

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«Владимирский государственный университет имени
Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ АНАЛОГОВЫХ И ЦИФРОВЫХ СИГНАЛОВ

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ МАШИНЫ И СИСТЕМЫ»**

(Электронный ресурс)

Составитель
В.П. ГАЛАС

Владимир 2012

УДК 681.32

Исследование преобразователей аналоговых и цифровых сигналов. Методические указания к лабораторным работам по дисциплине «Вычислительные машины и системы»/ Сост.: В.П. Галас, 2012. 24 с.

Приведены описания лабораторных работ по дисциплине «Вычислительные машины и системы», в которых изучаются преобразователи аналоговых и цифровых сигналов для современных вычислительных машин. Работы выполнены в виде виртуальной электронной лаборатории на персональном компьютере с использованием пакета программ Multisim, позволяющего производить необходимые экспериментальные исследования.

Предназначены для студентов специальности 080801 - прикладная информатика в экономике дневной формы обучения и бакалавров направления 230200 – прикладная информатика

Ил. 29. Библиогр.: 3 назв.








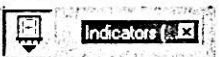
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ЦИФРОАНАЛОГОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Цель работы

1. Изучение ЦАП на основе взвешенных напряжений (токов).
2. Исследование схмотехнических вариантов ЦАП.
3. Изучение преобразования чисел со знаком.

Приборы и элементы

Генератор слов		Операционный усилитель	
Источник напряжения		ЦАП	
Резисторы		Вольтметр	
Ключи, управляемые с клавиатуры		Логические пробники	

Краткие сведения из теории

Простейшая схема четырехразрядного преобразователя кода в напряжение (ПКН). Цифроаналоговый преобразователь такого типа преобразует входной двоичный код в выходное аналоговое напряжение, которое представляет собой сумму взвешенных ступеней. Вес единицы каждого следующего (более старшего) разряда вдвое превышает вес предыдущего. Код задается набором логических входных сигналов (каждый бит 0 или 1) или состоянием ключей.

Простейшая для понимания схема ЦАП основана на применении n (по числу разрядов) источников с выходными напряжениями $U_0, 2U_0, 4U_0, \dots, 2^{n-1}U_0$. Пример такой схемы для четырехразрядного ПКН представлен на рис. 4.1.

Выходное напряжение ПКН вычисляется по формуле

$$U_{\text{вых}} = U_0(b_0 \cdot 2^0 + b_1 \cdot 2^1 + b_2 \cdot 2^2 + b_3 \cdot 2^3).$$

Здесь b — значения битов (0 или 1); U_0 — значение напряжения, соответствующее единице младшего разряда (ЕМР).

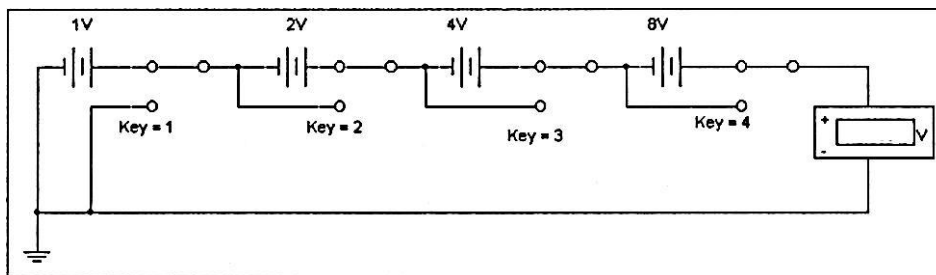


Рис. 1.1

Входной двоичный код управляет состоянием ключей 0, 1, 2, 3, 4. Ключ 1 управляется битом младшего разряда, ключ 4 — старшего. В верхнем положении ключа $b = 1$, в нижнем $b = 0$.

В схеме рис. 1.1 вес ЕМР $U_0 = 1$ В. Если двоичный код равен, например, 1011 (он получается, если перевести ключ 2 в нижнее положение), выходное напряжение, вычисленное по формуле (4.1),

$$U_{\text{цпп}} = (1 \cdot 1 + 1 \cdot 2 + 0 \cdot 4 + 1 \cdot 8) \text{ В} = 11 \text{ В}.$$

Схема рис. 1.1 удобна для понимания действия ПКН, однако в практических схемах код не устанавливается вручную, а задается входным многоразрядным логическим словом. При этом ключами в схеме управляют напряжения логического уровня. Такая схема приведена на рис. 1.8. Недостатком простейшей схемы (см. рис. 1.1) является большое число дорогих прецизионных источников напряжения.

ПКН со взвешенными сопротивлениями. Единственный прецизионный источник необходим для преобразователя код — напряжение, построенного по схеме с набором резисторов, сопротивления которых образуют ряд: $R, 2R, 4R, \dots$ (рис. 1.2).

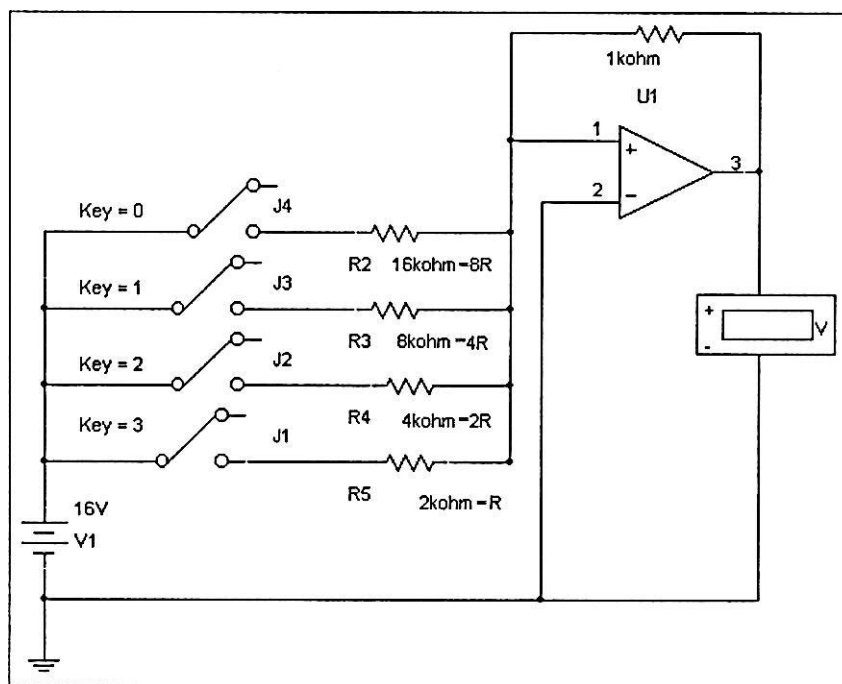


Рис. 1.2

Выходное напряжение в схеме рис. 1.2 вычисляется по формуле

$$U_{\text{вых}} = U(-R_f/R_c) = U(-G_c/G_f),$$

где U — напряжение прецизионного источника ($U = 16$ В); R_f, G_f - сопротивление и проводимость в цепи обратной связи ($R_f = 1$ кОм); R_c, G_c - сопротивление и проводимость в цепи управления.

Учитывая, что проводимости ветвей при параллельном соединении суммируются, получаем

$$U_{\text{вых}} = -\frac{U}{G_f} (b_0 G_{c0} + b_1 G_{c1} + b_2 G_{c2} + b_3 G_{c3}),$$

где b - значение бита соответствующего разряда входного кода.

Если выполняется соотношение

$$G_{c3} = 2G_{c2} = 4G_{c1} = 8G_{c0} = 8G_f,$$

то формула (1.3) совпадает с (1.1).

Схема, подобная схеме на рис. 1.2, но с ключами, управляемыми напряжением логического уровня, приведена на рис. 1.9. Такое устройство дешевле, чем выполненное по схеме рис. 1.1, поскольку прецизионные резисторы дешевле источников питания.

ПКН с матрицей $R - 2R$. Прецизионные сопротивления в схеме рис. 1.2 должны иметь разные номиналы. Более технологичный способ построения ПКН с взвешенными сопротивлениями - применение цепи, в которой используются сопротивления лишь двух номиналов: R и $2R$ (рис. 1.3). Подобные цепи получили название матриц лестничного типа $R - 2R$.

Выходным напряжением схемы является потенциал нижней ступени этой «лестницы» (точка, к которой на рис. 1.3 подключен вольтметр). Это напряжение может быть вычислено по формуле

$$U_{\text{вых}} = \frac{E(b_1 \cdot 2^0 + b_2 \cdot 2^1 + b_3 \cdot 2^2 + b_4 \cdot 2^3)}{16}.$$

Выходное сопротивление схемы рис. 1.3 можно существенно снизить, включив на выход повторитель на базе ОУ.

Преобразователь кода в ток (ПКТ). Функционально ПКТ, как и ПКН, является цифроаналоговым преобразователем кода в аналоговую величину. Однако различие между ними имеется, его можно пояснить на конкретных примерах.

Выходной сигнал такого ЦАП представляет собой ток, формируемый как сумма взвешенных нормированных токов. Током каждой из n ступеней управляет соответствующий бит входного кода. Каждая следующая ступень вдвое превышает ступень предыдущего разряда. В схеме рис. 1.4 используются четыре взвешенных источника тока: 1, 2, 4, 8 мА. Биты входного кода (ноль или единица) управляют положением переключателей

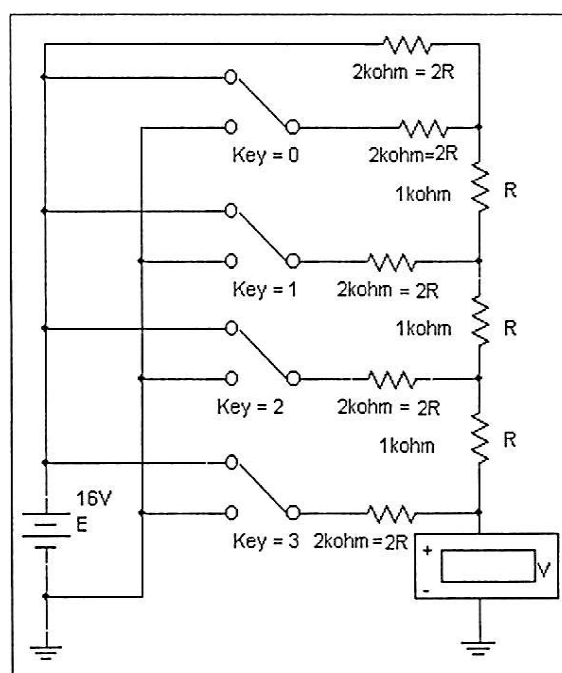


Рис. 1.3

О—3. Если соответствующий бит равен нулю, переключатель устанавливается в левое положение, если бит равен единице — в правое. При любом состоянии ключей любой источник тока на рис. 4.4 должен быть замкнут на конечную нагрузку. При $b = 1$ ток замыкается через измеритель тока

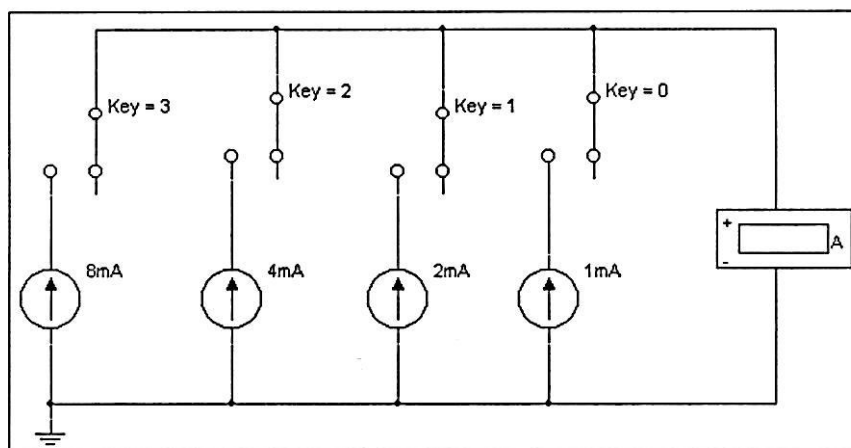


Рис. 1.4

(амперметр), при $b=0$ - через шунтирующий резистор.

