

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Курганский государственный университет»

Кафедра «Автоматизация производственных процессов»

Исследование цифро-аналоговых и аналого-цифровых преобразователей

Методические указания к выполнению
лабораторной работы по курсу «Электроника и схемотехника»
для студентов очной и заочной форм обучения
направления подготовки 09.03.04 «Программная инженерия»

Курган 2018

Кафедра: «Автоматизация производственных процессов»

Дисциплина: «Электроника и схемотехника»

Составил: старший преподаватель А.А. Иванов

Утверждены на заседании кафедры «11» октября 2018 г.

Рекомендованы методическим советом университета «20» декабря 2017 г.

Содержание

Введение	4
1 Цифро-аналоговые преобразователи	4
2 Аналого-цифровые преобразователи	11
3 Вопросы для самоконтроля	26
4 Задание на лабораторную работу	27
Список использованной литературы.....	27

Введение

Данные методические указания являются руководством для выполнения лабораторной работы по теме «Исследование цифро-аналоговых и аналого-цифровых преобразователей».

1 Цифро-аналоговые преобразователи

Назначение и виды цифро-аналоговых преобразователей. *Цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП)* называется электронное устройство, предназначенное для преобразования цифровой информации в аналоговую. ЦАП используются для формирования сигнала в виде напряжения или тока, функционально связанного с управляющим кодом. В большинстве случаев эта функциональная зависимость является линейной. Наиболее часто ЦАП используются для сопряжения устройств цифровой обработки сигналов с системами, работающими с аналоговыми сигналами. Кроме этого, они используются в качестве узлов обратной связи в аналого-цифровых преобразователях и в устройствах сравнения цифровых величин с аналоговыми.

По виду выходного сигнала ЦАП делят на два вида: *с токовым выходом и выходом по напряжению*. Для преобразования выходного тока ЦАП в напряжение обычно используются операционные усилители. По полярности выходного сигнала ЦАП принято делить на *однополярные и двухполярные*.

Управляющий код, подаваемый на вход ЦАП, может быть различным: *двоичным, двоично-десятичным, Грея, унитарным* и др. Кроме того, различными могут быть и уровни логических сигналов на входе ЦАП.

При формировании выходного напряжения ЦАП под действием управляющего кода обычно используются источники опорного напряжения. В зависимости от вида источника опорного напряжения ЦАП делят на две

группы: с постоянным опорным напряжением и с изменяющимся опорным напряжением. Кроме этого, ЦАП делят по основным характеристикам: количеству разрядов, быстродействию, точности преобразования, потребляемой мощности.

Основные параметры ЦАП. Все параметры ЦАП можно разделить на две группы: *статические и динамические*. К статическим параметрам ЦАП относят: *разрешающую способность, погрешность преобразования, диапазон значений выходного сигнала, характеристики управляющего кода, смещение нулевого уровня* и некоторые другие.

К динамическим показателям ЦАП принято относить: *время установления выходного сигнала, предельную частоту преобразования, динамическую погрешность*. Рассмотрим некоторые из этих параметров.

Разрешающая способность ЦАП определяется как величина, обратная максимальному количеству градаций выходного сигнала. Так, например, если разрешающая способность ЦАП составляет 10^{-5} , то это означает, что максимальное число градаций выходного сигнала равно 10^5 . Иногда разрешающую способность ЦАП оценивают выходным напряжением при изменении входного кода на единицу младшего разряда, т. е. *шагом квантования*. Очевидно, что чем больше разрядность ЦАП, тем выше его разрешающая способность.

Погрешность преобразования ЦАП принято делить на *дифференциальную и погрешность нелинейности*. С ростом кода на входе ЦАП растет и выходное напряжение, однако при увеличении напряжения могут быть отклонения от линейной зависимости.

Погрешностью нелинейности называют максимальное отклонение выходного напряжения от идеальной прямой во всем диапазоне преобразования.

Дифференциальной погрешностью называют максимальное отклонение от линейности для двух смежных значений входного кода.

Напряжение смещения нуля определяется выходным напряжением при входном коде, соответствующем нулевому значению.

Время установления $t_{уст}$ — это интервал времени от подачи входного кода до вхождения выходного сигнала в заданные пределы, определяемые погрешностью.

Максимальная частота преобразования — наибольшая частота дискретизации, при которой все параметры ЦАП соответствуют заданным значениям.

По совокупности параметров ЦАП принято делить на три группы: *общего применения, прецизионные и быстродействующие*. Быстродействующие ЦАП имеют время установления меньше 100 нс. К прецизионным относят ЦАП, имеющие погрешность нелинейности менее 0,1%.

Принципы построения ЦАП. Существует несколько схем, являющихся базой для построения многих разновидностей ЦАП соответствующего класса. Для формирования соответствующих уровней выходного напряжения (или тока) к выходу ЦАП подключается необходимое количество опорных сигналов E_1, E_2, \dots, E_n (или токов I_1, I_2, \dots, I_n), либо устанавливают соответствующее дискретное значение коэффициента деления K_1, K_2, \dots, K_n .

На рисунке 1.1 приведена схема ЦАП с суммированием токов.

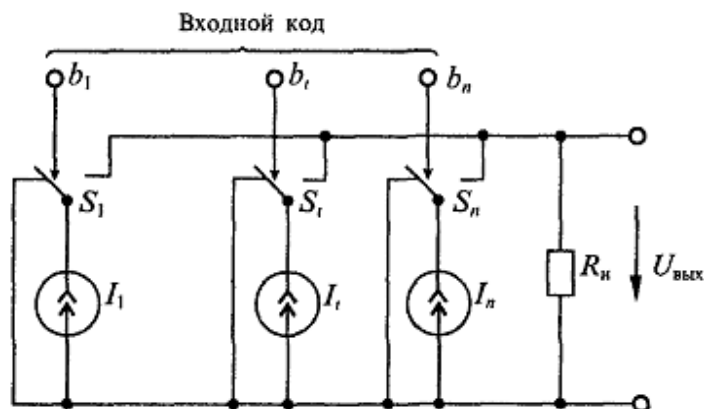


Рисунок 1.1 –
Упрощенная

с суммированием токов

схема ЦАП

В этой схеме используются n опорных источников тока $I_1, I_2 \dots I_n$. Входной код $b_1, b_2 \dots b_n$ управляет ключами $S_1, S_2 \dots S_n$, которые или подключают источники тока к нагрузке, или замыкают их накоротко. При этом если $b_i=0$, то соответствующий источник закорочен и в работе схемы не участвует. Если же $b_i=1$, то соответствующий источник тока подключен к нагрузке. Результирующий ток равен сумме токов опорных источников, для которых $b_i=1$.

