

Основни усилвателни схеми с аналогови ключове, аналогови мултиплексори, цифрови потенциометри и ЦАП

Съдържание

• Основни определения

• Усилватели с цифрово управление, реализирани с използване на аналогови ключове и аналогови мултиплексори

- Програмируеми усилватели с аналогови ключове. Принцип на действие и основни динамични параметри
- Аналогови ключове на базата на операционни усилватели
- Програмируеми усилватели с аналогови мултиплексори. Принцип на действие и основни динамични параметри

• Усилватели с цифрово управление, реализирани с използване на цифрови потенциометри и цифрово-аналогови преобразуватели (ЦАП)

- Програмируеми усилватели с цифрови потенциометри. Принцип на действие и основни динамични параметри
- Програмируеми усилватели с паралелно, последователно и каскадно свързване на цифрови потенциометри
- Програмируеми усилватели с ЦАП. Принцип на действие и основни динамични параметри
- Определяне на грешките в програмируемите усилватели с ЦАП

• Задачи за самостоятелна работа

• Литература

1 Основни определения

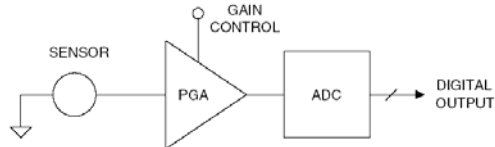
Едно от основните приложения на CMOS аналоговите ключове, мултиплексорите и цифровите потенциометри е при реализацията на усилвателни схеми с програмируем коефициент на усилване (Programmable Gain Amplifiers – PGAs). Това са електронни устройства, в които коефициентът на усилване по напрежение се задава или управлява с помощта на цифров код. Обикновено коефициентът на усилване има няколко фиксирани стойности, като например 1, 10, 100, 1000 и т.н. или 1, 2, 4, 8 и т.н. Програмируемите усилвателни схеми най-често са състоят от прецизни (или високоскоростни) ОУ, точни резисторни делители и управляеми електронни схеми (CMOS аналогови ключове, мултиплексори или цифрови потенциометри), като управляващият цифров код се получава от микроконтролер или друго цифрово устройство. Тъй като програмируемите усилвателни схеми не са идеални в процеса на проектирането им следва да се вземат под внимание следните особености:

- начин на превключване на усилването;
- точност на установяване на коефициента на усилване;
- линейност на предавателната характеристика;
- зависимост на усилването от честотната лента на пропускане;
- грешка от несиметриите на ОУ и другите елементи;
- температурен дрейф на коефициента на усилване и грешката от несиметрия;
- време за установяване на изходното напрежение след превключване на коефициента на усилване.

Всъщност основният проблем при проектирането и реализацията на програмируеми усилватели е получаването на желан коефициент на усилване за определен цифров код. В голяма степен грешката от установяване зависи от съпротивлението $R_{вкл}$ на електронните ключове. Електромеханичните релета имат минимално съпротивление $R_{вкл}$, но те са неподходящи за превключване на усилване, понеже са сравнително бавни, големи и скъпи елементи. CMOS ключовете са неголеми, но за тях съпротивлението във включено състояние зависи от входното напрежение и околната температура. Освен това имат паразитни капацитети, които влияят на променливотоковите параметри на програмируемите усилватели.

В повечето електронни схеми за събиране и обработка на информация с широк динамичен диапазон необходимо е прилагането на методи за нагласяване на нивото на входния сигнал към аналогово-цифровия преобразувател (АЦП). За типичен АЦП обхватът на входното напрежение е 2 или 10V. Тогава точно преобразуване може да се постигне, ако обхватът на входното напрежение се припокрива с обхвата на сигналите, които могат да се обработват от АЦП.

Най-общо различните видове сензори имат широк диапазон на изходните напрежения. От една страна когато се генерира малко напрежение е необходимо голямо усилване. От друга страна при големи напрежения голямото усилване може да доведе до насищане на АЦП. Следователно е необходим усилвател с програмируем коефициент на усилване, който да се включи между сензора и АЦП, както е показано на фигурата по-долу.



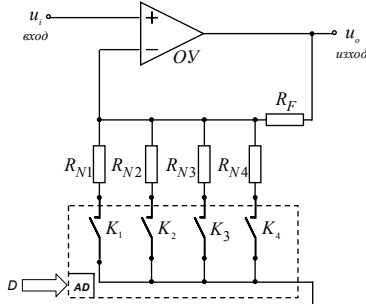
Независимо от начина на управление на коефициента на усилване програмируемите усилватели намират широко приложение в разнообразни електронни схеми. Най-общо програмируеми усилватели се използват за проектиране и реализация на следните видове схеми:

- инструментални усилватели;
- фотодиодни схеми;
- предусилватели в аудиоусилватели;
- сензори с широк диапазон на напреженията;
- електронни схеми за управление на АЦП (някои АЦП имат вграден програмируем усилвател);
- електронни схеми за автоматично регулиране на усилването в други усилвателни схеми.

2 Програмируеми усилватели и атенюатори, реализирани с използване на многоканални аналогови ключове и мултиплексори

– Програмируеми усилватели с аналогови ключове. Принцип на действие и основни динамични параметри

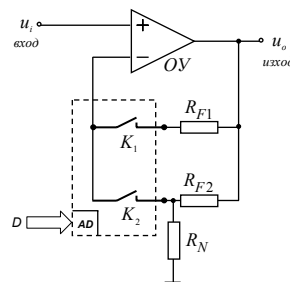
Схема на програмируем усилвател с влияние на съпротивлението $R_{вкл}$.