Выходной ток ПКТ и показания прибора определяются выражением

$$I_{\text{ВЫХ}} = b_1 \cdot 2^0 + b_2 \cdot 2^1 + b_3 \cdot 2^2 + b_4 \cdot 2^3.$$

Приведенная схема ПКТ требует n (по числу разрядов) прецизионных источников тока. Практические схемы ПКТ часто выполняют на основе матрицы лестничного типа $R - 2R$, подобной рис. 1.3, дополняя ее преобразователем напряжения в ток (рис. 1.5). На рисунке показан идеальный преобразователь напряжения в ток, имеющийся в программе Multisim, который практически может быть реализован с помощью различных схем, содержащих полупроводниковые, а иногда и магнитные элементы.

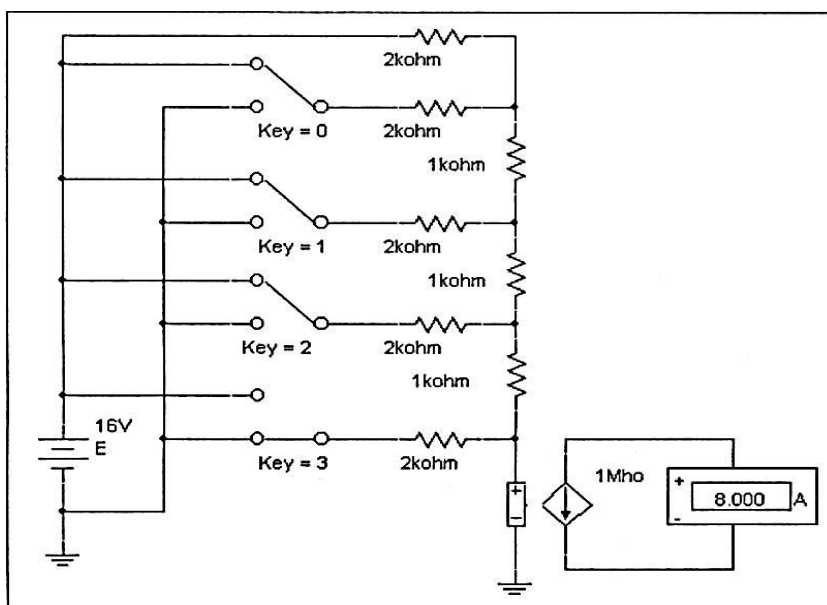


Рис. 1.5

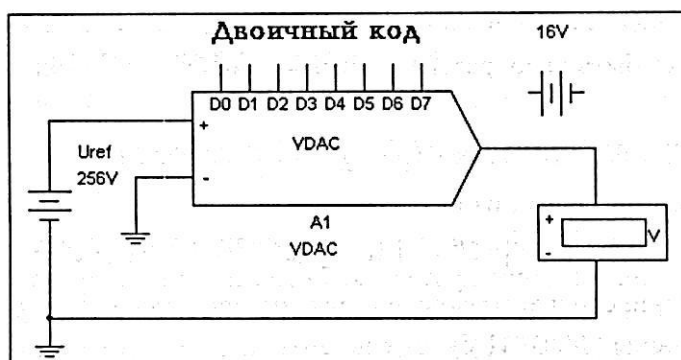


Рис. 4.6

Функциональный преобразователь кода в напряжение в программе Multisim. Преобразователи кода в напряжение выполняются в виде функциональных узлов. Такой функциональный узел ПКН, имеющийся в Multisim (рис. 1.6), имеет восемь логических входов $D0, D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7$, на которые может быть подан восьмиразрядный двоичный код. На два входа подается опорное напряжение U_{ref} . Максимальное значение кода, которое может быть преобразовано в напряжение, равно $2^8 - 1 = 255 = FF$ (в формуле приведено десятичное и шестнадцатеричное представление кода), а значение ЕМР вычисляется по формуле

$$U_0 = U_{ref}/2^8.$$

Наибольший двоичный код, который может быть подан на входы данного ПКН, равен 11111111, что соответствует десятичному числу 255 (шестнадцатеричному FF), а максимальное выходное напряжение

$$U_{\text{вых max}} = 255U_{ref}/256.$$

Выходное аналоговое напряжение в общем случае ПКН с n разрядами определяется формулой

$$U_{\text{вых}} = U_0(b_{n-1} \cdot 2^{n-1} + b_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + b_0 \cdot 2^0).$$

Здесь b — значения битов (ноль или единица); U_0 — напряжение, соответствующее ЕМР: $U_0 = U_{ref}/256$.

Если $U_{ref} = 25,6$ В, то $U_0 = 0,1$ В.

Функциональный ПКТ в программе Multisim. Функциональный ПКТ, имеющийся в Multisim (рис. 1.7), имеет восемь логических входов $D0, D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7$, на которые может быть подан восьмиразрядный двоичный код.

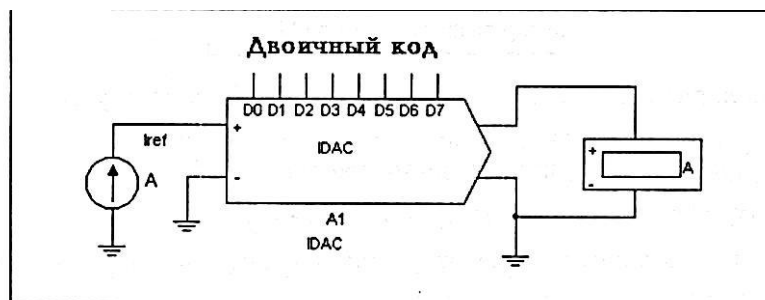


Рис. 1.7

К двум входным выводам подключается источник опорного тока I_{ref} . Максимальное значение кода, которое может быть преобразовано в ток, равно $2^8 - 1$, значение ЕМР вычисляется по формуле

$$I_0 = I_{ref} / 2^8,$$

а выходной ток можно определить из выражения

$$I_{вых} = I_0(a_{n-1} \cdot 2^{n-1} + a_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + a_0 \cdot 2^0).$$

Если $I_0 = 1$ мА, то токи, соответствующие разрядам, составляют 1, 2, 4, 8, ... мА, а выходной ток ПКТ при входном коде 00001011 будет равен

$$I_{ЦАП} = (1 \cdot 1 + 1 \cdot 2 + 0 \cdot 4 + 1 \cdot 8) = 11 \text{ мА}.$$

Выбор значения ЕМР и отображение полярности аналогового сигнала. Выходная величина ЦАП (напряжение или ток) должна однозначно с достаточной точностью отображать входной код. Для этого необходимо условиться о полярности напряжения и значении ЕМР. При работе с промышленными устройствами часто исходят из того, что выходное напряжение ПКН должно быть таким, чтобы было удобно выполнять операции с десятичными числами. Так, если выбрать ЕМР $U_0 = 0,01$ В, то максимальное выходное напряжение 10-разрядного преобразователя

$$U_{вых. max} = U_0 \cdot 2^{10} = 1024 U_0.$$

Учитывая, что для операций с числами обычно используется десятичная система счисления, опорное напряжение ЦАП удобно выбрать пропорциональным целой степени числа два, например,

$$E = U_{ref} = 10,24 \text{ В} = 0,01 \cdot 1024 \approx 0,01 \cdot 2^{10}.$$

При необходимости преобразования цифроаналогового двуполярного напряжения (двухнаправленного тока) необходимо один из битов цифрового кода использовать для передачи информации о полярности напряжения в ПКН или о направлении тока в ПКТ.

Обычно в ПКН для этой цели используется старший бит, нуль — признак положительного напряжения, единица — отрицательного. Тогда, например, код 10001100 в случае использования старшего разряда в качестве знакового отображает семиразрядное отрицательное число $-0001100 = -12$ (в правой части формулы десятичное представление):

Число со знаком -12	
Двоичный код	10001100
Номер разряда	76543210

Для изменения полярности напряжения на выходе ЦАП используют один из следующих способов:

- п
переключают полярность источника опорного напряжения U_{ref} ;
- переключают полярность выходного напряжения ЦАП $U_{вых}$;
- вводят в тракт аналогового сигнала инвертирующий усилитель с коэффициентом передачи -1.

При единственной полярности напряжения и единственном направлении тока не требуется передавать информацию о полярности (она изначально задана и в дальнейшем не изменяется).

Порядок проведения экспериментов

Эксперимент 1. Исследование преобразования двоичного кода в напряжение

Откройте файл с 16_01 со схемой, приведенной на рис 1.8. Схема содержит четыре ключа на два положения, управляемых сигналами логического уровня. Логические сигналы создаются с помощью ключей, управляемых с клавиатуры клавишами 0, 1, 2, 3, которые образуют входной регистр. При нажатии на клавишу изменяется логический уровень соответствующего разряда регистра, что показывает логический пробник. По состоянию четырех пробников можно считать двоичный входной код.

Шестнадцатеричное значение входного кода отображается на цифровом индикаторе.

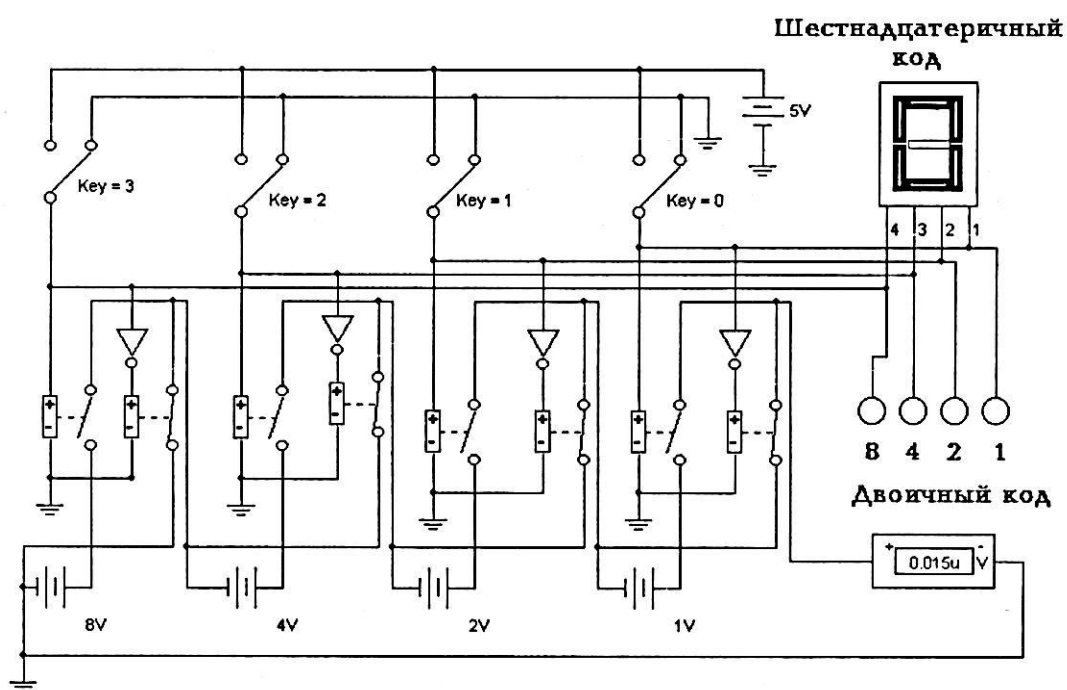


Рис. 1.8

Включите схему. Получите экспериментально значения выходного напряжения ЦАП, соответствующие различным значениям кода, и результаты внесите в таблицу раздела «Результаты экспериментов». Представьте полученные напряжения в виде суммы:

$$U_{\text{вых}} = U_0[b_3 \cdot 2^3 + b_2 \cdot 2^2 + b_1 \cdot 2^1 + b_0 \cdot 2^0],$$

где $U_0 = 1 \text{ В}$, b — значение соответствующего бита (ноль или единица).