Напряжение на выходе будет равно результирующему току I_Σ умноженному на сопротивление R_n , т. е.

$$U_m = I_\Sigma R_n.$$

Так, например, если входной код является двоичным, то результирующий ток определяется выражением:

$$I_\Sigma = I_o(b_1 2^{n-1} + b_2 2^{n-2} + \dots + b_n 2^0) = I_o N,$$

где n — число двоичных разрядов входного тока, N — n -разрядное цифровое слово.

Упрощенная схема ЦАП со сложением напряжений приведена на рисунке 1.2. В этой схеме используется n опорных источников напряжения $E_1, E_2 \dots E_n$. Входной код управляет ключами $S_1, S_2 \dots S_n$, которые или подключают соответствующие источники опорного напряжения к нагрузке, или отключают их. Так же, как и для схемы с суммированием токов, при $b_i = 1$ соответствующий источник напряжения включен, а при $b_i=0$ — выключен. Результирующее напряжение на выходе равно сумме напряжений включенных опорных источников. Например, для входного двоичного кода выходное напряжение определяется по формуле

$$U_\Sigma = U_{\text{вых}} = U_0(b_1 2^{n-1} + b_2 2^{n-2} + \dots + b_n 2^0) = U_0 N.$$

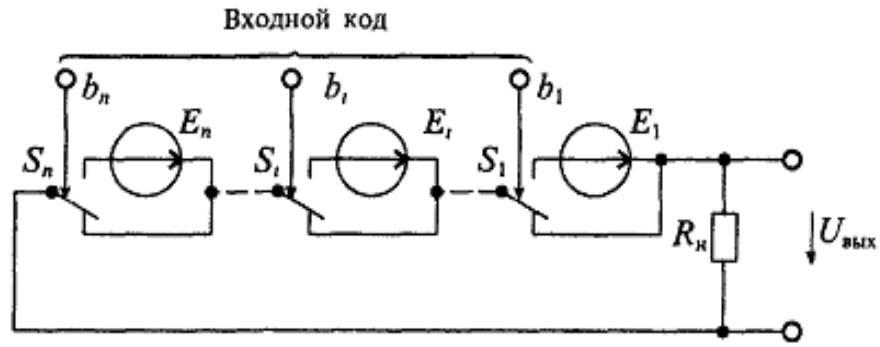


Рисунок 1.2 - Упрощенная схема ЦАП с суммированием напряжений

Практическая схема ЦАП со сложением токов обычно выполняется на различных резистивных матрицах и одном источнике опорного напряжения. На рисунке 1.3а приведена схема ЦАП с суммированием токов, в котором использован один источник опорного напряжения E_0 и резистивная матрица типа $R-2R$, изображенная на рисунке 1.3б.

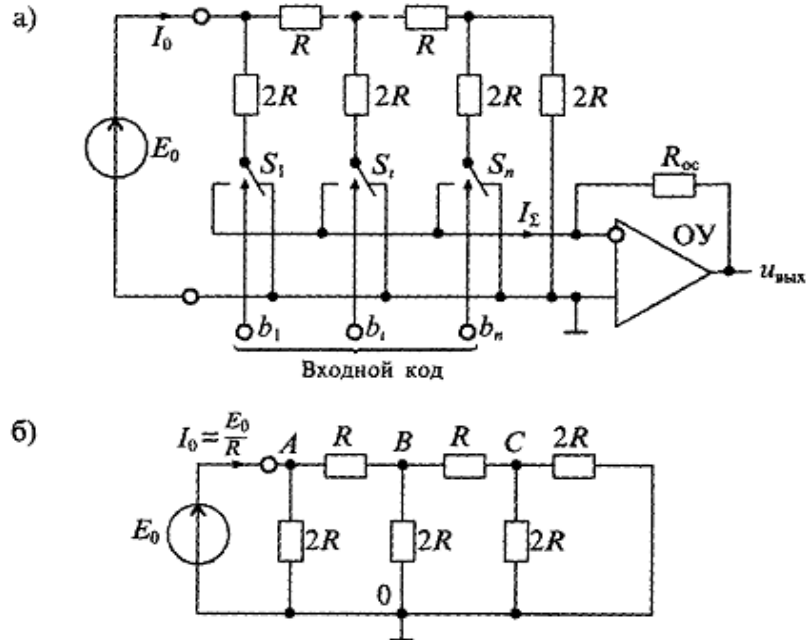


Рисунок 1.3 - Схема ЦАП со сложением токов на резистивной матрице типа $R-2R$ (а) и структура резистивной матрицы (б)

Особенность этой резистивной матрицы заключается в том, что при любом положении ключей $S_1, S_2 \dots S_n$ входное сопротивление матрицы всегда равно R , а следовательно, ток, втекающий в матрицу, равен $I_0 = E_0/R$. Далее он последовательно делится в узлах A, B, C по двоичному закону. Двоичный закон распределения токов в ветвях резистивной матрицы соблюдается при условии равенства нулю сопротивления нагрузки. Так как нагрузкой резистивной матрицы является операционный усилитель ОУ, охваченный отрицательной обратной связью через сопротивление R_{oc} то его входное сопротивление равно нулю с достаточно высокой точностью.

Напряжение на выходе операционного усилителя определяется выражением

$$U_{\text{вых}} = \frac{E_0 R_{oc}}{R 2^n} (b_1 2^{n-1} + b_2 2^{n-2} + \dots + b_n 2^0) = \frac{E_0 R_{oc}}{R 2^n} N,$$

где $b_i = 1$, если ключ S_i находится в положении, при котором ток протекает на инвертирующий вход ОУ, и $b_i = 0$, если ключ S_i находится в положении, при котором ток протекает в общий вывод, n — число разрядов преобразователя.

Максимальное значение выходного напряжения (т. е. напряжение в конечной точке диапазона преобразования) имеет место при всех $b_i = 1$ и определяется по формуле:

$$U_{\text{вых max}} = \frac{E_0 R_{oc} (1 - 2^{-n})}{R} = \frac{E_0 R_{oc}}{R} - h,$$

где h — шаг квантования, т. е. приращение выходного напряжения при изменении входного кода на единицу младшего разряда:

$$h = \frac{E_0 R_{oc}}{R 2^n}.$$

Выходное напряжение ЦАП зависит не только от входного кода N , но и от напряжения E_0 опорного источника. Если допустить, что напряжение E_0 меняется, то выходное напряжение ЦАП будет пропорционально произведе-

нию двух величин: входного кода и напряжения, поданного на вход опорного сигнала. В связи с этим такие ЦАП называют *перемножающими*. В интегральных микросхемах перемножающих ЦАП источник опорного напряжения отсутствует, но имеется вход для его подключения.