Особености на схемата:

- Точността на установяване на усилването зависи от съпротивлението $R_{вкл}$ и неговото изменение;
- Типични стойности на $R_{вкл}$ са 100-500Ω за аналогови ключове с полеви и CMOS транзистори;
- Грешката от установяване е приблизително 2,4% при коефициент на усилване 16 и $R_{вкл}=25\Omega$;
- За намаляване на грешката следва да се използват ключове с минимално съпротивление (релета).

Схема на програмируем усилвател с минимизиран ефект на съпротивлението $R_{вкл}$.

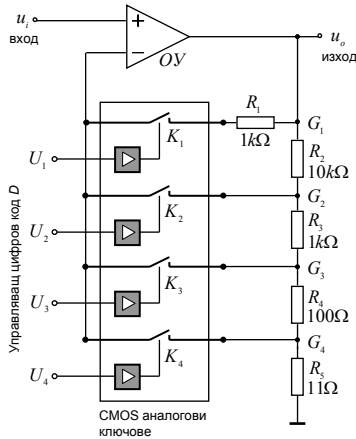


Особености на схемата:

- Съпротивлението $R_{вкл}$ не е паралелно на резисторите задаващи усилването;
- Съпротивлението $R_{вкл}$ обикновено е много по-малко в сравнение с входното съпротивление на ОУ;
- Изходното напрежение на грешката се повишава, ако се използва ОУ с голям входен поляризиращ ток.

Схема на управление неинвертиращ усилвател, реализирана с интегрална схема на 4 – канален аналогов ключ

Практическа схема на усилвател с цифрово управление и компенсация на съпротивлението $R_{вкл}$ е показана на фигурата по-долу. Тя е съставена от един ОУ тип AD797, четворен аналогов ключ ADG412 и пет точни резистори. Кондензаторът 20pF е включен между инвертиращия вход и изхода на ОУ осигурява стабилност на схемата при високи честоти и задържа изходното напрежение, когато коефициентът на усилване променя стойността си. Времето за превключване между две стойности на коефициента на усилване е няколко наносекунди. По време на този времеви интервал ОУ остава без ОБ и при липса на кондензатор между инвертиращия вход на ОУ и изхода напрежението ще започне да нараства. При използване на аналогови ключове с голямо време за превключване трябва капацитетът на кондензатора да се увеличи.



Режими на работа:

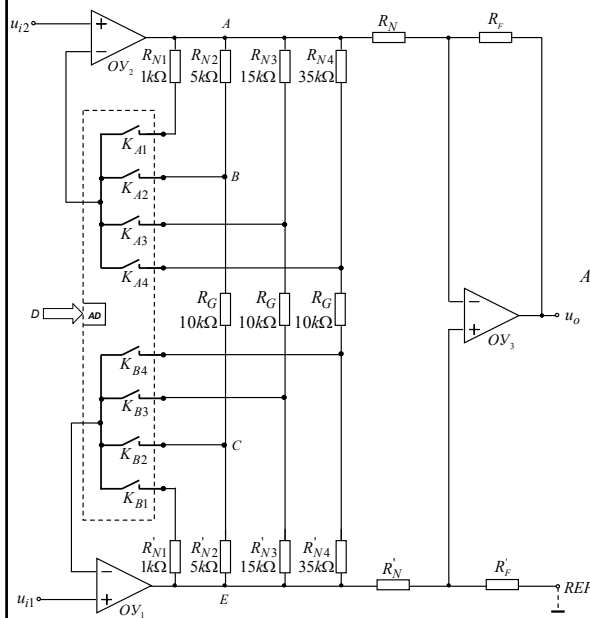
- K_1 затворен ключ: $A_{U1} = 1$;

- K_2 затворен ключ:
 $A_{U2} = 1 + 10k / (1k + 100 + 11) = 10$;

- K_3 затворен ключ:
 $A_{U3} = 1 + (10k + 1k) / (100 + 11) = 100$;

- K_4 затворен ключ:
 $A_{U4} = 1 + (10k + 1k + 100) / 11 = 1000$;

Практическа схема на мащабиращ инструментален усилвател с цифрово управление



Режими на работа:

- за $D=0$, K_{A1} и K_{B1} се затворяят: $A_{U1} = 1$;

- за $D=1$, K_{A2} и K_{B2} се затворяят :

$$i = \frac{u_{BC}}{R_G} \approx \frac{u_{id}}{R_G} \quad u_{AE} \approx i(R_{N2} + R_G + R'_{N2})$$

$$A_U^{(1)} = \frac{u_{AE}}{u_{id}} = \frac{R_{N2} + R_G + R'_{N2}}{R_G} = 1 + \frac{R_{N2} + R'_{N2}}{R_G}$$

$$A_U^{(2)} = u_o / u_{AE} = R_F / R_N \quad \text{за } R_F / R_N = R'_F / R'_N$$

