

Лабораторная работа №7

ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И АНАЛОГОВО-ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Цель работы: изучение устройства и принципов работы цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) и аналогово-цифровые преобразователи (АЦП).

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1 Структура резистивных матриц ЦАП

При построении устройств, связывающих цифровое устройство с объектами, использующими информацию в непрерывно изменяющейся форме, требуется преобразование информации из аналоговой формы в цифровую и из цифровой в аналоговую. Устройство, осуществляющее автоматическое преобразование непрерывно изменяющихся во времени аналоговых значений физической величины (напряжения, тока) в эквивалентные значения числовых кодов, называют **аналого-цифровым преобразователем** (АЦП). Устройство, осуществляющее автоматическое преобразование входных значений, представленных числовыми кодами, в эквивалентные им значения какой-нибудь физической величины (напряжения, тока и др.), называют **цифро-аналоговым преобразователем** (ЦАП).

Итак, цифроаналоговый преобразователь предназначен для прямого преобразования входного двоичного кода, например, $A_i(a_2a_1a_0)$ в аналоговый эквивалент. Выходная аналоговая величина, обычно напряжение $u_{вых}$, иногда нормированное $u_{вых.н} = u_{вых}/u_{вых.мах}$, соответствует кодовой комбинации A_i , поступившей на вход, и воспроизводится для дискретных моментов времени (рисунок 1а). Сменяющиеся входные цифровые коды обуславливают сменяющееся ступенчатое напряжение на выходе (L – идеальная передаточная характеристика ЦАП).

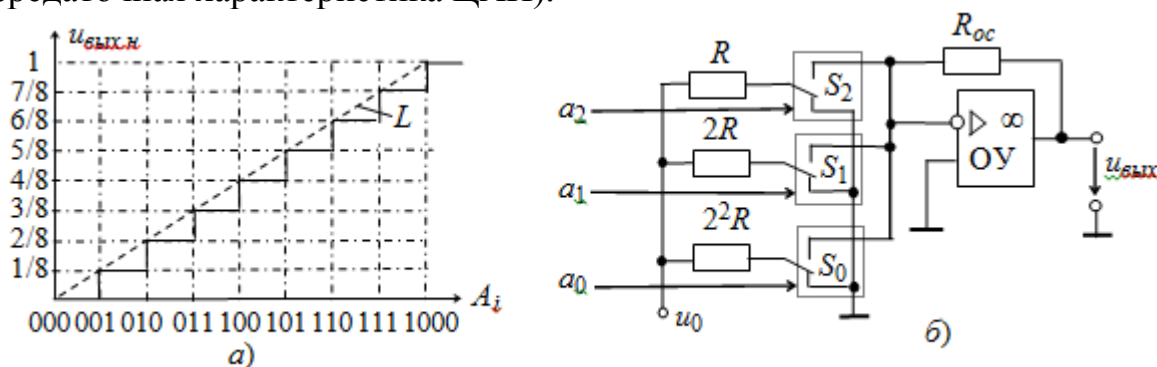


Рисунок 1 – ЦАПс весовыми двоично-взвешенными сопротивлениями

Существует два широко распространенных способа цифроаналогового преобразования с использованием:

- резистивной матрицы с весовыми двоично-взвешенными сопротивлениями;

- резистивной матрицы с двумя номиналами сопротивлений, которую обычно называют матрицей $R-2R$.

ЦАПс весовыми двоично-взвешенными сопротивлениями (рисунок 1б) состоит: из n переключателей S_i (по одному на каждый разряд), управляемых двоичным кодом A_i ; из матрицы двоично-взвешенных резисторов с сопротивлениями $2^{n-1}R$; источника опорного напряжения u_0 и выходного операционного усилителя ОУ, с помощью которого суммируются токи, протекающие через резисторы с двоично-взвешенными сопротивлениями, для получения аналогового выходного напряжения $u_{вых}$.

Каждый i -й разряд управляет переключателем S_i , который подключается к источнику опорного напряжения u_0 , когда $a_i = 1$, или к общей шине, когда $a_i = 0$. Сопротивления резисторов $2^{n-1}R$ (n – номер разряда входного кода), соединенных с ключами, таковы, что обеспечивают пропорциональность в них тока двоичному весу соответствующего разряда входного кода. Следовательно, ток на входе ОУ и выходное напряжение ЦАП:

$$i = \frac{a_{n-1}u_0}{R} + \frac{a_{n-2}u_0}{2R} + \dots + \frac{a_1u_0}{2^{n-1}R} + \frac{a_0u_0}{2^n R}; \quad u_{вых} = -R_{oc}i = -u_0 \frac{R_{oc}}{2^n R} \sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i.$$

Напряжение на выходе ЦАП пропорционально "весу" присутствующего на входах кода, а максимальное значение имеет место, когда все разряды примут значение 1, т. е.

$$u_{max} = \left| u_0 \frac{(2^n - 1)R_{oc}}{2^n R} \right|,$$

и оно всегда меньше опорного напряжения на шаг квантования $u_0 R_{oc} / (2^n R)$.