Другой тип ЦАП со сложением токов реализуется на *матрице со взвешенными резисторами*. Схема ЦАП на основе взвешенных резисторов приведена на рисунке 1.4. Из этой схемы видно, что ЦАП состоит из матрицы двоично-взвешенных резисторов, сопротивления которых определяются по формуле $R_i = R2^{i-n}$; переключателей на каждый разряд, управляемых входными сигналами; источника опорного напряжения E_0 и сумматора на операционном усилителе ОУ в инвертирующем включении.

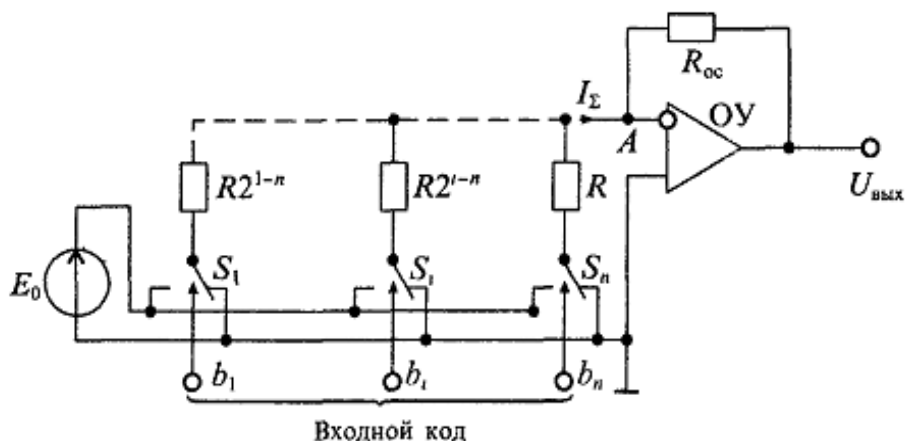


Рисунок 1.4 - Схема ЦАП со сложением токов на матрице взвешенных резисторов

Поскольку прямой вход ОУ соединен с общим проводом, то за счет отрицательной обратной связи напряжение в суммирующей точке A также будет равно нулю, иначе говоря, резистивная матрица работает в закороченном режиме независимо от состояния переключателей. Когда на цифровые входы ЦАП подан двоичный n -разрядный цифровой код, то каждый цифровой сигнал b_i управляет переключателем S_i , обеспечивая

подключение резистора с сопротивлением $R_i = R2^{i-n}$ кисточнику опорного напряжения E_0 или к общему проводу. Если предположить, что внутренние сопротивления источника опорного напряжения и ключей равны нулю, то ток, протекающий в сопротивлении R_i , будет равен

$$I_i = \frac{E_0 b_i}{R2^{i-1}} \begin{cases} 0, & \text{при } b_i = 0, \\ \frac{E_0}{R2^{i-1}}, & \text{при } b_i = 1 \end{cases}$$

Результирующий ток определяется суммой

$$I_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n I_i = \frac{E_0}{R} \sum_{i=1}^n b_i 2^{i-1} = \frac{E_0}{R} (b_1 2^{n-1} + b_2 2^{n-2} + \dots + b_n 2^0).$$

Для обеспечения точности и стабильности резистивных матриц применяется лазерная подгонка резисторов.

2 Аналого-цифровые преобразователи

Виды аналого-цифровых преобразователей и их особенности.

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) представляют собой устройства, предназначенные для преобразования электрических величин (напряжения, тока, мощности, сопротивления, емкости и др.) в цифровой код. Наиболее часто входной величиной является напряжение. Серийные промышленные микросхемы АЦП предназначены только для работы с напряжением. Поэтому в дальнейшем будут рассмотрены только преобразователи напряжения в цифровой код.

В общем случае напряжение характеризуется его мгновенным значением $u(t)$. Однако для оценки напряжения можно также пользоваться его средним за выбранный промежуток времени T значением:

$$U_{\text{cp}} = U = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt .$$

В связи с этим все типы АЦП можно разделить на две группы: *АЦП мгновенных значений напряжения* и *АЦП средних значений напряжения*. Так как операция усреднения предполагает интегрирование мгновенного значения напряжения, то АЦП средних значений часто называют интегрирующими.

При преобразовании напряжения в цифровой код используются три независимых операции: *дискретизация, квантование и кодирование*.

Процедура аналого-цифрового преобразования непрерывного сигнала представляет собой преобразование непрерывной функции напряжения $u(t)$ в последовательность чисел $u(t_n)$, где $n = 0, 1, 2, \dots$, отнесенных к некоторым фиксированным моментам времени. При *дискретизации* непрерывная функция $u(t)$ преобразуется в последовательность ее отсчетов $u(t_n)$, как показано на рисунке 2.1 а.

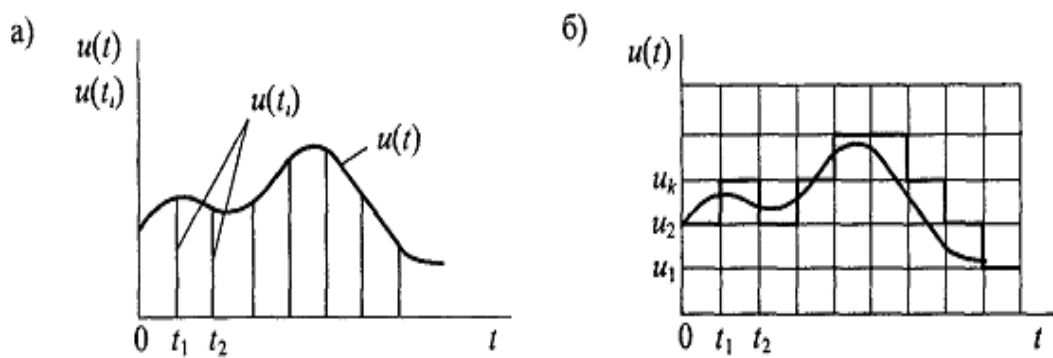


Рисунок 2.1 - Процесс дискретизации (а) и квантования непрерывного сигнала $u(t)$ (б)

Вторая операция, называемая *квантованием*, состоит в том, что мгновенные значения функции $u(t)$ ограничиваются только определенными уровнями, которые называются *уровнями квантования*.

В результате квантования непрерывная функция $u(i)$ принимает вид ступенчатой кривой $u_K(t)$, показанной на рисунке 2.1 б.

