

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
"Оренбургский государственный университет"

Индустриально-педагогический колледж
Отделение автоматизации информационных и технологических процессов

А.В. Зобин

ИССЛЕДОВАНИЕ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Методические указания
к лабораторной работе

Рекомендовано к изданию Редакционно–издательским советом
Государственного образовательного учреждения
высшего профессионального образования
"Оренбургский государственный университет"

Оренбург
ИПК ГОУ ОГУ

2010

УДК 62-52(07)

ББК 32.965я7

3-78

Рецензент – доцент, кандидат технических наук Н.Ю. Глинская

- Зобин, А.В.**
3-78 Исследование аналого-цифрового преобразователя: методические указания к лабораторной работе / А.В. Зобин; Оренбургский гос. ун-т. - Оренбург: ОГУ, 2010. - 24 с.

Основное содержание: виды АЦП и их особенности; основные характеристики АЦП; принципы построения АЦП; исследование аналого-цифрового преобразователя.

Методические указания по дисциплине “Типовые элементы и устройства систем автоматического управления“ предназначены для студентов, обучающихся в колледжах по специальности 220301 Автоматизация технологических процессов и производств (по отраслям) очной формы обучения.

УДК 62-52(07)

ББК 32.965я7

© Зобин А.В., 2010

© ГОУ ОГУ, 2010

Содержание

Введение	4
1 Общие положения	5
1.1 Виды АЦП и их особенности.....	5
1.2 Основные характеристики АЦП.....	6
1.3 Принципы построения АЦП	9
2 Исследование аналого-цифрового преобразователя	18
2.1 Цель работы	18
2.2 Порядок выполнения лабораторной работы	18
2.3 Содержание отчета	18
Список использованных источников	24

Введение

Основными устройствами измерительной техники и информационно-управляющих устройств являются измерительные преобразователи. Основные требования, предъявляемые к преобразователям, - это точность и быстродействие измерения, а также минимальное влияние окружающей среды на их работу.

АЦП заменяют непрерывный по уровню и по времени сигнал, поступающий на вход преобразователя, числом, т.е. выполняют квантование входного сигнала по уровню и по времени. Числовая величина на выходе преобразователя выражается обычно в виде кода.

Замена непрерывного сигнала кодом позволяет:

- получать и фиксировать показания в удобной числовой форме;
- применять для обработки полученной информации ЭВМ;
- облегчить требования к каналу связи, служащему для передачи информации;
- повысить устойчивость системы по отношению к помехам и изменениям внешних условий;
- хранить в течение долгого срока большой объем информации;
- использовать цифровые вычислительные машины в системах управления.

Область применения АЦП:

- в приборах с цифровым отсчетом (счетчики, цифровые вольтметры, и др);
- в системах обтекающего контроля (для согласования аналоговых датчиков с цифро-печатающим регистрирующим устройством);
- в телеметрических системах измерения;
- в системах автоматической обработки результатов измерений (для согласования аналоговых датчиков с цифровой вычислительной машиной);
- в системах программного управления;

1 Общие положения

1.1 Виды АЦП 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. Все другие величины перед подачей на такой АЦП нужно предварительно преобразовывать в напряжение.

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:

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

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 1.

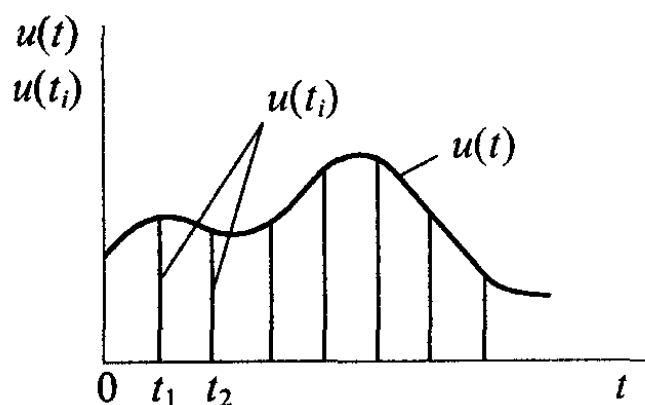


Рисунок 1 - Процесс дискретизации непрерывного сигнала $u(t)$

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 $u(t)$ принимает вид ступенчатой кривой $u_K(t)$ показанной на рисунке 2.

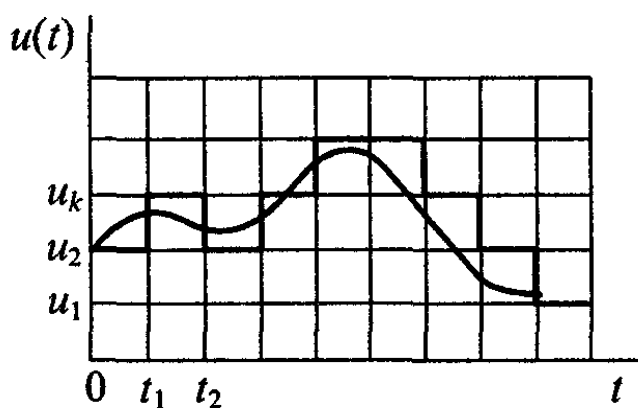


Рисунок 2 - Процесс квантования непрерывного сигнала $u(t)$

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.

1.2 Основные характеристики АЦП

Любой АЦП является сложным электронным устройством, которое может быть выполнено в виде одной интегральной микросхемы или содержать большое количество 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.

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 $(1024)^{-1} \approx 10^{-3} = 0,1\%$. Если напряжение шкалы для такого АЦП равно 10 В, 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 напряжений двух соседних квантов: $DNL = h_i - h_{i+1}$. Определение дифференциальной нелинейности показано на рисунке 3.

