

## 1

## Транзисторни усилвателни схеми

**Образователни цели**

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

- Да чертаят основните схеми за постояннотоково захранване на усилвателни стъпала с биполярни и униполярни (полеви) транзистори и да отбелязват посоките на токовете и напреженията, приети условно за положителни.
- Да чертаят трите схеми на свързване на биполярен и униполярен транзистор с веригите по постоянен ток и да изчисляват съпротивленията на резисторите за избрана работна точка.
- Да знаят основните диференциални параметри на транзисторите и да ги използват за изчисляване на динамичните параметри на елементарно усилвателно стъпало за средни честоти.
- Да анализират поведението на едностъпални и двустъпални усилвателни схеми при ниски и високи честоти и да определят съответните им гранични честоти.



**Ключови думи:** транзистор, схема с ОЕ (ОС), ОК (ОД) и ОК (ОГ), нормален активен режим, работна точка, усилване по напрежение и ток, амплитудно-честотна характеристика (АЧХ), ниска и висока гранична честота, диаграма на Боде, ефект на Милер.

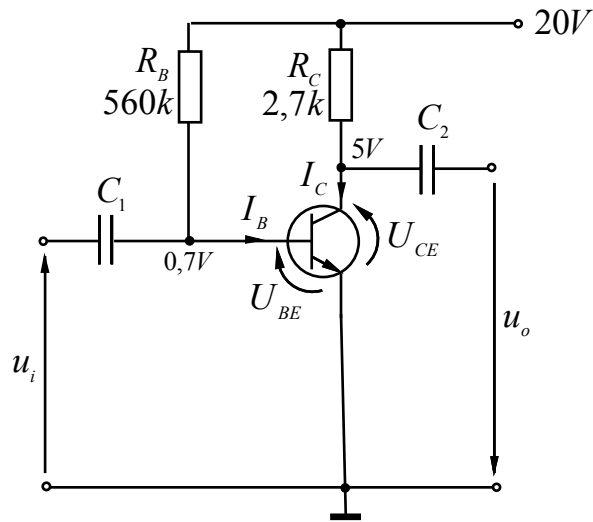
## 1.1. Постояннотоково захранване на усилвателни схеми с биполярни и униполярни (полеви) транзистори

За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 2.1 от [5].

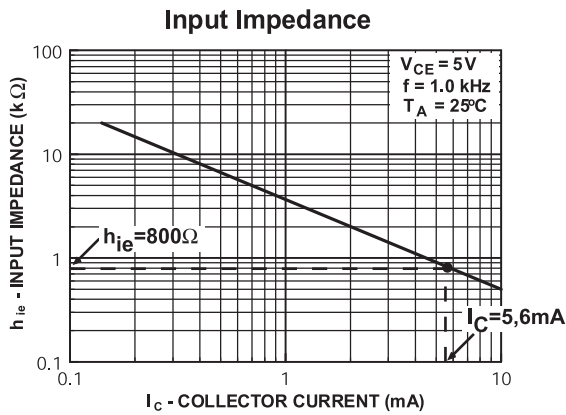
**Примери**

**1.1.** На фиг. 1.1 е дадена усилвателна схема с общ емитер (ОЕ) с биполярен транзистор 2N3904. Да се намерят:

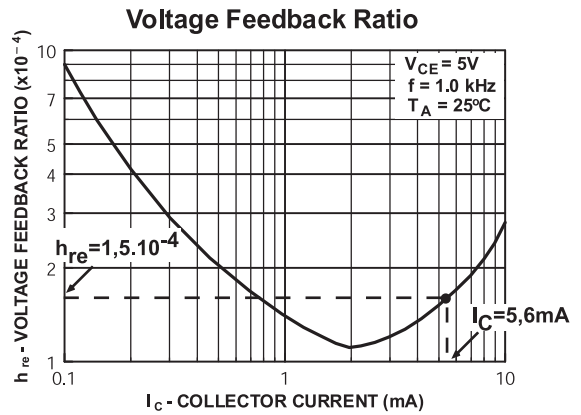
- а) координатите на работната точка на транзистора ( $U_{CE,A}$ ,  $I_{C,A}$ ,  $I_{B,A}$  и  $U_{BE,A}$ );
- б) четириполюсните параметри  $h_{11e}$  (или  $h_{ie}$ ),  $h_{12e}$  ( $h_{re}$ ),  $h_{21e}$  ( $h_{fe}$ ) и  $h_{22e}$  ( $h_{oe}$ ) от графиките, показани на фиг. 1.2а, 1.2б, 1.2в и 1.2г за определената работна точка;
- в) четириполюсните параметри  $y_{11e}$ ,  $y_{12e}$ ,  $y_{21e}$  и  $y_{22e}$  от  $h$ -параметрите;
- г) диференциалните параметри  $r_{BE}$ ,  $\beta$ ,  $S$ ,  $S_r$  и  $r_{CE}$  от  $h$ - и  $y$ -параметрите.



