

Измервания в електрониката

Модул 4: Основни градивни блокове на измервателните уреди

4. Основни градивни блокове на измервателните уреди

4.1. Усилвателни схеми

4.1.1. Основни схеми

4.1.2. Диференциални

4.1.3. Инструментални усилватели

4.1.4. Усилватели с носеща честота

4.1.5. Изолиращи усилватели

Примери

4.2. АЦП

4.2.1. Статични параметри

4.2.2. Динамични параметри

4.1. Усилвателни схеми

4.1.1. Основни схеми

4.1.2. Диференциални

4.1.3. Инструментални усилватели

4.1.4. Усилватели с носеща честота

4.1.5. Изолиращи усилватели

Примери

4.1. Усилвателни схеми

- **ОСНОВНИ УСИЛВАТЕЛНИ СХЕМИ С ОУ**
- При разглеждането на усилвателните схеми като четириполюсници с отрицателна обратна са възможни общо 4 двойки комбинации за входа и изхода на усилвателите.
- Въз основа на това разглеждане могат да се разграничат 4 вида усилватели:
 - усилватели напрежение/напрежение: V/V -усилватели;
 - усилватели напрежение/ток: V/I -усилватели;
 - усилватели ток/ток: I/I -усилватели;
 - усилватели ток/напрежение: I/V -усилватели [1].

4.1. Усилвателни схеми

Съпротив- ление	Вид обратна връзка			
	V/V	V/I	I/V	I/I
R_{IN}	Високо, $R_{IN} \gg R'_{IN}$		Ниско $R_{IN} \ll R'_{IN}$	
R_{OUT}	Ниско $R_{OUT} \ll R'_{OUT}$	Високо $R_{OUT} \gg R'_{OUT}$	Ниско $R_{OUT} \ll R'_{OUT}$	Високо $R_{OUT} \gg R'_{OUT}$

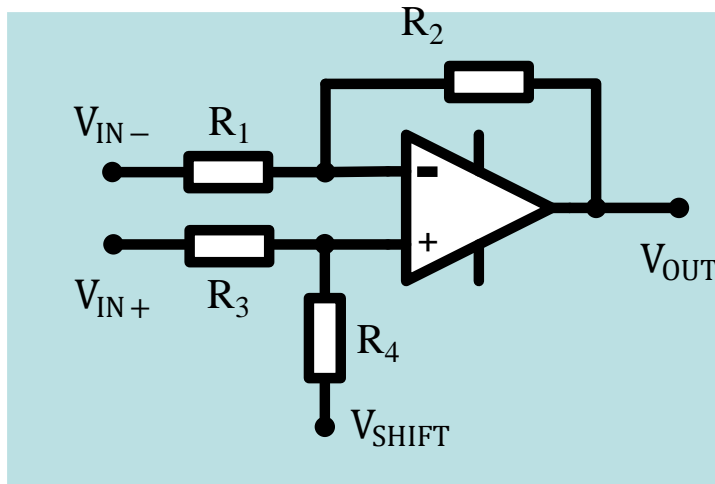
- R_{IN}, R_{OUT} : входно, респ. изходно съпротивление на усилвателната схема с ООВ;
- R'_{IN}, R'_{OUT} : входно, респ. изходно съпротивление на ОУ с отворена верига на ООВ.

4.1. Усилвателни схеми

- **СХЕМИ С ДИФЕРЕНЦИАЛНИ УСИЛВАТЕЛИ**
- При измерването и нормирането на несиметрични сигнали успешно се използват четирите основни вида измервателни усилватели.
- При диференциални сигнали използването на тези усилватели е проблематично. В такива случаи се използват диференциални или инструментални усилватели.
- Диференциалните усилватели комбинират инвертираща усилвателна схема с неинвертираща, при което се генерира разликата на два сигнала.

4.1. Усилвателни схеми

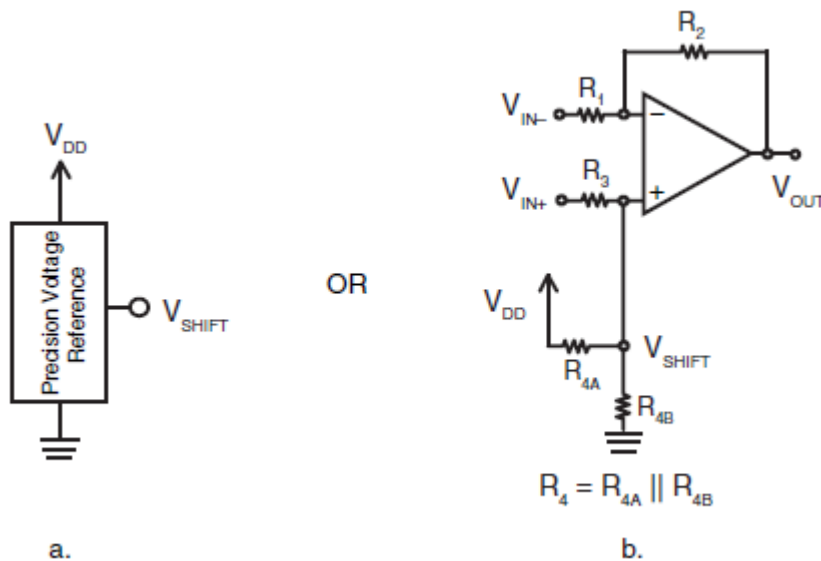
- При **идеален ОУ, с честотно независимо усилване**, изХОДНОТО напрежение е:
- $$V_{OUT} = V_{IN+} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3+R_4} - V_{IN-} \left(\frac{R_2}{R_1}\right) + V_{SHIFT} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_3+R_4}$$
- За $\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1}$ се получава $V_{OUT} = (V_{IN+} - V_{IN-}) \left(\frac{R_2}{R_1}\right) + V_{SHIFT}$



Фиг. 2.3 Схема на диференциален усилвател.

4.1. Усилвателни схеми

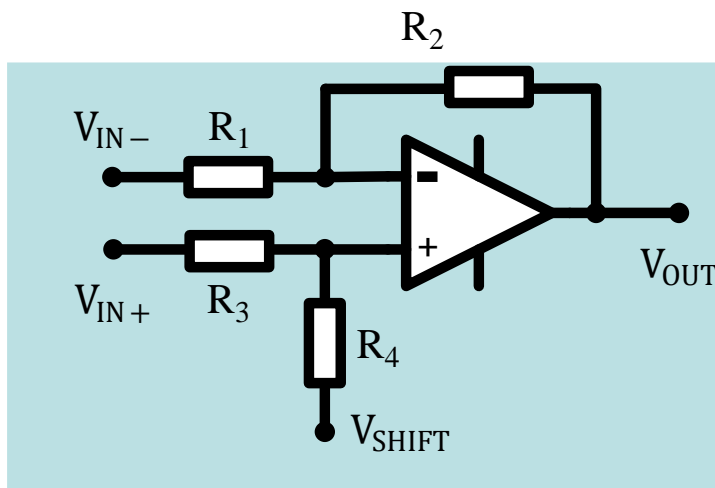
- При еднополярно захранване V_{SHIFT} се използва за „отместване“ на изхода в линейната област
- Решения за V_{SHIFT} :



..

4.1. Усилвателни схеми

- При диференциалните усилватели целта е да се постигне $G_C = 0$, което се получава за
- $\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1} = k$ и тогава
- $V_{OUT} = (V_{IN+} - V_{IN-})k + V_{SHIFT}$



Фиг. 2.3 Схема на диференциален усилвател.

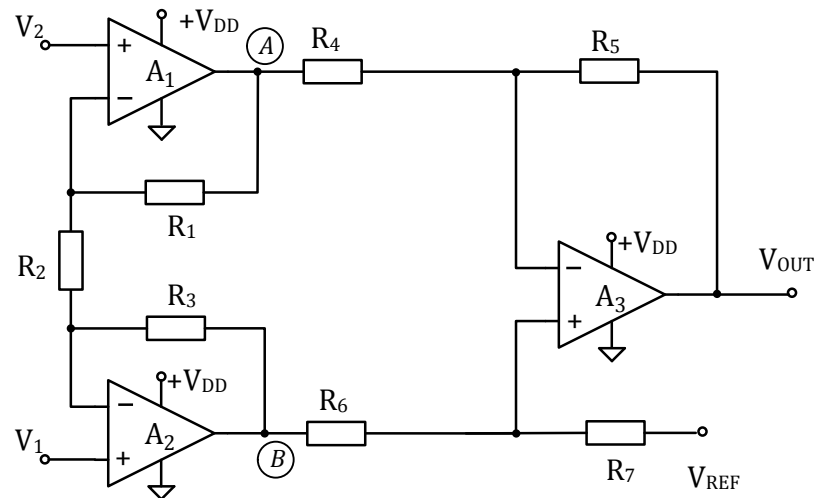
4.1. Усилвателни схеми

- **ИНСТРУМЕНТАЛЕН УСИЛВАТЕЛ**
- Инструменталният усилвател е електронна схема със следните основни характеристики:
 - висок входен импеданс;
 - висок коефициент на потискане на синфазните сигнали;
 - коефициент на усилване, който може да се регулира в широки граници само с един резистор или цифрово, като при повишаване на усилването не се губи честотна лента (както е при ОУ);
 - ниски стойности за входните поляризиращи токове и входното напрежение на несиметрия и за техния дрейф.
 - При реализацията се различават две основни архитектури – с два и с три ОУ.

4.1. Усилвателни схеми

- Чрез елиминиране на V_A , V_B и V_C се получава:
- $$V_{OUT} = -V_{IN2} \left(\frac{R_3}{R_2} \frac{R_7}{R_7+R_6} \frac{R_4+R_5}{R_4} + \frac{R_1+R_2}{R_2} \frac{R_5}{R_4} \right) + V_{IN1} \left(\frac{R_7}{R_2} \frac{R_2+R_3}{R_7+R_6} \frac{R_4+R_5}{R_4} + \frac{R_1}{R_2} \frac{R_5}{R_4} \right)$$
- При тези разглеждания сигналите също могат да се разделят на диференциални и синфазни:

- $$V_{OUT} = -V_D \left[\frac{1+\frac{R_5}{R_4}}{1+\frac{R_6}{R_7}} \left(\frac{R_3}{R_2} + \frac{1}{2} \right) + \frac{R_5}{R_4} \left(\frac{1}{2} + \frac{R_1}{R_2} \right) \right] + V_C \left[\frac{1-\frac{R_6 R_5}{R_7 R_4}}{1+\frac{R_6}{R_7}} \right]$$



4.1. Усилвателни схеми

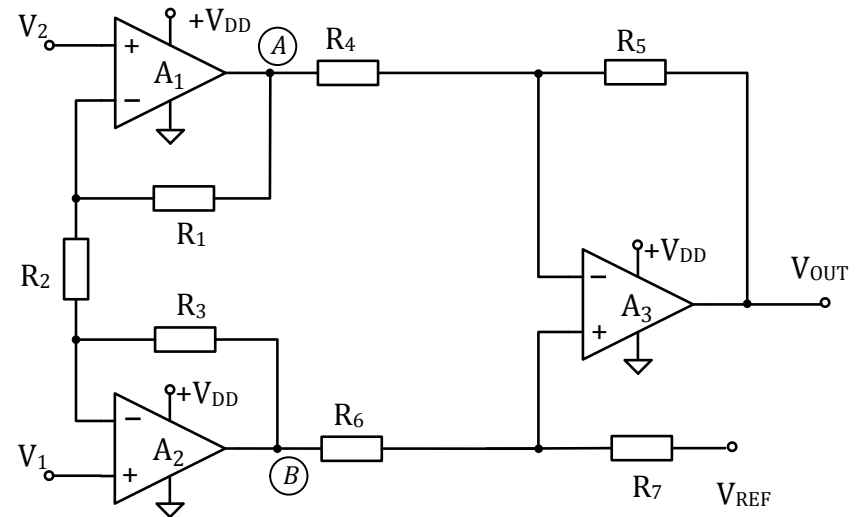
- **ИНСТРУМЕНТАЛЕН УСИЛВАТЕЛ**

- Оттук следва, че максимално потискане се получава за:

- $\frac{R_5}{R_4} = \frac{R_7}{R_6} = k$

- След полагане $\frac{2R_1}{R_2} = \frac{2R_3}{R_2} = G$ се получава:

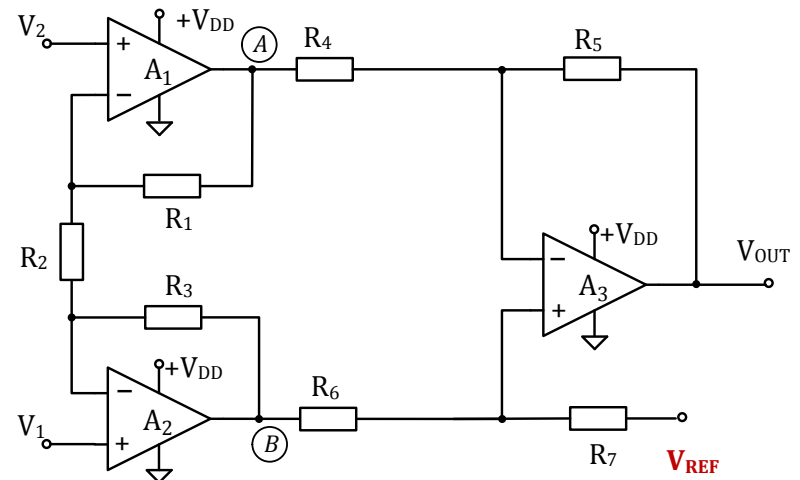
- $G_D = k(1 + G)$



4.1. Усилвателни схеми

- **ИНСТРУМЕНТАЛЕН УСИЛВАТЕЛ**

- Чрез напрежението V_{REF} , изходното напрежение на инструменталния усилвател може да се отмества в широки граници.
- При схеми с еднополярно захранване, типично за V_{REF} се избират стойности, равни на половината на захранващото напрежение. Тогава общата предавателна функция е:
- $V_{OUT} = (V_2 - V_1)k(1 + G) + kV_{REF}$



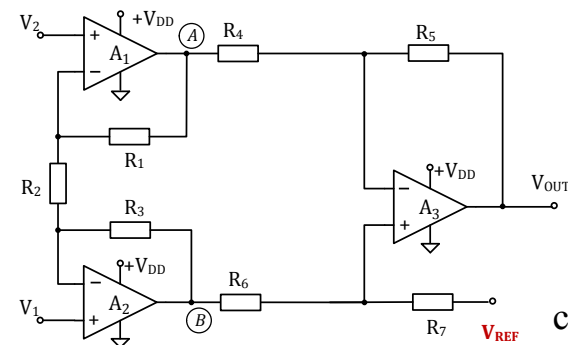
4.1. Усилвателни схеми

- **ИНСТРУМЕНТАЛЕН УСИЛВАТЕЛ**

- Както и при разглежданията за диференциалния усилвател, за оценка на общото влияние на всички фактори се получава следният обобщен израз:

- $$\frac{1}{CMRR_{\Sigma}} = \frac{1}{CMRR_i} + \frac{1}{G+1} \left(\frac{1}{CMRR_{A3}} + \frac{1}{CMRR_R} \right)$$

- Тук $CMRR_i$ може да има стойности, клонящи към безкрайност, за съгласувани ОУ A_1 и A_2 с еднакви синфазни и диференциални коефициенти на усилване. Затова при дискретни реализации, за входното стъпало е разумно да се използват схеми с два ОУ в един корпус [2] [Areny01, p. 180]



4.1. Усилвателни схеми

- **ИНСТРУМЕНТАЛЕН УСИЛВАТЕЛ**

- Влиянието на разбалансирането на стойностите на резисторите се представя с изрази:

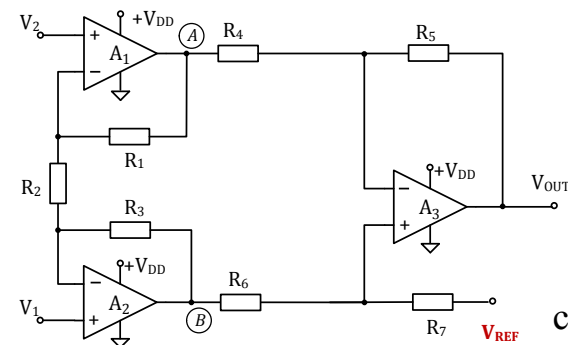
- $$CMRR_R = \frac{1}{2} \frac{R_4 R_7 + R_5 R_6 + 2R_5 R_7}{R_4 R_7 - R_5 R_6}$$

- Влиянието на толеранса на резисторите може да се установи чрез анализ на (2.26). Ако за всички резистори се приеме толеранс $\pm \delta$, то най-неблагоприятната ситуация ще е налице за максимална стойност на знаменателя или $R_4 = R(1 + \delta)$, $R_7 = kR(1 + \delta)$, $R_5 = kR(1 - \delta)$, $R_6 = R(1 - \delta)$.

