

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8,9

### «Исследование работы аналого-цифрового и цифроаналогового преобразователей»

#### 1 Цель работы:

- 1.1 Ознакомление с принципом работы и испытание интегрального цифро-аналогового преобразователя.
- 1.2 Ознакомление с принципом работы и испытание интегрального 8-разрядного аналого-цифрового преобразователя.

#### 2 Литература:

- 2.1. Конспект лекций;
- 2.2. Хартов В. Я. Микропроцессорные системы: учебное пособие для вузов / В. Я. Хартов - М. : Академия, 2010;
- 2.3. Нарышкин А. К. Цифровые устройства и микропроцессоры: учеб. пособие для вузов / А. К. Нарышкин .- 2-е изд., стереотип.- М. : Академия, 2008.

#### 3 Оборудование:

- 3.1 Персональный компьютер с установленной ОС Windows;
- 3.2 Программные пакет моделирования электронных компонентов схем Multisim.

#### 4 Вопросы для допуска к работе:

- 4.1 Укажите назначение АЦП?
- 4.2 Укажите формулу Котельникова, с помощью которой определяют шаг дискретизации  $\Delta t$  аналогового сигнала?
- 4.3 Определите понятие "абсолютная разрешающая способность" АЦП?
- 4.4 Укажите, можно ли свести к нулю погрешность квантования аналогового сигнала посредством выбора параметров устройства, например за счёт увеличения разрядности АЦП?
- 4.5 Укажите перспективные направления развития АЦП?
- 4.6 Укажите, какие операции необходимо выполнить при аналого-цифровом преобразовании?
- 4.7 Укажите, обладает ли способ последовательного счёта аналого-цифрового преобразования наибольшим быстродействием?



Т а б л и ц а 1

$u_{\text{вх}},$ В	$u_{\text{вых(ЦАП)}},$ В	$D_{(2)}$	$D_{(16)}$	$D_{(10)\text{инв}}$	$D_{(10)}$	$D_{(10)\text{расч}}$	$\Delta U\%$
0,1							
0,2							
0,5							
1,0							
1,5							
2,0							
2,4							
-0,5							
-1,0							
-2,0							

– установить в диалоговых окнах генераторов E1 и E2 ЭДС  $E_1 = 2,5$  В, и ЭДС  $E_2 = -2,5$  В;

– запустить программу моделирования АЦП и заносить в поля составленной таблицы значения напряжения  $u_{\text{вых(ЦАП)}}$  с выхода ЦАП, измеряемые на экране осциллографа с помощью визирной линии; двоичный эквивалент  $D_{(2)}$  преобразуемого напряжения, определяемый по свечению пробников X7, ..., X0 (например для рис. 1  $D_{(2)}=00010110$ ); шестнадцатеричный код  $D_{(16)}$ , считываемый с дисплея анализатора XLA1;

– получаемые с выхода АЦП десятичные инверсные сигналы  $D_{(10)\text{инв}}$  пересчитать на неинверсные  $D_{(10)}$  по выражению

$$D_{(10)} = D_{(10)\text{инв}} - 128$$

и занести в соответствующие столбцы таблицы;

– расчётные десятичные эквиваленты  $D_{(10)\text{расч}}$  двоичного кода  $D_{(2)}$  на выходе АЦП при заданном значении входного напряжения  $u_{\text{вх}}$  определить по формуле

$$D_{(10)\text{расч}} = 256u_{\text{вх}} / (E_1 + |-E_2|);$$

– рассчитать погрешности измерения напряжения по выражению

$$\Delta U\% = 100(u_{\text{вых(ЦАП)}} - u_{\text{вх}})/u_{\text{вх}}.$$

В качестве примера в таблице 2 приведены данные измерений при моделирования АЦП при  $E_1 = 3$  В и  $E_2 = -3$  В, которые близки к расчётным значениям. Так, при  $E_1 = |E_2| = 3$  В и  $u_{\text{вх}} = E_3 = 1$  В расчётный десятичный эквивалент  $D_{(10)\text{расч}} = 256 \cdot 1/6 \approx 42,67$  при измеренном  $D_{(2)} = 10101010$  и  $D_{(10)} = 42$ . При этом погрешность измерения составила 3,56%.

