

3. Аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи

При моделировании и разработке цифровых систем управления необходимы определенные знания об аппаратно-программных компонентах, обеспечивающих взаимодействие *цифровых* и *аналоговых* элементов системы, а именно – о цифро-аналоговых (ЦАП/DAC) и аналого-цифровых преобразователях (АЦП/ADC). Знание их принципов построения и характеристик необходимы для обеспечения *временных*, *точных* и других характеристик системы.

3.1. Цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП)

ЦАП - это устройство (автономно реализованный функциональный узел, или же встроенное на кристалле микроконтроллера), предназначенное для преобразования *входного цифрового* сигнала (*двоичных кодовых комбинаций*), в эквивалентные значения *аналогового* сигнала.

ЦАП во многих случаях входит составной частью в АЦП. Структурная организация ЦАП имеет гораздо меньшее разнообразие вариантов, чем у АЦП.

Классификация ЦАП

По характеру опорного сигнала: с фиксированным опорным сигналом; с изменяющимся опорным сигналом (переключающего типа).

По принципу формирования выходного сигнала: суммированием токов, суммированием напряжений, делением напряжений.

По принципу действия:

Широтно-импульсный модулятор - простейший тип ЦАП. Стабильный источник *тока* или *напряжения* периодически включается на время, пропорциональное преобразуемому цифровому коду, далее полученная импульсная последовательность фильтруется аналоговым фильтром низких частот. Например, такой способ часто используется для управления скоростью электродвигателей.

ЦАП передискретизации - например *дельта-сигма* ЦАП, основан на изменяемой плотности импульсов. Существенное *увеличение* частоты дискретизации цифрового сигнала позволяет использовать ЦАП с меньшей разрядностью для достижения большей разрядности итогового преобразования; часто дельта-сигма ЦАП строится на основе простейшего однобитного ЦАП. Большинство ЦАП большой разрядности (более 16 бит) построены на этом принципе.

Взвешивающий ЦАП - в нем каждому биту преобразуемого двоичного кода соответствует *резистор* или *источник тока*, подключенный на общую точку суммирования. Сила тока источника (проводимость резистора) пропорциональна весу бита, которому он соответствует. Таким образом, все ненулевые биты кода суммируются с весом. Это один из самых быстрых методов, но ему свойственна низкая точность из-за наличия набора множества различных прецизионных источников или резисторов. По этой причине взвешивающие ЦАП имеют разрядность не более восьми бит.

ЦАП с матрицей резисторов R-2R - является вариацией взвешивающего ЦАП. Взвешенные значения создаются в специальной схеме, состоящей из резисторов с сопротивлениями R и $2R$. Это позволяет существенно улучшить точность по сравнению с обычным взвешивающим ЦАП, т.к. значительно проще изготовить набор прецизионных элементов с *одинаковыми* параметрами. Недостатком метода является более низкая скорость вследствие паразитной емкости.

Сегментный ЦАП - содержит по одному источнику тока или резистору на каждое возможное значение выходного сигнала. Например, 8-битный ЦАП этого типа содержит 255 сегментов, а 16-битный - 65535. Теоретически, сегментные ЦАП имеют самое высокое быстродействие, так как для преобразования достаточно замкнуть один ключ, соответствующий входному коду.

Гибридные ЦАП - используют комбинацию перечисленных выше способов. Большинство микросхем ЦАП относятся к этому типу.

Выбор конкретного набора способов является компромиссом между быстродействием, точностью и стоимостью ЦАП.

3.2. Принципы построения ЦАП

ЦАП предназначен для преобразования цифрового сигнала $D_j(d_{n-1}d_{n-2}\dots d_1d_0)$ - двоичных кодовых комбинаций - в эквивалентные значения аналогового сигнала (напряжения или тока). Каждый разряд двоичного кода d_i имеет определенный вес, причем вес i -го разряда вдвое больше, чем вес $(i-1)$ -го. Число, задаваемое кодом D , принимает максимальное значение, когда $d_i=1, i=0, 1, \dots, n-1$:

$$D_{\max} = d_{n-1} \cdot 2^{n-1} + d_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + d_1 \cdot 2^1 + d_0 \cdot 2^0 = \sum_{i=0}^{n-1} 2^i = 2^n - 1 \quad (3.1)$$

Рассмотрим способы построения ЦАП на основе сложения токов:

- 1) с использованием весовых двоично-взвешенных сопротивлений;
- 2) с использованием матрицы с двумя номиналами сопротивлений (матрицей R - 2R).

На рис. 3.1 приведена схема ЦАП с весовыми двоично-взвешенными сопротивлениями (при $n=4$), она содержит:

- матрицу двоично-взвешенных резисторов;
- n ключей ($S_0 - S_{n-1}$), управляемых входным двоичным кодом $D=(d_{n-1}, d_{n-2}, \dots, d_1, d_0)$;
- источник опорного напряжения (ИОН) $U_{\text{оп}}$;
- выходной суммирующий операционный усилитель (ОУ).

Суть преобразования - суммирование нескольких токов (по числу единичных разрядов входного кода).

