

Цифрово-аналогови преобразуватели

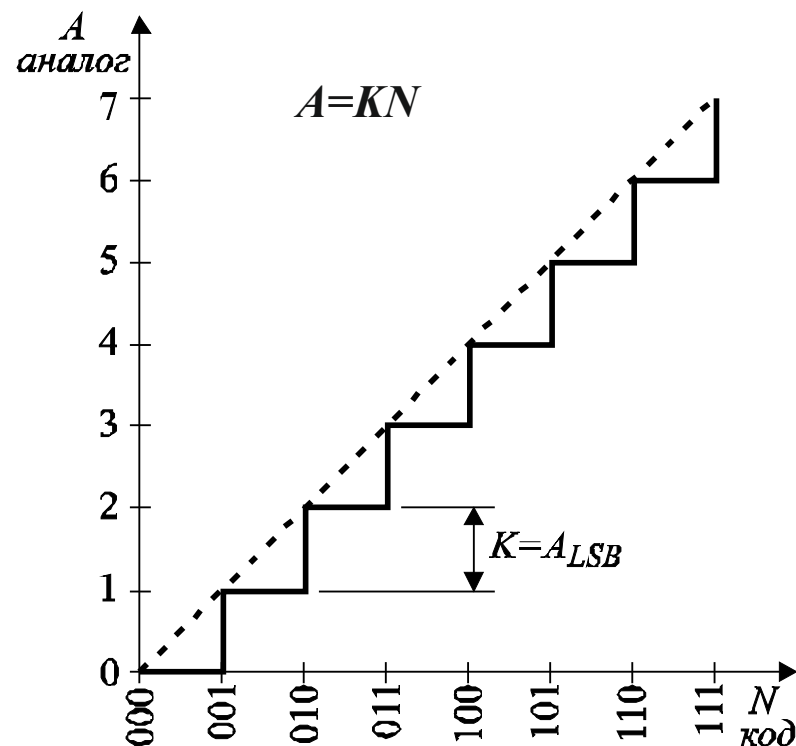
Схемотехника за Импулсни и
Смесени Сигнали

Цифрово-аналогови преобразуватели

- Цифрово-аналоговият преобразувател – ЦАП (Digital-to-Analog Converter - DAC) осъществява преобразуване на цифрова величина N в аналогова величина A (най-често ток или напрежение) с определен коефициент на преобразуване K , $A=KN$.

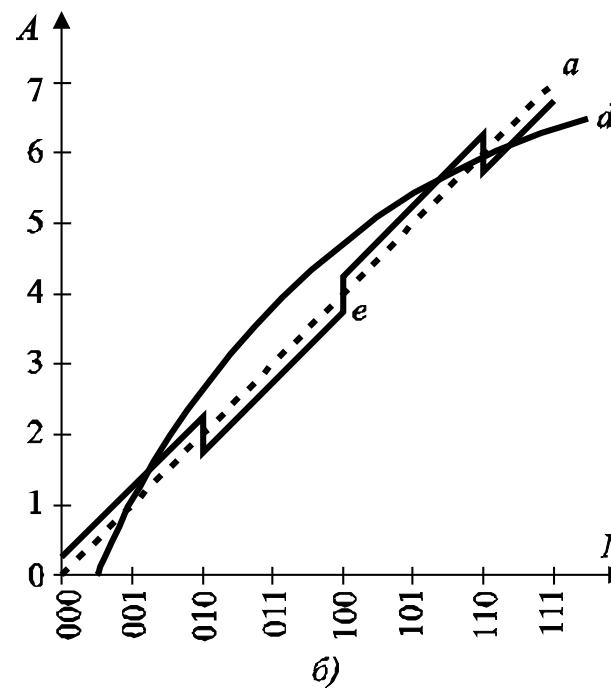
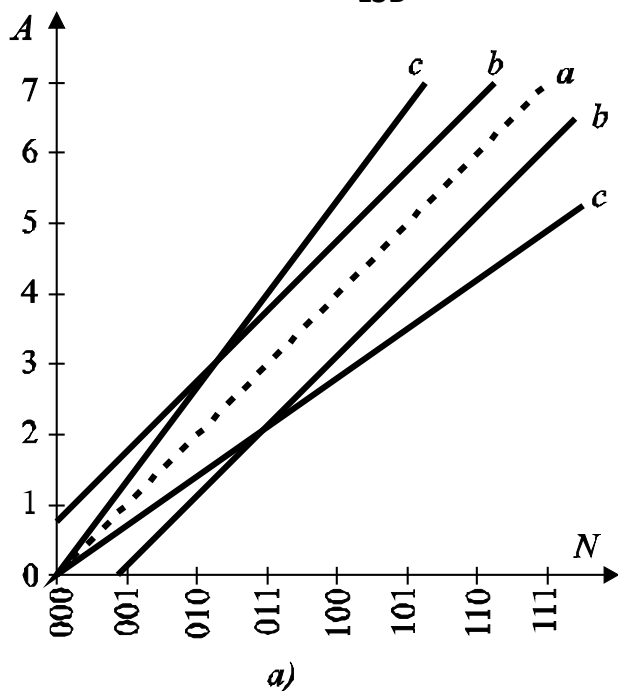
Предавателна характеристика