Таблица 2

$u_{вх}$ , В	$u_{вых(ЦАП)}$ , В	$D_{(2)}$	$D_{(16)}$	$D_{(10),инв}$	$D_{(10)}$	$D_{(10)расч}$	$\Delta U\%$
0,1	0,09375	10000100	84	132	4	4,27	6,25
0,5	0,5156	10010101	95	149	21	21,33	3,12
1,0	0,9644	10101010	AA	170	42	42,67	3,56
2,0	2,017	11010101	D5	213	85	85,34	0,85
2,5	2,484	11101010	EA	234	106	106,67	0,64
2,9	2,906	11111011	FB	251	123	123,74	0,21
-1,0	-0,9844	01010101	55	85	-43	-42,67	3,56

5.3. Исследовать процесс преобразования входного напряжения треугольной формы в цифровые коды, а затем с помощью ЦАП – в ступенчатое напряжение, аппроксимирующее напряжение  $u_{вх}$ .

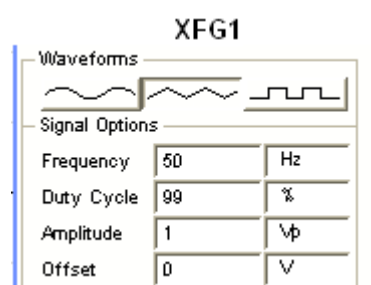
Для этого:

– удалить провод, соединяющий выход генератора ЕЗ с входом Vin АЦП, и восстановить провод 1, соединяющий выход "+" функционального генератора XFG1 с входом Vin АЦП (см. рис. 1);

– установить параметры генератора XFG1 (рис. 2, а): напряжение треугольной формы со скважностью  $N = 99$  и амплитудой 1 В (диапазон от  $-1$  В до  $0,98$  В) и его частоту  $f_z = 50$  Гц;

– запустить программу моделирования АЦП;

– получить и скопировать на страницу отчета осциллограмму входного напряжения  $u_{вх}$ , осциллограмму ступенчатого напряжения  $u_{вых(ЦАП)}$  с выхода ЦАП (см. рис. 2, б), и временные диаграммы сигналов с выходов D0, ..., D7 АЦП, поступающих на входы логического анализатора XLA1 и являющимися двоичными эквивалентами дискретных отсчётов  $u_{вх}(k\Delta t)$  входного напряжения (рис. 3);



а)

б)

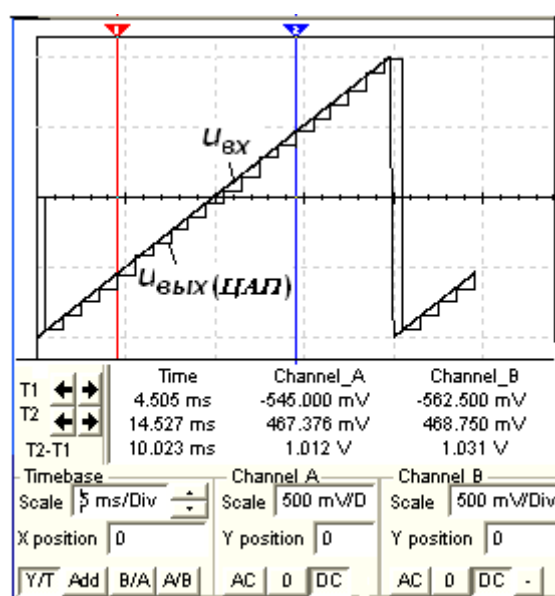


Рис. 2

– воспользовавшись визирными линиями, провести анализ формирования напряжения  $u_{\text{вых(ЦАП)}}$ , аппроксимирующего входное напряжение  $u_{\text{вх}}$ , в частности, измерить напряжение и высоту его ступеней в разные моменты преобразования (с интервалом в 1 мс в моменты положительного перепада тактового импульса синхронизации) и сравнить их с отсчётами  $u_{\text{вх}}(k\Delta t)$  напряжения  $u_{\text{вх}}$ .

Так, при частоте синхронизации  $f_c = 1$  кГц и частоте пилообразного напряжения  $f_z = 50$  Гц образовалось на выходе ЦАП двадцать ступеней напряжения  $u_{\text{вых(ЦАП)}}$ , средняя высота которых равна  $U_{\text{см}} \approx 93,7$  мВ при расчётном значении  $\Delta u = u_{\text{вх.max}}/(N + 1) = 1,98/21 = 94$  мВ. Первая ступень высотой 66 мВ сформировалась по истечении 0,5 мс с момента включения моделирования при уровне входного напряжения  $u_{\text{вх}} = -93,4$  мВ, вторая – при  $u_{\text{вх}} = -0,849$  В высотой 93,75 мкВ и и т. д.

