

Блок 10.1. Общие сведения

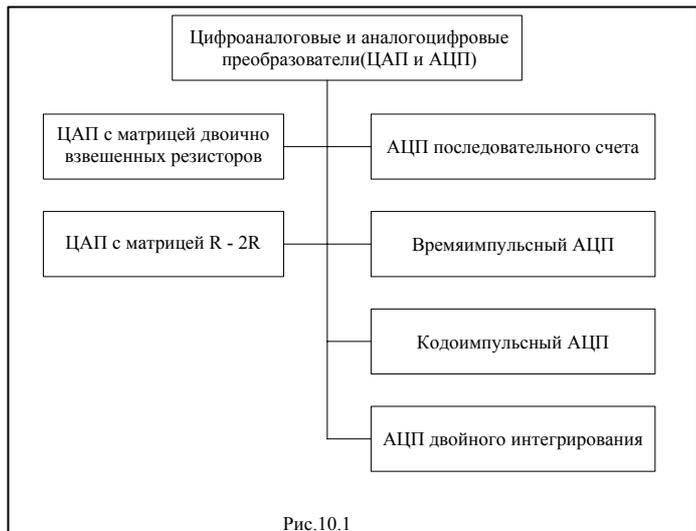


Рис.10.1

Напряжение на выходе цифроаналогового преобразователя (ЦАП) пропорционально весу установленного на входах кода.

Вес кода на выходах аналогоцифрового преобразователя (АЦП) пропорционален входному напряжению.

ЦАП и АЦП являются “перекидными мостами” между аналоговым и цифровым блоками устройства. Так, например, при регулировании температуры напряжение с выхода аналогового термодатчика подается на АЦП, и код с его выходов заносится в микропроцессор. Последний сравнивает его с двумя предварительно занесенными в память кодами, один из которых соответствует нижнему, а другой – верхнему допустимому пределу температуры. Если “температурный” код не находится внутри дозволённого диапазона, микропроцессор выставляет на входы ЦАП регулировочный код, и напряжение с выхода ЦАП приводит в действие серводвигатель, который через систему охлаждения / нагрева возвращает температуру в заданные пределы.

Эта же система используется для измерения температуры, для чего код с выходов АЦП преобразуется в код семисегментного индикатора, который высвечивается в привычной десятичной системе счисления.

Подробнее об этом мы расскажем в третьей части учебника.

Основными параметрами рассматриваемых преобразователей являются точность, разрешающая способность и быстродействие.

Изучив материал этой темы, студент сможет правильно осуществить выбор АЦП и ЦАП, ориентируясь на соответствие параметров преобразователя и требований разрабатываемого устройства.

Блок 10.2. Цифроаналоговые преобразователи

Цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) предназначен для преобразования цифрового сигнала в аналоговый. Иногда его называют преобразователем код-аналог.

Напряжение на выходе ЦАП будет наибольшим ($U_{\text{вых}}=U_{\text{макс}}$), когда во всех разрядах входного кода – логические единицы, т.е. когда его вес Q максимальный. Величина $Q_{\text{макс}}=2^n-1$, где n – разрядность кода. Так, при $n=4$ $Q_{\text{макс}}=15$ (код $N=1111_2$). Считая зависимость $U_{\text{вых}}$ от Q линейной, можно записать приращение выходного напряжения на каждую единицу входного кода (от приращения кода на единицу в младшем разряде) $\Delta u=U_{\text{макс}}/2^n-1$.

Величину Δu называют квантом. Если, к примеру, $n=3$, то квант $\Delta u=U_{\text{макс}}/7$.

По существу, диапазон выходного напряжения $U_{\text{макс}}$ разбивается входным кодом на ряд одинаковых интервалов, каждый из которых равен кванту Δu . Их границами являются квантованные уровни ($\Delta u, 2\Delta u, 3\Delta u$ и т.д.), о которых говорилось в блоке 1.2. уровни квантования.

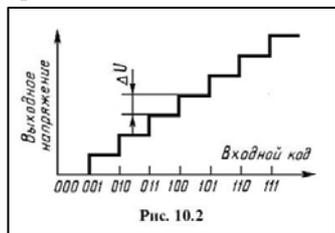


Рис. 10.2

Выходное напряжение “набирается” из квантов так же, как вес тела “набирается” из весовых единиц (например, граммов). Так как квант – наименьшая составляющая выходного напряжения, то последнее может быть равно только целому числу квантов. За счет этого погрешность преобразования код-аналог нельзя гарантировать меньшей кванта Δu .

Структура ЦАП обеспечивает передачу на выход столько квантов, каков вес входного кода. Если во всех разрядах кода присутствуют лог. 0, то $U_{\text{вых}}=0$. При наличии лог.1 только в первом (младшем) разряде на выход ЦАП выводится один квант – $U_{\text{вых}}=\Delta u$. Это – минимальное приращение выходного напряжения ЦАП, вызванное увеличением входного кода на единицу в младшем разряде. При наличии лог.1 только во втором разряде на выход передается 2 кванта, при наличии лог. 1 только в третьем разряде – 4 кванта и т.д.

Напряжение на выходе ЦАП при наличии логических единиц в нескольких разрядах входного кода является суммой напряжений, каждое из которых обусловлено единицей в соответствующем разряде.