- Оттук се стига до:

- $$CMRR_R = \frac{1}{2} \frac{2+2\delta+2k(1-\delta^2)}{4\delta}$$

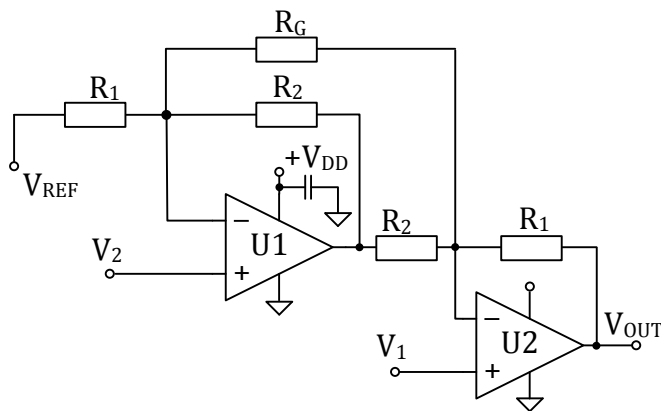
- Или за а за $\delta \ll 1$: $CMRR_R \approx \frac{k+1}{4\delta}$



4.1. Усилвателни схеми

- **ИНСТРУМЕНТАЛЕН УСИЛВАТЕЛ - СХЕМА С ДВА ОУ**

- Двата усилвателя съчетават функциите на усилване на сигнала и изолиране на товара. Вторият усилвател генерира разликата на сигналите V_{IN1} и V_{IN2} .
- Към първия усилвател може да се подаде напрежение V_{REF} . За приложения с еднополярно захранване, стойността на това напрежение типично е половината от захранващото напрежение.



4.1. Усилвателни схеми

- **ИНСТРУМЕНТАЛЕН УСИЛВАТЕЛ**

- **Пример.** Схема с инструментален усилвател трябва да се оразмери за усилване 1000. При използване на резистори с толеранс $\delta = \pm 5\%$, да се изследва влиянието върху $CMRR$ на различни стойности за G и k .
- $G_D = k(1 + G) \rightarrow 1000 = k(1 + G)$ или $(1 + G) = \frac{1000}{k}$.
- Като се разглежда само компонента, дължащ се на толеранса на съпротивленията се получава:
- $CMRR_{\Sigma} \approx \frac{(k+1)(1+G)}{4\delta}$, $CMRR_{\Sigma} \approx \frac{(k+1)1000}{4\delta k}$,
- $CMRR_{\Sigma} \approx \frac{(k+1)1000}{4\delta k} = \frac{(k+1)5000}{k}$,
- За $k = 1$ се получава $CMRR = 80 \text{ dB}$, а за $k = 10$ - $CMRR = 74,8 \text{ dB}$.

4.1. Усилвателни схеми

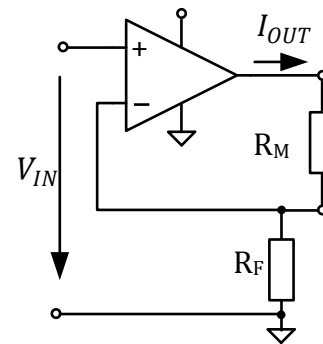
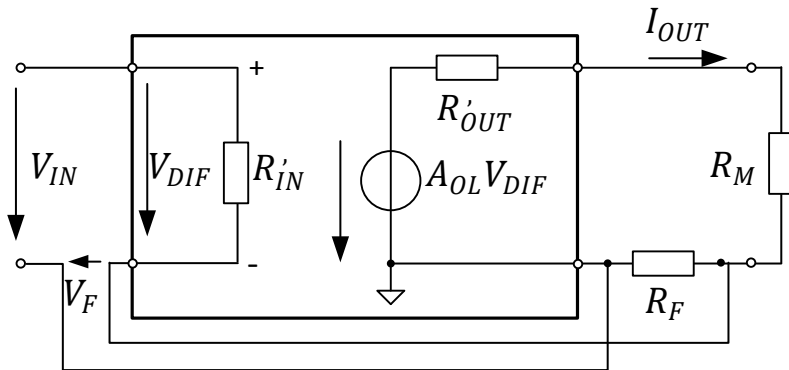
- **V/I УСИЛВАТЕЛИ**

- Коефициент на усилване $G_{V/I}$

- От $V_{IN} = I_{OUT}R_F$ следва: $G_{V/I} = \frac{I_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{1}{R_F}$

- Входно и изходно съпротивление:

- $R_{IN} = \frac{V_{IN}}{I_{IN}} \rightarrow \infty$; $R_{OUT} = \frac{V_{OUT}}{I_{OUT}} \rightarrow \infty$

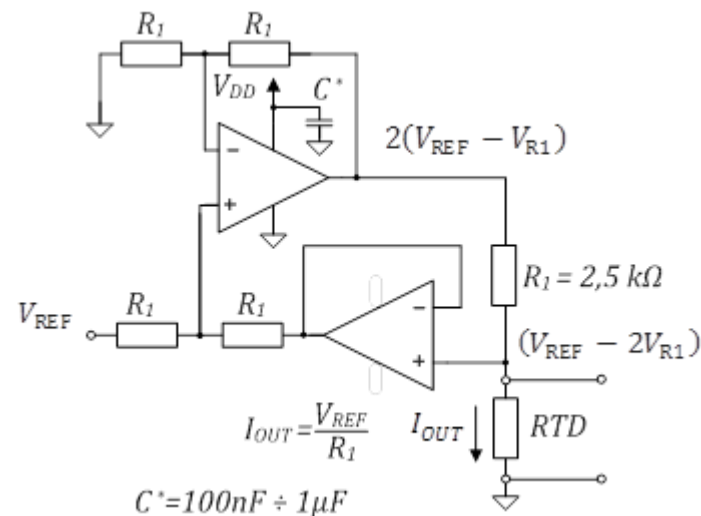


4.1. Усилвателни схеми

- **V/I УСИЛВАТЕЛИ**

- **СХЕМА „ПЛАВАЩ ИЗТОЧНИК НА ТОК“ [5][ВАКЕР05-Р.131]**

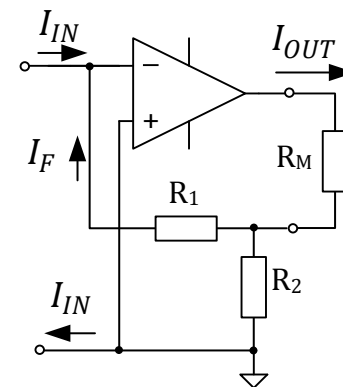
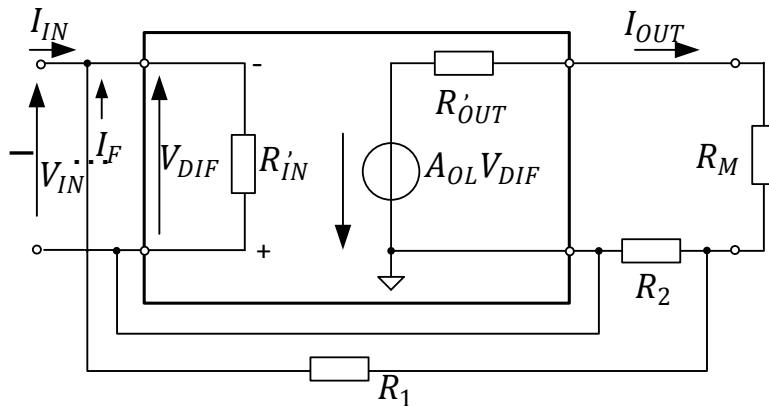
- Схемата „Плаващ източник на ток“ се използва най-често при стимулиране на резистивни температурни сензори (RTD). В показаната конфигурация на фиг. големината на генерирания ток е $I_{OUT} = 1 \text{ mA}$, но той може да се задава в широки граници чрез промяна на напрежението V_{REF} .



4.1. Усилвателни схеми

• II-УСИЛВАТЕЛ

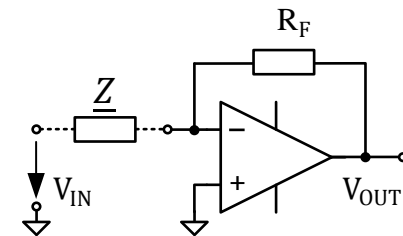
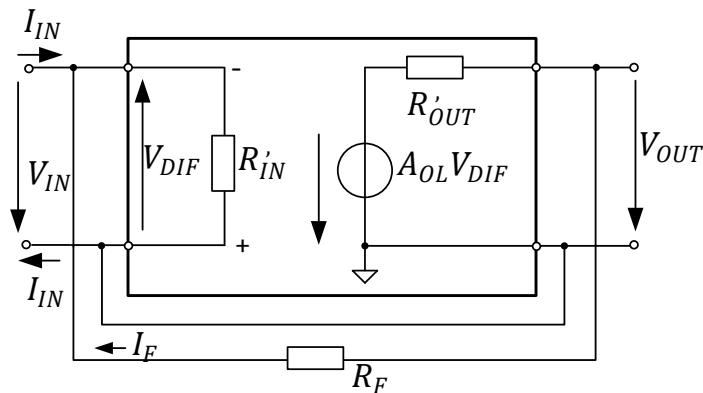
- При II усилвателите токът на изхода I_{OUT} е пропорционален на входния ток I_{IN} .
- $G_{I/I} = \frac{I_{OUT}}{I_{IN}} = - \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$.
- Входно и изходно съпротивление: $R_{IN} = \frac{V_{IN}}{I_{IN}} \rightarrow 0$; $R_{OUT} = \frac{V_{OUT}}{I_{OUT}} \rightarrow \infty$
- При реален ОУ имаме $R_{IN} \ll R'_{IN}$ и $R_{OUT} \gg R'_{OUT}$.



4.1. Усилвателни схеми

- **I/V-УСИЛВАТЕЛ**

- Коефициент на усилване: $G_{I/V} = \frac{V_{OUT}}{I_{IN}} = -R_F$
- Входно и изходно съпротивление: $R_{IN} = \frac{V_{IN}}{I_{IN}} \rightarrow 0$; $R_{OUT} = \frac{V_{OUT}}{I_{OUT}} \rightarrow 0$
- При реален ОУ имаме $R_{IN} \ll R'_{IN}$ и $R_{OUT} \gg R'_{OUT}$.



4.1. Усилвателни схеми

- **I/V-УСИЛВАТЕЛ**

- Основни схеми, реализирани на базата на I/V усилвател [1].

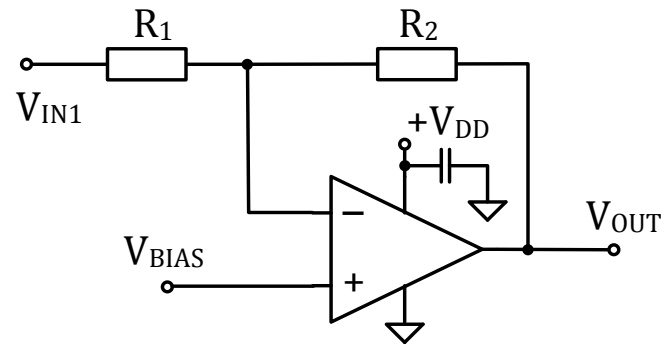
Схема	Елемент	
	На входа	В обратната връзка
I/V-усилвател	--	R
Инвертиращ у-тел	R	R
Сумиращи и изваждащи схеми	множество R	R
Интегратор	R	C (R паралелно)
Усилвател на товар	--	C
Диференциатор	C	R
Логаритматор	R	D

4.1. Усилвателни схеми

- **I/V-УСИЛВАТЕЛ**

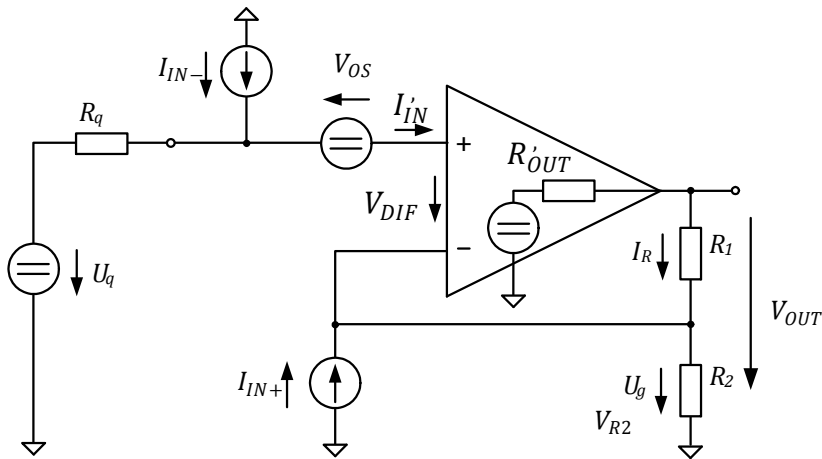
- Инвертираща схема

- $V_{OUT} = -\frac{R_2}{R_1} V_{IN}$???



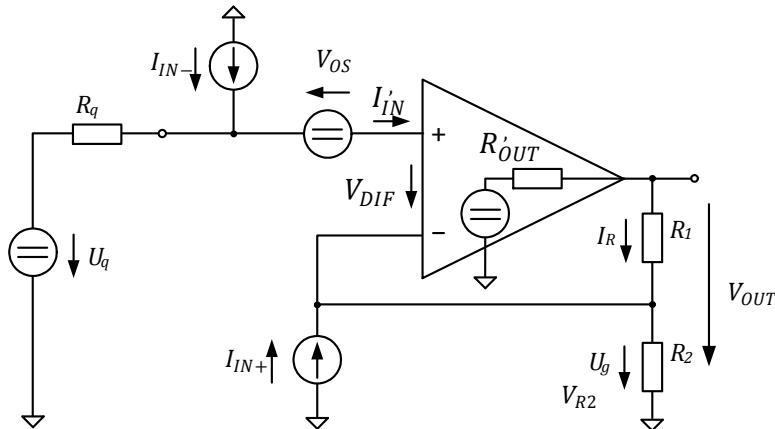
4.1. Усилвателни схеми

- **ОСНОВНИ СТАТИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ПРЕЦИЗНИ ОУ, ВЛИЯЕЩИ ВЪРХУ ТОЧНОСТТА НА ИЗМЕРВАТЕЛНИТЕ СХЕМИ**
 - Грешки, предизвикани от входното напрежение на несиметрия и входните поляризиращи токове при измерване на напрежение...



