

### 3. ОСНОВНИ ЕЛЕКТРОННИ СХЕМИ С ОПЕРАЦИОННИ УСИЛВАТЕЛИ

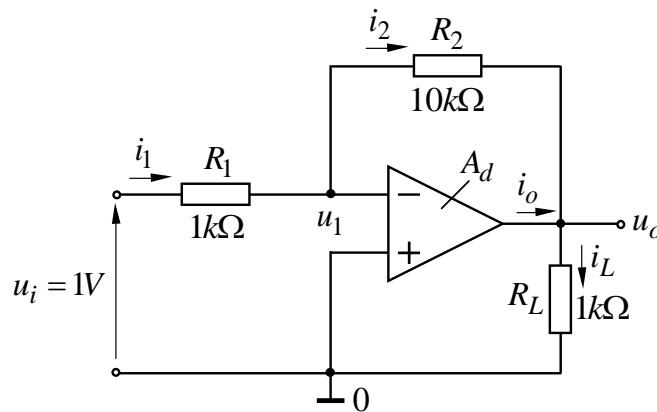
#### 3.1. Инвертиращи и неинвертиращи усилвателни схеми

За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 6.1 от [4].



#### Примери

**3.1.** За схемата на инвертиращ усилвател от **фиг. 3.1** да се определят стойностите на  $u_1$ ,  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $u_o$ ,  $i_L$  и  $i_o$ . Коэффициентът на усилване по напрежение  $A_U = u_o / u_i$ , коэффициентът на усилване по ток  $A_I = i_L / i_i$  и коэффициентът на усилване по мощност  $A_P = P_L / P_i$  за идеален операционен усилвател (ОУ).



Фиг. 3.1.

*Решение:*

Анализът започва с определяне на напрежението на инвертиращия вход на ОУ:

$$u_1 = \frac{-u_o}{A_d} \approx \frac{-u_o}{\infty} \approx 0V \text{ за } A_d \approx \infty \text{ при идеален ОУ по условие;}$$

За  $u_i = 1V$  се получава крайна стойност за изходното напрежение  $u_o$ . При известна стойност на  $u_1$  може да се определи токът  $i_1$  от формулата

$$i_1 = \frac{u_i - u_1}{R_1} = \frac{1V - 0V}{1k\Omega} = 1mA;$$

Тъй като токът към инвертиращия вход на ОУ е нула, целият ток  $i_1$  ще протича през  $R_2$ , и тогава  $i_2 = i_1 = \frac{u_i}{R_1} = 1mA$ ;

Сега може да се определи изходното напрежение:

$$i_2 R_2 + u_o = u_1 \rightarrow u_o = -i_2 R_2 = -\frac{R_2}{R_1} u_i, \text{ тогава } u_o = -\frac{10k\Omega}{1k\Omega} 1V = -10V;$$

Въз основа на закона на Ом за тока през товара се намира

$$i_L = \frac{u_o}{R_L} = \frac{-10V}{1k\Omega} = -10mA. \text{ Знакът минус показва, че токът } i_L \text{ протича от}$$

товара към ОУ на схемата;

$$\text{Изходният ток } i_o \text{ на ОУ е } i_o = i_L - i_2 = -10mA - 1mA = -11mA.$$

Основните динамични параметри на усилвателя са:

– Коефициент на усилване по напрежение

$$A_U = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{10k\Omega}{1k\Omega} = -10V/V \text{ (или } 20dB);$$

$$\text{– Коефициент на усилване по ток } A_I = \frac{i_L}{i_i} = A_U \frac{R_1}{R_L} = -10 \times \frac{1k\Omega}{1k\Omega} = -10A/A$$

(или  $20dB$ );

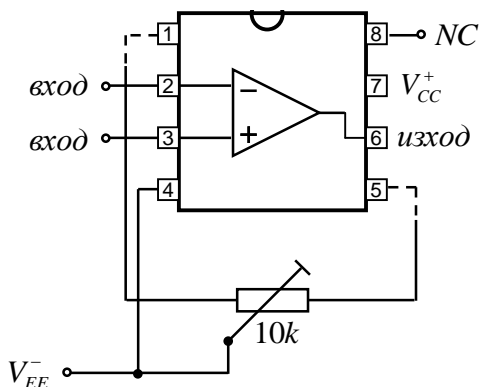
$$\text{– Коефициент на усилване по мощност } A_P = \frac{P_L}{P_i} = \frac{i_L u_o}{i_i u_i} = A_U A_I = 100 \text{ (или}$$

$20dB$ ).

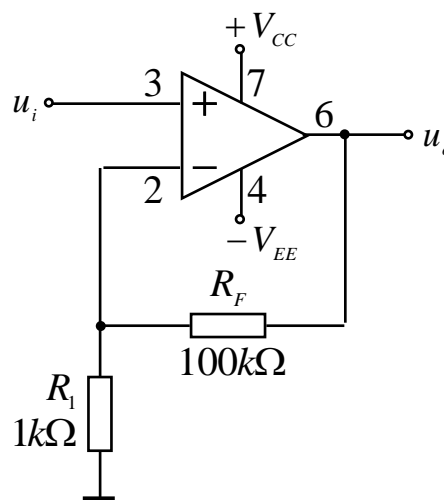
**3.2.** Даден е ОУ тип 741С (фиг. 3.2) със следните параметри за температура

$$25^\circ C: \quad A_{d0} = 10^5, \quad U_{io} = \pm 2mV, \quad \alpha_{U_{io}} = \frac{\partial U_{io}}{\partial T} = \pm 10\mu V/^\circ C, \quad I_{iB} = 300nA,$$

$$I_{io} = \pm 50nA \text{ и } \alpha_{I_{io}} = \frac{\partial I_{io}}{\partial T} = \pm 50pA/^\circ C.$$



Фиг. 3.2.



Фиг. 3.3.

а) Да се състави схема на неинвертиращ усилвател с ОУ 741С и коефициент на усилване по напрежение приблизително равен на 100.

б) Да се изчисли за схемата от подточка а) приведеното към изхода напрежение на грешката  $U_{o,err}$  за температура  $25^\circ C$ .

в) Да се допълни схемата на неинвертиращия усилвател така, че да се осигури възможност за компенсация на изходното напрежение на грешката  $U_{o,err}$ .

г) Да се изчисли напрежението на грешката  $U_{o,err}$  при  $T = 45^\circ C$ , ако е компенсирана стойността му при  $T = 25^\circ C$ .

Решение:

а) Електронната схема на неинвертиращ усилвател, реализирана с ОУ 741С, е представена на **фиг. 3.3**. В нея ОУ е обхванат от ООВ посредством резисторите  $R_F = 100k\Omega$  и  $R_1 = 1k\Omega$ . Входният сигнал  $u_i$  се подава между неинвертиращия вход (+) и масата, а изходното напрежение  $u_o$  се получава между изхода на ОУ и масата на схемата.

Ако се приеме, че ОУ е идеален ( $A_d \approx \infty$ ,  $r_{id} \rightarrow \infty$  и  $r_o \rightarrow 0$ ), за коефициента на усилване по напрежение се намира

$$A_U = \frac{u_o}{u_i} \approx 1 + \frac{R_F}{R_1} = 1 + \frac{100k\Omega}{1k\Omega} = 101.$$

б) В общ вид за схемата от подточка а) изходното напрежение е

$$u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) u_i + U_{o,err}, \text{ където } U_{o,err} \text{ е изходното напрежение на грешката.}$$

За изчисляване на напрежението  $U_{o,err}$ , предизвикано от едновременното действие на напрежението  $U_{io}$  и тока  $I_B^-$ , се използва формулата

$$U_{o,err} = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) \cdot [U_{io} + I_B^-(R_1 \parallel R_F)].$$

Входният поляризиращ ток на инвертиращия вход на ОУ  $I_B^-$  се получава от решението на системата уравнения (вж. подтема 5.2.1 от учебника):

$$\begin{cases} I_{iB} = \frac{I_B^+ + I_B^-}{2} \rightarrow I_B^- = I_{iB} - \frac{I_{io}}{2}, \text{ тогава} \\ I_{io} = I_B^+ - I_B^- \end{cases}$$

за  $I_{iB} = 300nA$ ,  $I_{io} = +50nA$  и  $U_{io} = +2mV$ :

$$U_{o,err} = 101 \times (2mV + 275nA \cdot 1k\Omega) \approx 230mV \text{ и}$$

за  $I_{iB} = 300nA$ ,  $I_{io} = -50nA$  и  $U_{io} = -2mV$ :

$$U_{o,err} = 101 \times (-2mV - 325nA \cdot 1k\Omega) \approx -235mV.$$

Следователно напрежението  $U_{o,err}$  ще се изменя в границите:

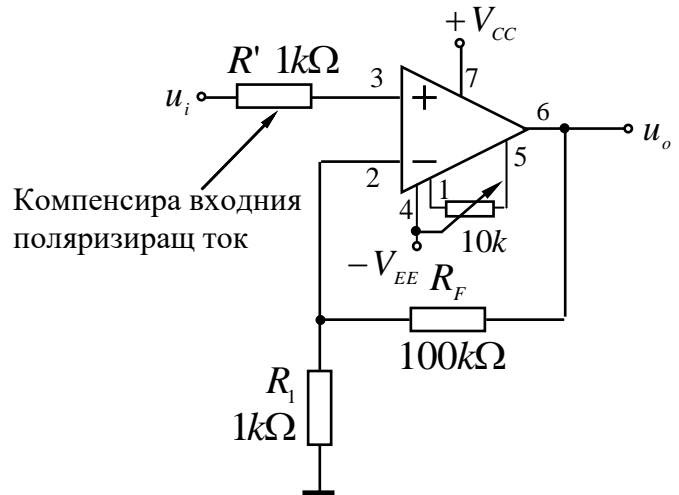
$$-235mV < U_{o,err} < 230mV.$$

в) Компенсация на входния поляризиращ ток  $I_B^-$  може да се постигне, ако последователно на неинвертиращия вход на ОУ се включи резистор  $R' = R_1 \parallel R_F \approx 1k\Omega$  (**фиг. 3.4**). В този случай

$$U_{o,err} \approx \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) [U_{io} - I_B^+ R' + (R_F \parallel R_1) I_B^-] = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) (U_{io} - I_{io} R'),$$

където  $I_B^+ = I_{iB} + \frac{I_{io}}{2}$  е входният поляризиращ ток на неинвертиращия вход на ОУ.