Величины этих составляющих относятся как веса единиц в разрядах. Так, к примеру, если на входе присутствует код 1011001, то напряжение на выходе ЦАП равно

$$1(64\Delta u) + 0(32\Delta u) + 1(16\Delta u) + 1(8\Delta u) + 0(4\Delta u) + 0(2\Delta u) + 1\Delta u = 89\Delta u.$$

Мгновенное напряжение на выходе ЦАП пропорционально весу присутствующего на входах кода, т.е. его десятичному эквиваленту. Сменяющиеся входные коды обуславливают изменяющееся напряжение на выходе ЦАП.

На рис. 10.2 изображена зависимость выходного напряжения ЦАП от величины кода на входе.

10.2.1. ЦАП с двоично взвешенными резисторами

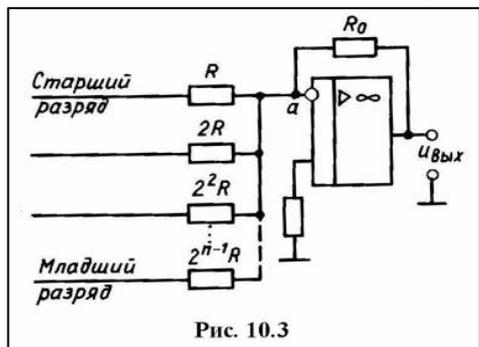


Рис. 10.3

Указанное преобразование можно осуществить, если использовать двоично взвешенные резисторы ($2^0R, 2^1R, 2^2R, \dots, 2^{n-1}R$); их сопротивления соотносятся как веса единиц в разрядах двоичного кода.

На рис. 10.3 изображена схема инвертирующего сумматора на операционном усилителе с такими резисторами. На подходящих к резисторам линиях имеются электрические потенциалы, соответствующие цифрам в разрядах кода, причем цифре 0 соответствует 0 В, а цифре 1 – потенциал U^1 . Снизить потенциал U^0 логического 0 до нулевого значения можно, установив перед резисторами матрицы диоды в пропускном направлении с напряжением отпирапия, большим U^0 .

К резистору R подходит линия старшего разряда, а к резистору $2^{n-1}R$ – линия младшего разряда. При наличии 1 в старшем разряде кода ток через резистор R (точка а – “кажущаяся земля”, ее потенциал весьма близок к нулю) равен U^1/R , при наличии 1 в следующем разряде ток через резистор $2R$ равен $U^1/(2R)$ и т.д., при на-

личии 1 в младшем разряде ток через резистор $2^{n-1}R$ равен $U^1/(2^{n-1}R)$.

Токи, обусловленные единицами в разрядах кода, суммируются на резисторе R_0 и создают напряжение, равное в общем случае

$$U_{\text{вых}} = \frac{U^1 R_0}{R} \left(a_{n-1} 1 + a_{n-2} \frac{1}{2} + a_{n-3} \frac{1}{2^2} + \dots + a_0 \frac{1}{2^{n-1}} \right),$$

где $a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_0$ – цифры (1 или 0) в разрядах кода. Это выражение можно представить иначе:

$$U_{\text{вых}} = \frac{U^1 R_0}{R} 2^{-(n-1)} (a_{n-1} 2^{n-1} + a_{n-2} 2^{n-2} + \dots + a_1 2^1 + a_0) = \frac{2U^1 R_0}{2^n R} N,$$

где N – записанная в скобках сумма – вес кода на входе.

Таким образом, напряжение на выходе ЦАП (рис.10.3) пропорционально весу действующего на входе кода.

Достоинством рассмотренного ЦАП является простая и недорогая структура, а недостатком – необходимость тщательного отбора резисторов разных номиналов, с тем чтобы их сопротивления находились в должном соответствии, а также невозможность практически выдержать это соответствие в диапазоне температур.

10.2.2. ЦАП с резисторной матрицей R-2R, суммирующей токи

Матрица такого ЦАП содержит резисторы только двух номиналов (рис.10.4,а), что делает ее выполнение много проще и точнее.

На каждый ключ (Кл) действует разряд входного кода $a_{n-1}, a_{n-2}, \dots, a_0$. Когда в разряде присутствует 0, ток через ключ замыкается на “землю”. Если в разряде присутствует 1, то ток проходит к инвертирующему входу операционного усилителя (ОУ). В силу этого правые по схеме выводы резисторов $2R$ имеют нулевой потенциал: через ключи они подключены к “земле” или к инвертирующему входу ОУ, потенциал которого близок к нулю ($U_0 \approx 0$). Поэтому резистивную матрицу можно представить схемой, изображенной на рис.10.4, б.

Рассматривая ее сверху вниз, легко заметить, что эквивалентное сопротивление элементов, расположенных выше каждой пары узлов $1-1', 2-2', \dots, n-n'$, равно $2R$. Поэтому в каждом узле притекающий к нему ток делится пополам, и токи по ветвям распределяются так, как показано на рис.10.4,б, т. е. они соотносятся как веса разрядов двоичного кода.