Номиналы сопротивлений резисторов в младшем и старшем разрядах отличаются в 2^{n-1} раз и должны быть выдержаны с высокой точностью. Например, для 12-разрядного ЦАП использование в старшем разряде резистора с сопротивлением 10 кОм потребует включения в младший разряд преобразователя резистора с сопротивлением порядка 20 МОм. Широкий набор номиналов резисторов и требования их высокой точности, в особенности при значительном числе разрядов n входного кода, создают трудности при реализации ЦАП посредством интегральной технологии.

Во второй схеме **ЦАП с матрицей $R-2R$** используют резисторы с двумя номиналами сопротивлений, причём резисторы с сопротивлением R включены в каждый разряд (рисунок 2 при $n = 3$). Однако в этой схеме увеличиваются значения паразитных ёмкостей.

Принцип функционирования схемы основан на свойстве резистивного делителя $R-2R$ сохранять постоянное сопротивление нагрузки для источника опорного напряжения при замыкании ключей. Вследствие этого на выводах резистора R , начиная со старшего $n-1$ разряда, опорное напряжение последовательно делится пополам, как и входящий в каждый узел матрицы ток. При этом напряжение на выходе преобразователя с матрицей $R-2R$:

$$u_{\text{вых}} = -u_0 \frac{R_{oc}}{R} (a_{n-1} 2^{-1} + a_{n-2} 2^{-2} + \dots + a_1 2^{-(n-1)} + a_0 2^{-n}) = -u_0 \frac{R_{oc}}{2^n R} \sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i.$$

Таким образом, выходное напряжение ЦАП пропорционально сумме напряжений со своими весами, обусловленными переключателями, подключенными к источнику опорного напряжения u_0 .

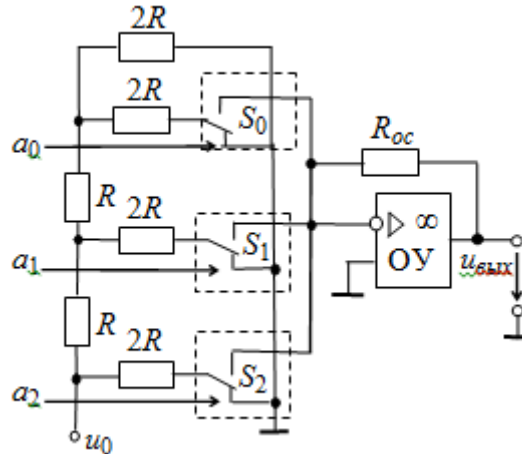


Рисунок 2 – ЦАП с матрицей R-2R

Недостатком ЦАП с матрицей R - $2R$ является сильное влияние на точность преобразования нестабильности сопротивлений переключателей в замкнутом состоянии, что снижает временную и температурную стабильность характеристик ЦАП. Этот недостаток в значительной степени удаётся устранить в схемах код-напряжение, выполненных на базе полупроводниковой технологии с использованием тонкоплёночных резисторов на кристалле и переключателей на КМДП-транзисторах, в которых нелинейность от $\pm 0,8\%$ до $\pm 0,003\%$ от опорного напряжения u_0 , время установления тока от 5 мкс до десятых долей микросекунд и менее, часто выходной диапазон напряжения ± 5 В. Опорное напряжение в схемах ЦАП может выбираться разной полярности.

2 Основные параметры ЦАП

Основными параметрами ЦАП являются число разрядов $n = 8, \dots, 24$ и **абсолютная разрешающая способность** – среднее значение минимального изменения сигнала на выходе ЦАП, обусловленное увеличением или уменьшением его кода на единицу. Теоретически ЦАП, преобразующий n -разрядные двоичные коды, должен обеспечить 2^n различных значений выходного сигнала с разрешающей способностью $1/(2^n - 1)$. При числе разрядов $n = 8$ количество независимых квантов (ступеней) выходного напряжения ЦАП равно $2^8 - 1 = 255$, при $n = 12$, $2^{12} - 1 = 4095$ и т. д.

