

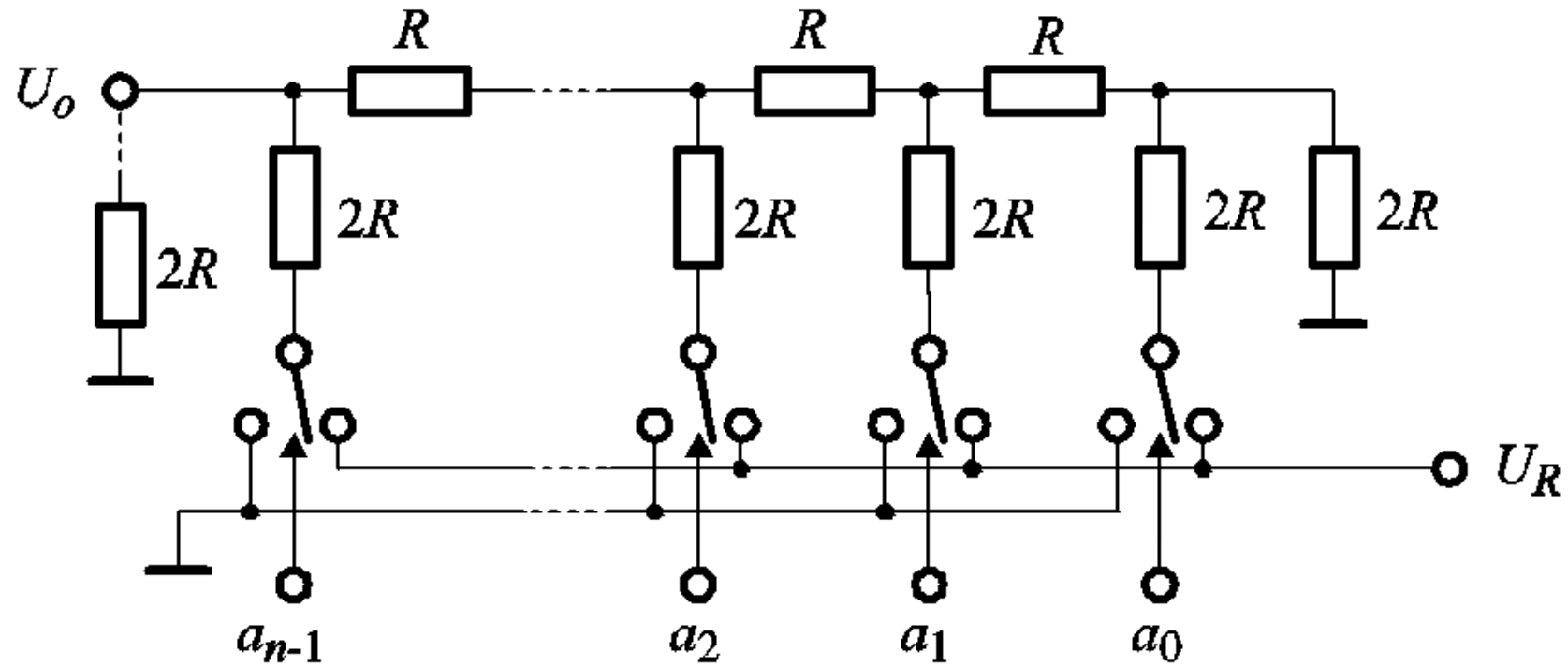
Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

ЦАП със сумиране на напреженията

Тези цифрово-аналогови преобразуватели работят със сумирането на напрежения, които са пропорционални на тежестта на числовите разряди. При използване на двоична бройна система напреженията ще се отнасят помежду си както степените на две. На сумиране подлежат само онези напрежения, чиито съответстващи двоични разряди са равни на 1. Отнасящи се както степените на две напрежения, лесно могат да се получат с помощта на резистивна $R-2R$ матрица съгласно нейното първо свойство.

Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

ЦАП със сумиране на напреженията



Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

ЦАП със сумиране на напреженията

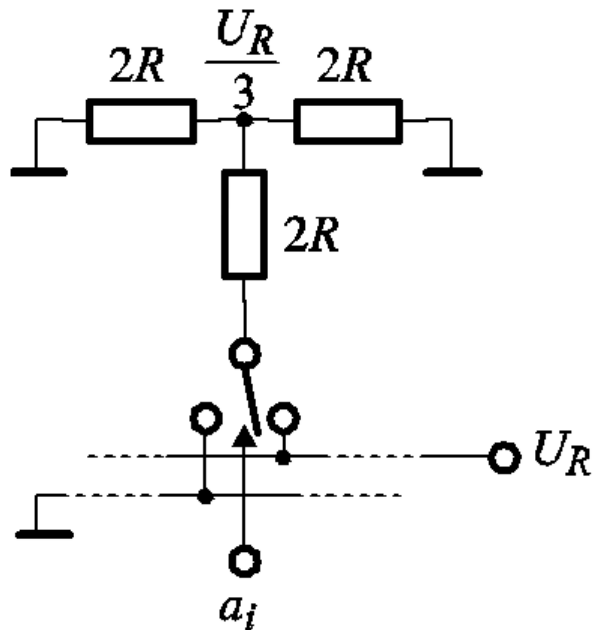
Спрямо схемата на ЦАП със сумиране на токовете са направени няколко промени. Източникът на опорно напрежение е включен на мястото на сумиращия токовете операционен усилвател, а изходът е изведен там, където е бил опорният източник. За облекчаване на анализа на схемата изходът е натоварен със съпротивление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

При тази постановка всеки възел на $R-2R$ матрицата се натоварва отляво и отдясно с еквивалентно съпротивление $2R$.

Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

ЦАП със сумиране на напреженията

Лесно се разчита, че при това натоварване опорното напрежение се предава от ключа към възела с коефициент $1/3$.



За определяне на стойността на изходното напрежение се прилага методът на суперпозицията. При определянето на реакцията на изхода спрямо въздействието на даден разряд се приема, че той е равен на 1, а останалите разряди - на 0.

Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

ЦАП със сумиране на напреженията

Поотделно се определя изходната реакция спрямо всеки разряд, а след това се извършва сумиране за определяне на общата реакция на комплексното въздействие:

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

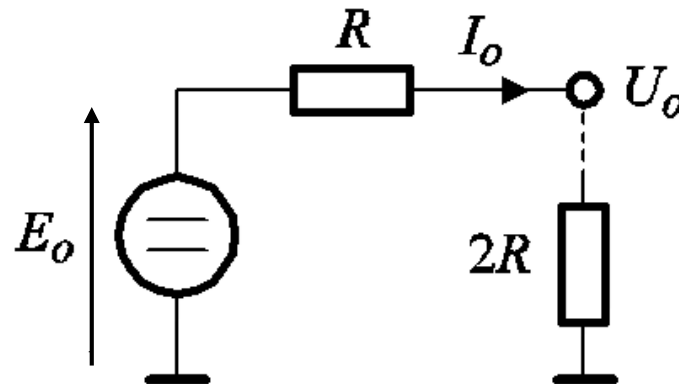
$$U_o = \frac{2}{3}U_R \frac{1}{2^n} N$$

Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

ЦАП със сумиране на напреженията

Така анализираната схема може да бъде преобразувана в еквивалентна, която включва идеален генератор на напрежение, неговото изходно съпротивление и товар.

Анализираният ЦАП е представен като идеален генератор на изходно напрежение E_o , имащ изходно съпротивление R и натоварен в изхода с товар $2R$.



Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

ЦАП със сумиране на напреженията

От еквивалентната схема може да се определи напрежението на идеалния генератор:

$$E_o = \frac{3}{2}U_o. \text{ Следователно } E_o = U_R \frac{1}{2^n} N, \text{ където } U_R \frac{1}{2^n} = U_{LSB}.$$

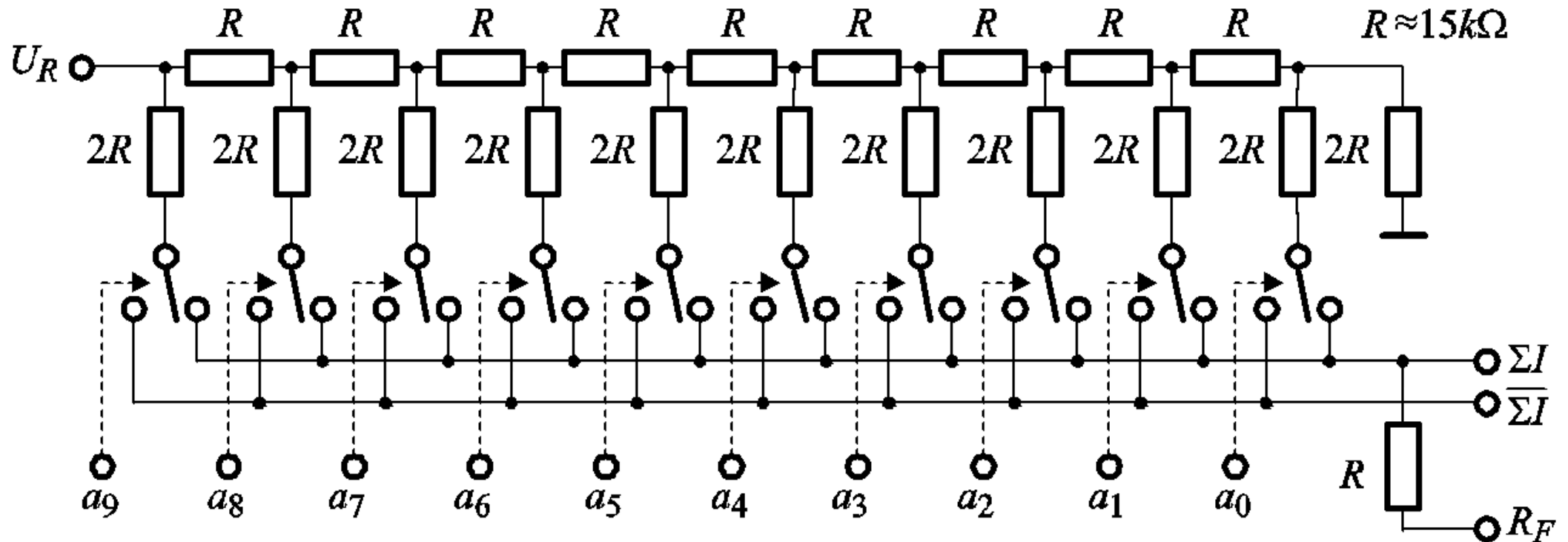
Такива ЦАП се произвеждат без вграденото товарно съпротивление $2R$, което беше използвано за облекчаване на анализа на схемата. Тяхното изходно напрежение на празен ход е $E_o = U_R \frac{1}{2^n} N$, а максималният ток

$$\text{(при късо съединение в изхода) е } I_{o\max} = \frac{E_o}{R} = U_R \frac{1}{2^n} N \frac{1}{R}.$$

Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

ЦАП със сумиране на напреженията

Типичен представител на този тип ЦАП е 10-разрядният DAC7520 на National Semiconductor (усъвършенствана версия на DAC1020).



Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

ЦАП със сумиране на напреженията

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

При свързването на ЦАП за работа със сумиране на напреженията трябва да се имат предвид по-рано споменатите недостатъци – ключовете работят, превключвайки напрежение, и товарът на опорното напрежение се променя в зависимост от подаденото число.

Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

Двуквадрантни ЦАП и ЦАП за обработка на числа със знак

Описаните дотук цифрово-аналогови преобразуватели получават като цифрова стойност числа без знак. Предавателната им характеристика се разполага в един от четирите квадранта на координатната система код – аналог. Такива ЦАП се наричат едноквадрантни.

Ако предавателната характеристика може да се разположи в два квадранта на координатната система, ЦАП се наричат двуквадрантни. Ако цифрово-аналоговият преобразувател може да изработи както положителни, така и отрицателни изходни напрежения, предавателната му характеристика се разполага в два квадранта и той е двуквадрантен.

Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

Двуквадрантни ЦАП и ЦАП за обработка на числа със знак

Двуквадрантен е и този ЦАП, при който обработваните от него числа могат да заемат както положителни, така и отрицателни стойности.

Преобразуването на числа със знак има някои особености. Обикновено двоичните числа със знак се представят в допълнителен код, където старшият разряд е знаков. Така с n разряда могат да се представят числа в диапазона от (-2^{n-1}) до $+(2^{n-1} - 1)$. Чрез прибавяне на 2^{n-1} към числата диапазонът се измества от 0 до $+(2^n - 1)$, като числата по-големи от 2^{n-1} се считат за положителни, а числата по-малки от 2^{n-1} – за отрицателни. Средната стойност 2^{n-1} съответства на нулата.

Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

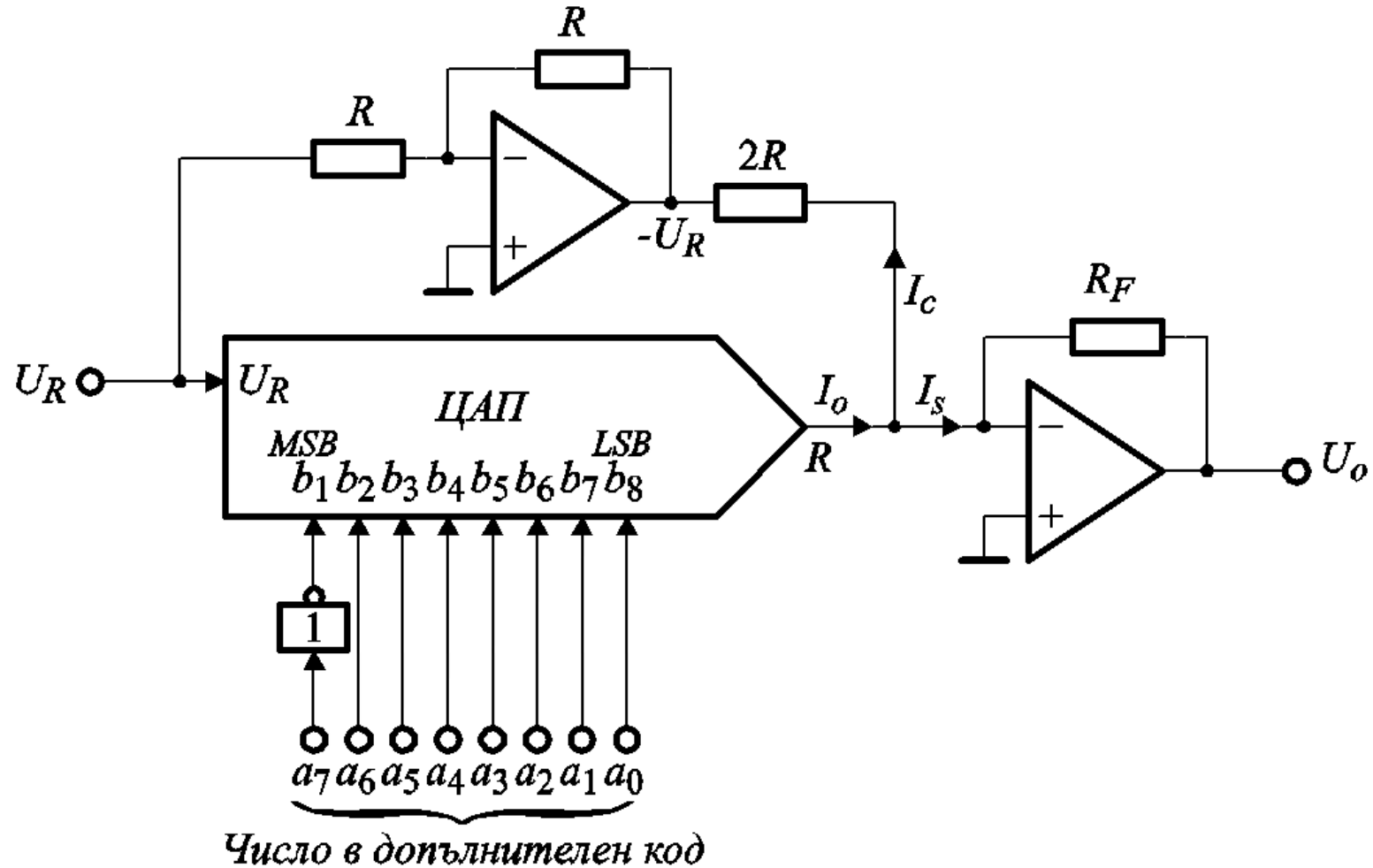
Двуквадрантни ЦАП и ЦАП за обработка на числа със знак

Такова представяне на числа със знак чрез положителни числа се нарича изместен двоичен код.

Например чрез 8 цифрови разряда могат да се представят числа със знак в диапазона от -128 до +127. Чрез прибавяне на 128 този диапазон се измества от 0 до 255, като числото 128 съответства на нулата. Прибавянето на 2^{n-1} (за примера 128) може да се извърши просто, само с инвертиране на старшия знаков разряд.

Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

Двуквадрантни ЦАП и ЦАП за обработка на числа със знак



Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

Двуквадрантни ЦАП и ЦАП за обработка на числа със знак

За получаването на изходно напрежение с правилен знак (двуполярно изходно напрежение) е осъществено реципрочно преместване на изходната величина чрез аналогово изваждане на ток $I_C = 128 \cdot I_{LSB}$. Изважданият (компенсиращият) ток се формира от инвертираното опорно напрежение $-U_R$ и резистор, който е с два пъти по-голяма стойност от изходното съпротивление R на ЦАП. Затова сумарният ток I_S е:

$$I_S = I_O - 128 \cdot I_{LSB} = I_O - (128/256) I_{Omax}.$$

Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

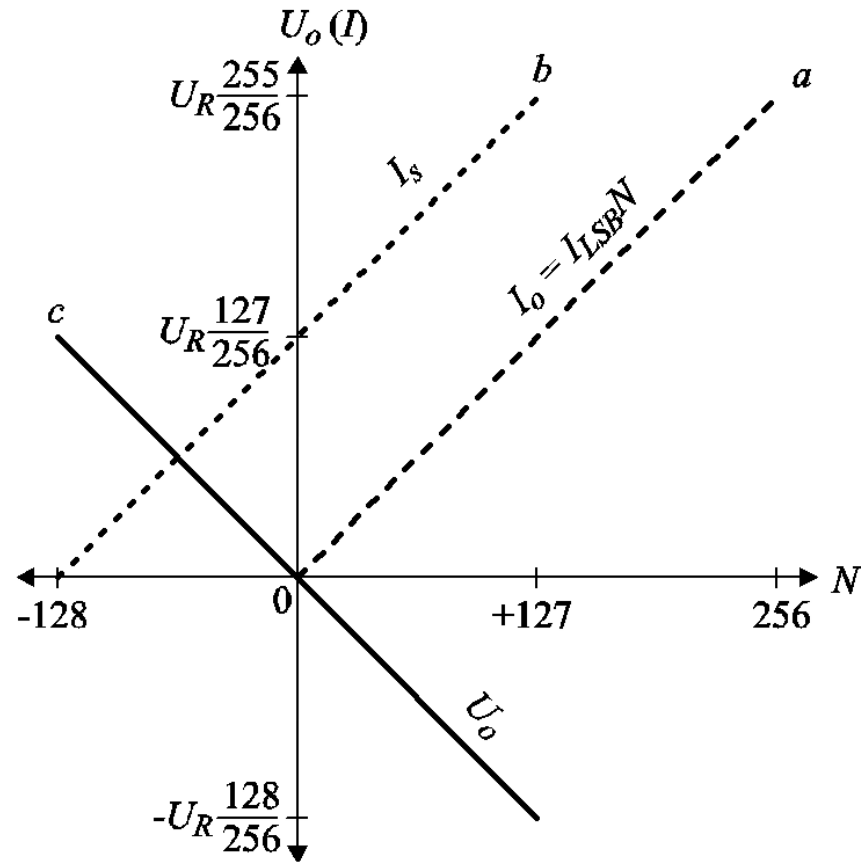
Двуквадрантни ЦАП и ЦАП за обработка на числа със знак

<i>Число</i>	<i>Допълнителен код</i>	<i>Изместен код</i>	$I_s/I_{o\max}$
127	0 1 1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1 1	127/256
.....
1	0 0 0 0 0 0 0 1	1 0 0 0 0 0 0 1	1/256
0	0 0 0 0 0 0 0 0	1 0 0 0 0 0 0 0	0
-1	1 1 1 1 1 1 1 1	0 1 1 1 1 1 1 1	-1/256
.....
-127	1 0 0 0 0 0 0 1	0 0 0 0 0 0 0 1	-127/256
-128	1 0 0 0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0	-128/256

Съответствие между цифровите и аналоговите стойности

Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

Двуквадрантни ЦАП и ЦАП за обработка на числа със знак



Предавателна характеристика на 8-разряден ЦАП за обработка на числа в допълнителен код

Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

Двуквадрантни ЦАП и ЦАП за обработка на числа със знак

Крива a е предавателната характеристика на обикновения двоичен ЦАП ($I_o = I_{LSB} \cdot N$). Преобразуването на постъпващото число от допълнителен код в изместен код чрез инвертиране на старшия му разряд е еквивалентно на транслиране (на половин диапазон) по абсцисната ос на характеристиката за I_s – крива b . Включването на компенсиращ ток при формирането на изходната величина също е еквивалентно на транслиране на характеристиката на половин диапазон, но по ординатната ос. Двете измествания формират окончателната предавателна характеристика за U_o – крива c .

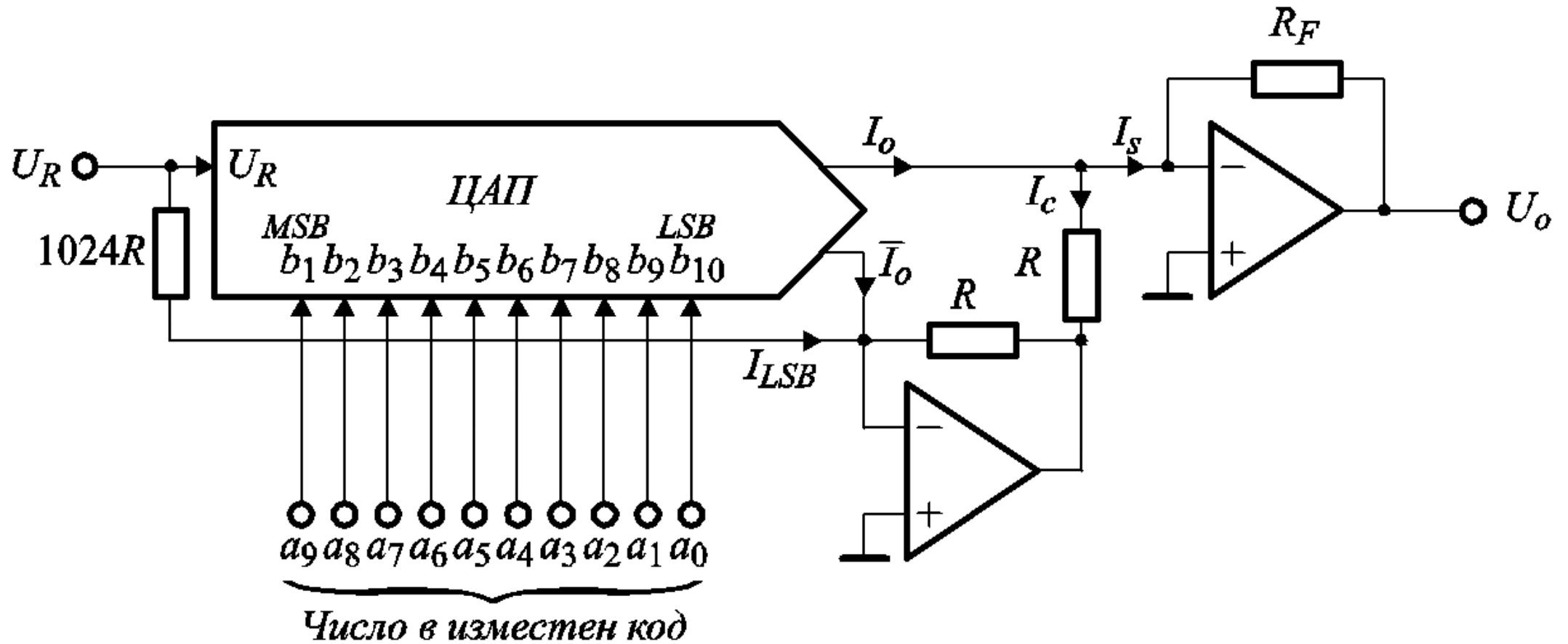
Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