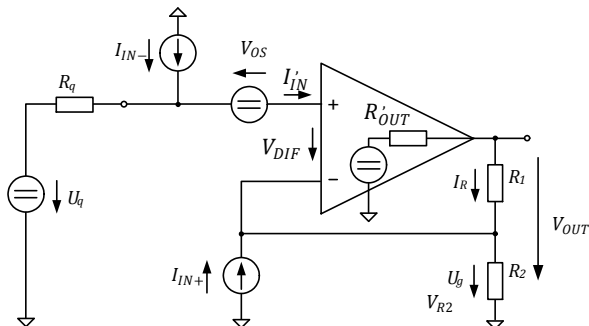
4.1. Усилвателни схеми

- **ОСНОВНИ СТАТИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ПРЕЦИЗНИ ОУ, ВЛИЯЕЩИ ВЪРХУ ТОЧНОСТТА НА ИЗМЕРВАТЕЛНИТЕ СХЕМИ**
 - Грешки, предизвикани от входното напрежение на несиметрия и входните поляризиращи токове при измерване на напрежение
 - Общ израз за грешката на изхода, предизвикана от сумарното въздействие на входното напрежение на несиметрия и на входните поляризиращи токове при измерване на напрежение:
 - $V_a(V_{OS}, I_{IN+}, I_{IN-}) = \frac{R_1+R_2}{R_2} \left(V_{OS} + R_q I_{IN+} - \frac{R_1 R_2}{R_1+R_2} I_{IN-} \right)$



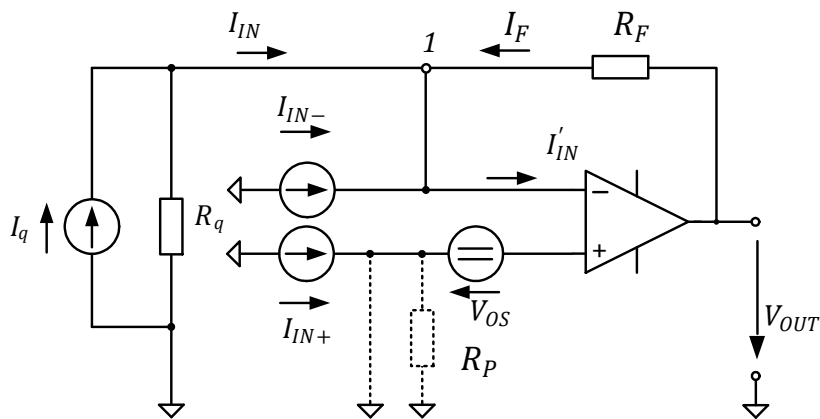
4.1. Усилвателни схеми

- **ОСНОВНИ СТАТИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ПРЕЦИЗНИ ОУ, ВЛИЯЕЩИ ВЪРХУ ТОЧНОСТТА НА ИЗМЕРВАТЕЛНИТЕ СХЕМИ**
 - Грешки, предизвикани от входното напрежение на несиметрия и входните поляризиращи токове при измерване на напрежение
 - $V_a(V_{OS}, I_{IN+}, I_{IN-}) = \frac{R_1+R_2}{R_2} \left(V_{OS} + R_q I_{IN+} - \frac{R_1 R_2}{R_1+R_2} I_{IN-} \right)$
 - Доминиращо смущаващо влияние оказва входното напрежение на несиметрия.
 - Влиянието на входните поляризиращи токове най-често е пренебрежимо малко.



4.1. Усилвателни схеми

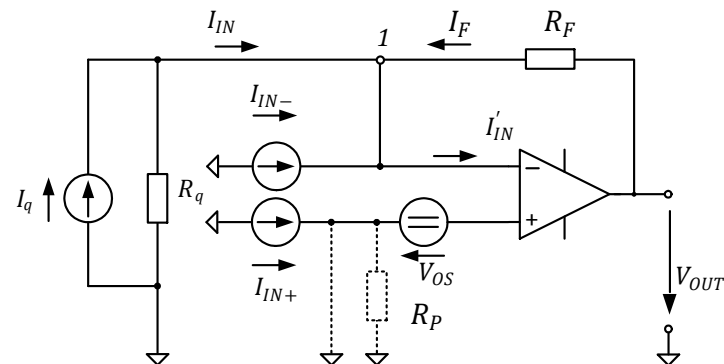
- **ОСНОВНИ СТАТИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ПРЕЦИЗНИ ОУ, ВЛИЯЕЩИ ВЪРХУ ТОЧНОСТТА НА ИЗМЕРВАТЕЛНИТЕ СХЕМИ**
 - Грешки, предизвикани от входното напрежение на несиметрия и входните поляризиращи токове при измерване на ток



4.1. Усилвателни схеми

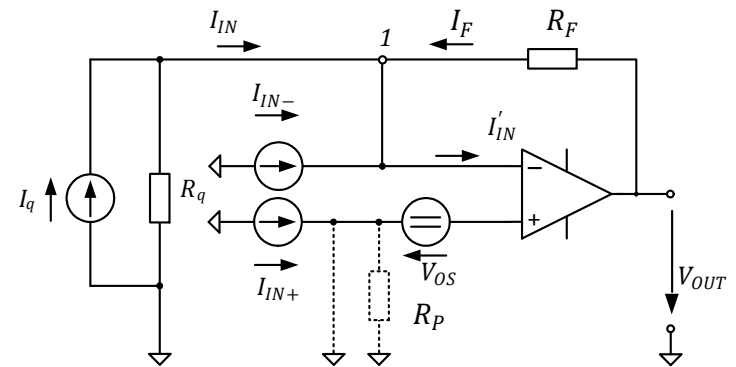
- **ОСНОВНИ СТАТИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ПРЕЦИЗНИ ОУ, ВЛИЯЕЩИ ВЪРХУ ТОЧНОСТТА НА ИЗМЕРВАТЕЛНИТЕ СХЕМИ**
 - Грешки, предизвикани от входното **напрежение на несиметрия** и **входните поляризиращи токове** при измерване на ток
 - Първо се разглежда влиянието на входното напрежение на несиметрия V_{os} за $I_{IN+} = I_{IN-} = 0$. Неинвертиращият вход, инвертиращият вход и възел (1) се намират на еднакъв потенциал и входното напрежение на несиметрия предизвиква следните токове:

$$- I_{IN} = -\frac{V_{os}}{R_F} \text{ и } I_F = \frac{V_{OUT} - V_{os}}{R_F}.$$



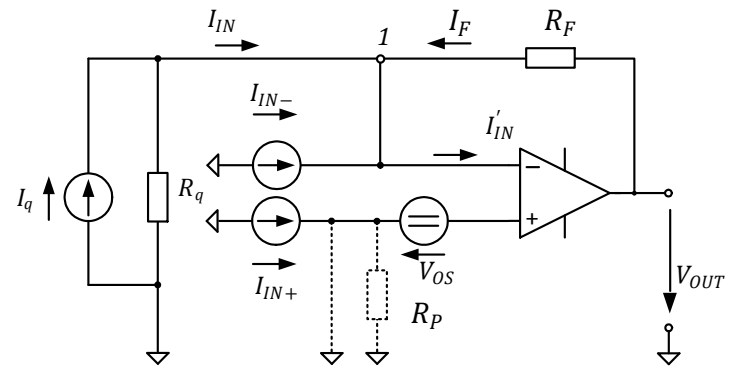
4.1. Усилвателни схеми

- **ОСНОВНИ СТАТИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ПРЕЦИЗНИ ОУ, ВЛИЯЕЩИ ВЪРХУ ТОЧНОСТТА НА ИЗМЕРВАТЕЛНИТЕ СХЕМИ**
 - Грешки, предизвикани от входното напрежение на несиметрия и входните поляризиращи токове при измерване на ток:
 - $I_{IN} = -\frac{V_{OS}}{R_F} = I_F = \frac{V_{OUT} - V_{OS}}{R_F}$.
 - $V_{OUT}(V_{OS}) = \frac{R_q + R_F}{R_q} V_{OS} = \left(1 + \frac{R_F}{R_q}\right) V_{OS}$
 - $R_q \gg R_F$
 - $V_{OUT}(V_{OS}) \approx V_{OS}$



4.1. Усилвателни схеми

- **ОСНОВНИ СТАТИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ПРЕЦИЗНИ ОУ, ВЛИЯЕЩИ ВЪРХУ ТОЧНОСТТА НА ИЗМЕРВАТЕЛНИТЕ СХЕМИ**
 - Грешки, предизвикани от **входните поляриращи токове** при измерване на ток
 - Така въздействията на входните поляриращи токове могат да се компенсират в значителна степен и за ефекта на общото въздействие се получава:
 - $V_{OUT}(I_{IN+}, I_{IN-}) = R_F(I_{IN+} - I_{IN-})$

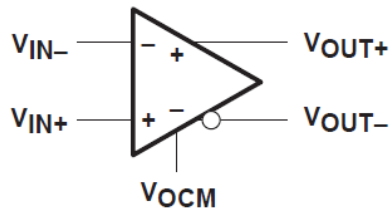


4.1. Усилвателни схеми

- **ОУ с диференциален изход**
 - Основни приложения
 - Събиране на данни с висока скорост - входовете на АЦП са диференциални и е нужен диференциален усилвател.
 - Две други предимства при използване на диференциални сигнали:
 - Повишен динамичен обхват
 - Редукция на четни хармоници.

4.1. Усилвателни схеми

- **ОУ с ДИФЕРЕНЦИАЛЕН ИЗХОД**
 - Сравнение



Fully-Differential Amplifier

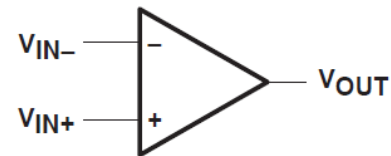
FULLY-DIFFERENTIAL AMPLIFIER

Differential in

Differential out

Output common-mode voltage set by V_{ocm}

Multiple feedback paths



Standard Operational Amplifier

STANDARD OPERATIONAL AMPLIFIER

Differential in

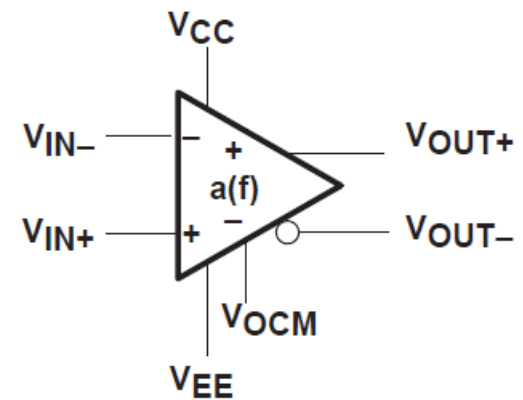
Single-ended out

Output common-mode voltage is signal

Single feedback path

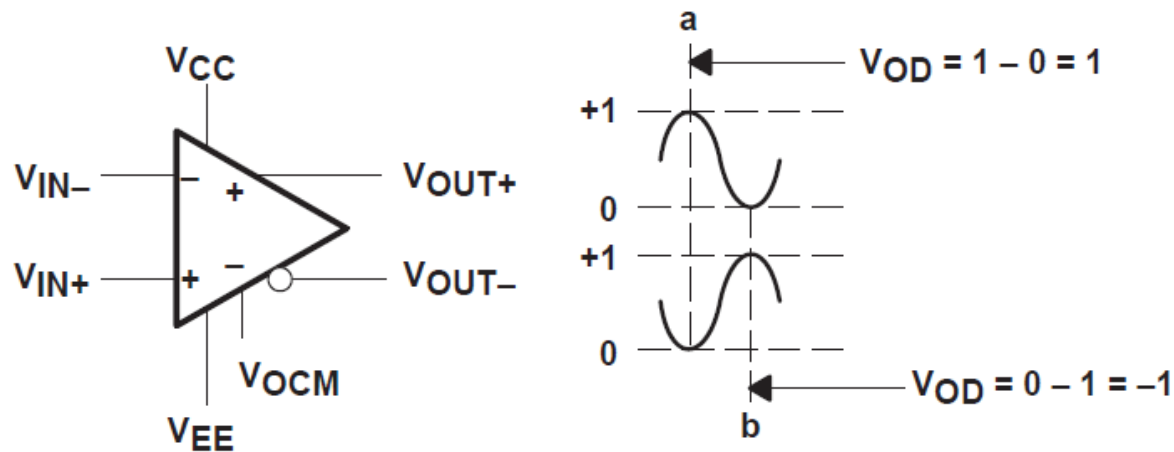
4.1. Усилвателни схеми

- **ОУ с диференциален изход**
 - Основни определения:
 - Входни напрежения
 - $V_{ID} = (V_{IN+} - V_{IN-})$
 - $V_{IC} = \frac{(V_{IN+} + V_{IN-})}{2}$
 - Изходни напрежения
 - $V_{OD} = (V_{OUT+} - V_{OUT-})$
 - $V_{OC} = \frac{(V_{OUT+} + V_{OUT-})}{2}$
 - Предавателна функция
 - $V_{OD} = V_{ID} \cdot a(f)$
 - Изходно синфазно напрежение
 - $V_{OC} = V_{OCM}$



4.1. Усилвателни схеми

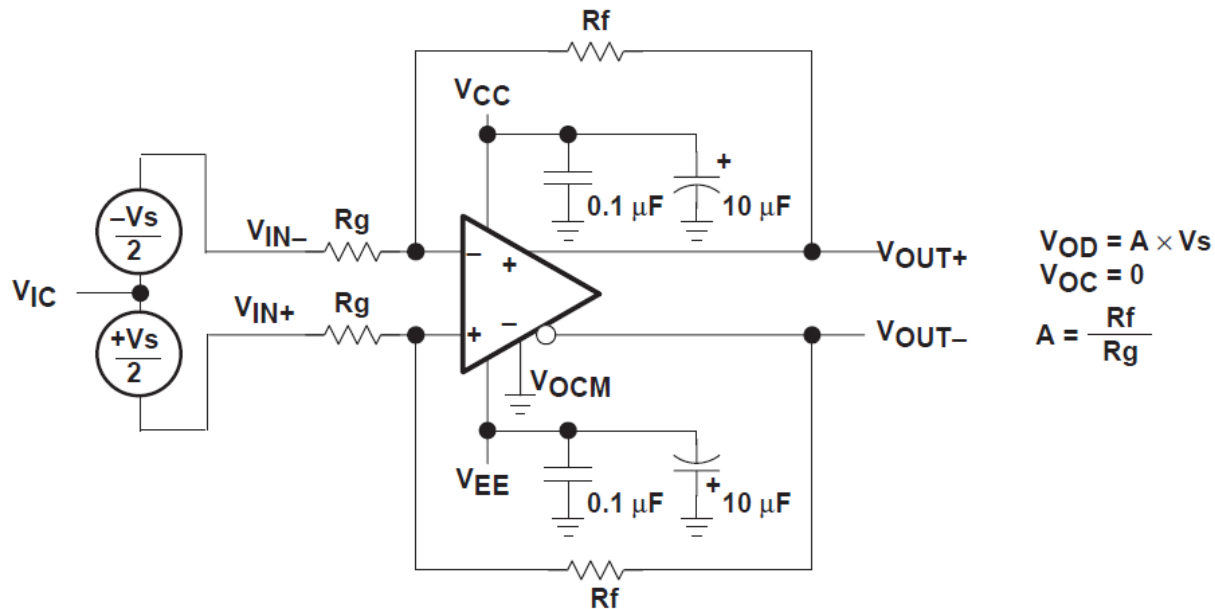
- **ОУ с диференциален изход**
 - Основни определения



