

Особенности преобразования напряжения в код для аналитических приборов. Б о р н г а р д т А. Ф., Карпов С. Н., Любезников О. А., Певанер А. С. — В кн.: Приборы для научных исследований и автоматизации эксперимента. Л., «Наука», 1982, с. 153—163.

Рассматриваются требования, предъявленные аналитическими приборами к преобразованию аналоговых сигналов в цифровой код. В соответствии с требованиями по динамическому диапазону, скорости изменения входного сигнала, точности и быстродействию аналого-цифровые преобразователи, применяемые для измерения и преобразования сигналов спектрометров, хроматографов и других аналитических приборов, разбиты на пять групп. Описаны структурные схемы, указаны технические характеристики аналого-цифровых преобразователей, разработанных в СКБ аналитического приборостроения, входящих в состав вычислителей «Роса-1», «Вихрь», систем обработки информации к спектрометрам и отвечающих требованиям четырех из указанных групп. Лит. — 2 назв., ил. — 7.

ОСОБЕННОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В КОД ДЛЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

При автоматизации современного аналитического прибора требуется производить измерение изменяющихся напряжений электрического тока и представлять результаты в цифровой форме для последующей обработки. Отличительными особенностями выходных сигналов аналитических приборов являются динамический диапазон от 10^2 до 10^6 при величине напряжения от единиц микровольт до десятков вольт и скорость изменения сигнала от значений, близких к нулю, до десятков и сотен тысяч вольт в секунду.

Требуемая относительная погрешность измерения составляет 10^{-2} — 10^{-5} . Интервал дискретизации по времени выбирается с учетом алгоритмов обработки и может быть от сотен наносекунд до десятков миллисекунд. Столь разнообразные характеристики сигналов и результатов измерения требуют различного подхода к выбору структуры аналого-цифрового преобразователя (АЦП). С этой целью целесообразно разбить АЦП на группы в зависимости от предъявляемых требований. За основу такого деления приняты требования к допустимой скорости изменения сигнала, так как этот параметр оказывает наибольшее влияние на структуру АЦП.

К первой группе отнесем АЦП для сигналов, изменяющих свое значение от минимального до максимального за интервалы времени от десятых долей секунды до нескольких минут при динамическом диапазоне

10^4 — 10^6 . Эти сигналы характерны для таких приборов, как газовый и жидкостный хроматографы, ИК-спектрометр, Оже-спектрометр и др. АЦП данной группы должны иметь относительную погрешность измерения $\left[(0.05-0.2) + (0.002-0.02) \left(\frac{U_{\text{пред}}}{U_{\text{изм}}} - 1 \right) \right] \%$, где $U_{\text{пред}}$ и $U_{\text{изм}}$ — соответственно предельное и измеряемое значения напряжений; предельные значения напряжений 0.3—30 В, интервал дискретизации по времени от единиц до десятков миллисекунд.

К второй группе отнесем АЦП для сигналов, изменяющих свое значение за интервалы времени от единиц до десятков миллисекунд. Такие сигналы поступают с выходов масс-спектрометров различного назначения и класса, электронных спектрометров и т. д. АЦП данной группы должны иметь динамический диапазон 10^4 — 10^5 , относительную погрешность

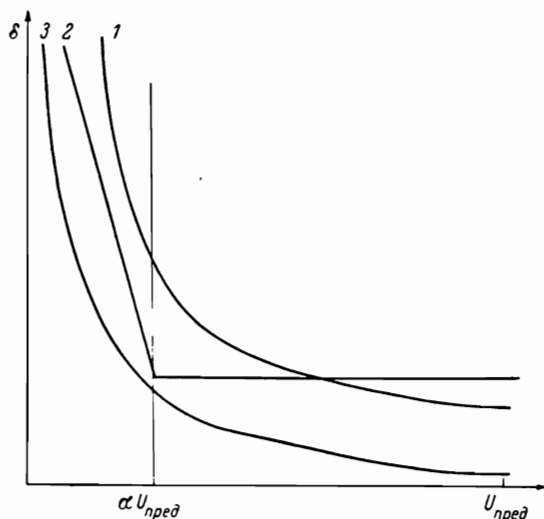


Рис. 1. График изменения относительной погрешности.

$\left[(0.02-0.1) + (0.002-0.005) \left(\frac{U_{\text{пред}}}{U_{\text{изм}}} - 1 \right) \right] \%$, предельные значения напряжений 1—10 В, интервал дискретизации 50—200 мкс.