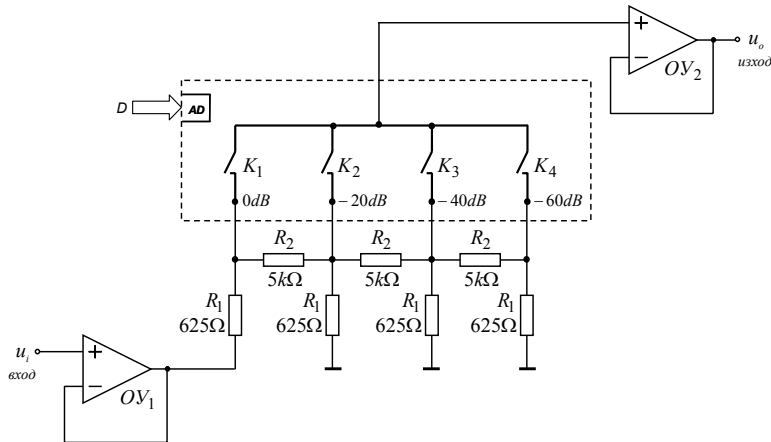
$$A_U = \frac{u_o}{u_{id}} = A_U^{(1)} A_U^{(2)} = \left(1 + \frac{R_{N2} + R'_{N2}}{R_G} \right) \frac{R_F}{R_N}$$

$$A_{U,2} = 2$$

- за $D=2$, K_{A3} и K_{B3} се затворяят :
 $A_{U3} = 4$;

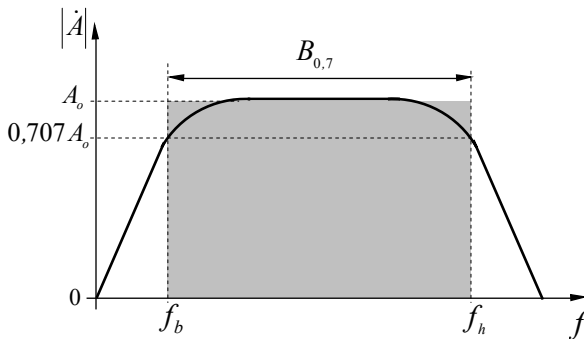
- за $D=3$, K_{A4} и K_{B4} се затворяят :
 $A_{U4} = 8$;

Основни схеми на програмируеми атенюатори (затихватели) с многоканални аналогови ключове и мултиплексори



- за $D=0$, K_1 се затворя: $u_i \approx u_o$ $K_{U,1} = 20 \lg(u_o / u_i) \approx 1$
- за $D=1$, K_2 се затворя: $u_i \approx 0,1u_o$ $K_{U,2} = 20 \lg(u_o / u_i) \approx -20dB$
- за $D=2$, K_3 се затворя: $K_{U,3} \approx -40dB$
- за $D=3$, K_4 се затворя: $K_{U,3} \approx -60dB$

Влияние на управляващия цифров код върху ширината на честотната лента на програмируемите усилватели



$$\dot{A}_{F(-)} = \frac{\dot{A}}{1 + \beta \dot{A}}$$

$$\dot{A} = \frac{A_o}{\left(1 - j \frac{f_b}{f}\right) \left(1 + j \frac{f}{f_h}\right)}$$

Прието е: $\beta = \beta_{RE}$;

$$B_{0,7} = f_h - f_b \approx f_h \text{ за } f_h \gg f_b; \quad \boxed{GBP = A_o B_{0,7} \approx A_o f_h}$$

□ Влияние на отрицателна обратна връзка (ООВ) върху високата гранична честота

$$\dot{A}_{F(-)} = \frac{\dot{A}}{1 + \beta \dot{A}} = \frac{A_o}{1 + \beta A_o} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_h'}} = \frac{A_{F0(-)}}{1 + j \frac{f}{f_h'}}, \text{ където } \boxed{A_{F0(-)} = \frac{A_o}{1 + \beta A_o}} \text{ и}$$

$$\boxed{f_h' = f_h (1 + \beta A_o) = f_h F}$$

□ **Влияние на ООВ върху ниската гранична честота**

За $f \ll f_h$ се получава $\dot{A} \approx \frac{A_o}{1 - j \frac{f_b}{f}}$;

$$\dot{A}_{F(-)} = \frac{\dot{A}}{1 + \beta \dot{A}} = \frac{A_o}{1 + \beta A_o} \cdot \frac{1}{1 - j \frac{f_b}{f(1 + \beta A_o)}} = \frac{A_{F0(-)}}{1 - j \frac{f_b}{f}}$$

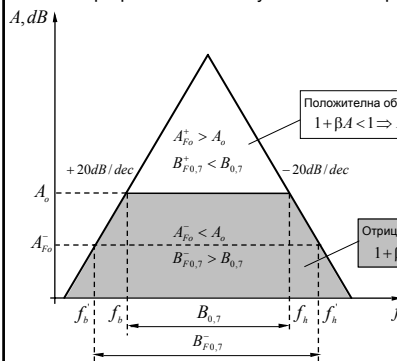
$$f'_b = \frac{f_b}{1 + \beta A_o} = \frac{f_b}{F} \quad \text{— ниска гранична честота с отрицателна обратна връзка}$$

□ **Обобщение**

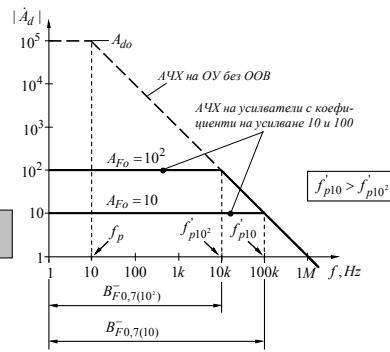
При въвеждане на ООВ, честотната лента на усилвателя се разширява ($f'_h > f_h$, $f'_b < f_b$), а коефициентът на усилване намалява $A_{F0(-)} < A_o$, като произведението честота – усилване (площ на усилването) се запазва, т.е.

$$GBP \approx A_{F0(-)} \cdot f'_h = A_o \cdot f_h = const$$

При въвеждане на отрицателна обратна връзка в усилвателна схема с ОУ коефициентът на усилване по напрежение намалява, а ширината на честотната лента се увеличава. Включването на положителна обратна връзка (ПОВ) увеличава коефициента на усилване, но стеснява допълнително честотната лента. Графика на АЧХ за усилвател с отрицателна и положителна обратна връзка е показана на фиг. 1.