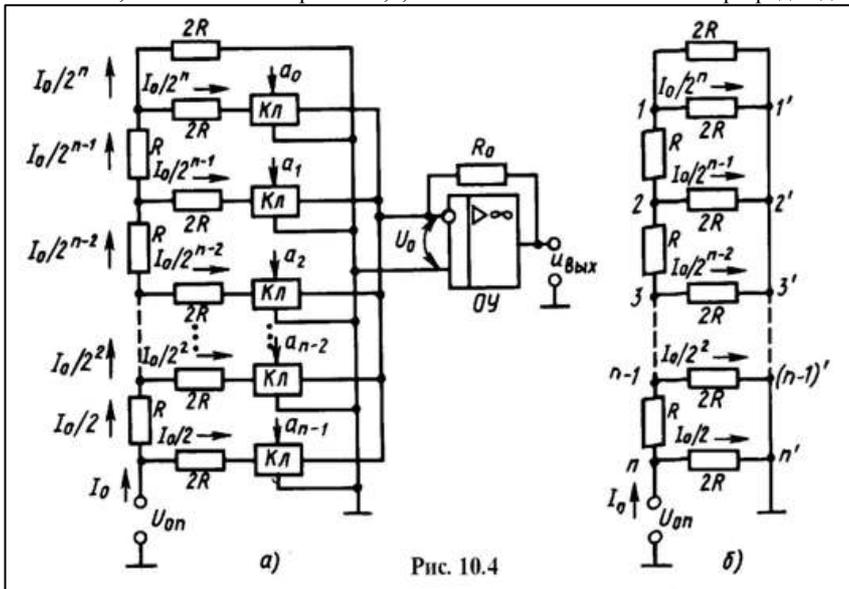


Рис. 10.4

Если в разрядах кода присутствуют 1, то ключи коммутируют токи соответствующих ветвей к неинвертирующему входу ОУ, где они складываются, и на резисторе R_0 (на выходе ЦАП) создают напряжение, эквивалентное весу действующего на входе кода. Заметим, что операционный усилитель в данном случае осуществляет преобразование тока в напряжение.

Из схемы рис.10.4,а следует, что полное сопротивление между источником опорного напряжения $U_{оп}$ и инвертирующим входом ОУ (точкой, имеющей нулевой потенциал) равно R и не зависит от числа единиц в разрядах кода. Отсюда следует, что ток на входе матрицы $I_0 = U_{оп}/R$, а коэффициент усиления ОУ $K = R_0/R$.

Так как в каждом узле ток делится пополам, то через ключ, на который воздействует младший разряд кода, проходит ток (рис.10.4 б) $I_1 = I_0/2^n = U_{оп}/(R2^n)$, где n – число разрядов преобразователя. Его вклад в выходное напряжение ЦАП, т. е. напряжение от единицы в младшем разряде кода

$$\Delta U = (U_{оп}/R \cdot 2^{-n}) R_0 = U_{оп} K / 2^n$$

а полное напряжение на выходе ЦАП

$$U_{\text{вых}} = \Delta U (a_{n-1} 2^{n-1} + a_{n-2} 2^{n-2} + \dots + a_1 2^1 + a_0) = U_{оп} K N / 2^n, \quad (10.1)$$

где $a_{n-1} 2^{n-1} + a_{n-2} 2^{n-2} + \dots + a_1 2^1 + a_0 = N$ – вес входного кода в десятичном счислении.

Если во всех разрядах кода единицы, то $N = 2^n - 1$. При этом выходное напряжение

$$U_{\text{вых max}} = U_{оп} K (2^n - 1) / 2^n = U_{оп} K (1 - 2^{-n}) \approx U_{оп} K.$$

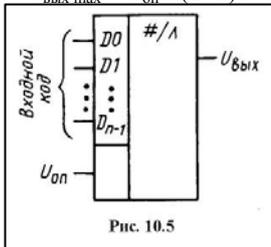


Рис. 10.5

Условное изображение цифроаналогового преобразователя с основными выводами приведено на рис.10.5.

Из выражения (10.1) следует, что выходное напряжение цифроаналогового преобразователя (рис.10.4,а) пропорционально произведению $U_{оп} N$. Если источник $U_{оп}$ является внешним, то ЦАП можно использовать в перемножающих устройствах, где один сомножитель – значение опорного напряжения $U_{оп}$, другой – устанавливаемый на входе код N , а произведение – выходное напряжение ЦАП. Такие ЦАП называют перемножающими.

По сравнению с ЦАП с матрицей двоично взвешенных резисторов рассмотренный ЦАП обладает большей точностью: выдержать соотношение резисторов только двух номиналов (R и $2R$) значительно проще, чем n номиналов в сравниваемом преобразователе. Вместе с этим за счет наличия прецизионных аналоговых ключей он существенно дороже и структура его сложнее.

Вопросы для самоконтроля.

Введите в компьютер значение напряжения (в вольтах) на выходе 8-разрядного ЦАП с матрицей R-2R и опорным напряжением $U_{оп} = 10,24В$, если вес входного кода равен 64.

Введите в компьютер наименьшее приращение выходного напряжения (в милливольтгах), различаемое 10-разрядным ЦАП с матрицей R-2R, опорное напряжение которого $U_{оп} = 10,24 В$

Блок 10.3. Аналогоцифровые преобразователи

Аналогоцифровой преобразователь (АЦП) преобразует аналоговый сигнал в цифровой. Далее описываются некоторые типы АЦП.

10.3.1. АЦП последовательного счета

Принцип такого преобразователя сводится к следующему. Счетные импульсы заполняют счетчик, на выходе которого формируется код с нарастающим весом. Этот код поступает на ЦАП, напряжение на выходе которого увеличивается. Когда оно чуть превысит напряжение, присутствующее в данный момент на входе, доступ импульсов к счетчику прекращается. Код, установившийся при этом на выходах счетчика, является цифровым эквивалентом напряжения на выходе ЦАП, а следовательно, и напряжения выборки входного напряжения $U_{вх}$.