К третьей группе можно отнести АЦП для масс-спектрометров высокого разрешения, импульсных ЯМР-спектрометров и некоторых других приборов, для которых скорость изменения сигнала от минимума до максимума составляет сотни микросекунд. Динамический диапазон таких АЦП должен составлять 10^3 — $5 \cdot 10^4$, относительная погрешность $\left[(0.02-0.1) + (0.01-0.05) \left(\frac{U_{\text{пред}}}{U_{\text{изм}}} - 1 \right) \right] \%$, предельные значения напряжений 1—10 В, интервал дискретизации 5—30 мкс.

К четвертой группе отнесем АЦП для сигналов, изменяющихся на предельную величину за десятки и единицы миллисекунд, например сигналы импульсных и многоимпульсных ЯМР-спектрометров. АЦП данной группы должны иметь динамический диапазон 10^2 — 10^3 , относительную погрешность $\left[(0.5-1) + (0.2-0.6) \left(\frac{U_{\text{пред}}}{U_{\text{изм}}} - 1 \right) \right] \%$, интервал дискретизации по времени менее 1 мкс.

При аналитических исследованиях вопрос погрешности измерения имеет некоторые особенности и поэтому требует отдельного рассмотрения. Для АЦП функция относительной погрешности имеет вид, представленный на рис. 1, 1, чему соответствует широко применяемая на практике

формула $\delta = \left[a + b \left(\frac{U_{\text{пред}}}{U_{\text{изм}}} - 1 \right) \right] \%$. При аналитических исследованиях представляют интерес не абсолютные значения сигналов, а их отношения друг к другу. Поэтому относительная погрешность для некоторого диапазона $aU_{\text{пред}} - U_{\text{пред}}$, где $a < 1$, должна быть постоянной (рис. 1, 2). Значение a определяется соотношением сигнал/шум и областью линейного изменения сигнала. Для того чтобы получить требуемую погрешность в середине диапазона, величину относительной погрешности в конце диапазона приходится обеспечивать значительно более малую, чем требуется по условию эксперимента (рис. 1, 3). Кроме того, относительный характер измерений позволяет требования к стабильности смещения нуля и масштабу аналого-цифрового преобразования ограничить во времени временем одного анализа и рассматривать погрешность преобразования как погрешность его линейности.

Спектры напряжения на выходе аналитического прибора и собственного шума АЦП существенно шире спектра полезного сигнала, что делает целесообразным вводить в процесс преобразования интегрирование сигнала хотя бы за часть интервала дискретизации.

При выборе структуры АЦП необходимо учитывать, что во многих случаях в ходе одного анализа измерения должны производиться по нескольким каналам, например по каналу интенсивности и каналу развертки для масс-спектрометра, по каналам фотодетектора и рефрактометрического детектора для жидкостного хроматографа и т. д.

Отдельную группу составляют АЦП для измерения очень медленно изменяющихся сигналов с высокой (сотые и тысячные доли процента) точностью при интервале дискретизации по времени десятки миллисекунд. Указанные требования характерны для однолучевых изотопных масс-спектрометров, при измерении напряжения развертки в квадрупольном масс-спектрометре и т. д. В большинстве случаев этим требованиям удовлетворяют цифровые вольтметры постоянного тока, выпускаемые промышленностью. АЦП, удовлетворяющие требованиям первых четырех групп, промышленностью не выпускаются и требуют специальной разработки.

Как известно [1, 2], классические методы аналого-цифрового преобразования, такие как метод поразрядного уравнивания, метод счета единичных приращений и т. п., даже при малых временах преобразования имеют довольно низкие динамические характеристики.

Так, например, АЦП поразрядного уравнивания со временем 50 мкс и динамическим диапазоном $6 \cdot 10^4$ (16 двоичных разрядов) допускает преобразование сигналов со скоростью изменения не более $\frac{1}{3}U_{\text{пред}}$ за секунду. Следящий АЦП имеет несколько лучшую динамическую характеристику, но не обеспечивает многоканальности из-за чрезмерно большого времени установления. Учитывая, что интервал дискретизации сигнала по времени значительно больше, чем интервал времени, за который сигнал изменяется на величину допустимой погрешности, для АЦП первой группы целесообразно применить структуру с трехшаговым компенсационным интегрированием. Функциональная схема такого АЦП представлена на рис. 2. Схема содержит три аналоговых ключа $K1$, $K2$, $K3$, операционный усилитель OU , два нуля-органа $HO1$, $HO2$, устройство управления $УУ$, счетчик старших n_1 разрядов $Сч1$, счетчик младших n_2 разрядов $Сч2$, генератор тактовых импульсов $ГТИ$.