Също така за намаляване на  $U_{o,err}$  в ОУ 741С са предвидени допълнителни изводи 1, 5 и 4 (фиг. 3.2), към които се включва многооборотен тример-потенциометър  $10k\Omega$ . Средната точка (плъзгачът) на потенциометъра се свързва към отрицателното захранващо напрежение  $-V_{EE}$ . При липса на входен сигнал ( $u_i = 0$ ), премествайки



Фиг. 3.4.

плъзгача наляво или надясно, се компенсира напрежението на несиметрия.

г) При  $T = 25^\circ C$ :  $U_{o,err} = 0$  чрез компенсация;

$$\text{При } T = 45^\circ C: U_{o,err} \approx 101 \cdot \left( \frac{\partial U_{io}}{\partial T} \cdot \Delta T + \frac{\partial I_{io}}{\partial T} \cdot \Delta T \cdot R' \right) \rightarrow$$

$$\rightarrow |U_{o,err}| \leq 101 \cdot \left( \frac{10\mu V}{^\circ C} + \frac{50pA}{^\circ C} \cdot 1k\Omega \right) \cdot 20^\circ C \leq 20mV.$$

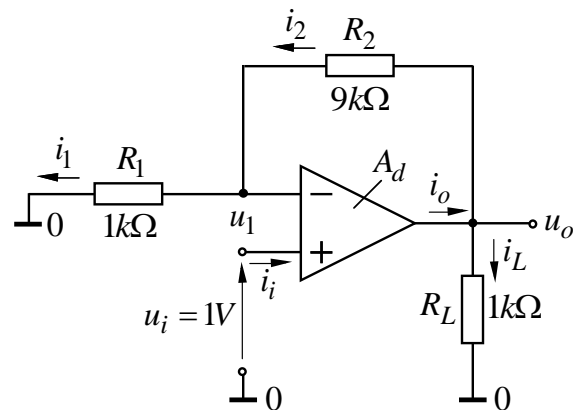


### Задачи

**3.3.** Начертайте опростена еквивалентна схема на операционен усилвател (ОУ) на напрежение (Voltage Feedback Operational Amplifier – VFOA), напишете израза за предавателната характеристика и я изобразете графично.

**3.4.** За ОУ тип VFOA дефинирайте параметрите входно напрежение на несиметрия  $U_{io}$ , входен поляризиращ ток  $I_{iB}$  и входен ток на несиметрия  $I_{io}$ . Какви са типичните стойности за  $U_{io}$ ,  $I_{iB}$  и  $I_{io}$ ?

**3.5.** За схемата на неинвертиращ усилвател от фиг. 3.5 да се определят стойностите на  $i_i$ ,  $u_1$ ,  $i_1$ ,  $i_2$ ,  $u_o$ ,  $i_L$  и  $i_o$ . Коэффициентът на усилване по напрежение  $A_U = u_o / u_i$ , коэффициентът на усилване по ток  $A_I = i_L / i_i$  и коэффициентът на усилване по мощност  $A_P = P_L / P_i$ .



Фиг. 3.5.

**3.6.** За схемата на инвертиращ усилвател, показана на **фиг. 3.6**, са известни:

– операционен усилвател 741С с параметри:  $A_d = 10^5$ ,  $r_{id} = 1M\Omega$ ,  $r_o = 100\Omega$  и  $f_p = 10Hz$ ;

– резистори със съпротивления:  $R_1 = 1k\Omega$  и  $R_F = 10k\Omega$ .

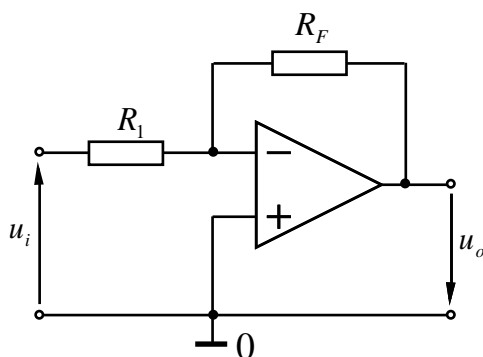
Да се определят следните параметри на схемата:

а) Входното съпротивление  $r_{iA}$ .

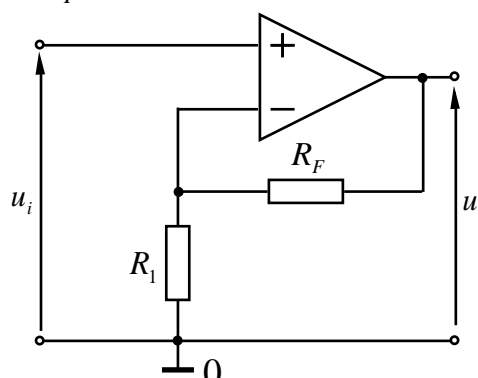
б) Коефициентът на усилване по напрежение  $A_U = u_o / u_i$ , при условие, че ОУ е идеален.

в) Изходното съпротивление  $r_{oA}$ ;

г) Да се изчисли високата гранична честота  $f_p'$ .



Фиг. 3.6.



Фиг. 3.7.

**3.7.** За схемата на неинвертиращ усилвател, показана на **фиг. 3.7**, са известни:

– операционен усилвател 741С с параметри:  $A_d = 10^5$ ,  $r_{id} = 1M\Omega$ ,  $r_{iCM} = 10M\Omega$  и  $r_o = 100\Omega$ ;

– резистори със съпротивления  $R_1 = 100,5\Omega$  и  $R_F = 20k\Omega$ .

Да се определят следните параметри на схемата:

а) Входното съпротивление  $r_{iA}$ .

б) Коефициентът на усилване  $A_U = u_o / u_i$  при условие, че ОУ е идеален.

в) Изходното съпротивление  $r_{oA}$ .

**3.8.** Даден е ОУ тип 741С (**фиг. 3.2**) със следните параметри за температура

$25^\circ C$ :  $A_d = 10^5$ ,  $U_{io} = \pm 2mV$ ,  $\alpha_{U_{io}} = \frac{\partial U_{io}}{\partial T} = \pm 10\mu V / ^\circ C$ ,  $I_{iB} = 300nA$ ,

$I_{io} = \pm 50nA$  и  $\alpha_{I_{io}} = \frac{\partial I_{io}}{\partial T} = \pm 50pA / ^\circ C$ .

а) Да се състави схема на инвертиращ усилвател с ОУ 741С и коефициент на усилване по напрежение приблизително равен на  $-100$ .

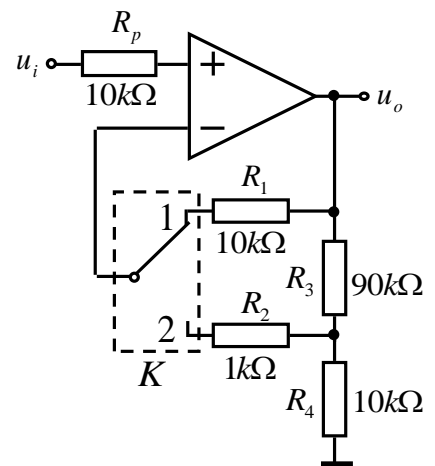
б) Да се изчисли за схемата от подточка а) приведеното към изхода напрежение на грешката  $U_{o,err}$  за температура  $25^\circ C$ .

в) Да се допълни схемата на инвертиращия усилвател така, че да се осигури възможност за компенсация на изходното напрежение на грешката  $U_{o, err}$ .

г) Да се изчисли напрежението на грешката  $U_{o, err}$  при  $T = 45^\circ C$ , ако е компенсирана стойността му при  $25^\circ C$ .

**3.9.** За схемата от **фиг. 3.6**, при условие, че  $R_F = 1M\Omega \pm 1\%$  и  $R_1 = 10k\Omega \pm 1\%$  да се изчисли максимално възможното относително изменение  $\Delta\beta/\beta$  на коефициента на обратната връзка  $\beta$ , дължащо се на отклонения на съпротивленията  $R_F$  и  $R_1$  спрямо номиналните им стойности.

**3.10.** За схемата на програмируем неинвертиращ усилвател, показана на **фиг. 3.8**, ОУ е 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: а) коефициентите на усилване по напрежение  $A_U = u_o/u_i$  за положение 1 и 2 на електронния ключ  $K$  при условие, че ОУ е идеален; б) входното и изходното съпротивление на схемата за положение 1 и 2 на ключа  $K$ ; в) ширината на честотна лента при максимално изходно напрежение 10V.



Фиг. 3.8.

### 3.2. Диференциални и инструментални (измервателни) усилватели

За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 6.2 от [4].



#### Примери

**3.11.** За схемата на диференциалния усилвател с ОУ, показана на **фиг. 3.9**, е известно:  $A_{DU} = 5$ ,  $r_{i1} = r_{i2} = 12k\Omega$  и отношението на резисторите е  $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$ .

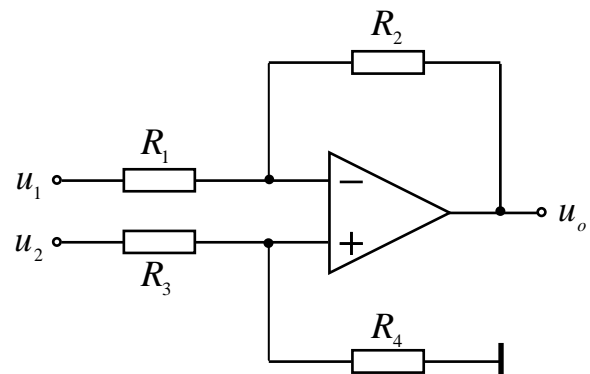
Да се определят:

а) в общ вид предавателната функция на схемата  $u_o = f(u_1, u_2)$ ;

б) съпротивленията на резисторите  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$ .

*Решение:*

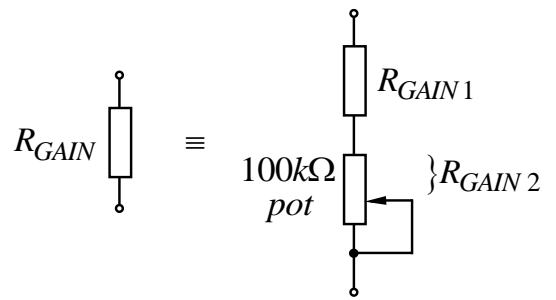
а) Анализът на схемата се извършва поотделно за входни напрежения, подадени съответно на инвертиращия и неинвертиращия вход, прилагайки принципа на суперпозицията валиден за линейни сис-



Фиг. 3.9.