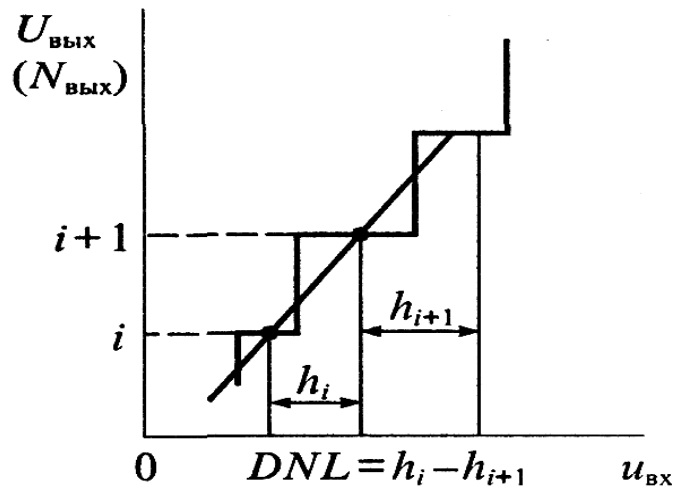


Рисунок 3 - Определение дифференциальной нелинейности

Интегральная нелинейность АЦП (INL) характеризует идентичность приращений во всем диапазоне входного сигнала. Обычно ее определяют, как показано на рисунке 4, по максимальному отклонению сглаженной характеристики преобразования от идеальной прямой линии, т. е. $INL = u'_i - u_i$.

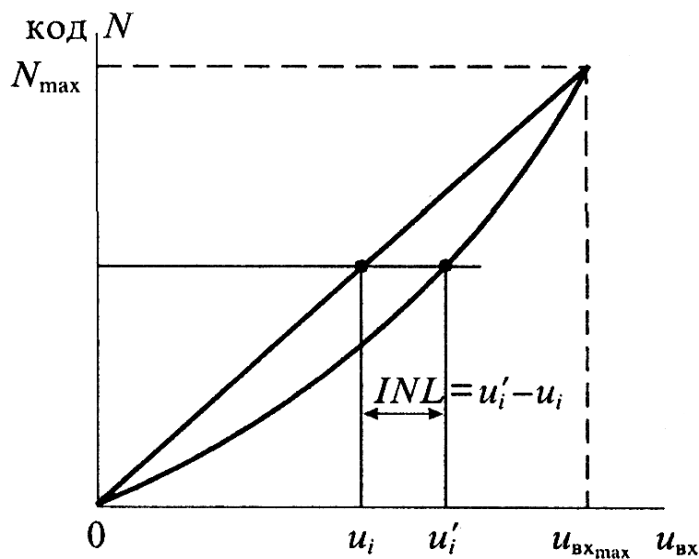


Рисунок 4 - Определение интегральной нелинейности

Время преобразования $T_{пр}$ 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.

Максимальная частота дискретизации - его 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 пригодно не для всех типов АЦП.

1.3 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 5.

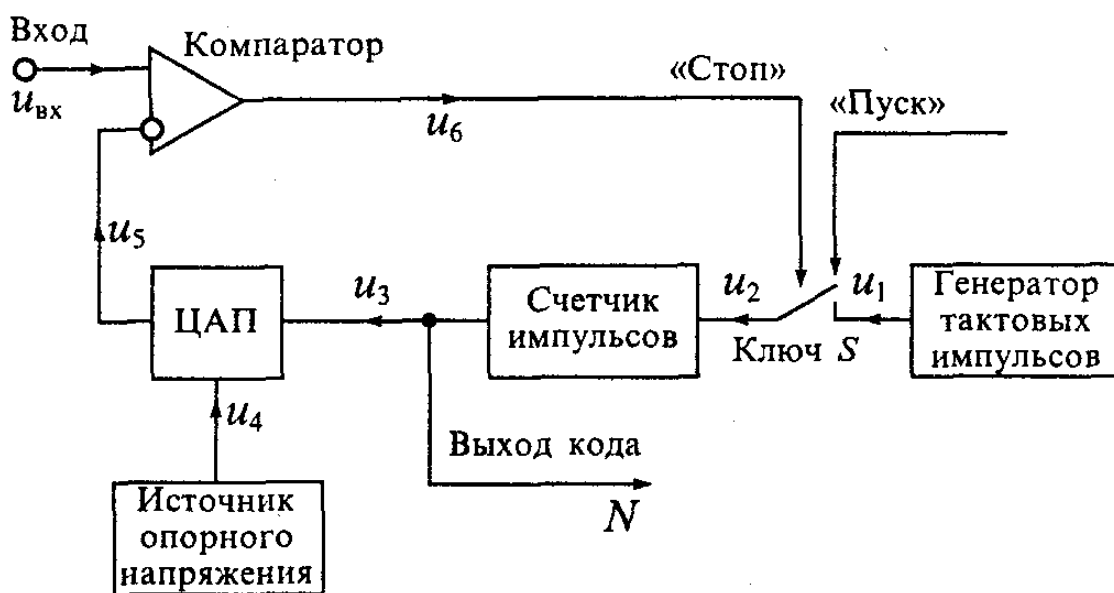


Рисунок 5 - Структурная схема АЦП последовательного счета

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 S 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 $u_{\text{вх}} = u_5$, снимается с выходного регистра счетчика.

Графики, иллюстрирующие процесс преобразования напряжения в цифровой код, приведены на рисунке 6.