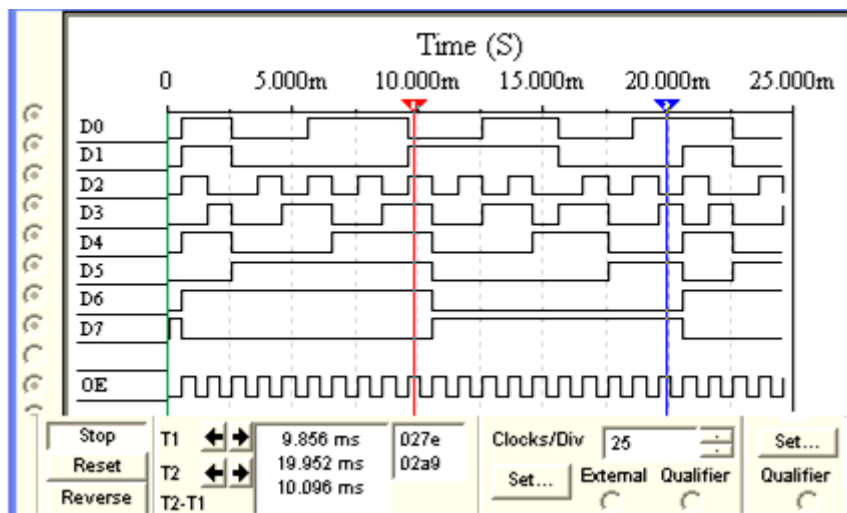


Рис. 3

5.4 Исследовать процесс преобразования АЦП входного синусоидального напряжения в цифровые коды, а затем с помощью ЦАП – в ступенчатое напряжение.

Для этого:

– щёлкнуть мышью на кнопке "Синусоидальное напряжение" генератора XFG1 (см. рис. 2, а) и установить частоту напряжения  $f_2 = 25$  Гц, а затем, при остановке моделирования,  $f_2 = 5$  Гц с изменением времени развёртки лучей осциллографа с 10 мс/дел на 50 мс/дел. Сместить вверх на 0,6 деления осциллограмму входного напряжения  $u_{вх}$  (рис. 4);

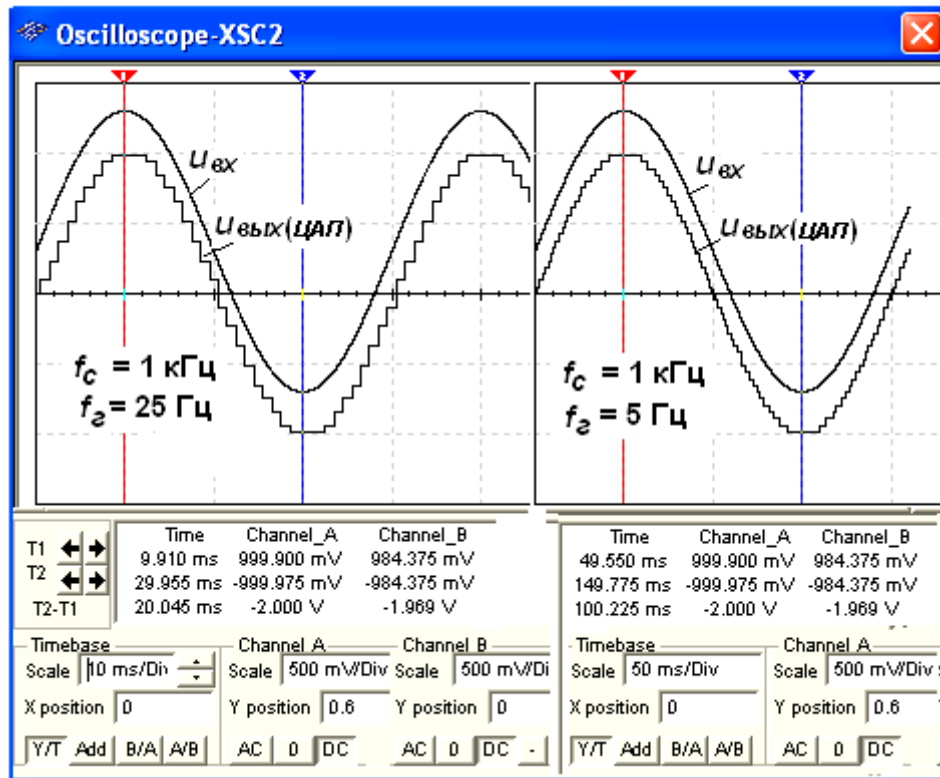


Рис. 4

– измерить напряжение  $u_{вых(ЦАП)}$  и высоту его ступеней в разные моменты преобразования и сравнить их с отсчётами напряжения  $u_{вх}(k\Delta t)$  входного напряжения  $u_{вх}$  для моментов положительного перепада тактового импульса синхронизации.