ло изпълнява задачата да преобразува симетричното изходно напрежение от първото стъпало в несиметрично напрежение, като при това се потиска и синфазният сигнал. С други думи, второто стъпало обикновено се проектира с коефициент на усилване 1. Прилагайки този подход е избрано всички резистори във второто стъпало да бъдат със стойности равни, например на  $10k\Omega$ . Тогава задачата се свежда до проектиране на първото стъпало с настройване на коефициента на усилване в обхвата от 2 до 1000. При реализацията на  $R_{GAIN}$  чрез последователно съединение на един резистор  $R_{GAIN1}$  със фиксирано съпротивление и един променлив резистор  $R_{GAIN2}$  с номинална стойност  $100k\Omega$  (фиг. 3.11), може да се запише



Фиг. 3.11.

$$1 + \frac{R'}{R_{GAIN1} + R_{GAIN2}} = 2 \text{ до } 1000 \text{ за } R_2 = R_3 = R',$$

тогава се получава следната система от уравнения

$$1 + \frac{R'}{R_{GAIN1}} = 1000 \text{ и } 1 + \frac{R'}{R_{GAIN1} + 100k\Omega} = 2.$$

Решението на горните две уравнения дава следните резултати  $R_{GAIN1} = 100,2\Omega$  и  $R_2 = R_3 = R' = 50,050k\Omega$ . Най-близките стандартни стойности от еднопроцентовия ред са:  $R_{GAIN1} = 100\Omega$  и  $R_2 = R_3 = R' = 49,9k\Omega$ .



### Задачи

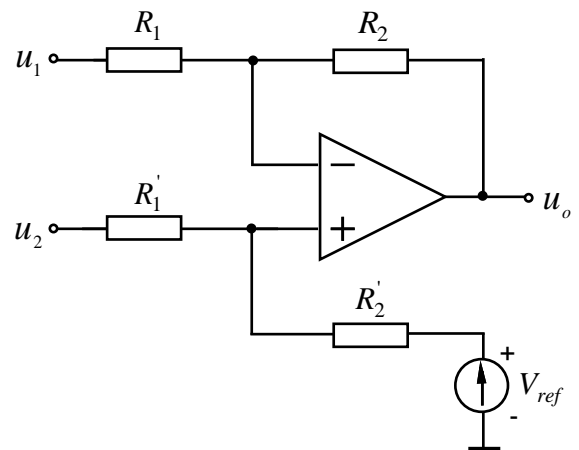
**3.13.** За схемата на диференциалния усилвател с ОУ, показана на **фиг. 3.9**, е известно:  $A_{ДУ} = 10$ ,  $r_{i1} = r_{i2} = 100k\Omega$  и отношението на резисторите е  $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$ .

Да се определят:

- а) в общ вид предавателната функция на схемата  $U_o = f(U_1, U_2)$ ;
- б) съпротивленията на резисторите  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$ .

**3.14.** На **фиг. 3.12** е дадена електронна схема на диференциален усилвател (субтрактор) с ОУ. Ако се знае, че ОУ е идеален,  $R_1 = R'_1 = 25k\Omega$ ,  $R_2 = R'_2 = 100k\Omega$  и  $V_{ref} = 2,5V$ , да се определи:

- а) в общ вид предавателната функция по напрежение  $u_o = f(u_1, u_2, V_{ref})$ ;

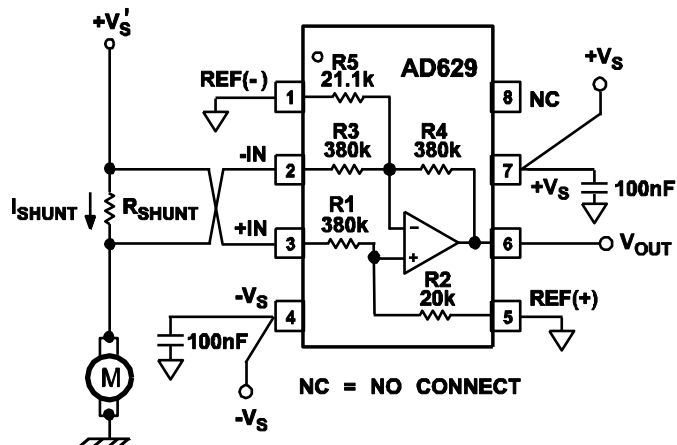


Фиг. 3.12.



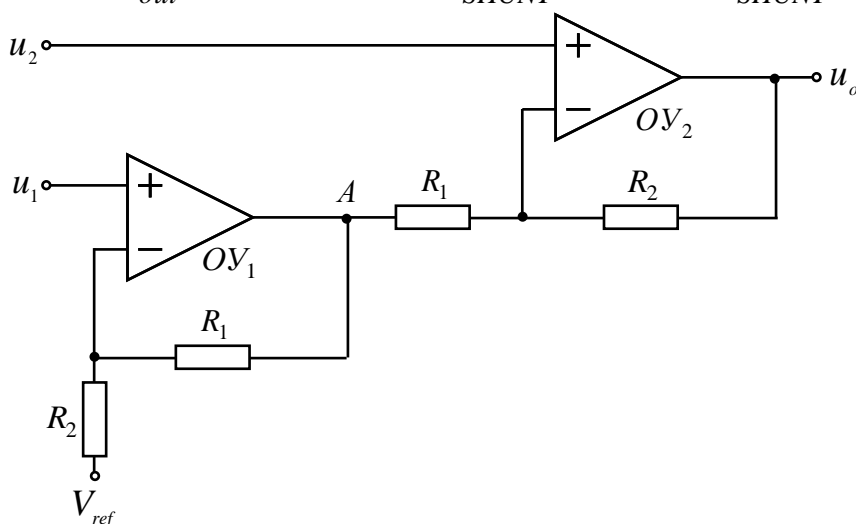
б) изходното напрежение  $u_o$ , ако входното диференциално напрежение е  $u_{id} = u_2 - u_1 = 100mV$ .

**3.15.** На **фиг. 3.13** е дадена принципна схема на диференциален усилвател, реализиран с интегрална схема AD629. ДУ се използва за определяне на тока  $I_{SHUNT}$  чрез измерване на пада на напрежение върху нискоомния резистор  $R_{SHUNT}$  в устройство за управление на двигател  $M$  ( $|V_S'| > |V_S|$ ). Ако се знае, че ОУ е идеален ( $A_d \rightarrow \infty$ ,  $r_{id} \rightarrow \infty$  и  $r_o = 0$ ) и резисторите са подбрани така, че  $R_2 = R_3 \parallel R_5$ , да се намери:



Фиг. 3.13.

- в общ вид предавателната функция на схемата  $V_{out} = f(V_{+in}, V_{-in})$ ;
- напрежението  $V_{out}$ , ако се знае, че  $I_{SHUNT} = 10A$  и  $R_{SHUNT} = 0,1\Omega$ .



Фиг. 3.14.

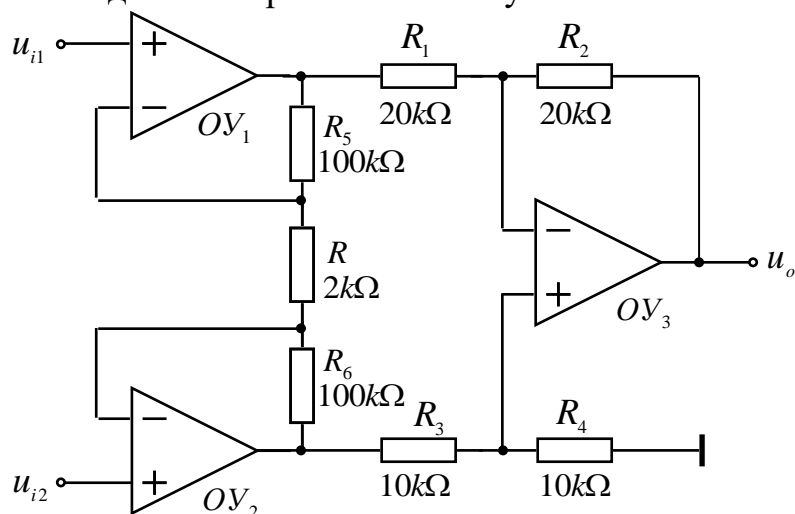
**3.16.** На **фиг. 3.14** е дадена електронна схема на инструментален усилвател с два ОУ. Ако се знае, че  $OY_1$  и  $OY_2$  са идеални ( $A_d \rightarrow \infty$ ,  $r_{id} \rightarrow \infty$  и  $r_o = 0$ ),  $R_1 = 10k\Omega$ ,  $R_2 = 990k\Omega$  и  $U_{ref} = 2,5V$ , да се определи:

- в общ вид предавателната функция на схемата  $u_o = f(u_1, u_2, V_{ref})$ ;
- изходното напрежение  $u_o$ , ако входното диференциално напрежение е  $u_{id} = u_2 - u_1 = 10mV$ .

**3.17.** На **фиг. 3.15** е дадена електронна схема на инструментален усилвател. Операционните усилватели в схемата са с параметри  $A_d = 10^5$ ,  $r_{id} = 1M\Omega$ ,  $r_{iCM} = 10M\Omega$ ,  $r_o = 100\Omega$  и  $CMRR_{OY} = 80dB$ .

Да се определят:

- а) коефициентът на усилване по напрежение на схемата  $A_U$  и коефициентът на потискане на синфазните сигнали  $CMRR$ ;  
 б) входното и изходното съпротивление на усилвателя.



Фиг. 3.15.

### 3.3. Променливотокови усилватели

За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 6.3 от [4].



