

## Основни градивни стъпала в аналоговите интегрални схеми



### Образователни цели

След приключване на обучението по тази глава студентите трябва да могат:

- Да чертаят основните градивни стъпала с веригите по постоянен ток, използвани в аналоговите интегрални схеми, и да отбелязват посоките на токовете и напреженията, приети условно за положителни.
- Да анализират входните и изходните вериги по постоянен ток на основните стъпала и да изчисляват параметрите на елементите, осигуряващи работната точка.
- Да анализират по променлив ток основните стъпала и да изчисляват техните динамични параметри за средни честоти.
- Да анализират поведението на крайните стъпала, работещи в клас *B* и клас *AB* на усилване, и да изчисляват основните енергийни параметри  $P_{CC\max}$ ,  $P_{L\max}$ ,  $P_{C\max}$  и  $\eta$ .



**Ключови думи:** генератор на ток, токово огледало, генератор на опорно напрежение, схема Дарлингтон, диференциален усилвател, каскоден усилвател, крайно стъпало, комплементарна двойка транзистори.

## 2.1. Задаващи източници на ток, токови огледала и генератори на опорно напрежение

За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 3.1 от [5].



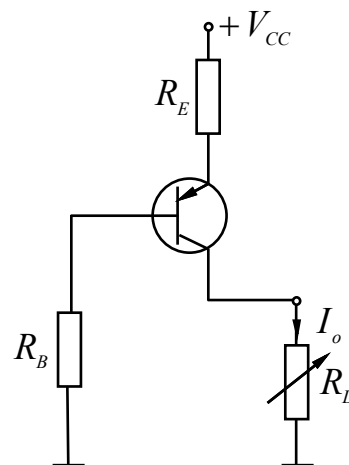
### Пример

**2.1.** За схемата на генератор на ток, показана на фиг. 2.1, са дадени:  $I_o = 3\text{mA}$ ,  $V_{CC} = 9\text{V}$ ,  $R_{L\max} = 1\text{k}\Omega$ ,  $U_{BE} = -0,7\text{V}$ ,  $U_{CE\min} = 2\text{V}$ ,  $U_T = 26\text{mV}$ ,  $r_{CE} = 20\text{k}\Omega$  и  $\beta = 80$ . Да се определят:

- а) съпротивленията на резисторите  $R_E$  и  $R_B$ ;
- б) изходното съпротивление на схемата.

*Решение:*

- а) Прилагайки втория закон на Кирхоф за изходната



Фиг. 2.1.

верига на схемата, се получава:  $V_{CC} = I_o R_E + U_{CE \min} + I_o R_{L \max} \rightarrow$

$$R_E = \frac{V_{CC} - U_{CE \min} - I_o R_{L \max}}{I_o} = \frac{9V - 2V - 3mA \cdot 1k\Omega}{3mA} = 1,33k\Omega.$$

Описвайки входната верига, се получава:  $-\frac{I_o}{\beta} R_B + U_{CE \min} - U_{BE} + I_o R_{L \max} = 0$

$$\rightarrow R_B = \frac{U_{CE \min} - U_{BE} + I_o R_{L \max}}{I_o / \beta} = \frac{2V - 0,7V + 3V}{3mA / 80} = 115k\Omega.$$

$$\text{б) } R_{oA} = r_{CE} (1 + S R_E) = 20k\Omega (1 + 115mS \cdot 1,33k\Omega) = 3,08M\Omega,$$

$$\text{където } S \approx \frac{I_o}{U_T} = \frac{3mA}{26mV} \approx 115mS.$$



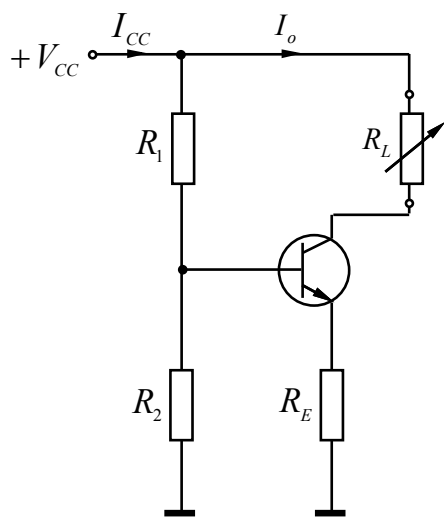
### Задачи

**2.2.** За схемата на генератор на ток, показана на фиг. 2.2, са дадени:  $V_{CC} = 20V$ ,  $I_{CC} = 2mA$ ,  $I_o = 1mA$ ,  $R_{L \max} = 5k\Omega$ ,  $U_{BE} = 0,6V$ ,  $U_{CE \text{sat}} = 2V$ ,  $r_{CE} = 60k\Omega$ ,  $\beta = 200$ ,  $U_T = 26mV$  и  $I_B \ll I_{R2}$ ,  $I_o$ . Да се определят:

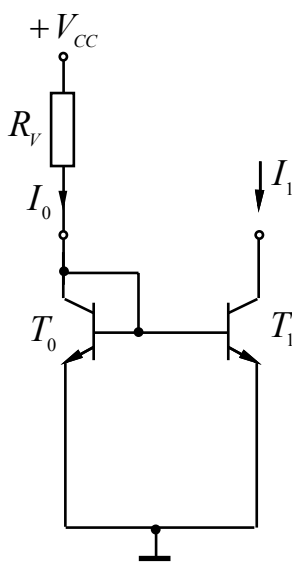
- съпротивленията на резисторите  $R_E$ ,  $R_1$  и  $R_2$ ;
- изходното съпротивление на схемата.

**2.3.** За схемата на токово огледало, показана на фиг. 2.3, са дадени:  $V_{CC} = 15V$ ,  $U_{BE} = 0,6V$ ,  $R_V = 144k\Omega$  и отношението на емитерните преходи на транзисторите  $T_1$  и  $T_0$  е  $S_{E_{T1}} / S_{E_{T0}} = 1,2$ . Да се определят токовете  $I_0$  и  $I_1$ .

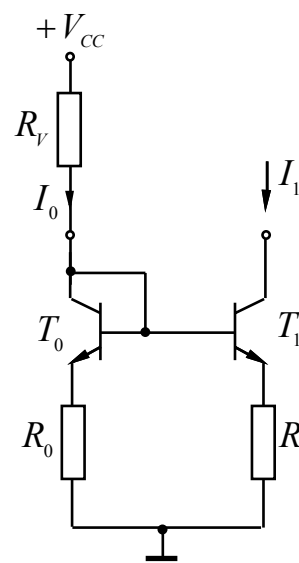
**2.4.** За схемата на токово огледало, показана на фиг. 2.4, са дадени:  $V_{CC} = 12V$ ,  $U_{BE} = 0,6V$ ,  $R_0 = 15k\Omega$ ,  $R_1 = 12k\Omega$  и  $I_0 = 0,5mA$ . Да се изчислят съпротивлението на резистора  $R_V$  и изходният ток  $I_1$ .



Фиг. 2.2.



Фиг. 2.3.

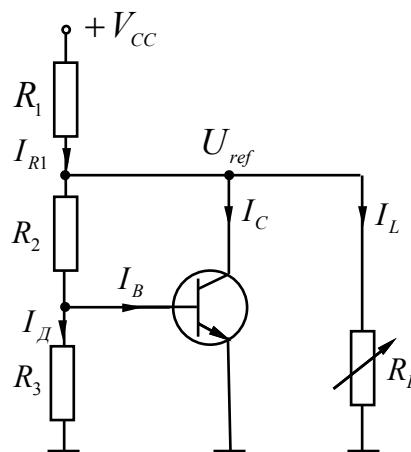


Фиг. 2.4.

2.5. Да се начертае схема на генератор на опорно напрежение с три диода и един резистор. Да се определи големината на изходното (опорното) напрежение  $U_{ref}$ , ако се знае, че падът на напрежение върху всеки от диодите е  $0,6V$ .

2.6. За схемата на източник на опорно напрежение, показана на фиг. 2.5, са известни:  $V_{CC} = 9V$ ,  $U_{BE} = 0,7V$ ,  $R_3 = 1k\Omega$ ,  $\beta = 100$ ,  $I_D = 10I_B$  и опорно напрежение  $U_{ref} = 3V$ . Да се изчислят:

- съпротивлението на резистора  $R_2$ ;
- съпротивлението на резистора  $R_1$  при  $I_L = 0$ ;
- изходното съпротивление на източника на опорно напрежение  $R_{oA}$ .



Фиг. 2.5.

## 2.2. Съставни транзистори, каскодни усилватели и диференциални усилватели

За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 3.2 – 3.4 от [5].



