

## Схеми с превключваеми кондензатори - SC

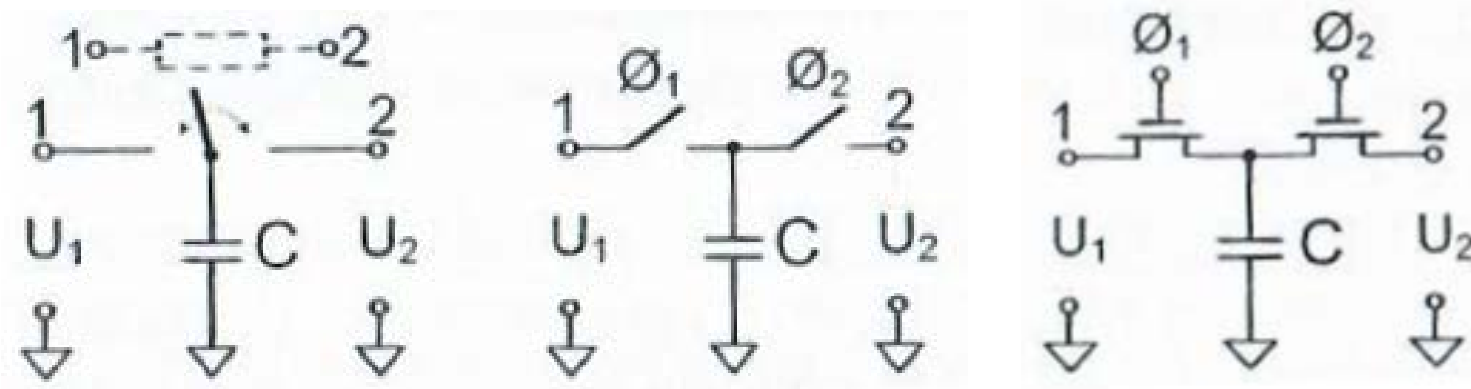
Схемите с превключваеми кондензатори (switched capacitors - SC) се появяват за първи път през 1977 г. Тогава развитието на MOS-технологията е достигнало ниво, позволяващо проектирането и производството на големи аналогови интегрални схеми за приложение в комуникациите, измервателната техника, автоматизацията и т.н. За база на тези схеми се използват ключовите свойства на MOS транзисторите. Приложението на SC схемите навлиза в проектирането на усилватели, цифрово-аналогови и аналогово-цифрови преобразуватели, умножители, модулатори, генератори, филтри и др.

## Схеми с превключваеми кондензатори - SC

Още в далечната 1892 г. Максвел е доказал, че периодично комутиран кондензатор е еквивалентен на резистор. Превключването на кондензаторите се извършва с еднотранзисторни Р-ключове. Те се управляват с правоъгълни сигнали с достатъчно голяма амплитуда  $U_m$  с цел в отпушено състояние да работят в резисторната област на характеристиките с малко съпротивление  $r_C$ , а в запушено състояние съпротивлението им да бъде практически равно на безкрайност. Процесът е под управлението на две незастъпващи се импулсни поредици (фази  $\phi_1$  и  $\phi_2$ ), всяка с амплитуда  $U_m$  и продължителност  $t_\phi$ .

## Схеми с превключваеми кондензатори - SC

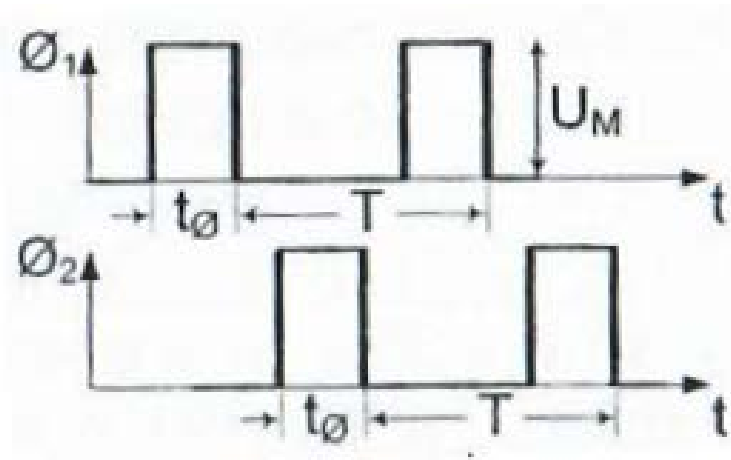
При превключване на кондензаторите се извършва предаване на заряд между два съседни възела на схемата. Това преместване на заряда трябва да се извършва много бързо в началото на интервала  $t_\phi$ . Затова времеконстантата от капацитета  $C$  и съпротивлението на ключа  $r_C$  трябва да бъде по-малка от интервала  $t_\phi$  -  $r_C C \ll t_\phi$ .



Паралелен модел на SC-резистор

## Схеми с превключваеми кондензатори - SC

Паралелният модел може да се представи с помощта на два ключа, всеки от които е изпълнен с един MOS транзистор. Управлението става с поредиците  $\phi_1$  и  $\phi_2$ .

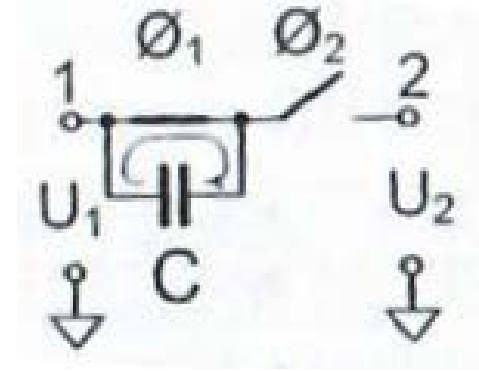
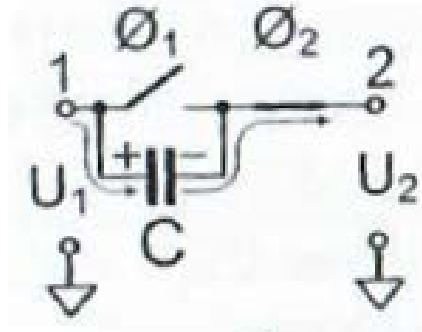
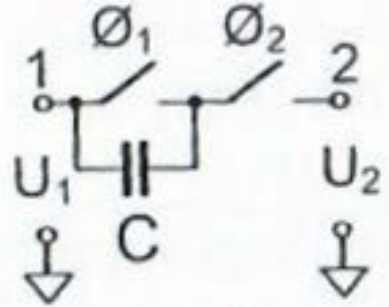


Приема се, че входното напрежение  $U_1$  и изходното напрежение  $U_2$  са неизменни за време, по-голямо от един период на тактовите сигнали и  $U_1 \gg U_2$ .

## Схеми с превключваеми кондензатори - SC

При активен сигнал  $\phi_1$  съответният ключ е затворен и кондензаторът се зарежда през съпротивлението на отпушения транзистор до входното напрежение  $U_1$ . По това време  $\phi_2$  не е активен и съответният му ключ е запушен. Когато двата ключа си сменят състоянието кондензаторът се разрежда до  $U_2$ . Изменението на заряда е  $\Delta Q = C(U_1 - U_2) = C\Delta U$ . Стойността на тока от входа към изхода е  $i_{cp} = \Delta Q / \Delta t = C\Delta U / T_n$ . Честотата на превключване е много по-висока от работната честота на схемата и чрез периодичното повтаряне на този процес се установява стационарен режим. Тогава стойността на еквивалентния резистор е:  $R = \Delta U / i_{cp} = \Delta U / (C\Delta U / T_n) = T_n / C = 1 / Cf_n$ .