#### Примери

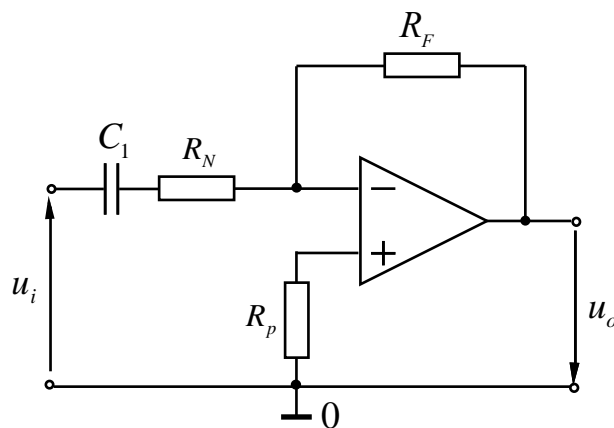
**3.18.** За схемата на инвертиращ променливотоков усилвател, показана на фиг. 3.16, са известни:

– операционен усилвател 741С с параметри:  $A_{d0} = 10^5$ ,  $f_p = 10\text{Hz}$ ,  $U_{io} = \pm 2\text{mV}$  и  $I_{io} = \pm 50\text{nA}$ ;

– резисторите със съпротивления  $R_N = 1\text{k}\Omega$ ,  $R_F = 100\text{k}\Omega$  и  $R_p = 100\text{k}\Omega$  и разделителен кондензатор  $C_1 = 5\mu\text{F}$ .

Да се определят следните характеристики и параметри на схемата:

- а) Приведеното към изхода напрежение на грешката  $U_{o,err}$ .  
 б) Комплексната предавателна функция по напрежение и ниската гранична честота  $f_{b,07}$ , ако се приеме, че ОУ е идеален.  
 в) Комплексната предавателна функция по напрежение и високата гранична честота  $f_{h,07}$  за реален ОУ.



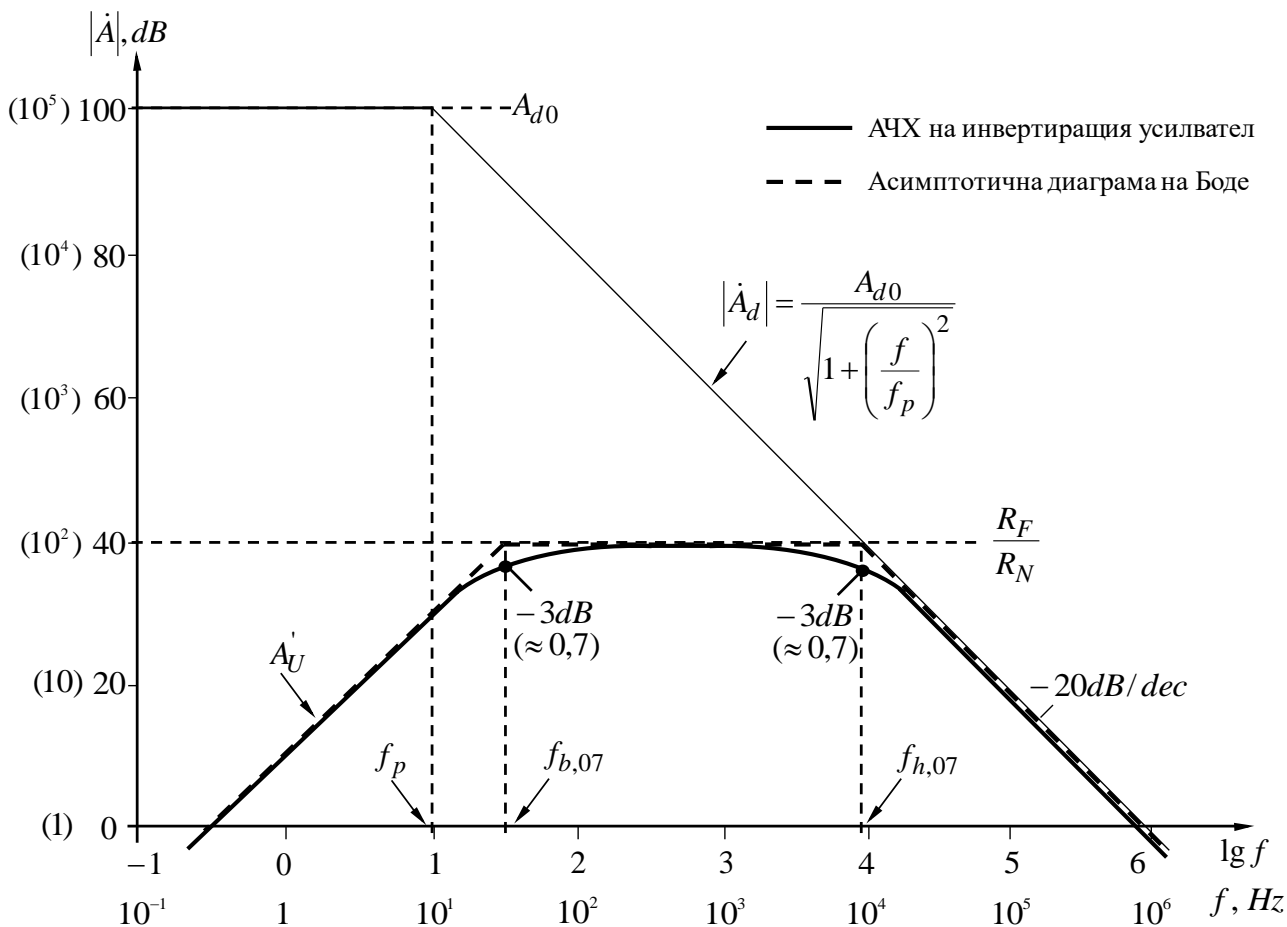
Фиг. 3.16.

г) Да се начертае АЧХ и асимптотичната диаграма на Бодe на усилвателя.

Решение:

а) Изходното напрежение на грешката  $U_{o,err}$  се изчислява при липса на входен сигнал ( $u_i = 0$ ). В този случай кондензаторът  $C_1$  може да се разглежда като отворена верига ( $\omega C_1 \rightarrow 0$ ), като през резистора  $R_N$  няма да протича постоянен ток. Следователно схемата действа като повторител за напреженията, предизвикани от  $I_{io}$  и  $U_{io}$  на ОУ.

$$U_{o,err} \approx U_{io} + I_{io}R_p = \pm 2mV \pm 50nA \cdot 100k\Omega = \pm 7mV.$$



Фиг. 3.17.

б) Ако се приеме, че ОУ е идеален за комплексния коефициент на усилване по напрежение, се намира

$$\dot{A}_U = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx -\frac{R_F}{R_N + \frac{1}{j\omega C_1}} = -\frac{R_F}{R_N} \cdot \frac{1}{1 - j \frac{f_{b,07}}{f}},$$

където  $f_{b,07} = (2\pi R_N C_1)^{-1} \approx 32 Hz$  е ниската гранична честота, при която коефициентът на усилване намалява приблизително с 0,7 пъти или 3dB.

в) При  $f \gg f_{b,07}$  ( $2\pi f \cdot R_N C_1 \gg 1$ ) и ако  $\dot{A}_d \approx \frac{A_{d0}}{1 + j(f/f_p)}$ , т.е. ОУ не е идеален, за комплексния коефициент на предаване на схемата се получава

$$A_U = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx -\frac{R_F}{R_N} \frac{1}{1 + \frac{1}{\beta A_{d0}}} = -\frac{R_F}{R_N} \frac{\beta A_{d0}}{(1 + \beta A_{d0}) \left(1 + j \frac{f}{f_{h,07}}\right)} \stackrel{\beta A_{d0} \gg 1}{\approx} -\frac{R_F}{R_N} \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_{h,07}}}$$

, където  $\beta = \frac{R_N}{R_N + R_F}$  е коефициентът на предаване на ООБ, а

$f_{h,07} = f_p (1 + \beta A_{d0}) \approx f_p A_{d0} \frac{R_N}{R_N + R_F} \approx 10\text{kHz}$  е високата гранична честота на усилвателя.

г) АЧХ и диаграмата на Боде на инвертиращия усилвател, получена въз основа на предавателните функции от подточки б) и в), са дадени на **фиг. 3.17**.



### Задачи

**3.19.** За схемата на неинвертиращ променливотоков усилвател, показана на **фиг. 3.18**, са известни:

– операционен усилвател 741С с параметри:  $A_{d0} = 10^5$ ,  $f_p = 10\text{Hz}$ ,  $U_{io} = \pm 2\text{mV}$  и  $I_{io} = \pm 50\text{nA}$ ;

– резистори със съпротивления  $R_N = 1\text{k}\Omega$ ,  $R_F = 100\text{k}\Omega$  и  $R_p = 101\text{k}\Omega$  и разделителни кондензатори  $C_1 = 5\mu\text{F}$  и  $C_N = 5\mu\text{F}$ .

Да се определят следните характеристики и параметри на схемата:

а) Приведеното към изхода напрежение на грешката  $U_{o,err}$ .

б) Комплексната предавателна функция по напрежение и ниската гранична честота  $f_{b,07}$ , ако се приеме, че ОУ е идеален.

в) Комплексната предавателна функция по напрежение и високата гранична честота  $f_{h,07}$  за реален ОУ.

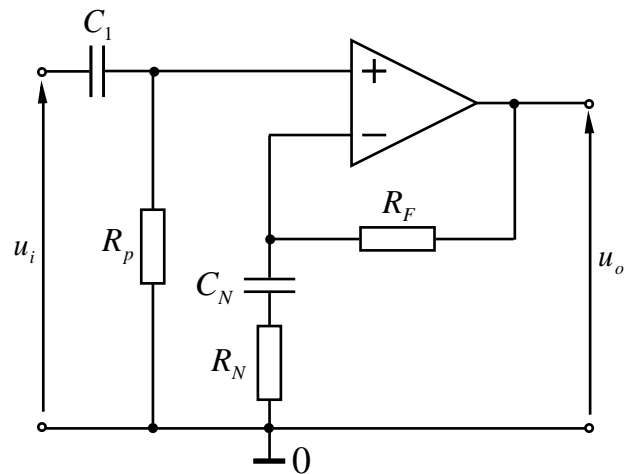
г) Да се начертаят АЧХ и асимптотичната диаграма на Боде на усилвателя.