Differential Output Results in $V_{OD} \text{ p-p} = 1 - (-1) = 2 \text{ X SE Output}$

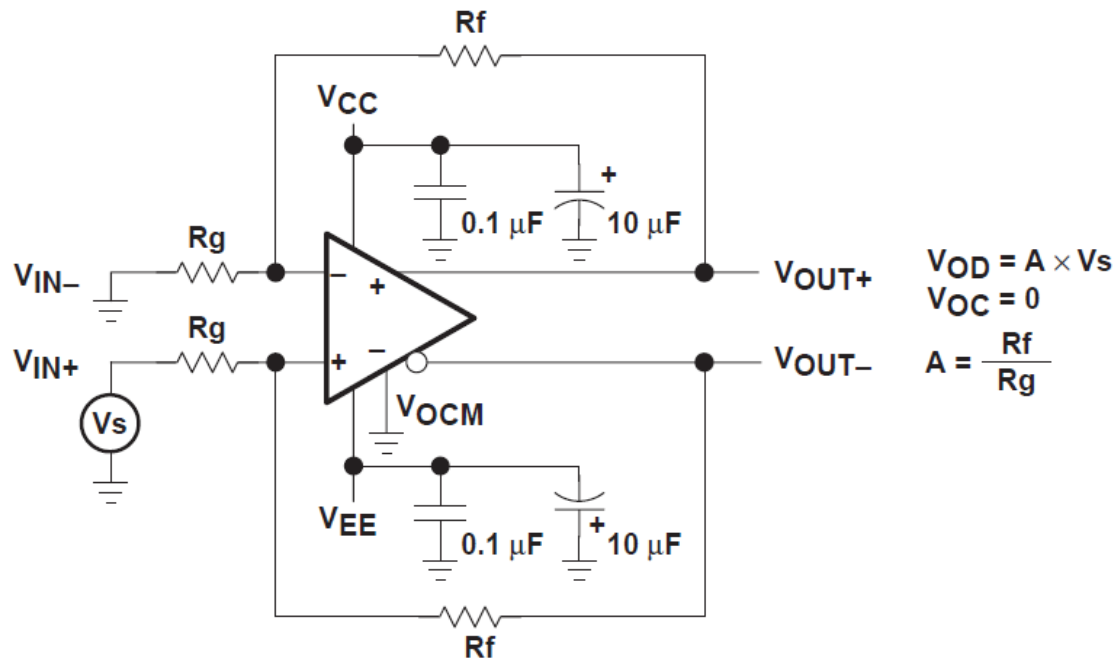
4.1. Усилвателни схеми

- **ОУ с диференциален изход**
 - Основни схеми
 - Усилване на диференциални сигнали



4.1. Усилвателни схеми

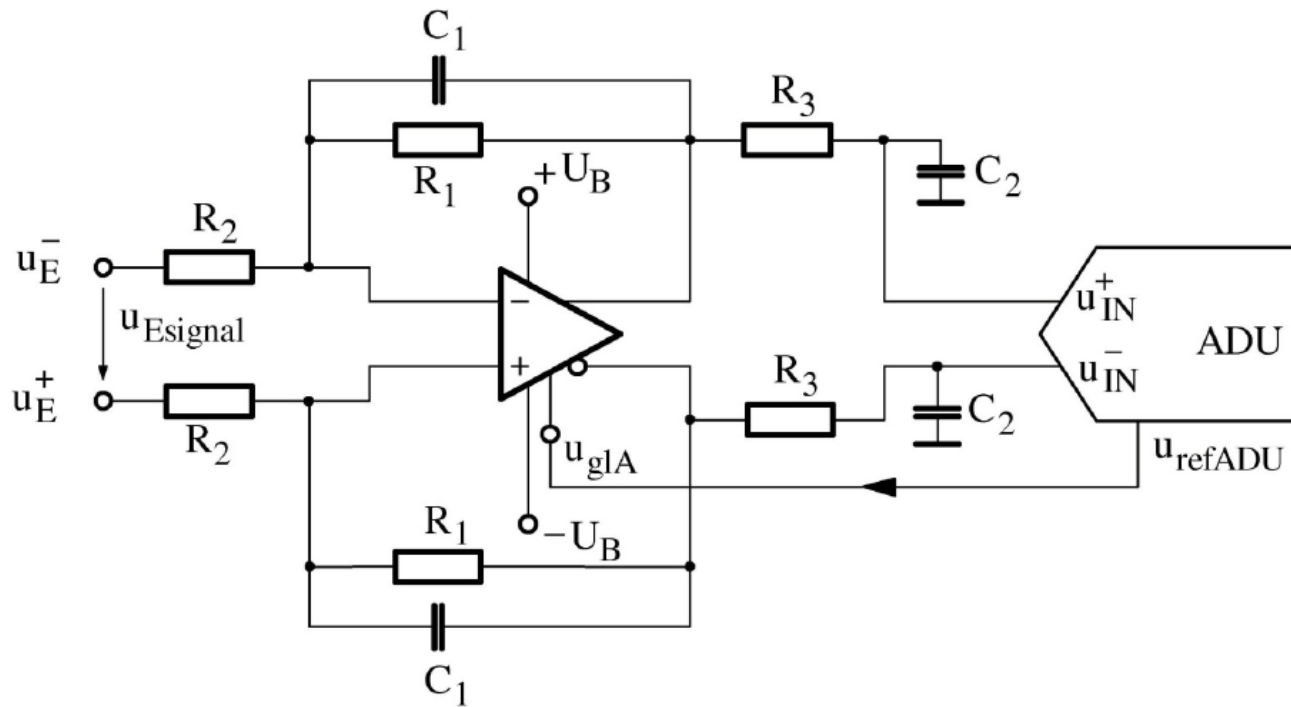
- **ОУ с диференциален изход**
 - Основни схеми
 - Усилване на сигнали спрямо маса



4.1. Усилвателни схеми

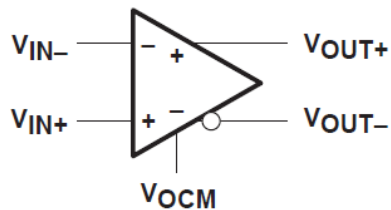
- **ОУ с диференциален изход**

- Схема за свързване към диференциален вход на АЦП



4.1. Усилвателни схеми

- ...
- ...



Fully-Differential Amplifier

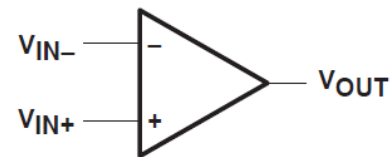
FULLY-DIFFERENTIAL AMPLIFIER

Differential in

Differential out

Output common-mode voltage set by V_{ocm}

Multiple feedback paths



Standard Operational Amplifier

STANDARD OPERATIONAL AMPLIFIER

Differential in

Single-ended out

Output common-mode voltage is signal

Single feedback path

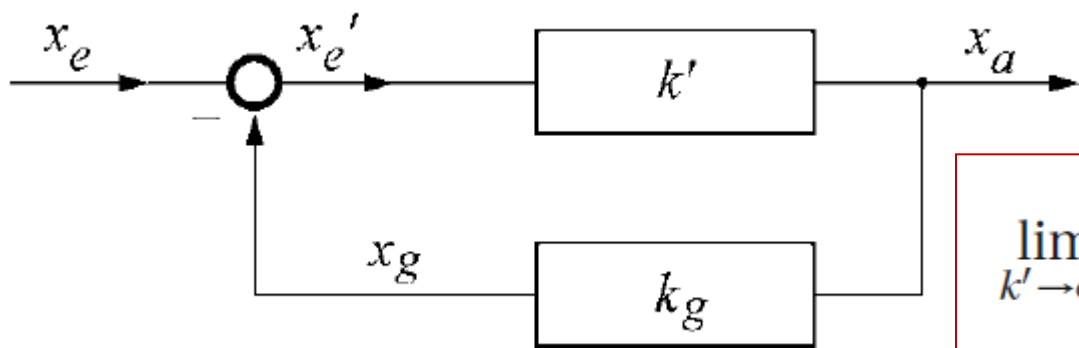
4.1. Усилвателни схеми

- **ЗАДАЧА 2.1** [SCHRUEF12, S...]
- Усилвател, чието входно напрежение на несиметрия има температурен коефициент $5 \mu\text{V}/\text{K}$, трябва да се използва при температури от 20 до 60°C .
- Да се определи най-малкият възможен обхват на измерване така, че грешката предизвикана от температурен дрейф да е най-много 1% от крайната стойност на измервателния обхват.
- ($\Delta U_{os} = 5 \mu\text{V}/\text{K} \cdot 40 \text{K} = 200 \mu\text{V} \cdot 100 = 20 \text{mV}$)

- ООВ

- Предавателна функция

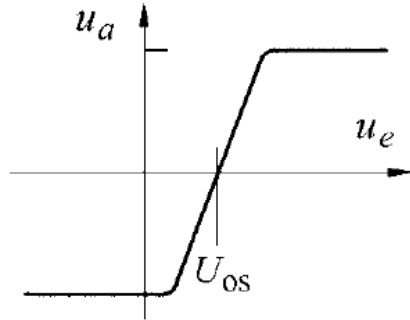
$$k = \frac{x_a}{x'_e + x_g} = \frac{k' x'_e}{x'_e + k_g k' x'_e} = \frac{k'}{1 + k_g k'}$$



$$\lim_{k' \rightarrow \infty} k = \lim_{k' \rightarrow \infty} \frac{1}{k_g + \frac{1}{k'}} = \frac{1}{k_g}$$

4.1.1. Измерване на постоянно напрежение

- [Неинвертираща схема U/U-усилвател](#)
- Функционални възли на електронните волтметри
- Неинвертиращ усилвател.
- Модел с:
 - входно напрежение на несиметрия и
 - входни поляризиращи токове и



- Входни поляризиращи токове:
 I_P и I_N
- Input **bias** current $I_B = \frac{1}{2}(I_P + I_N)$

$$\Delta U_{os} = \frac{\partial U_{os}}{\partial \vartheta} \Delta \vartheta + \frac{\partial U_{os}}{\partial U_V} \Delta U_V + \frac{\partial U_{os}}{\partial t} \Delta t.$$

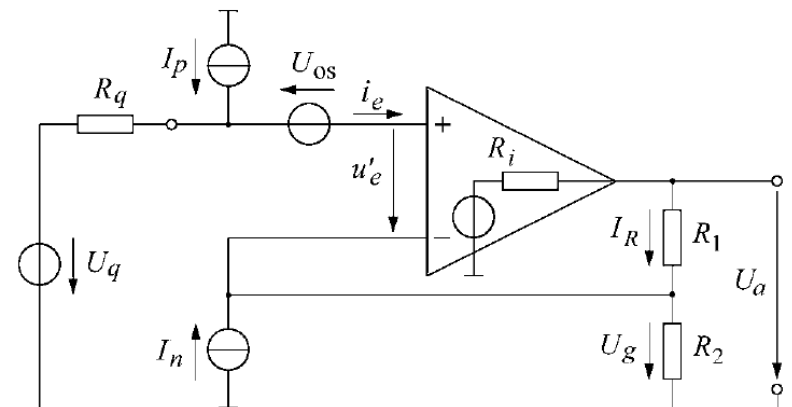
4.1.1. Измерване на постоянно напрежение

- Неинвертираща схема U/U-усилвател

Пример

- ОУ с температурен коефициент на входното напрежение на несиметрия $\frac{5\mu V}{K}$ се използва в температурен диапазон от 20 до 60 °С.
- Да се изчисли минималният възможен измервателен обхват, в който грешката на отстраняване на нулата (офсета) няма да надхвърли 1% от крайната стойност на обхвата

$$\Delta U_{os} = \frac{\partial U_{os}}{\partial \vartheta} \Delta \vartheta + \frac{\partial U_{os}}{\partial U_V} \Delta U_V + \frac{\partial U_{os}}{\partial t} \Delta t.$$



4.1.1. Измерване на постоянно напрежение

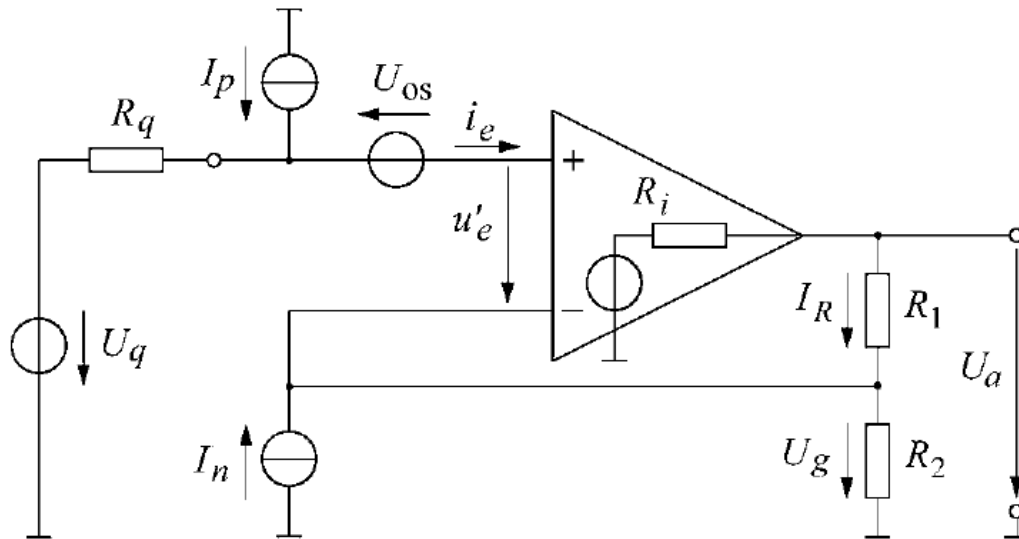
Неинвертираща схема U/U-усилвател

- Модел с:

- входно напрежение на несиметрия и
- входни поляризиращи токове и

□ Входни поляризиращи токове:

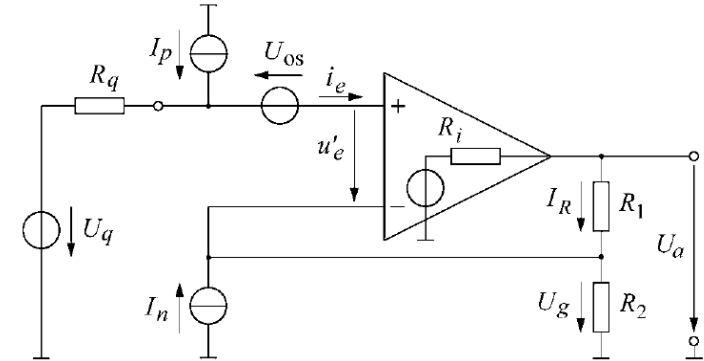
$$I_P \text{ и } I_N, \quad I_B = \frac{1}{2}(I_P + I_N)$$