Фиг. 1.



Фиг. 2.

При анализ на програмируем неинвертиращ усилвател с примерен ОУ в честотна област, комплексният коефициент на усилване по напрежение има вида:

$$\dot{A}_{Fi} = \frac{\dot{A}_d}{1 + \beta_i \dot{A}_d} = \frac{A_{Foi}}{1 + j \left(\frac{f}{f_{pi}} \right)}, \quad \text{където } A_{Foi} = \frac{A_{do}}{1 + \beta_i A_{do}} \approx \frac{1}{\beta_i} = 1 + \frac{R_{Fi}}{R_{Li}}, \quad f_{pi} = f_p (1 + \beta_i A_{do}) \quad \text{и } i = 1, 2, 3, \dots$$

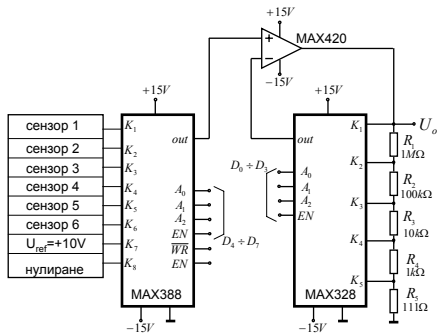
Фазово-честотната характеристика на схемата също се изменя и може да се представи по следния начин:

$$\varphi_i = -\arctan \left(\frac{f}{f_{pi}} \right). \quad \text{При } f = f_{pi}, |\dot{A}_{Fi}| = \frac{A_{Foi}}{\sqrt{2}} \approx 0,7 A_{Foi} \quad \text{и } \varphi = 45^\circ.$$

– Програмируеми усилватели с аналогови мултиплексори. Принцип на действие и основни динамични параметри

Практическа схема на управляем усилвател с два аналогови мултиплексори е показана на фигурата по-долу. В нея ОУ MAX420 е обхванат от последователна ООВ по напрежение, съставена от резисторния делител R_1 - R_5 и аналоговия мултиплексор MAX328. С помощта на адресните входове A_0 , A_1 и A_2 на аналоговия мултиплексор се задава коефициента на усилване по следния начин:

- $A_0=0$, $A_1=0$ и $A_2=0$, изходът е свързан с K1 – $A_U = 1$
- $A_0=1$, $A_1=0$ и $A_2=0$, изходът е свързан с K2 – $A_U = 1 + \frac{R_1}{R_2 + R_3 + R_4 + R_5} = 10$
- $A_0=0$, $A_1=1$ и $A_2=0$, изходът е свързан с K3 – $A_U = 1 + \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4 + R_5} = 100$
- $A_0=1$, $A_1=1$ и $A_2=0$, изходът е свързан с K4 – $A_U = 1 + \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_4 + R_5} = 1000$
- $A_0=0$, $A_1=0$ и $A_2=1$, изходът е свързан с K5 – $A_U = 1 + \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}{R_5} = 10000$



Входните сигнали се подават от няколко източника на напрежение, като изборът на канал се осъществява с помощта на втори мултиплексор MAX388. За мултиплексирани на сигнали се използват адресните входове A_0 , A_1 и A_2 .

Тогава адресите за двата мултиплексора могат да се формират общо от 8 адресни шини на микроконтролер. Като е показано в таблицата младшите четири бита задават коефициента на усилване, а старшите четири бита определят от кой източник да се подаде сигнал към входа на усилвателя.

Измервателен Канал	Усилване
EN A_2 A_1 A_0	EN A_2 A_1 A_0
D_7 D_6 D_5 D_4	D_3 D_2 D_1 D_0
1 1 0 1	1 0 1 1
5	3

3 Програмируеми усилватели и атенюатори, реализирани с използване на цифрови потенциометри

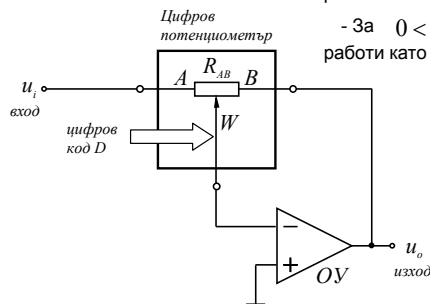
– Програмируеми усилватели с цифрови потенциометри. Принцип на действие и основни динамични параметри

Примерна схема на неинвертиращ усилвател/атенюатор с програмируем коефициент на усилване по напрежение е дадена на фигурата по-долу. В нея ОУ е обхванат от паралелна ООВ по напрежение, посредством цифров потенциометър R_{AB} като плъзгачът му W е свързан към инвертиращия вход на ОУ. Входното напрежение u_i се подава спрямо маса на извод А на потенциометъра, а извод В е свързан с изхода на ОУ. При условие, че ОУ се приеме за идеален ($A_0 \approx \infty$) коефициентът на усилване по напрежение е:

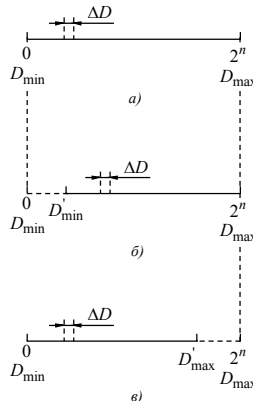
$$A_U(D) = \frac{u_o}{u_i} = - \frac{R_{WB}(D)}{R_{WA}(D)} = - \frac{D}{2^n - D}$$