**3.20.** За схемата на неинвертиращ променливотоков усилвател, показана на **фиг. 3.19**, са известни:

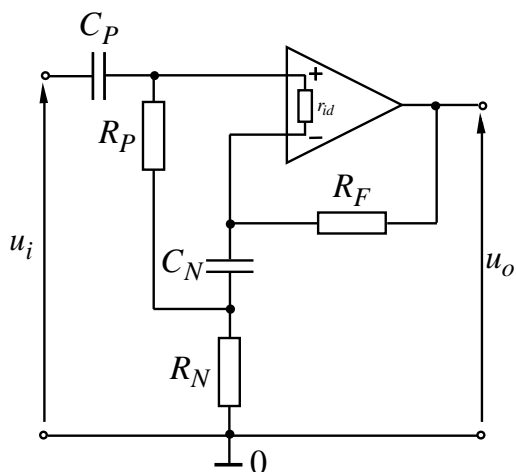
– операционен усилвател 741С с параметри:  $A_{d0} = 10^5$ ,  $r_{id} = 1\text{M}\Omega$  и  $r_{iCM} = 10\text{M}\Omega$ ;

– резистори със съпротивления  $R_N = 1\text{k}\Omega$ ,  $R_F = 100\text{k}\Omega$  и  $R_p = 101\text{k}\Omega$ .

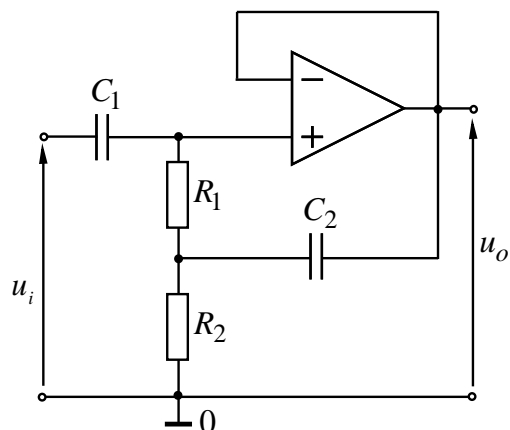
Да се определи коефициентът на усилване по напрежение  $A_U$  за средни честоти ( $\omega C_p, \omega C_N \rightarrow \infty$ ) и входното съпротивление  $r_{iA}$ .



**Фиг. 3.18.**



Фиг. 3.19.



Фиг. 3.20.

**3.21.** За схемата на усилвателя, показана на **фиг. 3.20**, са известни:

– операционен усилвател 741С с параметри:  $A_{d0} = 10^5$ ,  $r_{id} = 1M\Omega$ ,  $r_{iCM} = 10M\Omega$ ,  $U_{io} = \pm 2mV$ ,  $I_{iB} = 300nA$  и  $I_{io} = \pm 50nA$ ;

– резистори със съпротивления  $R_1 = 100k\Omega$  и  $R_2 = 1k\Omega$ .

а) Приведеното към изхода напрежение на грешката  $U_{o,err}$ .

б) коефициентът на усилване по напрежение  $A_U$  за средни честоти ( $\omega C_1, \omega C_2 \rightarrow \infty$ );

в) входното съпротивление  $r_{iA}$ .

**Упътване:** За изчисляване на входното съпротивление на схемата, съгласно

теоремата на Милер (вж. приложение № 2), се намира  $r_{iA} \approx \left( \frac{R_1}{1 - A_U} \right) \parallel 2r_{iCM}$ .

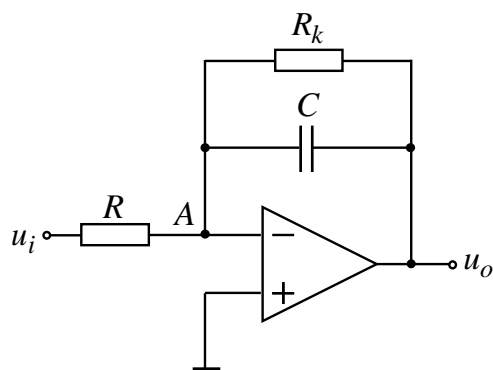
### 3.4. Интегратори и диференциатори

За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 6.4 от [4].



#### Примери

**3.22.** Да се намери изходният сигнал на инвертиращ интегратор с корекция (интегратор на Милер) (**фиг. 3.21**) при условие, че на входа е подаден правоъгълен импулс с амплитуда  $1V$  и продължителност  $1ms$  (**фиг. 3.22а**). Дадени са  $R = 10k\Omega$  и  $C = 10nF$ . Ако интегриращият кондензатор е шунтиран с резистор  $1M\Omega$ , как ще се промени изходната реакция. ОУ е специфициран да се насища при  $\pm 13V$ .



Фиг. 3.21.

Решение:

При подаване на правоъгълен импулс с амплитуда  $1V$  и продължителност  $1ms$  за изходният сигнал се получава

$$u_o(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t 1V \cdot dt, \quad 0 \leq t \leq 1ms,$$

където се приема, че в началния момент от интервала на интегриране ( $t=0$ ) изходното напрежение е нула.

За  $R=10k\Omega$  и  $C=10nF$   $RC=0,1ms$ ,  
тогава

$$u_o(t) = -10 \cdot t, \quad 0 \leq t \leq 1ms,$$

което показва, че изходното напрежение се изменя по линейен закон (фиг. 3.22б). То достига амплитуда  $-10V$  при  $t=1ms$  и остава константа след това.

Изходното напрежение се изменя по линейен закон, тъй като при подаване на правоъгълен импулс с височина  $1V$  се получава константен ток през кондензатора  $1V/10k\Omega=0,1mA$ . Този константен ток  $I=0,1mA$  зарежда кондензатора със заряд  $It$ , и в резултат на това напрежението върху кондензатора се изменя линейно като  $It/C$ . Тогава за изходното напрежение се получава  $u_o = -(I/C)t$ . След  $1ms$ , по условие входното напрежение става нула, зарядният ток също става равен нула. Изходното напрежение спира да се променя. Разряд на кондензатора може да настъпи, ако се отчете крайната стойност на входния поляризиращ ток на ОУ.

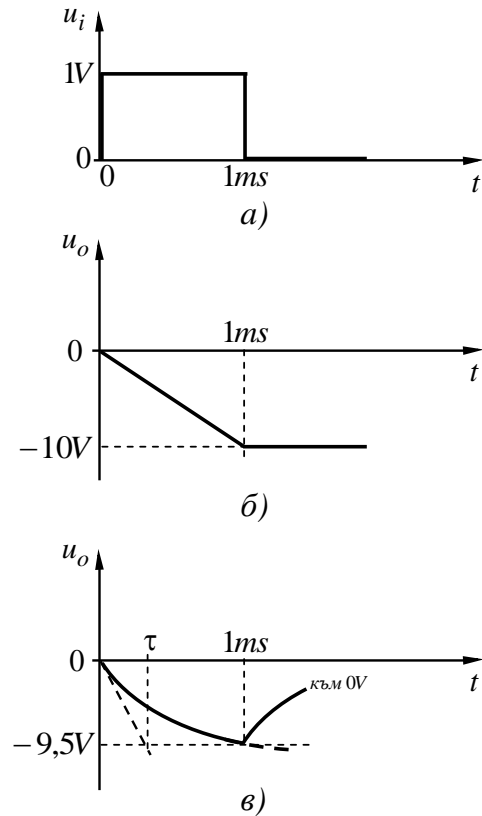
При включването на резистор  $R_k$ , паралелно на интегриращия кондензатор изходното напрежение на схемата може да се намери от следното диференциално уравнение за точка А на фиг. 3.21:

$$\frac{u_i}{R} = -\frac{u_o}{R_k} - C \frac{du_o}{dt} \quad \text{или} \quad -\frac{R}{R_k} \left( R_k C \frac{du_o}{dt} + u_o \right) = u_i = \begin{cases} U_i & \text{за } t > 0 \\ 0 & \text{за } t > 1ms. \end{cases}$$

От диференциалното уравнение при нарастващия и спадания фронт на входното напрежение за изходното напрежение, съответно се получават:

$$u_o(t) = -U_i \frac{R_k}{R} (1 - e^{-t/R_k C}) \quad \text{и} \quad u_o(t) = -U_i \frac{R_k}{R} e^{-t/R_k C}.$$

Както се вижда от решението на диференциалното уравнение, изходното напрежение на интегратора  $u_o(t)$  се доближава асимптотично до стойностите  $|U_o| = (R_k/R)U_i = 10V$  и съответно  $U_o = 0$ . Затова за измерване на времето на



Фиг. 3.22.

установяване на изходното напрежение се използва времеконстантата  $\tau = R_k C = 10ms$ . Тя показва момента от време, за който изходното напрежение достига стойност  $1/e$  при единичен скок на входа.

Разбира се, експоненциалното нарастване на изходното напрежение ще бъде прекъснато при края на импулса, така че за  $t = 1ms$  изходният сигнал ще достигне стойност

$$u_o(1ms) = -1V \frac{1M\Omega}{10k\Omega} (1 - e^{-1ms/10ms}) = -9,5V.$$

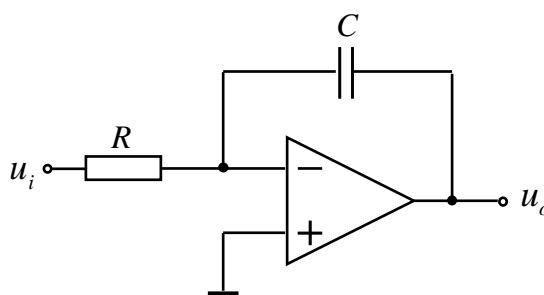
Изходното напрежение за интегратора на Милер при зададения входен импулс е показана на **фиг. 3.22в**. Вижда се, че изходното напрежение нараства почти по експоненциален закон до стойност  $-9,5V$ . За  $t > 1ms$  кондензаторът се разрежда през резистора  $R_k$  с времеконстанта  $\tau = R_k C = 10ms$ .

По условие ОУ достига до насищане при  $\pm 13V$ . Тези напрежения не се достигат в изследваната схема и следователно нямат ефект върху нея.



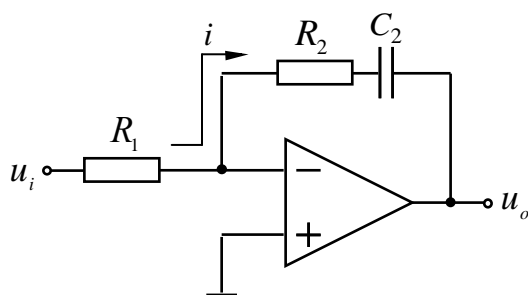
### Задачи

**3.23.** За схемата на интегратора от **фиг. 3.23** се знае, че  $R = 100k\Omega$  и  $C = 100nF$ . Да се пресметнат скоростите на изменение и самото изменение на изходното напрежение  $u_o$  за времеви интервал  $0 \div 30ms$ , ако в този интервал входното напрежение се изменя, както следва:  $u_i = 1V$  (за  $0 \leq t < 5ms$ );  $u_i = 0V$  (за  $5 \leq t \leq 15ms$ ) и  $u_i = -2V$  (за  $15ms < t \leq 30ms$ ).