4.1.1. Измерване на постоянно напрежение

Неинвертираща схема U/U-усилвател

- Модел с:
 - входно напрежение на несиметрия и
 - входни поляризиращи токове и



- $\mathbf{U_{OS}}$: $U_a(U_{os}) = \frac{R_1 + R_2}{R_2} U_{os}$

- $\mathbf{I_P}$: $U_a(I_p) = \frac{R_1 + R_2}{R_2} R_q I_p$

- $\mathbf{I_N}$: $U_g = (I_n + I_R) R_2$

$$I_n = -I_R$$

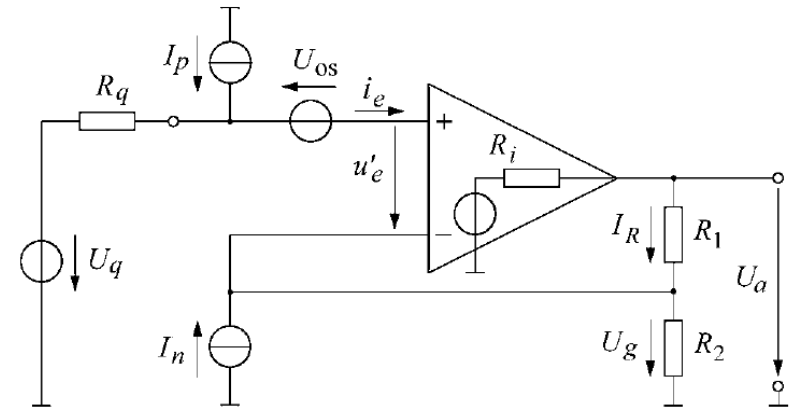
$$U_{os} + U_q - U_g = 0, \quad \text{От } U_{os} = U_q = 0 \text{ следва } U_g = 0$$

$$U_a(I_n) = R_1 I_R + U_g = -R_1 I_n.$$

4.1.1. Измерване на постоянно напрежение

Неинвертираща схема U/U-усилвател

- Модел с:
 - входно напрежение на несиметрия и
 - входни поляризиращи токове и



- **U_{os} :** $U_a(U_{os}) = \frac{R_1 + R_2}{R_2} U_{os}$

- **I_p :** $U_a(I_p) = \frac{R_1 + R_2}{R_2} R_q I_p$

- **I_N :** $U_a(I_n) = R_1 I_R + U_g = -R_1 I_n.$

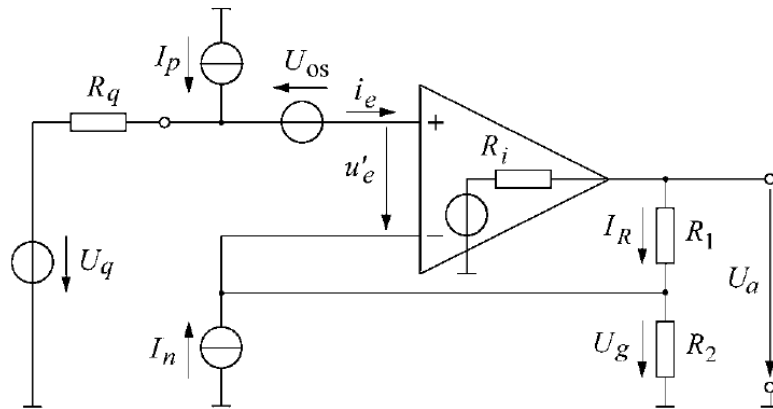
$$U_a(U_{os}, I_p, I_n) = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \left(U_{os} + R_q I_p - \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} I_n \right).$$

4.1.1. Измерване на постоянно напрежение

Неинвертираща схема U/U-усилвател

Пример

- Необходимо е да се измерва напрежението на източник с вътрешно съпротивление $R_q = 100\Omega$ с ОУ с напрежение на несиметрия $200\mu V$ и входни поляризиращи токове $I_P = I_N = 10^{-8}A$.
- Входният ток I_P води до пад на напрежението от $100\Omega \cdot 10^{-8}A = 1\mu V$, който е пренебрежим спрямо напрежението на несиметрия.

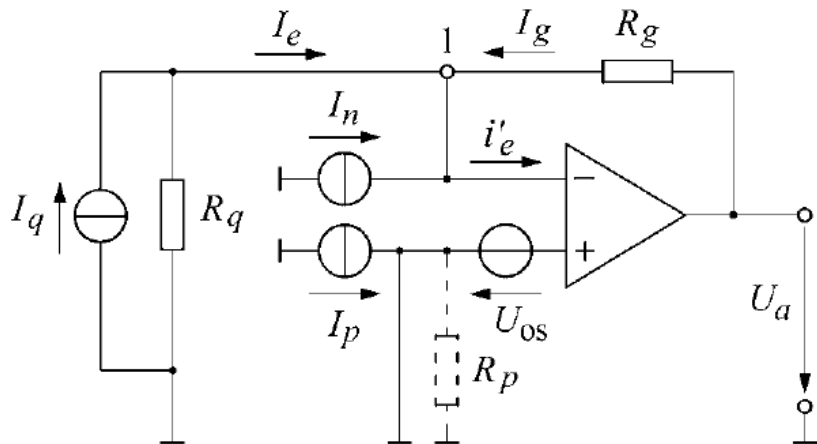


Измерване на постоянно напрежение и ток

Инвертираща схема - I/U-усилвател

Модел с:

- входно напрежение на несиметрия и
- входни поляризиращи токове и



$$I_e = -\frac{U_{os}}{R_q} \quad I_g = \frac{U_a - U_{os}}{R_g} \quad I_e = -I_g$$

$$U_a(U_{os}) = \frac{R_q + R_g}{R_q} U_{os} = \left(1 + \frac{R_g}{R_q}\right) U_{os}$$

$$R_q \gg R_g$$

$$U_a(U_{os}) \approx U_{os}$$

- U_{OS} не се усилва и може да бъде пренебрегнато

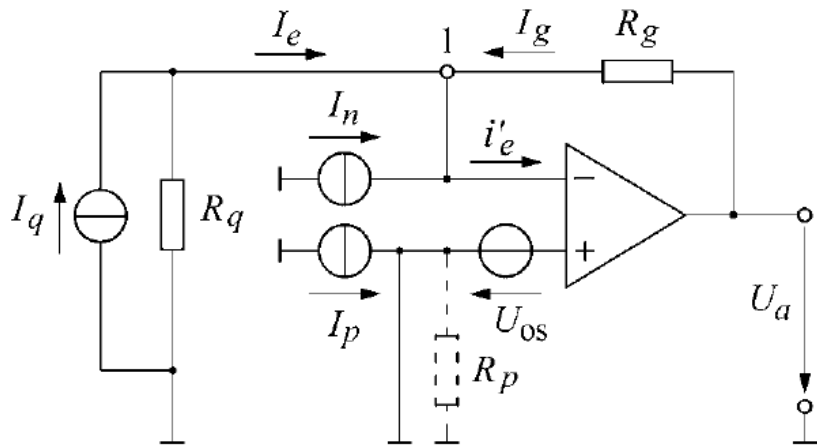
Измерване на постоянно

напрежение и ток

Инвертираща схема - I/U-усилвател

Модел с:

- входно напрежение на несиметрия и
- входни поляризиращи токове и



$$I_n = -I_g = -\frac{U_a}{R_g} \quad U_a(I_n) = -R_g I_n$$

- За $R_p = 0$ – липсва възможност за компенсация

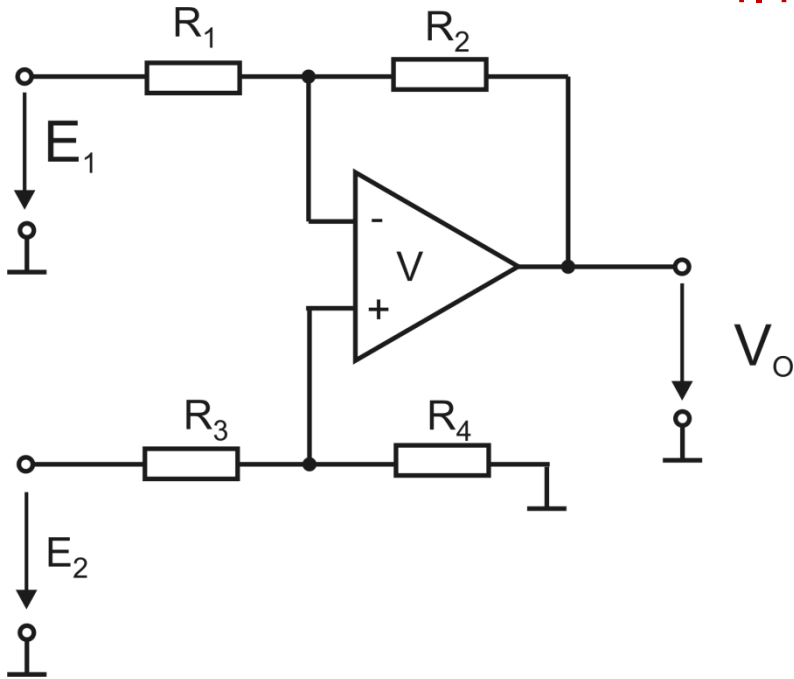
$$R_p = R_g \parallel R_q = \frac{R_g R_q}{R_g + R_q}$$

$$U_a(I_p) = \frac{R_q + R_g}{R_q} R_p I_p = R_g I_p$$

$$U_a(I_p, I_n) = R_g (I_p - I_n)$$

4.1. Усилвателни схеми

• 4.1.2. Диференциални усилватели

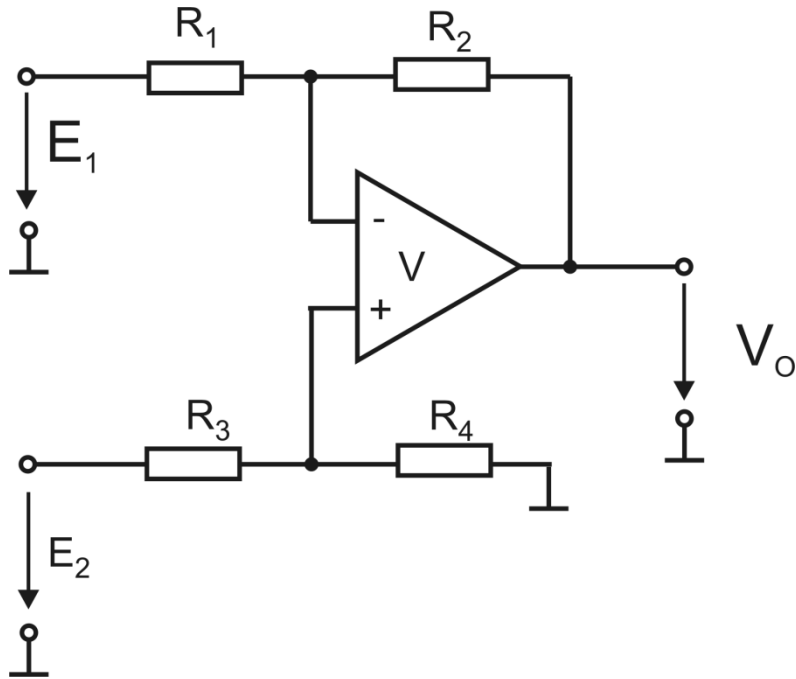


$$V_0 = -\frac{R_2}{R_1} E_1 + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} E_2$$

$$E_C = \frac{E_1 + E_2}{2} \quad E_D = E_2 - E_1$$

$$V_0 = G_C E_C + G_D E_D$$

4.1. Усилвателни схеми



•3а $R_1 = R_3$ $R_2 = R_4$

$$V_O = -\frac{R_2}{R_1}(V_1 - V_2)$$

•Диференциални усилватели

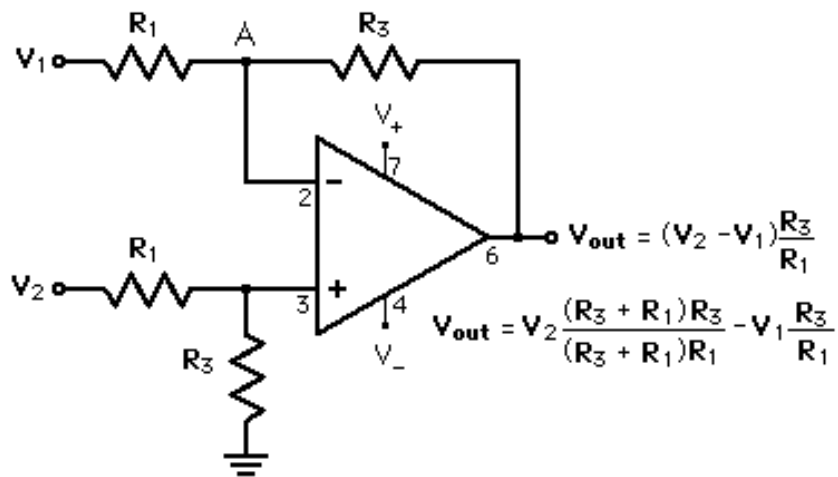
$$G_D = \left. \frac{V_O}{E_D} \right|_{E_C=0} = \frac{1}{2} \left[\frac{R_2}{R_1} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right]$$

$$G_C = \left. \frac{V_O}{E_C} \right|_{E_D=0} = \frac{R_4 R_1 - R_2 R_3}{R_1 (R_3 + R_4)}$$

$$CMRR = \frac{G_D}{G_C} = \frac{1}{2} \frac{R_1 R_4 + R_2 R_3 + 2R_2 R_4}{R_1 R_4 - R_2 R_3}$$

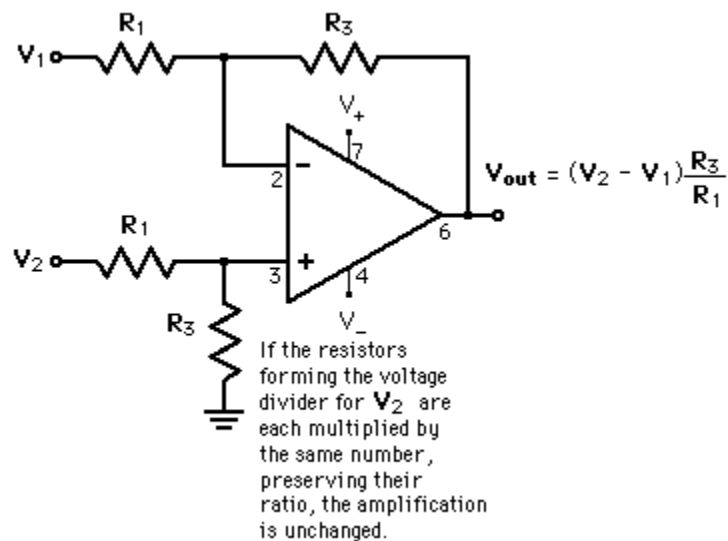
Диференциален усилвател

- Диференциален усилвател
- **(Differential Amplifier)**



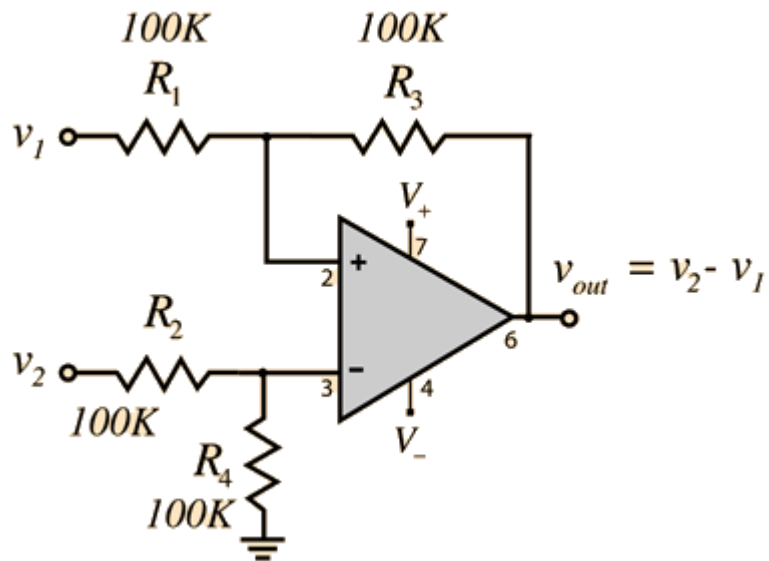
Дифференциален усилвател

- Усилвател на разлика
- (Amplified Difference)