АЦП работает следующим образом. В начальный момент времени входное напряжение $U_{\text{вх}}$ через ключ $K1$ подключается к интегрирующему усилителю OU и интегрируется в течение интервала времени, который требуется для заполнения счетчика $Сч1$ (2^{n_1} импульсов). Последний импульс при этом сбрасывает $Сч1$ в нуль. После этого ключ $K1$ размыкается, а ключ $K2$ замыкается и на вход интегрирующего усилителя подается опорное напряжение U_{01} , которое равно по величине максимально допустимому входному напряжению $U_{\text{вх, макс}}$, но противоположно ему по

знаку. Интегрирование U_{01} продолжается до тех пор, пока напряжение на выходе интегратора не достигнет порога срабатывания нуля-органа $HO1$, который выбирается несколько больше абсолютного значения $U_{01}/2^{n_1}$. На этом интервале времени тактовые импульсы поступают только в счетчик старших разрядов $Cч1$. Затем ключ $K2$ размыкается, ключ $K3$ замыкается, и на вход интегратора подается опорное напряжение $U_{02} = U_{01}/2^{n_2}$. Напряжение U_{02} интегрируется в течение интервала времени, пока напряжение на выходе интегратора не достигнет порога срабатывания нуля-органа $HO2$, который устанавливается на уровне «земли». В этом интервале тактовые импульсы поступают в счетчик младших разрядов $Cч2$, причем импульсы переноса могут проходить в $Cч1$. Число N , накопленное в счетчике к концу цикла, является двоичным представлением среднего за интервал интегрирования входного напряжения: $N = U_{вх}/U_{01} \cdot 2^n$.

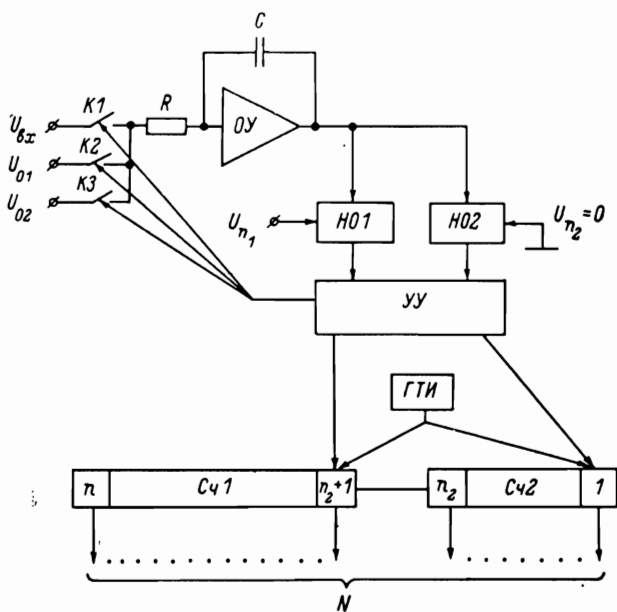


Рис. 2. Функциональная схема аналого-цифрового преобразователя вычислителя «Вихрь».

Достоинства рассмотренного метода преобразования заключаются в независимости результата от медленных изменений постоянной времени интегрирования (элементы R и C) и частоты тактовых импульсов, а также частичной компенсации нелинейности интегратора, вызванной неидеальностью операционного усилителя. Основными причинами погрешности для рассматриваемого АЦП являются неидеальность ключей и усилителя, абсорбция в интегрирующем конденсаторе.

АЦП, построенный по рассмотренной структуре, входит в состав специализированного вычислителя «Вихрь» и имеет следующие характеристики: число двоичных разрядов 16, время преобразования 20 мс, относительная погрешность $\left[0.05 + 0.005 \left(\frac{U_{пред}}{U_{взм}} - 1\right)\right] \%$, допустимая скорость изменения сигнала 10 мВ/мс, чувствительность (цена младшего разряда) 50 мкВ.

Для преобразования сигналов второй группы целесообразно построение комбинированного АЦП, в котором используется комбинация трех методов преобразования — поразрядного уравнивания, следящего и интегрирующего. При этом в одном АЦП удастся совместить такие противоречивые характеристики, как большой динамический диапазон (14—

17 двоичных разрядов), небольшое время преобразования (80—120 мкс), большую допустимую скорость изменения входного сигнала (10—20 дискрет/мкс) и малую величину собственного шума (менее 1 дискрета) при достаточно высокой чувствительности (50—100 мкВ). Последние два из перечисленных параметров особенно важны, так как обычно их не удается совместить для многоразрядных АЦП со временем преобразования менее 100 мкс из-за широкополосности элементов, входящих в такой АЦП. Использование же метода интегрирования позволяет уменьшить собственные шумы АЦП.

Примером такого АЦП может служить преобразователь спектроаналитического вычислителя «Роса-1», функциональная схема которого представлена на рис. 3. Рассматриваемый АЦП состоит из двух частей. Первая представляет собой восьмиразрядный преобразователь поразрядного уравнивания с дослеживанием со стороны младшего разряда и включает в себя операционный усилитель *ОУ*, нуль-орган *НО*, декодирующий преобразователь *ДП*, устройство управления *УУ* и реверсивный счетчик *РС*.