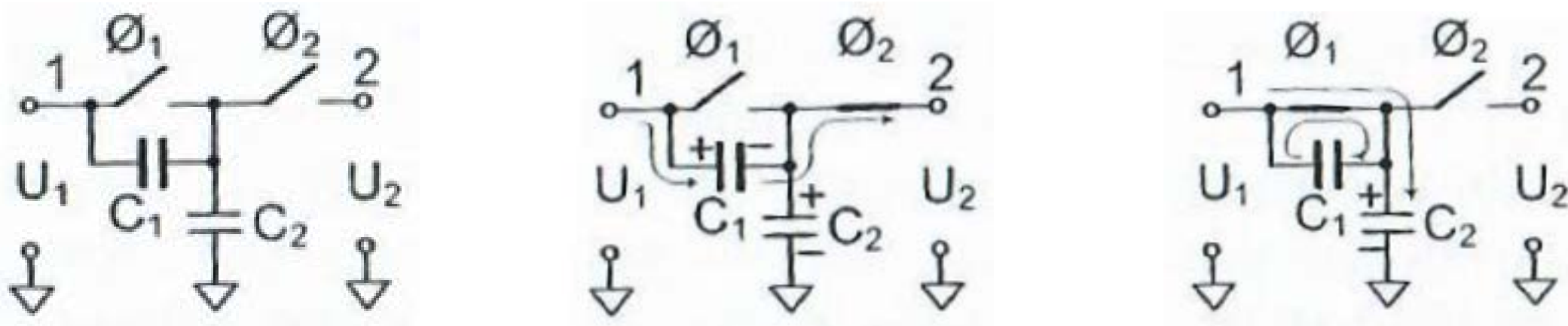
## Схеми с превключваеми кондензатори - SC



Последователен (сериен) модел на SC-резистор

В първото състояние на модела кондензаторът се зарежда до напрежение  $(U_1 - U_2)$ , а във второто се разрежда до нула и между точките 1 и 2 не протича ток. Тъй като изменението на заряда  $\Delta Q = C(U_1 - U_2)$  е същото както и при предния модел, то и стойността на еквивалентния резистор е същата –  $R = T_{\phi} / C = 1 / C f_{\phi}$ .

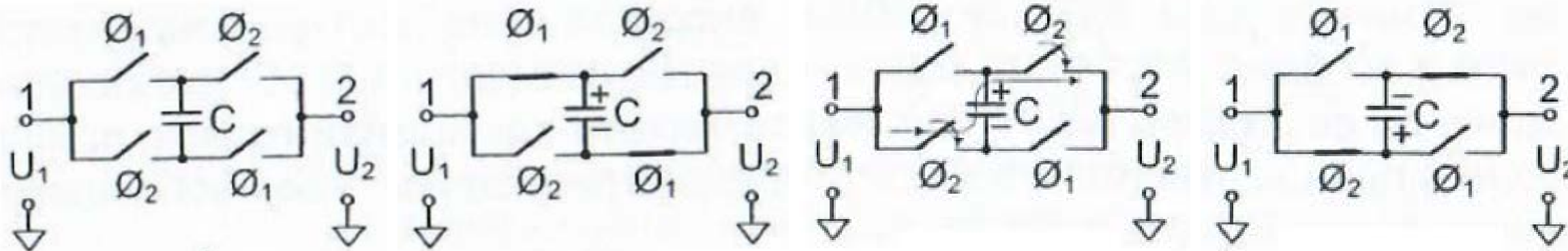
## Схеми с превключваеми кондензатори - SC



Последователно-паралелен модел на SC-резистор

Този модел съдържа два кондензатора и може да се разглежда като комбинация от предишните два. В първото състояние  $C_2$  е свързан към изхода и  $C_1$  се зарежда до напрежение  $(U_1 - U_2)$ . Във второто  $C_1$  се разрежда, а  $C_2$  се зарежда от  $U_2$  до  $U_1$ . Общото изменение на заряда между двата кондензатора е  $\Delta Q = C_1(U_1 - U_2) + C_2(U_1 - U_2) = (C_1 + C_2)\Delta U$  и еквивалентният резистор е равен на  $R = T_n / (C_1 + C_2) = 1 / (C_1 + C_2) f_n$ . Ако  $C_1 = C_2 \rightarrow R = T_n / 2C = 1 / 2C f_n$ .

## Схеми с превключваеми кондензатори - SC



### Билинеен модел на SC-резистор

Оригиналната мостова схема на този модел позволява кондензаторът да се презарежда през всяка от двете фази. Така през него протичат големи токове и SC-резисторът е с по-малка стойност. В края на фазата  $\phi_1$  кондензаторът е зареден до напрежение  $\Delta U = U_1 - U_2$ . В следващата фаза  $\phi_2$  той се зарежда до същото напрежение, но с обратен знак.



## Схеми с превключваеми кондензатори - SC

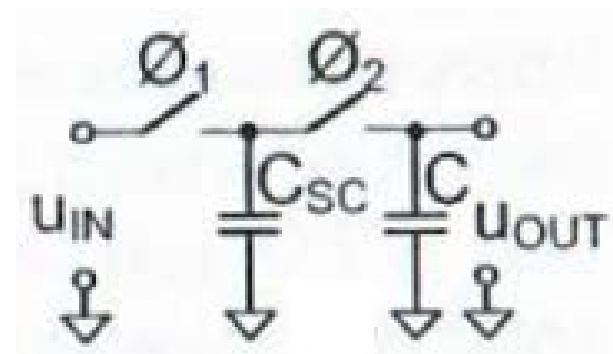
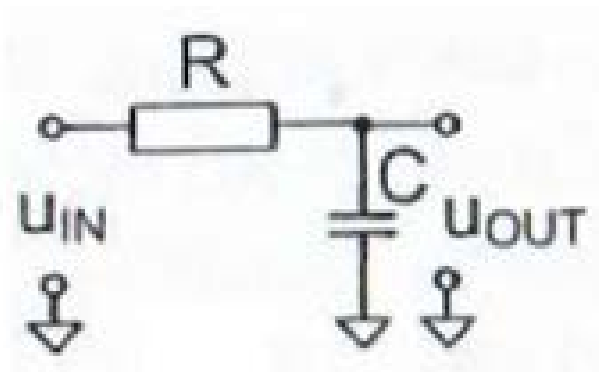
Следователно  $C$  се презарежда и размахът на напрежението върху него е  $2\Delta U = 2(U_1 - U_2)$ . Разрядът е  $\Delta Q = 2C(U_1 - U_2)$ . Същият процес се повтаря отново във фаза  $\phi_1$ . Следователно  $\Delta Q = 4C(U_1 - U_2) = 4C\Delta U$ . Еквивалентният резистор е равен на  $R = (\Delta U / 4C\Delta U) T_p = T_p / 4C = 1 / 4Cf_p$ .

SC-резисторите предоставят редица предимства – висока точност, която при стабилност на честотата зависи само от кондензатора и е от порядъка на 0,1%, както и значителна икономия от площта на кристала за производството на интегралните схеми. Нискоомни SC-резистори могат да се реализират върху малка площ, но с повече ключове.

## Схеми с превключваеми кондензатори - SC

### RC-времеконстанти

SC-технологията може да осигури времеконстанти с точни стойности, особено с високоомни резистори.

