1 \cdot T_1 = U_2 \cdot T_2$

$$U_1 = U_{\text{вх}}, U_2 = U_{\text{оп}} \Rightarrow U_{\text{вх}} \cdot T_1 = U_{\text{оп}} \cdot T_2$$

$$T_1 = N_1 \cdot T_G = \frac{N_1}{f_G}; \quad T_2 = N_2 \cdot T_G = \frac{N_2}{f_G}.$$

N_1 – содержимое счетчика (количество импульсов) после завершения интервала t_1-t_2 ;

N_2 – содержимое счетчика (количество импульсов) за интервал t_2-t_3 ;

f_G – частота тактового генератора G .

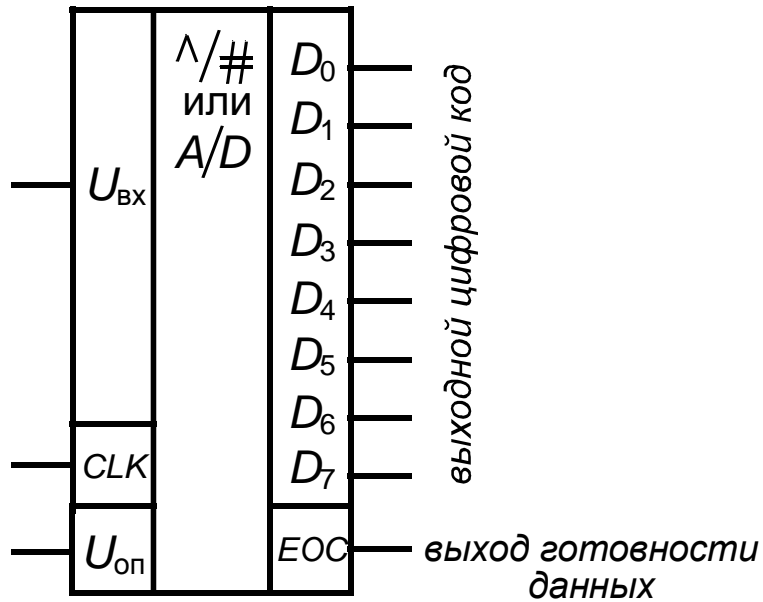
Зная $U_{\text{оп}}, T_2, T_1$, можно определить $U_{\text{вх}}$.

$$U_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{оп}} \cdot T_2}{T_1}$$

АЦП двухтактного интегрирования является наиболее медленным преобразователем. Однако этот недостаток компенсируется высокой разрешающей способностью и высокой точностью, а также сравнительно простой реализацией. Это позволяет выполнять их в виде ИМС. АЦП данного типа нашли применение в мультиметрах, т.к. сочетают в себе такие свойства как высокое разрешение и высокое помехоподавление.

Примеры: К572ПВ2, К572ПВ5.

Интегрирующие АЦП



УГО АЦП

Существуют АЦП со встроенными преобразователями кодов и схемами, обеспечивающими подключение жидко-кристаллических индикаторов непосредственно к микросхеме преобразователя без дополнительных схем. Отдельные АЦП содержат узлы для подключения к микропроцессору.