Двоичные эквиваленты отсчетов напряжения  $u_{вх}(k\Delta t)$  с выходов АЦП преобразуются с помощью ЦАП в аналоговый ступенчатый сигнал  $u_{вых(ЦАП)}$  (см. рис. 4). При этом с уменьшением частоты сигнала увеличивается число ступеней и преобразованная кривая хорошо аппроксимирует входной сигнал. Высота ступеней переменная, от 46 мВ до 141 мВ, так как интервал дискретизации  $\Delta t$  при заданной частоте синхронизации постоянный. Особенно заметна верхняя и нижняя ступени с отклонением от амплитуды входного напряжения приближённо на 15,5 мВ, так как на интервалах дискретизации около амплитуд скорость изменения напряжения минимальная.

5.5. Открыть файл **8.2** для испытания интегрального цифроаналогового преобразователя (рис. 5, а). Скопировать схему на страницу отчёта.

В схеме (рис. 5, а) использован библиотечный (Mixed) 8-разрядный цифроаналоговый преобразователь DAC, на входы которого подаются сформированные с помощью переключателей 0, ..., 7 двоичные коды от 00000000 до 11111111<sub>2</sub> (FF<sub>16</sub> или 255<sub>10</sub>). Выходное напряжение ЦАП можно измерить с помощью вольтметра V1 или осциллографа XSC1, воспользовавшись визирными линиями, расположенными на его экране.