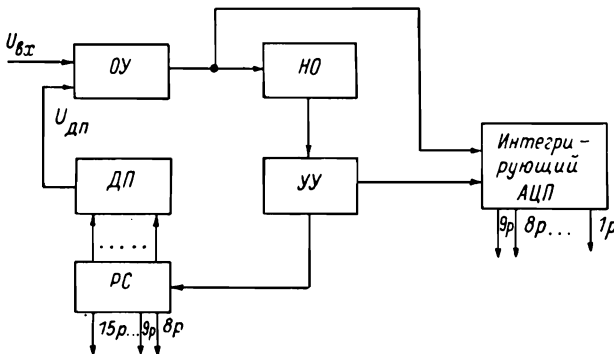


Рис. 3. Функциональная схема аналого-цифрового преобразователя вычислителя «Роса-1».

Вторая часть является трехшаговым интегрирующим преобразователем, аналогичным описанному выше, но с числом разрядов, равным 9.

АЦП работает следующим образом. Входной сигнал $U_{вх}$ поступает на первый вход операционного усилителя. На второй вход усилителя поступает компенсирующее напряжение с декодирующего преобразователя $U_{ДП}$. Величина $U_{ДП}$ с помощью цепи обратной связи, включающей *НО*, *УУ* и *РС*, устанавливается такой, чтобы уравновесить входной сигнал. Уравнивание происходит со стороны старших разрядов с 15-го до 8-го. После этого преобразователь переходит в режим слежения со стороны 8-го разряда, причем скорость изменения входного сигнала должна быть меньше скорости слежения. К концу интервала слежения в *РС* выдается код $N_{РС}$, соответствующий входному сигналу, а с выхода *ДП* выдается напряжение $U_{ДП}$, равное $U_{вх}$ с точностью до цены 8-го разряда. После этого цепь обратной связи отключается, в разностный сигнал $U_{вх} - U_{ДП}$ с выхода *ОУ* подается на вход интегрирующей части АЦП, где преобразуется в девятиразрядный код N_{\int} . Для получения окончательного результата необходимо код $N_{РС}$ алгебраически сложить с кодом N_{\int} . В рассматриваемом АЦП два младших разряда уравнивающей части преобразователя $9p$ и $8p$ дублируются двумя старшими разрядами интегрирующей части. Такое перекрытие разрядов сделано для того, чтобы за время интегрирования остатка $U_{вх} - U_{ДП}$ его величина не превысила динамического диапазона интегрирующей части из-за изменения во времени входного сигнала.

Рассмотрим вопрос о допустимой скорости изменения входного сигнала для данной структуры АЦП. Если уравнивающая часть АЦП содержит n_1 разрядов, число тактов при слежении m и время преобразования на один разряд t_p (длительность одного такта), то приращение $\Delta_{вх}$ входного напряжения за интервал времени от начала преобразования до конца слежения составит

$$\Delta_{вх} = v_c(n_1 - 2)t_p + v_c m t_p,$$

где v_c — скорость изменения входного напряжения. Величина $\Delta_{вх}$ должна быть скомпенсирована в режиме слежения с точностью не хуже $2/3$ цены разряда, которым осуществляется слежение, т. е.

$$v_c t_p (n_1 - 2 + m) - v_{сх} m t_p \leq \frac{2}{3} \cdot 2^{n-n_1},$$

где n — общее число разрядов АЦП; $v_{сх} = 2^{n-n_1}/t_p$ — скорость слежения разрядом с ценой 2^{n-n_1} . Отсюда следует

$$v_c \leq \frac{2^{n-n_1} \left(\frac{2}{3} + m \right)}{t_p (n_1 - 2 + m)}.$$

Для рассматриваемого АЦП $n=15$, $n_1=8$, $m=2$, $t_p=4$ мкс, величина v_c составляет 10.6 дискрет/мкс. Остальные характеристики АЦП таковы:

относительная погрешность $\left[0.05 + 0.005 \left(\frac{U_{пред}}{U_{изм}} - 1 \right) \right] \%$, предельное значение напряжения ЗВ, чувствительность (цена младшего разряда) 100 мкВ, время преобразования 112 мкс.

Рассмотрим методическую погрешность преобразования, связанную с наличием операции интегрирования. Будем считать, что интегрирование начинается в момент времени t_0 , а интервал интегрирования t_n равен постоянной интегратора T . Для случая линейно изменяющегося во времени входного сигнала вида $U_{вх} = U_0 + v_c t$ выходное напряжение интегратора в конце интервала t_n будет $U_{вых} = U_0 + v_c (t_0 + t_n/2)$, откуда следует, что сигнал не искажается по форме, а лишь сдвигается во времени на постоянную величину $t_n/2$, не зависящую от скорости изменения сигнала v_c .