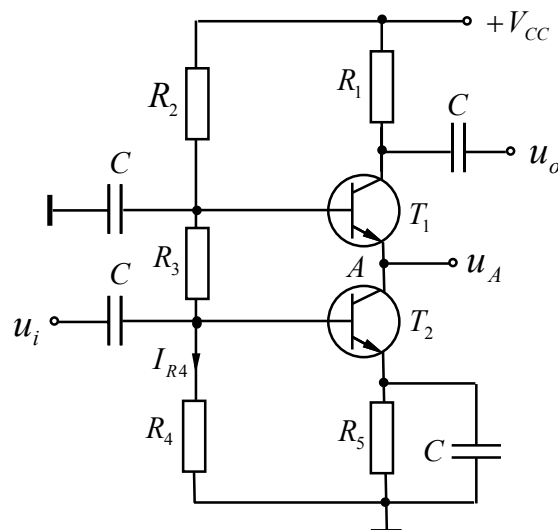
### Примери

2.7. На фиг. 2.6 е дадена схема на каскоден усилвател ОЕ – ОБ, реализирана с два еднакви транзистора  $T_1$  и  $T_2$  и общ базов делител  $R_2 - R_3 - R_4$ . За схемата са известни:

$V_{CC} = 3V$ ,  $I_{C1} = I_{C2} = 5mA$ ,  $\beta_{1,2} = 150$ ,  
 $U_T = 26mV$ ,  $U_{BE1,2} = 0,7V$ ,  $U_{R5} = 0,5V$ ,  
 $U_A = 1,5V$ ,  $I_{R4} = 0,5mA$ ,  $r_{CE1,2} \rightarrow \infty$  и  $\omega C \rightarrow \infty$ .

Да се изчислят:

- коэффициентът на усилване по напрежение  $A_{UT2} = u_A / u_i$ ;
- съпротивленията на резисторите  $R_5$ ,  $R_4$ ,  $R_3$  и  $R_2$ ;
- съпротивлението на резистора  $R_1$ , ако се знае, че коэффициентът на усилване на каскодния усилвател е  $|A_U| = u_o / u_i = 20$ .



Фиг. 2.6.

*Решение:*

а) Коефициентът на усилване по напрежение на първото стъпало е  $A_{U1} = \frac{u_A}{u_i} \approx -S_2 R'_L \approx -S_2 \frac{1}{S_1} \approx -1$ , където  $R'_L \approx R_{L1} \approx 1/S_1$  (транзисторът  $T_2$  е свързан по схема ОЕ).

$$\text{б) } R_5 \approx \frac{U_{R5}}{I_C} = \frac{0,5V}{5mA} = 100\Omega, \quad R_4 = \frac{U_{R5} + U_{BE}}{I_{R4}} = \frac{0,5V + 0,7V}{0,5mA} = 2,4k\Omega,$$

$$R_3 = \frac{U_A + U_{BE} - (U_{R5} + U_{BE})}{I_{R4} + I_{B2}} = \frac{1,5V - 0,5V}{0,5mA + 33\mu A} \approx 2k\Omega, \quad \text{където } I_{B2} = \frac{I_{C2}}{\beta_2} = \frac{5mA}{150} = 33\mu A$$

$$R_2 = \frac{V_{CC} - (U_A + U_{BE})}{I_{R4} + I_{B1} + I_{B2}} = \frac{3V - (1,5V + 0,7V)}{0,5mA + 2 \cdot 33\mu A} = 1,41k\Omega, \quad \text{където } I_{B1} = \frac{I_{C1}}{\beta_1} = \frac{5mA}{150} = 33\mu A.$$

в) Коефициентът на усилване по напрежение на второто стъпало има вида

$$A_{U2} = \frac{u_o}{u_A} \approx S_1 R_1 \quad (\text{транзисторът } T_1 \text{ е свързан по схема с ОБ}).$$

Коефициентът на усилване по напрежение на каскода е произведение от коефициентите на усилване на първото и второто стъпало, т.е.

$$|A_U| = \frac{u_o}{u_i} = \frac{u_A}{u_i} \frac{u_o}{u_A} = A_{U1} A_{U2} \approx S_1 R_1, \quad S_1 = \frac{I_{C1}}{U_T} = \frac{5mA}{26mV} = 192mS \rightarrow$$

$$\rightarrow R_1 \approx \frac{|A_U|}{S_1} = \frac{20}{192mS} \approx 104\Omega.$$