5.6. Получить на экране осциллографа XSC1 ступенчатое выходное

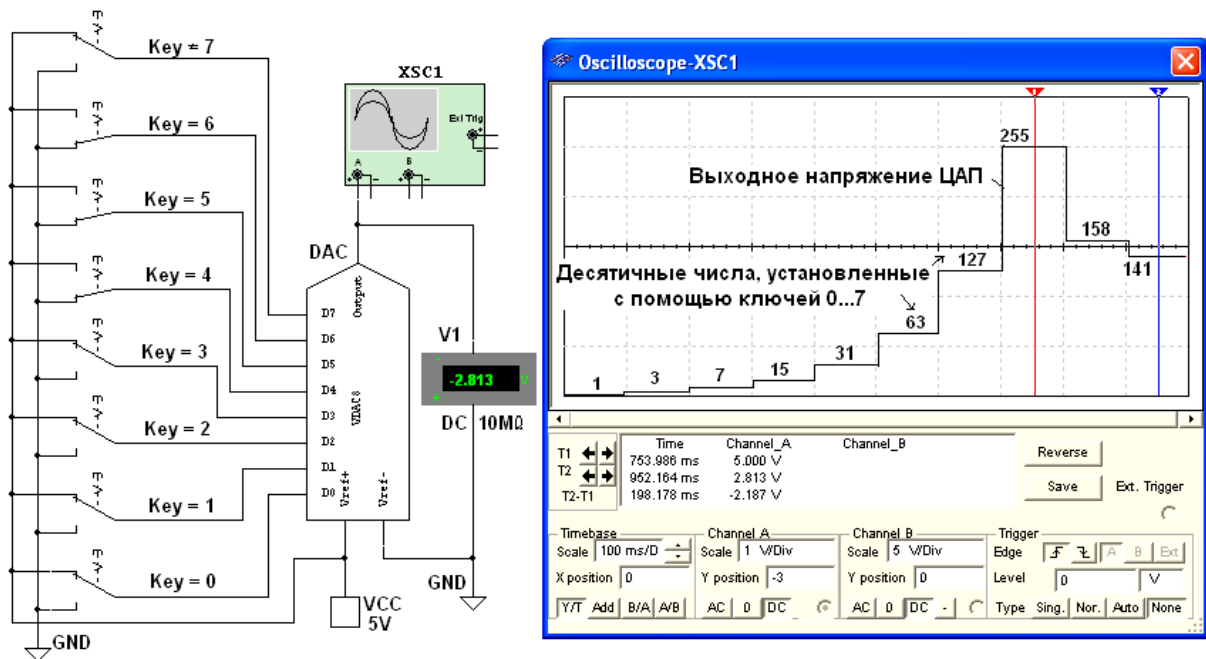


Рис. 5

напряжение ЦАП (рис. 5, б). Для этого нужно вначале замкнуть переключатель 0, т. е. подать напряжение 5 В на вход D0 ЦАП, и запустить программу моделирования. На выходе ЦАП формируется напряжение, равное 3МР. Затем во время остановок моделирования замыкать поочерёдно переключатели 1, 2, ..., 7, подавая входные десятичные комбинации 3, 7, 15, 31, 63, 127, 255 на входы D0, ..., D7 ЦАП (рис. 5, б).

Повторить эксперимент, подавая на входы ЦАП сформированные с помощью переключателей шестнадцатеричные коды от 0 до FF (255<sub>10</sub>) через шаг 10<sub>16</sub> (16<sub>10</sub>) и занося в табл. 3 показания вольтметра V1 (значения выходного напряжения  $u_{\text{вых}}$  ЦАП) при напряжении источника VCC  $u_o = 5$  В. Найти частичные и усредненное значение ступени, частичные и усреднённое значение МЗР. Построить график  $u_{\text{вых}}(N)$ , выбрав соответствующие масштабы для напряжений и входных десятичных чисел  $N$ , откладываемых по осям координат.

Т а б л и ц а 3

№ п/п	Входной десятичный код $N$	Выходное напряжение, $u_{\text{вых}}$ , В	Напряжение ступени $u_{\text{вых}2} - u_{\text{вых}1}$ , В	Значение младшего разряда МЗР = $(u_{\text{вых}2} - u_{\text{вых}1})/16$ , В
1	0	0	0	—
2	15			
3	31			
4	47			
5	63			
6	79			
7	95			
8	111			
9	127			
10	143			
11	159			
12	175			
13	191			
14	207			
15	223			
16	239			
17	255			

5.7. Открыть файл **8.3**, схему для испытания цифроаналогового преобразователя (рис. 6, а). Скопировать схему на страницу отчёта.

Провести моделирование ЦАП, запрограммировав генератор XWG1 (частота генерации сигналов  $f_c = 1$  кГц) на возрастание и убывание шестнадцатеричных чисел от 0 до FF ( $255_{10}$ ) при шаге  $10_{16}$  ( $16_{10}$ ).

Составить таблицу и занести в неё выходные напряжения ЦАП и величину ступеней, которые выводятся в нижнем окне осциллографа XSC2.

Измерение напряжений проводить с помощью визирных линий осциллографа, устанавливая их на двух соседних ступенях (см. рис. 6, б) при различных кодовых комбинациях на выходе генератора XWG1 и напряжении  $u_o = 5$  В источника VCC.

Так, при входных десятичных числах 175 и 191 и напряжении  $u_o = 5$  В выходные напряжения ЦАП соответственно равны 3,437 В и 3,750 В, а



напряжение ступени – 312,5 мВ. При этом  $ЗМР = 312,5/16 = 19,53$  В. Найти и сравнить усреднённое значение ЗМР с расчётным значением.