Дифференциален усилвател

- Усилвател на разлика
- (Difference Amplifier)



4.1. Усилвателни схеми

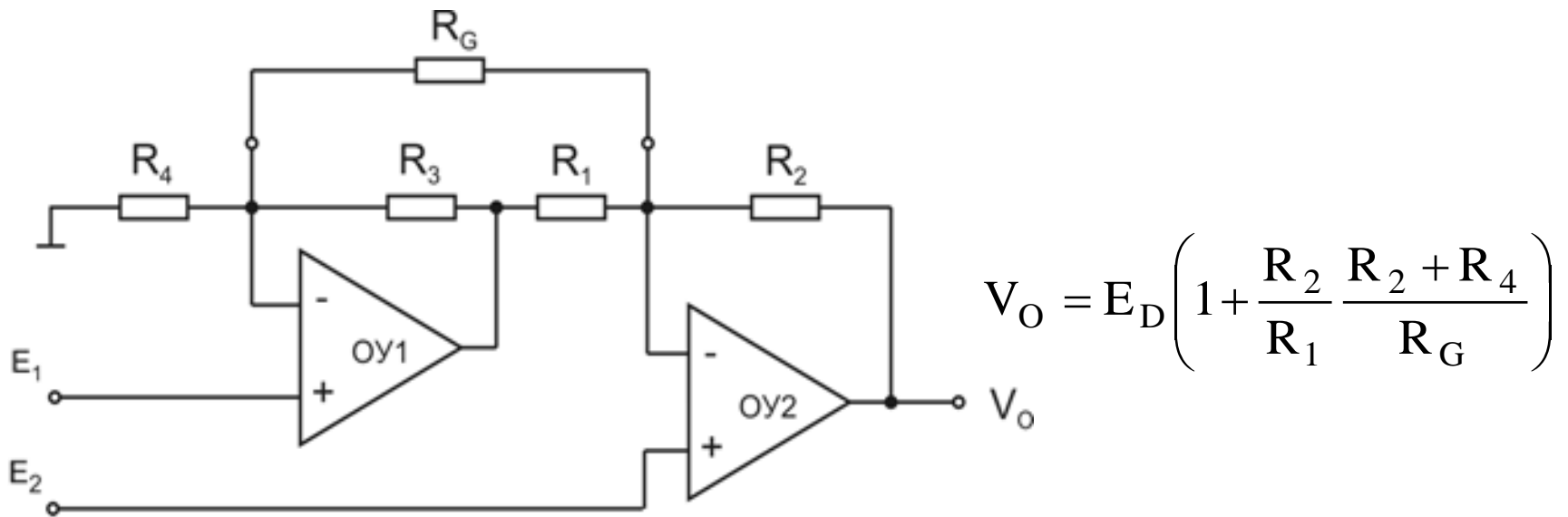
• 4.1.3. Инструментални усилватели - основни характеристики:

- висок коефициент на подтискане на синфазните сигнали;
- коефициент на усилване който може да се регулира в широки граници само с един резистор, като при повишаване на коефициента не се губи честотна лента (както е при ОУ);
- висок входен импеданс;
- ниски стойности за тока и напрежението на отместването на нулата и за техния дрейф.

2 основни архитектури – с 2 и с 3 ОУ

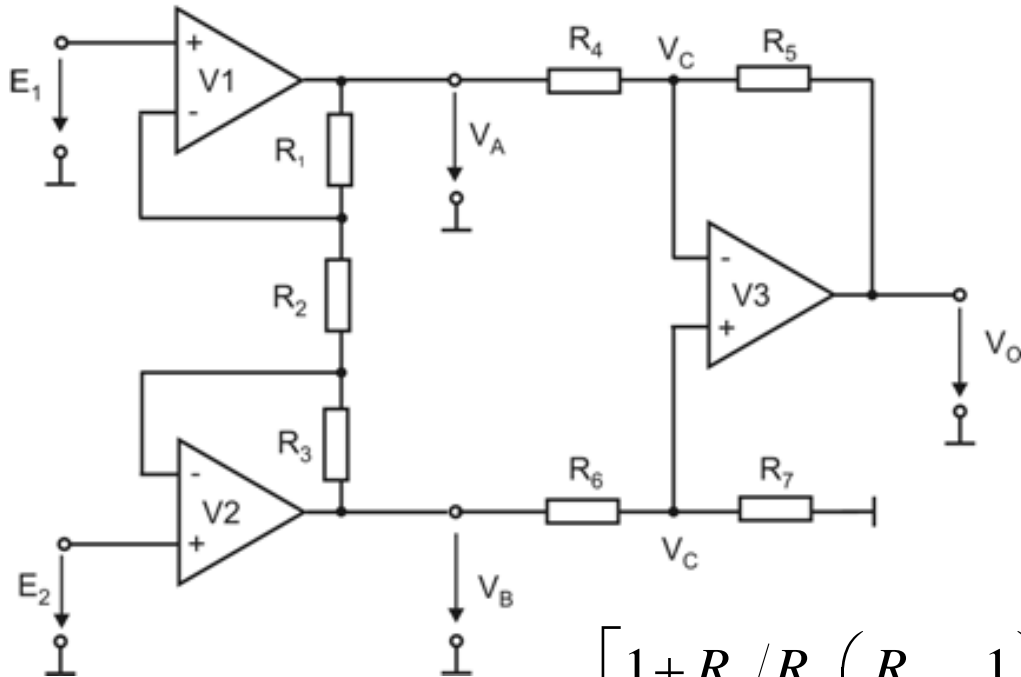
4.1. Усилвателни схеми

- Инструментален усилвател с 2 ОУ



4.1. Усилвателни схеми

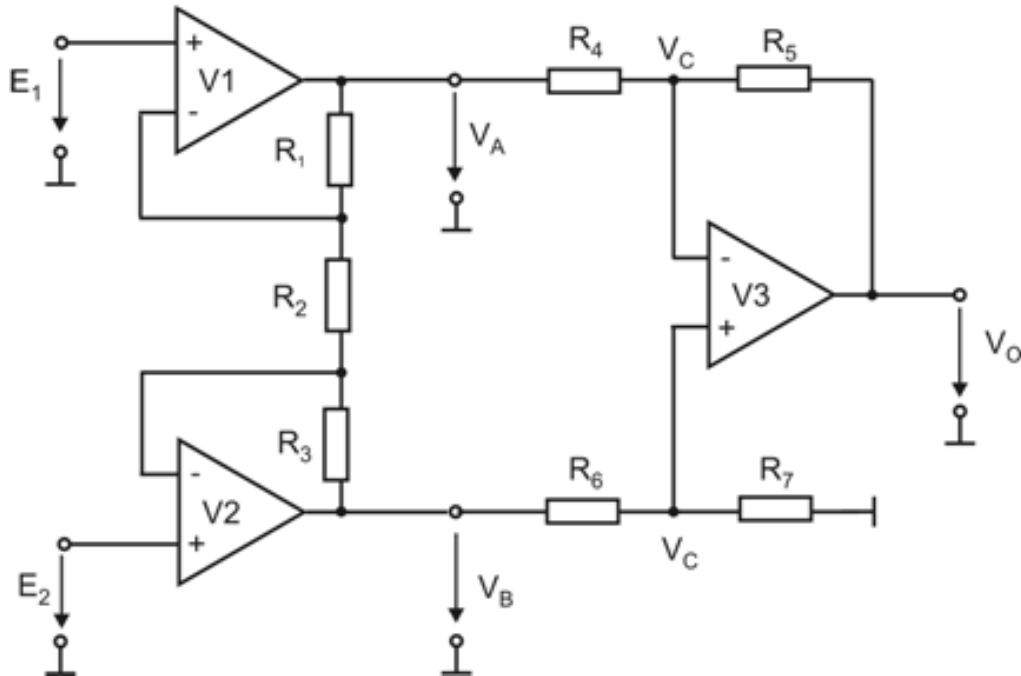
- Инструментален усилвател с 3 ОУ



$$V_O = -E_D \left[\frac{1 + R_5/R_4}{1 + R_6/R_7} \left(\frac{R_3}{R_4} + \frac{1}{2} \right) + \frac{R_5}{R_4} \left(\frac{1}{2} + \frac{R_1}{R_2} \right) \right] + E_C \left[\frac{1 - R_6 R_5 / R_7 R_4}{1 + R_6 / R_7} \right]$$

4.1. Усилвателни схеми

- Инструментален усилвател с 3 ОУ



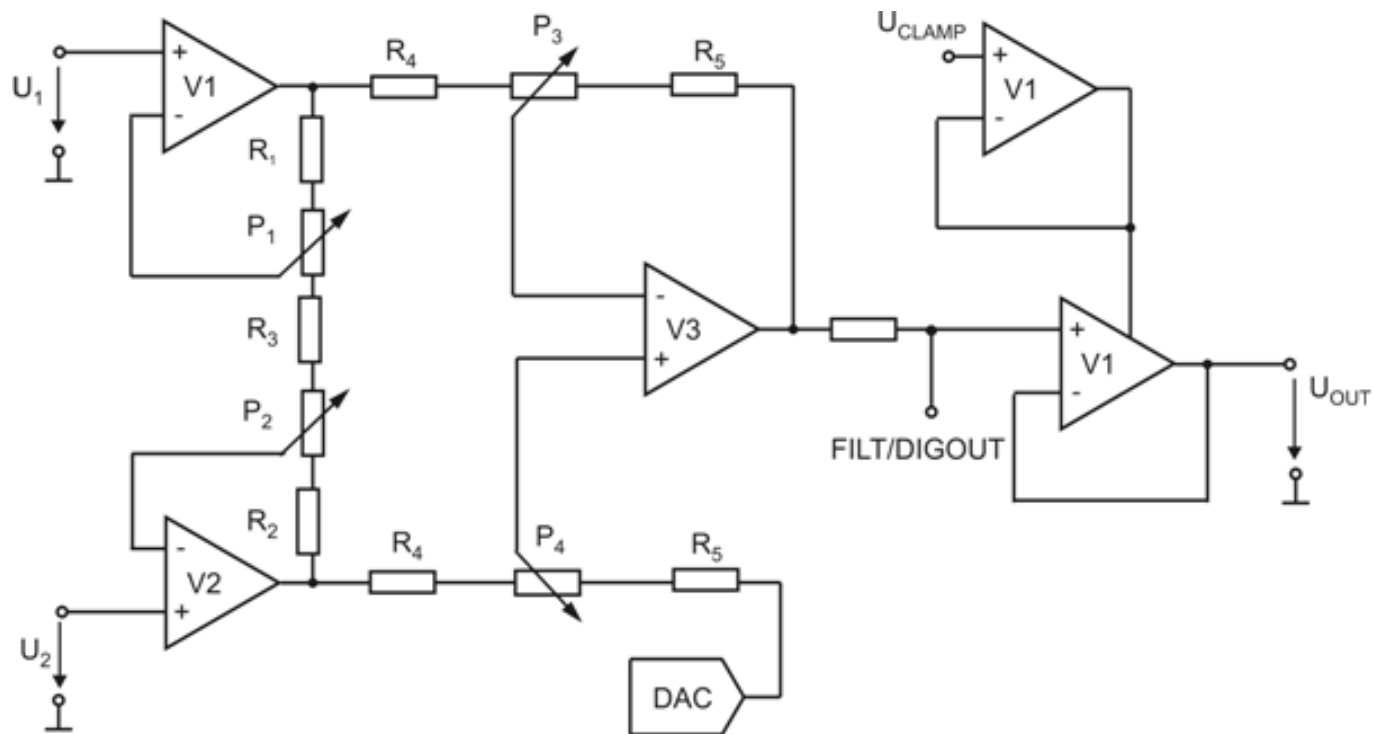
$$\frac{R_5}{R_4} = \frac{R_7}{R_6} = k$$

$$2R_1/R_2 = 2R_3/R_2 = G$$

$$G_D = k(1 + G)$$

4.1. Усилвателни схеми

- Примери:
 - AD 8555



4.1.4. Пример

Задача - термодвойка + усилвател

- За измерване на температура се използва термодвойка никелхром/никел (NiCr/Ni).
 - Изведете зависимостта на термодвижещото напрежение U_M от температурите на топлия и студения край – T_X и T_C .
($k_{NiCr/Pt} = 2,2 \text{ mV}/100 \text{ K}$, $k_{Ni/Pt} = -1,9 \text{ mV}/100 \text{ K}$).
 - Предложете схема с неинвертиращ усилвател и оразмерете резисторите ѝ, така че изходното напрежение да се повишава с 1 mV при повишаване на температурата с 1 K (операционният усилвател се приема за идеален).