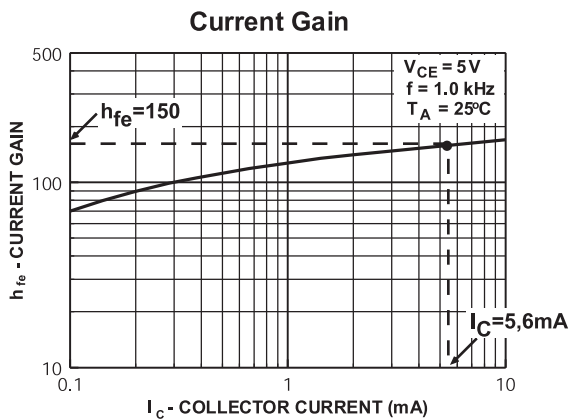
Фиг. 1.1.



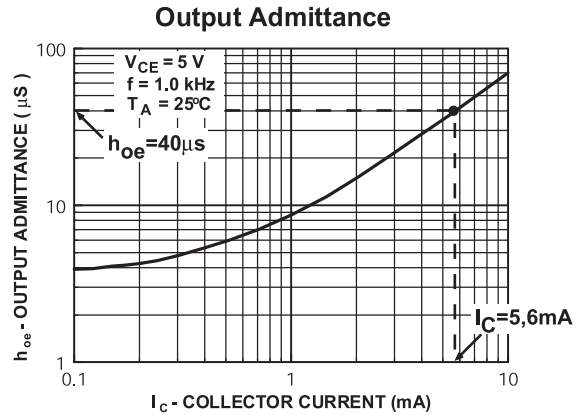
Фиг. 1.2а.



Фиг. 1.2б.



Фиг. 1.2в.



Фиг. 1.2г.

Решение:

а)  $U_{CE,A} = U_C - U_E = 5V - 0V = 5V$ .

Прилагайки втория закон на Кирхоф за изходната верига на схемата, се получава:  $V_{CC} = U_{CE,A} + I_{C,A} R_C \rightarrow I_{C,A} = \frac{V_{CC} - U_{CE,A}}{R_C} = \frac{20V - 5V}{2,7k\Omega} \approx 5,6mA$ .

За напрежението между В и Е се намира:  $U_{BE,A} = U_B - U_E = 0,7V - 0V = 0,7V$ .

Описвайки входната верига, се получава:  $V_{CC} = I_{B,A}R_B + U_{BE,A} \rightarrow$

$$I_{B,A} = \frac{V_{CC} - U_{BE,A}}{R_B} = \frac{20V - 0,7V}{560k\Omega} \approx 34\mu A;$$

б) Стойностите на четириполюсните  $h$ -параметри за  $I_{C,A} = 5,6mA$  и  $U_{CE,A} = 5V$ , определени от графиките на фиг. 1.2а, 1.2б, 1.2в и 1.2г, са:  $h_{11e} = 800\Omega$ ,  $h_{12e} = 1,5 \cdot 10^{-4}$ ,  $h_{21e} = 150$  и  $h_{22e} = 40\mu S$ .

$$в) y_{11e} = \frac{1}{h_{11e}} = \frac{1}{800\Omega} = 1,25mS, \quad y_{12e} = -\frac{h_{12e}}{h_{11e}} = -187,5nS,$$

$$y_{21e} = \frac{h_{21e}}{h_{11e}} = \frac{150}{800\Omega} = 187,5mS \text{ и } y_{22e} = \frac{h_{11e}h_{22e} - h_{12e}h_{21e}}{h_{11e}} = 11,87\mu S.$$

$$г) r_{BE} = h_{11e} = \frac{1}{y_{11e}} = 800\Omega, \quad \beta = h_{21e} = \frac{y_{21e}}{y_{11e}} = 150, \quad S = \frac{h_{21e}}{h_{11e}} = y_{21e} = \frac{150}{800\Omega} = 187,5mS,$$