Абсолютное значение минимального кванта напряжения определяется как предельным принимаемым числом $2^n - 1$, так и максимальным выходным напряжением ЦАП, по-другому называемым напряжением шкалы или опорным напряжением u_0 . Значение абсолютной разрешающей

способности ЦАП, часто обозначаемое ЗМР (значение младшего разряда), при $n = 8$ и опорном напряжении $u_o = 5$ В

$$\text{ЗМР} = u_o / (2^8 - 1) = 5 / 255 \approx 0,0196 \text{ В} = 19,6 \text{ мВ}.$$

Отличие реального значения разрешающей способности от теоретического обусловлено погрешностями и шумами входящих в ЦАП узлов. Точность ЦАП определяется значением абсолютной погрешности δ_a и нелинейностью преобразователя δ_n . **Абсолютная погрешность δ_a** характеризуется отклонением максимального значения выходного напряжения u_{\max} от расчётного, соответствующего конечной точке характеристики идеального преобразователя, и измеряется обычно в единицах ЗМР.

Нелинейность преобразователя δ_n характеризует отклонение действительной характеристики от линейной (от прямой линии L , рисунок 1а), проведенной через центры ступенек или через нуль и точку максимального значения выходного сигнала.

Из динамических параметров наиболее важным является максимальная частота преобразования f_{\max} (десятки и сотни кГц) – наибольшая частота дискретизации, при которой параметры ЦАП соответствуют заданным значениям.

Работа ЦАП часто сопровождается специфическими переходными импульсами в выходном сигнале, возникающими из-за разности времени открывания и закрывания аналоговых переключателей в ЦАП. Особенно значительно выбросы проявляются, когда входной код 01...111 сменяется кодом 10...000, а переключатель старшего разряда ЦАП открывается позже, чем закрываются переключатели младших разрядов. Вследствие определённой идеализации при моделировании библиотечных ЦАП среды ElectronicsWorkbench не всегда удаётся определить отмеченные выше параметры.

3 Структурная схема АЦП последовательного действия

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) – устройство, предназначенное для преобразования аналоговых величин в их цифровой эквивалент в различных системах исчисления. Входным сигналом АЦП в течение некоторого промежутка времени Δt является постоянное напряжение, равное отсчёту $u_{\text{вх}}(k\Delta t)$ входной аналоговой функции $u_{\text{вх}}$. За это время на выходе АЦП формируется цифровой (обычно двоичный) код

$$A_i(a_{n-1}a_{n-2}\dots a_1a_0),$$

соответствующий дискретному отсчёту напряжения $u_{\text{вх}}(k\Delta t)$. Количественная связь для любого момента времени определяется соотношением

$$A_i = u_{\text{вх}}(k\Delta t) / \Delta u \pm \delta_i,$$

где Δu – шаг квантования входного аналогового напряжения $u_{\text{вх}}$; δ_i – погрешность преобразования напряжения $u_{\text{вх}}(k\Delta t)$ на данном шаге.

Физический процесс аналого-цифрового преобразования состоит из дискретизации по времени аналогового сигнала, квантования по уровню и кодирования. Процесс **дискретизации** аналогового сигнала длительностью $t_{\text{вх}}$ выполняется в соответствии с **теоремой Котельникова**, определяющей необходимый шаг дискретизации $\Delta t \leq 1/(2f_m)$, где f_m – максимальная частота спектра входного сигнала, и число шагов $M = t_{\text{вх}}/\Delta t$.

Процесс **квантования по уровню** дискретизированной функции $u_{\text{вх}}(k\Delta t)$ заключается в отображении бесконечного множества её значений на некоторое множество конечных значений $u_{\text{д}}(k)$, равночислу уровней квантования $N = u_{\text{вх.max}}/\Delta u$. Процесс квантования по уровню (округление каждого значения $u_{\text{вх}}(k\Delta t)$ до ближайшего уровня $u_{\text{д}}(k)$) приводит к возникновению ошибки (шума) квантования, максимальное значение которой $\pm 1/2\Delta u$ определяется разрядностью используемого выходного кода. При увеличении разрядности выходного кода ошибка квантования может быть уменьшена до сколь угодно малой величины, но не может быть сведена к нулю выбором параметров устройства, так как она присуща данному алгоритму.

Процесс **кодирования** заключается в замене найденных квантованных $N + 1$ значений входного сигнала $u_{\text{д}}(k)$ некоторыми цифровыми кодами.