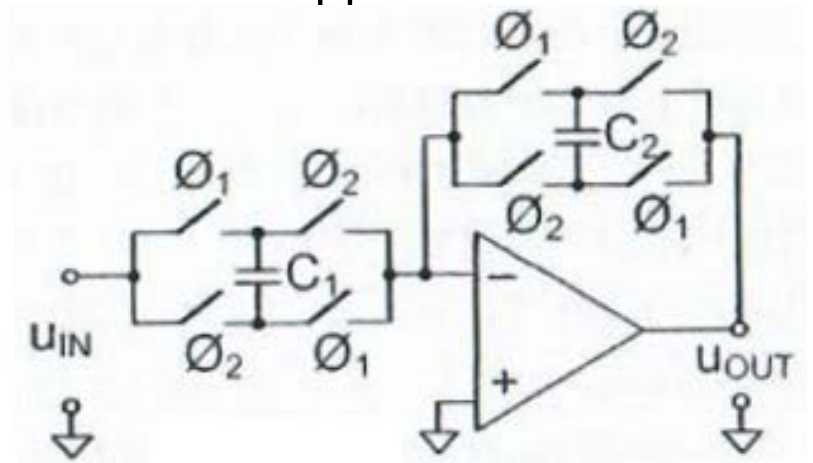
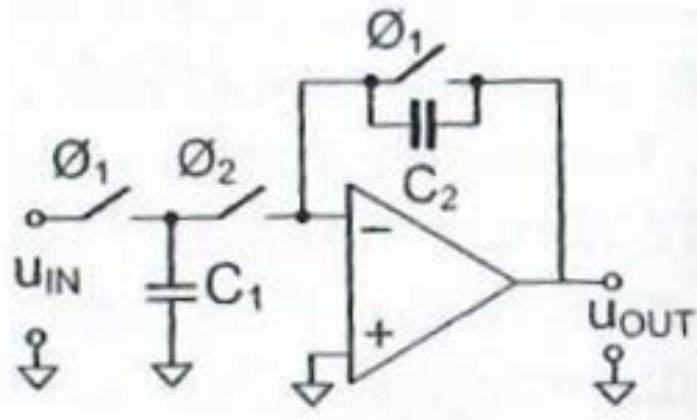
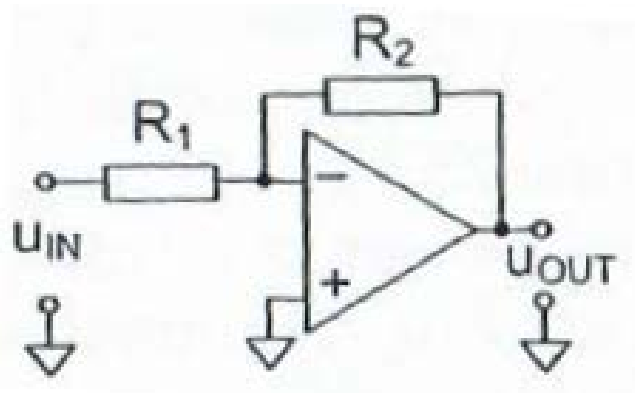


$$\tau = RC = \frac{1}{f_{\Pi} C_{SC}} C = \frac{1}{f_{\Pi}} \frac{C}{C_{SC}}$$

## Схеми с превключваеми кондензатори - SC

### Усилватели

Реализацията на инвертиращ усилвател може да се постигне със замяна на резисторите  $R_1$  и  $R_2$  с техни SC-еквиваленти. За да бъде схемата работоспособна е необходимо  $R_1$  да използва паралелния модел, а  $R_2$  – серийния. Най-подходящ за линейни схеми е билинейният модел.

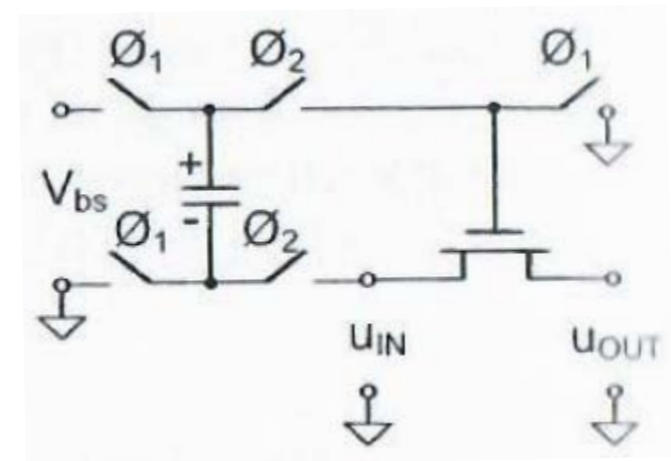


## Схеми с превключваеми кондензатори - SC

### Аналогов ключ – bootstrapped switch

Недостатък на еднотранзисторния P-ключ е промяната на съпротивлението на ключа с промяната на входното напрежение. Единствената величина, с която може да се влияе е гейтовото напрежение.

Този недостатък може да се преодолее с използването на SC-схеми. Кондензаторът се зарежда по време на фазата  $\phi_1$  до напрежението  $V_{bs}$ , което обикновено е равно на захранващото напрежение на аналоговата част.



## Схеми с превключваеми кондензатори - SC

### Аналогов ключ – bootstrapped switch

По време на фазата  $\phi_2$  това напрежение се прилага между гейта и сорса и осигурява дълбоко отпушване и минимално съпротивление на ключа, което не зависи от входното напрежение, а само от напрежението  $V_{bs}$ . Това е възможно защото гейтовото напрежение в случая не се прилага спрямо маса, а спрямо сорса на транзистора.

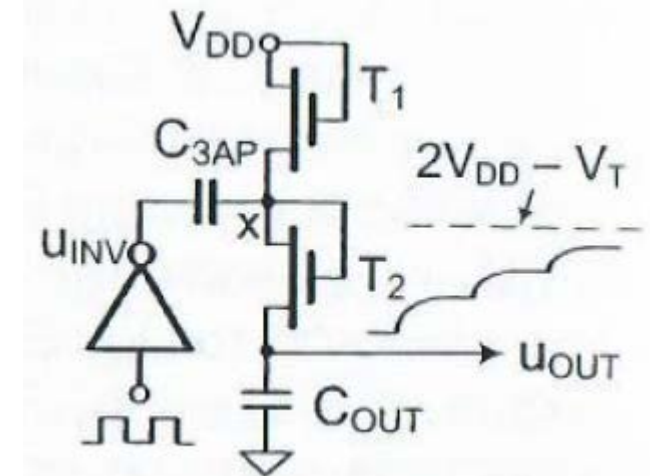
За управлението на ключовите схеми е необходимо по-високо гейтово напрежение. То се генерира с т.нар. зарядна помпа (charge pump).

## Схеми с превключваеми кондензатори - SC

### Зарядни помпи – charge pumps

Двата MOS транзистора са в диодно свързване. При ниско ниво в изхода на инвертора кондензаторът  $C_{OUT}$  се зарежда до напрежение  $(V_{DD} - 2V_T)$ , а  $C_{ЗАР}$  до  $(V_{DD} - V_T)$ . След превключването на инвертора в изхода му се появява напрежение  $V_{DD}$  и този скок се прехвърля в точка  $x$ .

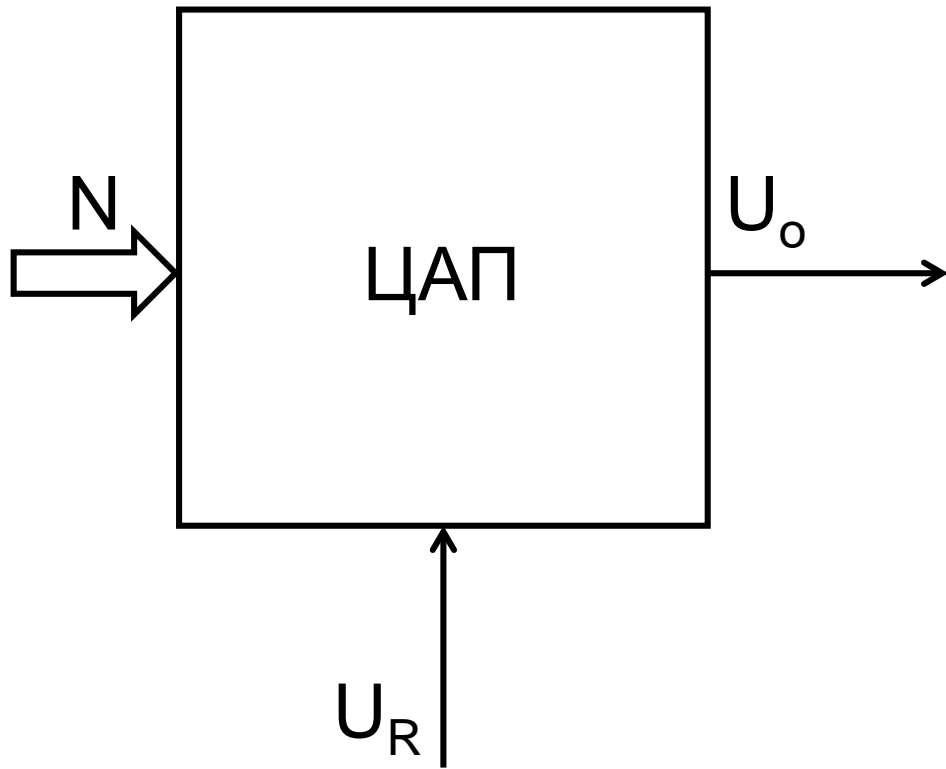
Транзисторът  $T_1$  се запушва и заряд от  $C_{ЗАР}$  се прехвърля към  $C_{OUT}$  и повишава напрежението върху него. То расте и клони към максималната стойност  $(2V_{DD} - V_T)$ .