- Предавателната характеристика на ЦАП представлява прекъснатата функция поради дискретния характер на цифровата стойност N , докато аналоговата величина A може да заема произволни стойности в обхвата с отклонение $\pm 1/2K$.

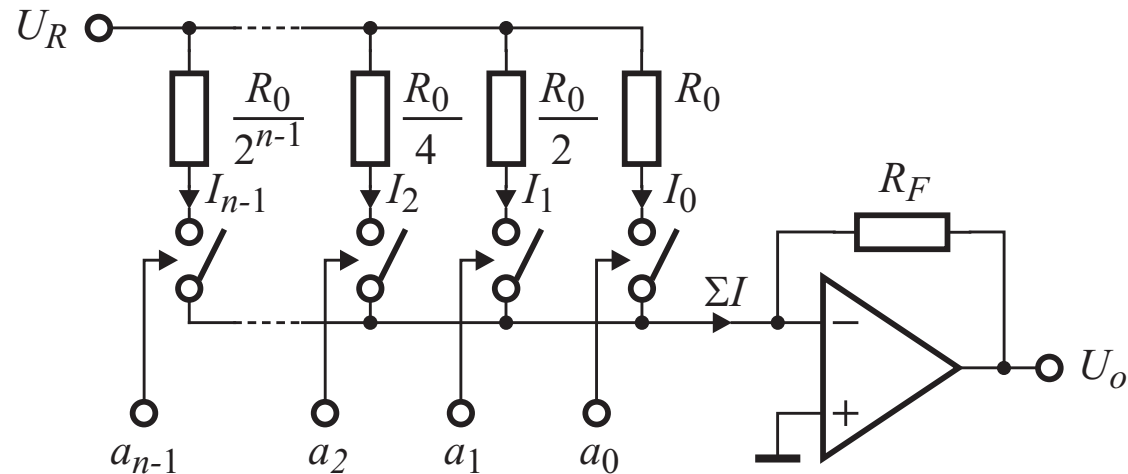


Грешки в ЦАП

- Четирите основни типа грешки в цифрово-аналоговите преобразуватели са представени на фигурите спрямо идеализираната им предавателна характеристика. Първите два типа – “грешка от изместване на нулата” (крива *b*) и “грешка от коефициент на предаване” (крива *c*) подлежат на компенсация с допълнителни елементи и настройка. Вторите два типа – “грешка от нелинейност” (крива *d*) и “грешка от немонотонност” или “грешка от тегло на разред” (крива *e*) не подлежат на компенсация и не трябва да надхвърлят $\pm 1/2 A_{\text{LSB}}$.



ЦАП със сумиране на токовете



$$U_0 = -R_F \Sigma I = -R_F (I_0 a_0 + I_1 a_1 + I_2 a_2 + \dots + I_{n-1} a_{n-1}) =$$

$$= -R_F \left(\frac{U_R}{R_0} a_0 + \frac{U_R \cdot 2}{R_0} a_1 + \frac{U_R \cdot 4}{R_0} a_2 + \dots + \frac{U_R \cdot 2^{n-1}}{R_0} a_{n-1} \right) =$$