Третья операция, называемая *кодированием*, представляет дискретные квантованные величины в виде цифрового кода, т. е. последовательности цифр, подчиненных определенному закону. С помощью операции кодирования осуществляется условное представление численного значения величины.

В основе дискретизации сигналов лежит принципиальная возможность их представления в виде взвешенных сумм:

$$u(t) = \sum_n a_n f_n(t),$$

где a_n — некоторые коэффициенты или отсчеты, характеризующие исходный сигнал в дискретные моменты времени, $f_n(t)$ — набор элементарных функций, используемых при восстановлении сигнала по его отсчетам.

Дискретизация бывает *равномерная и неравномерная*. При равномерной дискретизации период отсчетов T остается постоянным, а при неравномерной — период может изменяться. Неравномерная дискретизация чаще всего обусловлена скоростью изменения сигнала и потому называется *адаптивной*.

В основе *равномерной дискретизации* лежит теорема отсчетов, согласно которой в качестве коэффициентов a_n в представленном выше уравнении нужно использовать мгновенные значения сигнала $u(t_n)$ в дискретные моменты времени $t_n = Tn$, а период дискретизации выбирать из условия $T = (2f_m)^{-1}$, где f_m — максимальная частота в спектре исходного сигнала.

Для сигналов с ограниченным спектром теорема отсчетов называется *формулой Котельникова* и имеет вид

$$u(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} u(nT) \frac{\sin[2\pi f_m(t - nT)]}{2\pi f_{ni}(t - nT)}$$

При дискретизации сигнала появляется погрешность, обусловленная конечным временем одного преобразования и неопределенностью момента времени его окончания. В результате вместо равномерной дискретизации получаем *дискретизацию с переменным периодом*. Такая погрешность называется *апертурной*. Если считать, что апертурная погрешность определяется скоростью изменения сигнала, то ее можно определить по формуле

$$\Delta u_n(t_n) = u'(t_n)T_a,$$

Где T_a — апертурное время, $u'(t_n)$ — скорость изменения сигнала в момент времени t_n т. е.

$$u'(t_n) = [du/dt]_{t=t_n}.$$

Для гармонического сигнала $u(t) = U_m \sin \omega t$ максимальное значение апертурной погрешности получим при условии $u'(t) = U_m \omega \cos \omega t = 1$, т. е. при $\cos \omega t = 1$. Относительная апертурная погрешность в этом случае будет иметь значение

$$\delta_a = \frac{\Delta u_a}{U_m} = \omega T_a.$$

Сравнивая период дискретизации, определенный по теореме отсчетов, с *апертурным временем*, получим

$$T/T_a = \pi/\delta_a,$$

откуда следует, что для снижения апертурной погрешности приходится в π/δ_a раз увеличивать частоту преобразования АЦП. Так, например, при дискре-

тизации гармонического сигнала с частотой $f_m = 10 \text{ кГц}$ по теореме отсчетов достаточно иметь максимальную частоту АЦП $F_m = 2f_m = 20 \text{ кГц}$, при погрешности $\delta_a = 10^{-2}$, необходимо увеличить эту частоту до значения $2f_m \pi / \delta_a = 20 \cdot 10^3 \pi / 10^{-2} = 6,3 \text{ МГц}$.

В отличие от дискретизации, которая теоретически является обратимой операцией, квантование представляет собой необратимое преобразование исходной последовательности и сопровождается появлением неизбежных погрешностей. Разность между двумя соседними значениями квантованной величины называется *шагом квантования* h .

По существу квантование представляет собой операцию округления непрерывной величины до ближайшего целого значения. В результате максимальная погрешность квантования равна $\pm 0,5h$. Однако при преобразовании произвольного сигнала максимальная погрешность встречается сравнительно редко, поэтому в большинстве случаев для оценки качества АЦП используют не максимальную, а среднеквадратическую погрешность $\sigma_{\text{кв}} = h / \sqrt{12}$, которая примерно в 3,5 раза меньше максимальной. Погрешность квантования определяется как *единица младшего значащего разряда*.

Выходной величиной АЦП является цифровой код, т. е. последовательность цифр, с помощью которой представляются дискретные квантованные величины. В АЦП используют четыре основных типа кодов: *натуральный двоичный, десятичный, двоично-десятичный и код Грея*. Кроме этого, АЦП, предназначенные для вывода информации в десятичном коде, могут выдавать на своем выходе специализированный код для управления семисегментными индикаторами.

Основные характеристики АЦП. Любой АЦП является сложным электронным устройством, которое может быть выполнено в виде одной микросхемы или в виде схемы с большим количеством различных электронных компонентов. В связи с этим характеристики АЦП зависят не

только от его построения, но и от характеристик элементов, которые входят в его состав. Тем не менее, большинство АЦП оценивают по их основным метрологическим показателям, которые можно разделить на две группы: *статические и динамические*.

К статическим характеристикам АЦП относят: *абсолютные значения и полярности входных сигналов, входное сопротивление, значения и полярности выходных сигналов, выходное сопротивление, значения напряжений и токов источников питания, количество двоичных или десятичных разрядов выходного кода, погрешности преобразования постоянного напряжения и др.* К динамическим параметрам АЦП относят: *время преобразования, максимальную частоту дискретизации, апертурное время, динамическую погрешность и др.*

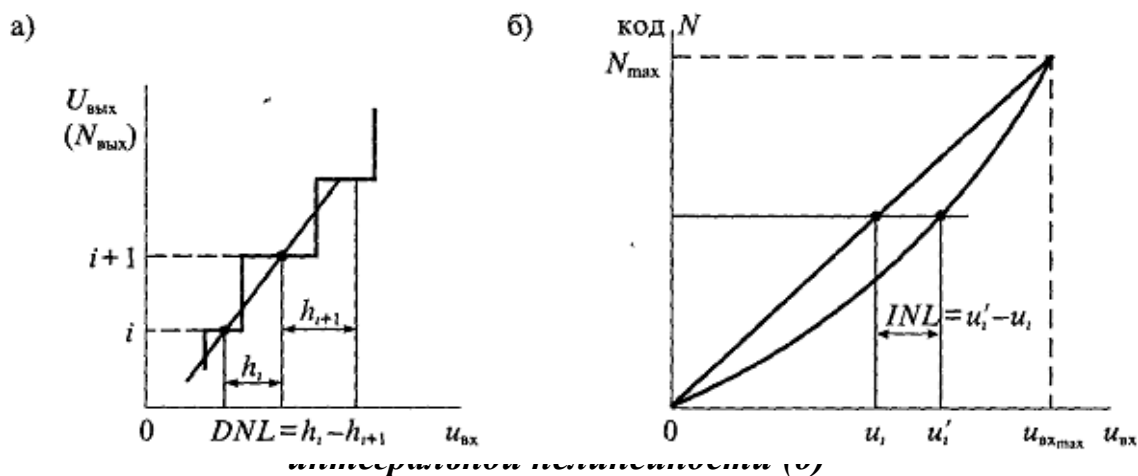
Рассмотрим некоторые из этих параметров более подробно. Основной характеристикой АЦП является его *разрешающая способность*, которую принято определять величиной, обратной максимальному числу кодовых комбинаций на выходе АЦП. Разрешающую способность можно выражать в процентах, в количестве разрядов или в относительных единицах. Например, 10-разрядный АЦП имеет разрешающую способность $1/1024-1 \approx 0,1\%$. Если напряжение шкалы для такого АЦП равно 10В, то абсолютное значение разрешающей способности будет около 10 мВ.