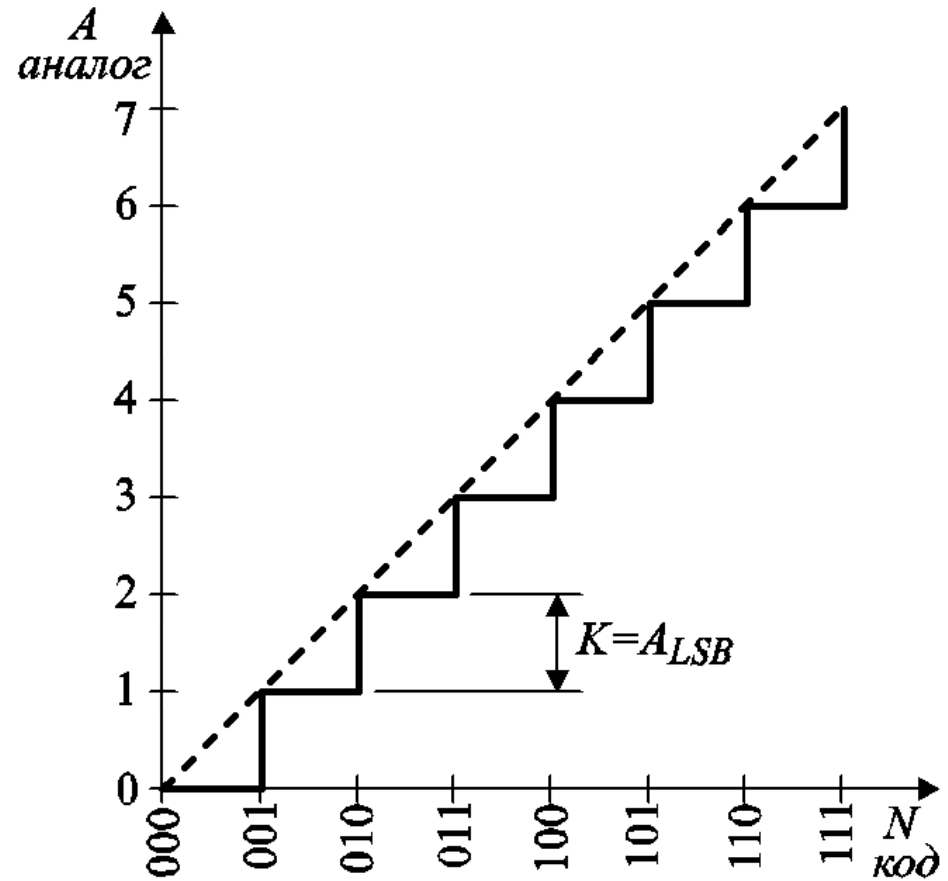
## Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

Развитието на електрониката, компютърните системи и телекомуникациите наложиха цифровата обработка на информацията с използването на микропроцесори и микроконтролери. В резултат на тази обработка изходните сигнали за управление на различни обекти и процеси са в цифров вид. Същевременно голяма част от изпълнителните устройства имат непрекъсната (аналогова) предавателна характеристика. Цифрово-аналоговите преобразуватели – **ЦАП** (Digital-to-Analog Converter – **DAC**) осъществяват връзка между цифрово устройство (микроконтролер или микропроцесорна система) и аналогово периферно устройство.

# Аналогово-цифрови преобразуватели - ЦАП



Блокова схема на ЦАП



Предавателна характеристика на ЦАП



## Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

Най-общо те извършват преобразуване на цифрова величина  $N$  в аналогова стойност  $A$  (най-често ток или напрежение) с някакъв коефициент на преобразуване  $K$ , т.е.  $A = KN$ . За удобство като аналогова величина ще се разбира напрежение  $U_o$ .

Цифрово-аналоговите преобразуватели изискват включването на източник на опорно напрежение (*reference voltage*) -  $U_R$ . Неговата стойност определя максималната стойност на изходното напрежение (обхвата) на преобразувателя -  $U_{omax}$ . Тази стойност още се нарича напрежение на пълната скала (*full scale*) -  $U_{FS}$ .

## Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

Тя ще се получи когато кодът  $N$  е равен на  $N_{max}$  и не може да надвиши стойността на опорното напрежение.

Цифровата величина  $N$  най-често е двоично число. То може да бъде представено по два начина:

1)  $N = a_0 2^0 + a_1 2^1 + a_2 2^2 + \dots + a_{n-1} 2^{n-1}$  - цяло число. Всеки коефициент „ $a_i$ ” има стойност 0 или 1.

$a_0$  е най-младши разряд (Least Significant Bit – LSB).

$a_{n-1}$  е най-старши разряд (Most Significant Bit – MSB).

## Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

2) Тъй като винаги  $U_{FS} < U_R$  е удобно  $N$  да бъде представено като дробно число –  $0 < N < 1$ .

Тогава числото  $N$  може да бъде представено във вида:

$$N = a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + a_3 2^{-3} + \dots + a_n 2^{-n}$$

Този израз може да бъде получен от предния след разделяне на  $2^n$ .

Отново всеки коефициент „ $a_i$ ” има стойност 0 или 1.

$a_n$  е най-младши разряд (Least Significant Bit – LSB).

$a_1$  е най-старши разряд (Most Significant Bit – MSB).

## Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

Поради дискретния характер на цифровата величина  $N$  предавателната характеристика на ЦАП представлява начупена линия. Широчината на едно стъпало е равна на аналоговата стойност при  $N = 1$  и съответства на теглото на най-младшия разряд, като  $A_{LSB} = K$ .