Задача - термодвойка + усилватель

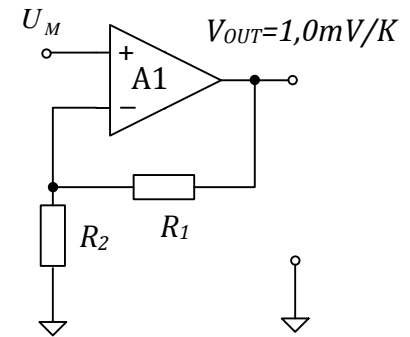
a)
$$U_M = k_{NiCr-Ni}(T_X - T_C) = (2,2 - (-1,9)) \frac{mV}{100K} (T_X - T_C) = 4,1 \frac{mV}{100K} (T_X - T_C)$$

$$U_M = 4,1 \frac{mV}{100K} (T_X - T_C) = 41 \frac{\mu V}{K} (T_X - T_C)$$

b)

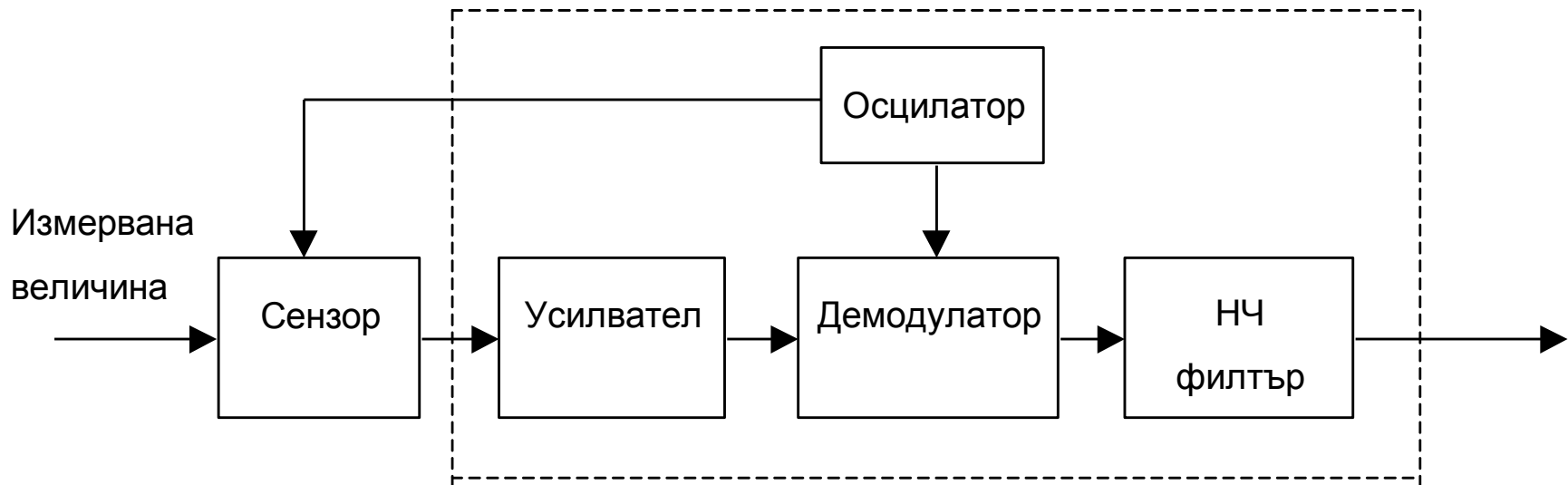
$$k = \frac{\partial V_{OUT}}{\partial U_M} = A_U = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = \frac{\Delta U_{OUT}}{\Delta U_M} = \frac{1 mV}{41 \mu V} = \frac{1000}{41}$$

Избира се $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = \frac{R_1}{(A_U - 1)} = 427,5 \Omega$



4.2. Усилватели с носеща честота (МДМ)

- Принцип:

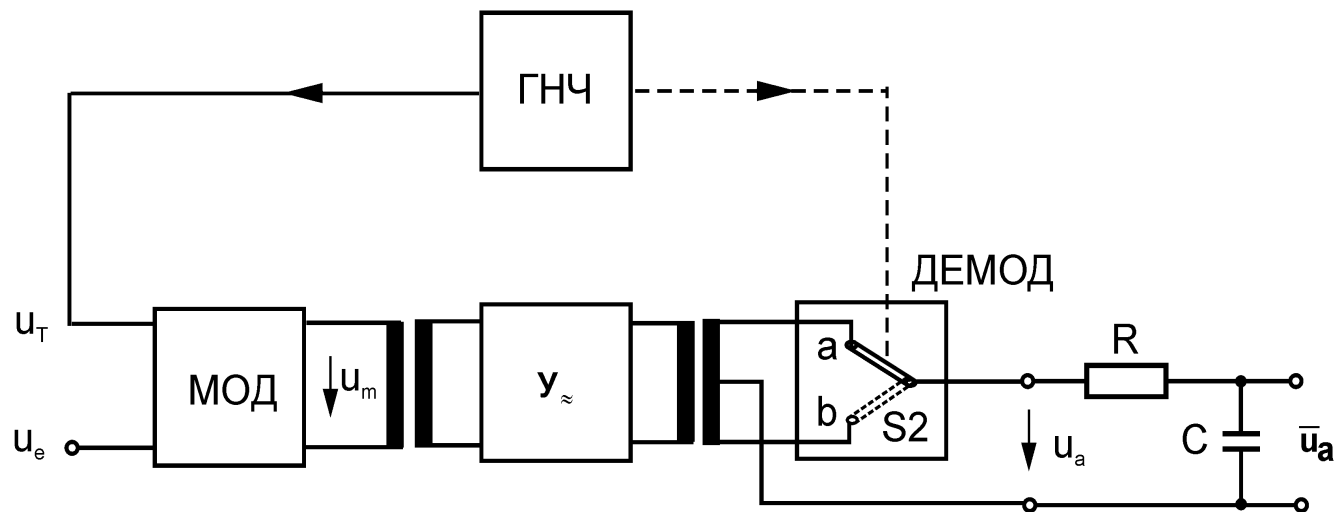


Фиг. 4.4. При усилвателите с носеща честота често осцилаторът се

използва за стимулиране на сензора и за управление на демодулатора

4.2. Усилватели с носеща честота (МДМ)

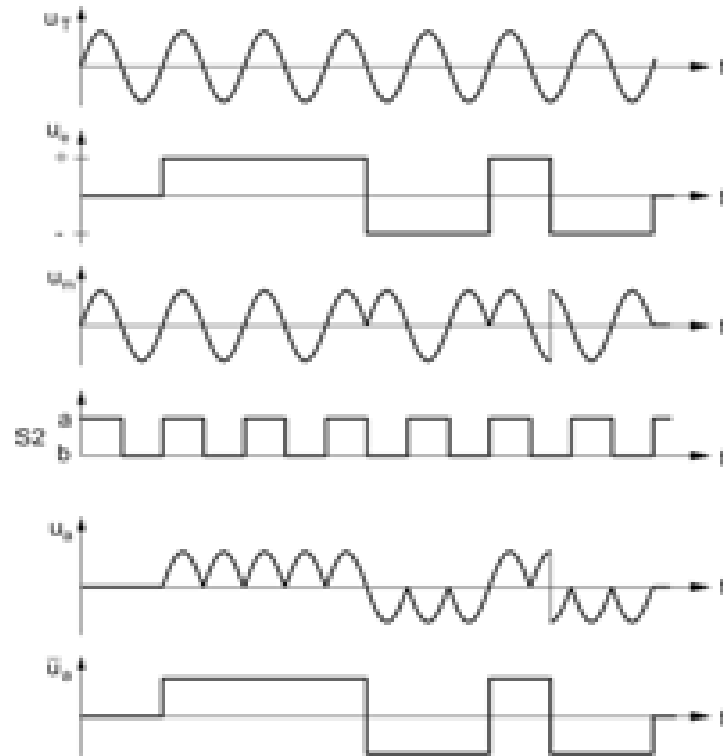
- Структура:



ФИГ. 4.6.а. Структура на усилвател с носеща честота

4.2. Усилватели с носеща честота (МДМ)

- Времедиаграми на сигналите:



4.2. Усилватели с носеща честота (МДМ)

• Фазов детектор:

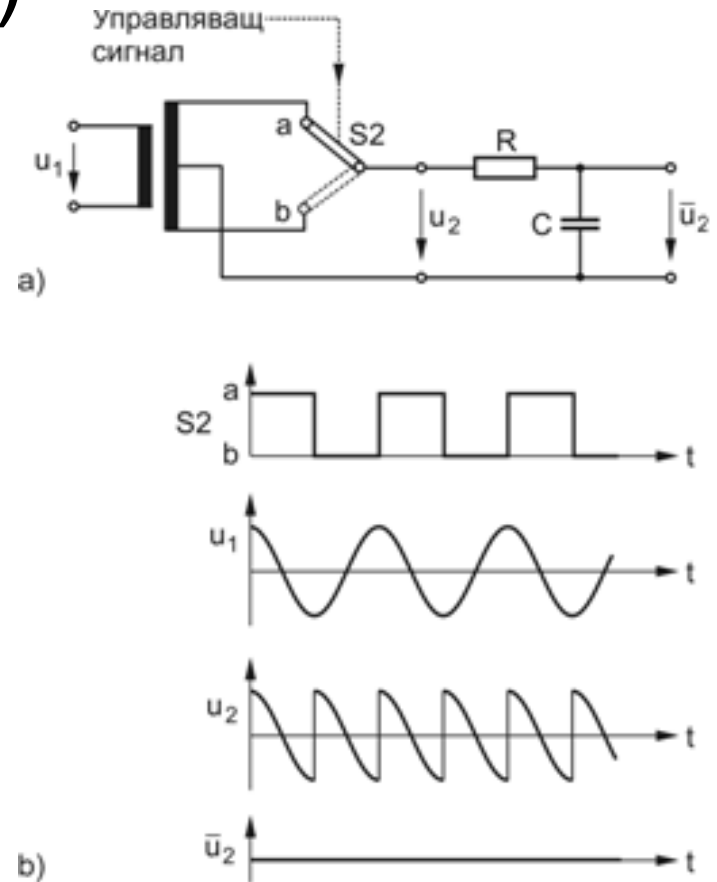
$$u_1 = \hat{u}_1 \sin(\omega t + \pi)$$

$$\bar{u}_2 = \frac{1}{T} \left[\int_0^{T/2} \hat{u}_1 \sin(\omega t + \varphi) - \int_{T/2}^T \hat{u}_1 \sin(\omega t + \varphi) \right] dt$$

$$u_2 = \frac{2}{\pi} \hat{u}_1 \cos \varphi$$

!!! Осредненото изходно напрежение на селективния изправител е **пропорционално на косинуса** на фазовия ъгъл м/у входното и управляващото напрежение

- За $\varphi = 0$ – изправена стойност на синусоидалното напрежение
- За $\varphi = 180^\circ$ – стойност на синусоидалното напрежение с обратен знак
- За $\varphi = \pm 90^\circ$ – $u_2 = 0$



4.2. Усилватели с носеща честота (МДМ)

- **Пример** (Schriefer S.158)

Смущаващо напрежение с фазово отместване 90°:

$$f = 5 \text{ kHz} \quad \Phi = 2 \cdot 10^{-7} \sin(\omega t) \text{ Vs}$$

$$u_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi}{dt} = -2 \cdot 10^{-7} \frac{\sin(\omega t)}{dt} = -2 \cdot 10^{-7} \cos(\omega t) \text{ V}$$

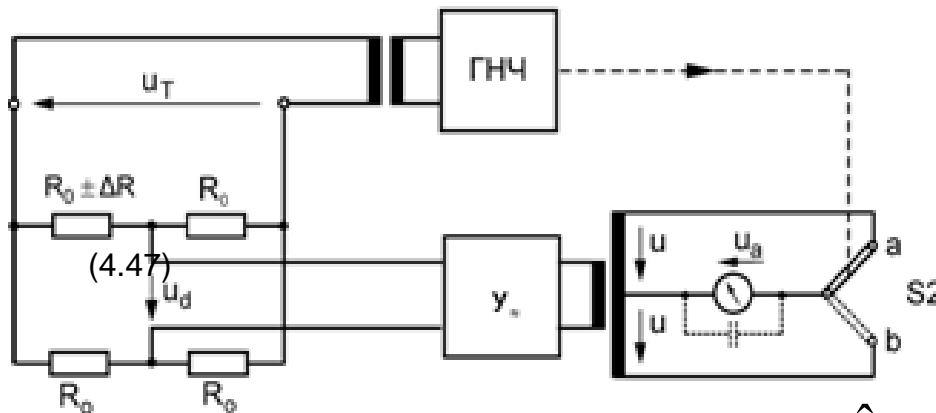
За

$$\omega = 2\pi \cdot 5 \text{ kHz} \quad \text{и} \quad \cos(\omega t) = -1$$

$$u_{\text{ind}} = 6,28 \text{ mV} \quad - \text{ Нива близки до полезния сигнал!!}$$

4.2. Усилватели с носеща честота (МДМ)

- Усилвател и мост с носеща честота:

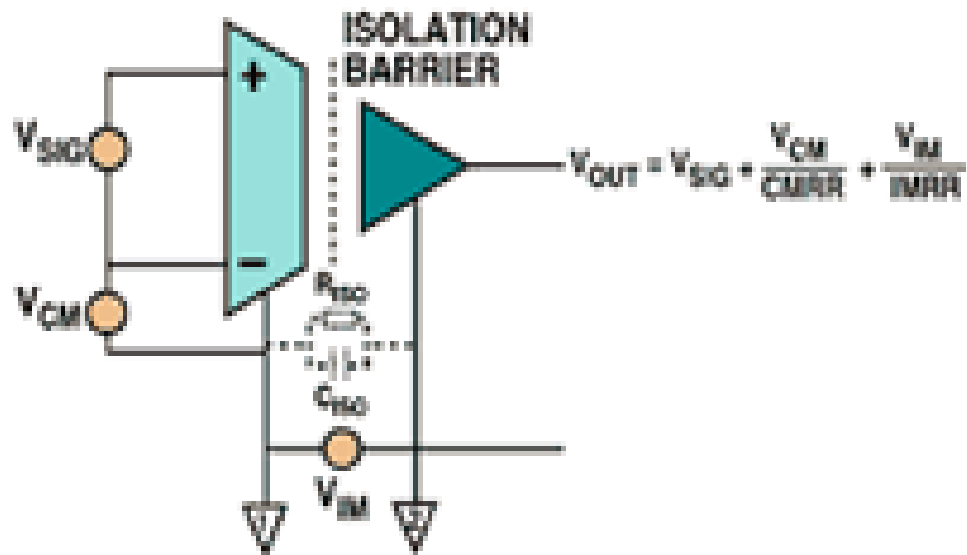


$$u_d = \frac{\hat{u}_T \sin \omega_0 t}{4R_0} \Delta R$$

$$u_d = \frac{\hat{u}_T}{4} \sin \omega_0 t \frac{(-\Delta R)}{R_0} = -\frac{\hat{u}_T \sin \omega_0 t}{4R_0} \Delta R$$

4.3. Изолиращи усилватели

- Модел на реален изолиращ усилвател:



4.3. Изолиращи усилватели

- Основни характеристики на изолиращ усилвател:
 - Изолиращо напрежение (Isolation Voltage - VISO).
 - 750 V до >7.5 kV
 - Изолиращо съпротивление R_{ISO} и изолиращ капацитет C_{ISO}

4.3. Изолиращи усилватели

- **Основни характеристики**

- **Изолиращо напрежение** (Isolation Voltage - V_{ISO}).

Изолиращото напрежение (известно и като dielectric withstand voltage) е показател за оценка на възможността на схемата да се защитава от заобикалящите я схеми от повреди, дължащи се на различни потенциали. Изолиращият материал между входа и изхода, както и използваната при корпусирането технология са основните влияещи величини за този параметър. Спецификацията на този параметър е различна при отделните производители. V_{ISO} се избира в зависимост от изискванията на приложението. Типичните стойности за този параметър са от 750 V до >7.5 kV.

4.3. Изолиращи усилватели

- **Основни характеристики**

- **Изолиращо съпротивление R_{ISO} и изолиращ капацитет C_{ISO}**

Паразитният капацитет на Изолиращия усилвател трябва да е възможно най-нисък, тъй като чрез него се реализира променливотокова връзка през изолационната бариера. Въпреки че R_{ISO} обикновено е от порядъка на няколко $G\Omega$, а C_{ISO} типично е <10 pF, импедансът при по-високи честоти има ниски стойности. При 10 MHz, бариерен капацитет от 10 pF има еквивалентно съпротивление:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C_{ISO}} = \frac{1}{2\pi(10^7 \text{ Hz})(10 \text{ pF})} \approx 1,6 \text{ k}\Omega$$

4.3. Изолиращи усилватели

- **Основни характеристики**

- **Потискане на изолиращото напрежение (Isolation-Mode Rejection - IMR)**

IMR е параметър, показващ колко добре усилвателят потиска напрежението върху изолиращата бариера (isolation-mode voltage, на фиг. означено като V_{IM}).