Реальное значение разрешающей способности отличается от расчетного из-за погрешностей АЦП. *Точность АЦП* определяется значениями *абсолютной погрешности, дифференциальной и интегральной нелинейности*.

Абсолютную погрешность АЦП определяют в конечной точке характеристики преобразования, поэтому ее обычно называют *погрешностью полной шкалы* и измеряют в единицах младшего разряда.

Дифференциальную нелинейность (DNL) определяют через идентичность двух соседних приращений сигнала, т. е. как разность нап-

разностей двух соседних квантов: $DNL = h_i - h_{i+1}$. Определение дифференциальной нелинейности показано на рисунке 2.2а.



Интегральная нелинейность АЦП (*INL*) характеризует идентичность приращений во всем диапазоне входного сигнала. Обычно ее определяют, как показано на рисунке 2.2 б, по максимальному отклонению сглаженной характеристики преобразования от идеальной прямой линии, т. е. $INL = u'_i - u_i$.

Время преобразования $T_{\text{пр}}$ обычно определяют как интервал времени от начала преобразования до появления на выходе АЦП устойчивого кода входного сигнала. Для одних типов АЦП это время постоянное и не зависит от значения входного сигнала, для других АЦП это время зависит от значения входного сигнала. Если АЦП работает без устройства выборки и хранения, то время преобразования является *апертурным временем*.

Максимальная частота дискретизации — частота, с которой возможно преобразование входного сигнала, при условии, что выбранный параметр (например, абсолютная погрешность) не выходит за заданные пределы. Иногда максимальную частоту преобразования принимают равной обратной величине времени преобразования. Однако это справедливо не для всех типов АЦП.

Принципы построения АЦП. Все типы используемых АЦП можно разделить по признаку измеряемого значения напряжения на две группы:

АЦП мгновенных значений напряжения и АЦП средних значений напряжения(интегрирующие АЦП).

АЦП мгновенных значений можно разделить на следующие основные виды: *последовательного счета, последовательного приближения, параллельные, параллельно-последовательные и с промежуточным преобразованием в интервал времени.*

Структурная схема АЦП последовательного счета приведена на рисунке 2.3а.

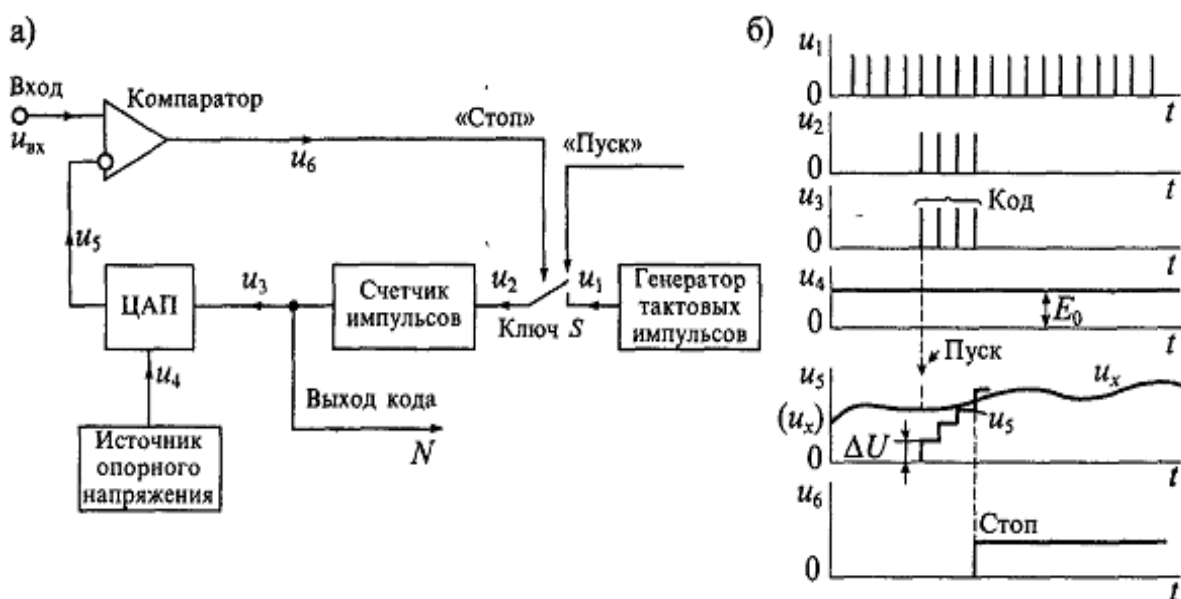


Рисунок 2.3 - Структурная схема АЦП последовательного счета (а) и графики процесса преобразования (б)

Она содержит компаратор, при помощи которого выполняется сравнение входного напряжения с напряжением обратной связи. На прямой вход компаратора поступает входной сигнал $u_{вх}$, а на инвертирующий —

напряжение u_5 обратной связи. Работа преобразователя начинается с приходом импульса «ПУСК» от схемы управления (на рисунке она не показана), который замыкает ключ S . Через замкнутый ключ импульсы u_1 от генератора тактовых импульсов поступают на счетчик, который управляет работой цифро-аналогового преобразователя (ЦАП). В результате последовательного увеличения выходного кода счетчика N происходит последовательное ступенчатое увеличение выходного напряжения u_5 ЦАП. Питание ЦАП выполняется от источника опорного напряжения u_4 .

Когда выходное напряжение ЦАП сравнивается с входным напряжением, произойдет переключение компаратора и по его выходному сигналу «СТОП» разомкнется ключ S . В результате импульсы от генератора перестанут поступать на вход счетчика. Выходной код, соответствующий равенству $u_{ex} = u_5$, снимается с выходного регистра счетчика.