Если входной сигнал изменяется во времени нелинейно, то, учитывая, что интервал t_n значительно меньше, чем время, за которое сигнал меняется от минимального до максимального значения, можно аппроксимировать входной сигнал полиномом второй степени вида

$$U_{вх} = U_0 + v_c t + \frac{a_c}{2} t^2,$$

где a_c — вторая производная от входного сигнала. В этом случае выходное напряжение интегратора в конце интервала t_n будет

$$U_{вых} = U_0 + v_c \left(t_0 + \frac{t_n}{2} \right) + \frac{a_c}{2} \left(t_0 + \frac{t_n}{2} \right)^2 + \frac{a_c}{12} t_n^2.$$

Полученное выражение показывает, что в данном случае, кроме сдвига сигнала во времени на величину $t_n/2$, происходит искажение формы сигнала, что в свою очередь приводит к появлению методической погрешности преобразования. Найдем, например, величину этой погрешности при измерении максимального значения входного сигнала, представленного в виде пика гауссовой формы:

$$U_{вх} = U_m e^{-\frac{t^2}{2\mu^2}},$$

где U_m — амплитуда пика; μ — среднеквадратичная ширина пика.

Если интервал $t_n \ll \mu$, то вершина пика с высокой точностью может быть аппроксимирована полиномом второй степени:

$$U_{\text{вх}} = U_m \left(1 - \frac{t^2}{2\mu^2} \right).$$

Тогда относительная погрешность измерения амплитуды пика будет

$$\delta = \frac{t_n^2}{12\mu^2}.$$

Для рассмотренного выше АЦП первой группы $t_n = 8 \cdot 10^{-3}$ с; тогда при $\delta = 5 \cdot 10^{-4}$ получим $\mu \approx 100$ мс, что соответствует минимально допустимой длительности пика ~ 600 мс и удовлетворяет требованиям хромотографии и ИК-спектроскопии.

Для рассмотренного выше АЦП второй группы $t_n = 16 \cdot 10^{-3}$ с; тогда при $\delta = 5 \cdot 10^{-4}$ получим $\mu = 200$ мс, что соответствует минимально допустимой длительности пика ~ 1.2 мс и удовлетворяет требованиям масс-спектрометрии.

В ряде случаев при обработке сигналов используется преобразование Фурье. В этом случае можно оценить влияние операции интегрирования по искажению отдельных гармоник. Для синусоидального входного сигнала с частотой ω выходное напряжение интегратора в конце интервала t_n будет

$$U_{\text{вых}} = \frac{\sin \frac{\omega t_n}{2}}{\frac{\omega t_n}{2}} U_m \sin \omega \left(t_0 + \frac{t_n}{2} \right),$$

а относительная погрешность

$$\delta = 1 - \frac{\sin \frac{\omega t_n}{2}}{\frac{\omega t_n}{2}}.$$

Для преобразования сигналов в среднем (10—13 двоичных разрядов) и большом (14—17 разрядов) динамическом диапазоне при больших скоростях изменения сигнала, достигающих 2^7 — 2^{10} дискрет/мкс (третья группа), появляется необходимость устанавливать на входе АЦП устройства фиксации напряжения (УФН), а в самом АЦП применять параллельно-последовательные методы, позволяющие получить малое время преобразования (10—50 мкс). Функциональная схема такого АЦП представлена на рис. 4. Она включает в себя следующие узлы: устройство фиксации напряжения *УФН*, сравнивающий усилитель *СУ*, декодирующий преобразователь *ДП*, параллельно-последовательный шестиразрядный аналого-цифровой преобразователь *АЦП-6*, счетчик *Сч*, устройство управления *УУ*, выходной регистр *Рг*. АЦП работает следующим образом. В начальный момент времени по сигналу из устройства управления на выходе *УФН* фиксируется мгновенное значение входного сигнала $U_{\text{вх}}$, которое будет сохраняться в течение всего времени преобразования. Далее процесс преобразования распадается на три шага.

На первом шаге *Сч* обнулен и напряжение $U_{\text{ДП}}$ с выхода *ДП* равно нулю. *СУ* имеет коэффициент передачи, равный единице. Поэтому напряжение $U_{\text{вх}}$ полностью поступает на входе *АЦП-6*, который преобразует его в шестиразрядный двоичный код. Этим заканчивается первый шаг.

Далее по сигналу *1ш* из *УУ* полученный код параллельно записывается в старшие разряды (разряды 10—15) *Сч* и на выходе *ДП* появляется соответствующее этому коду напряжение $U_{\text{ДП1}}$. Таким образом, после первого шага на выходе сравнивающего усилителя образуется разностный сигнал

$\Delta_1 = U_{вх} - U_{ДП1}$, который снова поступает на вход АЦП-6. Так как максимальное значение величины Δ_1 в 32 раза меньше максимального значения величины $U_{вх}$, то по сигналу ПМ1 уменьшается в 32 раза масштаб преобразования в АЦП-6.