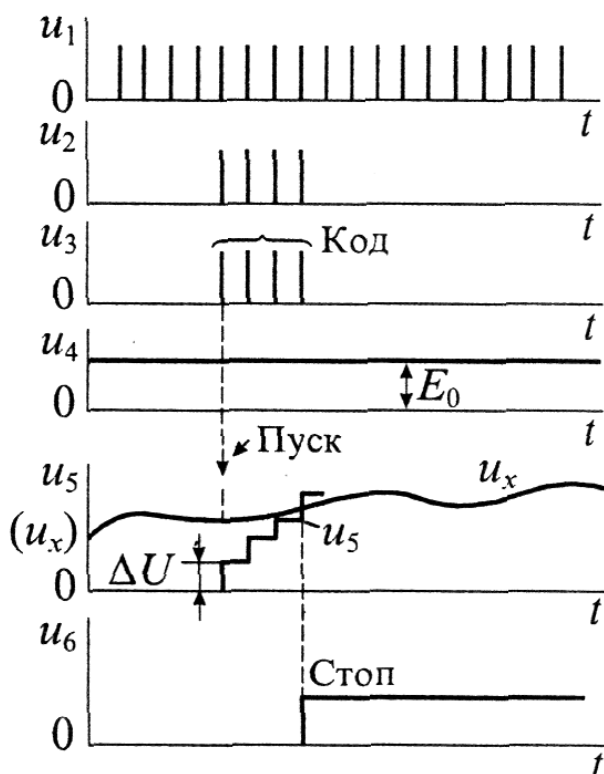


Рисунок 6 - Графики процесса преобразования

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:

$$T_{np} = (2^n - 1) \cdot T. \quad (2)$$

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

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

что обеспечивает максимальную частоту преобразования около 1 кГц.

Уравнение преобразования АЦП последовательного счета можно записать в виде:

$$k\Delta U = u_{вх}, \quad (3)$$

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 7.

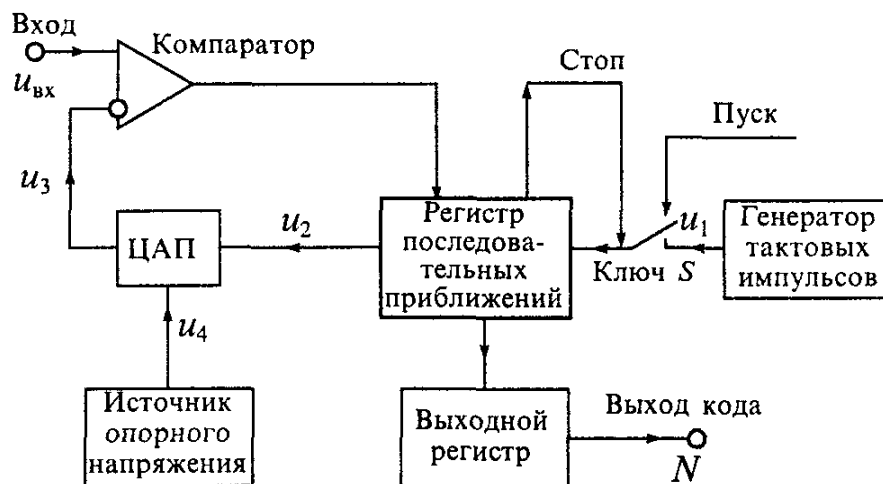


Рисунок 7 - Структурная схема АЦП последовательного приближения

По сравнению со схемой АЦП последовательного счета в ней сделано одно существенное изменение — 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 $u_{вх}$ 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 8.

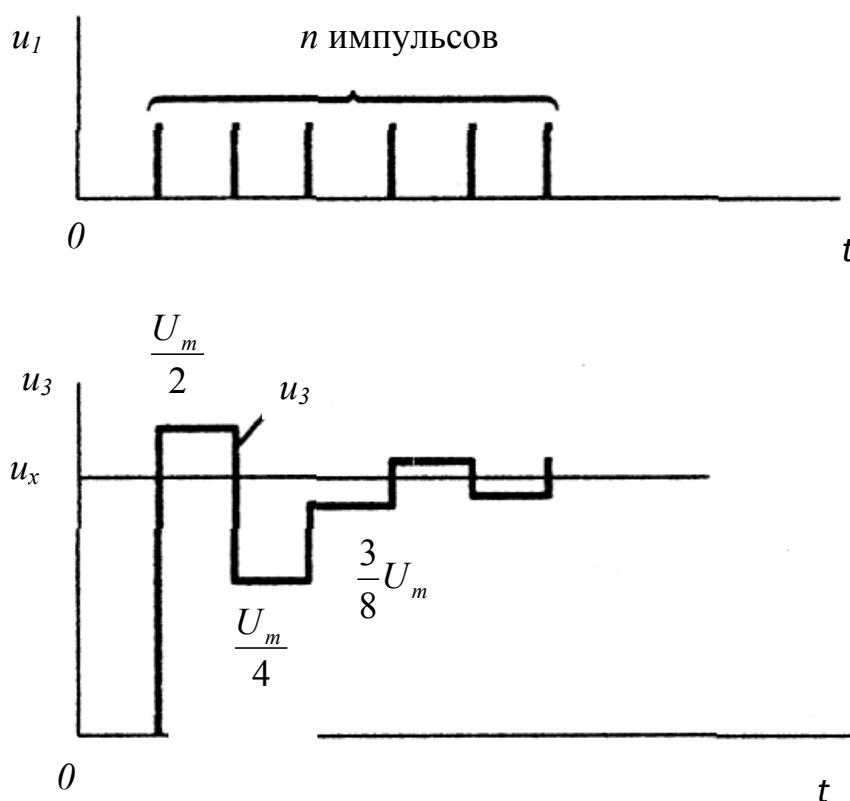


Рисунок 8 - Графики процесса преобразования

В качестве примера на рисунке 9 показана диаграмма переходов для трехразрядного АЦП последовательного приближения.