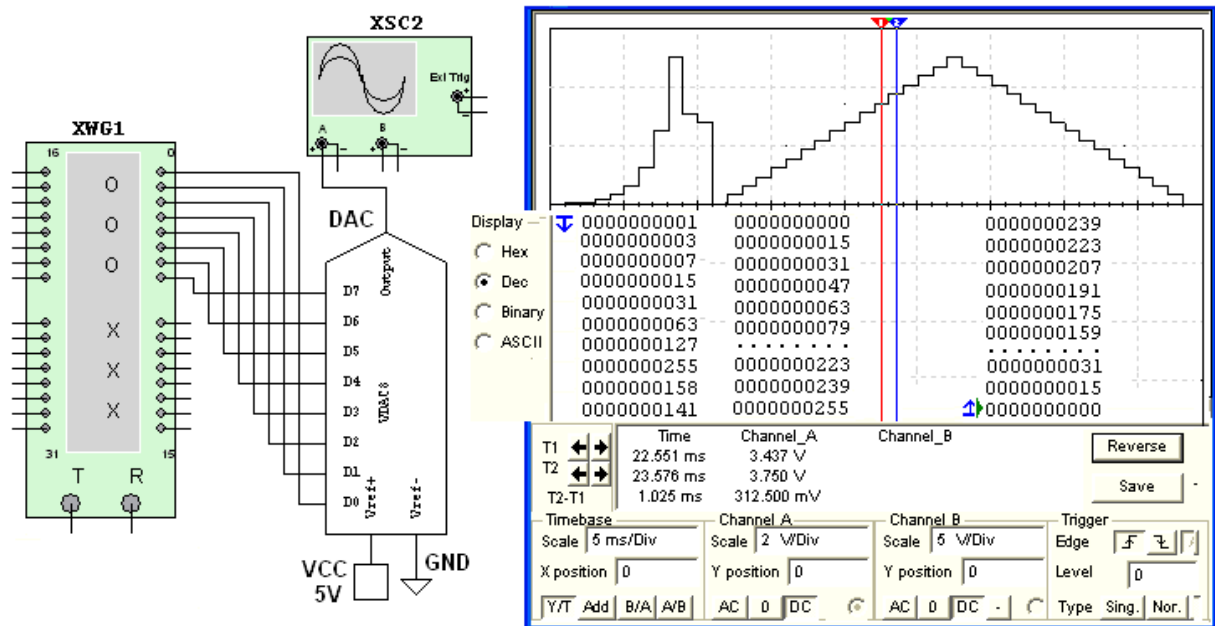


Рис. 6

Установить напряжение  $u_o = 10$  В источника VCC и повторить моделирование ЦАП при опорном напряжении 10 В. Построить графики  $u_{вых}(N)$  при  $u_o = 5$  В и  $u_o = 10$  В на одном рисунке, выбрав соответствующие масштабы для напряжений и входных десятичных чисел  $N$ , откладываемых по осям координат.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### 1.1. 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  $\Delta t$  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  $\Delta u$  – шаг квантования входного аналогового напряжения  $u_{\text{вх}}$ ;  $\delta_i$  – 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 [8]. 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  $u_{\text{д}}(k)$ , равное числу уровней квантования  $N = u_{\text{вх.макс}}/\Delta u$ . 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.

На рис. 1, а приведена характеристика идеального АЦП в нормированных единицах входного напряжения  $u_{\text{вх.н}} = u_{\text{вх}}/u_{\text{вх.макс}}$ . 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, см. рис. 1, а) и *апертурную*, возникающую из-за

несоответствия значения входного сигнала  $u_0(k)$  преобразованному цифровому коду  $A_i$ . Несоответствие возникает, если входной сигнал в течение интервала дискретизации  $\Delta t$  изменяется более чем на значение шага квантования  $\Delta u$ .

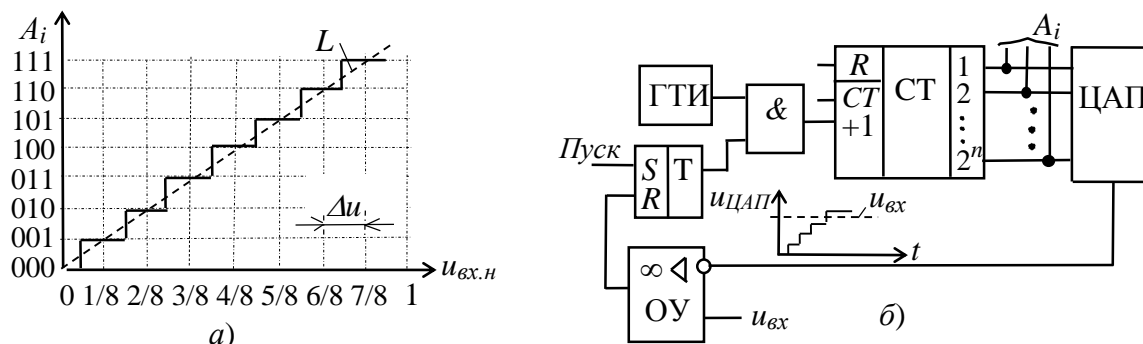


Рис. 1

## 1.2. 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  $u_{вх.мах}$ . Отметим, что АЦП может обрабатывать входную информацию в виде однополярного аналогового напряжения с пределами  $0 \dots u_{вх.мах}$  и двуполярного  $\pm u_{вх.мах} / 2$ ;
- 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  $\delta_i$  преобразования в конечной точке шкалы есть отклонение реального максимального значения входного сигнала  $u_{вх.мах}$  от максимального значения идеальной характеристики  $L$  АЦП (см. рис. 1, а). Обычно  $\delta_i$  измеряется в ЗМР;
- максимальная частота преобразования (десятки и сотни кГц);
- время преобразования входного сигнала:  $t_{пр.мах} \leq (1/2)\Delta t$ .