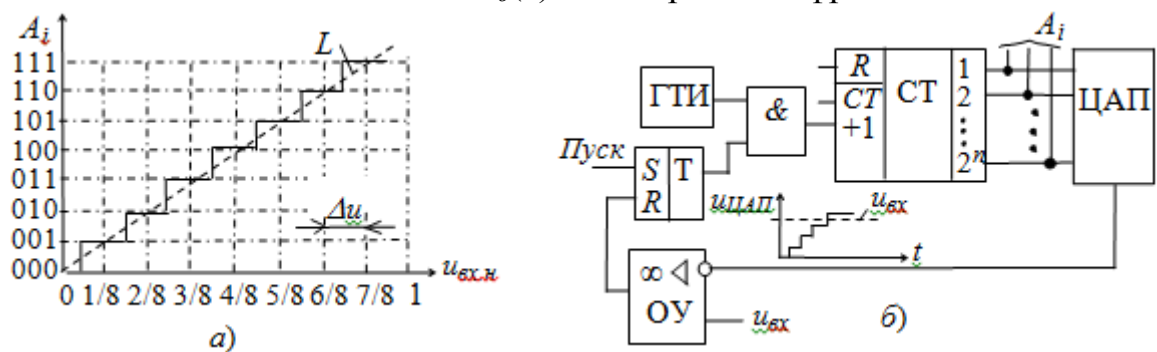


Рисунок 3 – АЦП

На рисунке 3а приведена характеристика идеального АЦП в нормированных единицах входного напряжения $u_{\text{вх.н}} = u_{\text{вх}}/u_{\text{вх.max}}$. Кроме ошибки квантования, при оценке точности АЦП учитывают дополнительные погрешности: **инструментальную** (погрешность смещения нуля, вызывающей смещение пунктирной прямой L влево или вправо от начала координат, рисунок 3а) и **апертурную**, возникающую из-за несоответствия значения входного сигнала $u_{\text{д}}(k)$ преобразованному цифровому коду A_i . Несоответствие возникает, если входной сигнал в течение интервала дискретизации Δt изменяется более чем на значение шага квантования Δu .

4 Основные параметры АЦП

К основным параметрам АЦП относят:

- число разрядов выходного кода $n = 8, \dots, 16$, отображающего исходную аналоговую величину, которое может формироваться на выходе

АЦП. При использовании двоичного кода $n = \log_2(N + 1)$, где $N + 1$ – максимальное число кодовых комбинаций (уровней квантования) на выходе АЦП;

- диапазон изменения входного напряжения $u_{вх.max}$. Отметим, что АЦП может обрабатывать входную информацию в виде однополярного аналогового напряжения с пределами $0 \dots u_{вх.max}$ и двуполярного $\pm u_{вх.max}/2$;

- абсолютная разрешающая способность $ЗМР = \Delta u$ (значение младшего разряда) – среднее значение минимального изменения входного сигнала $u_{вх}$, обуславливающего увеличение или уменьшение выходного кода на единицу. Значение ЗМР определяется разрядностью выходного кода и диапазоном входного напряжения;

- абсолютная погрешность δ_i преобразования в конечной точке шкалы есть отклонение реального максимального значения входного сигнала $u_{вх.max}$ от максимального значения идеальной характеристики L АЦП (рисунок 3а). Обычно δ_i измеряется в ЗМР;

- максимальная частота преобразования (десятки и сотни кГц);

- время преобразования входного сигнала: $t_{пр.max} \leq (1/2)\Delta t$.

Состав АЦП в отличие от ЦАП может изменяться в значительной степени в зависимости от выбранного метода преобразования и способа его реализации. Наибольшее распространение получили три основных метода: последовательного счёта, поразрядного кодирования и считывания.

Метод последовательного счёта основан на уравнивании входной величины суммой одинаковых по величине эталонов (суммой шагов квантования). Момент уравнивания определяется с помощью одного компаратора, а количество эталонов, уравнивающих входную величину, подсчитывается с помощью счётчика.

Метод поразрядного кодирования (уравнивания) предусматривает наличие нескольких эталонов (часто реализованных в виде уравнивающего сдвигающего регистра), обычно пропорциональных по величине степеням числа 2, и сравнение этих эталонов с аналоговой величиной. Сравнение начинается с эталона старшего разряда. В зависимости от результата этого сравнения формируется значение старшего разряда выходного кода. Если эталон больше входной величины, то в старшем разряде ставится 0 и далее производится уравнивание входной величины следующим по значению эталоном. Если эталон равен или меньше входной величины, то в старшем разряде выходного кода ставится 1 и в дальнейшем производится уравнивание разности между входной величиной и первым эталоном.

Наибольшим быстродействием обладают преобразователи, построенные по методу считывания. **Метод считывания** подразумевает наличие $2^n - 1$ эталонов при n -разрядном двоичном коде. Входная аналоговая величина одновременно сравнивается со всеми эталонами. В результате преобразования получается параллельный код в виде логических сигналов на выходах $2^n - 1$ компараторов.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Задание 1.

а) Собрать на рабочем поле ElectronicsWorkbench схему для испытания ЦАП с весовыми резисторами (рисунок 4).

