

Глава 13. Аналогово-цифровые преобразователи и цифроаналоговые преобразователи.

13.1. Аналогово-цифровые преобразователи.

Это устройства, которые предназначены для преобразования аналоговых сигналов в цифровой код. В качестве входного аналогового сигнала X , величина которого может принимать произвольное значение, как правило, выступает напряжение, а выходным - является число N , представленное обычно в параллельном двоичном коде. Уравнение преобразования аналого-цифрового преобразователя записывается в виде:

$$N_{10} = \text{int} \left[\frac{X}{X_{\max}} (2^R - 1) \right]$$

$\text{int}[x]$ – функция определяющая целую часть числа X ; X – текущее значение входного сигнала; X_{\max} – максимальное значение входного сигнала;

N_{10} – выходной сигнал в десятичной системе счисления. Десятичное число в двоичной системе счисления записывается так: $N_{10} = a_{R-1}2^{R-1} + a_{R-2}2^{R-2} + \dots + a_02^0$

где $a_i = 0, 1$. R – число разрядов двоичного кода ($a_{R-1}a_{R-2} \dots a_0$), которым представляется десятичное число N_{10} ; ($a_{R-1}a_{R-2} \dots a_0$) – двоичный код десятичного числа N_{10} ;

$q = \frac{X_{\max}}{2^k - 1}$ – вес младшего разряда АЦП, минимальное изменение напряжения на входе, которое приводит к

изменению кода

на выходе на единицу младшего разряда. Классификация АЦП по принципу действия приведена на рис.

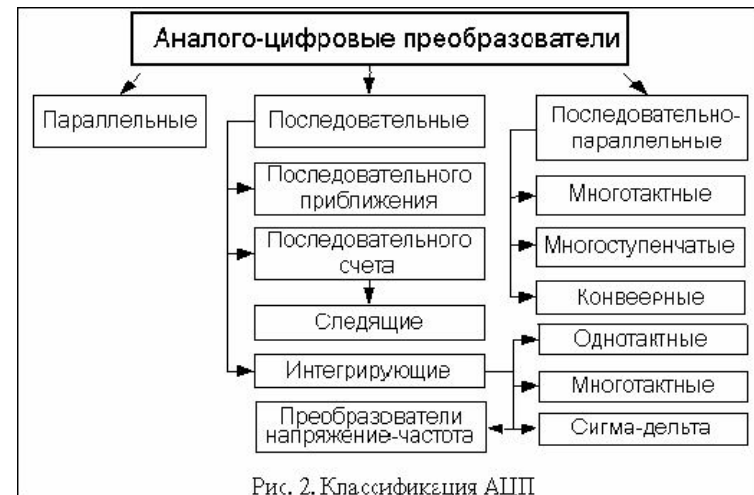
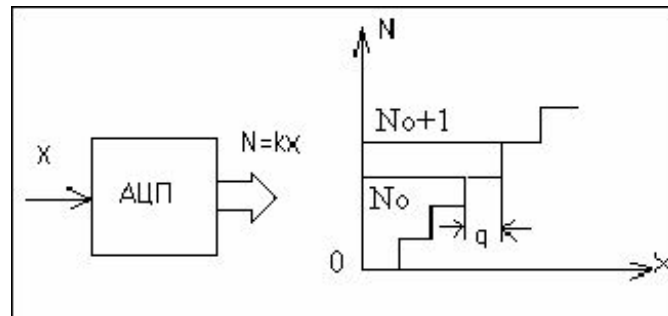


Рис. 2. Классификация АЦП



Наиболее распространена классификация АЦП, признаком которой служит характер процедуры приближения цифрового кода, получаемого в результате дискретизации времени и квантования уровня, к преобразуемому сигналу. Соответственно этой процедуре АЦП делят на последовательные, параллельные и последовательно-параллельные.