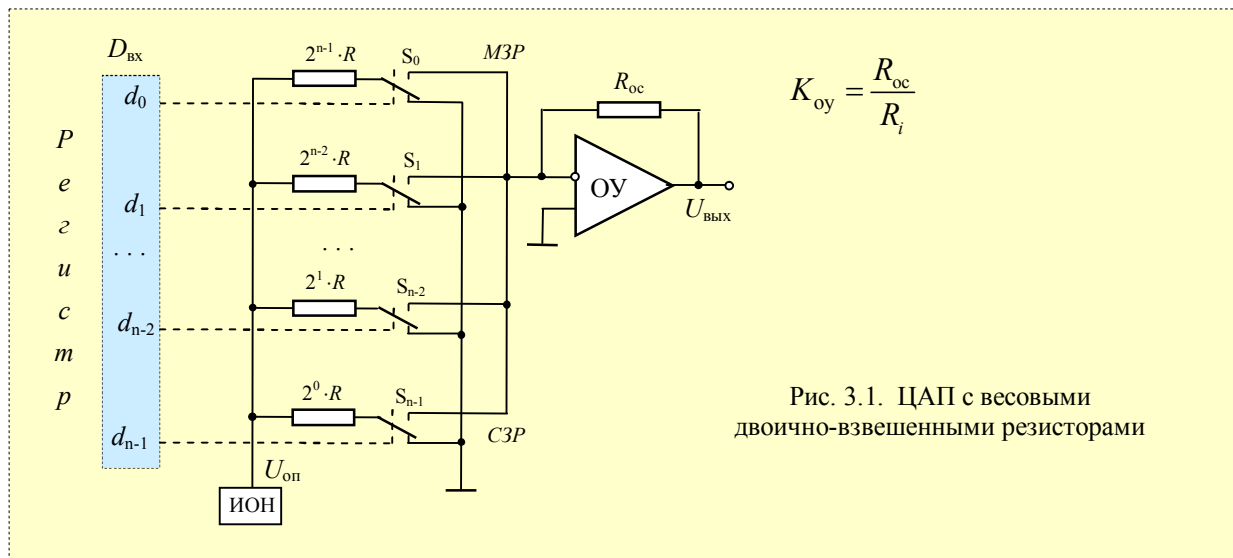


Рис. 3.1. ЦАП с весовыми двоично-взвешенными резисторами

Все резисторы постоянно подключены к ИОН. Другие концы резисторов могут подключаться ко входу ОУ, либо отключаться от него. Каждый i -й разряд управляет ключом S_i , который подключает резистор ко входу ОУ, когда $d_i=1$, или отключает, когда $d_i=0$. Сопротивления резисторов R_i таковы, что обеспечивается пропорциональность протекающего в них тока двоичному весу соответствующего разряда входного кода: $R_i = R \cdot 2^{(n-1)-i}$, где $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$, R - сопротивление резистора самого старшего значащего разряда d_{n-1} (наименьшее по величине), сопротивление следующего резистора $2 \cdot R$ и т. д. до сопротивления резистора в младшем разряде, значение которого $R \cdot 2^{n-1}$. Следовательно, ток I , на входе ОУ определяется

следующим соотношением:

$$I = \frac{d_{n-1} \cdot U_{\text{оп}}}{R} + \frac{d_{n-2} \cdot U_{\text{оп}}}{2 \cdot R} + \dots + \frac{d_1 \cdot U_{\text{оп}}}{2^{n-2} \cdot R} + \frac{d_0 \cdot U_{\text{оп}}}{2^{n-1} \cdot R} \quad (3.2),$$

а напряжение на выходе ЦАП:

$$U_{\text{вых}} = -I \cdot R_{\text{ос}} = -\frac{d_{n-1} \cdot U_{\text{оп}} \cdot R_{\text{ос}}}{R} - \frac{d_{n-2} \cdot U_{\text{оп}} \cdot R_{\text{ос}}}{2 \cdot R} - \dots - \frac{d_1 \cdot U_{\text{оп}} \cdot R_{\text{ос}}}{2^{n-2} \cdot R} - \frac{d_0 \cdot U_{\text{оп}} \cdot R_{\text{ос}}}{2^{n-1} \cdot R} = -\frac{U_{\text{оп}} \cdot R_{\text{ос}}}{2^{n-1} \cdot R} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} d_i \cdot 2^i \quad (3.3)$$

Если обозначить $\frac{R_{oc}}{2^{n-1} \cdot R} = k$, то можно записать

$$U_{вых} = -k \cdot U_{оп} \cdot D = -k \cdot U_{оп} \cdot (d_{n-1} \cdot 2^{n-1} + d_{n-2} \cdot 2^{n-2} + \dots + d_1 \cdot 2^1 + d_0 \cdot 2^0) = -k \cdot U_{оп} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} d_i \cdot 2^i \quad (3.4)$$

$$U_{вых} = -k \cdot U_{оп} \cdot D = -k \cdot U_{оп} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} d_i \cdot 2^i$$

где $U_{оп}$ - опорное (эталонное) напряжение; $d_{n-1}, d_{n-2}, \dots, d_1, d_0$ - коэффициенты двоичных разрядов, принимающие значения 0 или 1; n - число двоичных разрядов; k - коэффициент пропорциональности.

$U_{вых}$ максимально, когда все разряды принимают значение 1: $U_{вых}^{max} = \left| k \cdot U_{оп} \frac{(2^n - 1) \cdot R_{oc}}{2^{n-1} \cdot R} \right|$

Данная схема проста по структуре, однако реализация ее представляет определенную сложность из-за того, что с увеличением разрядности ЦАП n величины сопротивлений имеют очень большой разброс (в тысячи раз). Например, для 16-разрядного ЦАП это диапазон от R до $2^{15} \cdot R = 32768 \cdot R$. Если $R=10$ кОм, то $R_0=327,68$ МОм. А так как разрешающая способность ЦАП должна быть при этом не хуже половины МЗР, то точность выполнения номинала этого резистора должна быть не хуже $1/65536$. Такую точность в интегральном исполнении реализовать практически невозможно. Поэтому схема с суммированием взвешенных токов может использоваться только для реализации ЦАП невысокой разрядности.

На рис. 3.2 приведена схема ЦАП с двумя номиналами сопротивлений (матрицей $R - 2R$). Она исключает эти сложности, благодаря наличию *дополнительного резистора в каждом разряде*.

Особенность матрицы $R - 2R$ заключается в том, что при любом положении ключей S_i ее входное сопротивление со стороны источника $U_{оп}$ всегда равно R , т. е. общий ток, втекающий в матрицу, равен $I = \frac{U_{оп}}{R}$. Распределение потенциалов в узлах матрицы *не меняется* при изменении положения ключей,

т.к. входное сопротивление ОУ, охваченного отрицательной обратной связью через резистор R , фактически равно нулю, следовательно, потенциал его входа равен потенциалу «земли». Это обстоятельство приводит к последовательному уменьшению вдвое напряжения в узлах схемы по мере их удаления от ИОН и такому же уменьшению токов, протекающих через ключи S_i .

Ключом S_3 коммутируется ток величиной $U_{оп}/2 \cdot R$, ключом S_2 - $U_{оп}/4 \cdot R$, S_1 - $U_{оп}/8 \cdot R$, S_0 - $U_{оп}/16 \cdot R$. Т.е. токи, коммутируемые соседними ключами, различаются вдвое, как и веса разрядов двоичного кода.

Токи, коммутируемые всеми ключами, суммируются и преобразуются в выходное напряжение с помощью ОУ с сопротивлением R_{oc} в цепи отрицательной обратной связи.