- За $2^{n-1} \leq D < 2^n$ схемата работи като усилвател;

- За $0 < D \leq 2^{n-1}$ схемата работи като затихвател;



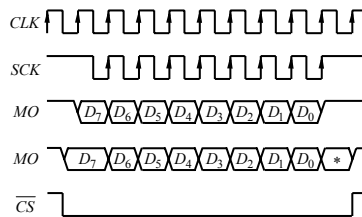
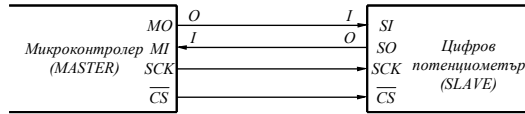
Обхвати на изменение на цифровия код: а) – без мащабиране; б) – скъсяване отляво; в) – скъсяване отясно.



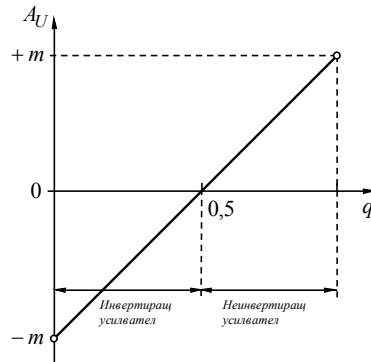
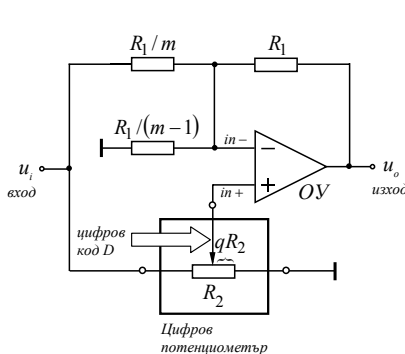
– Програмиране на цифрови потенциометри. Организация на синхронен серийен интерфейс – SPI

Програмирането на монолитните цифрови потенциометри се осъществява през стандартни серийни интерфейси от микроконтролер. Голяма част от цифровите потенциометри притежават вграден SPI (Serial Peripheral Interface) порт. Той включва в състава си четири линии за обмен на информация. В него задължително влиза обща за предавателя и приемника тактова честота, което значително облекчава синхронизирането на информацията.

При обмен на данни задължително микроконтролерът има статут на главен (*Master*), а цифровият потенциометър – на подчинен (*Slave*). Микроконтролерът изпраща последователните данни от серийния си изход *MO* (Master Output) към последователния вход на „подчинения“ потенциометър *SI* (Slave Input), а получава данни от последователния изход на подчинения *SO* (Slave Output) на последователния си вход *MI* (Master Input). Общият тактов сигнал *SCK* се генерира от микроконтролера и се възприема от потенциометъра.



– Биполярен програмируем едностъпален усилвател с цифров потенциометър



- За крайно дясно положение на W $q = (D/2^n) = 0$ ($D=0$) $A_U = -m$

- За крайно ляво положение на W $q = 1$ ($D=2^n$) $A_U = \frac{u_o}{u_i} \approx 1 + \frac{R_1}{R_1/(m-1)} = +m$

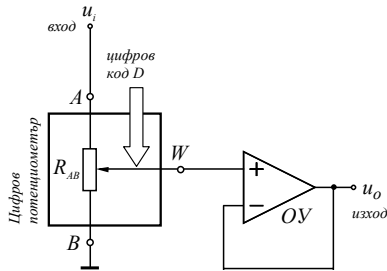
- За междинно положение на W

$$\frac{u_i - u_{in-}}{R_1/m} = \frac{u_{in-}}{R_1/(m-1)} + \frac{u_{in-} - u_o}{R_1} \rightarrow u_{in-} = \frac{nu_i + u_o}{2n} \quad \Rightarrow \quad A_U = \frac{u_o}{u_i} = m(2q - 1)$$

$$\frac{u_i - u_{in+}}{(1-q)R_2} = \frac{u_{in+}}{qR_2} \rightarrow u_{in+} = qu_i$$

– Програмируеми атенюатори (затихватели) с цифрови потенциометри

Основна схема на програмируем атенюатор (затихвател) с цифров потенциометър.

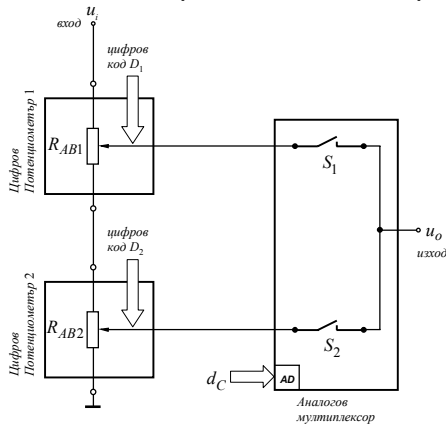


Предавателна функция:

$$u_o = \frac{R_{WB}}{R_{WB} + R_{WA}} u_i = \frac{D}{2^n} u_i$$

При изменение на цифровия код D от 0 до 2^n изходното напрежение се изменя от 0 до u_i .