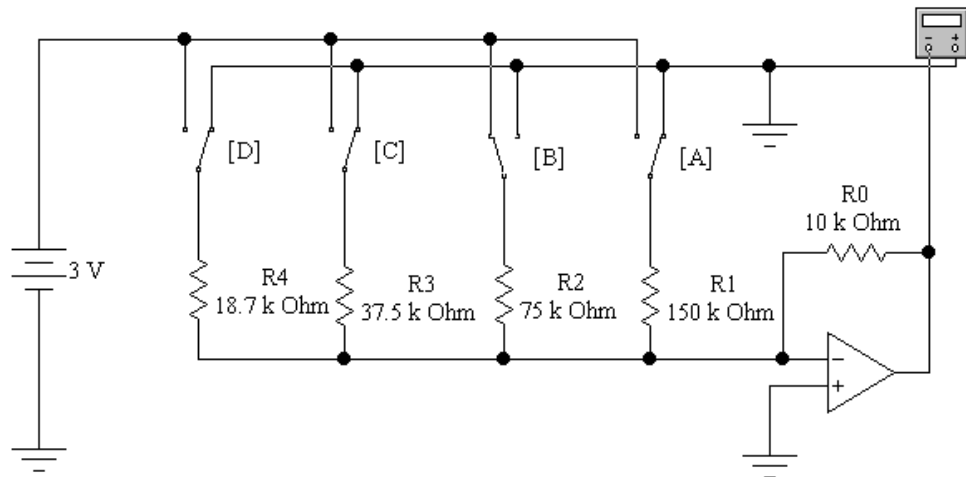


Рисунок 4 – ЦАП с весовыми резисторами

ЦАП состоит из двух блоков. Резистивная схема (матрица) выполнена на резисторах R1...R4. Суммирующий усилитель включает в себя ОУ и резистор обратной связи R₀. Опорное напряжение (3 В) подключается к резисторам матрицы ключами **D**, **C**, **B** и **A**, управляемыми одноименными клавишами клавиатуры и имитирующими преобразуемый код. Выходное напряжение U_{ВЫХ} измеряется мультиметром. Коэффициент усиления рассчитывается по формуле:

$$K = \frac{R_0}{R_n}$$

Тогда U_{ВЫХ} = K U_{ВХ}. **Рассчитайте** коэффициент усиления для каждой логической комбинации (см. таблицу 1).

Переключая A, B, C, D, **подайте** тем самым на вход ЦАП двоичные комбинации, **запишите** показания мультиметра в таблицу и сравните с расчетными значениями.

Таблица 1

N	A	B	C	D	K	U _{ВЫХ}	
						расчетное	измеренное
0	0	0	0	0			
1	1	0	0	0			
2	0	1	0	0			
3	1	1	0	0			
4	0	0	1	0			
..							

16	1	1	1	1			
----	---	---	---	---	--	--	--

б)Собратьна рабочем поле ElectronicsWorkbench схему для испытания ЦАП *лестничного типа* (рисунок 5).

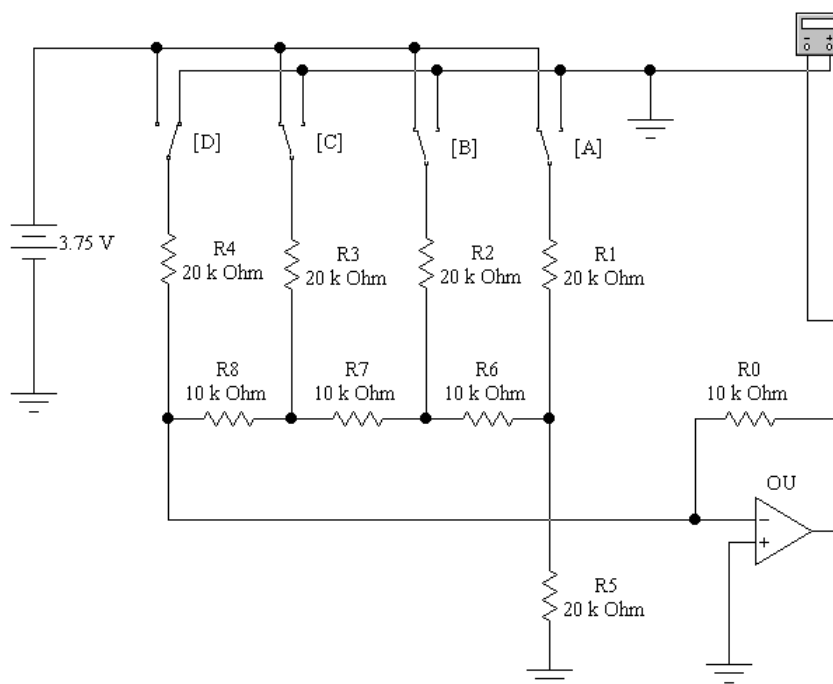


Рисунок 5 – ЦАП лестничного типа (с матрицей R-2R)