Эксперимент 2. Исследование ПКН с взвешенными сопротивлениями

Откройте файл с16_02 со схемой, приведенной на рис 1.9. Задайте значения битов входного кода. Рассчитайте и определите экспериментально показания вольтметра. Результаты измерений и расчетов занесите в таблицу раздела «Результаты экспериментов». Измените значения сопротивления в цепи обратной связи на 2 кОм, затем на 0,5 кОм. Результаты измерений занесите в ту же таблицу. Объясните полученный результат.

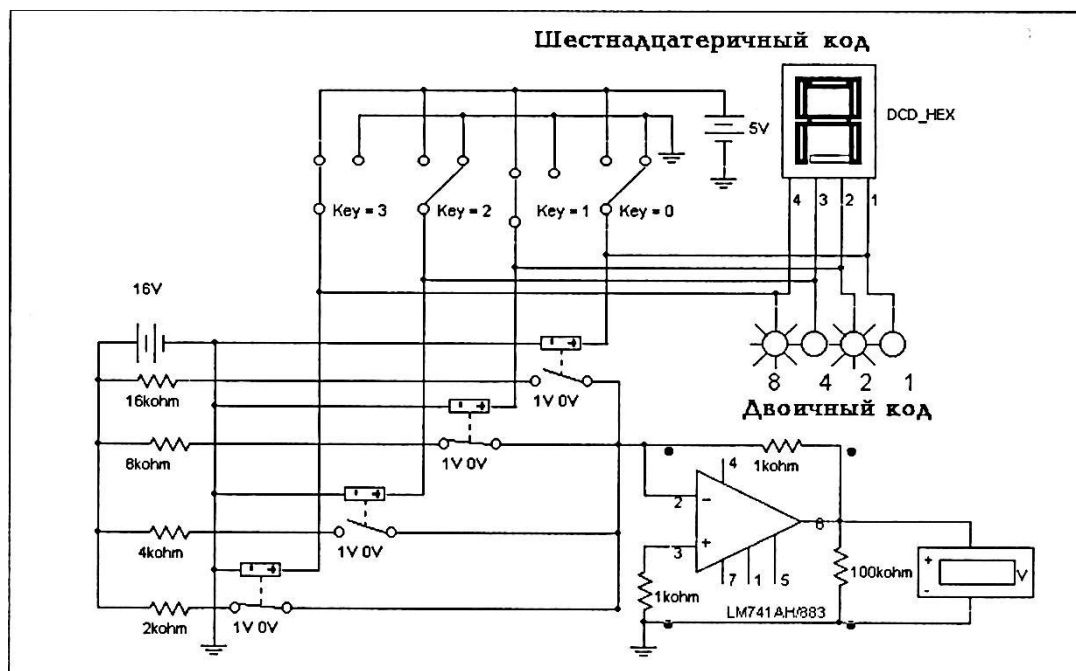


Рис. 1.9

Измените значение ЭДС с 16 на 8 В, а затем на 32 В. Занесите в таблицу полученные значения выходного напряжения. Объясните полученный результат.

Эксперимент 3. Исследование ЦАП на основе матрицы $R - 2R$

Откройте файл `s16_03` со схемой приведенной на рис 1.10. По составу приборов, формирующих и отображающих входной код и выходной сигнал, схема подобна схеме рис. 1.8, отличается только структура ЦАП. Рассчитайте по формуле (1.1) выходное напряжение при состояниях ключей, отображенных в каждой строке таблицы раздела «Результаты экспериментов». Проверьте экспериментально результаты расчетов и занесите их в таблицу раздела «Результаты экспериментов».

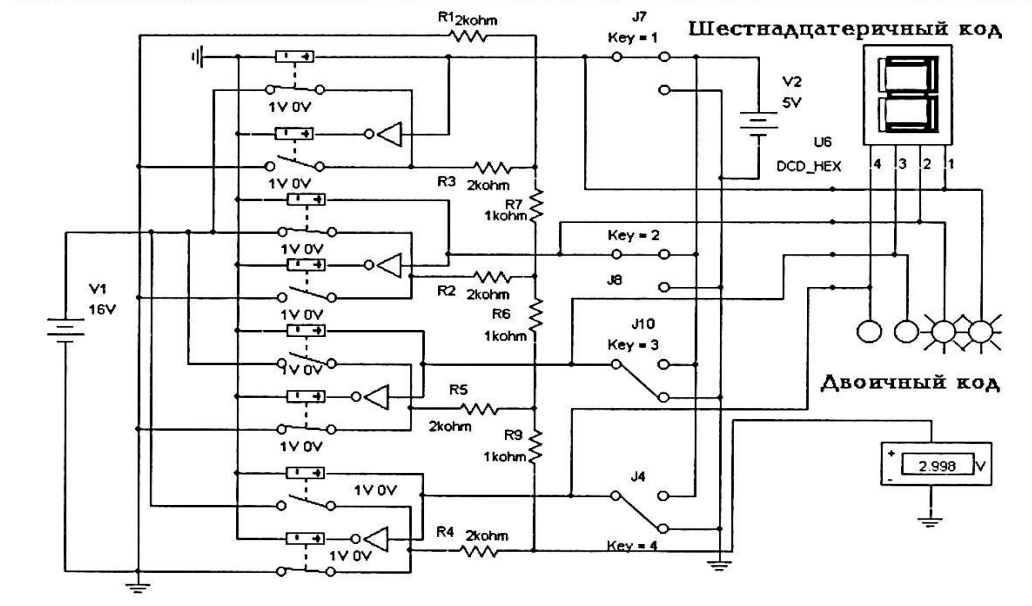


Рис. 1.10

Эксперимент 4. Исследование функциональной модели ПКН

Откройте файл c16_04 со схемой, приведенной на рис 1.11. Включите схему. Установите на генераторе слов последовательность кодов, соответствующую рис. 1.11.

Щелкните мышкой на поле Step генератора слов. При этом на табло генератора (слева) подсветится поле 1, на табло Address-Current — 0001, на индикаторах появится двоичный код 00000010 (зажжется второй индикатор слева) и шестнадцатеричный код 2 (на индикаторах U_3 , U_2). Занесите эти результаты в строку 1 таблицы в разделе «Результаты экспериментов». Напряжение на выходе ЦАП, измеренное вольтметром, при этом будет, однако, равно нулю, что соответствует предыдущему значению кода. В то же время напряжение, измеренное по осциллографу равно 0,2 В и правильно отражает выходной сигнал. Только если еще раз щелкнуть мышкой на поле Step, на вольтметре появится значение, соответствующее полю 1. При этом на индикаторах зафиксируются коды, соответствующие полю 2.

Рассчитайте и, пройдя с помощью клавиши Step все позиции генератора слов, экспериментально определите последовательность соответствующих им значений выходного напряжения АЦП. Результаты занесите в таблицу в разделе «Результаты экспериментов».

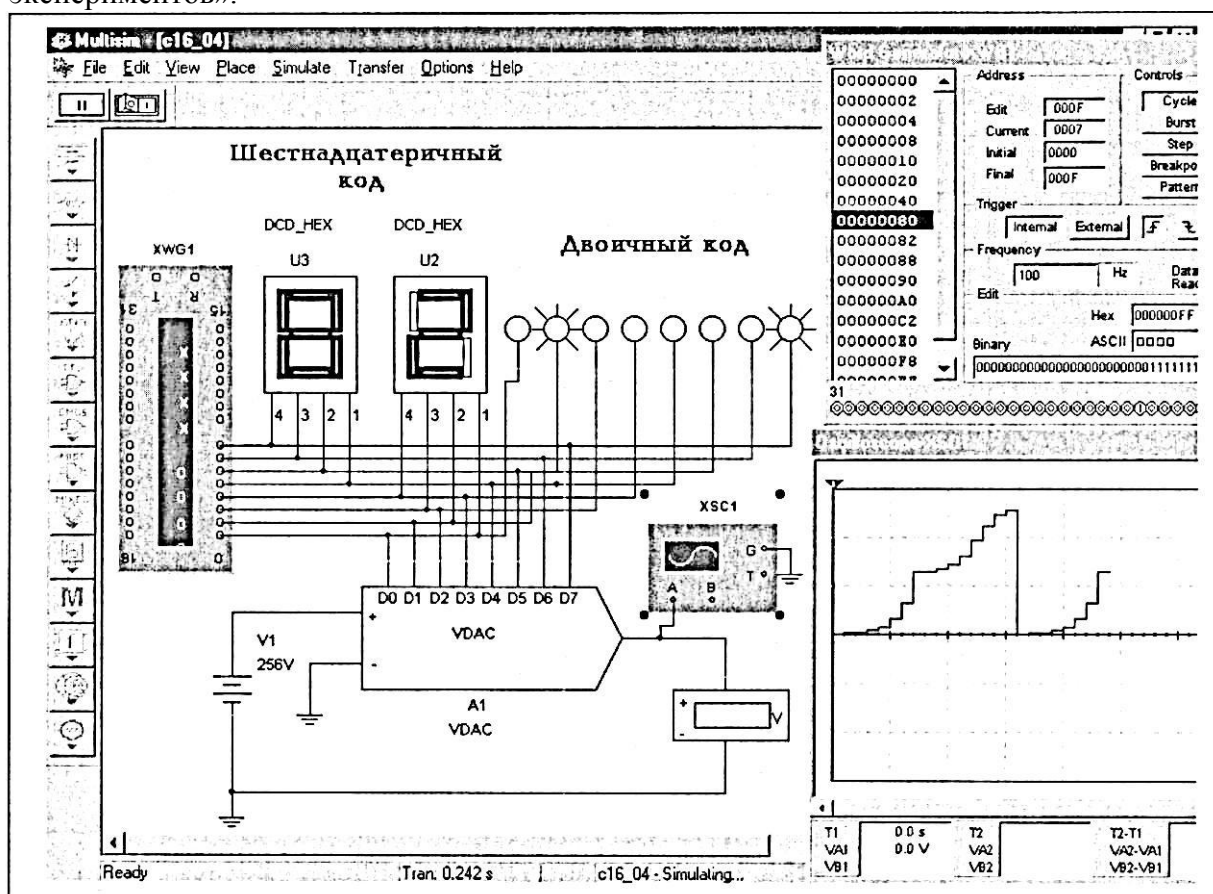


Рис. 1.11

Эксперимент 5. Простейший преобразователь кода в ток

Откройте файл c16_05 со схемой, приведенной на рис 1.12. Включите схему. Получите экспериментально значения выходного тока ЦАП, соответствующие различным значениям кода, и результаты измерений внесите в таблицу раздела «Результаты экспериментов». Представьте полученные токи в виде суммы:

$$I_{\text{вых}} = I_0(b_{n-1} \cdot 2^{n-1} + b_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + b_0 \cdot 2^0).$$

Эксперимент 6. Исследование функциональной модели ПКТ

Откройте файл `s16_06` со схемой, приведенной на рис 1.13. Включите схему. Установите на генераторе слов последовательность кодов, соответствующую рис. 1.13.