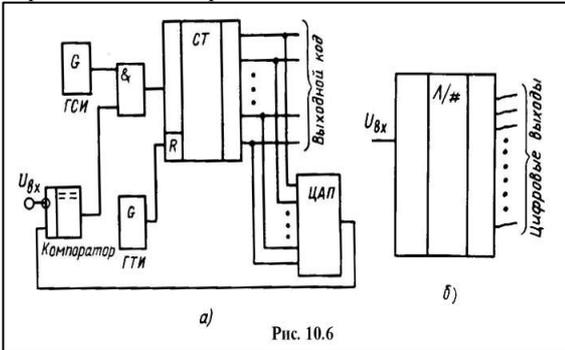


Рис. 10.6

Схема, реализующая описанный принцип АЦП последовательного счета, изображена на рис. 10.6,а.

Преобразование начинается с обнуления счетчика импульсом генератора тактовых импульсов (ГТИ). Период следования этих импульсов является периодом дискретизации входного аналогового напряжения. После обнуления счетчика напряжение на выходе ЦАП становится равным нулю – на выходе компаратора логическая 1, обеспечивающая поступление импульсов от генератора счетных импульсов (ГСИ) через элемент И на счетчик. Когда напряжение на выходе ЦАП станет практически равным $U_{вх}$, компаратор переключится и логическим нулем на выходе разъединит ГСИ и счетчик. Таким образом, в промежуток времени с момента окончания импульса ГСИ, обнулившего счетчик, до завершения преобразования осуществляется оцифровка выборки входного напряжения.

Заметим, что с поступлением на счетчик каждого импульса (с увеличением выходного кода на единицу) напряжение на выходе ЦАП увеличивается на квант, так что $U_{вых.ц.ап}$ содержит целое число квантов, которым оно уравнивает $U_{вх}$. Поэтому нельзя гарантировать, что такое уравнивание может иметь ошибку, меньшую одного кванта, что соответствует ошибке на единицу в младшем разряде выходного кода.

Условное изображение АЦП приведено на рис. 10.6,б, где для общности показаны только входной и выходные выводы.

10.3.2. Времяимпульсный АЦП

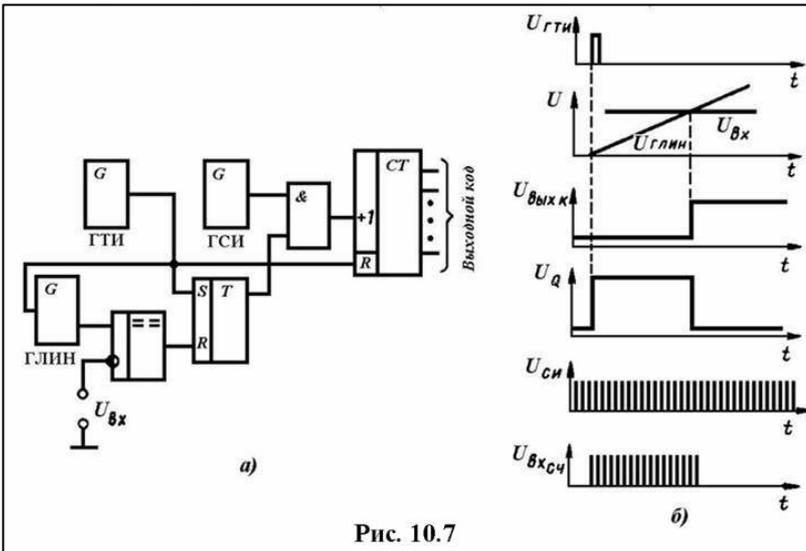


Рис. 10.7

Времяимпульсный метод преобразования заключается в том, что входному напряжению $U_{вх}$ ставится в соответствие временной интервал, длительность которого пропорциональна $U_{вх}$. Этот интервал заполняется импульсами стабильной частоты. Число их и представляет цифровой эквивалент преобразуемого напряжения. Схема, реализующая указанный принцип, изображена на рис. 10.7, а. Импульс с выхода генератора тактовых импульсов – ГТИ (импульсов дискретизации) обнуляет счетчик, запускает генератор линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН) и переключает триггер в состояние $Q=1$. Сигналом $Q=1$ генератор счетных импульсов (ГСИ) через элемент И подключается к счетчику. Когда нарастающее напряжение ГЛИН станет равным выборке преобразуемого напряжения $U_{вх}$, на выходе компаратора появится логическая 1, которая переключит триггер в состояние $Q=0$ и прервет связь ГСИ со счетчиком. Код, установившийся на выходе счетчика, – цифровой эквивалент выборки $U_{вх}$. Следующая выборка даст свой код на выходах счетчика.

Чтобы обеспечить линейность нарастания напряжения, заряд конденсатора в генераторах ЛИН осуществляется током неизменной величины, что обеспечивается специальными схемами стабилизации.

Временные диаграммы на рис. 10.7, б иллюстрируют описанные процессы. На выходе триггера формируются «временные ворота». Начало их соответствует тактовому импульсу с ГТИ, а конец – появлению 1 на выходе компаратора, когда наступает равенство напряжений ГЛИН и выборки. Таким образом, длительность «временных ворот» пропорциональна текущему значению входного напряжения. «Временные ворота» заполняются счетными импульсами стабильной частоты, поэтому их число пропорционально значению текущей выборки $U_{вх}$.