**2.8.** На фиг. 2.7 е дадена схема на диференциален усилвател, чийто постоянен ток се задава с генератор на ток. За схемата са дадени:  $V_{CC} = -V_{EE} = 12V$ ,  $U_{BE1..4} = 0,6V$ ,  $U_T = 30mV$ ,  $\beta_{1,2} = 100$ ,  $r_{BE1,2} = 4k\Omega$ ,  $r_{CE1..4} = 20k\Omega$  ( $T_1 \equiv T_2$ ) и  $A_d = u_o / u_{id} = -70$ . Отношението на площите на емитерните преходи на  $T_3$  и  $T_4$  е  $S_{E_{T3}} / S_{E_{T4}} = 1$ . Да се изчислят:

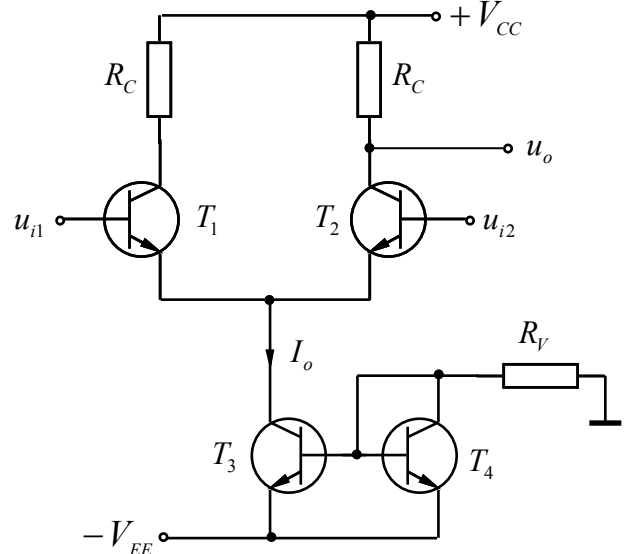
а) съпротивленията на резисторите  $R_C$  и  $R_V$ ;

б) входното и изходното диференциално съпротивление;

в) коефициентът на потискане на синфазните сигнали.

*Решение:*

а) Коефициентът на усилване за диференциалните сигнали е



**Фиг. 2.7.**

$$|A_d| \approx \frac{1}{2} S R_C \rightarrow R_C = \frac{2 \cdot |A_d|}{S} = \frac{2 \cdot 70}{25 mS} = 5,6 k\Omega, \text{ където } S = \frac{\beta_{1,2}}{r_{BE1,2}} = \frac{100}{4 k\Omega} = 25 mS.$$

Прилагайки втори закон на Кирхоф, за задаващия клон на генератора на ток се получава  $V_{EE} + U_{BE} + I_{R_V} \cdot R_V = 0 \rightarrow R_V = -\frac{V_{EE} + U_{BE}}{I_{R_V}} = -\frac{-12V + 0,6V}{1,5mA} = 7,6 k\Omega,$

където  $\frac{I_o}{I_{R_V}} = \frac{S_{E_{T3}}}{S_{E_{T4}}} = 1$  или  $I_{R_V} = I_o, I_o = 2 \cdot I_C, I_C \approx S \cdot U_T = \frac{\beta_{1,2}}{r_{BE1,2}} \cdot U_T = 750 \mu A,$  тогава

$$I_{R_V} = I_o = 2 \cdot I_C = 1,5 mA;$$

$$\text{б) } R_{id} \approx 2 \cdot r_{BE1,2} = 2 \cdot 2,4 k\Omega = 4,8 k\Omega \text{ и } R_{od} \approx R_C = 5,6 k\Omega;$$

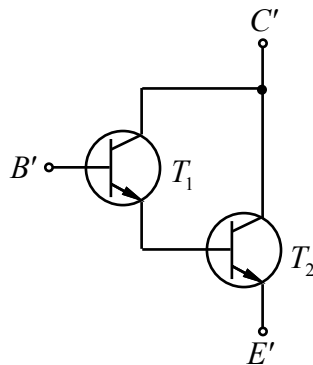
$$\text{в) } A_{CM} \approx \frac{R_C}{2 \cdot r_{CE3}} = \frac{5,6 k\Omega}{2 \cdot 2,2 k\Omega} = 0,14 \rightarrow CMRR = \frac{A_d}{A_{CM}} = \frac{70}{0,14} = 500$$

(или  $CMRR_{dB} = 20 \cdot \log_{10} 500 \approx 54 dB$ ).