Двуквадрантни ЦАП и ЦАП за обработка на числа със знак

Недостатък на описаната схема е това, че компенсационният ток I_c се формира извън ЦАП и поради различните температурни коефициенти сумарният ток I_s не притежава висока термостабилност. Формирането на компенсационния ток вътре в ЦАП е възможно само за онези ЦАП, които притежават изход за сумата от допълнителните токове (например DAC7520).

Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

Двуквадрантни ЦАП и ЦАП за обработка на числа със знак



Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

Двуквадрантни ЦАП и ЦАП за обработка на числа със знак

$$I_o = I_{LSB}N \text{ и } I_o + \bar{I}_o = const = (2^n - 1)I_{LSB}, \bar{I}_o = (2^n - 1)I_{LSB} - I_o.$$

$$\text{Тъй като } I_c = -I_{LSB} - (2^n - 1)I_{LSB} + I_o = -2^n I_{LSB} + I_{LSB}N,$$

$$I_s = I_o + I_c = I_{LSB}N - 2^n I_{LSB} + I_{LSB}N = 2I_{LSB}(N - 2^{n-1}).$$

От крайния резултат за I_s се вижда, че той е пропорционален на постъпващото число в изместен код $(N - 2^{n-1})$. Освен това изходният диапазон на тока I_s е двойно по-голям. В реалната практика големият резистор $1024R$, формиращ тока I_{LSB} , се пренебрегва.

Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

Четириквadrантни ЦАП и умножителни ЦАП

Четириквadrантни ЦАП са тези, при които предавателната характеристика може да се разполага и в четирите квадранта на координатната система код – аналог. Затова е необходимо освен възможността за обработка на числа със знак, ЦАП да е способен да изработва както положителни, така и отрицателни изходни напрежения.

DAC7520 е четириквadrантен ЦАП тъй като може да работи с разнополярни опорни напрежения и съответно да изработва разнополярна изходна величина.

Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

ЧетириквADRантни ЦАП и умножителни ЦАП

С допълнителни елементи едноквADRантните и двуквADRантните ЦАП също могат да се преобразуват в четириквADRантни.

Ако се разгледат внимателно предавателните уравнения на показаните тук цифрово-аналогови преобразуватели, които се подчиняват на общото уравнение $U_o = U_{LSB} \cdot N$, може да се забележи, че коефициентът на предаване U_{LSB} представлява произведение от някаква константа (означена в случая с M) и опорното напрежение U_R , т.е. $U_{LSB} = M \cdot U_R$.

Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

Четириквadrантни ЦАП и умножителни ЦАП

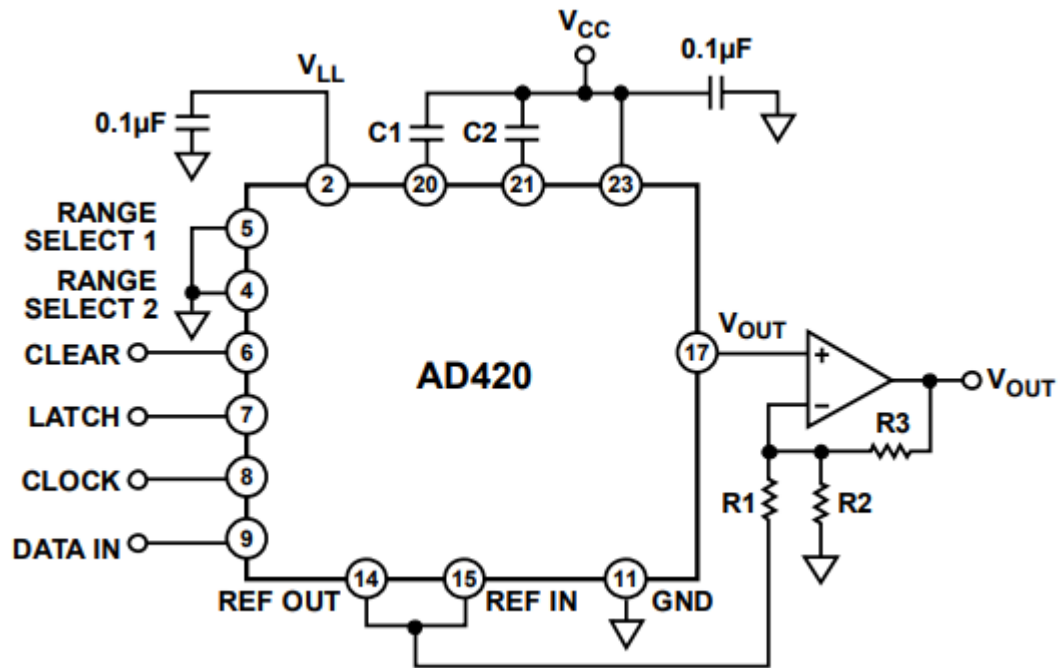
Така общото уравнение може да бъде записано във вида $U_o = M.N.U_R$.