Далее начинается второй шаг, в течение которого на выходе АЦП-6 образуются следующие шесть разрядов кода, соответствующие сигналу

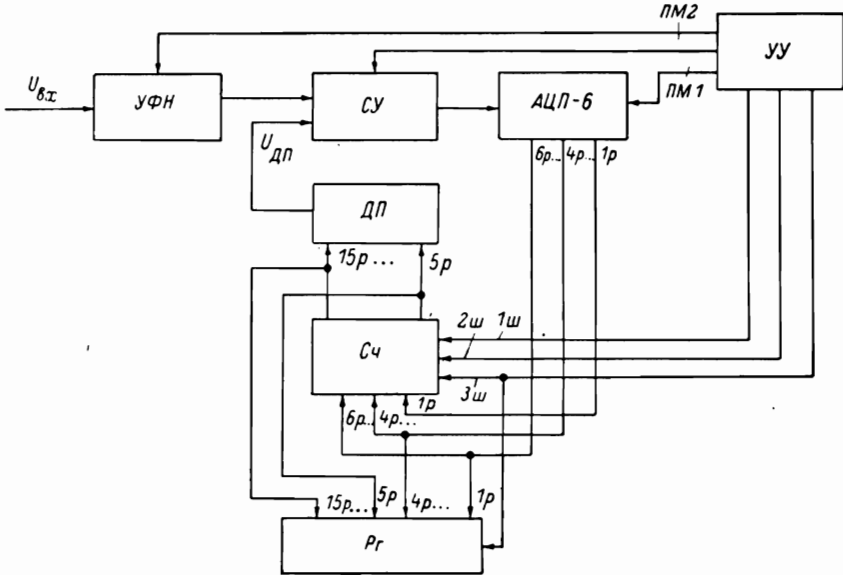


Рис. 4. Функциональная схема АЦП третьей группы.

Δ_1 . По сигналу 2ш из УУ код, полученный на втором шаге, записывается параллельно в разряды 5—10 Сч. При этом, так как запись на втором шаге осуществляется с перекрытием в разряде 10, а сигнал переноса может проходить в более старшие разряды, то происходит уточнение кода, полученного на первом шаге.

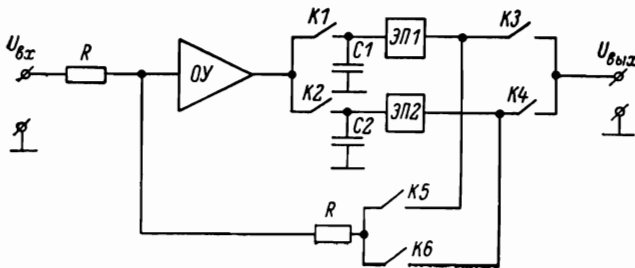


Рис. 5. Функциональная схема устройства фиксации напряжения.

После второго шага на выходе ДП появляется напряжение $U_{ДП2}$, а на выходе СУ соответственно $\Delta_2 = U_{вх} - U_{ДП2}$, причем максимальное значение величины Δ_2 в 32 раза меньше, чем максимальное значение величины Δ_1 . Поэтому по сигналу ПМ2 осуществляется увеличение коэффициента передачи СУ в 16 раз.

На третьем шаге на выходе АЦП-6 образуются последние шесть разрядов кода, соответствующие сигналу Δ_2 . При этом два старших разряда этого кода (5 и 6) добавляются к двум младшим разрядам кода, полученного на предыдущих двух шагах, и, таким образом, снова происходит уточнение полученного ранее кода. По окончании третьего шага по сигналу 3ш

происходит перепись содержимого C_4 и четырех младших разрядов АЦП-6 в выходной регистр P_2 .

Рассмотрим функциональные схемы некоторых узлов данного АЦП.

Устройство фиксации напряжения представляет собой аналоговое запоминающее устройство замкнутого типа с двумя запоминающими конденсаторами (рис. 5). Применение такой схемы позволяет получить высокую точность и быстродействие, а также дает возможность избавиться от перегрузок усилителя.