Только в частном случае во «временные ворота» может точно уложиться целое число периодов $T_{сч}$ счетных импульсов. Может оказаться,

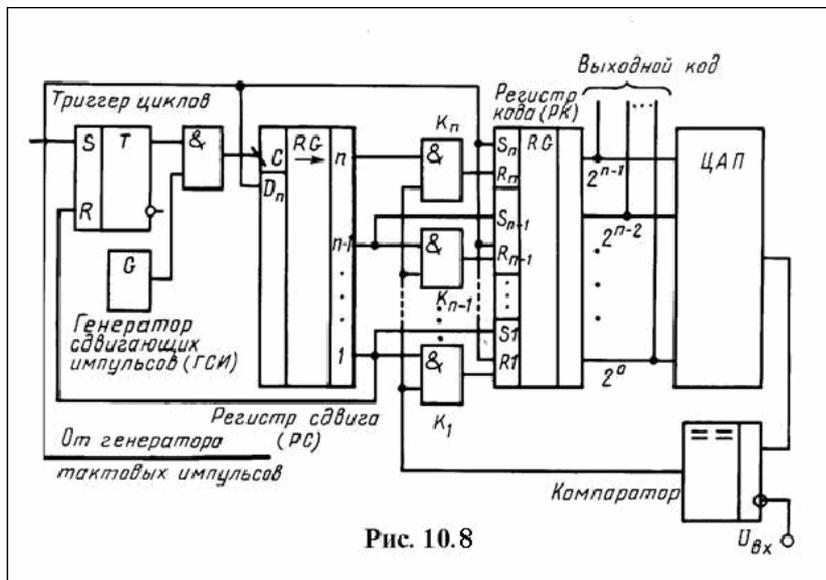


Рис. 10.8

что между последним вошедшим в ворота импульсом и границей ворот будет интервал, почти равный $T_{сч}$, т.е. следующий импульс генератора будет чуть правее конечной границы ворот (см. временные диаграммы на рис 10.7), и не поступит на счетчик. Поэтому нужно считаться с тем, что выходной код времяимпульсного преобразователя может иметь погрешность в одну единицу (единицу в младшем разряде).

10.3.3. Кодоимпульсный АЦП

В описанных АЦП цифры (0 или 1) в разрядах выходного кода могут в процессе преобразования многократно изменяться, так как устанавливаются в ходе постепенного накопления числа в счетчике.

При рассматриваемом преобразовании формируемый код последовательно приближается к своему полному выражению: вначале определяется цифра в старшем n-ом разряде, затем в (n-1)-ом и т.д. до младшего разряда.

Такая возможность формирования основана на свойствах натурального двоичного кода: веса единиц в соседних разрядах отличаются вдвое; единица в старшем разряде имеет вес, больший половины веса всего кода; единица в соседнем разряде имеет вес, больший четверти веса всего кода, и т. д. Например, вес кода 1111_2 равен 15; вес единицы в четвертом разряде равен 8, что больше $0,5 \cdot 15$; вес единицы в третьем разряде равен 4, что больше $0,25 \cdot 15$, и т.д. Поэтому для определения цифры в старшем разряде формируемого кода надо сравнить $U_{вх}$ с $0,5U_m$ – половиной максимального для данного АЦП значения $U_{вх}$. Если окажется, что $U_{вх} < 0,5U_m$, то в старшем разряде кода – цифра 0, и дальнейшее сравнение $U_{вх}$ надо производить с $0,25U_m$. Если же $U_{вх} > 0,5U_m$, то в старшем разряде кода цифра 1; при этом последующее сравнение следует производить с $(1/2+1/4)U_m$ и т.д.

На рис. 10.8 изображена схема устройства, реализующая изложенный принцип. Код, соответствующий выборке входного аналогового сигнала, формируется на выходах регистра кода РК. В каждый разряд этого регистра, начиная со старшего разряда, по входу S последовательно записывается логическая 1 с соответствующего выхода сдвигового регистра РС. Одновременно она поступает на верхний (по схеме) вход конъюнктора К, принадлежащий данному разряду РК. Каждая записанная 1 “испытывается” на соответствие выборке входного сигнала. Для этого код с выходов РК в процессе формирования преобразуется цифроаналоговым преобразователем в напряжение ($U_{ЦАП}$), которое сравнивается на аналоговом компараторе с выборкой преобразуемого напряжения $U_{вх}$. Если $U_{вх} > U_{ЦАП}$, то на выходе компаратора присутствует логический 0, и после конъюнкторов $K_n \dots K_1$ на входах R регистра РК – логические нули, которыми разряды РК не сбрасываются: в проверяемом разряде остается записанной 1. Если $U_{вх} < U_{ЦАП}$, то на выходе компаратора логическая 1 – на обоих входах компаратора проверяемого разряда логические единицы, которыми этот разряд сбрасывается в нуль, остальные разряды кода сохраняются.

Логическая 1 на выходах РС появляется поочередно: на выходе n – с приходом тактового импульса (импульса дискретизации входного аналогового сигнала) на вход Dn, на выходах n-1, n-2, ... – в момент окончания сдвигающего импульса на динамическом входе С.

Очередной цикл преобразования выборки входного сигнала начинается с поступлением тактового импульса; кроме записи 1 в старший n-ый разряд РК он обнуляет все его остальные разряды (по второму входу R), записывает 1 по входу Dn в n-й разряд РС, а также переключает триггер циклов в состояние 1, после чего сдвигающие импульсы начинают поступать на С-вход РС. В конце цикла (после сформирования выходного кода) логической 1 с выхода первого разряда РС триггер цикла переключается в 0 и цепь связи ГСИ–РС прерывается. С поступлением следующего тактового импульса начинается цикл преобразования следующей выборки входного сигнала.