Пройдя с помощью клавиши `Step` все позиции генератора слов, экспериментально определите последовательность соответствующих им значений выходного напряжения АЦП. Результаты измерений занесите в таблицу раздела «Результаты экспериментов».

Определите значение `EMR` для идеальной модели.

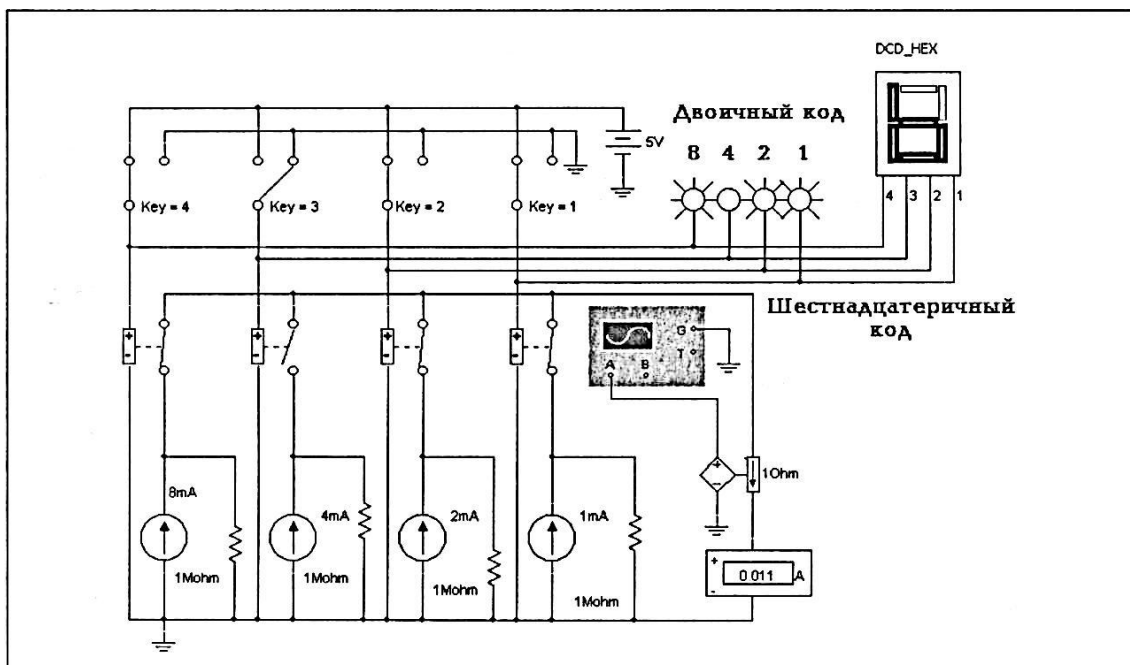


Рис. 1.12

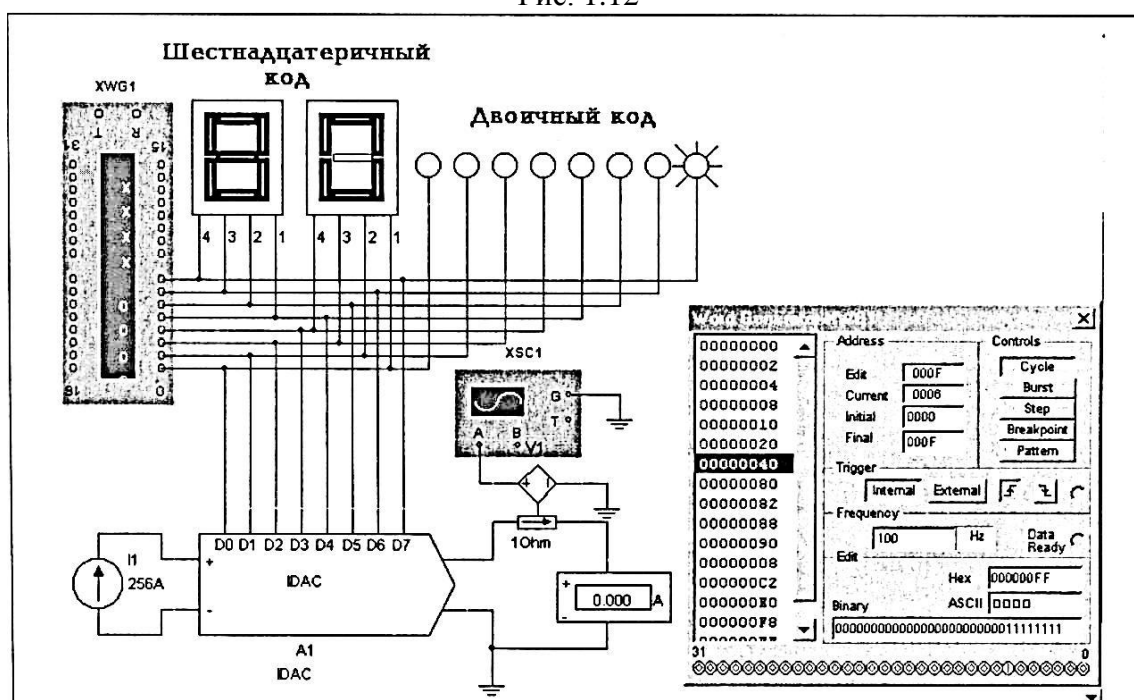


Рис. 1.13

Эксперимент 7. Использование знакового разряда в ПКН

Откройте файл s16_07 со схемой, приведенной на рис. 1.14. В левой части схемы старший разряд генератора слов, использующийся в качестве знакового, применяется для изменения полярности опорного напряжения. В правой части схемы сигнал этого разряда используется для включения в тракт аналогового сигнала усилителя с коэффициентом передачи -1 . В качестве такого усилителя используется источник напряжения, управляемый напряжением с коэффициентом передачи 1 V/V . Включите схему. Установите на генераторе слов последовательность кодов, соответствующую рис. 1.14.

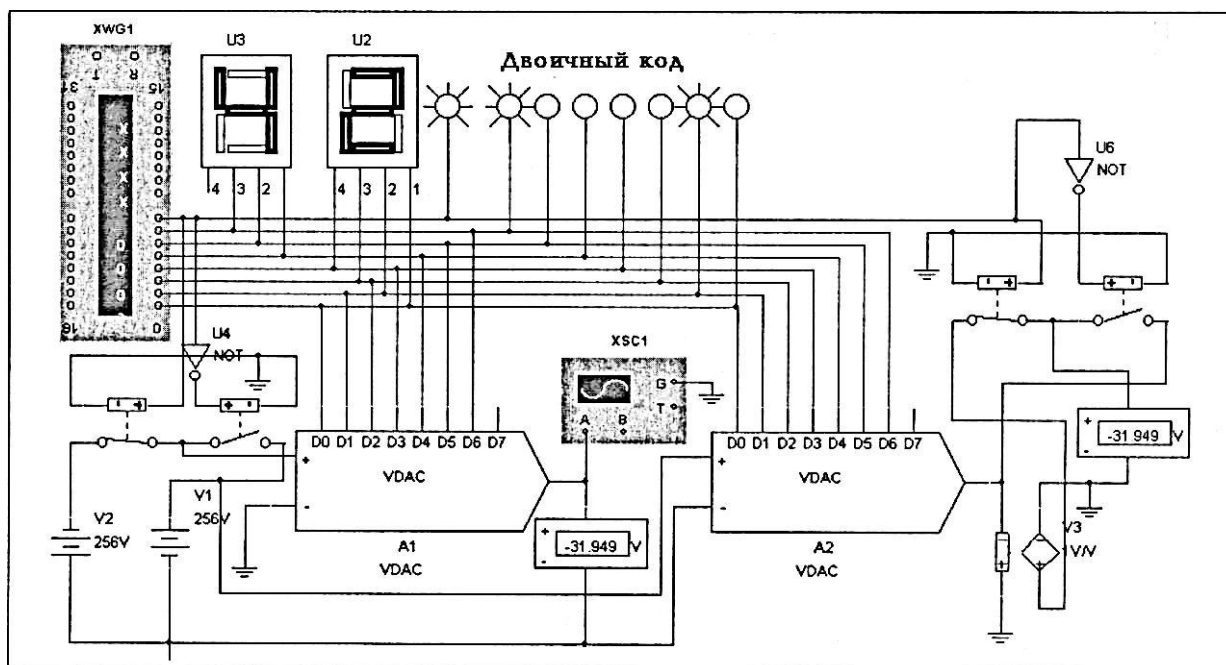


Рис. 1.14

Рассчитайте и, пройдя с помощью клавиши Step все позиции генератора слов, экспериментально определите последовательность соответствующих им значений выходного напряжения АЦП. Измерять выходное напряжение лучше с помощью осциллографа. Результаты занесите в таблицу раздела «Результаты экспериментов».

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Цель работы

1. Изучение АЦП, построенного на принципе считывания.
2. Изучение АЦП, построенного на принципе единичных приращений.
3. Изучение АЦП, построенного на принципе взвешенных приращений.

Приборы и элементы

Генератор слов		АЦП	
Источник напряжения		ЦАП	
Резисторы		Вольтметр	
Ключи, управляемые с клавиатуры		Логические пробники	
Операционный усилитель			

Краткие сведения из теории

АЦП выполняют преобразование входного аналогового сигнала (тока или напряжения) в выходной код (обычно двоичный). Они характеризуются большим разнообразием схем и способов преобразования. Наиболее распространенные структуры АЦП:

- основанные на считывании состояний компараторов;
- с единичными приращениями компенсирующего сигнала;
- с поразрядным уравниванием.

АЦП, основанный на считывании состояний компараторов (рис. 2.15). Он характеризуется наибольшим быстродействием. Преобразователь содержит источник опорного сигнала U_{ref} , делитель напряжения, содержащий 2^k резисторов R ($k=3—8$) и такое же число компараторов. На один из входов каждого компаратора подается напряжение с резистивного делителя, другие входы всех компараторов объединены и подключены к источнику преобразуемого сигнала U_x .

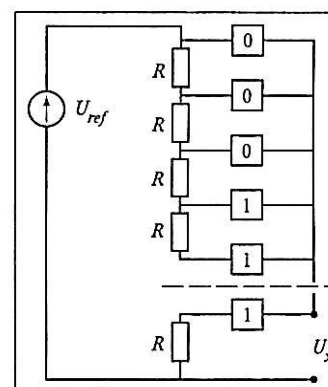


Рис. 2.15

Каждый компаратор $K_1—K_8$ имеет два входа, все правые входы объединены, и на них подается преобразуемое напряжение U_x . Каждый из левых входов присоединен к одному из выводов делителя напряжения. Делитель образован цепочкой из восьми одинаковых резисторов с сопротивлением R . Таким образом, на левые входы компараторов подано напряжение (считая снизу вверх) $n(U_{ref})/8$, где $n=1,2, \dots, 8$; $U_{ref}/8$, $2(U_{ref})/8$, $3(U_{ref})/8$, ..., $8(U_{ref})/8$.