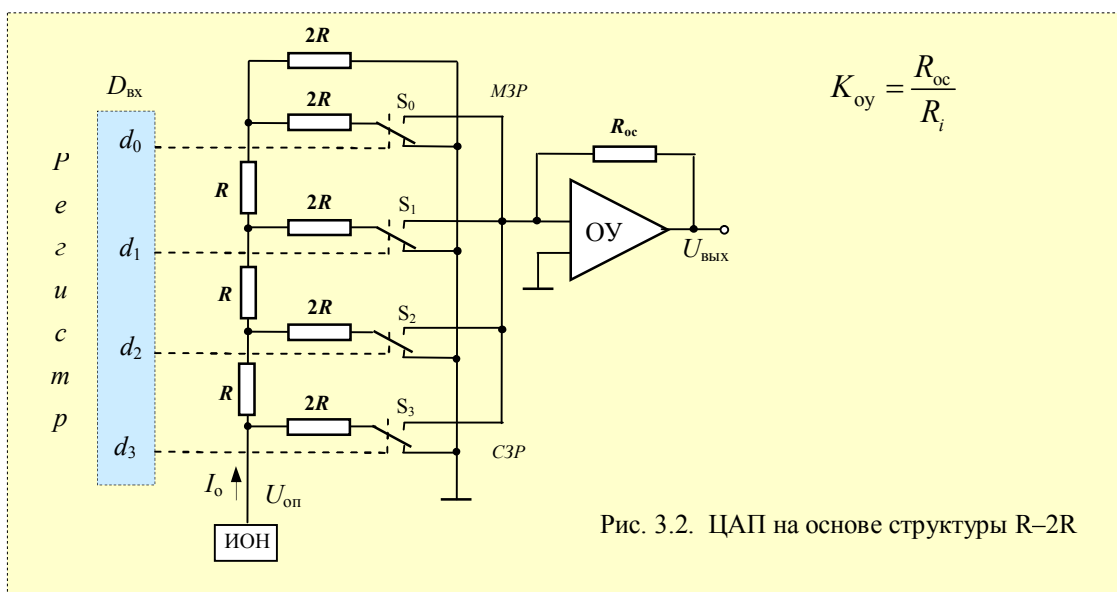


Рис. 3.2. ЦАП на основе структуры $R-2R$

Например, это наглядно показывает схема для 3-х разрядного двоичного кода, приведенная **рис. 3.3**.

В каждой точке соединения резисторов R и $2R$ ток разветвляется на два равных тока.

В соответствии с кодом числа D (в примере $D=0111$) эти взвешенные токи поступают на вход ОУ. Тогда общий ток на инверсном входе ОУ будет

$$I_{OY} = \frac{d_2 \cdot I_o}{2} + \frac{d_1 \cdot I_o}{4} + \frac{d_0 \cdot I_o}{8}, \text{ а так как } I_o = \frac{U_{оп}}{R}, \text{ то } I_{OY} = \frac{d_2 \cdot U_{оп}}{2R} + \frac{d_1 \cdot U_{оп}}{4R} + \frac{d_0 \cdot U_{оп}}{8R}$$

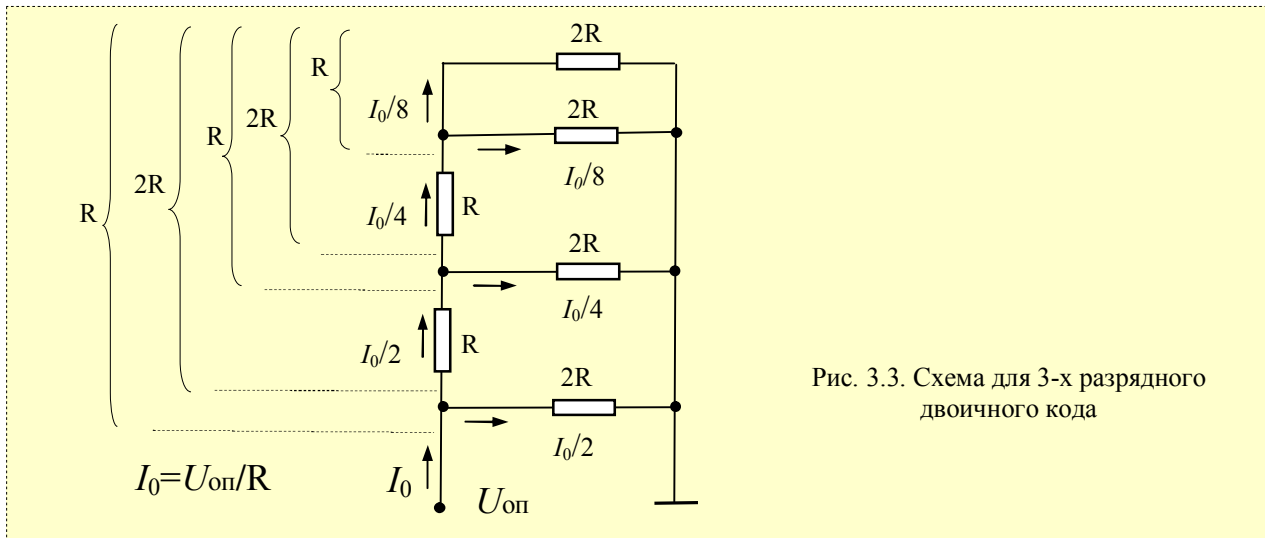


Рис. 3.3. Схема для 3-х разрядного двоичного кода

Результирующее выходное напряжение ЦАП определяется по выражению

$$U_{вых} = -I_{OY} \cdot R_{OC} = -\left(\frac{d_2 \cdot U_{оп}}{2 \cdot R} + \frac{d_1 \cdot U_{оп}}{4 \cdot R} + \frac{d_0 \cdot U_{оп}}{8 \cdot R}\right) \cdot R_{OC} = -\frac{U_{оп} \cdot R_{OC}}{8R} \cdot (4 \cdot d_2 + 2 \cdot d_1 + d_0)$$

Для n -разрядного входного кода результирующее $U_{вых}$: $U_{вых} = -\frac{U_{оп} \cdot R_{OC}}{2^n \cdot R} \cdot \sum_{i=0}^{n-1} d_i \cdot 2^i$. $U_{вых}$ отрицательно, т.к. ОУ осуществляет инверсию знака входного сигнала.

$U_{вых}$ максимально, когда все разряды имеют значение 1: $U_{вых}^{макс} = \left| \frac{(2^n - 1) \cdot U_{оп} \cdot R_{OC}}{2^n \cdot R} \right|$

Качество преобразования зависит от разрядности ЦАП и частоты дискретизации. Например, при максимальном уровне напряжения 2,6 В и $n=8$ ($2^8=256$) точность передачи уровня будет не лучше $2600/256 \approx 10$ мВ, а при $n=16$ изменения в МЗР дадут уровень около $2600/65536 \approx 40$ мкВ. Частота дискретизации зависит от верхней частоты в спектре выходного сигнала.

Работу ЦАП можно описать также следующей формулой:

$$U_{вых} = h \cdot (d_{n-1} \cdot 2^{n-1} + d_n \cdot 2^n + \dots + d_1 \cdot 2^1 + d_0 \cdot 2^0)$$

где h - напряжение, соответствующее весу МЗР, d_i - значение i -го разряда (0 или 1). Например, при $n=4$ числу 1001 (мл. разряд справа) соответствует

$$U_{вых} = h \cdot (1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0) = 9 \cdot h,$$

а числу 1100 соответствует $U_{вых} = 12 \cdot h$.

Т.к. выходной ток в таком преобразователе изменяется линейно, то имеется возможность умножения аналогового сигнала на цифровой код, если вместо $U_{оп}$ использовать аналоговый сигнал. Такие ЦАП называются *перемножающими*.