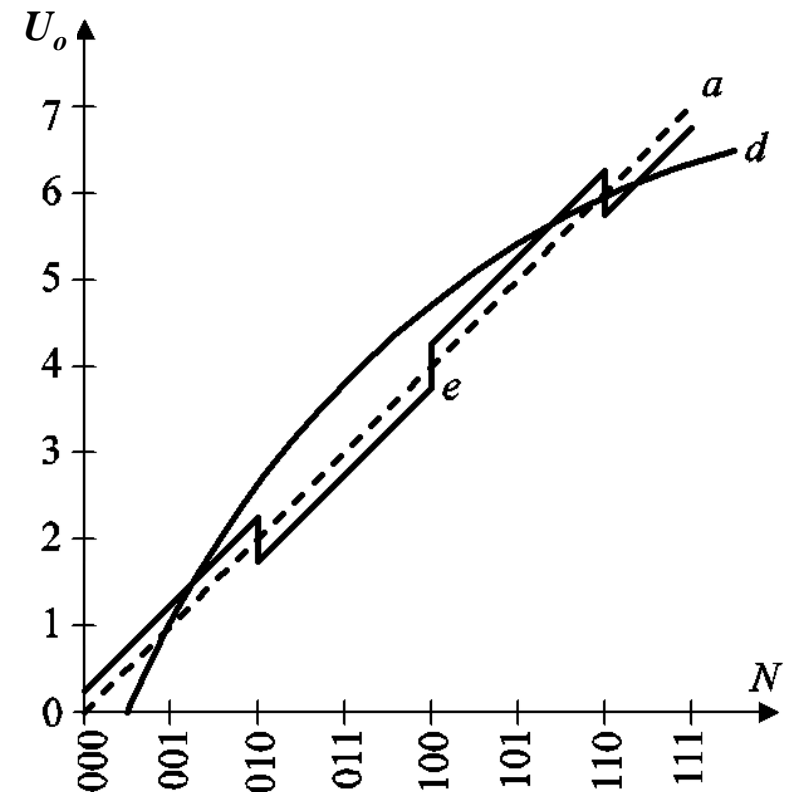
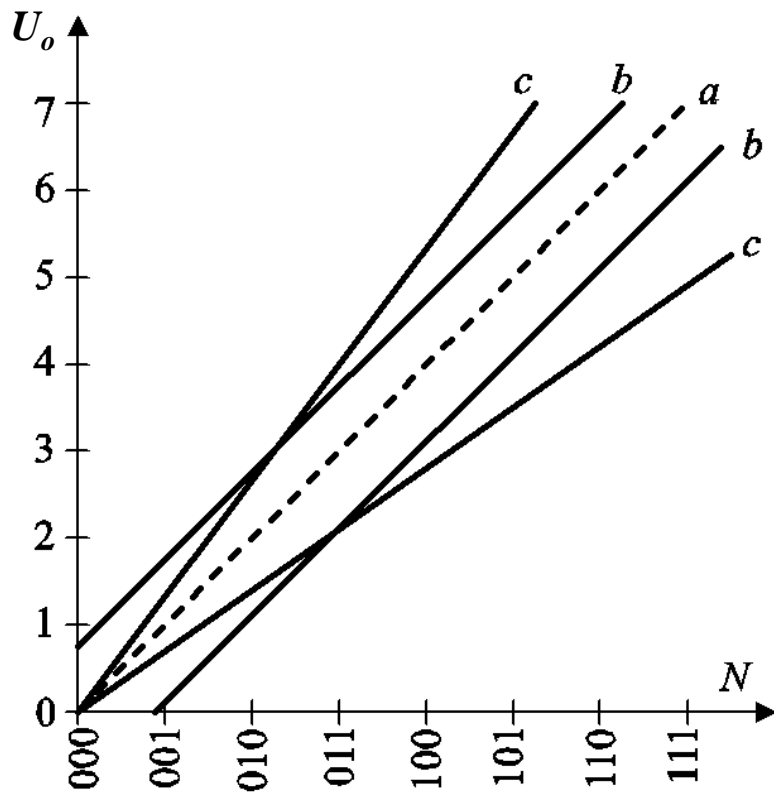
Предавателната характеристика на ЦАП се описва с уравнението  $U_o = U_{LSB} \cdot N$ . Тук коефициентът на предаване  $K$  е означен с  $U_{LSB}$  и е равен на изходното напрежение при  $N = 1$ . Той има смисъл на „напрежение, съответстващо на най-малкия разряд“ (ако изходната величина е ток, коефициентът на предаване се означава с  $I_{LSB}$ ).

## Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

Теглото на най-младшия разряд е:  $U_{LSB} = U_R / 2^n$ , където  $n$  е броят на разрядите на цифровия код (брой на цифровите входове на ЦАП). След като  $U_{LSB}$  се замести с горния израз, предавателната функция може да се представи във вида  $U_o = \frac{U_R}{2^n} N$ . Максималната стойност на кода  $N$  (всички разряди са равни на 1) е равна на  $N_{max} = 2^n - 1$ . След заместването и' в израза за изходното напрежение се получава неговата максимална стойност  $U_{FS} = \frac{U_R}{2^n} (2^n - 1)$  или  $U_{FS} = U_R - U_{LSB}$ . Теглото на най-старшия разряд е равно на половината от опорното напрежение -  $U_{MSB} = U_R / 2$ .

## Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

Четири основни грешки при ЦАП са показани спрямо идеализираната предавателна характеристика  $a$ .



## Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

Две от тях са **компенсируеми** и могат да бъдат елиминирани чрез използването на допълнителни елементи и чрез съответна настройка на схемата – „грешка от изместване на нулата“ (крива *b*) и „грешка от коефициент на предаване“ (крива *c*).

**Некомпенсируеми** са „грешката от нелинейност“ (крива *d*) и „грешката от немонотонност“ или „грешката от тегло на разряд“ (крива *e*). Сумата на всички некомпенсируеми грешки не трябва да надхвърля стойността  $U_{LSB}/2$ , за да се осигури гарантираната от производителя точност.

## Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

В зависимост от разрядността и бързодействието съвременните цифрово-аналогови преобразуватели могат да се разделят на три групи:

- високоскоростни ЦАП с до 8 бита разрядност и с време на преобразуване до 10 ns;

- конвенционални, средно бързодействащи ЦАП с общо предназначение, с разрядност 8÷12 бита и с време на преобразуване до 1  $\mu$ s;

- високоточни ЦАП с 16 и повече бита разрядност и с относително ниско бързодействие.



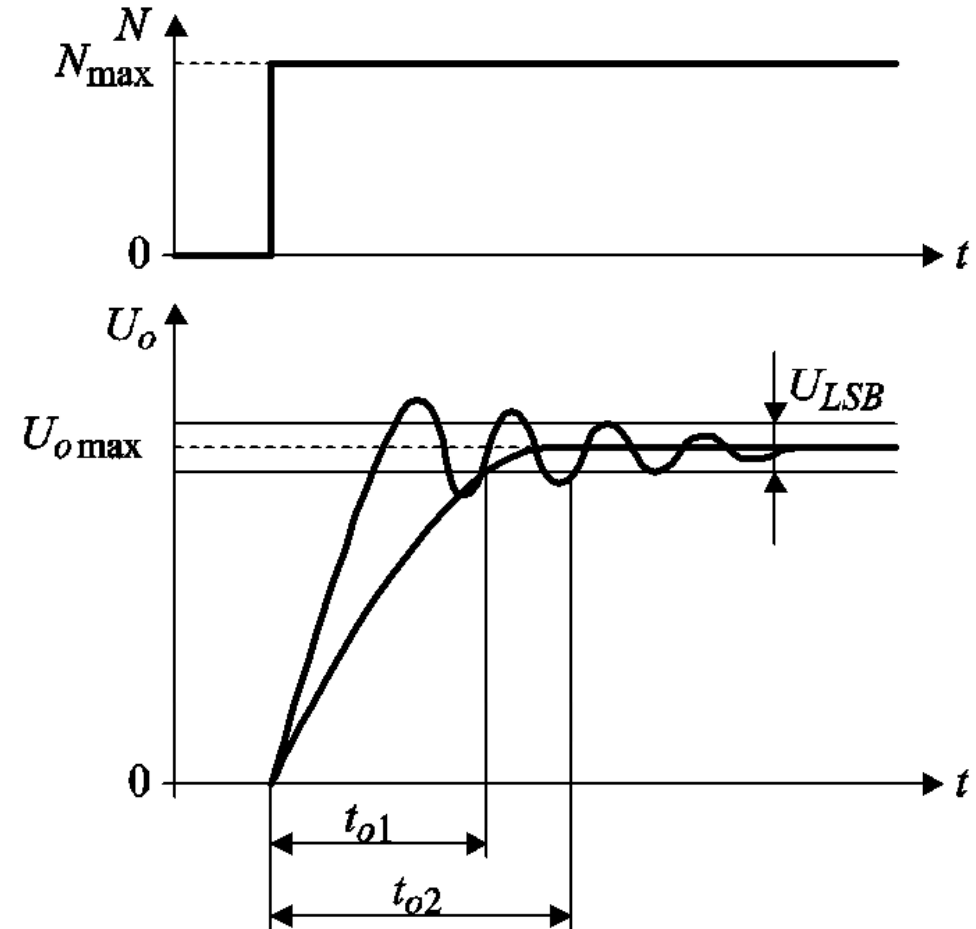
## Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

Границите между отделните групи са условни, тенденцията в развитието на съвременните ЦАП е увеличаването на бързодействието при запазване на точността.