Каждый компаратор на выходе создает логический сигнал: нуль, если $n(U_{ref})/8 > U_x$ и единица, если $n(U_{ref})/8 < U_x$.

Если $U_{ref} = 8 \text{ В}$, $U_x = 3 \text{ В}$, то состояния выходов компараторов соответствуют схеме рис. 2.15. Код, считываемый с выходов компараторов, называют унитарным. Посредством шифратора его можно преобразовать в двоичный трехразрядный.

Точность АЦП, изображенного на рис. 2.15, невысока, поэтому на практике применяют АЦП считывания, содержащие 64 резистора R ($k = 6$) и шестизрядный выходной шифратор ($n = 1-64$).

Функциональная модель АЦП считывания. АЦП, имеющийся в Multisim, по основным характеристикам подобен АЦП, рассмотренному ранее. Аналого-цифровое преобразование в нем осуществляется не непрерывно, а по синхронизирующему сигналу генератора тактовых импульсов (ГТИ), подаваемому на вход SOC , (рис. 2.16) при условии, что на входе OE сформирован сигнал логической единицы. Поскольку время преобразования составляет 1 мкс, частота тактового генератора не может превышать 1 МГц. АЦП имеет два входа $VREF+$ и $VREF-$, на которые подается опорное напряжение U_{ref} и вход VIN , на который подается преобразуемое напряжение.

На восьми логических выходах DO , ..., $D7$ формируется выходной восьмиразрядный двоичный код. С помощью идеального АЦП можно моделировать и АЦП с меньшим числом разрядов. Это можно сделать, не используя избыточные младшие разряды.

Схема, приведенная на рис. 2.16, применяется для преобразования в случае, когда измеряемый сигнал положителен и изменяется в диапазоне от нуля до U_{max} . При использовании всех восьми разрядов максимальное значение кода, в который может быть преобразовано напряжение, равно $2^8 - 1 = 255$, а значение ЕМР вычисляется по формуле

$$U_0 = U_{ref}/2^8 = U_{ref}/256.$$

Следовательно, максимальное значение напряжения, которое может быть преобразовано в код, составляет

$$U_{max} = U_{ref} (2^8 - 1)/2^8 = U_{ref} \frac{255}{256}.$$

Если необходимо преобразовать в код двуполярный сигнал, изменяющийся от минимального отрицательного до максимального положительного значения, удобно применять схему рис. 2.17.

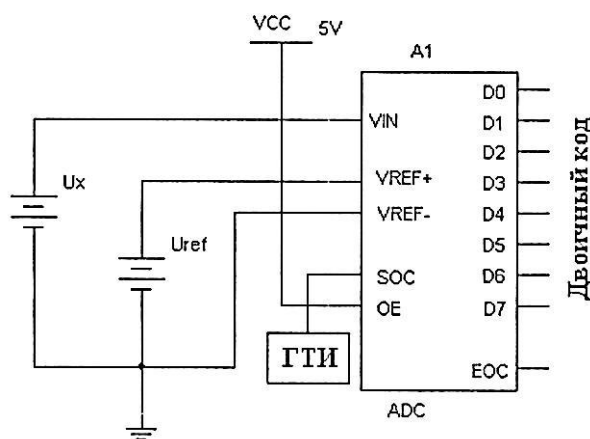


Рис. 2.16

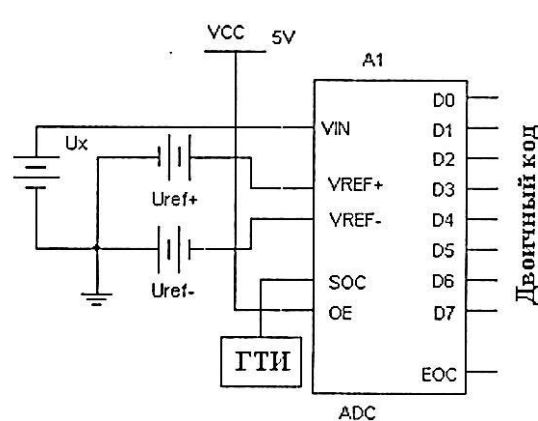


Рис. 2.17

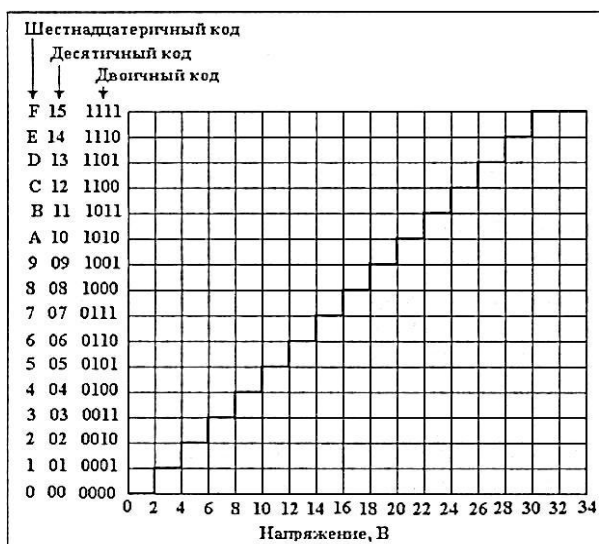


Рис. 2.18

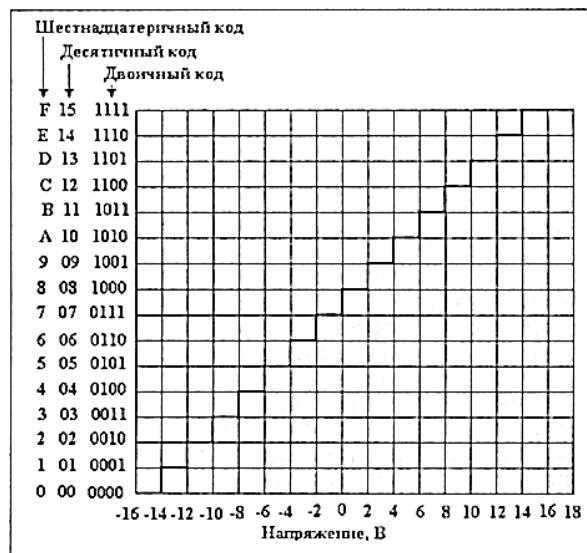


Рис. 2.19

Нулевому значению входного сигнала соответствует середина шкалы, т.е. число 128. Минимальное отрицательное значение будет преобразовано в нуль, максимальное положительное — в 255.

Характеристика вход-выход для случая четырехразрядного АЦП (используются четыре старших разряда) при напряжении на входе V_{REF+} равном 32 В, а на входе V_{REF-} — нулю, представлена на рис. 2.18.

Как следует из рисунка, при любом значении входного сигнала меньше 2 В на выходе АЦП будет формироваться двоичный код 0000, при входных сигналах от 2 до 4 В — код 0001. Следовательно, если на выходе формируется код равный единице, то аналоговый сигнал, соответствующий этому коду, мы можем записать в виде $A = 3 \pm 1$ В. Это определяет погрешность, вызываемую дискретностью преобразования.

Рассмотрим теперь характеристику преобразования двуполярного напряжения. Пусть напряжение на входах $V_{REF+} = V_{REF-}$ равно 16 В. Выходные величины отложены на горизонтальной оси рис. 2.19. Таким образом, одинаковым выходным кодам на вертикальной оси рис. 2.18 и 2.19 в зависимости от способа подключения V_{REF} (см. рис. 2.16 или 2.17) соответствуют разные преобразуемые напряжения. Для уменьшения максимальной погрешности часто характеристику преобразования смещают на $1/2$ ЕМР, как показано на рис. 2.20.

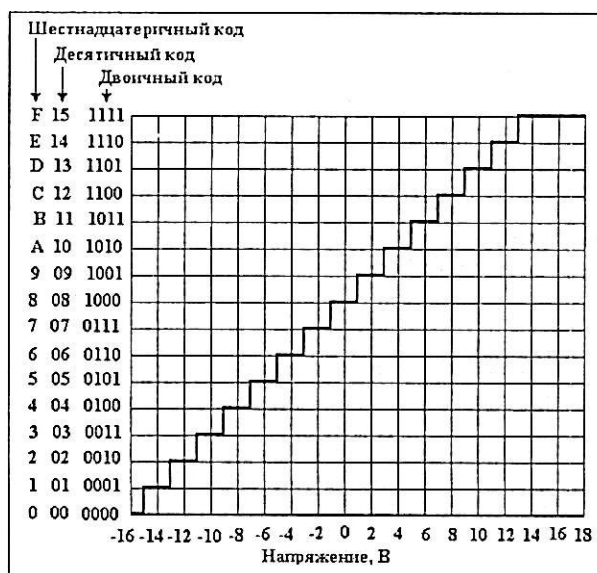


Рис. 4.20

Если диапазон преобразуемых аналоговых сигналов задан, то нетрудно вычислить значения опорных напряжений на входах VREF+ и VREF-, при которых перекрывается весь диапазон и обеспечивается максимальная точность преобразования:

$$(VREF+) = U_{x \max} / (U_{x \max} - U_{x \min});$$

$$(VREF-) = U_{x \min} / (U_{x \max} - U_{x \min}).$$

Погрешность преобразования кода в напряжение. Рассматривая выходные характеристики, нетрудно понять, как определяется погрешность, вызываемая дискретностью преобразования. Абсолютная погрешность при любом входном сигнале не должна превышать 1 ЕМР. Максимальная относительная погрешность при этом зависит от значения преобразуемого напряжения. Она вычисляется по формуле $\delta = U_0 / U_x$.

Погрешность минимальна при максимальном значении измеряемого напряжения $U_{x \max}$ и составляет

$$U_0 / U_{x \max} = U_0 / (U_0 \cdot 2^n) = 1/2^n.$$

Здесь U_0 — значение ЕМР; U_x — преобразуемое аналоговое напряжение.

При снижении преобразуемого напряжения максимальная погрешность увеличивается, достигая при $U_x = U_0$ 100 %.

Для обеспечения точности преобразования не менее 0,1 % необходимо иметь не менее 10 двоичных разрядов ($1/(2^{10} - 1) < 0,001$). Стандартные модули АЦП обычно бывают восьми—десятиразрядными. Однако в дальнейшем описании для удобства записи результатов ограничимся при изучении АЦП четырьмя разрядами.

АЦП с единичными приращениями компенсирующего сигнала. Если преобразуемый сигнал изменяется достаточно медленно, например, в случае измерения напряжения на выходе аккумулятора в процессе разрядки, быстроедействие преобразователя не играет роли. Благодаря этому удастся упростить схему АЦП. Одна из возможных структур для таких применений представлена на рис. 2.21, а.

Преобразователь содержит двоичный n -разрядный счетчик, цифроаналоговый преобразователь, аналоговый компаратор со входами преобразуемого U_x и компенсирующего U_k напряжения.