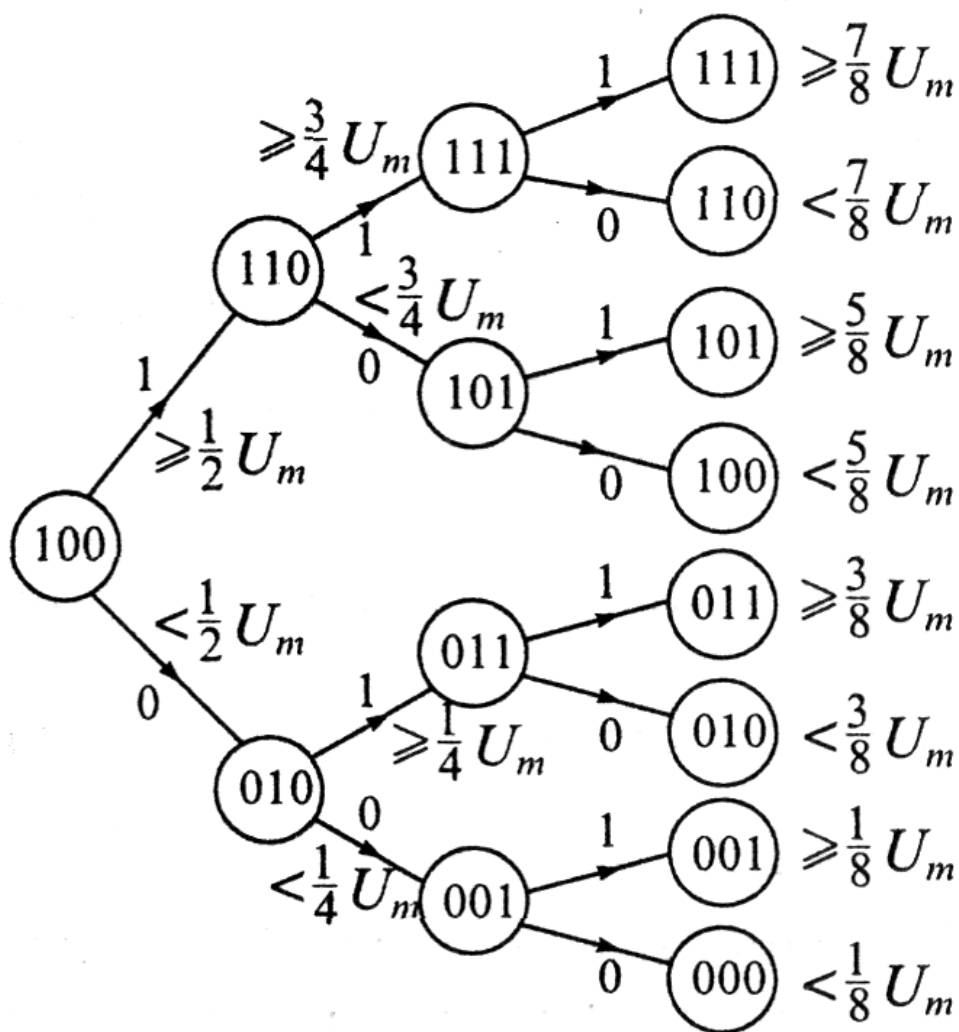


Рисунок 9 - Диаграмма последовательности переходов для трехразрядного АЦП

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 $u_{вх}$, чем $U_m/2$. На следующем шаге определяется, в какой четверти диапазона находится $u_{вх}$. 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 10.