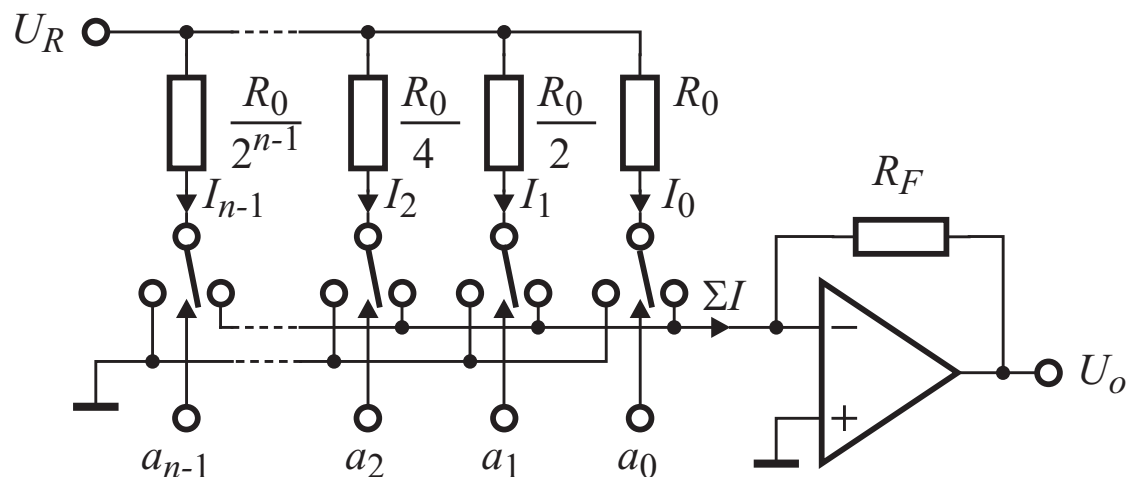
$$= -\frac{R_F}{R_0} U_R \underbrace{\left(a_0 \cdot 2^0 + a_1 \cdot 2^1 + a_2 \cdot 2^2 + \dots + a_{n-1} \cdot 2^{n-1} \right)}_N$$

$$U_0 = -\frac{R_F}{R_0} U_R N, \text{ където } -\frac{R_F}{R_0} U_R = U_{LSB}. \quad U_{LSB} = \frac{1}{2^n}$$

ЦАП със сумиране на токовете използващ превключващи ключове

- Основният недостатък на схемата е, че ключовете превключват напрежение. Паразитните капацитети на ключовете ограничават бързодействието на схемата.
- Тези недостатъци се избягват при използване на превключващи ключове. Разрядите в 0 комутират токовете към общия възел на схемата а тези в единица към виртуалната нула на преобразувателя ток-напрежение. Така се запазва константно натоварването на опорния източник.

ЦАП със сумиране на токовете използващ превключващи ключове



$$\sum I = U_R \left(\frac{a_0}{2^{n-1} \cdot R} + \dots + \frac{a_{n-3}}{4 \cdot R} + \frac{a_{n-2}}{2 \cdot R} + \frac{a_{n-1}}{R} \right)$$

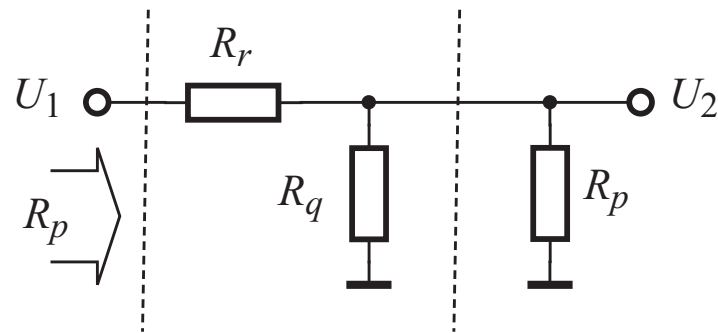
$$\Sigma I = \left(a_1 \cdot 2^{-1} + a_2 \cdot 2^{-2} + a_3 \cdot 2^{-3} + \dots + a_n \cdot 2^{-n} \right) = \frac{1}{2^N}$$

$$R = R_F \Rightarrow U_{OUT} = R_F \sum I = U_R \left(\frac{a_0}{2^{n-1}} + \dots + \frac{a_{n-3}}{4} + \frac{a_{n-2}}{2} + a_{n-1} \right)$$

ЦАП със сумиране на токовете с резисторна матрица

- При разработването на интегрални ЦАП представлява трудност реализирането на високоточни резистори с големи разлики в стойностите. При разгледаните до сега ЦАП най-голямата разлика между два резистора е 2^{n-1} пъти и грешката при изготвянето на резистора за най-старшия разред трябва да бъде $\Delta R/R < 1/2^{n-1}$.
- Затова в интегралната схемотехника обикновено се използва резисторна матрица която с помощта на последователно деление на напрежение или ток реализира тегловните коефициенти на разредите.