ЦАП лестничного типа аналогичен ЦАП с весовыми резисторами. В рассматриваемом примере используется опорное напряжение 3,75 В. Переход к каждой следующей двоичной последовательности на входах приводит к увеличению аналогового выходного сигнала. Опорное напряжение выбрано равным 3,75 В из соображения удобства сопряжения с ИМС семейства ТТЛ при замене ключей А...D такими ИМС. Выходное напряжение ЦАП на рисунке 2 определяется по формуле:

$$U_{\text{ВЫХ}}=U_0R_0 [S_12^n+S_22^{n-1}+\dots+S_i2^{n-i+1}+S_n2] /R2^n ,$$

где S_i – значение цифрового сигнала (0 или 1) на i -том входе, n -число разрядов преобразования (для схемы на рисунке 5 $n = 4$), R – сопротивление резистора матрицы ($R = 20\text{кОм}$ для данной схемы).Для нашей схемы формула примет вид:

$$U_{\text{ВЫХ}}=U_0R_0 [S_D2^4+S_C^3+S_B2^2+S_A2] /R2^n.$$

Переключая А, В, С,D, **подайте** тем самым на вход ЦАП двоичные комбинации, **запишите** показания мультиметра в таблицу и сравните с расчетными значениями.

N	A	B	C	D	U _{ВЫХ}	
					расчетное	измеренное
0	0	0	0	0		
1	1	0	0	0		
2	0	1	0	0		
..						

16	1	1	1	1		
----	---	---	---	---	--	--

в) **Собрать** на рабочем поле ElectronicsWorkbench схему для испытания ЦАП с использованием в качестве коммутирующего устройства двоично-десятичного счетчика ИМС 74160 (рисунок 6).

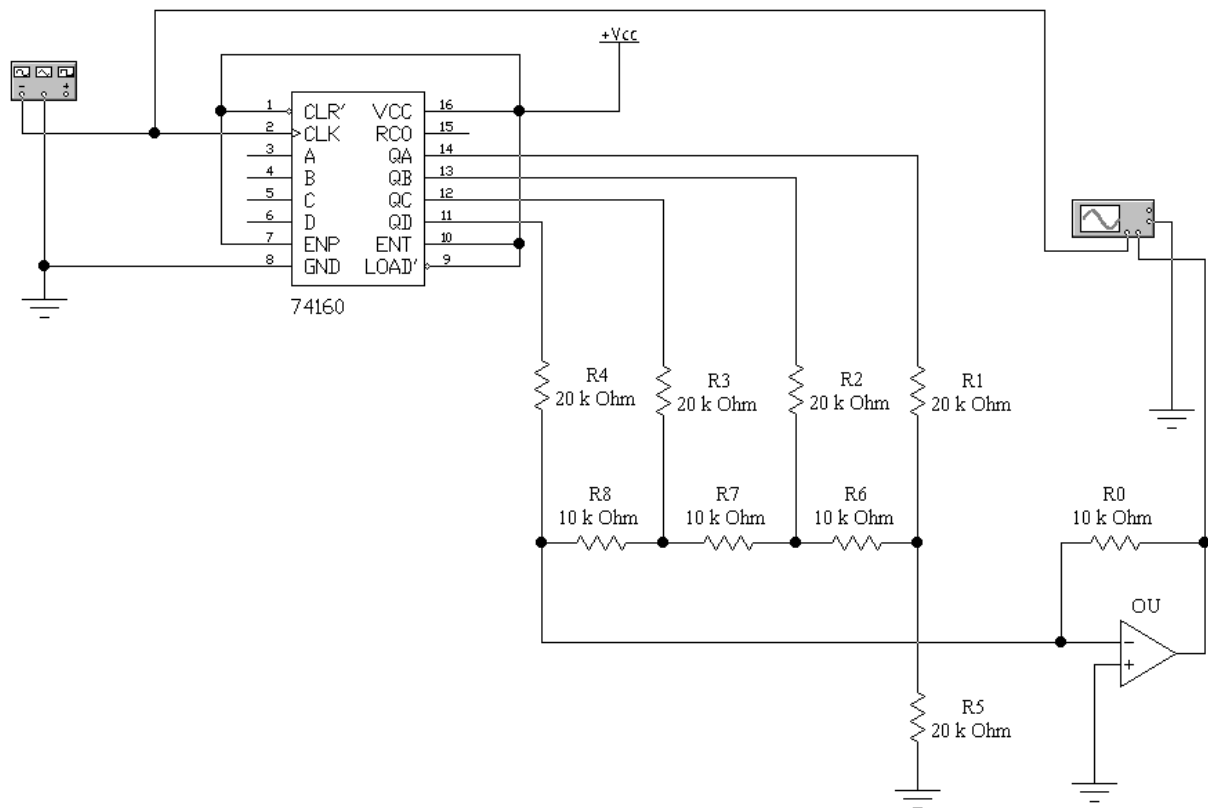


Рисунок 3 – Четырехразрядный ЦАП лестничного типа на базе счетчика ИМС74160

Скопировать схему и показания осциллографа в отчет.