Заметим, что в соответствии с методом преобразования рассмотренный АЦП называют преобразователем поразрядного кодирования.

Пример 10.1.

Определим код на выходе рассмотренного АЦП при следующих данных: $U_{вх} = 8,5$ В, разрядность АЦП $n = 10$, опорное напряжение АЦП $U_{оп} = 10,24$ В.

Напряжение $U_{оп}$ делится квантованными уровнями на $2^n - 1$ квантов, величина каждого из которых $\Delta U = U_{оп} / 2^n - 1$.

В данном случае $\Delta U = 10,24 / 1024 - 1 \approx 10,24 / 1024 = 10$ мВ.

Такое приращение $\Delta U_{цап}$ выходное напряжение цифроаналогового преобразователя (в структуре АЦП) получает от приращения входного кода на единицу (от единицы в младшем разряде кода). Приращение напряжения $U_{цап}$ от единицы в k-ом разряде равно величине кванта (в данном случае 10 мВ), умноженной на вес единицы в этом разряде.

Ниже приведены вес единицы в разрядах 10-разрядного кода и напряжение, которое она добавляет к $U_{цап}$.

# разряда	Вес единицы	$\Delta U_{цап}, В$
10	512	5,12
9	256	2,56
8	128	1,28
7	64	0,64
6	32	0,32
5	16	0,16
4	8	0,08
3	4	0,04
2	2	0,02
1	1	0,01

В соответствии с алгоритмом работы кодоимпульсного АЦП проведем сравнение $U_{вх}$ с значениями $\Delta U_{цап}$, компенсирующими напряжение $U_{вх}$. Если $U_{вх} > U_{цап}$, то против соответствующего неравенства будет проставлена единица.

$8,5 > 5,12$	1
$8,5 > 5,12 + 2,56 = 7,68$	1
$8,5 < 7,68 + 1,28 = 8,96$	0
$8,5 > 7,68 + 0,64 = 8,32$	1
$8,5 < 8,32 + 0,32 = 8,64$	0
$8,5 > 8,32 + 0,16 = 8,48$	1
$8,5 < 8,48 + 0,08 = 8,56$	0
$8,5 < 8,48 + 0,04 = 8,52$	0
$8,5 = 8,48 + 0,02 = 8,50$	1

Таким образом, код на выходах АЦП $N=1101010010_2=850_{10}$. Учитывая, что каждая единица кода соответствует кванту в 10 мВ, фиксируем входное напряжение равным 8,5 В.

10.3.4. АЦП двойного интегрирования

В таких АЦП процесс преобразования имеет две стадии. На первой из них в течение фиксированного временного интервала T_1 интегрируется входное напряжение $U_{вх}$. Чем оно больше, тем большего значения достигает напряжение на конденсаторе C интегратора за время T_1 .

При этом конденсатор заряжается через регистр R_1 неизменным током $I_3=U_{вх} / R_1$, получая заряд

$$Q_3=U_{вх} T_1 / R_1.$$

На второй стадии на интегратор подается образцовое напряжение U_0 с полярностью, обратной полярности $U_{вх}$, и конденсатор интегратора через резистор R_2 разряжается неизменным током $I_p=U_0/R_2$.

Как только напряжение на интеграторе достигает нулевого значения, элементы схемы прекращают вторую стадию – преобразование закончено.

В течение второй стадии конденсатор интегратора теряет заряд

$$Q_p=U_0 T_2 / R_2,$$

где T_2 – продолжительность второй стадии, за которую конденсатор разряжается до нуля.

Так как на первой стадии конденсатор заряжался от нуля до некоторого значения, пропорционального $U_{вх}$, а во второй стадии от этого значения разряжался до нуля, то приобретенный и потерянный заряды равны:

$$U_{вх} T_1 / R_1=U_0 T_2 / R_2, U_{вх}=U_0 T_2 R_1 / T_1 R_2$$

Таким образом, входное преобразуемое напряжение $U_{вх}$ пропорционально длительности второй стадии.

Фиксированный интервал T_1 задается с помощью счетчика, который из обнуленного состояния к началу первой стадии заполняется импульсами тактового генератора с периодом T_T , и в момент его переполнения (обнуления) эта стадия заканчивается, т. е.

$$T_1= T_T N_{max},$$

где N_{max} – максимальное число, которое может вместить счетчик.

В интервале T_2 на этот счетчик поступают импульсы того же генератора до тех пор, пока напряжение на выходе интегратора не станет равным нулю. Поэтому при N импульсах, поступивших на счетчик во второй стадии,

$$T_2=NT_T \text{ и } U_{вх}=U_0 T_2 R_1 / T_1 R_2=U_0 N T_T R_1 / T_1 N_{max} R_2=U_0 N R_1 / N_{max} R_2.$$

Так как U_0 , R_1 , R_2 и N_{max} являются постоянными параметрами схемы, то входное преобразуемое напряжение выражается числом импульсов N , поступивших на счетчик во второй стадии.

Если длительность T_1 первой стадии выбрать кратной периоду напряжения питающей сети, то результат его интегрирования будет равен нулю, т.е. сетевая помеха будет отсутствовать.