3.3. Параметры и характеристики ЦАП

ЦАП находятся в начале аналогового тракта системы, поэтому его параметры и характеристики во многом определяют некоторые параметры всей системы управления в целом. Параметры ЦАП можно разделить на две группы: *статические* и *динамические*.

Статические параметры: число разрядов; диапазон изменения входного кода; диапазон изменения выходного сигнала; разрешающая способность; погрешности преобразования.

Эти параметры могут быть определены по *характеристике преобразования* или **статической характеристике** (СХ), под которой понимают зависимость значений выходной аналоговой величины $U_i(t)$ от значений входного кода D_i . Эта зависимость может быть представляться в виде *графика*, *формулы* или *таблицы*. На **рис. 3.4,а** представлена СХ *однополярного* 3-разрядного ЦАП. Здесь как *входной*, так и *выходной сигналы квантованы*, поэтому график СХ содержит 8 отдельных точек. *Начальная точка СХ* определяется как точка, соответствующая первому (нулевому) входному коду $D(000)$. *Конечная точка СХ* определяется как точка, соответствующая последнему входному коду $D(111)$.

Иногда, чтобы подчеркнуть дискретность изменения как значения кода, так и выходной аналоговой величины, СХ изображают ступенчатой (кусочно-постоянной) линией (**рис. 3.4,б**).

Реальная СХ может существенно отличаться от идеальной. Для количественного описания этих различий существует целый ряд параметров.

Разрядность n – число разрядов/бит, определяет максимальное количество различных уровней N выходного сигнала $N=2^n$, которые ЦАП может воспроизвести, $n = \log_2 N$.

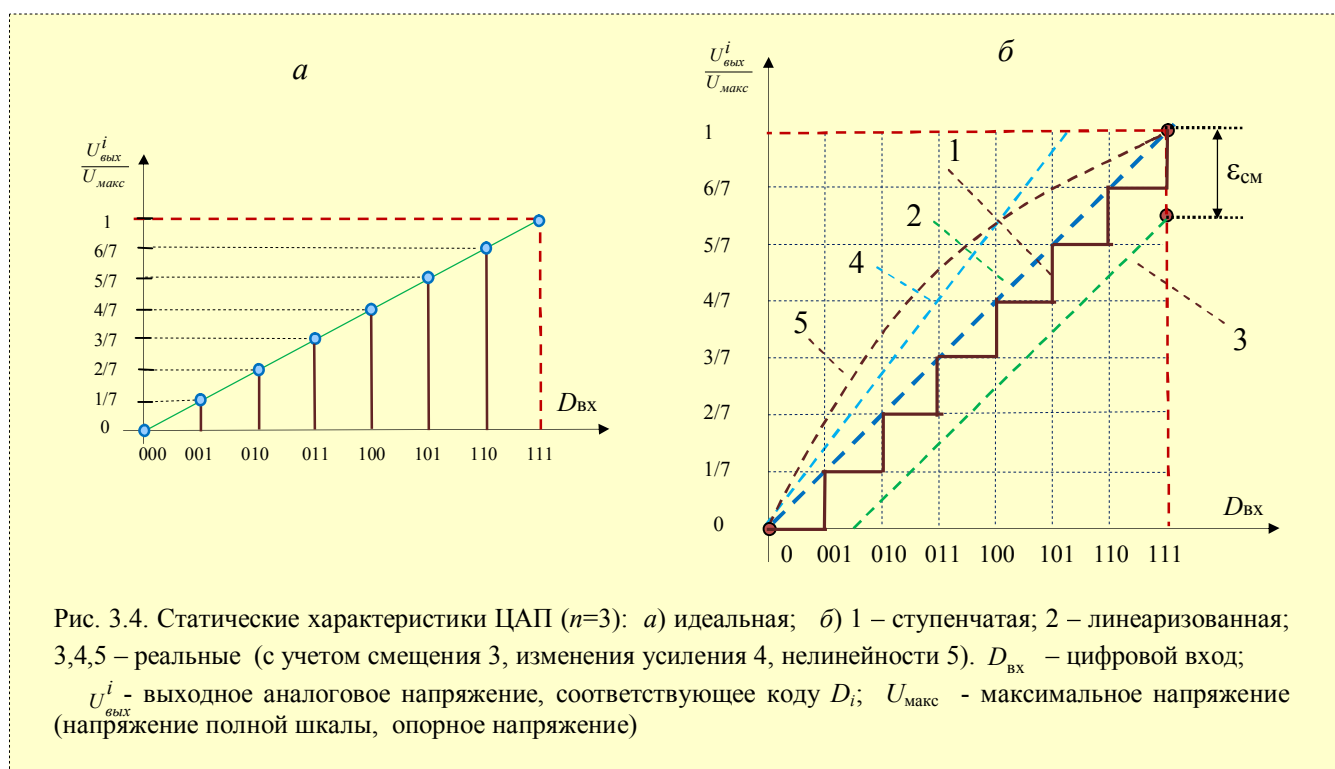


Рис. 3.4. Статические характеристики ЦАП ($n=3$): а) идеальная; б) 1 – ступенчатая; 2 – линейризованная; 3,4,5 – реальные (с учетом смещения 3, изменения усиления 4, нелинейности 5). $D_{\text{вх}}$ – цифровой вход;

$U_{\text{вых}}^i$ – выходное аналоговое напряжение, соответствующее коду D_i ; $U_{\text{макс}}$ – максимальное напряжение (напряжение полной шкалы, опорное напряжение)

Разрешающая способность – величина, обратная максимальному числу кодовых комбинаций N на входе ЦАП, она представляет собой приращение $U_{\text{вых}}$ при преобразовании смежных значений цифрового кода D_j , т.е. при изменении кода D_j на один МЗР. Это приращение h называют также *шагом квантования*