Електронна схема на атенюатор с два цифрови потенциометъра $R_{AB1} = R_{AB2}$



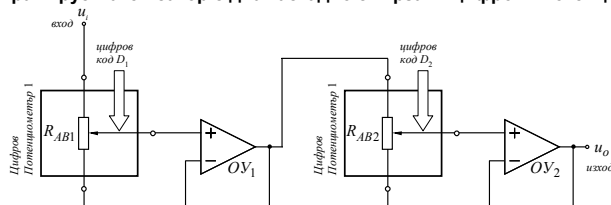
Предавателна функция:

$$u_o = \frac{D}{2^{n+1}} u_i$$

– За $d_c=1$ долният ключ S_2 е затворен, а горният ключ S_1 е отворен $0 \leq u_o \leq u_i / 2$

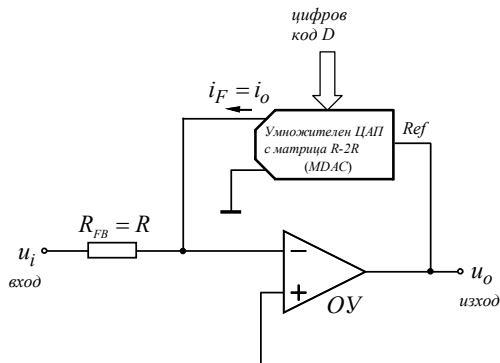
– За $d_c=0$ долният ключ S_2 е отворен, а горният ключ S_1 е затворен $u_i / 2 < u_o \leq u_i$

Програмируем атенюатор с два каскадно свързани цифрови потенциометъра



4 Програмируеми усилватели и атенюатори (затихватели) с умножителни ЦАП

Често при реализацията на усилвателни схеми с цифрово управление се използват умножителни цифрово-аналогови преобразуватели (ЦАП), включени във веригата на ООВ на ОУ. При това за реализацията на такъв тип управляем усилвател трябва да се използва двуквадрanten ЦАП, който да работи както с положителни така и с отрицателни опорни напрежения. Обикновено се избира умножителен ЦАП с R-2R матрица.



$$A_{UJ} = \frac{u_o}{u_i} \approx -\frac{2^n}{D}$$

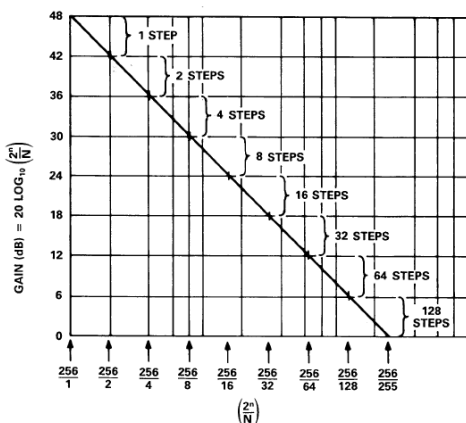
От формулата за предавателната функция се вижда, че коефициентът на усилване по напрежение може да се променя от 1 (всички битове единица) до 1024 (за 10-битов ЦАП). Ако на всички цифрови входове се подаде "логическа нула", ОУ остава без ОВ и в резултат на това може да се насити по напрежение.

Така например за 8 битов ЦАП коефициентът на усилване се изменя от 256 (при цифров код 00000001) до единица (всъщност 256/255, на всички адресни входове има логическа единица). Динамичният диапазон в общ вид на програмируемия усилвател в децибели има вида:

$$D = 20 \log_{10}(2^n - 1)$$

За 8 битов ЦАП динамичният диапазон е 48 dB. При увеличаване на разрешаващата способност на ЦАП с един бит динамичният диапазон се увеличава с 6dB. Тогава за 12 битов ЦАП динамичният диапазон е 72 dB.

На фиг. 1 е дадено графично представяне на формулата за коефициента на усилване в dB за 8 битов ЦАП. От нея се вижда, че при изменение на цифровия код от 255 до 128 коефициентът на усилване по напрежение се изменя от 0 до +6dB (или от 1 до 2), при изменение от 128 до 64 коефициентът на усилване се изменя от +6dB до +12dB (или от 2 до 4) и т.н.



Фиг. 1. Зависимост на коефициента на усилване от цифровия код за 8 битов ЦАП

- Определяне на грешките в програмируемите усилватели с ЦАП

• Грешка от нелинейност и грешка от установяване

По-горе направените анализи са валидни при условие, че ОУ и ЦАП се приемат за идеални елементи.

Така например, ако се вземе под внимание грешката от нелинейност 0,2% F.S. или $\pm 1/2\text{LSB}$, тогава за коефициент на усилване 16 ефективният цифров код ще варира от 15,5 до 16,5. В резултат на това коефициентът на усилване ще варира от 256/15,5 (или 16,51) до 256/16,5 (или 15,51), като грешката от установяване ще бъде 3%. При по-големи коефициенти на усилване грешката ще се увеличава.

При отчитане на грешката от дискретизация и грешката от влиянието на толерансите на резисторите за коефициента на усилване по напрежение се получава

$$A_U = \frac{U_{out}}{U_{in}} = - \frac{2^{12}}{(N + X)(1 + \Delta_R)}, \text{ където}$$

X е грешката от линейност на ЦАП определена чрез LSB;

$$1 + \Delta_R = \frac{R_F}{R} \text{ е грешката от установяване, породена чрез толеранса на резисторите, където относителното изменение е } \Delta_R = \frac{R_F - R}{R},$$

• Грешка от зависимостта на изходното съпротивление на ЦАП от цифровия код и утечния ток

Утечния ток в ЦАП се получава като сума от утечните токове на отворените ключове в структурата на схемата. Изходното съпротивление се определя от съпротивлението на резисторите в R-2R матрицата и съпротивлението на отворените и затворените ключове.