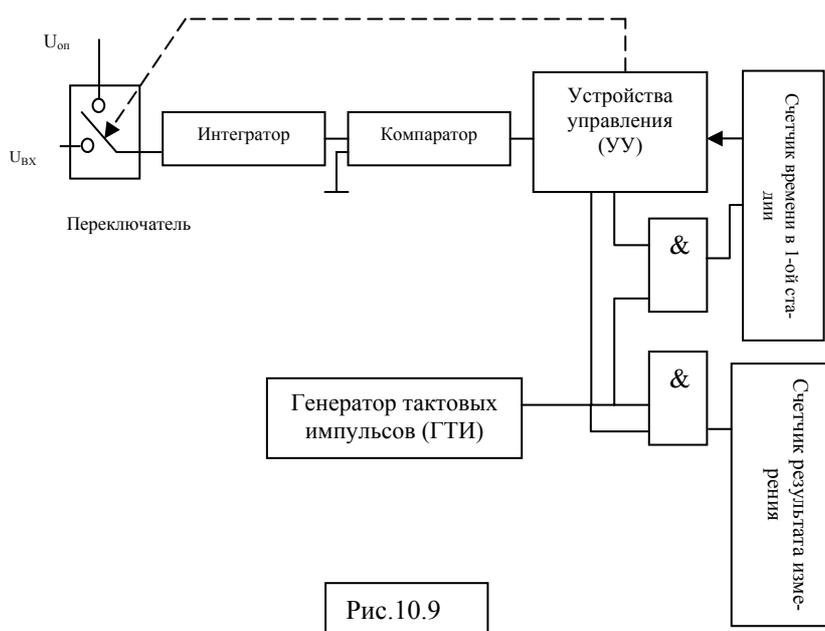


Рис.10.9

Структурная схема АЦП двойного интегрирования приведена на рис. 10.9. На первой стадии (продолжительностью T_1) устройством управления (УУ), воздействуя на переключатель, подключает к интегратору входное напряжение и открывает доступ импульсов тактового генератора (ГТИ) к счетчику времени первой стадии. Когда в этот счетчик будет занесено число, соответствующее времени T_1 , он даст сигнал на устройство управления, которое подключит к интегратору образцовое напряжение U_0 , и даст разрешение на подключение ГТИ к счетчику результата измерения. После этого конденсатор интегратора будет разряжаться, и когда напряжение на его выходе окажется практически равным нулю, УУ разъединит ГТИ и счетчик результата измерения. Занесенное в него число будет пропорционально входному напряжению.

Нестабильность частоты тактового генератора (если только частота не меняется во время преобразования) не влияет на точность: в выражении $U_{вх}$ период T_T не входит. Вместе с этим АЦП двойного интегрирования не отличается высоким быстродействием, что связано с наличием вре-

менных стадий T_1 и T_2 , в течение которых осуществляется интегрирование.

Блок 10.4. Параметры АЦП и ЦАП

К основным параметрам АЦП и ЦАП следует отнести максимальное напряжение U_{max} (входное для АЦП и выходное для ЦАП), число разрядов кода n , разрешающую способность и погрешность преобразования.

Разрешающая способность. Под разрешающей способностью (РС) понимают наименьшее значение входной величины, различаемое устройством, т.е. в той или иной форме фиксируемое им на выходе. Численно РС оценивают различным приращением выходной величины от наименьшего возможного приращения входной величины.

Разрешающая способность для ЦАП – приращение выходного напряжения от приращения входного кода на единицу в младшем разряде. Это – наименьшее приращение (квант- Δu), какое может получить напряжение на выходе цифроаналогового преобразователя. Выше было показано, что его величина

$$\Delta u=U_{оп} / 2^{n-1}, (9.2)$$

где 2^{n-1} – максимальный вес входного кода, n – разрядность ЦАП.

Так, при $U_{оп}=10,24$ В, $n=12$ $\Delta u=10,24 / (2^{12}-1) \approx 2,5$ мВ.

Чем больше n , тем меньше Δu и тем точнее выходное напряжение представляет входной код.

Относительное значение разрешающей способности

$$\delta=\Delta u / U_{оп}=1 / 2^{n-1} (9.3)$$

Тот же параметр АЦП определяется приведенными выражениями (9.2), (9.3) и представляет собой приращение входного напряжения, которое вызывает приращение выходного кода на единицу в младшем разряде. Меньшее приращение входного напряжения АЦП не почувствует, т.е. квант Δu – наименьшее приращение входного напряжения, различимое АЦП. В соответствии с этим разрешающую способность отождествляют с чувствительностью АЦП.

Быстродействие ЦАП и АЦП оценивается временем преобразования $t_{пр}$, которое определяется методом преобразования и быстродействием элементной базы. Так, например, в АЦП последовательного счета (см. рис. 10.6,а) счетчик с большим быстродействием позволит увеличить частоту генератора счетных импульсов, что уменьшит $t_{пр}$. Время преобразования такого АЦП линейно зависит от величины входного напряжения $U_{вх}$: чем оно больше, тем большее число счетных импульсов должно поступить на счетчик, чтобы напряжение с выхода ЦАП уравнило входное напряжение. Если $U_{вх}$ имеет значение, равное максимальному входному напряжению для данного АЦП, то за время $t_{пр}$ на счетчик поступит $2^n - 1$ импульсов с периодом $T_{сч}$ и время преобразования составит

$$t_{пр} = (2^n - 1) T_{сч}.$$

При больших входных напряжениях большим быстродействием обладают кодоимпульсные АЦП.

Выбор ЦАП может, в частности, производиться по значению $t_{пр}$: за время $t_{пр}$ код на входе не должен, например, измениться более, чем на единицу в младшем разряде. АЦП с большим временем преобразования не может работать с быстро изменяющимся входным напряжением, так как последнее за время $t_{пр}$ может измениться.