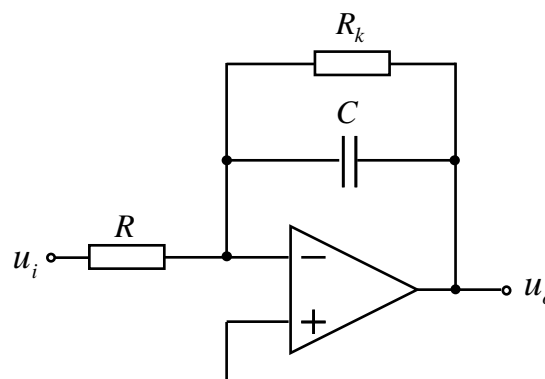


Фиг. 3.23.

Начертайте времедиаграмите на напреженията  $u_i$  и  $u_o$ , като за  $t \leq 0$ ,  $u_o = 0$ .



Фиг. 3.24.



Фиг. 3.25.

**3.24.** На входа на интегратор – усилвател (**фиг. 3.24**) с коефициент  $A_U = R_2/R_1 = 10$  е подадено напрежение с параметри:

$$u_i(t) = \begin{cases} 0 & \text{за } t < 0 \\ U_i & \text{за } t \geq 0 \text{ с } U_i = 1V. \end{cases}$$

Да се изведе изразът за изходното напрежение  $u_o$  и да се начертае формата му за три стойности на времеконстантата  $\tau_2$ :  $\tau_2 = R_2 C_2$  равна на 1, 2 и 5 sec.

**3.25.** На **фиг. 3.25** е дадена интегратор, като  $R_k = 100k\Omega$  и  $R = 10k\Omega$ .

а) Да се намери в общ вид комплексната предавателна функция по напрежение на схемата  $\dot{A}_U(j\omega) = \dot{U}_o / \dot{U}_i$ ;

б) Да се определят в общ вид модулът (АЧХ) и фазата (ФЧХ) на  $\dot{A}_U(j\omega)$  (чрез формули и графики);

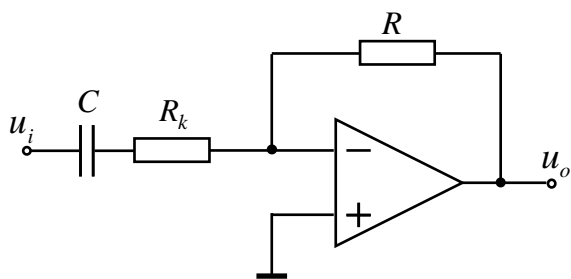
в) Да се начертаят АЧХ на схемата за  $C = 2,2nF$ ,  $4,7nF$  и  $10nF$ .

**3.26.** На **фиг. 3.26** е дадена схема на диференциатор, като  $R = 59k\Omega$  и  $R_k = 5,9k\Omega$ .

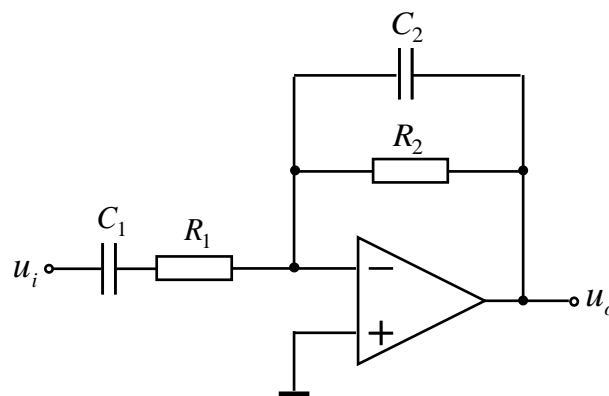
а) Да се намери в общ вид комплексната предавателна функция по напрежение на схемата  $\dot{A}_U(j\omega) = \dot{U}_o / \dot{U}_i$ ;

б) Да се определят в общ вид модулът (АЧХ) и фазата (ФЧХ) на  $\dot{A}_U(j\omega)$  (чрез формули и графики);

в) Да се начертаят АЧХ на схемата за  $C = 270nF$ ,  $27nF$  и  $2,7nF$ .



Фиг. 3.26.



Фиг. 3.27.

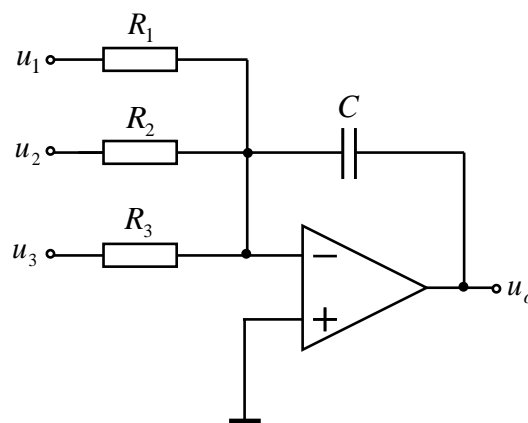
**3.27.** На **фиг. 3.27** е представена схема на диференциатор, като  $R_1 = 1,59k\Omega$ ,  $C_1 = 10nF$ ,  $R_2 = 15,9k\Omega$  и  $C_2 = 1nF$ .

а) Да се намери в общ вид комплексната предавателна функция по напрежение на схемата  $\dot{A}_U(j\omega) = \dot{U}_o / \dot{U}_i$ ;

б) Да се определят в общ вид модулът (АЧХ) и фазата (ФЧХ) на  $\dot{A}_U(j\omega)$  (чрез формули и графики).

в) Да се начертае АЧХ за параметрите на елементите, дадени по-горе.

**3.28.** За схемата на сумиращ интегратор от **фиг. 3.28** при условие, че ОУ е идеален, да се изведе формулата за предавателната функция по напрежение  $u_o = f(u_1, u_2, u_3)$ .



Фиг. 3.28.



## 3.5. Преобразуватели на ток в напрежение, напрежение в ток и ток в ток

За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 6.5 от [4].

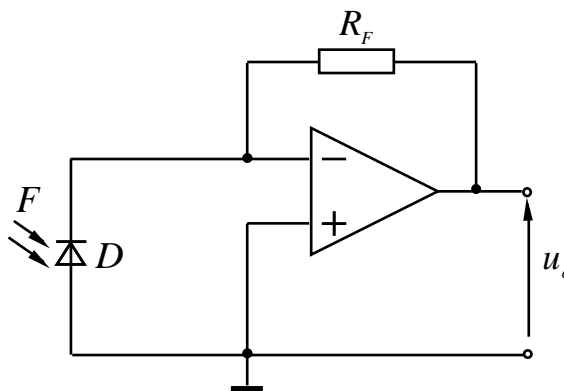


## Примери

**3.29.** За схемата на преобразувател на ток в напрежение, показана на **фиг. 3.29**, са известни:

– фотодиод с параметри: ток на тъмно  $I_S = 10\text{nA}$ , коефициент на чувствителност  $k_\Phi = 0,5\text{A/W}$ ,  $\phi_T = 26\text{mV}$  и  $m = 1,92$ , като

$$i = I_S \left( e^{\frac{u_D}{m\phi_T}} - 1 \right) - k_\Phi \cdot F, \text{ където } F \text{ е светлинният поток;}$$



Фиг. 3.29.

– CMOS ОУ **AD8605** с параметри:  $A_d = 10^6$ ,  $r_{id} = 10^{12}\Omega$ ,  $r_o = 100\Omega$ ,  $U_{io} = \pm 20\mu\text{V}$ ,  $I_{iB} = \pm 0,2\text{pA}$ ,  $I_{io} = \pm 0,1\text{pA}$  и  $\bar{S}_{Uo} = 75,4\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  за  $f = 1\text{Hz}$ .

Да се изчисли:

а) съпротивлението на резистора  $R_F$ , така че да се получи коефициент на предаване на схемата  $1\text{V}/\mu\text{W}$ ;

б) диференциалното съпротивление  $r_G$  на фотодиода за  $U_D = 0\text{V}$ ;

в) входното и изходното съпротивление на схемата;

г) Напрежението на грешката  $U_{o,err}$ , предизвикано от  $U_{io}$ ,  $I_{iB}$  и  $I_{io}$ ;

д) изходното напрежение на грешката  $U'_{o,err}$ , предизвикано от шумовото напрежение на ОУ в обхвата от  $f_1 = 0,001\text{Hz}$  до  $f_2 = 10\text{Hz}$ ;

е) минималният светлинен поток ( $F_{\min}$ ), който може да се регистрира като изходно напрежение  $u_{o,\min} \geq \bar{U}_{oN,tot}$ . При определянето му да се вземе предвид само влиянието на шумовете, а да се счита, че входното напрежение и ток на несиметрия не влияят.

*Решение:*

а) Изходното напрежение на схемата е  $u_o = i_F \cdot R_F \approx k_\Phi \cdot F \cdot R_F$ , където фототокът  $i_F \approx k_\Phi \cdot F$ , тогава  $R_F = \frac{u_o}{k_\Phi \cdot F} \approx \frac{1\text{V} \cdot \text{W}}{1\mu\text{W} \cdot 0,5\text{A}} = 2\text{M}\Omega$ .