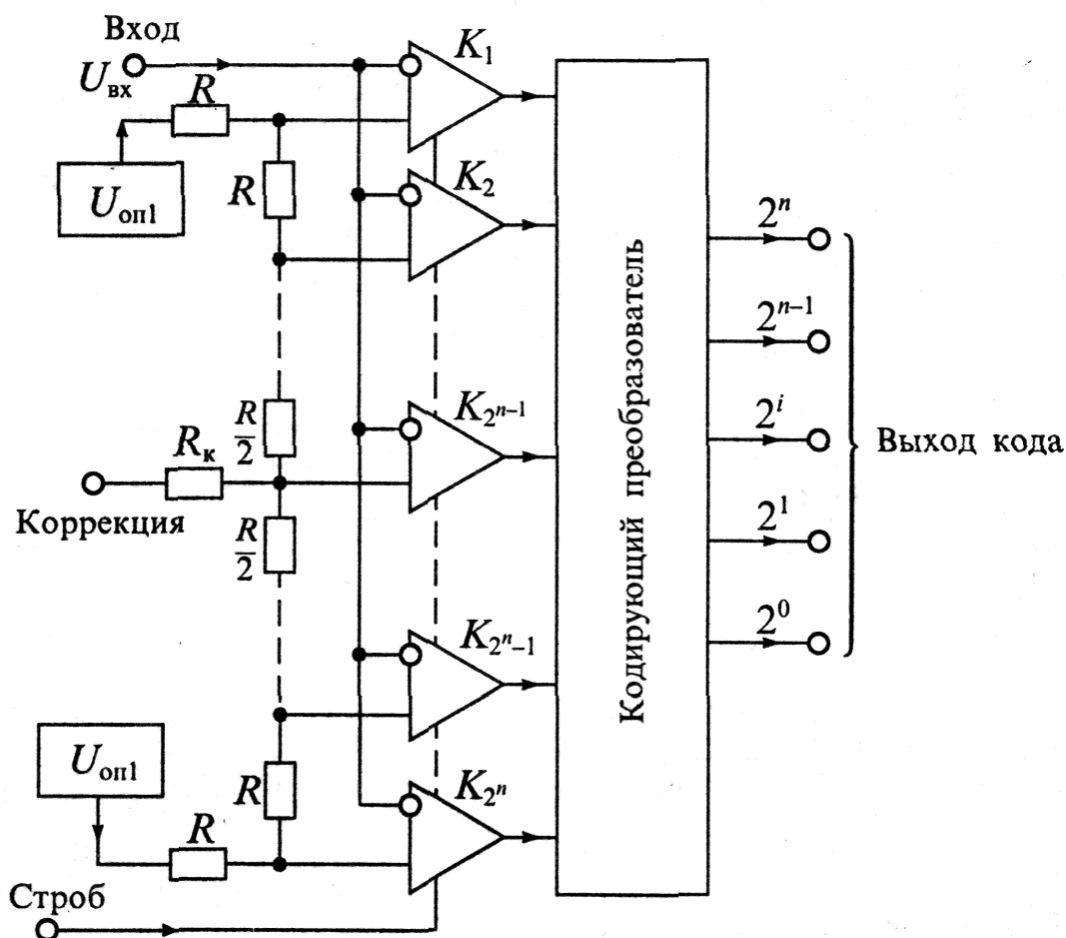


Рисунок 10 - Структурная схема параллельного АЦП

Преобразователь осуществляет одновременное квантование входного сигнала $u_{вх}$ 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 $u_{вх}$ на их выходах получим квантованный сигнал, представленный в унитарном коде.

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.

Делитель опорного напряжения представляет собой набор низкоомных резисторов с сопротивлением около 1 Ом. По выводу «Коррекция» возможно проведение коррекции напряжения смещения нулевого уровня на входе, а по выводу U_{on2} — абсолютной погрешности преобразования в конечной точке шкалы. Номинальные значения опорных напряжений имеют значения: $U_{on1} = -0,075 \dots 0$ В, и $U_{on2} = -2,1 \dots -1,9$ В. Типовая задержка срабатывания компараторов около 7 нс.

Структурная схема *последовательно-параллельного АЦП* приведена на рисунке 11.

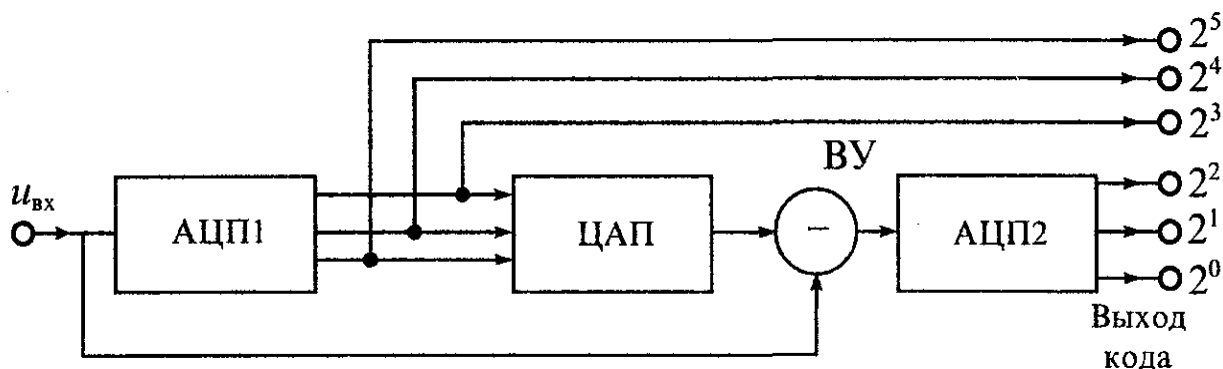


Рисунок 11 - Структурная схема параллельно-последовательного АЦП

Такой АЦП работает в несколько тактов. В первом такте АЦП преобразует старшие разряды входного напряжения $u_{вх}$ в цифровой код (на схеме это разряды $2^3 \dots 2^5$). Затем во втором такте эти разряды преобразуются с помощью ЦАП в напряжение, которое вычитается из входного сигнала в вычитающем устройстве ВУ. В третьем такте АЦП2 преобразует полученную разность в код младших разрядов входного напряжения $u_{вх}$.

Такие преобразователи характеризуется меньшим быстродействием по сравнению с параллельными, но имеют меньшее число компараторов. Так, например, для 6-ти разрядного параллельного АЦП необходимо 64 компаратора, а для последовательно-параллельного АЦП — всего 16.

АЦП состоит из генератора линейно-изменяющегося напряжения ГЛИН, двух компараторов $K1$ и $K2$, формирователя длительности импульса $\tau_{и}$, генератора тактовых импульсов и счетчика, с выхода которого снимается код преобразованного напряжения. Первый импульс u_2 формируется при сравнении напряжения $u_{вх}$ с напряжением u_1 , а второй импульс u_3 формируется при достижении напряжением u_1 нулевого уровня. Быстродействие таких АЦП невелико: время преобразования в лучшем случае составляет 20...50 мкс.

Уравнение, описывающее работу АЦП, можно определить следующим образом. Напряжение u_1 , вырабатываемое ГЛИН, имеет вид:

$$U_1 = U_m - kt, \quad (4)$$

где k — крутизна пилообразного напряжения.

Моменты времени t_2 и t_3 срабатывания компараторов $K1$ и $K2$ определяются по формуле (4):

$$t_2 = \frac{U_m - u_{вх}}{k}; \quad t_3 = \frac{U_m}{k}.$$

Длительность импульса определяется как разность $\tau_u = t_3 - t_2 = u_{вх}/k$. Количество импульсов, подсчитанных счетчиком, равно $N = f_0 \tau_u$, где f_0 — частота тактового генератора.

2 Исследование аналого-цифрового преобразователя

2.1 Цель работы

Научить студента моделировать и исследовать работу аналого-цифровых преобразователей представленных в виде электронной модели в среде «Electronics Workbench».