Бързодействието на ЦАП се определя чрез т.нар. време на установяване (*settling time*) -  $t_o$ . То се измерва от момента на подаване на възможно максималното число на входа на преобразувателя  $N_{\max}$  (при начално състояние  $N = 0$ ) до момента, в който изходната величина се установи на съответстващата му стойност.

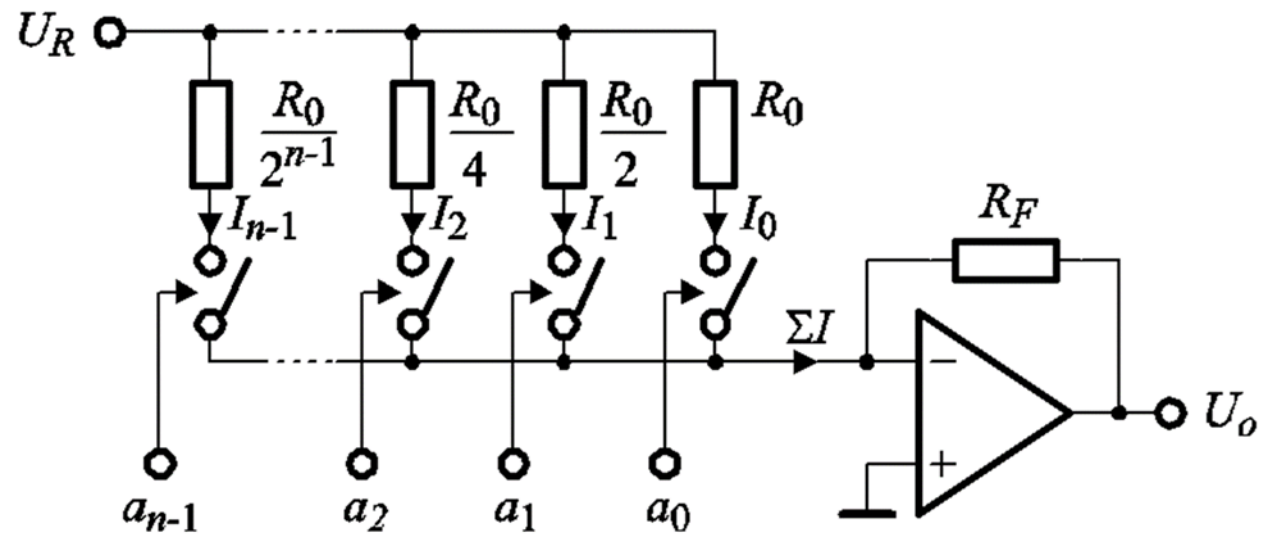
## Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

За момент на установяване следва да се отчете моментът, в който изходната величина остане в областта, определена от  $\pm 0,5U_{LSB}$ . Преходният процес по установяването на изхода на ЦАП може да се развие по различен начин. Най-малко време на установяване се постига, когато той е критично-апериодичен.



# Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

ЦАП със сумиране на токовете



## Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

### ЦАП със сумиране на токовете

Тези цифрово-аналогови преобразуватели работят със сумирането на токове, които са пропорционални на тежестта на разрядите. При двоична бройна система токовете се отнасят помежду си както степените на две. На сумиране подлежат само онези токове, чиито съответстващи разряди са равни на „1”. Токовете се формират от опорното напрежение  $U_R$  и резисторите в съответния клон. Съпротивленията на резисторите се отнасят както степените на две и формираният от тях ток съответства на теглото на разряда. Ток в даден клон ще протече когато съответният ключ е затворен, а това става при установяване на управляващия го разряд в 1.

## Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

### ЦАП със сумиране на токовете

Точката на сумиране е инвертиращият вход на операционния усилвател, който е обхванат с отрицателна обратна връзка чрез резистора  $R_F$  и работи в режим на преобразувател ток-напрежение. Изходното напрежение на цифрово-аналоговия преобразувател е:

$$\begin{aligned} U_o &= -R_F \Sigma I = -R_F (I_0 a_0 + I_1 a_1 + I_2 a_2 + \dots + I_{n-1} a_{n-1}) = \\ &= -R_F \left( \frac{U_R}{R_0} a_0 + \frac{2U_R}{R_0} a_1 + \frac{4U_R}{R_0} a_2 + \dots + \frac{2^{n-1} U_R}{R_0} a_{n-1} \right) = \\ &= -\frac{R_F}{R_0} U_R (a_0 2^0 + a_1 2^1 + a_2 2^2 + \dots + a_{n-1} 2^{n-1}) = -\frac{R_F}{R_0} U_R N \end{aligned}$$

## Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

### ЦАП със сумиране на токовете

От последния израз се вижда, че когато даден разряд е равен на „1“, съответната степен на две ще участва в образуването на числото N. Физическото отражение на тази зависимост е, че токът от клон със затворен ключ ще участва в сумата  $\Sigma I$  и във формирането на изходното напрежение.

Стойността на най-младшия разряд е: 
$$U_{LSB} = -\frac{R_F}{R_0} U_R$$

За да бъде изпълнено  $U_{LSB} = U_R / 2^n$ , е необходимо  $R_F = R_0 / 2^n$ .

## Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

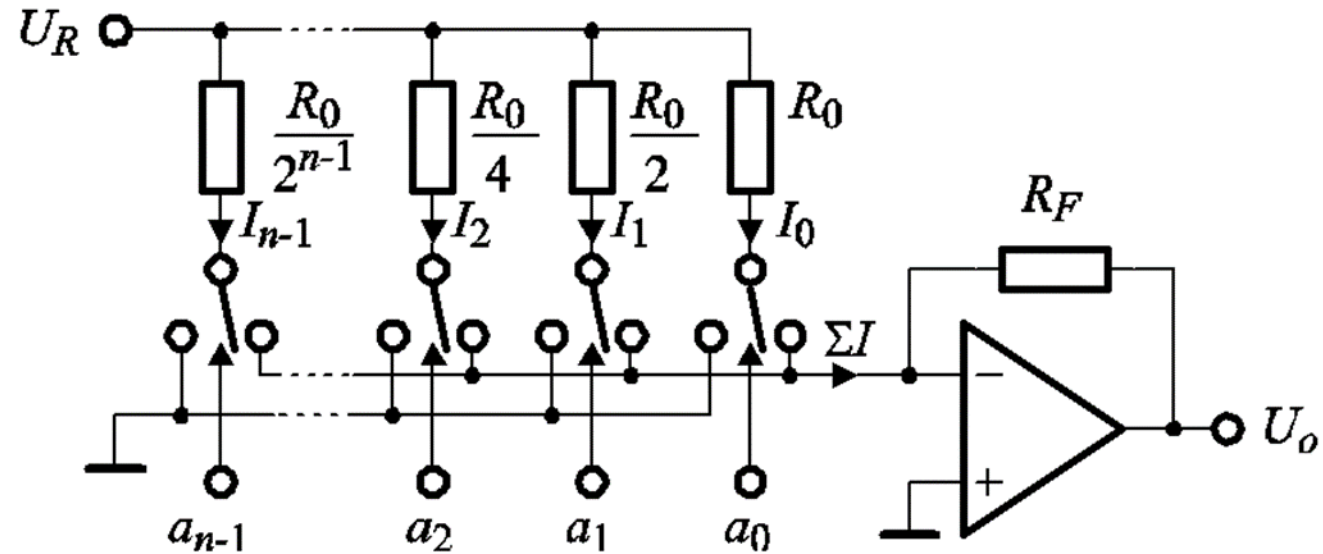
### ЦАП със сумиране на токовете

Недостатък на разгледаната схема е фактът, че ключовете работят, превключвайки напрежение (при отворен ключ върху него действа опорното напрежение  $U_R$ , докато напрежението върху затворен ключ е виртуална нула).