По сигналу «Пуск» счетчик обнуляется (на его выходах устанавливается код 0000), затем начинается счет числа импульсов генератора тактов (ГТ). По мере увеличения числа импульсов и, следовательно, кода K_x , возрастает выходное напряжение ЦАП. Когда устанавливается соотношение $U_k > U_x$, компаратор сигналом «Стоп» прекращает работу счетчика. Зафиксированный в счетчике и на индикаторе код K_x и будет результатом преобразования. Цикл повторяется с поступлением следующего сигнала «Пуск». Временные диаграммы (рис. 2.21, б) поясняют работу АЦП.

Счетчик имеет n разрядов, частоты ГТ и сигналов «Пуск» выбираются так, чтобы за время между пусковыми сигналами счетчик успел заполниться ($K_{\max} = 1111 \dots$), а система индикации кода успела зарегистрировать код K_x , т.е. результат преобразования аналог—код.

Системы АЦП с единичными приращениями могут выполняться по принципу слежения. В этом случае счетчик должен быть реверсивным, а компаратор должен фиксировать выполнение одного из условий:

$$1) \quad U_k > U_x + U_0;$$

2)

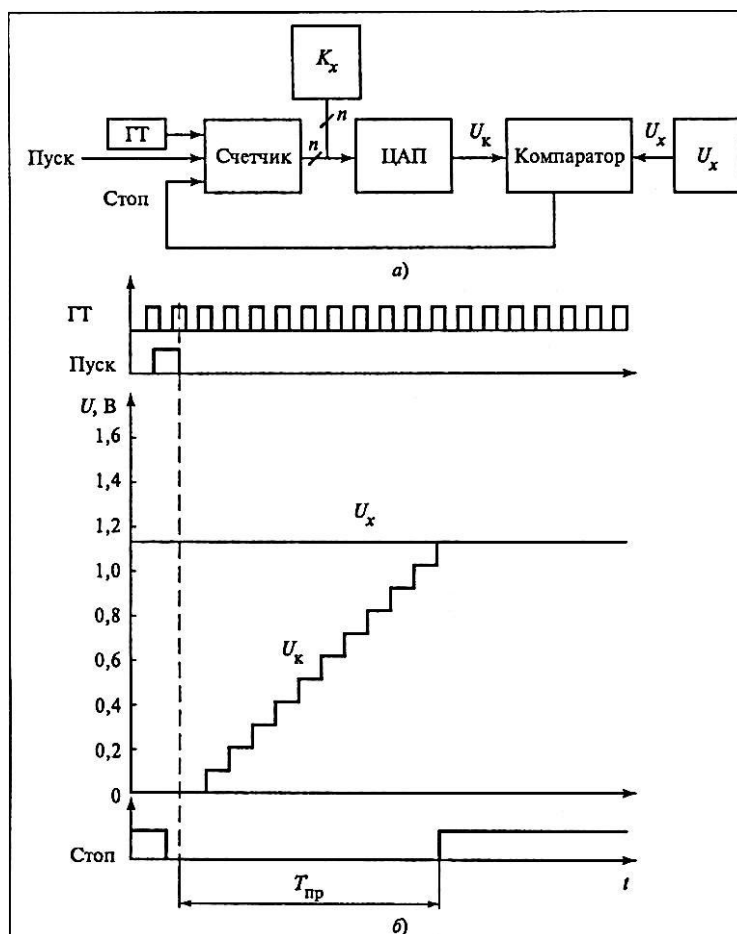


Рис. 2.21

$$2) U_x - U_0 \leq U_k \leq U_x + U_0;$$

$$3) U_k < U_x - U_0.$$

Если выполняется условие 1) и компенсирующее напряжение ЦАП недостаточно, компаратор устанавливает режим работы счетчика на сложение; если выполняется условие 3), счетчик переводится в режим вычитания. Режим 2) означает, что с точностью $EMR = U_0$ можно считать $U_k \sim U_x$, т.е. счетчик не работает до тех пор, пока компаратор не обнаружит перехода к условию 1) или 3).

Описанная структура АЦП называется структурой с единичными приращениями компенсирующего сигнала. Она характеризуется низким быстродействием. В нашем примере (см. рис. 4.21) наибольшее время преобразования $T_{пр} = 2^n T_{ГТ}$.

АЦП с поразрядным уравниванием. Более высокое быстродействие достигается при использовании способа поразрядного уравнивания. Он основан на половинном делении интервала измерения и определении факта принадлежности измеряемой величины к одной либо другой половине интервала.

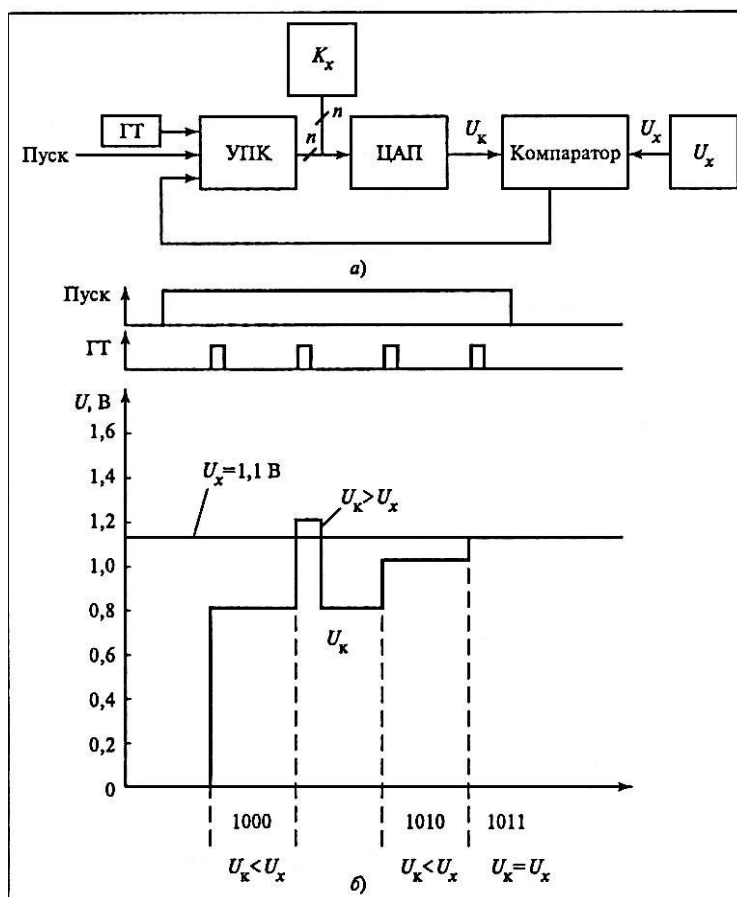


Рис. 2.22

Поясним это примером. Пусть $U_x = 1,1$ В, интервал измерения $0—1,5$ В, $U_0 = \text{EMР} = 0,1$ В. Преобразование осуществляется путем реализации определенного алгоритма в схеме рис. 2.22, а, б.

Схема содержит устройство поразрядной компенсации (УПК), ГТ, ЦАП, аналоговый компаратор и узел хранения и отображения кода K_x . После поступления сигнала запуска в предварительно обнуленный УПК записывается единица старшего разряда; вместо кода 0000 фиксируется код 1000. В нашем примере это соответствует напряжению $U_k = 1000 = 0,8$ В.

Это напряжение сравнивается с U_x . Поскольку $1,1 > 0,8$, единица в старшем разряде запоминается; если $U_k < U_x$ — единица сбрасывается и заменяется нулем. На этом этап формирования бита старшего разряда закончен.

Записывается единица в следующий за старшим бит, выполняются аналогичные операции с кодом 1100. Этому коду соответствует $U_k = 1,2$ В. Поскольку $1,2 > 1,1$, т.е. $U_k > U_x$, единица сбрасывается, старшие биты 10XX заполнены.

Записывается единица в следующий бит: код 1010 соответствует $U_k = 1$ В, $U_k < U_x$, поэтому запоминается код 101x и аналогичная процедура выполняется с младшим разрядом: код 1011 соответствует $U_k = 1,1$ В, $U_k = U_x$, для определения полученного кода 1011 потребовалось $n = 4$ тактов, что существенно быстрее метода единичных приращений с 15 тактами.

Порядок проведения экспериментов

Эксперимент 1. АЦП, основанный на считывании состояния компараторов:

а) *наблюдение процессов в АЦП.* Откройте файл c16_08 со схемой, приведенной на рис. 2.23. Поскольку активными уровнями на входах и выходах приоритетного шифратора являются уровни логического нуля, логические пробники подключены к выводам микросхемы через инверторы. В этом случае активное состояние вывода соответствует светящемуся пробнику. Установите частоту генератора треугольного напряжения равной 0,1 Гц, амплитуду напряжения 8 В и смещение 7 В. Запустите схему и наблюдайте выходное напряжение генератора на экране осциллографа, состояние входов и выходов шифратора и коды на декодирующем семисегментном индикаторе в реальном времени (двоичный, десятичный и шестнадцатеричный);

б) *измерение потенциалов узлов делителя.* Измерьте потенциалы узлов 1—15 делителя напряжения, результаты измерения занесите в табл. раздела «Результаты экспериментов»;

в) *измерение порогов переключения младшего разряда шифратора.* Установите частоту генератора треугольного напряжения равной 1 Гц, амплитуду напряжения 1 В и смещение 5 В. Запустите схему и наблюдайте выходное напряжение генератора на экране осциллографа, состояние входов и выходов шифратора и шестнадцатеричный код на декодирующем семисегментном индикаторе в реальном времени. Второй вход осциллографа подключите к пробнику младшего разряда А0. Зарисуйте осциллограммы, полученные на экране осциллографа, в разделе «Результаты экспериментов». Измерьте порог переключения младшего разряда по осциллографу. Результат измерения занесите в соответствующую графу таблицы в разделе «Результаты экспериментов». Сравните полученное значение с потенциалом в точке 4. Проведите соответствующие измерения для значений смещения -1, -2, -3, -4, -6 и -7 В;

г) *осциллографирование процессов в АЦП.* Зарисуйте выходное напряжение генератора и напряжение на пробнике младшего разряда в эксперименте а) на экране осциллографа в разделе «Результаты экспериментов». Проставьте на соответствующих интервалах временной диаграммы напряжения на пробнике двоичный код А3, А2, А1, А0 и код, показываемый декодирующим индикатором.

Эксперимент 2. Исследование функциональной модели четырехразрядного АЦП:

а) *получение выходной характеристики АЦП.* Откройте файл c16_09 со схемой, приведенной на рис. 2.24. Откройте изображение генератора слов и осциллографа. Нажмите клавишу Step на панели генератора слов. Зарисуйте осциллограммы, полученные на экране осциллографа, в разделе «Результаты экспериментов». По осциллографу измерьте напряжение функционального генератора, под тактовым импульсом на экране осциллографа проставьте значение шестнадцатеричного кода на семисегментном индикаторе, на графике выходной характеристики проставьте точку, соответствующую эксперименту. Около точки запишите измеренное по осциллографу напряжение. Продолжите действия по описанному алгоритму для всех тактовых импульсов одного периода входного напряжения;

б) *получение осциллограмм входного и выходного сигналов АЦП.* Зарисуйте с экрана осциллографа в соответствующем пункте раздела «Результаты экспериментов» осциллограммы входного сигнала и напряжения с младшего разряда D4 (рис. 2.25). Определите пороги переключения.