ЦАП със сумиране на токовете с резисторна матрица



$$\alpha = U_2/U_1$$

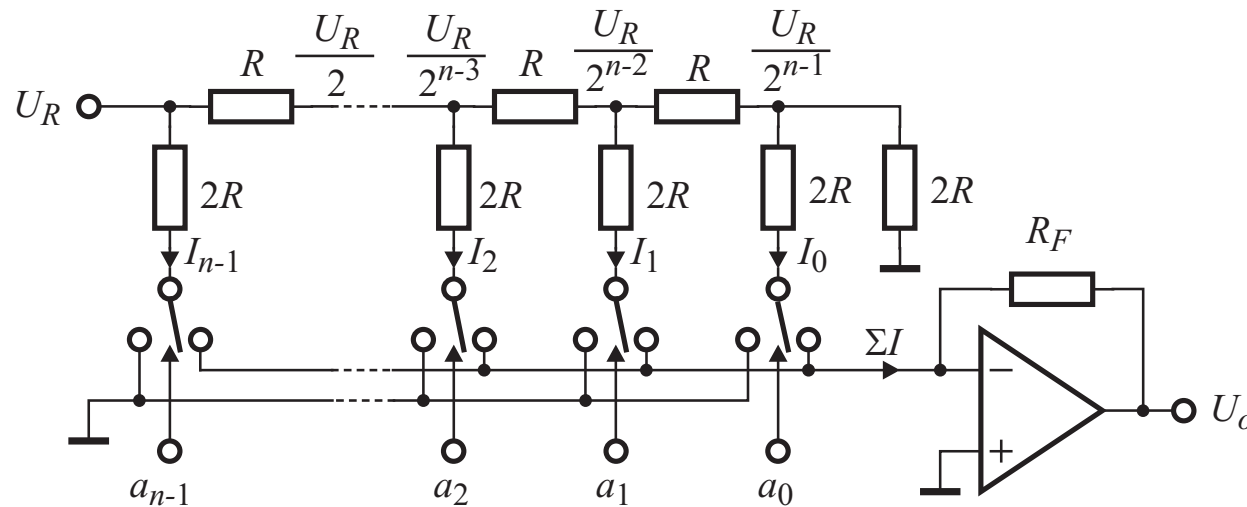
$$R_r = \frac{(1-\alpha)^2}{\alpha} R_q \quad R_p = \frac{1-\alpha}{\alpha} R_q$$

Основни свойства на резисторната матрица:

- При използването на двоична бройна система $\alpha = 0,5$. Като се избере $R_q = 2R$, следва $R_r = R$ и $R_p = 2R$. В практиката това се нарича R - $2R$ матрица.
- коефициентът на предаване по напрежение на матрицата от възел към възел е $1/2$;
- характеристичното съпротивление на матрицата е R ;
- съпротивлението, с което даден възел се натоварва със следващите звена от матрицата, е $2R$.

Двоичен ЦАП със сумиране на токовете с резисторна матрица

- Източникът на опорно напрежение U_R е постоянно натоварен с характеристичното съпротивление на матрицата $2R \parallel 2R = R$

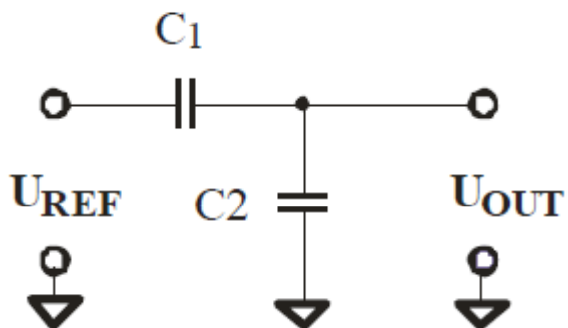


$$U_o = -\frac{R_F}{2^n R} U_R N \quad -\frac{R_F}{R} \frac{U_R}{2^n} = U_{LSB}$$

$$N = \left(2^0 \cdot a_0 + 2^1 \cdot a_1 + 2^2 \cdot a_2 + \dots + 2^{n-1} \cdot a_{n-1} \right)$$