К последовательным АЦП относятся:

1. Аналого-цифровой преобразователь со ступенчато-нарастающим образцовым напряжением. Это напряжение сравнивается с преобразуемым напряжением. В процессе нарастания образцового напряжения подсчитывается число ступенек строго определенной высоты. Счет прекращается в момент равенства образцового напряжения преобразуемому. Фиксируемое в этот момент число ступенек представляет числовой эквивалент значения преобразуемого напряжения.
2. Время-импульсный АЦП (с однократным интегрированием), преобразующий напряжение в отрезок периодической последовательности импульсов (с промежуточным преобразованием напряжение-интервал времени), число которых пропорционально измеряемому значению напряжения. Преобразование напряжения в интервал времени осуществляется путем сравнения этого напряжения с образцовым линейно-изменяющимся напряжением, вырабатываемым интегратором.
3. Аналого-цифровой преобразователь с двухтактным (двухкратным) интегрированием. В течение первого такта длительностью T_1 ко входу интегратора приложено преобразуемое (измеряемое) напряжение постоянного тока и выходное напряжение интегратора растет по линейному закону (крутизна этого напряжения пропорциональна $U_{изм}$). По окончании такта в момент $t_1 = T_1$ преобразуемое напряжение снимается со входа интегратора, и он подключается к источнику образцового напряжения полярности, противоположной полярности преобразуемого напряжения. Начинается второй такт интегрирования, во время которого выходное напряжение интегратора линейно падает и в момент t_2 становится равно нулю. Интервал $\Delta t = t_2 - t_1$ заполняется счетными импульсами, число m которых пропорционально значению $U_{изм}$ напряжения.

4. Интегрирующий АЦП, осуществляющий преобразование напряжение в периодическую последовательность импульсов, частота следования которых пропорциональна значению преобразуемого напряжения.

5. Аналого-цифровой преобразователь поразрядного уравнивания, работающий по принципу сравнения преобразуемого напряжения с рядом образцовых напряжений, значения которых различаются по определенному закону, например по закону последовательного расположения разрядов двоичного кода.

Число, соответствующее набору значений образцовых напряжений, которым компенсируется преобразуемое (измеряемое) значение, представляет это значение в закодированной форме, т.е. в виде числового эквивалента. Параллельные АЦП или АЦП, работающие по методу считывания, выполняют операцию квантования напряжения сигнала по многим уровням параллельно путем сравнения его с набором пороговых уровней.

Последовательно-параллельные $2n$ -разрядные АЦП представляют собой сочетание двух параллельных n -разрядных АЦП, n -разрядного ЦАП и схемы вычитания. В этой системе цифры старших разрядов формируемого кода получают на выходе первого параллельного АЦП, а цифры младших разрядов - на выходе второго параллельного АЦП из разности входного напряжения и выходного напряжения ЦАП, на вход которого подается число, образованное старшими разрядами первого АЦП.

13.1.1. Основные параметры и характеристики АЦП

Любой АЦП является сложным устройством состоящим из одной или нескольких микросхем, параметры которых можно разделить на две группы: статические и динамические.

К статическим параметрам относят:

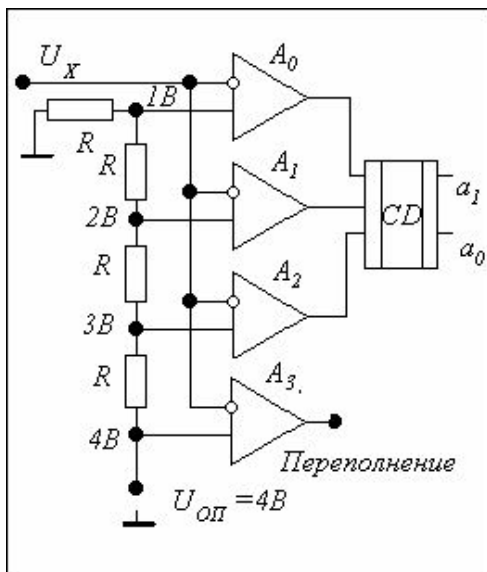
- Абсолютные значения и полярности входных напряжений;
- Входное сопротивление;
- Разрешающая способность выражается: количеством кодовых комбинаций на выходе АЦП - $N_{10}=2^R$; числом разрядов двоичного кода - R ; абсолютной разрешающей способностью $\Delta x = X_{\max}/2^R$; относительной разрешающей способностью $\Delta x/X_{\max} = (1/2^R)100\%$. Так, например АЦП с $R=10$ и $X_{\max}=10\text{В}$ имеет: $N_{10}=1024$; относительную разрешающую способность $(1024)^{-1} \approx 10^{-3} = 0.1\%$; абсолютная разрешающая способность равна 10 мВ .
- Погрешности преобразования постоянного напряжения количественно характеризуются: дифференциальной нелинейностью (DNL) – это разность напряжений соседних квантов: $DNL = q_{i+1} - q_i$, интегральной нелинейностью (INL) – это максимальное отклонение сглаженной характеристики преобразования от идеальной прямой линии.

К динамическим параметрам относят:

- Время преобразования $T_{\text{пр}}$ – время получения кода преобразования.
- Максимальная частота дискретизации $F_{\text{мах}}$. Иногда $F_{\text{мах}} = 1/(T_{\text{пр}})$.
- Апертурное время.



13.1.2. Аналого-цифровые преобразователи параллельного типа.



Аналого-цифровые преобразователи параллельного типа состоят из компараторов, число которых равно числу уровней квантования. Такие АЦП наиболее быстродействующие и способны работать на частотах до 100МГц и выше.

Схема двухразрядного аналого-цифрового преобразователя параллельного типа:

С помощью одинаковых резисторов R_1, R_2, \dots, R_N создаются уровни квантования с шагом квантования, равным падению напряжения на одном резисторе. Шаг и уровни квантования зависят от величины опорного стабилизированного напряжения.

В настоящей схеме шаг квантования составляет 1В.

CD - приоритетный шифратор. Преобразует унитарный двоичный код в натуральный двоичный, т.е. на выходе формирует код, который соответствует старшему номеру сработавшего компаратора.

Аналоговый сигнал U_x поступает одновременно на все компараторы. При этом изменяют состояние лишь те компараторы, у кого $U_x > U_{вх+}$

С помощью приоритетного шифратора на выходе формируется двоичный код номера старшего сработавшего компаратора.

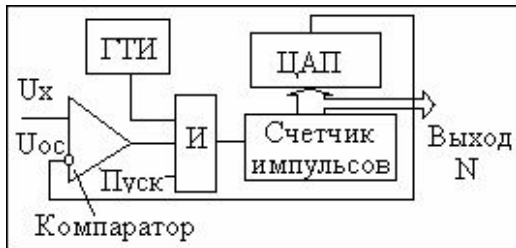
Если $U_x < 1B$, то ни один из компараторов не срабатывает. Работу АЦП можно описать таблицей 13.1.

Табл.13.1.

Так как результаты АЦ-преобразования записываются, как правило, в запоминающее устройство, существует вероятность получить полностью неверную величину. Решить эту проблему можно, например, с помощью устройства выборки-хранения (УВХ). Некоторые интегральные микросхемы (ИМС) параллельных АЦП, например МАХ100, снабжаются сверхскоростными УВХ, имеющими время выборки порядка 0,1нс.