• Грешка от неидеалните параметри на ОУ

Грешките породени от ОУ се дължат на входното напрежение на несиметрия, входният поляризиращ ток и крайната стойност на коефициента на усилване по напрежение без ОБ. Освен това влияние оказва и температурния дрейф на входното напрежение на несиметрия, входният поляризиращ ток.

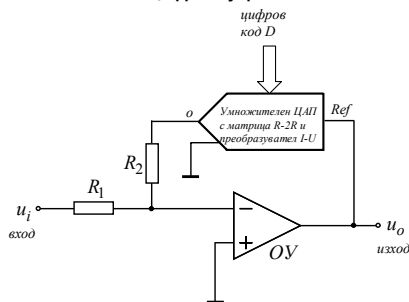
Изходното напрежение на грешката, определена от утечния ток на ЦАП, входното напрежение на несиметрия и входният поляризиращ ток се определя по следната формула:

$$U_{err} = \pm U_{io} \cdot A_U \pm I_{LKG} R_{EQ} \pm I_B^- R_{EQ} = \pm U_{io} \cdot A_U + (I_{LKG} + I_B^-) R_{EQ}, \text{ където } R_{EQ} = \frac{2^n}{N} R$$

- Програмируеми усилватели с ЦАП, притежаващи напрежителен изход. Принцип на действие и основни динамични параметри

Освен чрез използване на цифрово-аналогов преобразувател с R-2R матрица за реализацията на програмируеми усилватели се използват и ЦАП с напрежителен изход. Примерни схеми на такъв тип усилватели са показани на **Фиг. 1** и **Фиг. 2**. В тях ЦАП с напрежителен изход е включен във веригата на ООБ на ОУ за превключване на коефициента на усилване по напрежение. В схемата от **Фиг. 1** входният сигнал през резистор R1 се подава към инвертиращия вход на ОУ, а схемата от **Фиг. 2** входният сигнал се подава директно към неинвертиращия вход на ОУ.

Схема на инвертиращ усилвател с цифрово управление

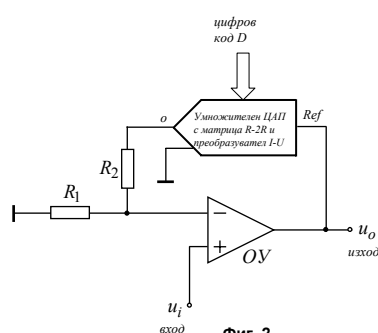


Фиг. 1.

$$A_U = \frac{U_o}{U_i} = - \frac{R_2}{R_1} \frac{2^n}{N}, \text{ където}$$

$$N = a_0 + 2a_1 + 2^2 a_2 + \dots + a_{n-1} 2^{n-1} + a_n 2^n$$

Схема на неинвертиращ усилвател с цифрово управление



Фиг. 2.

$$A_U = \frac{U_o}{U_i} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \frac{2^n}{N}, \text{ където}$$

$$N = a_0 + 2a_1 + 2^2 a_2 + \dots + a_{n-1} 2^{n-1} + a_n 2^n$$

За нормалната работа на схемите не се допуска $N = 0$, тъй като операционните усилватели се насищат по напрежение.

5 Задачи за самостоятелна работа

4.1. За схемата на програмируем неинвертиращ усилвател, показана на фиг. 4.1, ОУ с параметри: $A_d = 10^5$, $R_{id} = 10M\Omega$, $R_{icm} = 5000M\Omega$, $R_o = 1k\Omega$ и $SR = 1V/\mu s$. Да се определят:

- за положение 1 и 2 на електронния ключ K коефициентите на усилване по напрежение $A_{Uj} = u_o / u_i$ при условие, че ОУ е идеален;
- входното и изходното съпротивление на схемата за положение 1 и 2 на ключа K ;
- ширината на честотна лента при максимално изходно напрежение 10V.

Отговори: а) $A_{Uj} = 1$ (повторител на напрежение) за положение 1 на ключа K и $A_{Uj} = 10$ за положение 2; б) $R_{id} \approx 5000M\Omega$ и $R_{o.d} \approx 0,001\Omega$ за положение 1 и $R_{id} \approx 5000M\Omega$ и $R_{o.d} \approx 0,01\Omega$ за положение 2; в) $f_{max} \approx 16kHz$.

4.2. За схемата на програмируем инвертиращ усилвател, показана на фиг. 4.2, ОУ с параметри: $A_d = 10^5$, $R_{id} = 10M\Omega$, $R_{icm} = 5000M\Omega$, $R_o = 100\Omega$ и $SR = 1V/\mu s$. Да се определят:

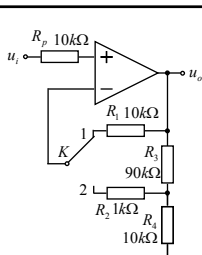
- коефициентите на усилване по напрежение $A_{Uj} = u_o / u_i$ за положение 1 и 2 на електронния ключ K и при условие, че ОУ е идеален;
- входното и изходното съпротивление на схемата за положение 1 и 2 на ключа K ;
- ширината на честотна лента при максимално изходно напрежение 10V.

Отговори: а) $A_{Uj} = -1$ (инвертор) за положение 1 на ключа K и $A_{Uj} = -10$ за положение 2; б) $R_{id} = 10k\Omega$ и $R_{o.d} \approx 0,002\Omega$ за положение 1 и $R_{id} = 10k\Omega$ и $R_{o.d} \approx 0,02\Omega$ за положение 2; в) $f_{max} \approx 16kHz$.