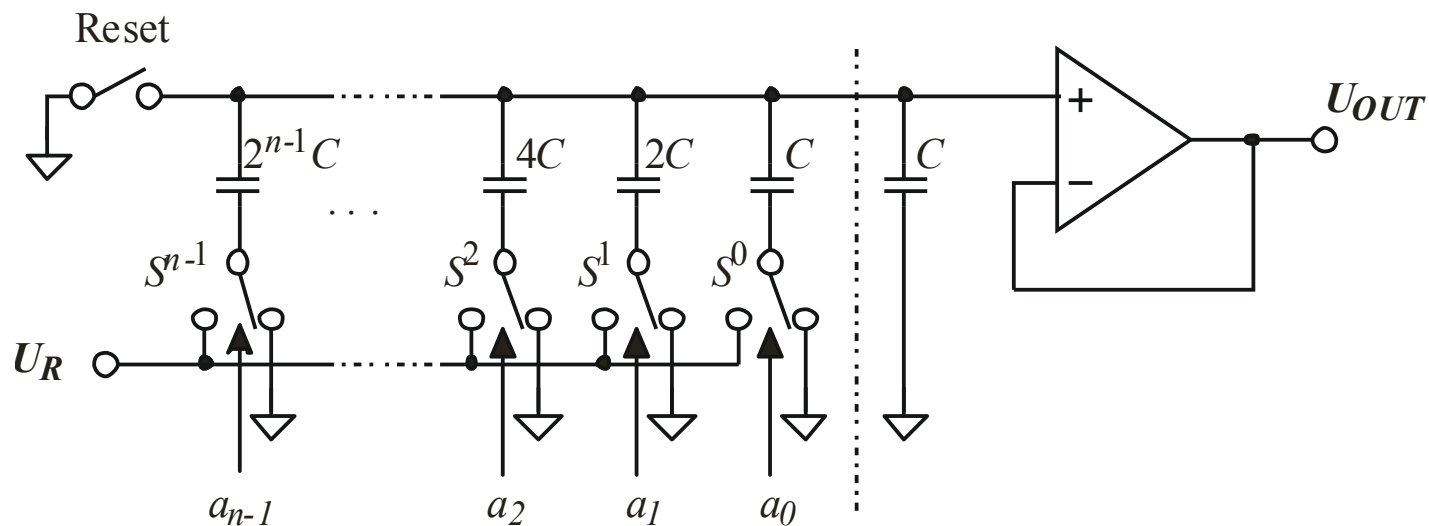
Зарядни ЦАП

- При CMOS технологията изработването на кондензатори е по-лесно от колкото изработването на резистори. По тази причина придобиват популярност зарядните цифрово-аналогови преобразуватели.



$$U_{out} = \frac{\frac{1}{C_2}}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}} \cdot U_{REF} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot U_{REF}$$