2.2 Порядок выполнения лабораторной работы

Согласно принципиальным схемам АЦП поочередно составить в среде Workbench схему и выполнить моделирование.

2.3 Содержание отчета

Отчет по проделанной лабораторной работе должен содержать:

- схему исследуемого АЦП;
- результаты расчетов;
- выводы по результатам проделанной работы.

АЦП прямого преобразования

Преобразователь постоянного положительного напряжения в частоту (смотри рисунок 14) выполнен на двух операционных усилителях (ОУ).

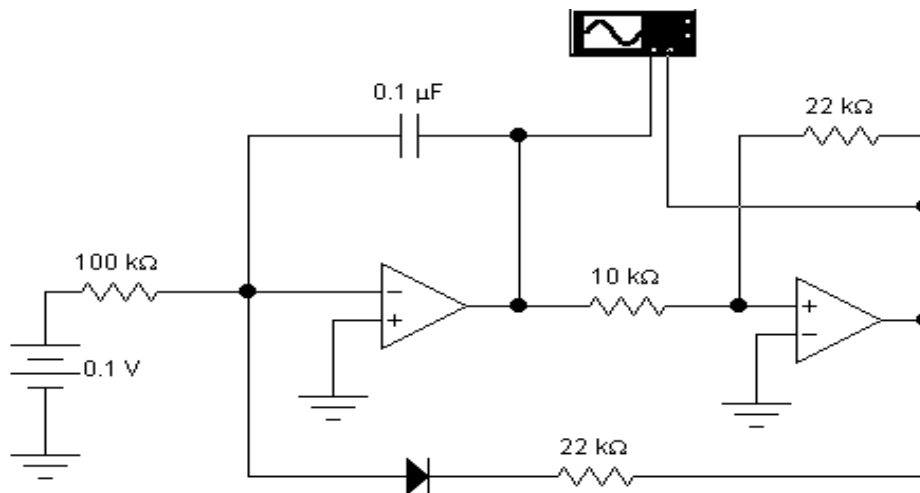


Рисунок 14 - Преобразователь постоянного положительного напряжения в частоту

Усилитель OUI используется в интеграторе, а $OUI2$ — в регенеративном компараторе с гистерезисом. Когда выходное напряжение компаратора U_f имеет максимальное положительное значение U_j , диод VD смещен в обратном направлении и напряжение U_s на выходе OUI (см. осциллограммы на рисунке 15) уменьшается по линейному закону со скоростью, определяемой амплитудой входного положительного сигнала U_i , до тех пор, пока не достигнет значения $U_1R1/R2$. В этот момент компаратор переключается в другое состояние, при котором напряжение на его выходе равно максимальному отрицательному значению U_2 , при этом диод VD открывается и выходное напряжение интегратора быстро нарастает до значения $U_2R1/R2$, после чего компаратор возвращается в первоначальное состояние и цикл повторяется.

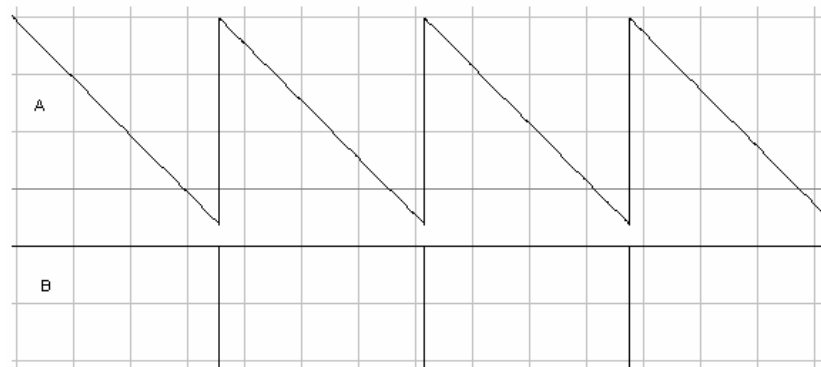


Рисунок 15 - Осциллограммы

Так как время нарастания выходного напряжения интегратора значительно меньше времени спада, которое обратно пропорционально амплитуде входного сигнала, частота циклов повторения F будет прямо пропорциональна входному напряжению. Пренебрегая собственным временем переключения компаратора, можно записать следующее выражение для частоты выходных импульсов:

$$F = \frac{U_i R3}{R1 \cdot C \cdot R4 \cdot (U_1 - U_2)} \approx 1000 \cdot U_i. \quad (9)$$

На самом деле размах напряжения U_s на выходе OUI несколько больше величины $(R1/R2)(U_1 - U_2)$ из-за отличного от нуля значения времени переключения компаратора, а частота соответственно меньше значения,

определяемого выражением (9), причем это расхождение будет особенно значительным при больших амплитудах входного сигнала.

Задание к лабораторной работе

- 1 Проверить работоспособность схемы АЦП и исследовать зависимость частоты выходного сигнала от входного напряжения в диапазоне от 20 мВ до 10 В.
- 2 Проверить справедливость формулы.

Контрольные вопросы

- 1 Что из себя представляет АЦП прямого преобразования?
- 2 В чем заключается суть метода прямого преобразования?
- 3 Область применения АЦП?

АЦП параллельного типа

АЦП, представленный на рисунке 16 отличается самым высоким быстродействием.