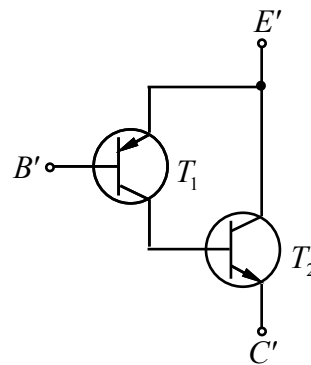


### Задачи

**2.9.** На фиг. 2.8 е показана схема Дарлингтон с два NPN транзистора. Изведете формулите за статичния коефициент  $\beta$ , входното съпротивление, стръмността и изходното съпротивление на еквивалентния транзистор.



Фиг. 2.8.



Фиг. 2.9.

**2.10.** На фиг. 2.9 е показана схема Дарлингтон с два комплементарни транзистора. Изведете формулите за статичния коефициент  $\beta$ , входното съпротивление, стръмността и изходното съпротивление на еквивалентния транзистор.

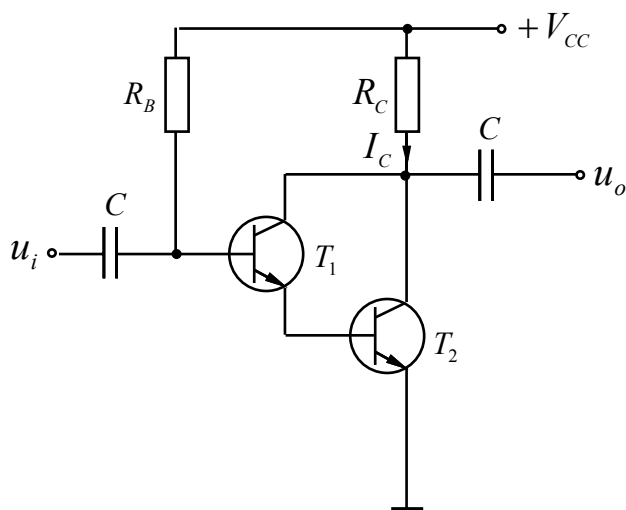
**2.11.** За схемата, показана на фиг. 2.10, са дадени:  $V_{CC} = 7V, U_{BE} = 0,7V, U_{om}^+ = 3V, U_{CEsat} = 0,3V, R_C = 50\Omega, \beta_1 = 100, \beta_2 = 20, U_T = 30mV, r_{CE1,2} \rightarrow \infty$  и  $\omega C \rightarrow \infty$ . Да се намерят:

а) колекторният ток  $I_C$  и стръмността на съставния транзистор;

б) стойността на съпротивлението на резистора  $R_B$ ;

в) коефициентът на усилване по напрежение на схемата и стойността на напрежението  $U_{om}^-$ .

**2.12.** Начертайте схемата на каскоден усилвател ОЕ с неуправляем динамичен товар. Намерете изразите за  $A_U$ ,  $R_{iA}$ ,  $C_{iA}$ ,  $R_{oA}$  и  $C_{oA}$ . Сравнете основните динамични параметри на каскодния усилвател с едностъпален усилвател по схема ОЕ при условие, че двете схеми се реализират с един и същи транзистор и работят при еднакъв постоянен ток режим.



Фиг. 2.10.

**2.13.** Начертайте схемата на каскоден усилвател ОК – ОБ с последователно свързване по постоянен ток. Намерете изразите за  $A_U$ ,  $R_{iA}$ ,  $C_{iA}$ ,  $R_{oA}$  и  $C_{oA}$ .

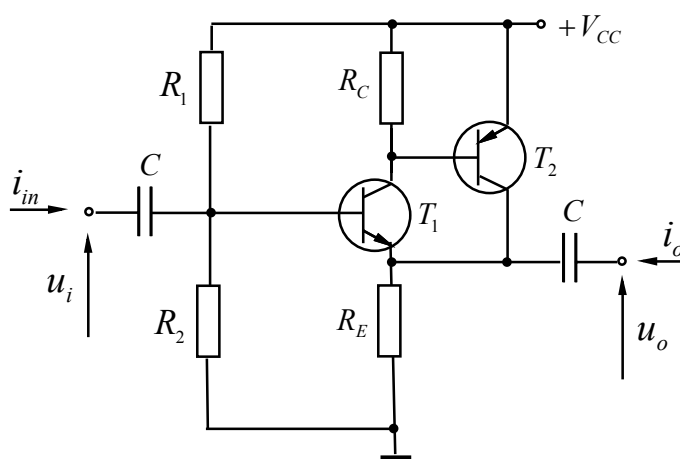
Сравнете основните динамични параметри на каскодния усилвател с едностъпален усилвател с ОБ, при условие, че двете схеми се реализират с един и същи транзистор и работят при еднакъв постоянен ток режим.