U_x	$U_x < 1B$	$1B < U_x < 2B$	$2B < U_x < 3B$	$3B < U_x < 4B$
a_0	0	0	1	1
a_1	0	1	0	1

13.1.3. АЦП последовательного счёта



Этот преобразователь является типичным примером последовательных АЦП с единичными приближениями и состоит из компаратора, счетчика и ЦАП (рис. 8). 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 $U_{ос}$. Процесс преобразования продолжается до тех пор, пока напряжение обратной связи не сравняется 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

$$N_2 = a_{r-1} * a_{r-2} \dots a_0$$

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

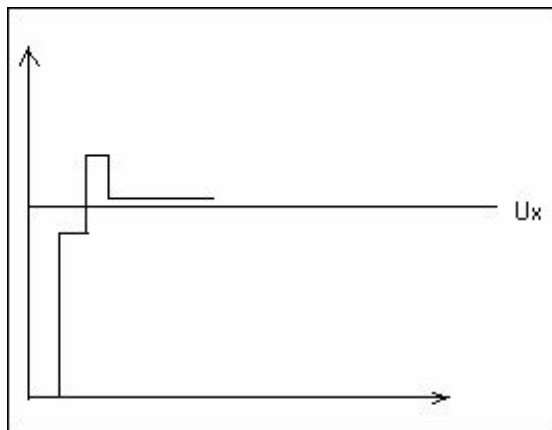
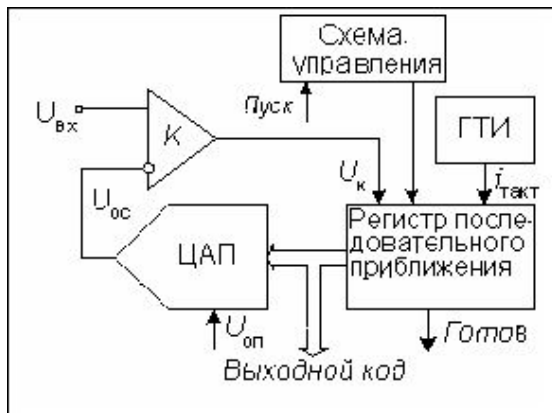
$$N_{10} = a_{r-1} 2^{r-1} + a_{r-2} 2^{r-2} + \dots + a_0 2^0$$

Время преобразования АЦП этого типа является переменным и определяется входным напряжением. Максимальное время преобразования соответствует максимальному входному напряжению и при разрядности двоичного счетчика R и частоте тактовых импульсов $f_{такт}$ равно

$$t_{пр.макс} = (2R-1)T = (2R-1) / f_{такт}$$

Например, при $N=10$ и $f_{такт}=1$ МГц $t_{пр.макс}=1024$ мкс, что обеспечивает максимальную частоту выборок порядка 1 кГц, T - период импульсов генератора.

13.1.4. АЦП последовательного приближения.



Преобразователь этого типа, называемый в литературе также АЦП с *поразрядным уравниванием*, является наиболее распространенным вариантом последовательных АЦП. Они применяются часто, т.к. обладают высокой точностью и малым временем преобразования.

В основе работы этого класса преобразователей лежит принцип *дихотомии*, т.е. последовательного сравнения измеряемой величины с $1/2$, $1/4$, $1/8$ и т.д. от возможного максимального значения ее. Это позволяет для R -разрядного АЦП последовательного приближения выполнить весь процесс преобразования за R последовательных шагов (итераций) вместо $2R-1$ при использовании последовательного счета и получить существенный выигрыш $\sim R \cdot \Delta t$ в быстродействии. Время преобразования составляет

Основу схемы составляет регистр поразрядно уравниваемый приближения, который работает по принципу дихотомия, т.е. разделяет диапазон преобразования на части $1/2, 1/4, 1/8 \dots$

13.2. Цифро-аналоговые преобразователи.

Служат для преобразования сигнала, представленного двоичным кодом ($a_{R-1}a_{R-2} \dots a_0$), в аналоговое выходное напряжение U .