б) В общ вид формулата за тока през диода е

$$i = i_D - i_F = I_S \left( e^{\frac{u_D}{m\phi_T}} - 1 \right) - k_\Phi \cdot F, \text{ където } i_D = I_S \left( e^{\frac{u_D}{m\phi_T}} - 1 \right)$$

$$\rightarrow \left. \frac{di}{du_D} \right|_{u_D=0} = \frac{I_S}{m\varphi_T} = \frac{1}{r_G} \rightarrow r_G = 5M\Omega.$$

$$\text{в) } r_{iA} \approx \frac{R_F}{1+A_d} \stackrel{A_d \gg 1}{\approx} \frac{R_F}{A_d} = \frac{2M\Omega}{10^6} = 2\Omega \text{ (ефект на Милер, вж. Приложение 2) и}$$

$$r_{oA} \approx \frac{r_o}{1+\beta A_d} \approx \frac{r_o}{A_d} \left(1 + \frac{R_F}{r_G}\right) \approx \frac{100\Omega}{10^6} \left(1 + \frac{2}{5}\right) \approx 0,14m\Omega, \text{ където } \beta = r_G / (r_G + R_F).$$

$$\text{г) } U_{o,err} \approx \left(1 + \frac{R_F}{r_G}\right) \cdot [U_{io} - I_B^-(r_G \parallel R_F)] \rightarrow$$

$$\rightarrow |U_{o,err}| \leq \left(1 + \frac{2}{5}\right) \cdot [20\mu V + 0,15pA \cdot 1,4M\Omega] \approx 30\mu V.$$

д) изходното напрежение на грешката е  $\bar{U}'_{o,err} \approx \left(1 + \frac{R_F}{r_G}\right) \bar{U}_N$ , където  $\bar{U}_N$  е

шумовото напрежение на ОУ.

$$\bar{U}_N = \sqrt{\int_{0,001Hz}^{10Hz} \frac{\bar{S}_{U_o}^2}{\Delta f} \cdot df} = \sqrt{\int_{0,001Hz}^{10Hz} \frac{5,69 \cdot 10^{-15} V^2}{f} \cdot df} = \sqrt{5,69 \cdot 10^{-15} \cdot \ln \frac{10}{0,001} V^2} \approx 229nV$$

$$\text{Тогава } \bar{U}'_{o,err} \approx \left(1 + \frac{R_F}{R_G}\right) \bar{U}_N \approx 0,32\mu V.$$

е) За определяне на потока  $F_{\min}$  първоначално се изчисляват шумовите напрежения, предизвикани от резистора  $R_F$ , и диференциалното съпротивление на фотодиода за  $\Delta f = 10Hz$  и  $T = 300K$ :

$$U_{R_G N} = \sqrt{4kT \cdot R_G \cdot \Delta f} \approx 0,9\mu V \text{ и } U_{R_F N} = \sqrt{4kT \cdot R_F \cdot \Delta f} \approx 0,57\mu V.$$

Тогава за общото шумово напрежение и потока  $F_{\min}$  се получава

$$U_{oN,tot} = \sqrt{0,32^2 + \left(\frac{R_F}{R_G} \cdot 0,9\right)^2 + 0,57^2} \mu V \approx 0,74\mu V \rightarrow F_{\min} \approx \frac{0,74\mu V}{1V / \mu W} = 0,74 \cdot 10^{-12} W.$$

**3.30.** За базовата схема на източник на ток за заземен товар (или т.нар. токова помпа на Хоуланд) от **фиг. 3.30** да се намерят:

а) в общ вид предавателната функция  $i_L = f(u_2)$  за идеален ОУ и условието, при което схемата реализира независим (от товара) източник на ток;

б) стойностите на  $i_L$ ,  $i_2$ ,  $i_{R_4}$  и  $u_o$  за  $R_L = 1k\Omega$  и  $2k\Omega$ , ако се знае че  $u_1 = 0V$ ,  $u_2 = 1V$  и  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 1k\Omega$ .

*Решение:*

а) За определяне на предавателната функция се съставят следните уравнения по първия закон на Кирхоф за интертирация и неинвертирация вход, при условие че ОУ е идеален:

$$(3.1) \quad \frac{u_o - u_L}{R_2} = \frac{u_L}{R_1} \text{ и}$$

$$(3.2) \quad \underbrace{\frac{u_2 - u_L}{R_3}}_{i_2} + \underbrace{\frac{u_o - u_L}{R_4}}_{i_{R_4}} = i_L.$$

Въз основа на формула (3.1) за напрежението в изхода на ОУ се получава

$$(3.3) \quad u_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} u_L.$$

След заместване на (3.3) в (3.2) за изходния ток  $i_L$  се намира

$$(3.4) \quad i_L = \frac{1}{R_3} u_2 - \left( \frac{1}{R_3} - \frac{R_2}{R_1 R_4} \right) u_L.$$

Ако се приравни към нула коефициентът пред  $u_L$ , се получава условието за баланс на съпротивленията на резисторите, т.е.  $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$ . Тогава формулата за

изходния ток добива вида

$$(3.5) \quad i_L = u_2 / R_3;$$

б) Определят се стойностите на  $i_L$ ,  $i_2$ ,  $i_{R_4}$  и  $u_o$  за  $R_L = 1k\Omega$  и  $2k\Omega$ , ако се знае че  $u_2 = 1V$  и  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 1k\Omega$ :

– При  $R_L = 1k\Omega$

$$i_L = \frac{u_2}{R_3} = \frac{1V}{1k\Omega} = 1mA,$$

$$i_2 = \frac{u_2 - i_L R_L}{R_3} = \frac{1V - 1V}{1k\Omega} = 0A,$$

$$i_{R_4} = i_L - i_2 = 1mA - 0A = 1mA \text{ и}$$

$$u_o = i_L R_L + i_{R_4} R_4 = 1V + 1V = 2V;$$

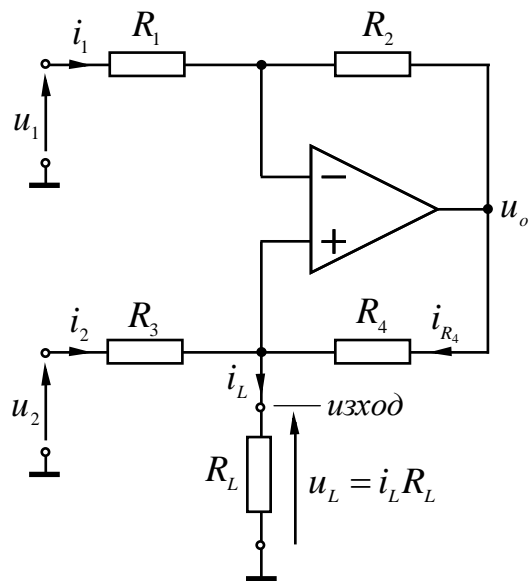
– При  $R_L = 2k\Omega$

$$i_L = \frac{u_2}{R_3} = \frac{1V}{1k\Omega} = 1mA, \quad i_2 = \frac{u_2 - i_L R_L}{R_3} = \frac{1V - 1mA \cdot 2k\Omega}{1k\Omega} = -1mA,$$

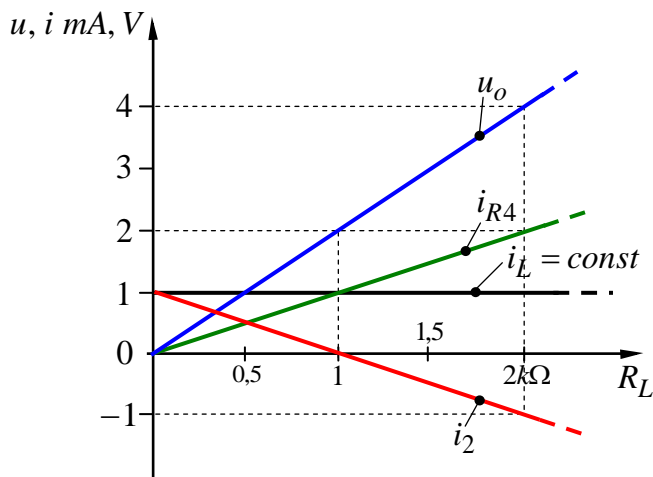
$$i_{R_4} = i_L - i_2 = 1mA - (-1mA) = 2mA \text{ и}$$

$$u_o = i_L R_L + i_{R_4} R_4 = 1mA \cdot 2k\Omega + 2mA \cdot 1k\Omega = 4V.$$

На **фиг. 3.31** са показани в графичен вид получените зависимости на  $i_L$ ,  $i_2$ ,  $i_{R_4}$  и  $u_o$  от товара  $R_L$ . Вижда се, че изходният ток  $i_L$  не се променя при



Фиг. 3.30.



Фиг. 3.31.

промяна на товара. В същото време токът  $i_2$  намалява от  $1mA$  през нулата и за  $R_L = 2k\Omega$  е  $-1mA$  (т.е. променя попоката си). Токът  $i_{R_4}$  нараства, при увеличаване на  $R_L$ , като е резултат на това се увеличава и изходният на ОУ. Изходното напрежение  $u_o$  на ОУ също се увеличава, като за  $R_L = 2k\Omega$  има стойност  $4V$ . При достигане на напрежението на насищане, изходният ток ще започне да намалява, вместо да остане константа, т.е. схемата ще престане да работи като генератор на ток.

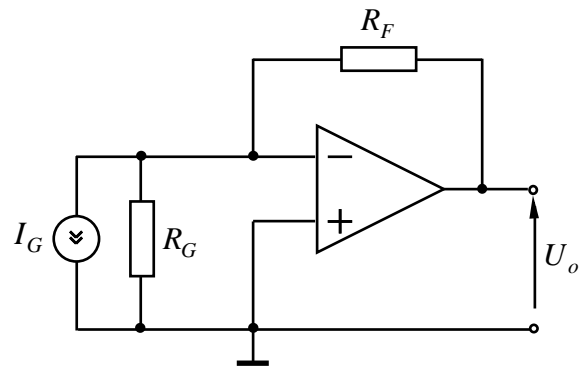


**Задачи**

**3.31.** За схемата на преобразувател на ток в напрежение от **фиг. 3.32** са известни  $R_F = 20M\Omega$  и източник на ток  $I_G$  с вътрешно съпротивление  $R_G = 5M\Omega$ . Да се изчисли:

а) напрежението в изхода на схемата  $U_o$  за  $I_G = -100nA$ ;

б) изходното напрежение на грешката  $U_{o,err}$ , ако се знае, че ОУ е с входно напрежение на несиметрия  $U_{io} = \pm 0,5mV$ , входен поляризиращ ток  $I_{iB} = 3pA$  и входен ток на несиметрия  $I_{io} = \pm 1pA$ .