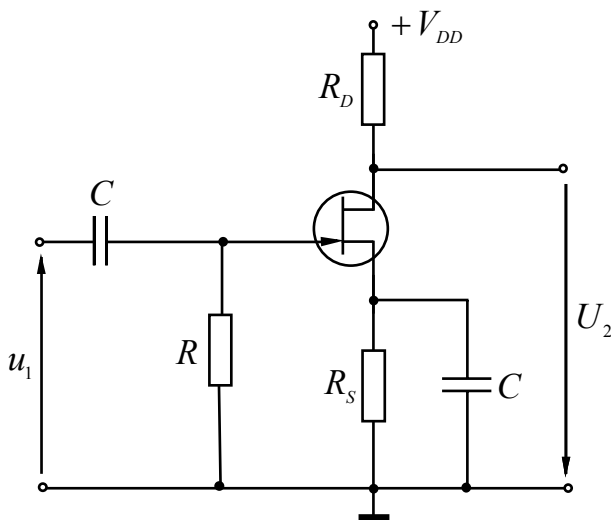
$$S_r = -\frac{h_{12e}}{h_{11e}} = y_{12e} = -\frac{1,5 \cdot 10^{-4}}{800\Omega} = -187,5nS \text{ и}$$

$$r_{CE} = \frac{h_{11e}}{h_{11e}h_{22e} - h_{12e}h_{21e}} = \frac{1}{y_{22e}} = \frac{800\Omega}{800\Omega \cdot 40\mu S - 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot 150} = 84,2k\Omega.$$

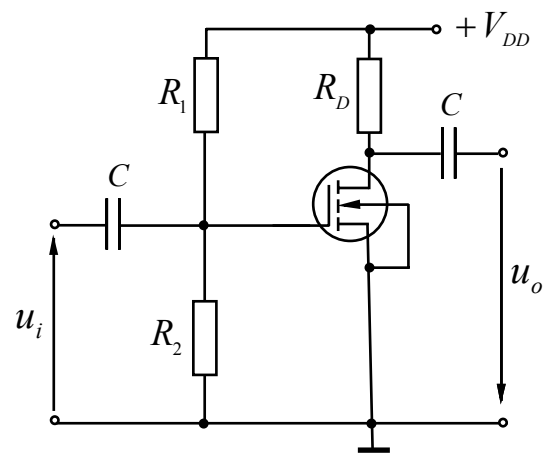
1.2. На фиг. 1.3 е дадена усилвателна схема с общ сорс (ОС) с полеви транзистор 2N4222. За схемата са известни:  $V_{DD} = 10V$ ,  $I_{DSS} = 10mA$  и  $U_{GS} = -1,2V$ . Да се изчислят:

а) съпротивленията на резисторите  $R_D$  и  $R_S$ , ако се знае, че  $U_2 = 5V$  и  $I_D = 0,5I_{DSS}$  за  $u_1 = 0$ ;

б) съпротивлението на резистора  $R$ , ако гейтовият ток е  $I_G = -5nA$  и падът на напрежение върху  $R$  не трябва да надвишава  $10mV$ .



Фиг. 1.3.



Фиг. 1.4.

Решение:

$$а) R_S = \frac{-U_{GS}}{I_D} = \frac{1,2V}{5mA} = 240\Omega \text{ и } R_D = \frac{V_{DD} - U_2}{I_D} = \frac{10V - 5V}{5mA} = 1k\Omega.$$

$$б) R \leq \frac{10mV}{5nA} = 2M\Omega.$$

**1.3.** На фиг. 1.4 е дадена схема ОС, реализирана с MOS транзистор с индуциран N – канал. Дрейновият ток е  $I_D = I_{D0} (U_{GS}/U_{Th} - 1)^2$ , където  $I_{D0} = 58,8mA$  и  $U_{Th} = 3,5V$ . Дадени са:  $V_{DD} = 10V$ ,  $I_D = 1mA$ ,  $R_D = 5k\Omega$  и  $\omega C \rightarrow \infty$ . Да се определи:

- отношението на резисторите  $R_1/R_2$  за  $I_G = 0$ ;
- стръмността на транзистора за избраната работна точка;
- коэффициентът на усилване по напрежение и изходното съпротивление на схемата при  $r_{DS} \rightarrow \infty$ .