**2.14.** На фиг. 2.11 е показана схема на двустъпален усилвател ОЕ – ОЕ със 100% последователна ООВ по напрежение. За схемата е известно:  $V_{CC} = 15V$ ,  $U_T = 26mV$ ,  $\beta_{1,2} = 100$ ,  $R_1 = R_2 = 22k\Omega$ ,  $R_E = 2k\Omega$ ,  $R_C = 5k\Omega$ ,  $r_{CE1,2} \rightarrow \infty$  и  $\omega C \rightarrow \infty$ . Да се изчисли следното:

а) токовете  $I_{C1}$  и  $I_{C2}$ , и напрежението  $U_{E1}$ , ако  $U_{BE1,2} = 0,65V$ ;

б) коефициентът на усилване по напрежение  $A_U = u_o / u_i$  (за  $i_o = 0$ ) и изходното съпротивление  $R_{oA}$  (за  $i_{in} = 0$ ).

**2.15.** За схемата на двустъпалния усилвател ОС – ОЕ (фиг. 1.12) от задача 1.11 да намери коефициентът на усилване по напрежение  $A_U = u_o / u_i$ .



Фиг. 2.11.

**2.16.** На фиг. 2.12 е показана схема на диференциален усилвател (ДУ) с биполярни транзистори, като  $T_1 \equiv T_2$ . За схемата е известно:  $V_{CC} = 15V$ ,  $V_{EE} = -15V$ ,  $R_C = 15k\Omega$ ,  $I_o = 1mA$ ,  $\beta_{1,2} = 100$ ,  $U_{BE1,2} = 0,7V$ ,  $U_T = 26mV$  и  $r_{CE1,2} \rightarrow \infty$ .

Да се изчислят:

а) съпротивлението на резистора  $R_o$  и координатите на работната точка ( $I_{E1,2}$ ,  $I_{C1,2}$ ,  $I_{B1,2}$  и  $U_{CE1,2}$ ) на транзисторите  $T_1$  и  $T_2$ ;

- б) параметрите на транзисторите  $r_{BE1,2}$  и  $S_{1,2}$ ;
- в) коефициентът на усилване за диференциалните сигнали  $A_d$ , коефициентът на усилване за синфазните сигнали  $A_{CM}$  и коефициентът на потискане на синфазните сигнали  $CMRR$ .

2.17. На фиг. 2.7 е дадена схема на диференциален усилвател с биполярни транзистори, като  $T_1 \equiv T_2$ . За схемата са дадени:

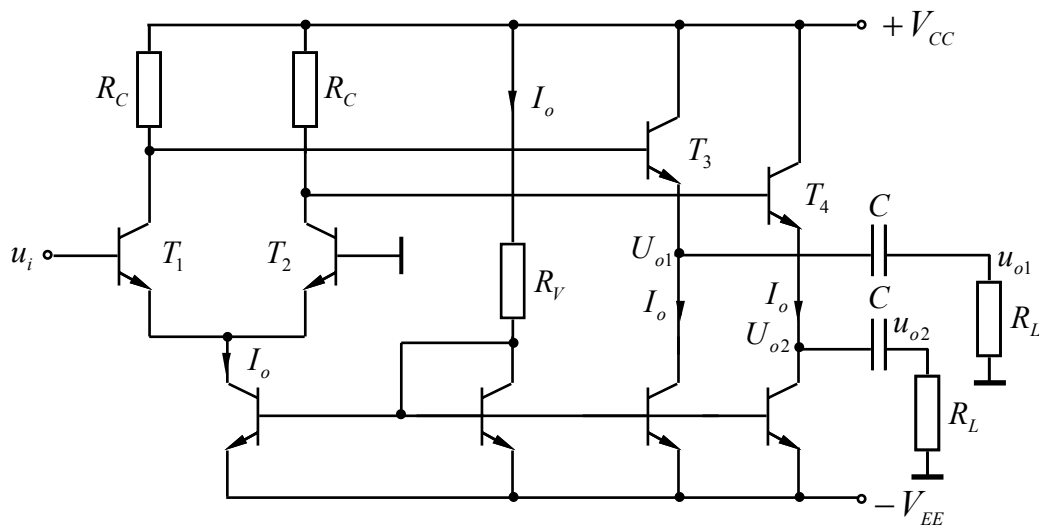
$$V_{CC} = -V_{EE} = 12V, U_{BE} = 0,6V, U_{CT_2} = 6V,$$

$$U_T = 30mV, S_{1,2} = 16,7mS, \beta_{1,2} = 80,$$

$$r_{CE1, \dots, 4} = 30k\Omega \text{ и } S_{E_{T_3}} / S_{E_{T_4}} = 1,5. \text{ Да се изчислят:}$$

- а) съпротивленията на резисторите  $R_C$  и  $R_V$ ;
- б) входното и изходното диференциално съпротивление;
- в) коефициентите на усилване за диференциален и синфазен входен сигнал.