Задание 2.

Собрать на рабочем поле ElectronicsWorkbench схему для испытания АЦП прямого преобразования (рисунок 7). АЦП прямого преобразования являются наиболее простыми и часто встраиваются непосредственно в датчики.

АЦП выполнен на двух ОУ, усилитель OU1 включен в режиме интегратора, а усилитель OU2 – в режиме регенеративного компаратора с гистерезисом. Когда выходное напряжение компаратора U_f имеет максимальное положительное значение U_1 , диод VD смещен в обратном направлении и напряжение U_s на выходе OU1 уменьшается по линейному закону со скоростью, определяемой амплитудой входного положительного сигнала U_0 , до тех пор, пока не достигнет значения $U_1 R_1 / R_2$. В этот момент компаратор переключается в другое состояние, при котором напряжение на его выходе равно максимальному отрицательному значению U_2 , диод VD открывается и выходное напряжение интегратора быстро нарастает до

значения $U_2 R_1 / R_2$. При этом компаратор возвращается в первоначальное состояние и цикл повторяется.

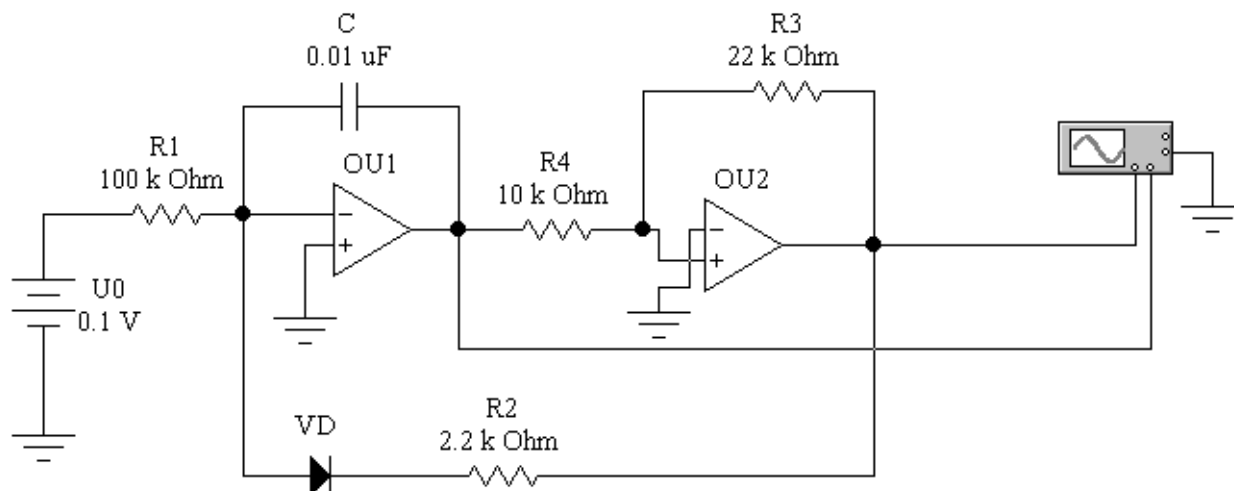


Рисунок 7 –АЦП прямого преобразования

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:

$$F = U_0 R_3 / [R_1 C R_4 (U_1 - U_2)]$$

Используя формулу и параметры схемы, **рассчитайте** частоту выходных импульсов, осциллограмму и схем**скопируйте** в отчет.

Задание 3.

Собрать на рабочем поле ElectronicsWorkbench схему для испытания **аналого-цифрового преобразователя с ЦАП**(рисунок 8) и **установить** в диалоговых окнах компонентов их параметры или режимы работы. **Скопировать** схему на страницу отчёта.

В схему включены собственно библиотечный 8-разрядный АЦП (ADC); источники опорного напряжения E1 и E2 (подключены к входам Vref+ и Vref- АЦП); генератор прямоугольных импульсов E3 для синхронизации работы (подключен к входу SOC); вход OE предназначен разрешения (на выдачу двоичной информации на выходы D0, ..., D7 АЦП; функциональный генератор в качестве источника входного сигнала Uвх (подключен к входу Vin); ЦАП (DAC) и осциллограф. Выход EOC служит для передачи двоичной информации АЦП, например, на ЭВМ.

Установить частоту генератора для синхронизации $f_c = 1$ кГц, амплитуда 5 В.