Решение:

$$а) \text{ От формулата за дрейновия ток } I_D = I_{D0} \left( \frac{U_{GS}}{U_{Th}} - 1 \right)^2 \text{ напрежението } U_{GS} \text{ се}$$

$$\text{получава: } U_{GS,A} = U_{Th} \left( \sqrt{\frac{I_D}{I_{D0}}} + 1 \right) = 3,5V \cdot \left( \sqrt{\frac{1mA}{58,8mA}} + 1 \right) \approx 3,96V.$$

$$\text{Тъй като } I_G = 0, U_{GS,A} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{DD} \rightarrow \frac{R_1}{R_2} = \frac{V_{DD} - U_{GS,A}}{U_{GS,A}} = \frac{10V - 3,96V}{3,96V} = 1,525.$$

$$б) S = \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} = 2 \cdot \frac{I_{D0}}{U_{Th}} \cdot \left( \frac{U_{GS,A}}{U_{Th}} - 1 \right) = 2 \cdot \frac{58,8mA}{3,5V} \cdot \left( \frac{3,96V}{3,5V} - 1 \right) = 4,41mS.$$

$$в) A_U \approx -SR_D = -4,41mS \cdot 5k\Omega = -22,05 \text{ и } R_{oa} = r_{DS} \parallel R_D \approx R_D = 5k\Omega \text{ за } r_{DS} \rightarrow \infty.$$



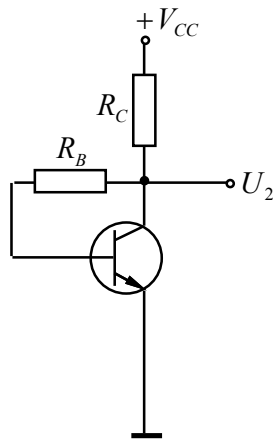
### Задачи

**1.4.** На фиг. 1.5 е представена схема за постояннотоково захранване на биполярен транзистор. За схемата са дадени:  $V_{CC} = 10V$ ,  $I_C = 10mA$ ,  $U_2 = 5V$ ,  $\beta = 100$  и  $U_{BE} = 0,7V$ . Да се изчислят:

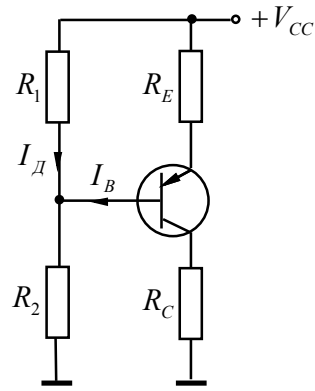
- съпротивлението на резистора  $R_C$ ;
- съпротивлението на резистора  $R_B$ .

Какъв тип обратна връзка е въведена с резистора  $R_B$ ?

**1.5.** На фиг. 1.6 е представена схема за постояннотоково захранване на PNP транзистор. За схемата са дадени:  $V_{CC} = 15V$ ,  $I_C = 1mA$ ,  $I_D = 10I_B$ ,  $\beta = 100$ ,  $U_{BE} = 0,7V$ ,  $U_{CE} = 9V$  и  $R_E = 5k\Omega$ . Да се изчислят съпротивленията на резисторите  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_C$ .



Фиг. 1.5.



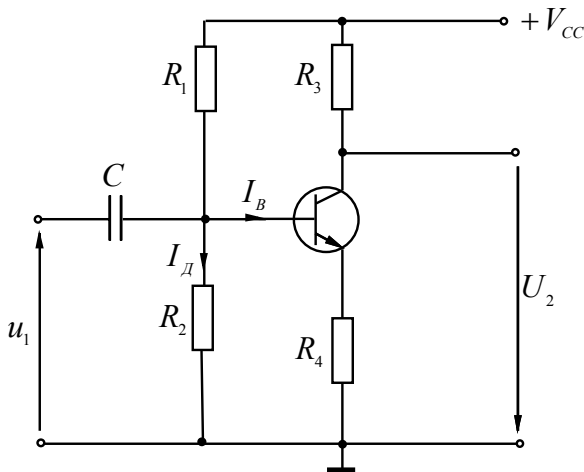
Фиг. 1.6.