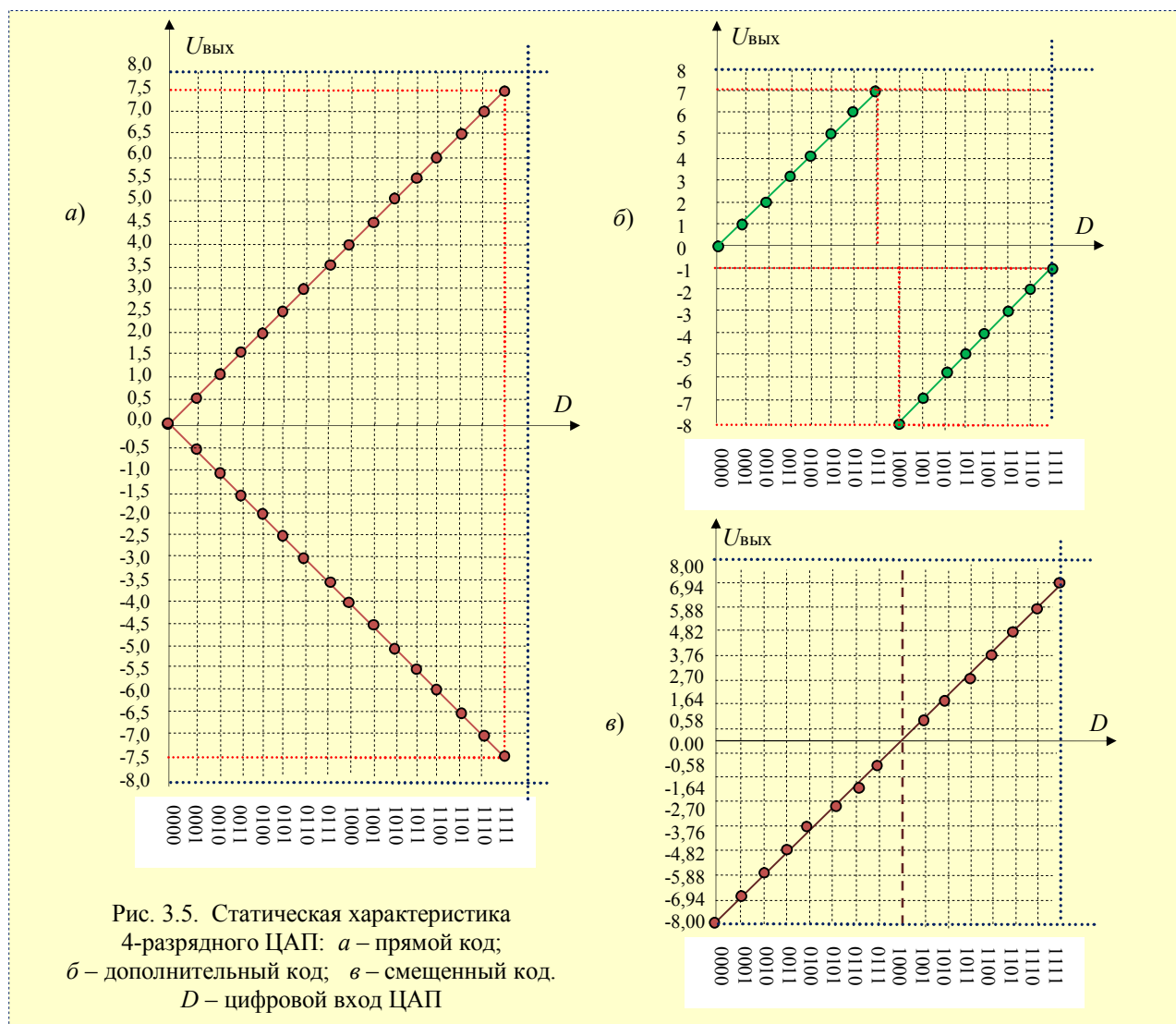
по уровню $h = \frac{U_{\text{пш}}}{2^n - 1} = \frac{U_{\text{макс}} - U_{\text{мин}}}{2^n - 1}$, где $U_{\text{пш}}$ – напряжение полной шкалы (номинальное максимальное выходное напряжение ЦАП), $U_{\text{макс}}$ – максимальное, а $U_{\text{мин}}$ – минимальное значение $U_{\text{вых}}$. Чем больше разрядность преобразователя, тем выше его разрешающая способность.

Значение шага квантования может служить единицей измерения выходной аналоговой величины.

Разрешающая способность выражается в *процентах*, *разрядах* или *децибелах* и характеризует потенциальные возможности АЦП с точки зрения достижимой точности. Например, 12-разрядный ЦАП имеет разрешающую способность 1/4095, или 0,0245% от полной шкалы, или -72,2 дБ.

Коды, используемые при ЦА-преобразовании

На практике используются как однополярные, так и двухполярные/биполярные сигналы. При этом могут применяться следующие коды (рис. 3.5): 1) *прямой*, 2) *смещенный*, 3) *дополнительный*.



Прямой код - отдельный знаковый разряд управляет переключением полярности $U_{\text{вых}}$ (рис. 3.5,а).

Дополнительный код - отрицательные числа представляются двоичным *дополнением* положительного числа (инверсия всех разрядов с последующим суммированием младшего разряда с единицей) (рис. 3.5,б).

Смещенный код – исключаются коммутирующие элементы из схемы ЦАП; прост в реализации (рис. 3.5,в).

Таблица 3.1

Десятичный	Прямой	$U_{\text{вых}}$	Дополнительный (ст. разр. - знаковый)	$\pm U_{\text{вых}}$	Смещенный	$\pm U_{\text{вых}}$
0	0000	0,0	0000	0,0	0000	-8,00
1	0001	0,5	0001	1,0	0001	-6,94
2	0010	1,0	0010	2,0	0010	-5,88
3	0011	1,5	0011	3,0	0011	-4,82
4	0100	2,0	0100	4,0	0100	-3,76
5	0101	2,5	0101	5,0	0101	-2,70
6	0110	3,0	0110	6,0	0110	-1,64
7	0111	3,5	0111	7,0	0111	-0,58
8	1000	4,0	1000	-8,0	1000	0,58
9	1001	4,5	1001	-7,0	1001	1,64
10	1010	5,0	1010	-6,0	1010	2,70
11	1011	5,5	1011	-5,0	1011	3,76
12	1100	6,0	1100	-4,0	1100	4,82
13	1101	6,5	1101	-3,0	1101	5,88
14	1110	7,0	1110	-2,0	1110	6,94
15	1111	7,5	1111	-1,0	1111	8,00

Из приведенной таблицы 3.1 и **рис. 3.5** видно, что прямой код дает возможность использовать в 2 раза большее разрешение (например, для 4-разрядного ЦАП при напряжении полной шкалы 8,0 В МЗР=8/16=0,5) по сравнению с дополнительным и смещенным кодами (когда МЗР=8/8=1).

Т.к. обычно отрицательные целые числа представляются с использованием *дополнительного кода*, то диапазон их представления: $-2^{n-1} \leq X \leq 2^{n-1}-1$ (n –разрядность ЦАП). Для $n=8$ получаем $-2^7 \leq X \leq 2^7-1$ или $-128 \leq X \leq 127$.

Для представления чисел со знаком используется также так называемый *смещенный код*, когда при вводе чисел в ЦАП диапазон чисел ($-2^{n-1} \leq X \leq 2^{n-1}-1$) сдвигают до диапазона $(0 \dots 2^{n-1}-1)$ путем прибавления 2^{n-1} . Числа, большие 2^{n-1} , при этом считаются положительными, а числа, меньшие 2^{n-1} , - отрицательными. Среднее число 2^{n-1} соответствует нулю. Прибавление числа, составляющего половину полной шкалы данной разрядности, можно легко выполнить путем инверсии старшего (знакового) разряда. Соответствие рассмотренных выше кодов иллюстрируется табл. 3.1.