Графики, иллюстрирующие процесс преобразования напряжения в цифровой код, приведены на рисунке 2.3 б. Из этих графиков видно, что время преобразования переменное и зависит от уровня входного сигнала. При числе двоичных разрядов счетчика, равном n , и периоде следования счетных импульсов T максимальное время преобразования можно определить по формуле:

$$T_{пр} = (2^n - 1)T .$$

Так, например, при $n=10$ разрядов и $T=1$ мкс (т.е. при тактовой частоте 1 МГц) максимальное время преобразования равно

$$T_{пр} = (2^{10} - 1) = 1024 \text{ мкс} \approx 1 \text{ мс},$$

что обеспечивает максимальную частоту преобразования около 1 кГц.

Уравнение преобразования АЦП последовательного счета можно записать в виде:

$$kAU = u_{\text{вх}}$$

где $0 \leq k \leq n$ — число ступеней до момента сравнения, $\Delta U = h$ — значение одной ступени, т. е. шаг квантования.

Структурная схема АЦП последовательного приближения приведена на рисунке 2.4а.

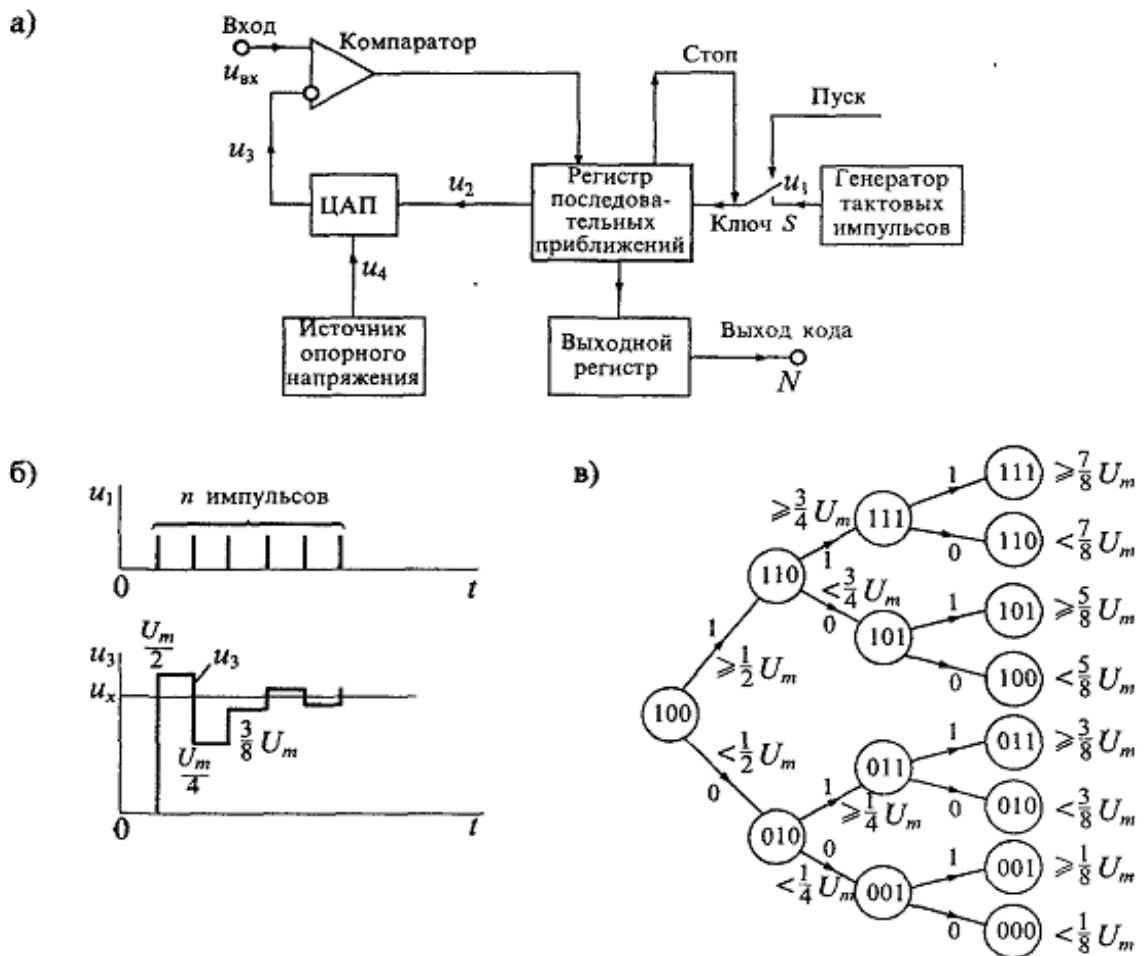


Рисунок 2.4 - Структурная схема АЦП последовательного приближения (а), графики процесса преобразования (б) и диаграмма последовательности переходов для трехразрядного АЦП (в)

По сравнению со схемой АЦП последовательного счета в ней вместо счетчика введен регистр последовательного приближения (РПП). Это изменило алгоритм уравнивания и сократило время преобразования. В основе работы АЦП с РПП лежит принцип *дихотомии*, т. е. последовательного сравнения преобразуемого напряжения u_{ex} с $1/2$, $1/4$, $1/8$ и т. д. возможного максимального его значения U_m . Это позволяет для n -разрядного АЦП выполнить весь процесс преобразования за n последовательных шагов приближения (итераций) вместо (2^{n-1}) при использовании последовательного счета и получить существенный выигрыш в быстродействии. График процесса преобразования АЦП с РПП показан на рисунке 2.4 б.

В качестве примера на рисунке 2.4 в показана диаграмма переходов для трехразрядного АЦП последовательного приближения. Поскольку на каждом шаге производится определение значения одного разряда, начиная со старшего, то такой АЦП часто называют АЦП поразрядного уравнивания. При первом сравнении определяется — больше или меньше напряжение u_{ex} , чем $U_m/2$. На следующем шаге определяется, в какой четверти диапазона находится u_{ex} . Каждый последующий шаг вдвое сужает область возможного результата.

При каждом шаге сравнения компаратор формирует импульсы, соответствующие состоянию «больше-меньше» (1 или 0), управляющие регистром последовательных приближений.

Структурная схема *параллельного АЦП* приведена на рисунке 2.5. Преобразователь осуществляет одновременное квантование входного сигнала u_{ex} с помощью набора компараторов, включенных параллельно источнику сигнала. Пороговые уровни компараторов установлены с помощью резистивного делителя в соответствии с используемой шкалой квантования. При подаче на входы компараторов сигнала u_{ex} на их выходах

получим квантованный сигнал, представленный в унитарном коде.