Для АЦП период дискретизации T_d следует выбирать больше $t_{пр}$: $T_d > t_{пр}$, т.е. между скоростью преобразования $1/t_{пр}$ и частотой дискретизации ($F_d = 1/T_d$) должно соблюдаться соотношение $1/t_{пр} > F_d$. С другой стороны, по теореме Котельникова F_d связана с наивысшей частотой f_{max} в спектре непрерывного входного сигнала неравенством $F_d \geq 2f_{max}$. Поэтому АЦП должен иметь время преобразования $t_{пр} < 1/2f_{max}$.

Наибольшим быстродействием обладают АЦП с параллельным преобразованием, в котором входное напряжение сравнивается одновременно с $2^n - 1$ уровнями, для чего структура преобразователя, кроме прочего, содержит $2^n - 1$ аналоговых компараторов и приоритетный шифратор. Во избежание усложнения структуры такого преобразователя число его разрядов не должно быть большим (в 8-ми разрядном АЦП количество компараторов составляет $2^8 - 1 = 255$), что дополнительно снижает возможную точность преобразования.

Погрешность преобразования имеет статическую и динамическую составляющие. Статическая составляющая включает в себя методическую погрешность квантования, или дискретности и инструментальную погрешность от неидеальности элементов преобразователей. Погрешность квантования Δ_k обусловлена самим принципом представления непрерывного сигнала квантованными уровнями, отстоящими друг от друга на выбранный интервал. Выше эта погрешность описывалась. Для ее уменьшения напряжение на входе (для АЦП) и на выходе (для ЦАП) исходно смещают на половину кванта. При этом погрешность квантования составляет половину разрешающей способности, и в общем случае

$$\Delta_k = \pm 0,5 \Delta u \quad \delta = \pm 0,5 / 2^{n-1}$$

Инструментальная погрешность не должна превышать погрешность квантования. При этом полная абсолютная и относительная статические погрешности

$$\Delta_k = \pm \Delta u \quad \delta = \pm 1 / 2^{n-1},$$

что соответствует разрешающей способности преобразователя.

Динамическая составляющая погрешности связана с быстродействием преобразователя (с временем преобразования $t_{пр}$) и скоростью изменения входного сигнала (v). Чем меньше $t_{пр}$ и v , тем меньше эта составляющая. При большом $t_{пр}$ нужно будет увеличивать период T_d , чтобы избежать значительных динамических искажений. Для их уменьшения обычно выбирают АЦП с таким временем преобразования $t_{пр}$, за которое входной сигнал изменяется не более, чем на разрешающую способность $\Delta u = U_{оп} / (2^n - 1)$.

Вопросы для самоконтроля

3. Введите в компьютер число милливольт, равное разрешающей способности 10-разрядного АЦП с опорным напряжением $U_{оп} = 10,24$ В.

Задачи к модулю “Цифроаналоговые и аналогоцифровые преобразователи”

1. Введите в компьютер код на выходах импульсного АЦП, если $U_{вх} = 2,5$ В, скорость нарастания "пилы" $v = 1$ В/мкс, а частота импульсов, заполняющих “временные ворота”, составляет 20 МГц.
2. Введите в компьютер число, на которое нужно будет умножить выходной код АЦП, работающего в типовом режиме, если предположить, что его опорное напряжение составит 1/3 от номинального.

Заключение по теме модуля “Цифроаналоговые и аналогоцифровые преобразователи”

ЦАП и АЦП являются переходными элементами между аналоговыми и цифровыми блоками устройства.

Из за наличия аналоговых ключей (по числу разрядов) ЦАП с матрицей R-2R имеют достаточно сложную структуру и относительно высокую стоимость, но при этом обладают наибольшей точностью.

ЦАП с матрицей двоично взвешенных резисторов осуществляют преобразование с большей погрешностью, т.к. должного соотношения номиналов резисторов получить не удастся. Однако при этом они обладают простой структурой и малой стоимостью.

Наиболее простую структуру имеют АЦП последовательного счета, наиболее сложную – АЦП с параллельным преобразованием, компенсируя это наибольшим быстродействием.

Значительную часть выпускаемых АЦП составляют аналогоцифровые преобразователи с поразрядным кодированием (кодоимпульсные) и двойного интегрирования. Для большинства применений они обладают достаточной точностью, быстродействием и относительно низкой стоимостью.

Указания к вопросам и задачам

Указание к вопросу 1. Определите выходное напряжение от единицы в младшем разряде входного кода.

Указание к вопросу 2. Вспомните, на какое значение должен измениться входной код ЦАП, чтобы изменение его выходного напряжения оказалось минимальным.

Указание к вопросу 3. Определите число интервалов, на которое 10-разрядный код разобьет опорное напряжение, и какова "ширина" каждого интервала.

Указание к задаче 1. По скорости нарастания "пилы" и величине $U_{вх}$ определите длительность "временных ворот".

Указания к задаче 2: 1) Вспомните, откуда снимается напряжение, которое уравнивает преобразуемое входное напряжение;
2) Какие физические величины определяют напряжение на выходе ЦАП в структуре АЦП.

Литература

1. Калабеков Б.А. Цифровые устройства и микропроцессорные системы – М.: Телеком, 2000г., с.156...172.
2. Фролкин В.Т., Попов Л.Н. Импульсные и цифровые устройства – М.: Радио и связь, 1992 г., с.280...284.
3. Сайты в интернете: WWW. abc. WSV.ru, rff.tsu.ru, pub. mirea. ac. ru, foroff. phys. msu.ru