2.18. На фиг. 2.13 е показана електронна схема на диференциален усилвател с изходно стъпало по схема ОК. За схемата е известно:  $\beta_{1, \dots, 4} = 50, r_{CE1, \dots, 4} \rightarrow \infty,$



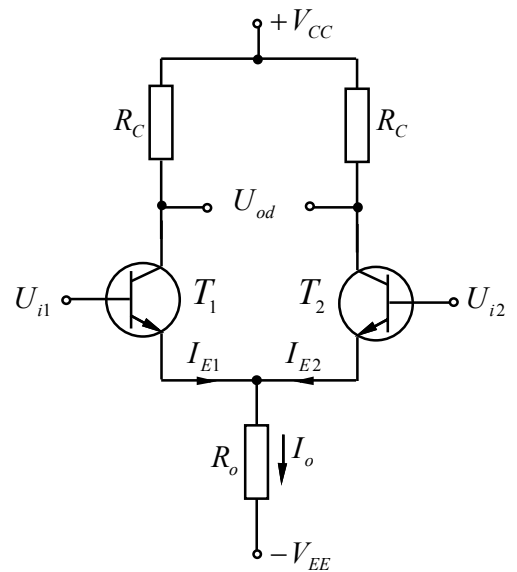
Фиг. 2.13.

$$V_{CC} = -V_{EE} = 6V, U_{BE1, \dots, 4} = 0,6V, R_C = 10k\Omega, R_L = 50\Omega, U_T = 30mV \text{ и } \omega C \rightarrow \infty.$$

Да се изчисли следното:

- а) токът  $I_o$  и съпротивлението на резистора,  $R_V$  при условие, че напреженията на изхода са  $U_{o1} = U_{o2} = 0V$ ;
- б) входното диференциално съпротивление  $R_{id}$ ;
- в) коефициентите на усилване по напрежение  $A_{U1} = u_{o1} / u_i$  и  $A_{U2} = u_{o2} / u_i$ .

2.19. Начертайте схема на диференциален усилвател с управляем динамичен товар и с генератор на ток (ГТ). Изведете в общ вид формулите за  $A_d, A_{CM}, CMRR, R_{id}$  и  $R_o$ , и ги сравнете с тези на основната схема на диференциален



Фиг. 2.12.

усилвател при условие, че двете схеми са реализирани с един и същи транзистор и работят при еднакъв постоянен ток режим.

## 2.3. Изходни (крайни) стъпала

За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 3.5 от [5].



### Пример

**2.20.** Да се изчислят амплитудата на изходното напрежение  $U_{cm}$ , отдадената върху товара мощност  $P_L$ , консумираната мощност от токозахранващите източници  $P_{CC}$  и коефициентът на полезно действие  $\eta$  на крайно стъпало с комплементарна двойка биполярни транзистори, ако са дадени:  $V_{CC} = -V_{EE} = 12V$ ,  $U_{CEsat} = 2V$  и  $R_L = 8\Omega$ .

Как биха се променили  $P_L$ ,  $P_{CC}$  и  $\eta$ , ако в изхода се включи озвучително тяло (високоговорител или тонколони) с  $R_L = 4\Omega$  и  $R_L = 16\Omega$ ?

*Решение:*

Въз основа на енергийния анализ на крайното стъпало за основните параметри се получава:

– амплитуда на изходното напрежение  $U_{cm} = V_{CC} - U_{CEsat} = 12V - 2V = 10V$ ;

– мощност, която може да се отдаде в товара,  $P_L = \frac{1}{2} \frac{U_{cm}^2}{R_L} = \frac{1}{2} \cdot \frac{(10V)^2}{8\Omega} = 6,25W$ ;

– консумирана мощност от захранващия източник

$$P_{CC} = 0,636 \cdot U_{CC} \frac{U_{cm}}{R_L} = 0,636 \cdot 12V \cdot \frac{10V}{8\Omega} \approx 10W;$$

– коефициент на полезно действие  $\eta = \frac{P_L}{P_{CC}} = \frac{6,25W}{10W} = 0,654$  (или 65,4%).