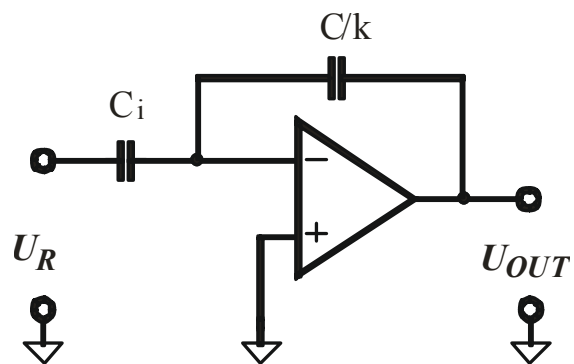
Зарядни ЦАП



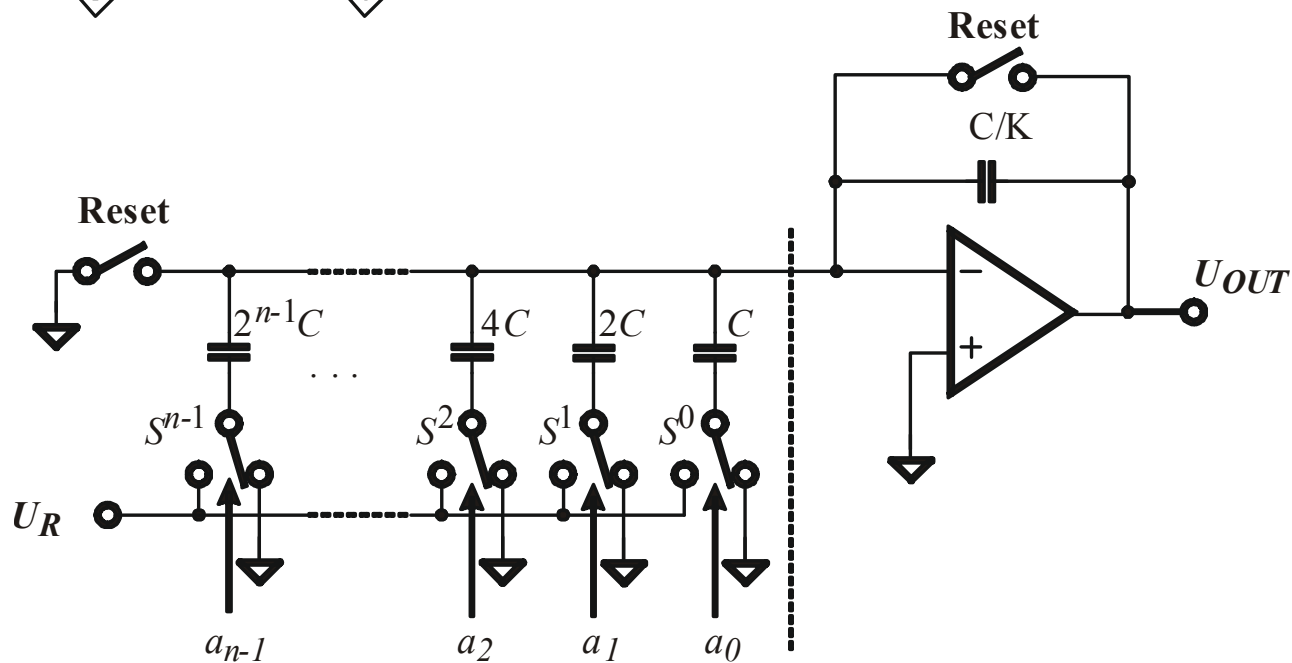
$$C \cdot U_{OUT} = \frac{U_R}{2} \left(a_0 C + a_1 \frac{C}{2} + a_2 \frac{C}{4} + \dots + a_{n-1} \frac{C}{2^{n-1}} \right)$$

$$U_{OUT} = \frac{U_R}{2} \left(a_0 + a_1 \frac{1}{2} + a_2 \frac{1}{4} + \dots + a_{n-1} \frac{1}{2^{n-1}} \right)$$

Зарядни ЦАП



$$U_{OUT} = -\frac{k \cdot U_R}{2} \left(a_0 + a_1 \frac{1}{2} + a_2 \frac{1}{4} + \dots + a_{n-1} \frac{1}{2^{n-1}} \right)$$



Зарядни ЦАП

- При зарядните цифрово-аналогови преобразуватели е възможно изпълнение на капацитивната матрица както с капацитети с отношение по степените на 2, така и $C-2C$ матрица за двоично преобразуване. Срещат се и комбинации от двата метода.

Двоично-десетични ЦАП

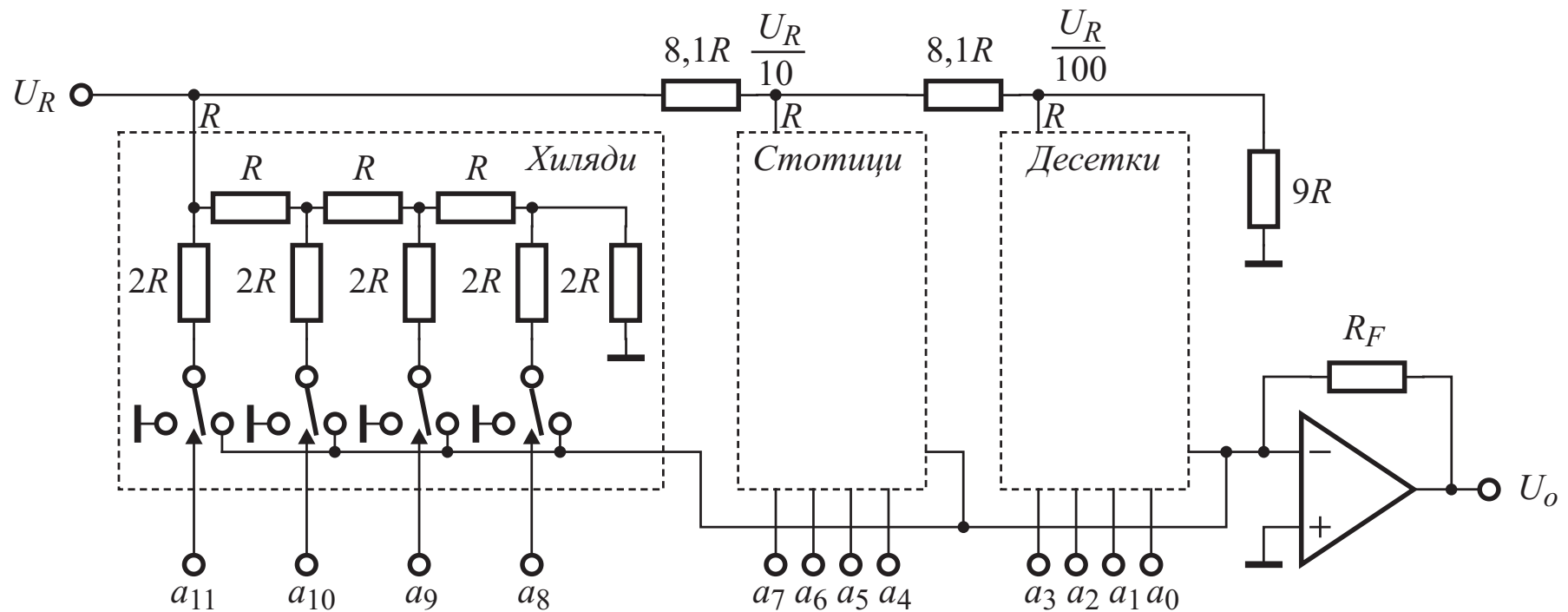
- Двоично-десетичните ЦАП се изграждат на същите принципи както и двоичните. При тях разредите могат да се считат разделени на тетради, като вътре във всяка тетрада разредите се отнасят като степените на две а тетрадите се отнасят като степените на десет.
- Когато се използва принципът на сумирането на токовете, трябва да се осигурят токове вътре в тетрадите, отнасящи се като степените на две, а за тетрадите – токове, отнасящи се като степените на 10.