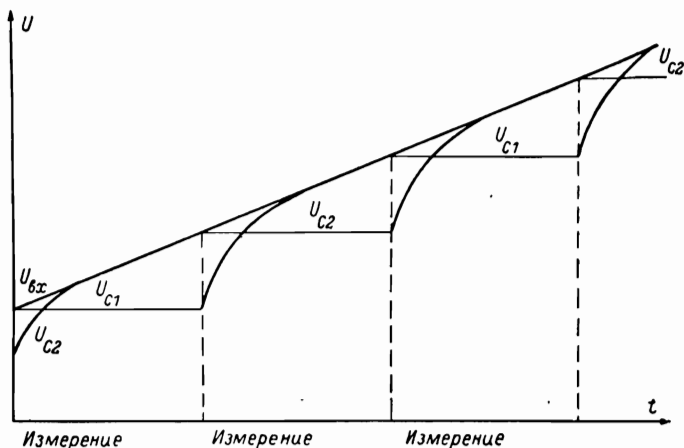


Рис. 6. Временная диаграмма работы устройства фиксации напряжения.

Устройство работает следующим образом. В исходном состоянии электронные ключи $K1$, $K4$, $K5$ замкнуты, а ключи $K2$, $K3$ и $K6$ разомкнуты. а выходе устройства напряжение $U_{\text{вых}}$ равно напряжению на конденсаторе C_2 , накопленному на предыдущем цикле, а устройство осуществляет слежение за текущим значением входного сигнала $U_{\text{вх}}$ по цепи обратной связи, включающей в себя $K1$, эмиттерный повторитель ЭП1 , $K5$, R . При этом на конденсаторе $C1$ накапливается текущее значение входного сигнала $U_{C1} = U_{\text{вх}}$, а напряжение $U_{\text{вых}} = U_{C2}$ преобразуется в код.

При поступлении следующего импульса начала измерения размыкаются ключи $K1$, $K4$ и $K5$ и замыкаются ключи $K3$ и $K6$. При этом на выходе устройства формируется напряжение $U_{\text{вых}} = U_{C1}$, равное новому мгновенному значению $U_{\text{вх}}$, а устройство начинает слежение за текущим значением входного сигнала $U_{\text{вх}}$ по цепи обратной связи, включающей в себя $K2$, ЭП2 , $K6$, R . При этом текущее значение $U_{\text{вх}}$ накапливается на конденсаторе $C2$. Работу устройства поясняет рис. 6.

Шестиразрядный аналого-цифровой преобразователь АЦП-6 построен по параллельно-последовательному принципу. Функциональная схема АЦП-6 представлена на рис. 7. Схема включает в себя следующие узлы: компараторы напряжения $KН1$, $KН2$, $KН3$, четырехразрядные декодирующие преобразователи $ДП4-1$ и $ДП4-2$, дешифратор $Дш$, регистры P_1 и P_2 , устройство управления $УУ$.

АЦП-6 работает в три такта. Число одновременно определяемых разрядов

$$p = N - n = 2,$$

где $N = 6$ — число разрядов АЦП-6; $n = 4$ — число разрядов $ДП4-1$ и $ДП4-2$.

Число необходимых компараторов

$$l = 2^p - 1 = 3.$$

Число тактов связано с числом разрядов АЦП-6 соотношением

$$m = \frac{N}{p} = 3.$$

Выходные сопротивления $ДП4-1$ и $ДП4-2$ равны $R_1 = R_2 = R$. $ДП4-1$ имеет пятый, постоянно включенный разряд, значение которого равно значению младшего разряда.

АЦП-6 работает следующим образом. В начальный момент времени в регистр $Р21$ записаны единицы, а в $Р22$ — нули (сигналом $ИНУ$). В ре-

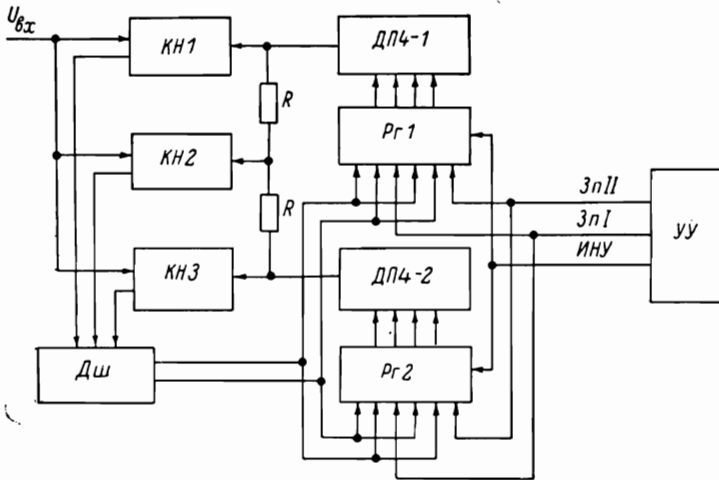


Рис. 7. Функциональная схема АЦП-6.

зультате на выходе $ДП4-1$ будет максимальное напряжение, а на выходе $ДП4-2$ — нулевое и, следовательно, в узлах сети R напряжение будет

$$U_q = \frac{E_0}{2^p} q = \frac{E_0}{4} q,$$

где q — номер узла ($q=1, 2, 3$).