Пример для $n=4$ (**рис. 3.5**, табл. 1). Диапазон $(-2^3 \leq X \leq 2^3-1)$ или $(-8 \leq X \leq 7)$ переведем в диапазон (0 до 15), прибавляя к левой и правой части исходного диапазона число 8. Среднее число 8 - соответствует нулю. При этом числа, большие 8, считаются положительными, а числа, меньшие 8, - отрицательными.

$$\text{Величина МЗР или шаг квантования по уровню } h : h = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2^n - 1} = \frac{8B - (-8B)}{2^4 - 1} = \frac{16}{15} \approx 1,06B.$$

Чтобы получить выходной сигнал с правильным знаком, необходимо осуществить обратный сдвиг путем вычитания напряжения (или тока), составляющего половину шкалы преобразователя. Для различных типов ЦАП это можно сделать разными способами.

3.4. Погрешности ЦА-преобразования

Необходимо учитывать *инструментальную погрешность* - аппаратную погрешность, определяемую нестабильностью ИОН, погрешностью ключей, резистивных матриц и выходных ОУ. Основными факторами, вызывающими возникновение погрешностей элементов, являются: технологический разброс параметров; влияние изменений окружающей среды (в основном температуры); изменение параметров во времени (старение); воздействия внешних и внутренних шумов и помех.

Поэтому характеристики преобразования реальных ЦАП отличаются от идеальных формой, значением ступеней и расположением относительно осей координат. Все инструментальные погрешности проявляются в основном в виде параметров, характеризующих степень совпадения реальной СХ с идеальной.

Таковыми параметрами являются:

- *смещение нуля* - параллельный сдвиг реальной СХ (прямая 3 на **рис. 3.4,б**);
- *изменение коэффициента передачи* - отклонение крутизны реальной СХ от идеальной (4 на **рис. 3.4,б**);
- *нелинейность преобразования* - отклонение реальной СХ от идеальной прямой (5 на **рис. 3.4,б**).

Погрешность смещения или установки нуля (**рис. 3.6**) – обусловлена параллельным сдвигом реальной СХ относительно идеальной. Ошибка смещения $\epsilon_{см}$ равна значению $U_{вых}$, когда входной код ЦАП равен нулю, она является аддитивной составляющей полной погрешности. Обычно $\epsilon_{см}$ определяется в милливольтгах или в процентах от полной шкалы

$$\delta_{см} = \frac{\epsilon_{см}}{U_{пш}} \cdot 100\% . \text{ Эта ошибка остается константной для}$$

всех входных значений. Она может быть скомпенсирована при калибровке схемы. Приемлемая ошибка смещения - обычно меньше, чем ± 10 мВ.

Погрешность усиления (**рис. 3.6**) – ошибка от изменения коэффициента передачи/усиления - характеризуется отклонением реальной СХ от крутизны идеальной. Т.к. ошибка от усиления изменяет наклон всей СХ, то относительная ошибка будет на каждом шаге преобразования. Эта ошибка может быть выражена в единицах МЗР или милливольтгах, а также в процентах от максимальной величины.

Нелинейность преобразования (**рис. 3.6**) - проявляется как отклонение реальной СХ от идеальной.

Интегральная нелинейность (ИН/INL) (**рис. 3.6**) – определяется отклонениями реальной СХ от идеальной во всем диапазоне преобразования. Она показывает, насколько напряжение на выходе ЦАП при заданном коде отстоит от линейной характеристики (выражается в МЗР). Для ЦАП это отклонение измеряется на каждом шаге. В дешевых приборах интегральная нелинейность достигает 1 МЗР.

Дифференциальная нелинейность (ДН/DNL) (рис. 3.6) - определяется как отклонение (с учетом знака) расстояния между двумя соседними уровнями $U_{\text{вых}}$ от идеального значения $U_{\text{МЗР}}$. ДН определяется отклонениями реальной СХ в части диапазона/локально. Она обычно определяется в относительных единицах или в единицах МЗР. Большое значение *дифференциальной нелинейности* $\delta_{\text{дн}}$ может привести к тому, что ЦАП станет *немонотонным*. Это означает, что увеличение цифрового кода будет приводить к уменьшению выходного сигнала на каком-нибудь участке СХ (рис. 3.7).

Если $\delta_{\text{дн}} \leq 1 \text{ МЗР}$, то гарантируется, что ЦАП является монотонным, никакие данные не потеряны, т.к. $U_{\text{вых}}$ всегда изменяется в соответствии с цифровым кодом на входе.