Поради влиянието на паразитните капацитети честотата на превключване е ниска. Това може да се преодолее, ако се използват превключващи ключове, които превключват токоопределящите резистори или към маса, или към виртуалната нула в точката на сумирането.

# Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

ЦАП със сумиране на токовете



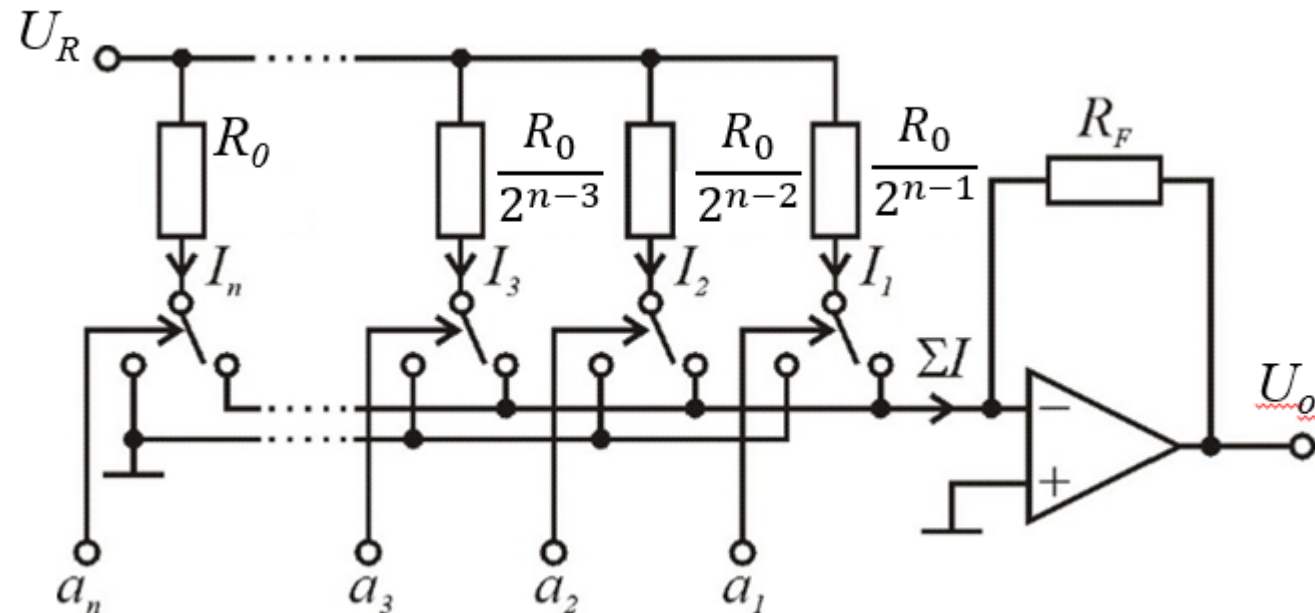
Протичащият ток през резисторите няма да се променя и натоварването на източника на опорно напрежение ще бъде постоянно.



# Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

## ЦАП със сумиране на токовете

Вътрешното съпротивление на източника не е задължително да бъде малко, както трябва да е в предходната схема. Той ще бъде постоянно натоварен с активен товар  $R_0/(2^n - 1)$ .



## Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

### ЦАП със сумиране на токовете

Ако кодът се задава като дробно число, разрядът  $a_1$  ще превключва тока с най-голяма стойност, а разрядът  $a_n$  – този с най-малка.

В този случай изразът за предавателната функция ще има вида:

$$U_o = -R_F \sum_{i=1}^n I_i = -R_F(I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n) = -R_F \left( a_1 \frac{U_R 2^{n-1}}{R_0} + a_2 \frac{U_R 2^{n-2}}{R_0} + a_3 \frac{U_R 2^{n-3}}{R_0} + \dots + a_n \frac{U_R 2^0}{R_0} \right) =$$
$$= -\frac{U_R R_F 2^n}{R_0} (a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + a_3 2^{-3} + \dots + a_n 2^{-n}) = -\frac{U_R R_F 2^n}{R_0} N$$

При  $R_F = R_0 / 2^n$  се получава:

$$U_o = -U_R N; \quad U_{LSB} = -\frac{U_R}{2^n}; \quad U_{FS} = -U_R \frac{2^n - 1}{2^n}$$

Недостатък на този метод за цифрово-аналогово преобразуване е необходимостта от осигуряване на  $n$  на брой точни резистори.

## Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

### ЦАП със сумиране на токовете

Отношението между най-големия и най-малкия резистор е  $2^n-1$  пъти, като същевременно грешката при изготвянето на резистора за най-старшия разряд трябва да бъде  $\Delta R/R < 1/2^n-1$ . В интегралната схемотехника представлява значителна трудност реализирането на високоточни резистори, силно различаващи се по стойност. Затова се използва **резисторна матрица**, която с помощта на последователно делене на напрежение или ток реализира тегловните коефициенти на разрядите.

## Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

ЦАП със сумиране на токовете с  $R$ - $2R$  матрица

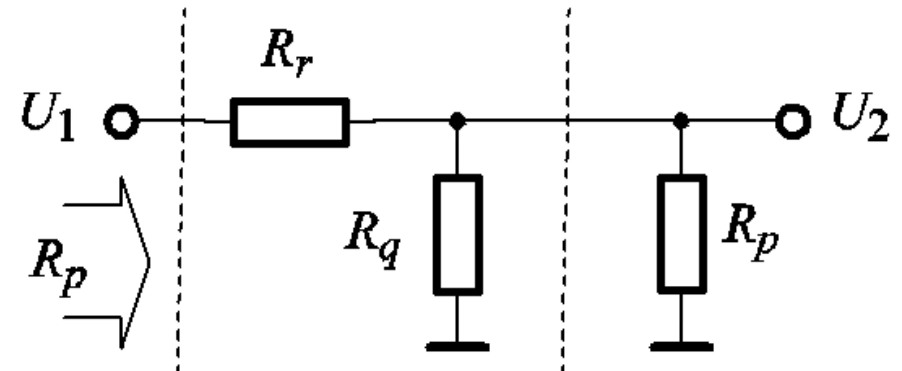
Основният елемент на такава матрица е делител на напрежение, който удовлетворява следните условия:

– когато делителят се натовари със съпротивление  $R_p$ , входното му съпротивление също трябва да стане

$R_p$ ;

– при товар  $R_p$  коефициентът на отслабване на напрежението трябва да

има зададена стойност  $\alpha = U_2/U_1$ .



## Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

ЦАП със сумиране на токовете с  $R$ - $2R$  матрица

При изпълнение на тези две условия стойностите на съпротивленията се получават със следните уравнения:

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

При използването на двоична бройна система  $\alpha = 0,5$ . Като се избере  $R_q = 2R$ , следва  $R_r = R$  и  $R_p = 2R$ . Затова в практиката такава матрица се нарича  **$R$ - $2R$  матрица**. Основните ѝ свойства могат да се дефинират както следва:

## Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

ЦАП със сумиране на токовете с  $R$ - $2R$  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  $2R$ .