Двоично-десетични ЦАП

- Класическата R - $2R$ резисторна матрица може да бъде променена за използване в двоично-десетични ЦАП. За всички десетични разреди са използвани 4-разредни двоични матрици, които са съединени във верига, в която от декада към декада напрежението се предава с коефициент $\alpha = 1/10$.
- Избирайки $R_q = R$, чрез формулите за R_q и R_p се получават следните стойности за съпротивленията: $R_r = 8,1R$ и $R_p = 9R$. При тези стойности характеристичното съпротивление на двоично-десетичната резисторна матрица е $0,9R$.

Двоично-десетични ЦАП

- 3 декаден двоично-десетичен ЦАП използващ резисторна матрица.

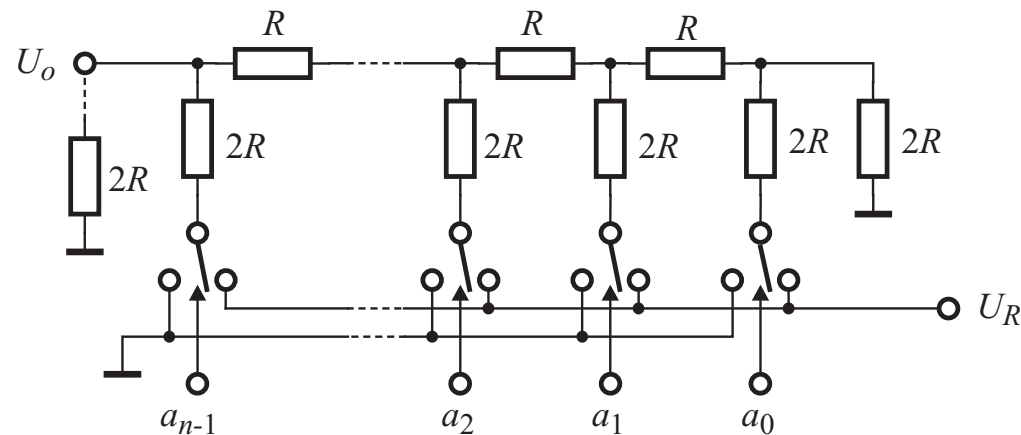


ЦАП със сумиране на напреженията

- Тези цифрово-аналогови преобразуватели работят със сумирането на напреженията, които са пропорционални на тежестта на числовите разреди. При работа в двоична бройна система напреженията ще се отнасят помежду си както степените на две. На сумиране подлежат само онези напрежения, чиито съответстващи двоични разреди са 1. Отнасящи се като степените на две напрежения, лесно могат да се получат с помощта на резистивна матрица съгласно нейното първо свойство.