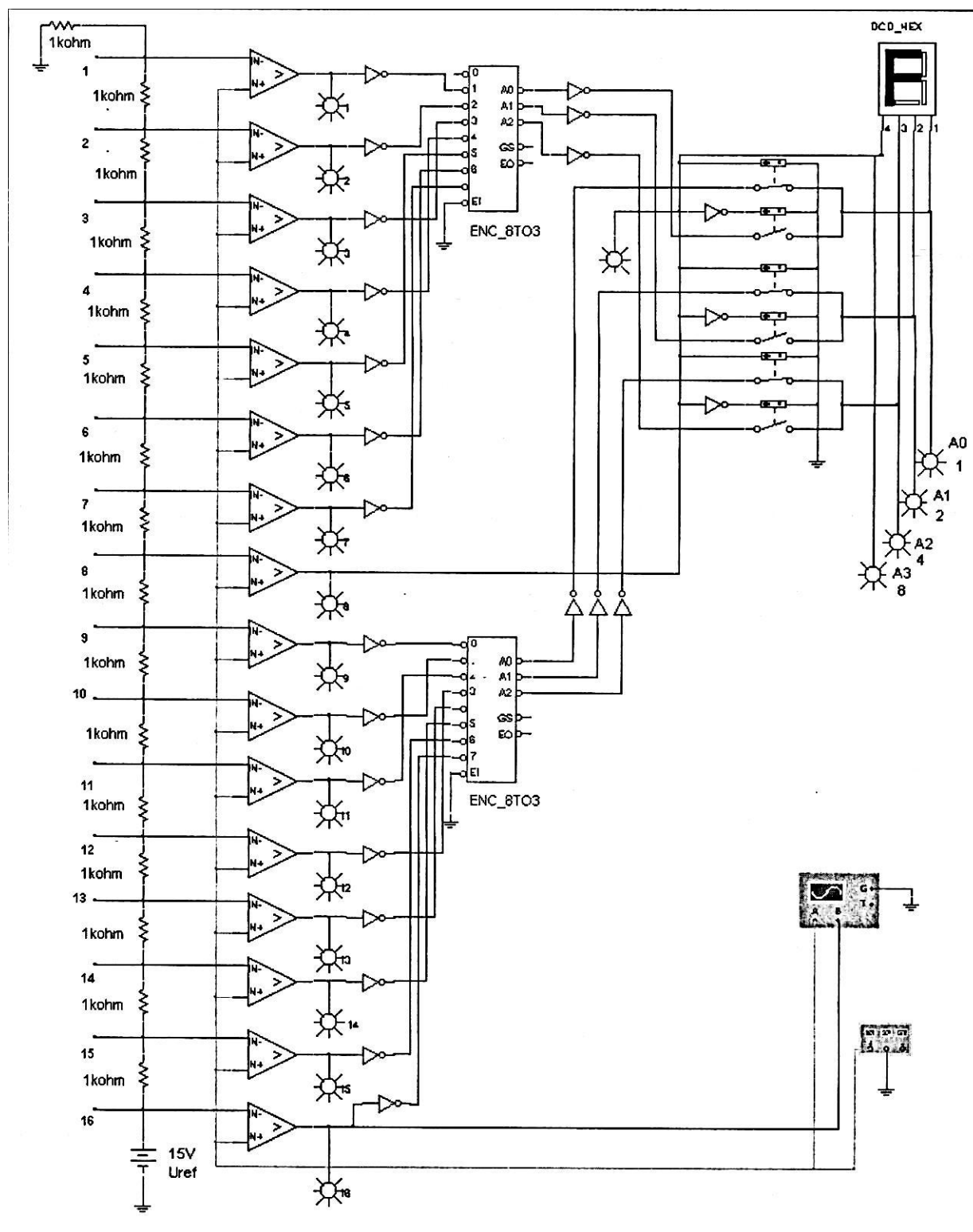


Рис. 2.23

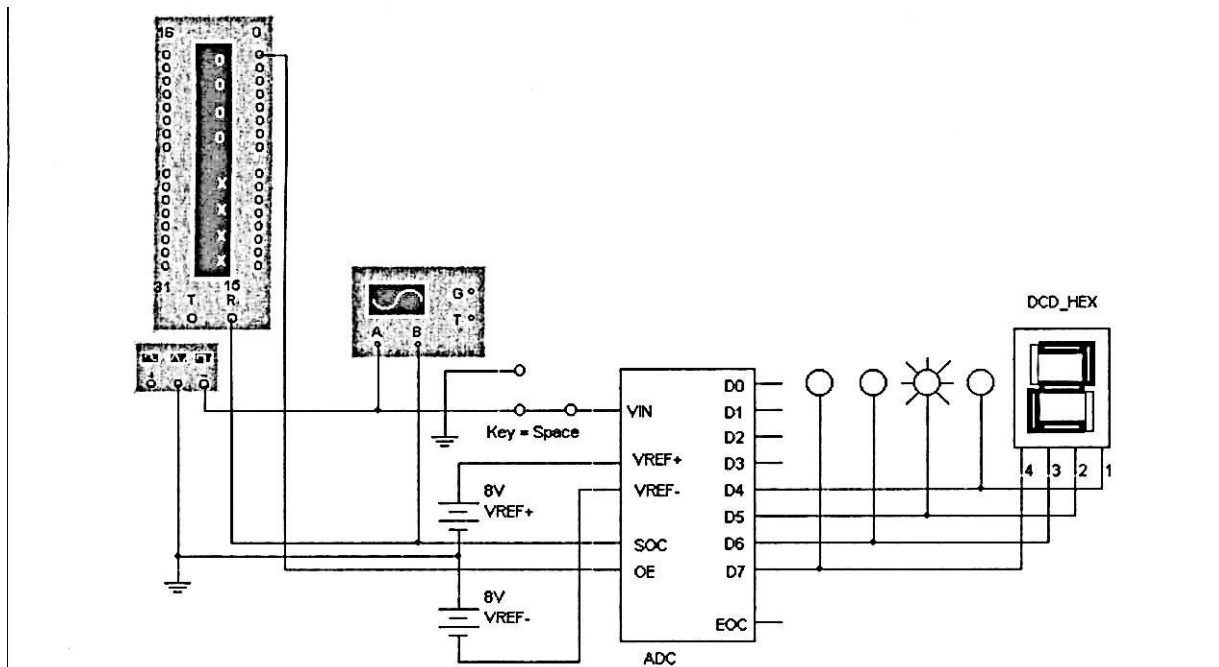


Рис. 2.24

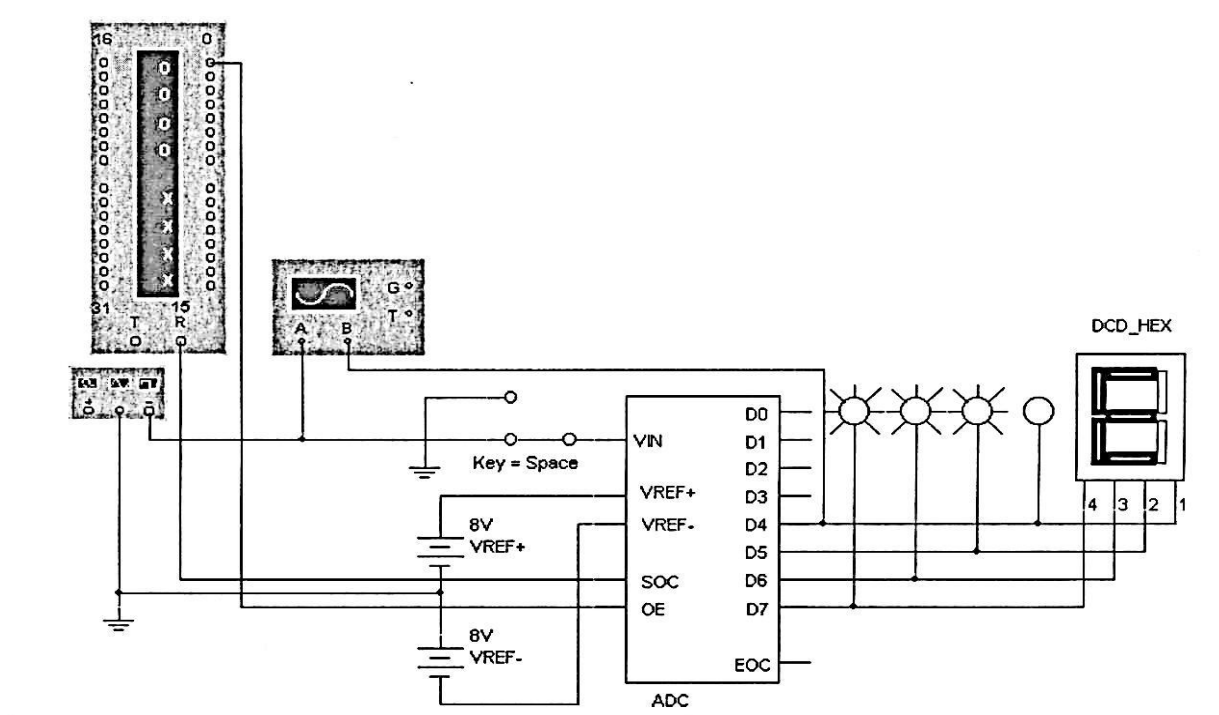


Рис. 2.25

Эксперимент 3. Исследование АЦП с единичными приращениями компенсирующего сигнала:

а) процессы в АЦП при ручной подаче тактовых сигналов. Откройте файл s16_10 со схемой, приведенной на рис. 2.26. Переведите ключ сброса *S* в нижнее

положение. Двойным нажатием на клавишу Т подайте тактовый сигнал. Наблюдайте изменение шестнадцатеричного кода, записанного в декодирующем семисегментном индикаторе. Повторяйте тактовый сигнал до тех пор, пока не погаснет индикатор преобразования I_p и не засветится индикатор окончания операции *lend*.

Измените уровень входного аналогового сигнала до 6,5 В. Проведите процесс преобразования вручную и занесите результат в таблицу раздела «Результаты экспериментов»;

б) *определение времени измерения сигнала АЦП при подаче тактовых сигналов от генератора.* Откройте файл *s16_11* со схемой, приведенной на рис. 2.27. Включите схему. Зарисуйте осциллограммы напряжения на выходе компаратора и напряжения на входе счетчика, полученные на экране осциллографа, в соответствующем пункте раздела «Результаты экспериментов». Рассчитайте время измерения и определите его по осциллограммам. Результаты занесите в раздел «Результаты экспериментов».