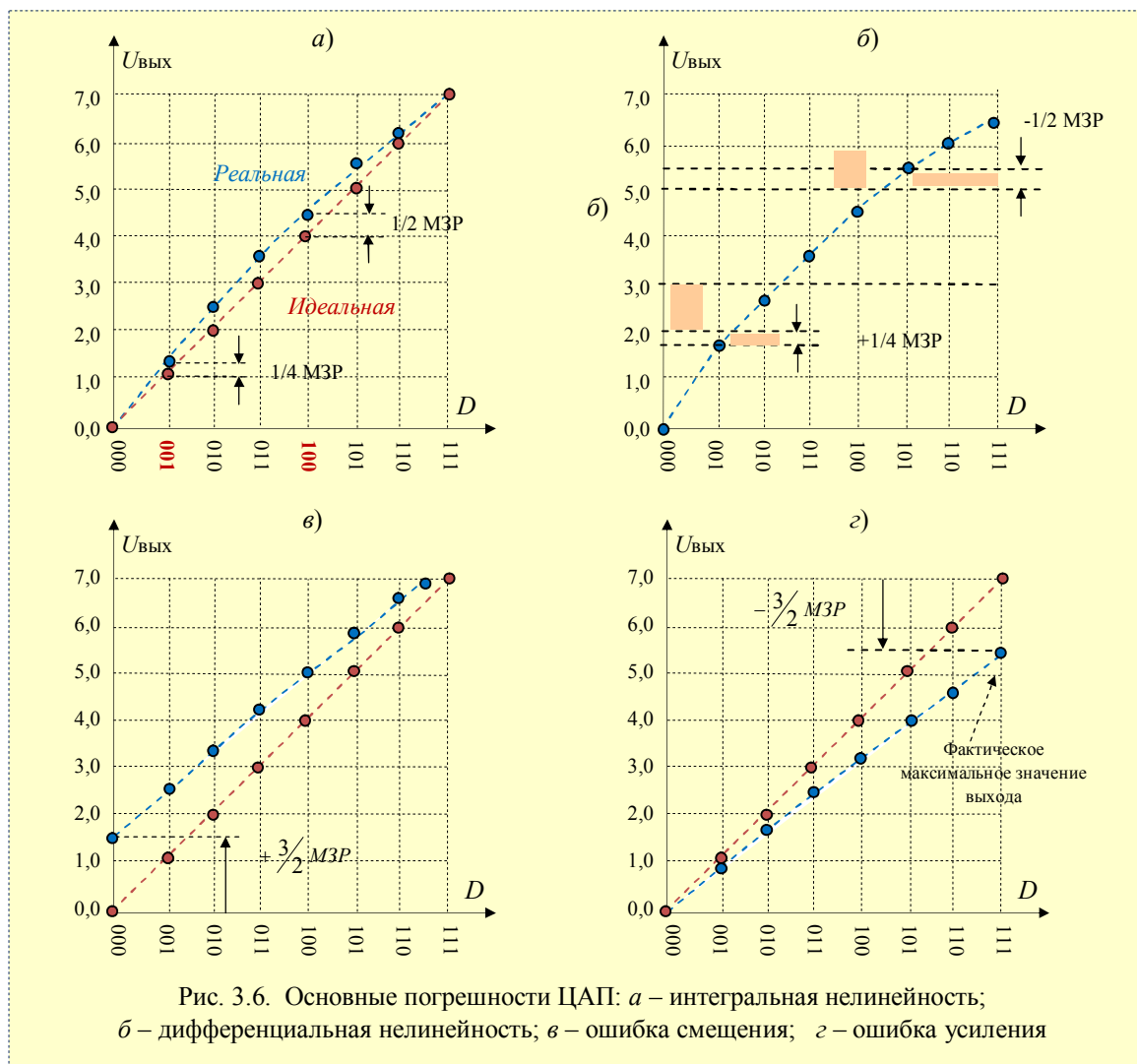
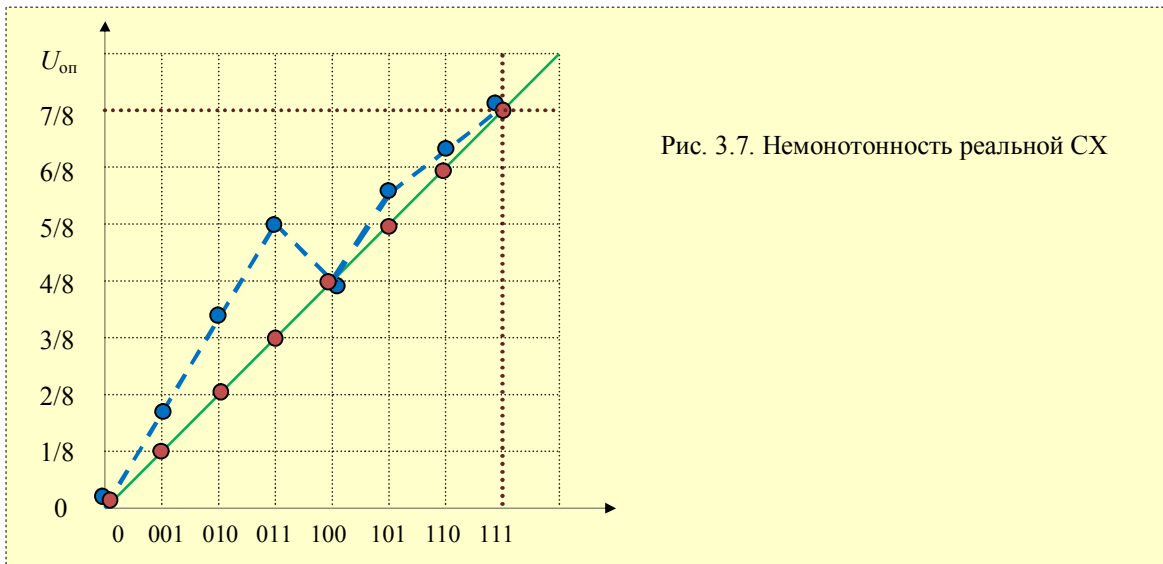


Рис. 3.6. Основные погрешности ЦАП: а – интегральная нелинейность; б – дифференциальная нелинейность; в – ошибка смещения; з – ошибка усиления

Монотонность СХ (рис. 3.7) - возрастание (уменьшение) $U_{\text{вых}}$ при возрастании (уменьшении) значения входного кода $D_{\text{вх}}$. Если *дифференциальная нелинейность* больше относительного шага квантования $h/U_{\text{пш}}$, то СХ немонотонна.

Погрешности *полной шкалы, смещения и усиления* могут быть легко скомпенсированы. Сложнее поддаются регулировке погрешности *нелинейности*, особенно *дифференциальные нелинейности*. Если дифференциальная нелинейность превышает величину 1 МЗР, то в выходном сигнале может отсутствовать одна из кодовых комбинаций.

Опорное напряжение ($U_{\text{оп}}$). Характеристики ЦАП в большой степени определяются источником опорного напряжения (ИОН), который может быть встроен в корпус ЦАП или применяться как внешний элемент. Если на выходе аналоговый сигнал не усиливается, то максимальный входной код соответствует $U_{\text{оп}}$. $U_{\text{оп}}$ также определяет напряжение шага, т.е. изменение выхода в ответ на 1 переход МЗР на входе.



Динамические характеристики

Идеальный ЦАП должен мгновенно выдавать аналоговый сигнал при подаче на вход цифрового кода. Реально же аналоговый сигнал на выходе появляется через какое-то время, которое включает внутренние задержки, время нарастания $U_{вых}$ (скорости нарастания ограничена), в том числе и задержки в ОУ.

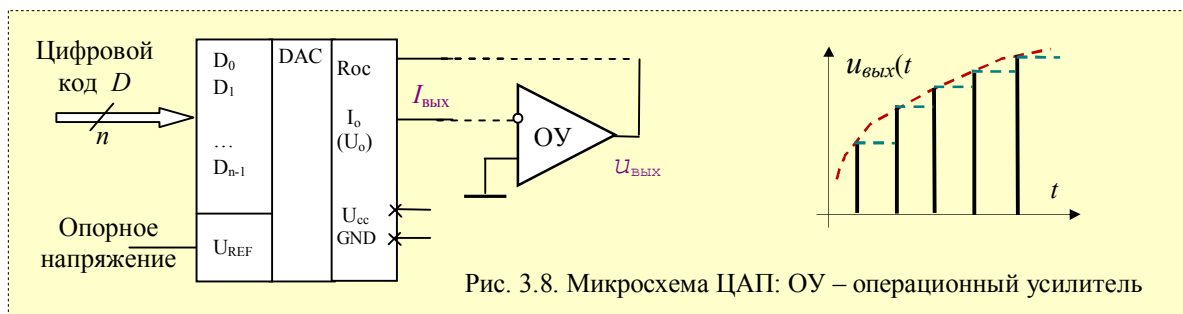
Цифровые системы управления работают при непрерывно изменяющихся значениях входных кодов. Поэтому считывание значений напряжения с выхода ЦАП должно производиться после окончания всех переходных процессов в нем. Это позволит получить точность, на которую рассчитан ЦАП, а быстродействие системы будет определяться временем переходных процессов ЦАП, т.е. его *быстродействием*. По этой причине важно знать динамические параметры ЦАП.