Тези свойства водят до следните предимства:

- стойността на  $R$  е относително маловажна, стига да не се използват изключително големи стойности; критично е само съотношението на стойностите на резистора;

## Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

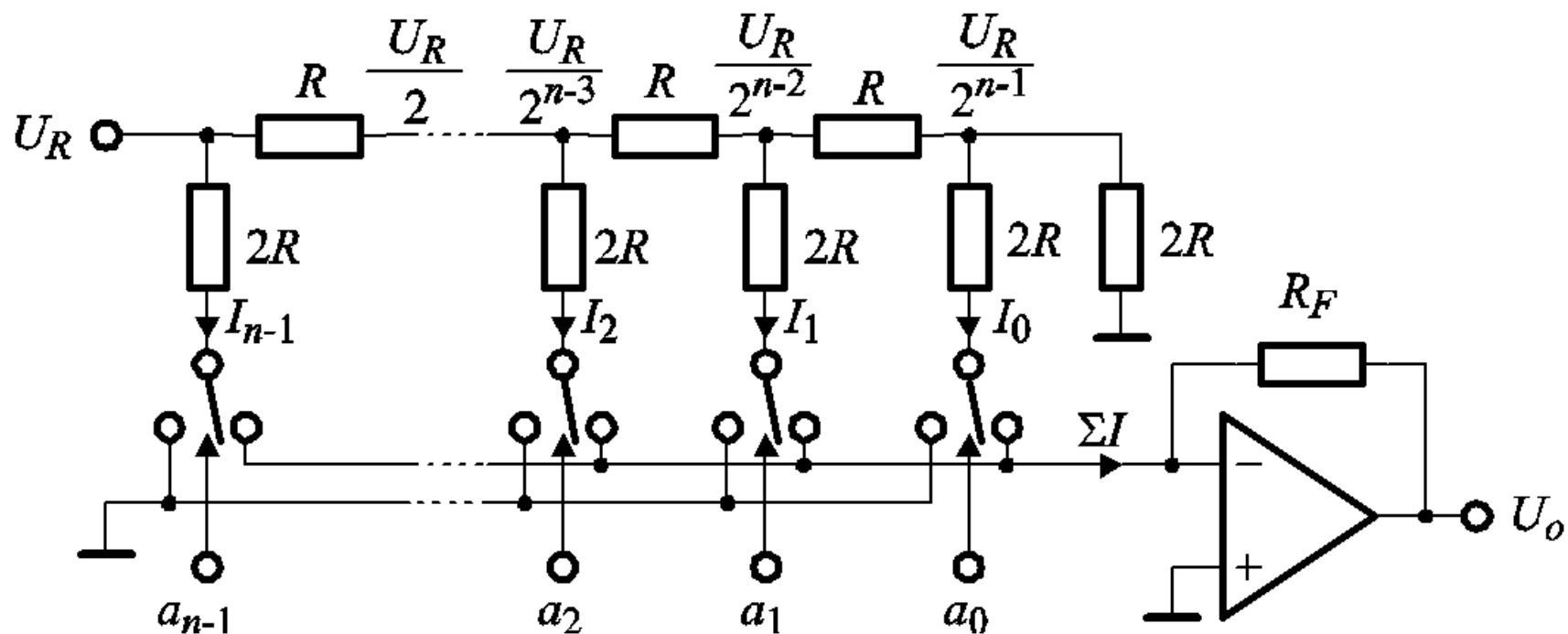
ЦАП със сумиране на токовете с  $R-2R$  матрица

- теглото на съответните разряди се получава автоматично според мястото на ключовете в матрицата;
- $R-2R$  матрици се предлагат в монолитни интегрални схеми, които са лазерно настроени, за да бъде точността в рамките на 0,01% от желаните съотношения.

Източникът на опорно напрежение  $U_R$  в схемите с използване на  $R-2R$  матрица е постоянно натоварен с характеристикното съпротивление на матрицата  $2R||2R = R$ .

## Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

ЦАП със сумиране на токовете с  $R$ - $2R$  матрица





## Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

ЦАП със сумиране на токовете с  $R$ - $2R$  матрица

За тази схема са валидни следните зависимости:

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

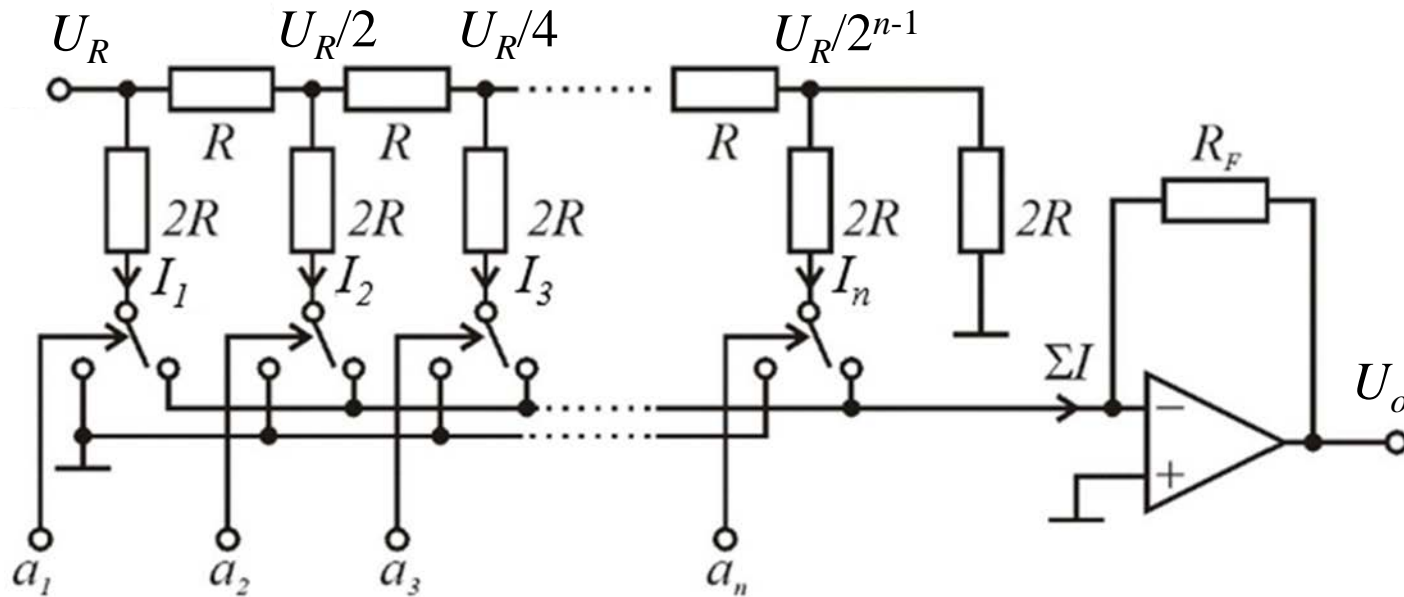
Ако  $R_F = R$ :

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

Същата зависимост се получава и когато се използва задаване на цифровия код като дробно число.

## Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

ЦАП със сумиране на токовете с  $R$ - $2R$  матрица



$$\begin{aligned}
 U_o &= -R_F \sum_{i=1}^n I_i = -R_F (I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n) = -R_F \left( a_1 \frac{U_R}{2R} + a_2 \frac{U_R}{4R} + a_3 \frac{U_R}{8R} + \dots + a_n \frac{U_R}{2^n R} \right) = \\
 &= -\frac{U_R R_F}{R} (a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + a_3 2^{-3} + \dots + a_n 2^{-n}) = -\frac{U_R R_F}{R} N \\
 R_F = R &\rightarrow U_o = -U_R N; \quad U_{LSB} = -\frac{U_R}{2^n}; \quad U_{FS} = -U_R \frac{2^n - 1}{2^n}
 \end{aligned}$$

# Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

## Двоично-десетични ЦАП

Двоично-десетичните ЦАП се изграждат на същите принципи както и двоичните. При тях разрядите могат да се считат разделени на тетради, като вътре във всяка тетрада разрядите се отнасят помежду си както степените на две, а тетрадите се отнасят помежду си както степените на десет.

Когато се използва принципът на сумирането на токовете, трябва да се осигурят токове вътре в тетрадите, отнасящи се както степените на две, а за тетрадите – токове, отнасящи се както степените на десет.

# Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

## Двоично-десетични ЦАП

Резисторната матрица може да бъде променена за използване в двоично-десетични ЦАП. За всички десетични разряди са използвани 4-разрядни двоични матрици, които са съединени във верига, в която от декада към декада напрежението се предава с коефициент  $\alpha = 1/10$ .

Избирайки  $R_q$  да бъде равно на характеристичното съпротивление на тетрадната двоична матрица, т.е.  $R_q = R$ , чрез формулите за  $R_r$  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  $0,9R$ .

# Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

## Двоично-десетични ЦАП