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.

## 2.1. 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 *цифроаналоговым 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  $u_{\text{вых}}$ , иногда нормированное  $u_{\text{вых.н}} = u_{\text{вых}}/u_{\text{вых.мах}}$ , соответствует кодовой комбинации  $A_i$ , поступившей на вход, и воспроизводится для дискретных моментов времени (рис. 2, а). Сменяющиеся входные цифровые коды обуславливают сменяющееся ступенчатое напряжение на выходе ( $L$  – идеальная передаточная характеристика ЦАП).

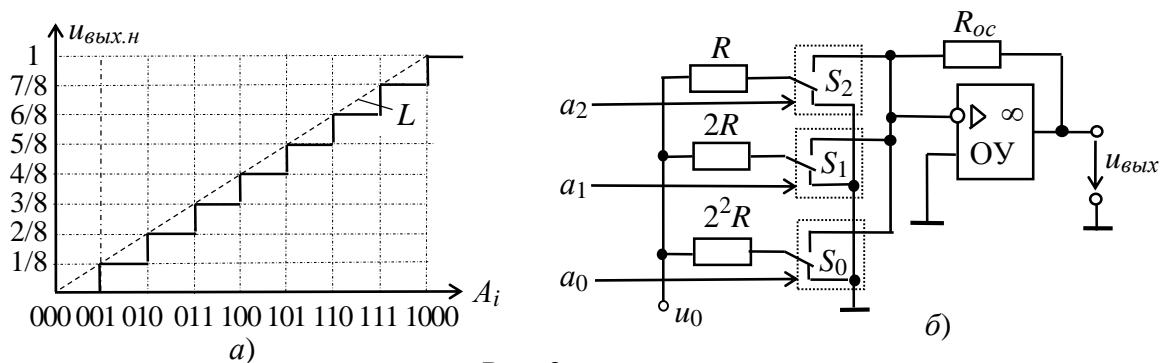


Рис. 2

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  $R-2R$ .

ЦАП с весовыми двоично-взвешенными сопротивлениями (рис. 2, б) 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  $u_{\text{вых}}$ .

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:

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

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

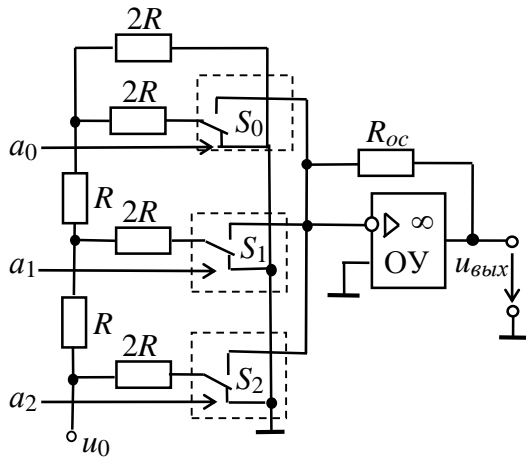


Рис. 3

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 (см. рис. 3 при  $n = 3$ ). Однако в этой схеме увеличиваются значения паразитных ём-

костей.

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  $R-2R$ :

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

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

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  $\pm 5$  В. Опорное напряжение в схемах ЦАП может выбираться разной полярности или двуполярным.

## 2.2. 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  $u_o$ . 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  $\delta_a$  и нелинейностью преобразователя  $\delta_n$ . *Абсолютная погрешность*  $\delta_a$  характеризуется отклонением максимального значения выходного напряжения  $u_{\max}$  от расчётного, соответствующего конечной точке характеристики идеального преобразователя, и измеряется обычно в единицах ЗМР.

*Нелинейность преобразователя*  $\delta_n$  характеризует отклонение действительной характеристики от линейной (от прямой линии  $L$ , см. рис. 2, а), 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 MS10 не всегда удаётся определить отмеченные выше параметры.

Библиотечные интегральные схемы ЦАП среды MS10 требуют для своей работы подключения только постоянного эталонного напряжения, заземления и входных сигналов.