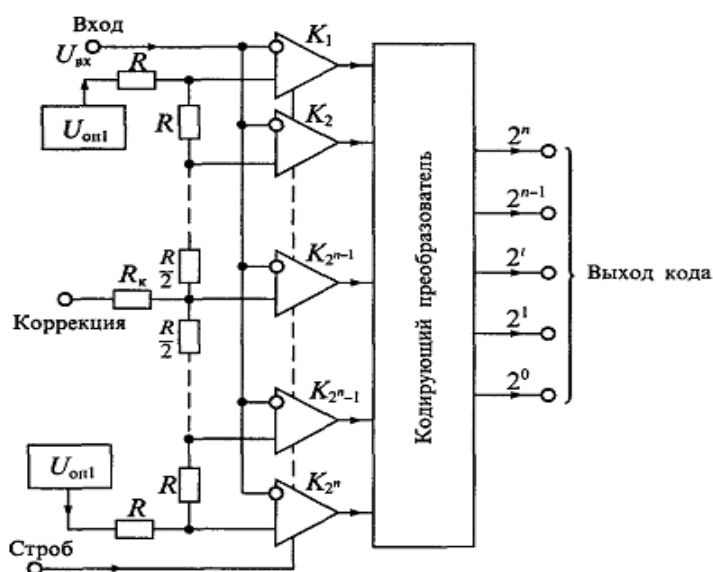


Рисунок 2.5 - Структурная схема параллельного АЦП

Для преобразования унитарного кода в двоичный (или двоично-десятичный) используют *кодирующий преобразователь*. При работе в двоичном коде все резисторы делителя имеют одинаковые сопротивления R . Время преобразования такого преобразователя составляет один такт, т. е. $T_{пр} = T$. Параллельные преобразователи являются в настоящее время самыми быстрыми и могут работать с частотой дискретизации свыше 100 МГц. Для получения более широкой полосы пропускания компараторы обычно делают стробируемыми.

АЦП средних значений напряжения (интегрирующий АЦП) можно разделить на следующие основные виды: *с время-импульсным преобразованием, с частотно-импульсным преобразованием и со статистическим усреднением*. Наибольшее распространение получили первые две группы АЦП.

Структурная схема интегрирующего АЦП с *время-импульсным преобразованием* приведена на рисунке 2.6 а. Работу этой схемы можно разделить на три такта. В первом такте производится заряд интегратора, во

втором — его разряд, а в третьем коррекция нулевого уровня интегратора. Графики, иллюстрирующие работу АЦП, приведены на рисунке 2.6б.

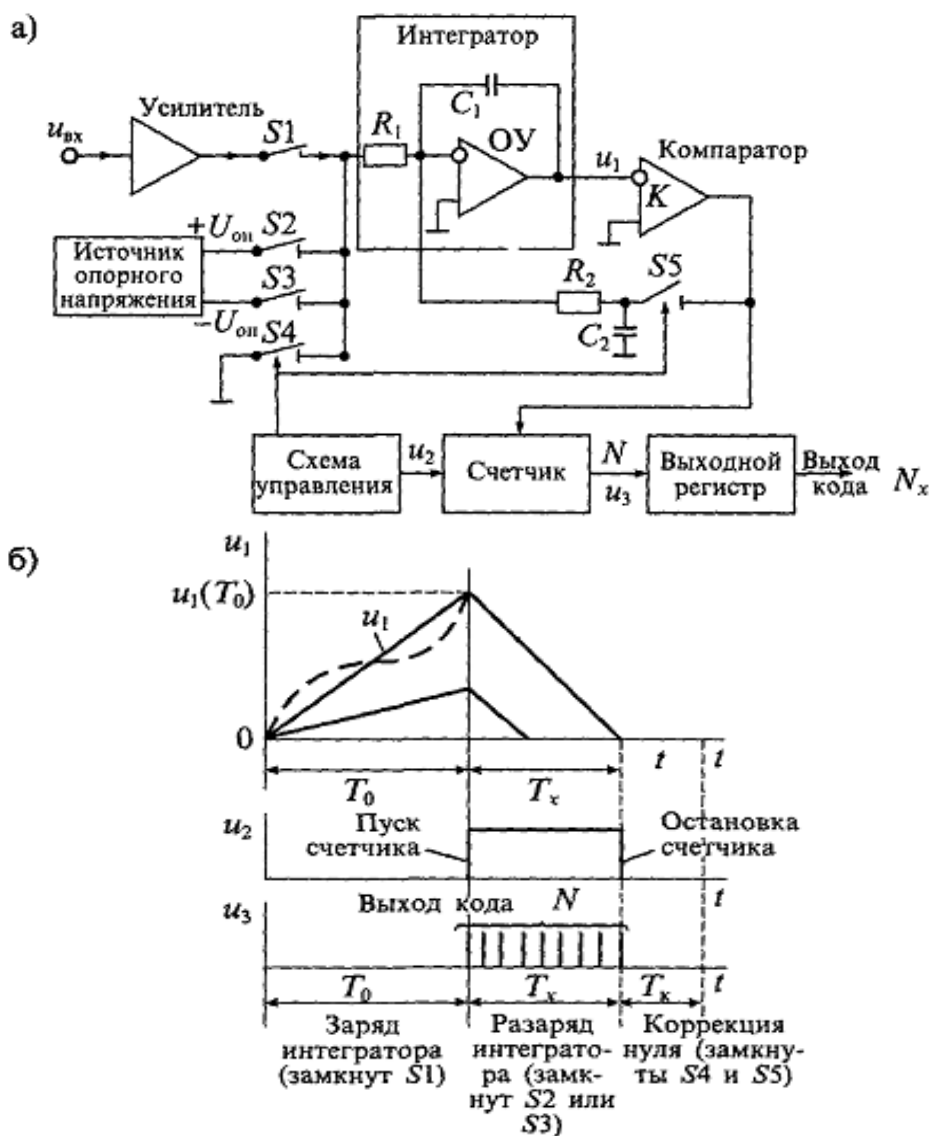


Рисунок 2.6 - Структурная схема АЦП двухтактного интегрирования (а) и графики процесса преобразования (б)

В первом такте, имеющем фиксированную длительность T_0 , замкнут ключ $S1$, а остальные ключи разомкнуты. В этом случае входное напряжение $u_{вх}$ через замкнутый ключ $S1$ и сопротивление $R1$ заряжает емкость $C1$ интегратора и выходное напряжение растет линейно во времени, как

показано на рисунке 2.6 б. К концу интервала T_0 напряжение на выходе интегратора будет равно

$$u_1(T_0) = k \int_0^{T_0} u_{\text{вх}} dt = k T_0 U_{\text{вх}},$$

где $k = R_1 C_1$ — постоянная времени интегратора, $U_{\text{вх}}$ — среднее значение входного напряжения:

$$U_{\text{вх}} = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} u_{\text{вх}} dt.$$

Во втором такте происходит разряд интегратора. При этом в зависимости от требуемой полярности источника опорного напряжения замыкается один из ключей $S2$ или $S3$. Разряд интегратора происходит с постоянной скоростью, которая не зависит от накопленного в интеграторе заряда, поэтому с увеличением накопленного заряда время разряда также увеличивается. Конец разряда интегратора фиксируется компаратором K , после чего ключ $S2$ (или $S3$) размыкается.