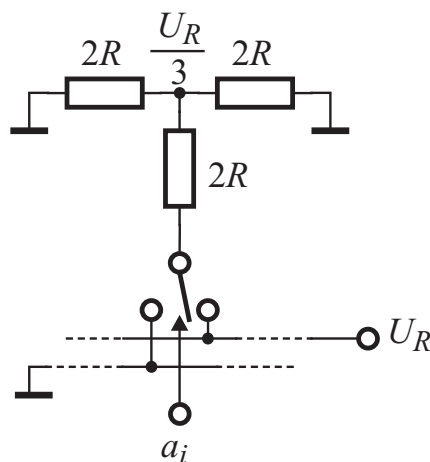
ЦАП със сумиране на напреженията с използване на R - $2R$ матрица

- Спрямо схемата със сумиране на токовете са направени няколко промени. Източникът на опорно напрежение е включен на мястото на сумиращия токове операционен усилвател, а изходът е изведен там, където е бил опорният източник. За облекчаване на анализа на схемата изходът е натоварен със съпротивление $2R$.



Основна клетка на двоичен ЦАП със сумиране на напреженията

- При тази постановка всеки възел на R - $2R$ матрицата е натоварен отляво и отдясно с еквивалентно съпротивление $2R$, както е показано на фигурата. Лесно се разчита, че при това натоварване опорното напрежение се предава от ключа към възела с коефициент $1/3$.



ЦАП със сумиране на напреженията

- За определяне на стойността на изходното напрежение се прилага методът на суперпозицията, който в синтезиран вид гласи: “реакцията на общото въздействие е равна на сумата от реакциите на отделните въздействия”. При определянето на реакцията на изхода спрямо въздействието на даден разред се приема, че разредът е в 1, а останалите разреди са в 0. Поотделно се определя изходната реакция спрямо всеки разред, след което се извършва сумиране за определяне на общата реакция на комплексното въздействие:

$$U_0 = \frac{1}{3}U_R a_{n-1} + \dots + \frac{1}{3}U_R \frac{1}{2^{n-3}} a_2 + \frac{1}{3}U_R \frac{1}{2^{n-2}} a_1 + \frac{1}{3}U_R \frac{1}{2^{n-1}} a_0 =$$

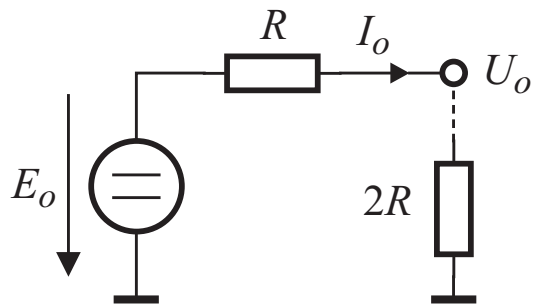
$$= \frac{1}{3}U_R \frac{1}{2^{n-1}} \underbrace{\left(a_{n-1} \cdot 2^{n-1} + \dots + a_2 \cdot 2^2 + a_1 \cdot 2^1 + a_0 \cdot 2^0 \right)}_N$$

$$U_0 = \frac{2}{3}U_R \frac{1}{2^n} N.$$

ЦАП със сумиране на напреженията

еквивалентна схема

- Така анализираната схема може да бъде преобразувана в еквивалентна, както е показано на фигурата. Анализираният ЦАП е представен като идеален генератор на изходно напрежение E_0 , имащ изходно съпротивление R и натоварен в изхода с товар $2R$. От еквивалентната схема може да се определи напрежението на идеалния генератор:



$$E_0 = \frac{2}{3}U_0 \text{ или } E_0 = U_R \frac{1}{2^n} N, \text{ където } U_R \frac{1}{2^n} = U_{LSB}.$$

ЦАП със сумиране на напреженията

- Такива ЦАП се произвеждат без вграденото товарно съпротивление $2R$, което беше използвано да облекчаване на анализа на схемата. Тяхното изходно напрежение на празен ход е:

$$E_0 = \frac{1}{2^n} N$$

- Максималният им изходен ток (при късо съединение в изхода) е:

$$I_{0\max} = \frac{E_0}{R} = U_R \frac{1}{2^n} N \frac{1}{R}$$

DAC7520 вътрешна структура

- 10 битовият DAC7520 съдържа само резисторната матрица и токовите ключове. В зависимост от приложението той може да се включи като ЦАП със сумиране на токовете или ЦАП със сумиране на напреженията. Допълнително в него е включен и точен резистор R който може да бъде използван от потребителя при свързването на външен операционен усилвател.