Динамический диапазон (DD) - соотношение наибольшего и наименьшего сигналов (напряжения или тока), которые может воспроизвести ЦАП, выражается в *децибелах*: $DD = 20 \cdot \lg \frac{U_{max} - U_{min}}{h}$, где h – шаг квантования (связан с *разрядностью* и *шумовым порогом*).

Максимальная частота дискретизации - максимальная частота, на которой ЦАП может работать, выдавая на выходе корректный результат. В соответствии с *теоремой Котельникова* необходимо, чтобы частота дискретизации была не менее чем удвоенная максимальная частота в спектре сигнала.

Время преобразования - интервал времени, в течение которого после подачи кода на выходе устанавливается сигнал с заданным отклонением от истинного (в пределах шага квантования).

Применение ЦАП. В общем случае микросхема ЦАП (рис. 3.8) имеет несколько цифровых входов и один аналоговый вход, а также аналоговый выход.



На цифровые входы ЦАП подается n -разрядный код D , на аналоговый вход — *опорное напряжение* $U_{оп}$ (U_{REF}). Выходным сигналом является напряжение $U_{вых}$ или ток $I_{вых}$. Для некоторых микросхем $U_{оп}$ должно иметь строго заданный уровень, для других допускается менять его значение в широких пределах, в том числе и изменять его полярность (положительную на отрицательную и наоборот).

Кроме информационных сигналов, микросхемы ЦАП требуют также подключения одного или двух источников питания и общего провода (обозначение “×”). Обычно цифровые входы ЦАП обеспечивают совместимость со стандартными выходами микросхем ТТЛ.

Если ЦАП имеет токовый выход, то его можно преобразовать в напряжение с помощью внешнего ОУ и встроенного в ЦАП резистора R_{OC} (рис. 3.8).

ЦАП применяются не только для преобразования код-аналог. Пользуясь их свойствами можно определять произведения двух или более сигналов, строить делители функций, аналоговые звенья, управляемые от МК, такие как аттенуаторы, интеграторы. Важной областью применения ЦАП являются также генераторы сигналов, в том числе сигналов произвольной формы.

Микросхемы ЦАП различаются количеством разрядов (от 8 до 24), величиной задержки преобразования (от единиц наносекунд до единиц микросекунд), допустимой величиной $U_{оп}$ (обычно — единицы вольт), величинами погрешностей преобразования и другими параметрами. Различаются они также технологией изготовления и особенностями внутренней структуры, что нередко накладывает ограничения на их использование. Поэтому выбирать микросхему ЦАП для конкретного применения необходимо с использованием подробной справочной информации, предоставляемой фирмами-изготовителями.

В качестве *примера* рассмотрим характеристики одного из конкретных ЦАП - TLV5636.

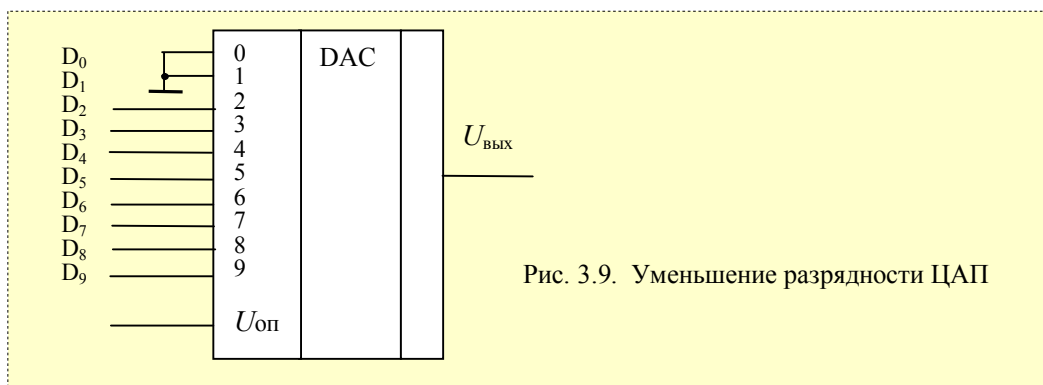
Это маломощный 12-разрядный ЦАП с потенциальным выходом, с диапазоном напряжения питания от 2,7 до 5,5 В, внутренним ИОН и режимом пониженного потребления. *Характеристики:*

- программируемый встроенный ИОН;
- программируемое время установления выходного сигнала: 1 мкс в быстром режиме, 3,5 мкс в медленном режиме;
- совместимый с последовательным портом TMS320 и SPI интерфейсом;
- дифференциальный коэффициент нелинейности < 0,5 МЗР;
- монотонность выходной характеристики во всем рабочем диапазоне температур.

Применение: Цифровые схемы слежения за серводвигателями; цифровые регуляторы; управление производственными процессами; контроль механизмов; устройства с памятью большой емкости.

Иногда бывает необходимо уменьшить количество разрядов ЦАП (интегральной схемы). Для этого нужно подать сигналы логического 0 на нужное число мл. разрядов ЦАП (но никак не старших разрядов). На рис. 3.9 показано, как из 10-разрядного ЦАП можно сделать 8-разрядный, подав нули на 2 мл. разряда.

Увеличение количества разрядов ЦАП представляет собой гораздо более сложную задачу, требующую построения сложных аналоговых схем, поэтому оно встречается довольно редко. Значительно проще подобрать микросхему с нужным или с большим, чем нужно, количеством разрядов.



Микроконверторы – это особый класс устройств с комплексным использованием АЦП и ЦАП. Они включают многоканальный АЦП, микроконтроллер (МК) и одно- или двухканальный ЦАП. Такой *модуль* принимает аналоговые сигналы, преобразует их в цифровые коды, по программе, записанной в ПЗУ МК, обрабатывает эти коды и с помощью ЦАП вновь преобразует результаты в аналоговые сигналы. Уступая чисто аналоговой только в быстродействии, такая схема отличается большой функциональной гибкостью и точностью. В частности, микроконвертор ADuC812 содержит 8-канальный мультиплексор, СВХ, 12-разрядный АЦП последовательного приближения с производительностью 200 тысяч отсчетов в секунду, два 12-разрядных ЦАП и МК с системой команд семейства MCS-51.

Шумы ЦАП

Шум на выходе ЦАП может появляться по различным причинам, вызываемым физическими процессами, происходящими в полупроводниковых устройствах. Для оценки качества ЦАП с высокой разрешающей способностью принято использовать понятие среднеквадратического значения шума.