Уравнение преобразования идеального однополярного ЦАП

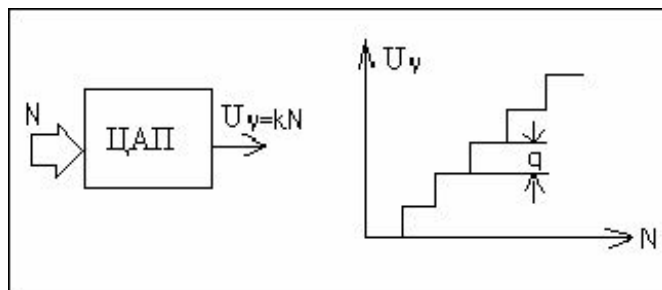
$$U = \frac{U_{\max}}{2^R - 1} N_{10} = \frac{U_{\max}}{2^R - 1} (a_{R-1}2^{R-1} + a_{R-2}2^{R-2} + \dots + a_02^0)$$

где: N_{10} – значение входного кода в десятичной системе счисления; a_i – коэффициенты двоичной системы счисления; R – число разрядов двоичного кода; U_{\max} – максимальное выходное напряжение ЦАП.

Из уравнения преобразования следует, что минимальное приращение на выходе ЦАП составляет

$$q = \frac{U_{\max}}{2^R - 1} \text{ – вес единицы}$$

младшего разряда ЦАП.



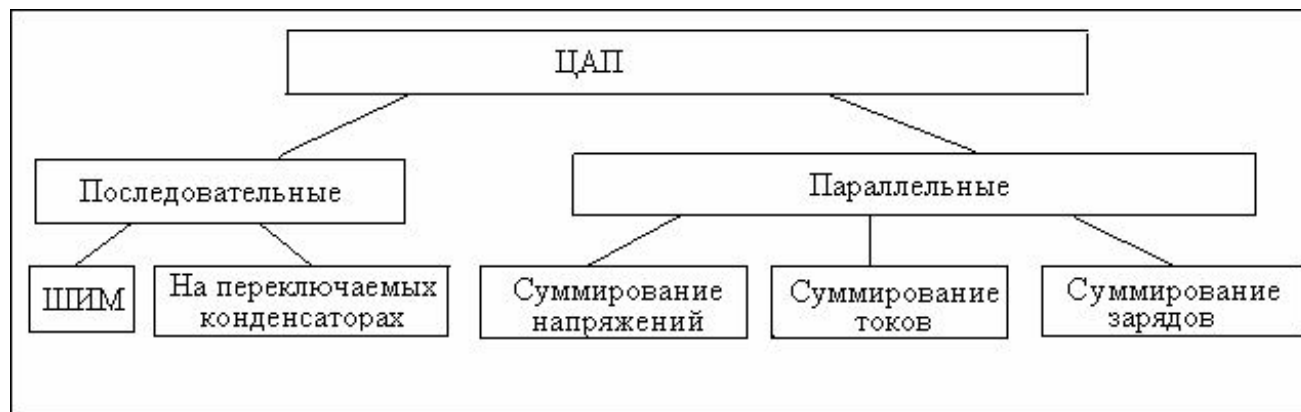
13.2.1. Основные параметры и характеристики ЦАП

Все параметры ЦАП можно разделить на две группы: статические и динамические. К статическим параметрам ЦАП относят: разрешающая способность (это число разрядов, число уровней квантования, величина обратная числу уровней квантования, вес младшего разряда); погрешность преобразования; диапазон значений выходного сигнала; характеристики управляющего кода; смещение нулевого уровня. К динамическим показателям относят: время установления выходного сигнала; предельную частоту преобразования; динамическую погрешность.

По совокупности параметров ЦАП принято делить на три группы: общего применения; быстродействующие (время установления $< 100\text{нс}$); прецизионные нелинейность $< 0.1\%$.

Классификация ЦАП по принципу работы приведена на рис. .

Наибольшее распространение получили ЦАП параллельного типа с суммированием токов, т.к. они обладают наилучшим быстродействием преобразования.