4.3. Изолиращи усилватели

- **Основни характеристики**

Напрежението върху изолиращата бариера внася грешка на изхода V_{OUT} , която отнесена към входа има стойност, където коефициентът на потискаме на изолиращото напрежение (IMRR - isolation mode rejection ratio) е

$$V/V = \log^1 (\text{IMRdB} / 20).$$

Например, за IMR 160 dB (за постоянно напрежение), V_{IM} от $1000 V_{DC}$ резултира като грешка отнесена към изхода от $10^3 / 10^8 = 10^5 V$, или $10 \mu V$

4.3. Изолиращи усилватели

- **Основни характеристики**

- **Потискане на синфазното напрежение (Common-Mode Rejection Ratio)**

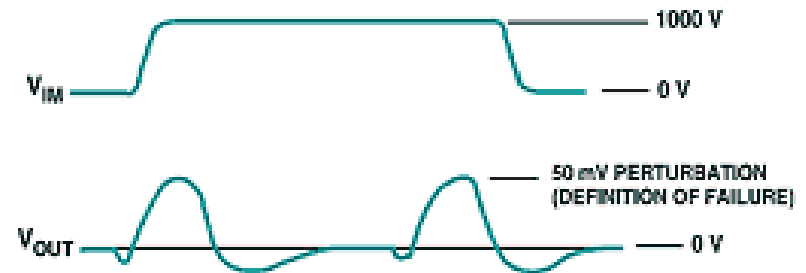
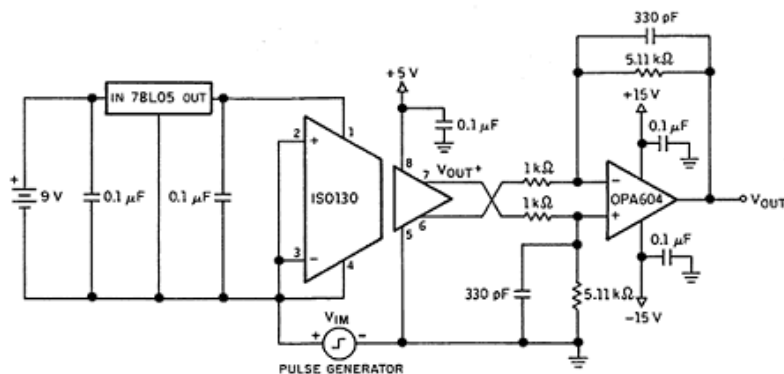
Коефициентът CMMR показва колко добре устройството подтиска синфазните сигнали. То определя отношението между диференциалния коефициент на усилване (сигнал приложен между входа и масата за входа) към коефициента на усилване на синфазните сигнали (входните изводи дадени на късо и приложен едновременно към тях сигнал).

4.3. Изолиращи усилватели

- Основни характеристики

- Устойчивост на импулсни въздействия **Transient Immunity**

Този параметър показва минималната скорост на нарастване или на спадане на изолационното напрежение (isolation-mode noise signal, V_{IM}), при което започват да се наблюдават смущения на изхода. При определени обстоятелства това напрежение върху изолационната бариера може да олицетворява ударния напрежение на изолационния усилвател.



4.3. Изолиращи усилватели

- **Методи за реализация**

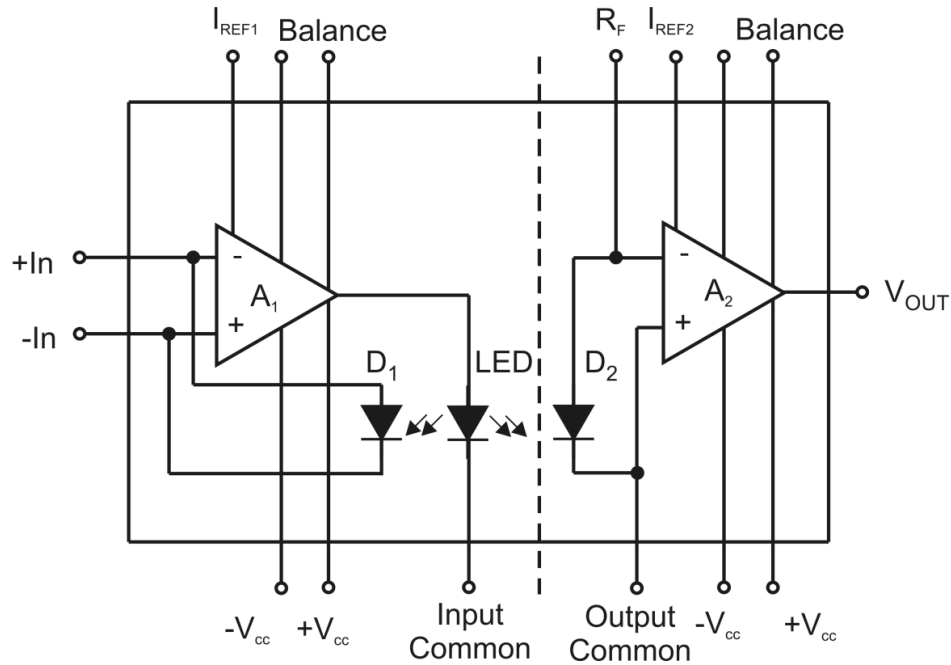
Използват се разнообразни методи за реализиране на бариерата и схеми за модулиране на сигнала.

- Бариерата може да бъде оптична, капацитивна, индуктивна. Използва се дори топлинен трансфер.

- Методите за модулация са амплитуден, преобразуване на напрежение в честота, коефициент на запълване, широчно-импулсна модулация и др.

4.3. Изолиращи усилватели

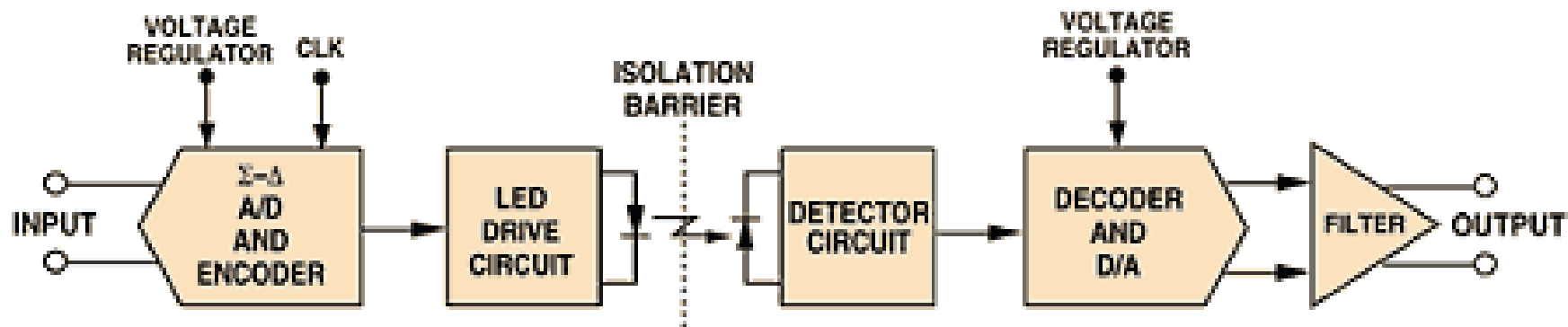
- Методи за реализация



ISO 100 усилвател с оптично разделяне

4.3. Изолиращи усилватели

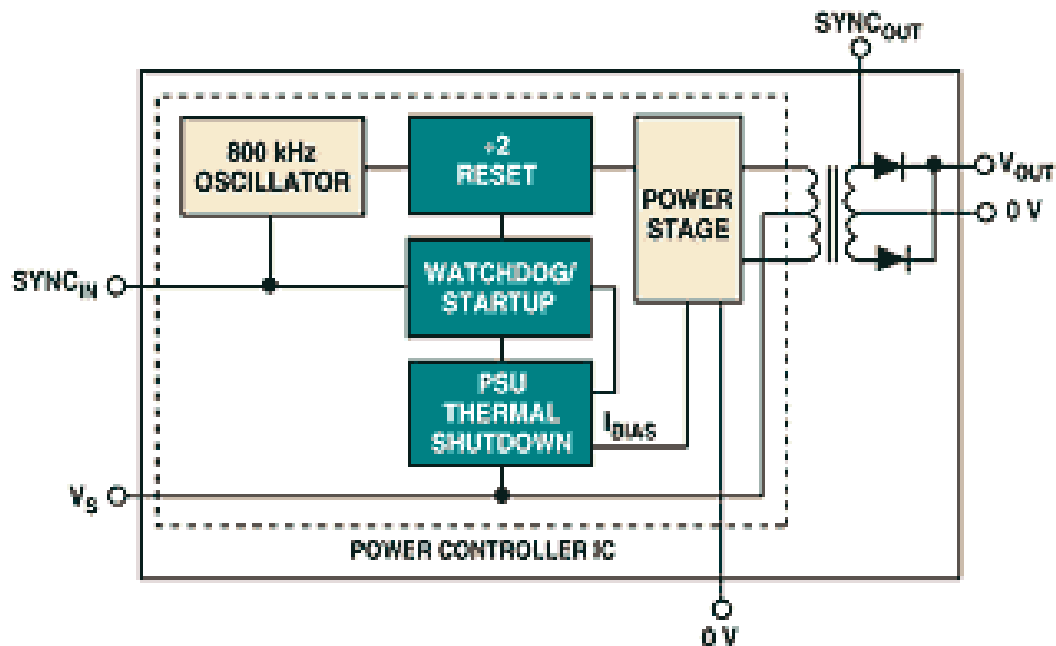
- Методи за реализация



ISO 130 преобразува аналоговия сигнал в последователност от битове, която се предава цифрово през бариерата

4.3. Изолиращи усилватели

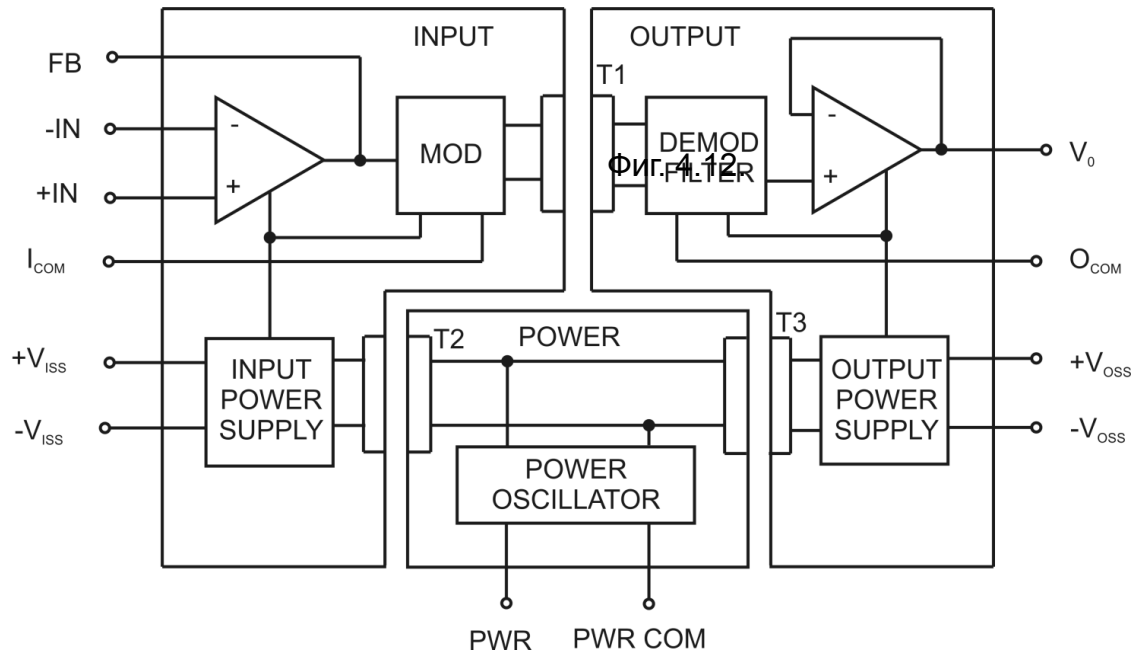
- Методи за реализация



DCP01 усилвател с индуктивно разделяне

4.3. Изолиращи усилватели

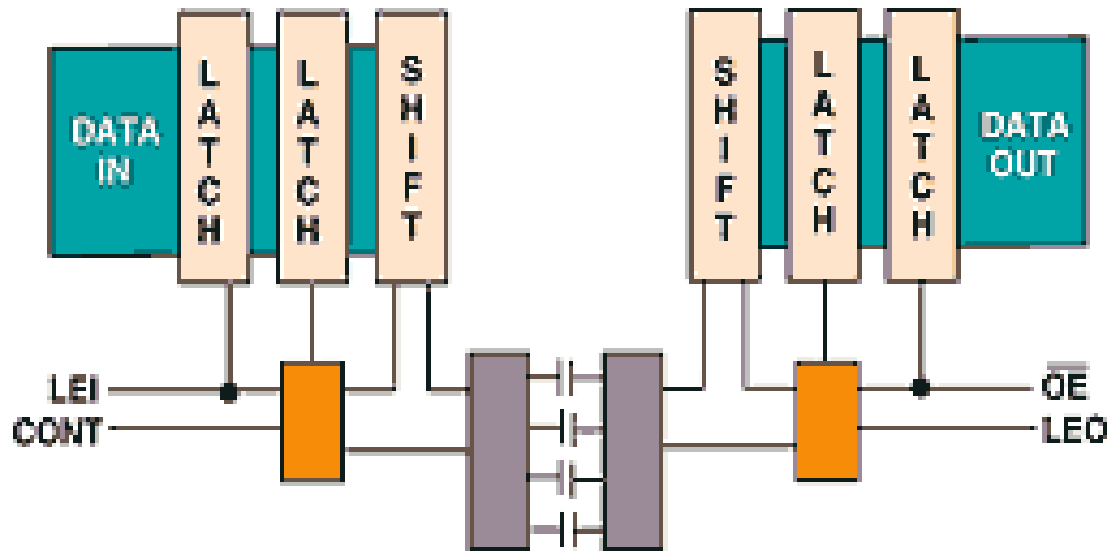
- Методи за реализация



Блок-схема и изводи на разделителен/изолиращ усилвател AD202.

4.3. Изолиращи усилватели

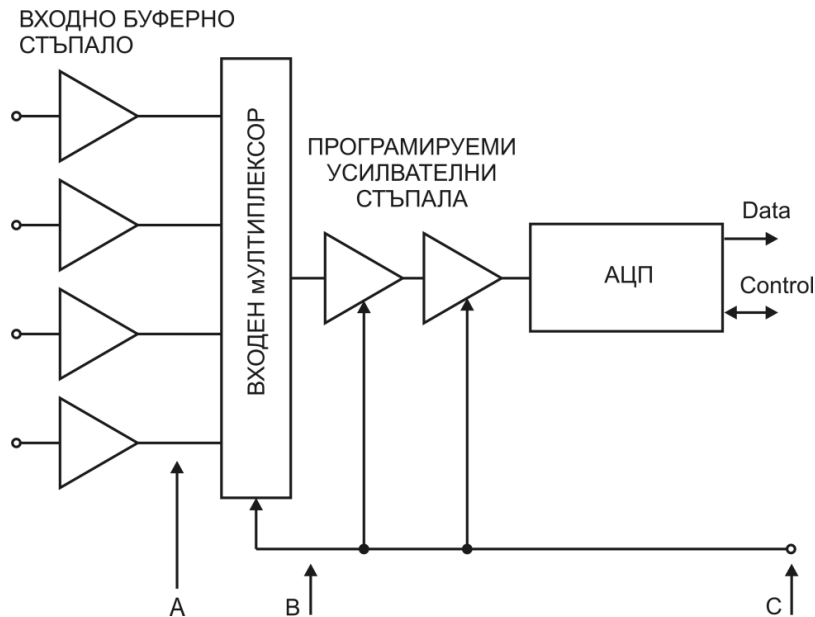
- Методи за реализация



ISO 508 - усилвател с капацитивна разделяне

4.3. Изолиращи усилватели

- Системна архитектура



Различни възможности за позициониране на изолиращите схеми в зависимост от изискванията на системата

Благодаря за вниманието!