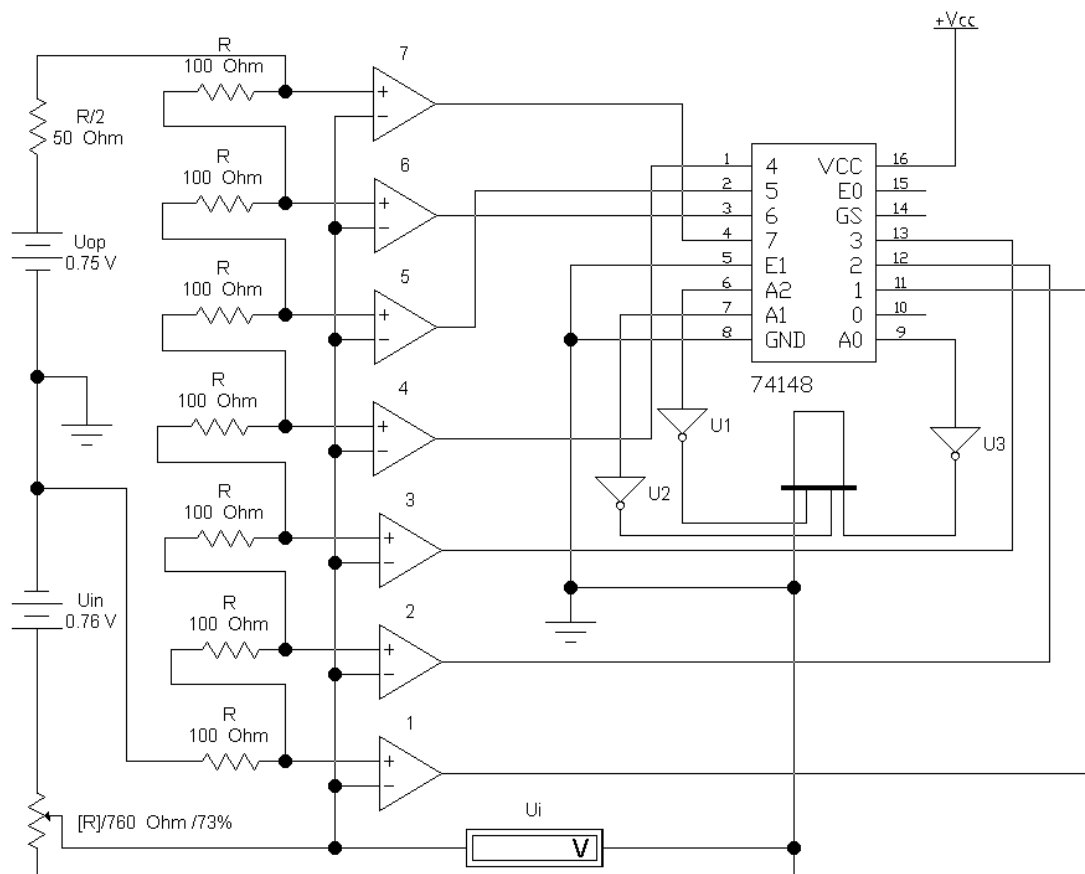


Рисунок 16 – Схема АЦП параллельного типа

В трехразрядном АЦП в качестве компараторов использованы ОУ 1—7 типа Ideal, в диалоговых окнах которых изменены следующие параметры: $V_{sw+} = 5 \text{ В}$, $V_{sw-} = 0 \text{ В}$. Это необходимо для согласования по уровню логических сигналов с приоритетным шифратором 74148 (КМ555ВИ1).

Как видно из рисунка 16, на неинвертирующие входы подаются опорные уровни от $U_{op} \cdot R/(7R + R/2) = 0,75 \cdot 100/(700 + 50) = 0,1 \text{ В} = 100 \text{ мВ}$ для ОУ 1 до $U_{op} \cdot 7R/(7R + R/2) = 0,75 \cdot 700/(700 + 50) = 0,7 \text{ В} = 700 \text{ мВ}$ для ОУ 2 с шагом 100 мВ. Когда входное напряжение U_i , подаваемое от источника U_{in} через переменный резистор на все инвертирующие входы ОУ, меньше 100 мВ, то все компараторы находятся в исходном состоянии и на их выходах формируются сигналы логической единицы (+5 В), которые не являются активными для шифратора. Напомним, что все входы и выходы шифратора инверсные. Поэтому для получения прямого отсчета формируемого кода алфавитно-цифровой индикатор подключен к выходам А0-А2 через инверторы U1-U3.

Таким образом, при $U_i < 100 \text{ мВ}$ на индикаторе будет десятичный код 0 (двоичный 000); при $200 > U_i > 100 \text{ мВ}$ — 1 (001), хотя сработает и первый компаратор; при $300 > U_i > 200 \text{ мВ}$ — 2 (010), хотя сработают и первый и второй компараторы; при $400 > U_i > 300 \text{ мВ}$ — 3 (011) и т. д. Наконец, при $U_i > 700 \text{ мВ}$ сработают все компараторы, однако в силу приоритетности старшего разряда на индикаторе будет зафиксирован десятичный код 7 (111).

Задание к лабораторной работе

Проверить работоспособность схемы АЦП и составить таблицу состояний шифратора с указанием сигналов на всех входах (1—7) и выходах (А0—А2) при изменении входного сигнала в диапазоне от 0 до 760 мВ.

Контрольные вопросы

- 1 Что из себя представляет АЦП параллельного типа?
- 2 Какими преимуществами и недостатками обладает АЦП параллельного типа?

АЦП уравнивающего типа

В четырехразрядном АЦП на рисунке 17 измеряемое напряжение U_x сравнивается с падением напряжения на резисторах $R—8R$, включаемых в цепь калиброванного источника тока I_s двойными переключателями 0—3; вторая половина этих переключателей используется в схеме индикации получаемого кода в двоичной и десятичной форме.