13.2.2. Цифро-аналоговые преобразователи с суммированием взвешенных токов

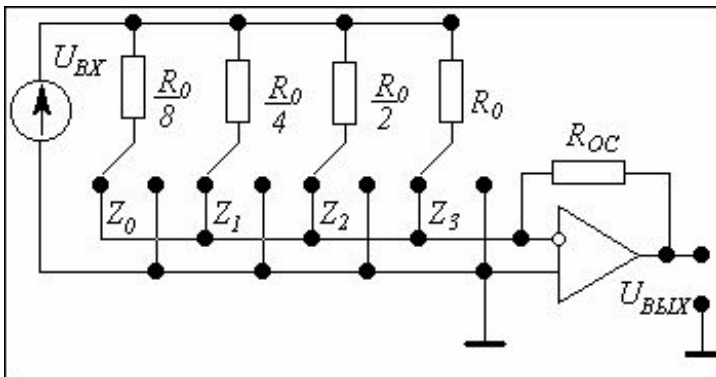
Состояние кода числа определяется состоянием ключей Z_0, Z_1, Z_2, Z_3 . Если ключ находится в левом положении, то это состояние соответствует 1, а если в правом – 0.

$U_{ВЫХ} = -I_{ВХ} R_{ОС} = -\frac{U_{ОП}}{2^R} \sum_{i=1}^{R-1} a_i 2^i$, где a_i - значение разрядов двоичного числа (определяется состоянием ключей).

ЦАП состоит из матрицы двоично-взвешенных резисторов. Двоичный код входного числа задаётся состоянием ключей $S=0$ или 1.

Ток i -го разряда $I_i = a_i * \frac{U_{оп}}{R_i} = a_n * \frac{U_{оп}}{R * 2^{i-1}}$

Суммарный ток $I_{\Sigma} = I_0 + I_1 + \dots + I_{n-1} = \frac{U_{оп}}{R_0 * 2^{n-1}} (a_0 * 2^{n-1} + a_1 * 2^{n-1} + \dots + a_{n-1} * 2^0)$



13.2.3. Цифро-аналоговые преобразователи с резистивной матрицей $R-2R$

Большинство ЦАП строятся с использованием резистивной матрицы $R-2R$. Электрическая схема резистивной матрицы приведена на рис. 3.

На входе цепочки подключается источник опорного напряжения E_0 . Несложный анализ схемы показывает, что напряжения в узлах цепочки a, b, \dots, m отличаются друг от друга в два раза. Например, напряжение в точке a равно $E_0/2$ так как сопротивление всех элементов цепочки, включенных между этим узлом и корпусом, равно R . Учитывая, что сопротивление между узлом a и клеммой опорного источника тоже равно R , получим резистивный делитель напряжения в два раза.

Аналогично доказывается, что напряжение в точке b равно $E_0/4$ и т. д. Чем дальше от источника расположены узлы в цепочке, тем меньше напряжение на них.

Электрическая схема ЦАП, содержащая цепочку $R-2R$, приведена на рис. 4. Входное двоичное слово, имеющее p разрядов, управляет работой электронных ключей $K_i, i = 0, 1, 2, \dots, p - 1$, схемы. Если в i -м разряде входного слова установлена логическая единица, то $K_i = 1$ и соответствующее напряжение с цепочки $R-2R$ с помощью электронного ключа подается на вход ОУ. Так как величина коэффициента усиления ОУ определяется отношением сопротивлений резисторов, включенных в цепи обратной

связи и на входе схемы, а эти сопротивления одинаковы, то коэффициент передачи инвертирующего усилителя относительно напряжений в точках a, b, \dots, m равен 1. Следовательно, с помощью операционного усилителя осуществляется суммирование тех напряжений в узлах цепочки $R-2R$, которые подключены к ОУ через электронные ключи. Учитывая, что наименьшее напряжение в точке m цепочки $R-2R$ соответствует шагу квантования сигнала, напряжение на выходе ЦАП записываем в виде:

$y(kT_D) = s_1(kT_D) + s_2(kT_D) + \dots + s_n(kT_D)$, где коэффициенты электронных ключей $K_i \in \{0, 1\}$, а Δ — шаг квантования, равный $E_0/2^n$