Ако към изхода на крайното стъпало се включи озвучително тяло с еквивалентно съпротивление  $R_L = 16\Omega$ , максималната отдадена мощност върху товара  $P_{Lmax}$ , загубната мощност  $P_{Cmax}$  и консумираната мощност от токозахранващите източници  $P_{CC}$  ще бъдат два пъти по-малки. Коефициентът на полезно действие  $\eta$  обаче ще остане същият. Като предимство в този случай може да се посочи облекченият режим на работа на транзисторите. Недостатък на схемата с товар  $R_L = 16\Omega$  е, че максимално отдадената мощност на товара (звуквата мощност) ще бъде два пъти по-малка.



При включване на озвучително тяло с еквивалентно съпротивление  $R_L = 4\Omega$  всички по-горе изброени мощности ще удвоят стойностите си. Това може да доведе до повреждане на транзисторите или на захранващия източник.



### Задачи

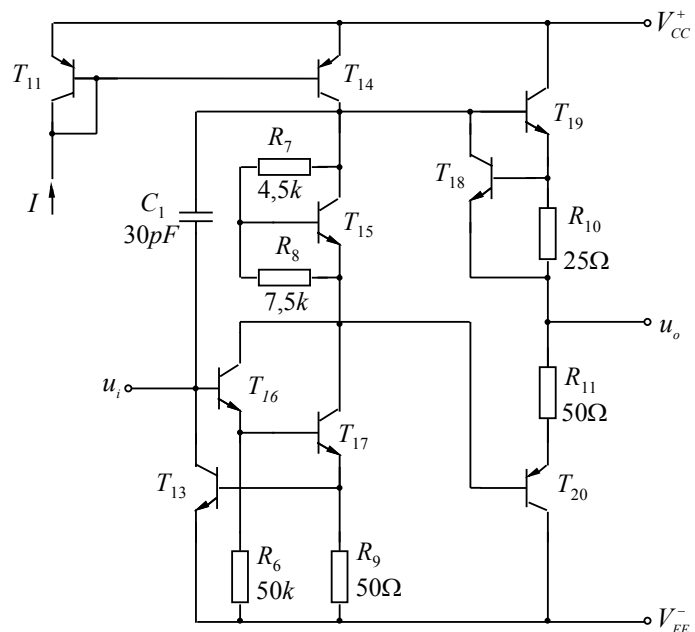
**2.21.** Да се изчислят амплитудата на изходното напрежение и ток ( $U_{cm}$  и  $I_{cm}$ ) върху товара  $R_L$ , необходимата стойност на захранващото напрежение  $V_{CC} = -V_{EE}$  и максималната загубна мощност  $P_{Cmax}$  на крайно стъпало с комплементарна двойка биполярни транзистори, ако са дадени:  $P_L = 30W$ ,  $R_L = 4\Omega$  и  $U_{CEsat} = 1,5V$ .

**2.22.** Начертайте и обяснете действието на крайно стъпало с комплементарна двойка биполярни транзистори, работещо в клас В. Ако се знае, че е необходимо да се получи максимална полезна мощност върху товара  $20W$ , да се определи максималната загубна мощност на всеки от транзисторите  $P_{Cmax}$  и консумираната мощност от токозахранващите източници  $P_{CC}$  (да се приеме, че  $U_{CEsat} = 0V$ ).

**2.23.** На фиг. 2.14 е дадена схема на крайно стъпало на ОУ 741С с драйверно стъпало ( $T_{14} - T_{16} - T_{17} - R_6 - C_1$ ). Групата  $T_{15} - R_7 - R_8$  осигурява постояннотоковия режим на крайните транзистори  $T_{19}$  и  $T_{20}$ , а транзисторите  $T_{13}$  и  $T_{18}$  заедно с резисторите  $R_9 - R_{10} - R_{11}$  представляват активна защита по ток. Да се изчислят:

а) преднапрежението между базите на  $T_{19}$  и  $T_{20}$ , и режимът им на работа (клас В или клас АВ), ако  $U_{BE} = 0,7V$ ;

б) максималните емитерни токове на  $T_{19}$  и  $T_{20}$  ( $I_{ET_{19},max}$  и  $I_{ET_{20},max}$ ), при които се задейства активната защита.



Фиг. 2.14.