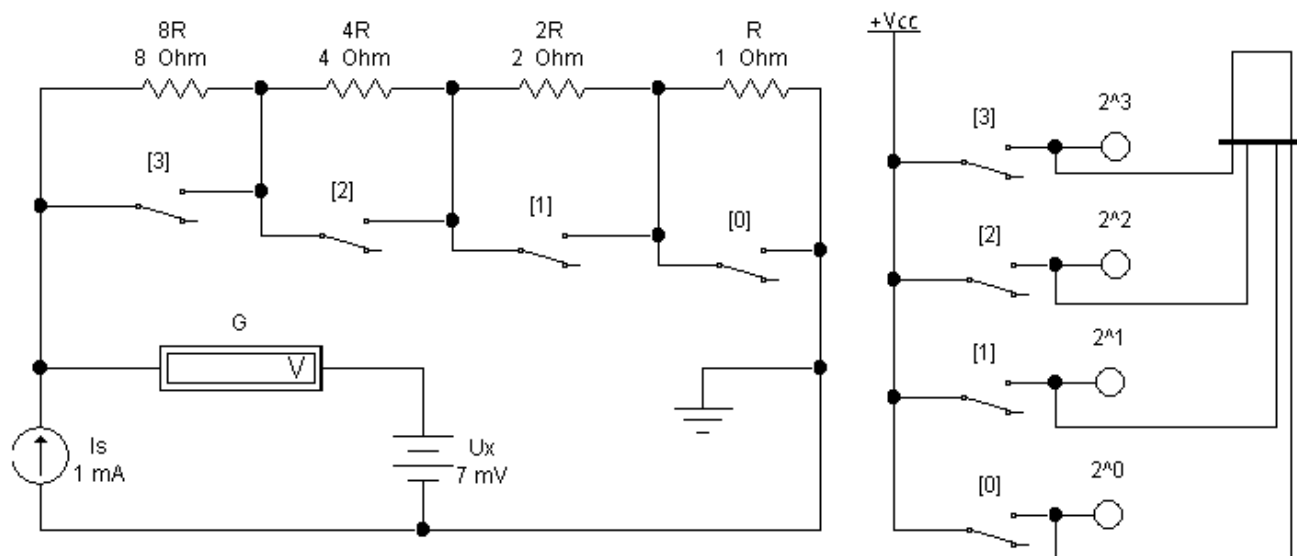


Рисунок 17 – Упрощенная схема четырехразрядного АЦП

Индикатором равенства измеряемого и компенсирующего напряжения служит гальванометр G : при равенстве указанных напряжений гальванометр будет иметь нулевые показания.

Как следует из рисунка 17, самая первая (старшая) ступень равна 8 мВ, вторая — 4 мВ, третья — 2 мВ и последняя (самая младшая) — 1 мВ. Перед уравниванием все переключатели находятся в замкнутом положении, и нуль-орган (гальванометр G) показывает, что измеряемое напряжение U_x превышает компенсирующее, равное в исходном состоянии нулю. Первой включается первая ступень, включающая компенсирующее напряжение величиной 8 мВ. Поскольку $U_x < 8$ мВ, то нуль-орган зафиксирует перекомпенсацию, поэтому эта ступень выключается. На втором шаге включается вторая ступень (4 мВ), при этом нуль-

орган зафиксирует недокомпенсацию, поэтому эта ступень остается включенной и к ней переключателем 1 добавляется третья ступень величиной 2 мВ. Однако и в этом случае нуль-орган фиксирует недокомпенсацию. Поэтому на третьем шаге ключом 0 добавляется четвертая ступень величиной 1 мВ, после чего нуль-органом фиксируется нулевой результат, что соответствует равенству измеряемого и компенсирующего напряжений. При этом на выходе «преобразователя» получаем двоичный код 0111 и его десятичный эквивалент 7.

Возможен и другой способ уравнивания, при котором этот процесс начинается с четвертой ступени (1 мВ). Если при этом фиксируется недокомпенсация, то переключатель 0 выключается и переключателем 1 включается третья ступень (2 мВ). При недокомпенсации переключателем 0 дополнительно подключается четвертая ступень, что в сумме дает 3 мВ. При недокомпенсации четвертая и третья ступени выключаются и переключателем 2 включается третья ступень (4 мВ). Далее поочередно подключаются четвертая и третья ступени, что обеспечивает увеличение компенсирующего напряжения на каждом шаге уравнивания на величину одного кванта, равного в нашем случае 1 мВ. Уравнивание заканчивается, когда при очередном добавлении одного кванта к компенсирующему напряжению последнее становится больше измеряемого.

Задание к лабораторной работе

Провести сравнительный анализ двух способов уравнивающего преобразования по длительности процесса уравнивания.

Контрольные вопросы

- 1 Что из себя представляет АЦП уравнивающего типа?
- 2 Охарактеризовать два способа уравнивающего преобразования.
- 3 Как называются рассмотренные алгоритмы преобразования?

Список использованных источников

1 **Келим, Ю. М.** Типовые элементы систем автоматического управления: учебное пособие для студентов учреждений среднего профессионального образования / Ю.М. Келим. - М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2007. - 384 с. - ISBN 5-8199-0043-X (ФОРУМ), ISBN 5-16-000989-2 (ИНФРА-М).

2 **Иващенко, Н.Н.** Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем: учеб. для вузов / Н.Н. Иващенко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1978. – 736 с.

3 **Прянишников, В.А.** Электроника: полный курс лекций / В.А. Прянишников. – 4-е изд. – СПб.: КОРОНА принт, 2004. – 416 с., ил. - ISBN 5-7931-0018-0;

4 **Карлащук, В.И.** Электронная лаборатория на IBM PC: лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и MATLAB / В.И. Карлащук. – 5-е изд. — М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 800 с. - ISBN 5-98003-151-0.

5 **Немцов, М.В.** Электротехника и электроника: учебник для вузов. / М.В. Немцов. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 597[3] с., ил. - ISBN 5-7046-0814-0