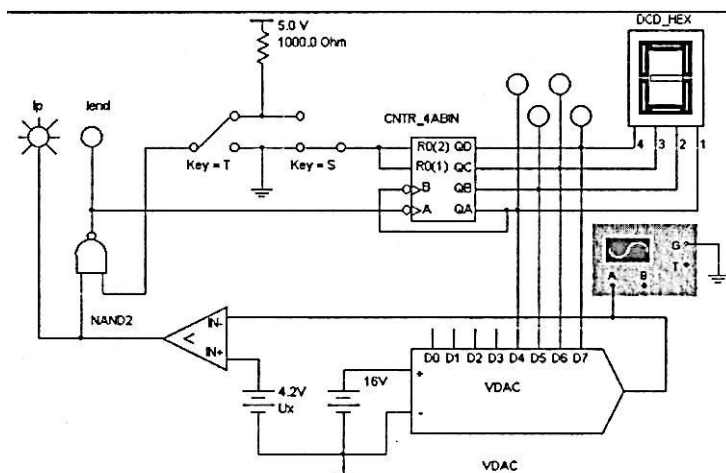
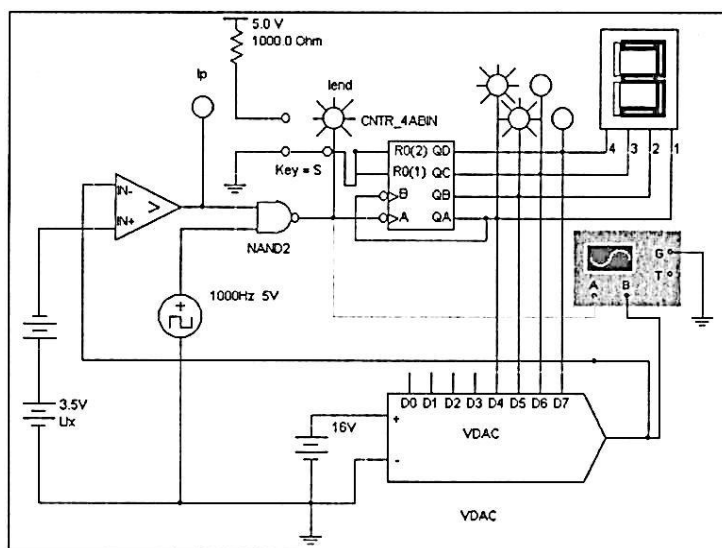


Рис. 2.26

в) *исследование АЦП с единичными приращениями компенсирующего сигнала с использованием двух разрядов шестнадцатеричного кода.* Откройте файл *s16_12* со схемой, приведенной на рис. 4.28. Наблюдайте изменение шестнадцатеричного кода, записанного в двух декодирующих семисегментных индикаторах (справа на схеме) и на вольтметре VDAS. Повторяйте тактовый сигнал до тех пор, пока не погаснет индикатор преобразования I_p и не засветится индикатор окончания операции *lend*.



Установите значение напряжения U_x равным 7,2 В. Получите шестнадцатеричный код, соответствующий этому аналоговому значению в схеме рис. 16.6. Вычислите соответствующее значение, умножив код на масштаб (в данном случае 1 В/единицу). Определите абсолютную и относительную погрешность измерения. Занесите результаты в раздел «Результаты экспериментов» на компакт-диске.

Установите значение опорного напряжения в схеме рис. 4.28 равным 8 В. Получите шестнадцатеричный код, соответствующий тому же значению поданного сигнала 7,2 В. Вычислите значение поданного сигнала, умножив код на масштаб (в данном случае

1/32 В/единицу). Занесите результат в раздел «Результаты экспериментов». Сравните погрешность измерения в схемах рис. 2.27 и 2.28.

В схеме рис. 2.28 проведите определение времени измерения по методике, изложенной в пункте б) данного эксперимента. Результат занесите в раздел «Результаты экспериментов».

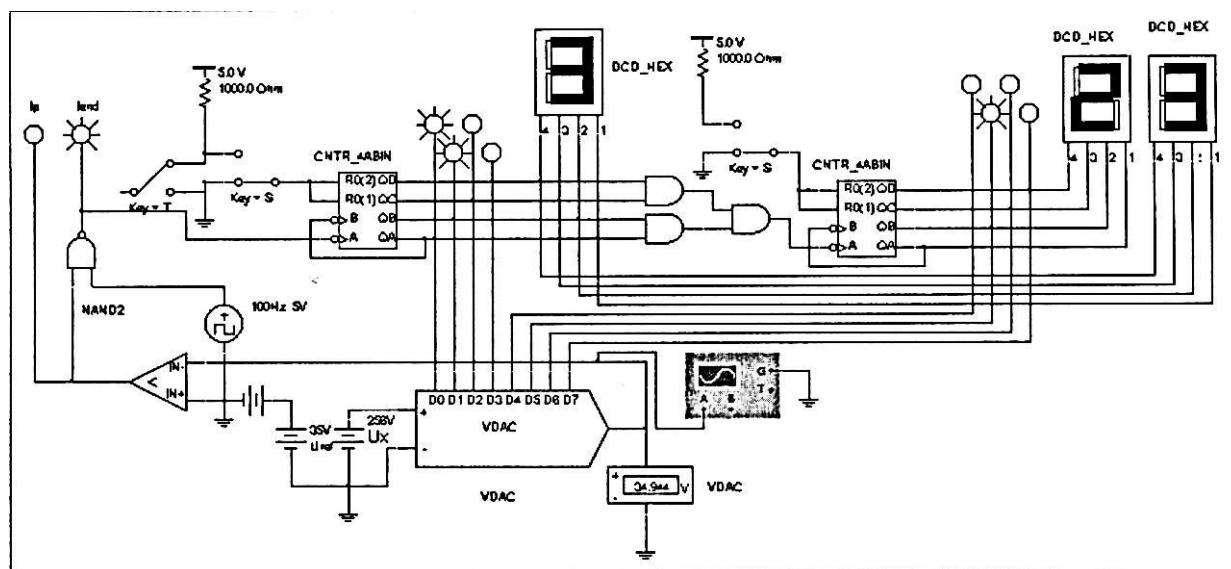


Рис. 2.28

Эксперимент 4. АЦП, основанный на поразрядном уравнивании

Откройте файл с 16_13 со схемой, приведенной на рис. 2.29. Верхняя часть схемы представляет собой схему рис. 2.1, в которой ключи управляются не с клавиатуры, а с помощью генератора слов. Нижняя часть схемы содержит регистр, построенный по схеме рис. 2.1. Схема работает по алгоритму, приведенному в кратких сведениях из теории. На первом такте включается старший разряд ЦАП, формируя на неинвертирующем входе компаратора напряжение 8 В. Если значение $U_x > 8$ В, то старший (левый на схеме) разряд регистра переводится в момент записи в активное состояние. При этом на нижний вход логической схемы ИЛИ подается единица с выхода этого разряда и на последующих тактах источник 8 В будет участвовать в формировании выходного напряжения ЦАП. Если же значение $U_x < 8$ В, то старший разряд остается в неактивном состоянии на всех последующих тактах. На втором такте включается следующий по старшинству разряд ЦАП, и на выходе формируется напряжение 12 или 4 В (в зависимости от состояния старшего разряда). Если значение $U_x > 12$ В (при включенном старшем разряде) или 4 В (при выключенном), то второй разряд регистра переводится в момент записи в активное состояние. При этом на нижний вход второй логической схемы ИЛИ подается единица с выхода этого разряда и на последующих тактах источник с напряжением 4 В будет участвовать в формировании выходного напряжения ЦАП. Аналогично происходят процессы на третьем и четвертом тактах. Для того чтобы пройти один такт, необходимо 4 раза нажать мышкой клавишу Step генератора слов в режиме Step.

Исследуйте схему и получите характеристику преобразователя АЦП:

а) *наблюдение процессов в АЦП*. Переведите ключ R в нижнее положение. Включите схему. Переведите ключ R в верхнее положение. Эту последовательность действий необходимо строго соблюдать, в противном случае работа схемы будет некорректной. Задавая значения входного аналогового сигнала в диапазоне от нуля до 16В, определите цифровое выходное значение. Результат занесите в раздел «Результаты экспериментов».

б) *получение характеристики преобразования АЦП*. Откройте изображение генератора слов и осциллографа. Нажмите клавишу Step на панели генератора слов. Зарисуйте осциллограммы, полученные на экране осциллографа, в разделе «Результаты экспериментов». По осциллографу измерьте напряжение функционального генератора, под тактовым импульсом на экране осциллографа проставьте значение шестнадцатеричного кода на семисегментном индикаторе, на графике выходной характеристики проставьте точку, соответствующую эксперименту. Около точки запишите измеренное по осциллографу напряжение. Продолжите действия по описанному алгоритму для всех тактовых импульсов одного периода входного напряжения.

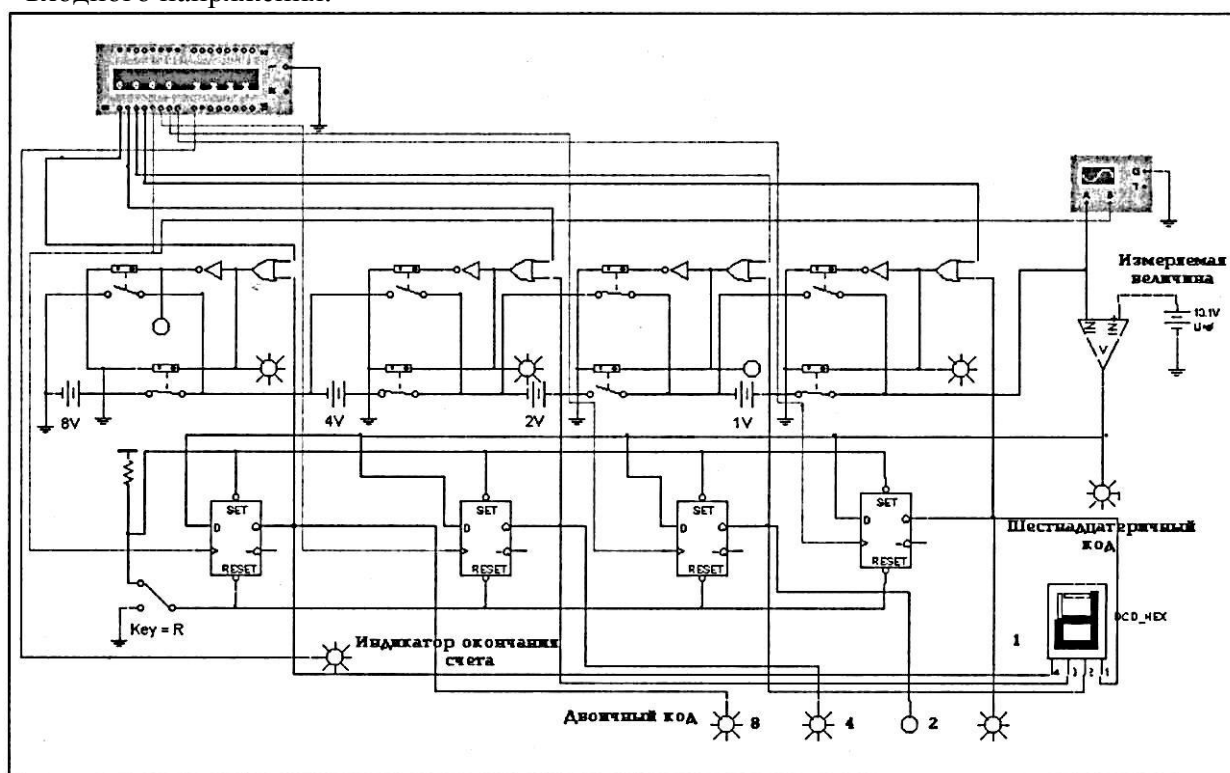


Рис. 2.29

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вычислительные машины, сети и телекоммуникационные системы: учебное пособие/ А. П. Пятибратов, Л. П. Гудыно, А. П. Кириченко. - М.: МЭСИ, 2007. - 292 с.
2. Бройдо В.Л., Ильина О.П. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации. СПб.: Питер, 2008 г.

3. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и ее применение. - М.: Солон-Р, 1999. - 512 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Лабораторная работа № 1. Цифроаналоговые преобразователи.....	3
Лабораторная работа № 2. Аналого-цифровые преобразователи.....	12
Библиографический список.....	23