Поскольку начало разряда определяет схема управления, а конец — компаратор, то длительность разряда интегратора можно определить по формуле:

$$u_1(T_x) - k \int_0^{T_x} U_{\text{оп}} dt = 0,$$

откуда

$$k T_0 U_{\text{вх}} = k T_0 U_{\text{оп}} T_x \quad \text{или} \quad T_x = \frac{T_0}{U_{\text{оп}}} U_{\text{вх}},$$

что свидетельствует о пропорциональности интервала T_x среднему значению входного напряжения $U_{\text{вх}}$. Заполнение интервала T_x счетными импульсами, поступающими от схемы управления, позволяет найти числовой код $N_x = T_x f_0$.

К достоинствам интегрирующих АЦП следует отнести их высокую помехозащищенность. Если на входной сигнал наложена гармоническая помеха, то при равенстве периода помехи времени заряда интегратора $T_n = T_0$ среднее значение помехи к концу интервала интегрирования будет равно нулю, как

показано штриховой линией на рисунке 2.6б. Случайные помехи и шумы также ослабляются интегрированием, хотя и в меньшей степени.

На третьем этапе производится коррекция нулевого уровня интегратора. Для этого замыкаются ключи $S4$ и $S5$, а остальные ключи размыкаются. Так как вход интегратора через сопротивление R_1 соединен с общей шиной, то конденсатор C_2 через замкнутый ключ $S5$ заряжается до напряжения ошибки, которое после размыкания ключей $S4$ и $S5$ вычитается из входного сигнала.

К недостаткам таких интегрирующих АЦП относится прежде всего сравнительно невысокое быстродействие. Кроме этого, при перегрузке АЦП большим входным сигналом происходит перезаряд интегрирующего конденсатора C_1 поэтому после снятия перегрузки в течение нескольких циклов АЦП будет работать с большой погрешностью.

В последнее время в связи широким применением АЦП в различных системах сбора и обработки информации появились новые типы преобразователей с улучшенными характеристиками. К их числу можно отнести АЦП *сигма-дельта модулятором*.

Структурная схема АЦП *сигма-дельта модулятором* приведена на рисунке 2.7.

Название этого типа АЦП отражает два процесса: интегрирование за

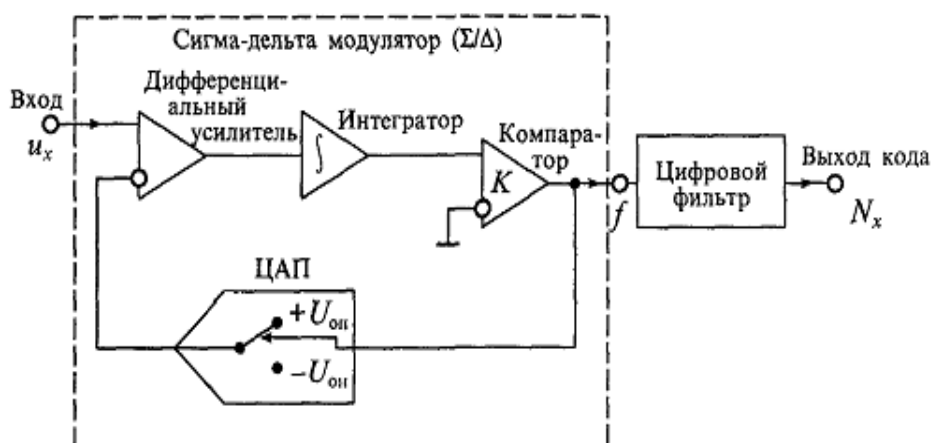


Рисунок 2.7 - Структурная схема АЦП с сигма-дельта модулятором

малое время и сложение результатов интегрирования. Выходным сигналом такого модулятора является *частота импульсов*. Схема такого АЦП во многом совпадает с АЦП с частотно-импульсной обратной связью. В этом АЦП также производится компенсация заряда, накопленного в интеграторе, а вместо импульсного генератора используется одноразрядный ЦАП с компаратором на входе.

3 Вопросы для самоконтроля

- 1) Как может быть измерена практически погрешность преобразования ЦАП и АЦП?
- 2) Можно ли в схеме ЦАП со сложением токов на резистивной матрице $R-2R$ обойтись без операционного усилителя?
- 3) Что такое умножающий ЦАП?
- 4) Что называется напряжением шкалы ЦАП?
- 5) Какие виды существуют АЦП, по каким параметрам они различаются?
- 6) На что влияет возможная зависимость емкости конденсатора интегратора от температуры в АЦП двойного интегрирования?

4 Задание на лабораторную работу

- 1) Изучить разделы 1 и 2 данных методических указаний
- 2) По заданию преподавателя собрать схемы ЦАП и АЦП и исследовать их.
- 3) Результаты исследований отразить в отчете по лабораторной работе.

Список использованной литературы

- 1 Федерков Б.Г., Телец В.А., Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение. М.: Энергоиздат, 1990. – 320с.
- 2 Валах В.В., Григорьев В.Ф., Быстродействующие АЦП для измерения формы случайных сигналов М.: Приборы и техника эксперимента. 1987. №4 С.86 – 90
- 3 Быстродействующие интегральные микросхемы ЦАП и АЦП и измерение их параметров. Под редакцией Марцинкявичуса. М.: Радио и связь. 1988 – 224с.

Иванов Алексей Александрович

Исследование цифро-аналоговых и аналого-цифровых преобразователей

Методические указания к выполнению
лабораторной работы по курсу «Электроника и схемотехника»
для студентов очной и заочной форм обучения
направления подготовки 09.03.04 «Программная инженерия»

Авторская редакция

Подписано в печать 16.01.19	Формат 60x84 1/16	Бумага тип. 65г/м ²
Печать цифровая	Усл. печ. л. 1,75	Уч. изд. л. 1,75
Заказ 8	Тираж 25	Не для продажи

БИЦ Курганского государственного университета.

640020, г. Курган, ул. Советская 63/4

Курганский государственный университет.