Ако вместо опорно напрежение се подаде някакво неизвестно входно напрежение U_i , то изходното напрежение $U_o = M.N.U_i$ ще представлява, с коефициент на пропорционалност M , произведение на входното напрежение U_i по число N . Всички ЦАП, за които това е вярно, се наричат умножителни. Следователно всички четириквadrантни ЦАП са умножителни. Те изпълняват следните две условия:

- имат вход за включване на външно опорно напрежение;
- могат да работят с разнополярно опорно напрежение.

Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

Четириквadrантни ЦАП и умножителни ЦАП



R1	R2	R3	V _{OUT}
Open	Open	0	0V – 5V
Open	R	R	
R	Open	R	±5V
R	2R	2R	±10V

Suitable R = 5 kΩ.

Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

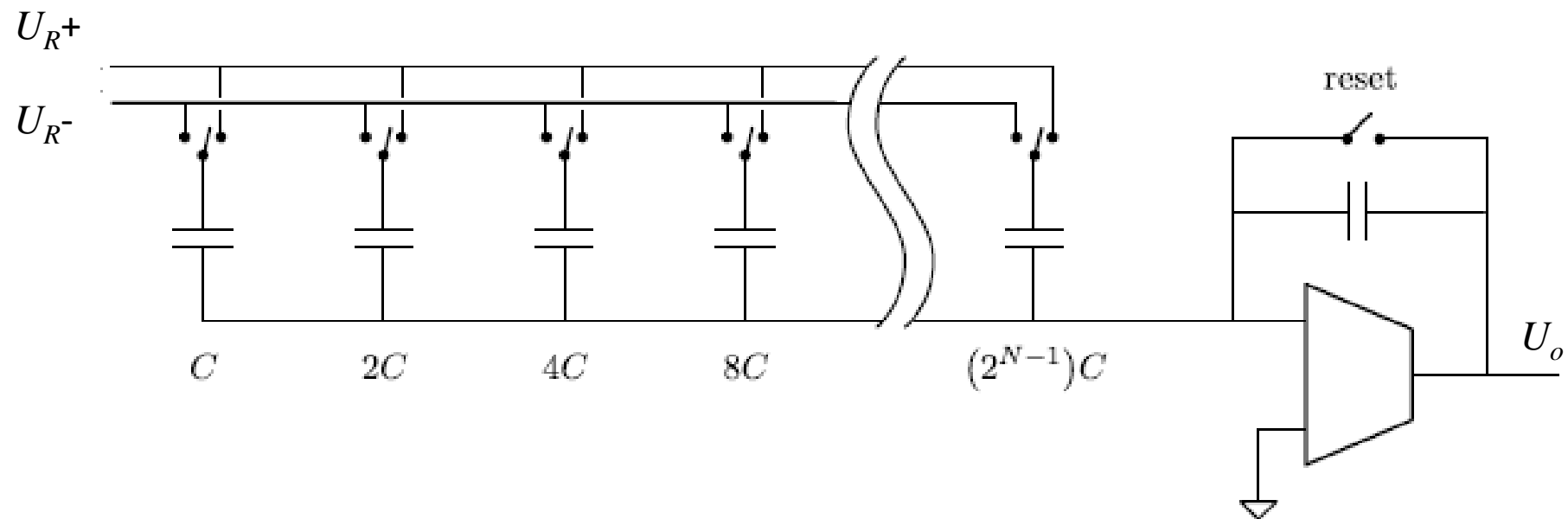
ЦАП със зарядно преразпределение

ЦАП със зарядно преразпределение имат подобна структура като резисторните ЦАП, с разликата, че кондензаторите, а не резисторите, се използват за деление на опорното напрежение.

Трябва да се има предвид, че тъй като кондензаторите не могат да задържат заряд за неопределено време, кондензаторните ЦАП, трябва да се управляват с постоянна тактова честота и с фази, предназначени за различни дейности като нулиране и преразпределение на заряда.

Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

ЦАП със зарядно преразпределение



Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

ЦАП със зарядно преразпределение

Един проблем с тази архитектура е, че трудно може да се постигне пропорционално съвпадение в точността между много големи и много малки кондензатори, което да е достатъчно точно за приложения с висока разделителна способност. Например кондензатор със стойност C трябва да съвпада по точност с кондензатор със стойност $C \cdot 2^{n-1}$.

Увеличаването на стойностите на кондензаторите може да бъде намалено с разделяне на мрежата на капацитивно свързани части, което увеличава зависимостта от паразитните капацитети, или чрез използване на многостъпков алгоритъм, което намалява пропускателната способност.

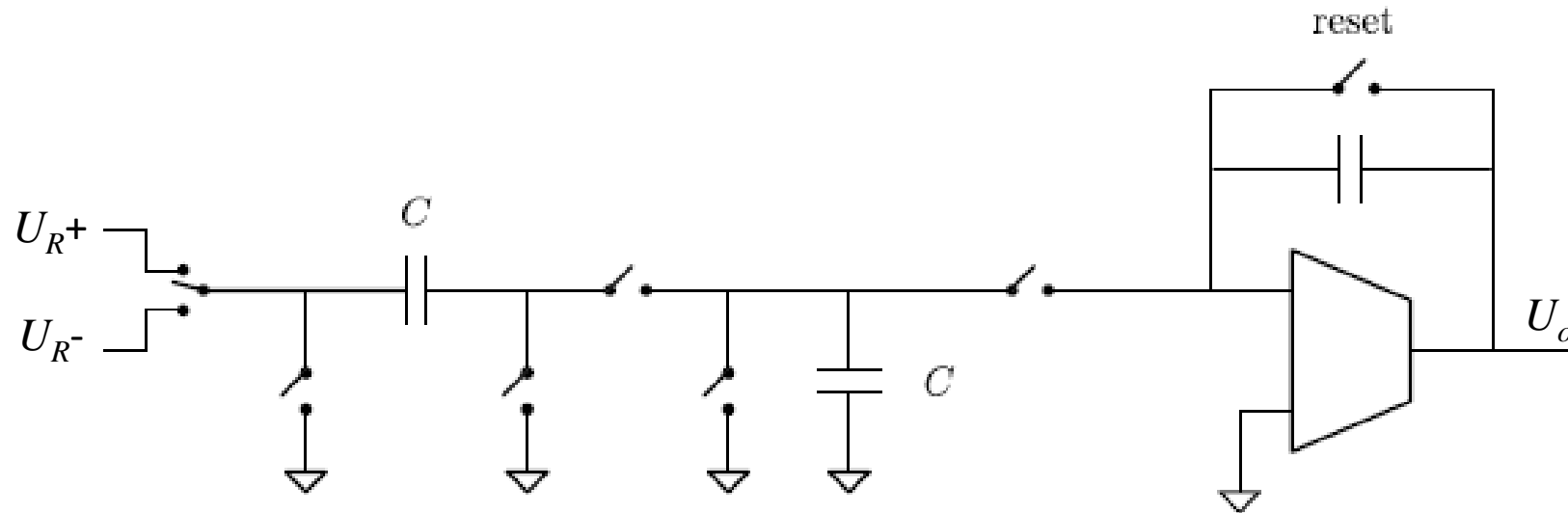
Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