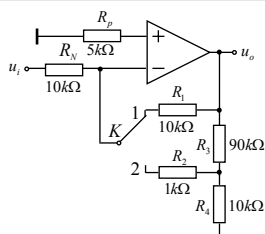
4.3. На фиг. 4.3 е дадена схема на ДУ с ОУ. Към неинвертиращия вход на ОУ е включен цифров потенциометър R_3 . Положението на средната точка на R_3 се определя от стойността на параметъра x , чиято големина зависи от цифровия код D . За схемата са известни: $R_1 = R/n$ и $R_2 = R/(n-1)$.

- Да се изведе в общ вид предавателната функция $u_o = f(u_1, u_2)$;
- Да се начертае зависимостта $A_{Uj} = f(x)$ ($A_{Uj} = u_o / u_i$, където $u_i = u_1 = u_2$ - двата входа свързани накъсо) за $R = 100k\Omega$, $n = 100$ и $0 \leq x \leq 1$.

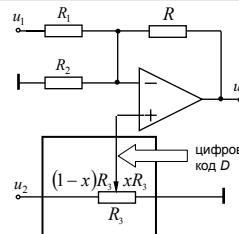
Отговори: а) $u_o = n(2xu_2 - u_1)$; б) $-100 \leq A_{Uj} \leq 100$ за $0 \leq x \leq 1$.



Фиг. 4.1.

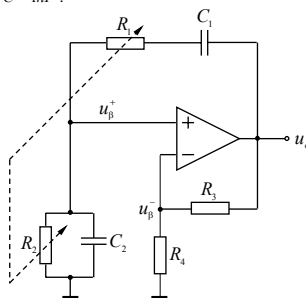


Фиг. 4.2.



Фиг. 4.3.

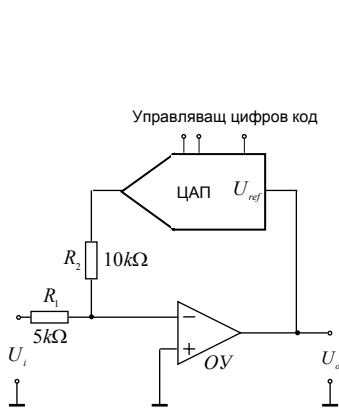
4.4. В схемата на RC генератор с мост на Вин-Робинзон, показана на фиг. 4.4, двояният механичен потенциометър $R_1 - R_2$ е заменен със двоян 256-стъпков цифров потенциометър AD5232 с $R_{AB} = 100k\Omega$. При включването на цифровия потенциометър точките W_1 (W_2) и B_1 (B_2) са свързани накъсо. Да се определи честотата на генерираните трептения f_o за цифров код $D = 0, 128$ и 196 , ако $C_1 = C_2 = C = 1nF$.



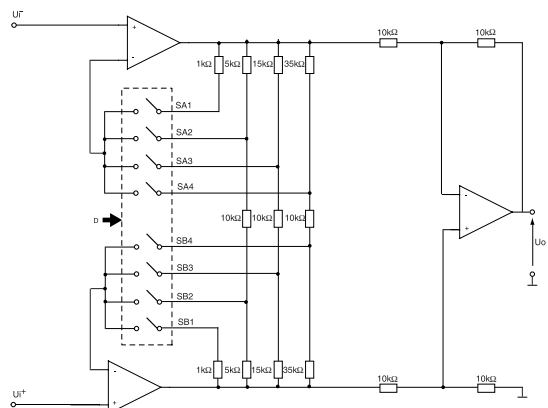
Фиг. 4.4.

4.5. Анализирайте схемата от фиг. 4.5 и определете предавателната функция по напрежение. Сравнете получения аналитичен израз с този за схемата с умножителен ЦАП с матрица R-2R.

4.6. На фиг. 4.6 е дадена схема на инструментален усилвател, реализиран с четворен ОУ LMC6484 и двоен четириканален мултиплексор тип 4052. При подаване на цифров код едновременно се затварят по един ключ от секция А и секция В. Например при $D=(0,0)$ се затварят SA1 и SB1, при $D=(0,1)$ - SA2 и SB2 и т.н. Анализирайте схемата и определете коефициентите на усилване по напрежение за всички комбинации на цифровия код.



Фиг. 4.5.



Фиг. 4.6.

Литература

1. Златаров, В., Л. Донева, Д. Стаменов, И. Немигенчев. Електронни аналогови схеми и устройства (8.3. Управляеми усилватели, стр. 257-260). С., Техника, 1994.
2. Пандиев, И., Л. Донева, Д. Стаменов. Аналогова схемотехника II (5.2. Основни усилвателни схеми с програмируем коефициент на усилване, стр. 107-109). С., ТУ - София, 2008.
3. Куцаров, С. Някои аналогови схеми с цифрово управление (дисертация) (3. Усилватели), С., ТУ - София, 1995.
4. Li, A. Versatile programmable amplifiers using digital potentiometers with nonvolatile memory. AN-579, Analog Devices, USA, 2003.
5. Wynne, J. CMOS DACs and op amps combine to build programmable gain amplifiers. Part I. AN-320A, Analog Devices, USA, 1999.
6. Wynne, J. CMOS DACs and op amps combine to build programmable gain amplifiers. Part I. AN-320B, Analog Devices, USA, 1999.
7. Li, A. Resolution enhancements of digital potentiometers with multiple devices. AN-582, Analog Devices, USA, 2001.
8. Jung, W. Op amps applications, Analog Devices, USA, 2004.
9. Seifart, M. Analoge Schaltungen. 6 Auflage. Verlag Technik Berlin, 2003.