Установить параметры генератора: напряжение треугольной формы со скважностью $N = 99$ и амплитудой 1 В; частоту $f_z = 50$ Гц.

Получить осциллограмму входного и выходного сигнала, при помощи смещения по оси **Усовместить** входные и выходные сигналы.

Скопировать осциллограмму в отчет.

Установить частоту генератора для синхронизации $f_c = 300$ Гц. **Сделать** вывод.

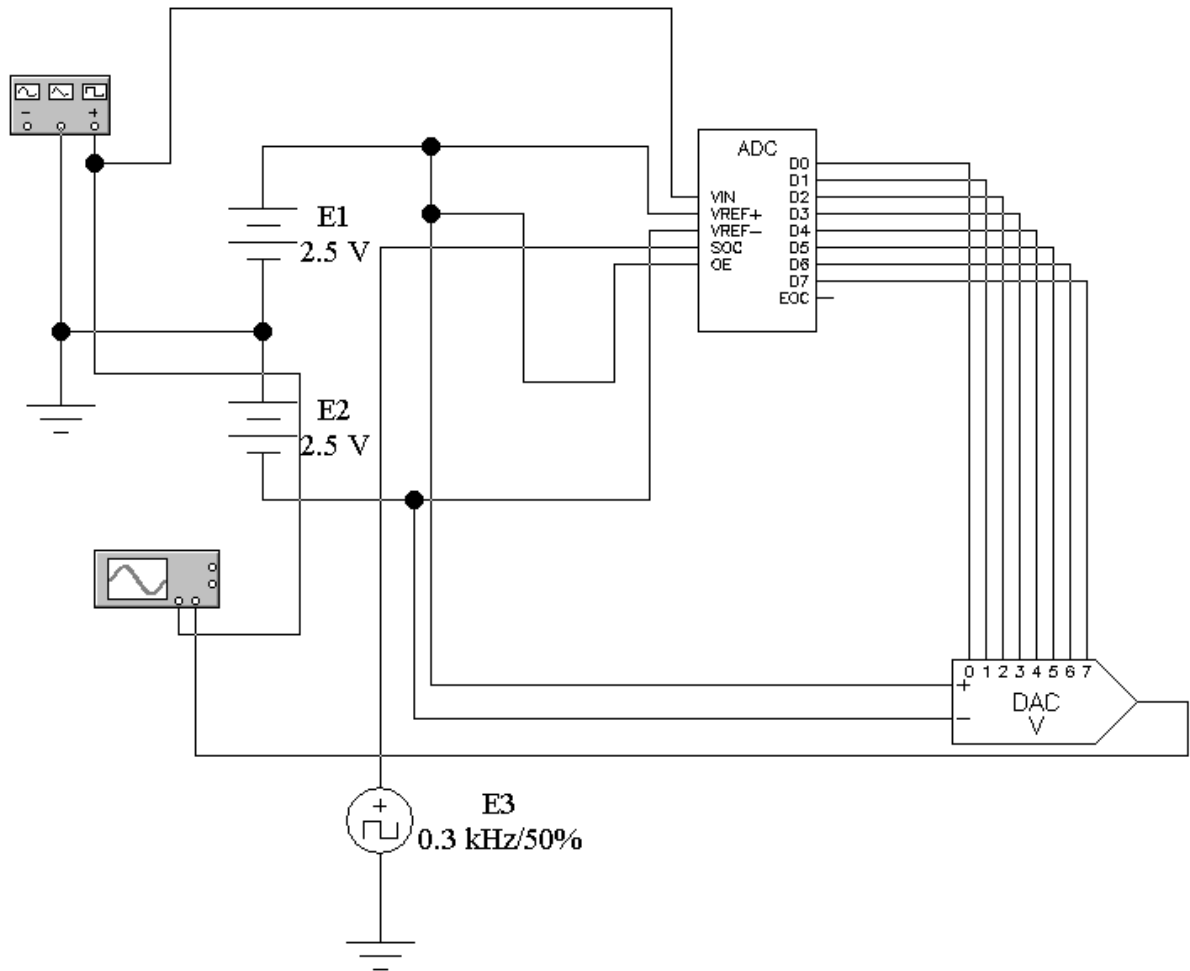


Рисунок 8 – АЦП с ЦАП

Установить параметры генератора: напряжение синусоидальной формы со скважностью $N = 50$ и амплитудой 1 В; частоту $f_c = 25$ Гц. **Скопировать** осциллограмму в отчет.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Что такое ЦАП ?
- 2 Отличие ЦАП с весовыми коэффициентами и ЦАП с матрицей R-2R ?
- 3 Основные параметры ЦАП ?
- 4 Абсолютная разрешающая способность ЦАП ?
- 5 Принципы работы АЦП ?
- 6 Основные методы преобразования АЦП ?