Двукондензаторни ЦАП

Удобен начин за премахване на необходимостта от големи съотношения на капацитета е използването на двукондензаторна схема. Този ЦАП постига висока разделителна способност, използвайки многократно разделяне поравно на заряда между двата кондензатора с еднаква стойност C . Съвпадението в точността между кондензатори с еднаква стойност е много по-лесно, отколкото постигането на точно голямо съотношение.

Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

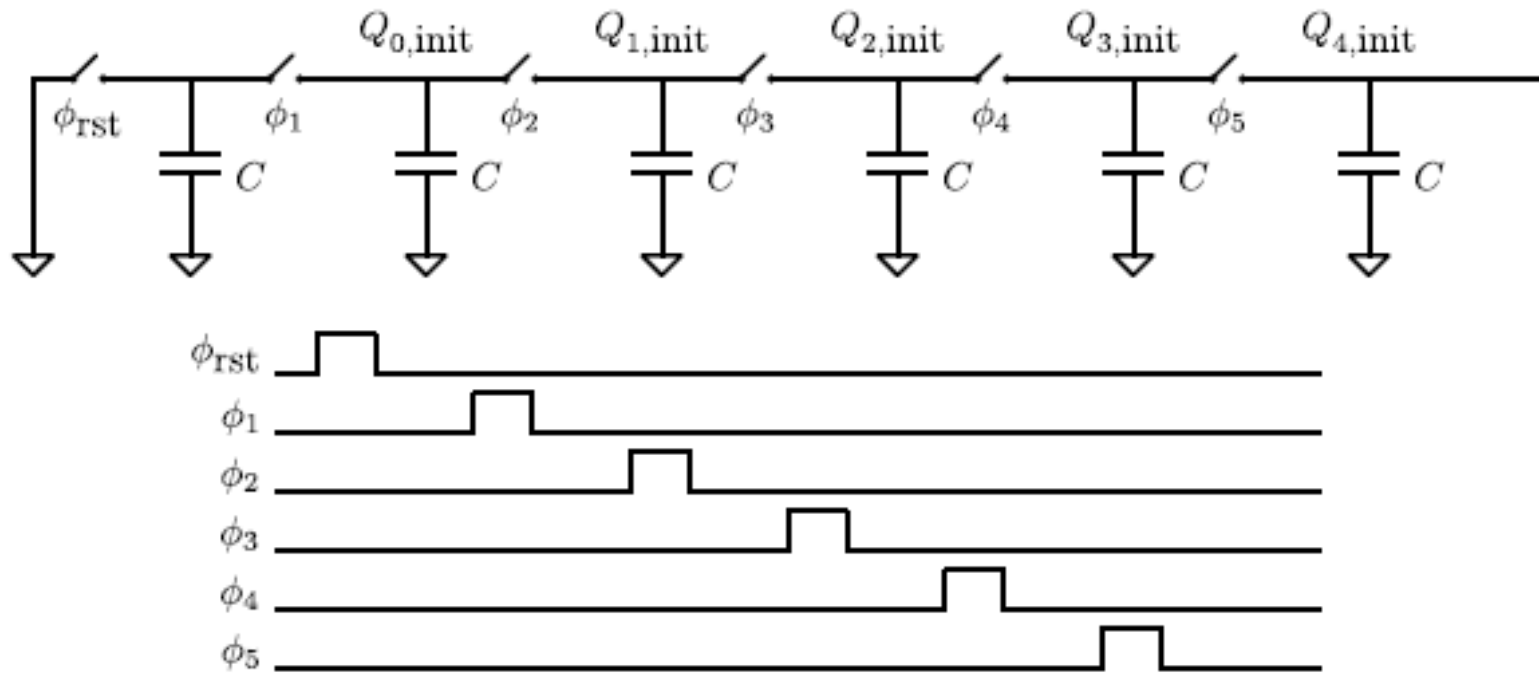
Двукондензаторни ЦАП



Недостатъкът на топологията на двукондензаторните ЦАП е, че са необходими множество тактови цикли, за да се генерира нова стойност на изходното напрежение.

Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

ЦАП с превключваеми кондензатори



Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

ЦАП с превключваеми кондензатори

В примера се разглежда 5-разряден ЦАП с превключваеми кондензатори. За начало нека всички кондензатори имат начален заряд съответно $Q_{0;init}$, $Q_{1;init}$, $Q_{2;init}$ и т.н., както е показано, и всички кондензатори имат еднакъв капацитет C . Ако ключовете са последователно затворени в съответствие с времедиagramата, крайната стойност на Q_4 ще бъде двоично претеглената сума от първоначалните заряди на всеки кондензатор.

$$Q_{4,final} = \frac{Q_{0,init}}{32} + \frac{Q_{1,init}}{16} + \frac{Q_{2,init}}{8} + \frac{Q_{3,init}}{4} + \frac{Q_{4,init}}{2}$$

Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

ЦАП с превключваеми кондензатори

Както може да се види, последователността на превключване естествено създава двоично претеглена сума от първоначалните заряди. Това се получава чрез многократно разделяне на заряда. $Q_{0;init}$ се разделя 5 пъти, докато $Q_{1;init}$ се разделя 4 пъти и т.н. Точността на разделянето, с други думи точността, с която зарядът се разделя по равно между два кондензатора, зависи от съвпадението на стойността им.

Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

ЦАП с превключваеми кондензатори

За да се използва мрежата с превключваеми кондензатор като ЦАП, трябва да се заредят първоначално кондензаторите с помощта на цифрови входни данни. Например нека да се преобразува 5-разрядното число $D = [11001]$ в аналогова стойност. В такъв случай трябва да се заредят кондензаторите, съответстващи на Q_0 , Q_3 и Q_4 до 1V, а кондензаторите, съответстващи на останалите разряди до 0V. Ако отново се затворят и отворят ключовете последователно, крайната стойност на Q_4 ще бъде:

$$Q_{4,\text{final}} = \frac{25}{32}(C \cdot 1V)$$

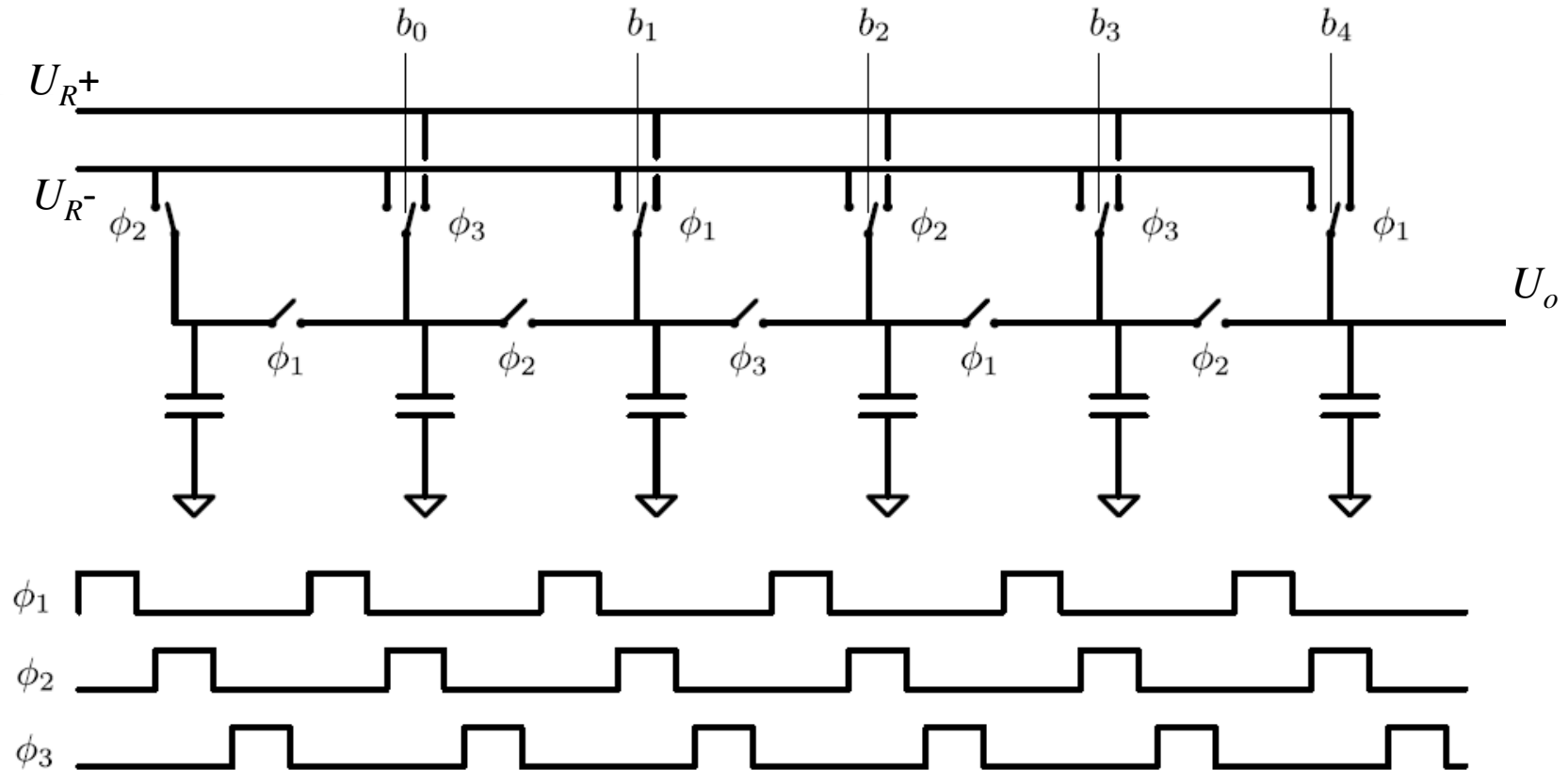
Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

Конвейерни ЦАП с превключваеми кондензатори

Схемата на ЦАП с превключваеми кондензатори не използва кондензаторите толкова често, колкото би било възможно. Например, след като зарядите $Q_{0;init}$ и $Q_{1;init}$ са споделени по време на ϕ_2 , Q_0 не допринася с нищо повече към крайната стойност на изхода. Времето на престой на тези кондензатори може да се намали чрез конвейерна схема. Тази 3-фазна схема всъщност е най-популярният метод за внедряване на ЦАП с превключваеми кондензатори.

Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

Конвейерни ЦАП с превключваеми кондензатори



Цифрово-аналогови преобразуватели - ЦАП

Конвейерни ЦАП с превключваеми кондензатори

Схемата използва ефективно кондензаторите в смисъл, че определено стъпало винаги започва формирането на следващата дискретна стойност в най-ранната възможна фаза, но също така за съжаление това позволява на дискретните стойности да си влияят една на друга. Например, когато разряд b_0 се инициализира по време на ϕ_3 , разрядите b_1 и b_2 са заети с обработката на предишната дискретна стойност. Ако ключът между разрядите b_0 и b_1 няма безкрайно съпротивление в изключено състояние, тогава ще има някакво взаимодействие между двете дискретни стойности, което може да доведе до нелинейно поведение.