**Фиг. 3.32.**

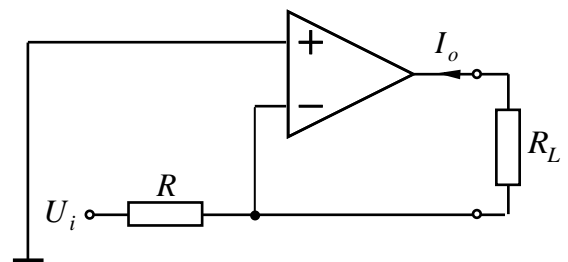
**3.32.** За схемата на преобразувател на напрежение в ток, показана на **фиг. 3.33** ОУ, е с параметри:  $A_d = 10^5$ ,  $I_{iB} = 300nA$ ,

$I_{io} = \pm 50nA$  и  $U_{io} = \pm 2mV$ . Да се изчисли:

а) съпротивлението на  $R$  за  $U_i = 200mV$  и  $I_o = 100\mu A$ ;

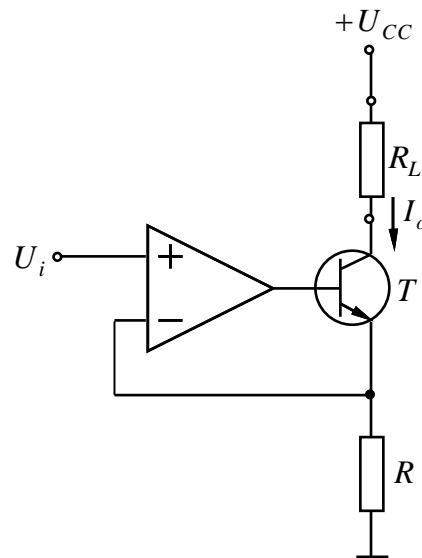
б) входното и изходното съпротивление на преобразувателя ( $r_{iA}$  и  $r_{oA}$ );

в) изходният ток на грешката  $I_{o,err}$ .



**Фиг. 3.33.**

**3.33.** На **фиг. 3.34** е дадена схема на преобразувател на напрежение в ток с биполярен транзистор  $T$ . Ако се знае, че ОУ е идеален ( $A_d \rightarrow \infty$ ,  $r_{id} \rightarrow \infty$  и  $r_o = 0$ ),  $U_{cc} = 15V$ ,  $R = 50\Omega$  и коефициентът на



**Фиг. 3.34.**

усилване по ток на транзистора  $\beta = 100$ , да се определят:

- в общ вид предавателната функция  $I_o = f(U_i)$ ;
- изходният ток  $I_o$  за  $U_i = 0V$ ,  $2V$  и  $5V$ ;
- граничните стойности на  $R_L$ , за които токът  $I_o$  не се променя, при  $U_i = 1V$  и  $2V$  (приема се  $U_{CEsat} \approx 0V$ ).

**3.34.** За схемата на преобразувател напрежение – ток със заземен товар, показана на **фиг. 3.30**, са известни:  $u_1 = 1V$ ,  $u_2 = 0V$  и  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 1k\Omega$ . Да се намерят:

- в общ вид предавателната функция  $i_L|_{u_2=0} = f(u_1)$  и условието, при което схемата реализира независим източник на ток.
- стойностите на  $i_L$ ,  $i_1$ ,  $i_{R_1}$  и  $u_o$  за  $R_L = 1k\Omega$  и  $2k\Omega$ .

**3.35.** На **фиг. 3.35** е показана схема на инвертиращ преобразувател напрежение – ток със заземен товар. Схемата е съставена от един ДУ с мощен ОУ **РА09**, един повторител на напрежение с ОУ **741С** и допълнителен токозадаващ резистор  $R$ . За схемата са известни: максимален изходен ток  $i_{Lmax} = 250mA$  за  $u_i = -10V$  и напрежение върху резистора  $R$  за максималния ток  $u_o - u_L = 2,5V$ . Да се определи:

- в общ вид предавателната функция  $i_L = f(u_i)$  и условието, при което схемата реализира независим източник на ток. При анализа да се приеме, че ОУ са идеални;

- съпротивлението на резистора  $R$  за  $i_{Lmax} = 250mA$  и  $u_o - u_L = 2,5V$ ;

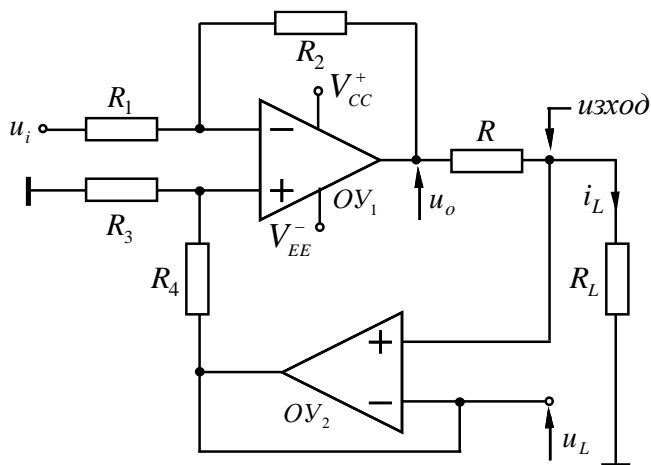
- отношението на съпротивленията на резисторите  $R_2 / R_1$ ;

- разсейваната мощност в резистора  $R$  за  $i_{Lmax} = 250mA$ ;

- граничната стойност на товарното съпротивление  $R_L$ , за която изходният ток  $i_{Lmax}$  остава непроменен, както и максималната консумирана мощност на ОУ<sub>1</sub> от хранящия източник, ако за ОУ<sub>1</sub>  $V_{CC}^+ = -V_{EE}^- = 15V$  и  $U_{om}^+ = -U_{om}^- = 12V$ .

**Упътване:** При определяне на предавателната функция на схемата да се използват следните зависимости:  $i_L = \frac{u_o - u_L}{R}$  и  $u_o = -\frac{R_2}{R_1}u_i + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\frac{R_3}{R_3 + R_4}u_L$ .

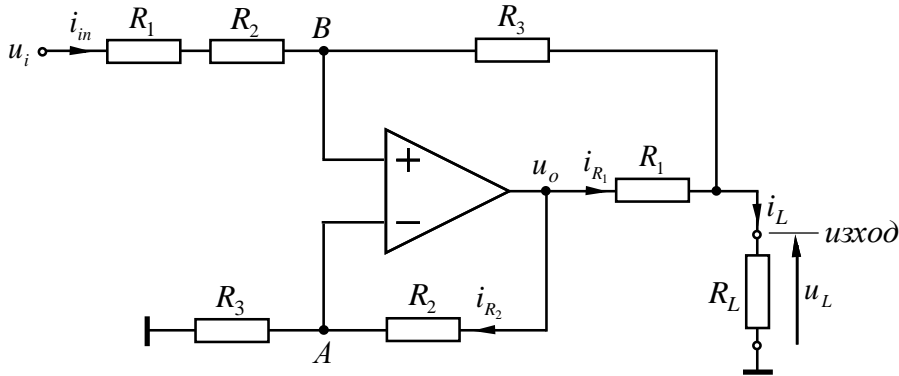
**3.36.** На **фиг. 3.36** е дадена схема на преобразувател на напрежение в ток със заземен товар. Схемата е съставена от един мощен ОУ тип **РА07** (Арех Micro-



**Фиг. 3.35.**

tech.) и шест резистора, формиращи обратните връзки. За схемата са известни:  $u_i = 1V$ ,  $R_1 = 1\Omega$ ,  $R_2 = 10k\Omega$  и  $R_3 = 10k\Omega$ . Да се намерят:

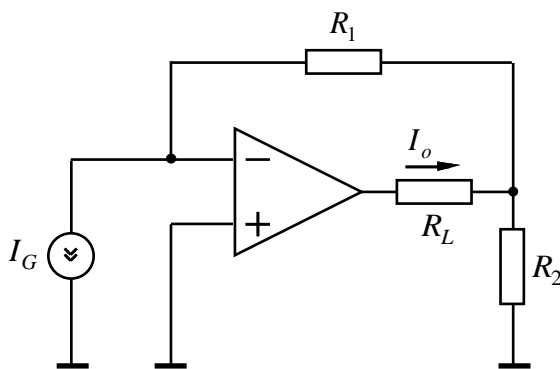
- а) в общ вид предавателната функция  $i_L = f(u_i)$  за идеален ОУ и условието, при което схемата реализира независим (от  $R_L$ ) източник на ток;
- б) стойностите на  $i_L$ ,  $i_{in}$ ,  $i_{R_1}$ ,  $i_{R_2}$  и  $u_o$  за  $R_L = 1\Omega$  и  $2\Omega$ .



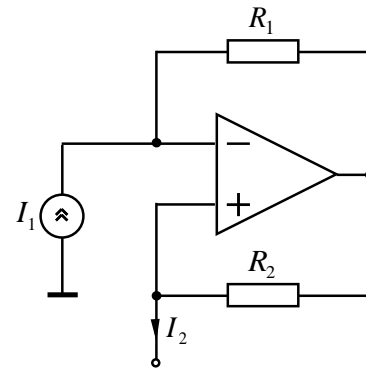
Фиг. 3.36.

**3.37.** На **фиг. 3.37** е показана електронна схема на преобразувател ток в ток с ОУ. За схемата е известно: ОУ **AD744C** с входен поляризиращ ток  $I_{iB} = 30pA$  и входен ток на несиметрия  $I_{io} = 10pA$ ; резисторите със съпротивления:  $R_1 = 100k\Omega$  и  $R_2 = 1k\Omega$ . Да се намери:

- а) в общ вид предавателната функция на схемата  $A_I = I_o / I_G$  за идеален ОУ;
- б) изходният ток  $I_o$  за  $I_G = 1\mu A$ ;
- в) грешката от входния поляризиращ ток  $\delta_{I_{iB}} = (I_{iB}^- / I_G) 100\%$ , ако се знае, че  $I_G = 1\mu A$ .



Фиг. 3.37.



Фиг. 3.38.

**3.38.** На **фиг. 3.38** е показана схема на инвертиращ преобразувател на ток в ток (усилвател на ток или токово огледало с ОУ). Схемата е реализирана с един мощен ОУ тип **PA07** (Арех Microtech.) и два резистора. Ако се приеме, че ОУ е идеален,  $R_1 = 1k\Omega$  и  $R_2 = 1\Omega$ , да се намери:

- а) в общ вид предавателната функция  $I_2 = f(I_1)$ ;
- б) изходният ток  $I_2$  за  $I_1 = 0$ ,  $1mA$  и  $2mA$ .