Таким образом, интервал напряжения от 0 до E_0 разбит на 2^p зон (в нашем случае на 4 зоны). Напряжения узлов сетки подаются на входы компараторов $КН1, КН2, КН3$ и сравниваются с входным напряжением. Число сработавших компараторов указывает, в какой из 2^p зон находится входное напряжение. Число сработавших компараторов с помощью $Дш$ преобразуется в двоичный код, который по сигналу $3nI$ записывается в $Р21$ и $Р22$. Если на первом такте сработало S_1 компараторов, то в регистрах будут числа: в $Р21$ — $S_1 \cdot 2^{n-p} + 2^{n-p} - 1$, в $Р22$ — $S_1 \cdot 2^{n-p}$. На выходах $ДП4-1$ и $ДП4-2$ установятся напряжения

$$U_1 = \frac{E_0}{2^p} + S_1 \frac{E_0}{2^p}, \quad U_2 = S_1 \frac{E_0}{2^p},$$

а в узлах сетки

$$U_q = S_1 \frac{E_0}{2^p} + \frac{E_0}{2^{2p}} q = S_1 \frac{E_0}{4} + \frac{E_0}{16} q.$$

Таким образом, зона $E_0/2^p$, которая была определена на первом такте, будет снова разбита на 2^p зон. Затем начинается второй такт, на котором снова определяется число сработавших компараторов, и соответствующий

этому числу код запишется по сигналу $ZnII$ в следующие p разрядов $Pz1$ и $Pz2$. Если на втором такте сработало S_2 компараторов, то в регистрах будут числа: в $Pz1 - S_1 \cdot 2^{n-p} + S_2 \cdot 2^{n-2p}$, в $Pz2 - S_1 \cdot 2^{n-p} + S_2 \cdot 2^{n-2p}$. На выходах ДП4-1 и ДП4-2 установятся напряжения

$$U_1 = S_1 \frac{E_0}{2^p} + S_2 \frac{E_0}{2^{2p}} + \frac{E_0}{2^n},$$

$$U_2 = S_1 \frac{E_0}{2^p} + S_2 \frac{E_0}{2^{2p}}.$$

а в узлах сетки

$$U_q = S_1 \frac{E_0}{2^p} + S_2 \frac{E_0}{2^{2p}} + \frac{E_0}{2^n} q = S_1 \frac{E_0}{4} + S_2 \frac{E_0}{16} + \frac{E_0}{64} q.$$

Таким образом, зона $E_0/2^{2p}$, которая была определена на втором такте, снова будет разбита на 2^p зон (в нашем случае на 4). Далее начинается третий, последний такт, на котором определяются последние два разряда кода.

По рассмотренной функциональной схеме разработан АЦП, входящий в систему измерения и обработки информации для масс-спектрометров высокого разрешения и импульсных ЯМР-спектрометров. АЦП имеет следующие характеристики: число двоичных разрядов 15, время преобразования 25 мкс, относительная погрешность $\left[0.03 + 0.01 \left(\frac{U_{\text{пред}}}{U_{\text{взм}}} - 1\right)\right] \%$, допустимая скорость изменения сигнала $0.15 U_{\text{пред}}$ за 1 мкс.

АЦП четвертой группы для преобразования быстроменяющихся сигналов со временем преобразования менее 1 мкс целесообразно строить по параллельно-последовательному принципу, описание которого было дано выше (при описании АЦП-6). Разработанный по этому принципу АЦП также входит в систему измерения и обработки информации импульсных ЯМР-спектрометров и имеет следующие характеристики: число двоичных разрядов 8, время преобразования 0.6 мкс, относительная погрешность $\left[0.8 + 0.4 \left(\frac{U_{\text{пред}}}{U_{\text{взм}}} - 1\right)\right] \%$. Входящее в этот АЦП устройство фиксации имеет время выборки 0.4 мкс и допустимую скорость изменения сигнала $0.4 U_{\text{пред}}$ за 1 мкс.

Рассмотренные в статье аналого-цифровые преобразователи удовлетворяют требованиям автоматизации таких аналитических приборов, как масс-спектрометры, хроматографы, ЯМР-спектрометры, электронные спектрометры и др. Однако предложенный ряд АЦП нельзя считать законченным. Развитие аналитической техники, которое характеризуется снижением времени на проведение анализа, повышением чувствительности, расширением диапазона измеряемых величин, предъявляет новые требования к АЦП, а развитие элементной базы позволяет применять новые структурные решения и расширять границы требований, которые можно удовлетворить путем разработки одного АЦП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров Г. М. Преобразование информации в аналого-цифровых вычислительных устройствах и системах. М., 1973.
2. Гитис Э. И. Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных машин. М., 1975.