1.6. За схемата на фиг. 1.7 са известни следните величини и параметри:  $V_{CC} = 10V$ ,  $I_C = 5mA$ ,  $U_2 = 5V$ ,  $\beta = 100$  и  $U_{BE} = 0,7V$ . Да се изчислят:

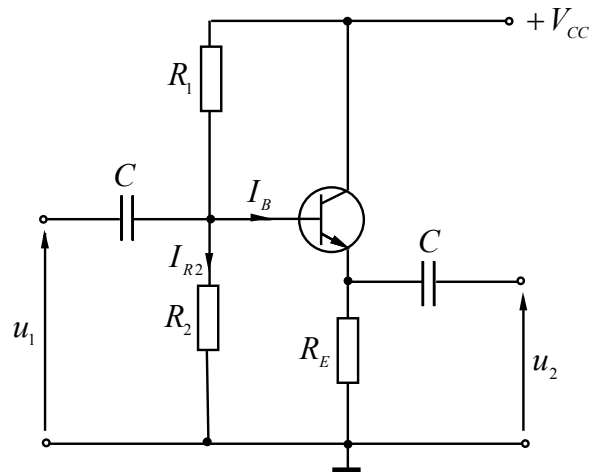
- а) съпротивленията на резисторите  $R_3$  и  $R_4$ , ако се знае, че  $U_{R4} = 1V$ ;
- б) съпротивленията на резисторите  $R_1$  и  $R_2$ , ако  $I_D = 10I_B$ .

1.7. За схемата на фиг. 1.8 са дадени:  $V_{CC} = 5V$ ,  $I_C = 0,5mA$ ,  $\beta = 100$ ,  $U_T = 26mV$ ,  $I_{R2} = 10I_B$ ,  $U_{BE} = 0,7V$  и  $R_E = 510\Omega$ . Да се изчислят:

- а) съпротивленията на резисторите  $R_1$  и  $R_2$ , ако  $I_{R2} = 10I_B$ ;
- б) стръмността на транзистора за  $I_C = 0,5mA$ .



Фиг. 1.7.

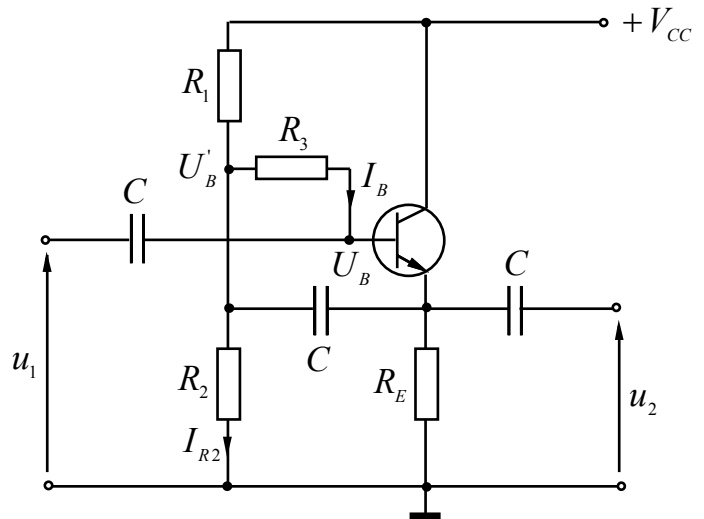


Фиг. 1.8.

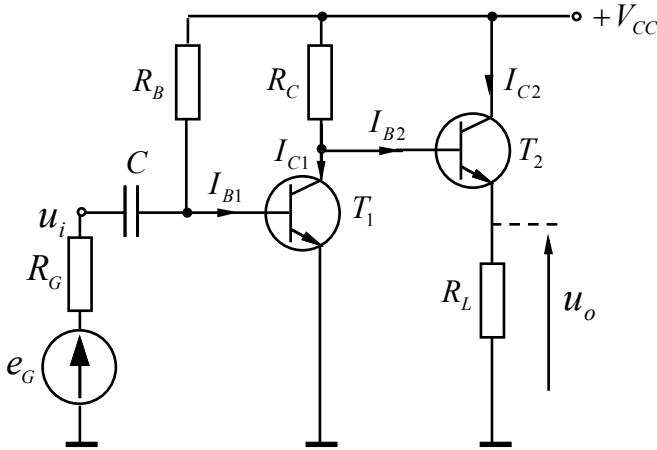
1.8. За стъпало общ колектор (ОК) с Bootstrap – ефект, дадено на фиг. 1.9,  $V_{CC} = 10V$ ,  $U_T = 26mV$ ,  $U_{BE} = 0,6V$ ,  $I_E = 1mA$ ,  $I_{R2} = 20I_B$ ,  $\beta = 200$ ,  $R_E = 5k\Omega$  и  $R_3 = 20k\Omega$ . Да се намерят съпротивленията на резисторите  $R_1$  и  $R_2$ .

1.9. За схемата на двустъпален усилвател, показана на фиг. 1.10, са известни:  $V_{CC} = 5V$ ,  $U_{BE1,2} = 0,6V$ ,  $U_T = 30mV$ ,  $I_{C2} = 1mA$ ,  $R_L = 1,4k\Omega$ ,  $R_C = 1k\Omega$ ,  $\beta_{1,2} = 100$ ,  $\omega C \rightarrow \infty$  и  $r_{CE1,2} \rightarrow \infty$ . Да се определят колекторният ток  $I_{C1}$  на транзистора  $T_1$  и съпротивлението на резистора  $R_B$ .

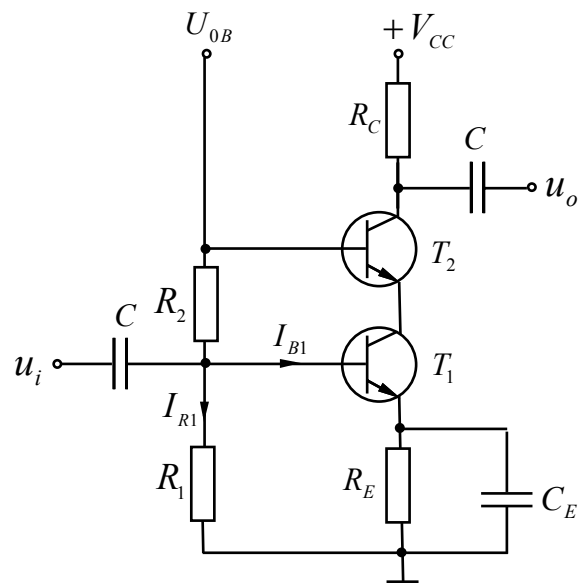
1.10. За схемата на каскодния усилвател, показана на фиг. 1.11, са известни:  $V_{CC} = 10V$ ,  $U_{CE1} = 3,3V$ ,  $U_{CE2} = 3,7V$ ,  $U_{BE} = 0,7V$ ,  $U_T = 26mV$ ,  $I_C = 1mA$ ,  $\beta_{1,2} = 100$ ,  $R_1 = 3k\Omega$ ,  $R_C = 2R_E$ ,  $\omega C, \omega C_E \rightarrow \infty$  и  $r_{CE1,2} \rightarrow \infty$ . Да се определят стойностите на съпротивленията на резисторите  $R_E$ ,  $R_C$  и  $R_2$ , и напрежението  $U_{0B}$  за  $I_{R1} \gg I_{B1}$ .



Фиг. 1.9.



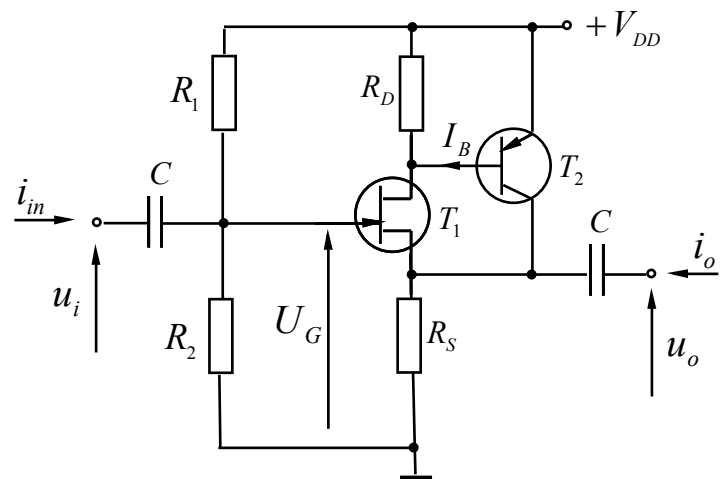
Фиг. 1.10.



Фиг. 1.11.

1.11. На фиг. 1.12 е показана схема на двустъпален усилвател ОС – ОЕ със 100% последователна ООВ по напрежение. За схемата е известно:  $V_{DD} = 5V$ ,  $U_G = 3V$  и  $\omega C \rightarrow \infty$ . Полевият транзистор е с параметри  $k = 1,2mA/V^2$ ,  $U_{Th} = -1V$ ,  $I_D = 0,6mA$ , като уравнението на дрейновия му ток е  $I_D = \frac{k}{2}(U_{GS} - U_{Th})^2$ . Биполярният транзистор е с параметри  $U_{BE} = 0,66V$ ,  $I_B = 50\mu A$  и  $I_C = 2,4mA$ . Да се изчислят:

- съпротивленията на резисторите  $R_D$  и  $R_S$ ;
- съпротивленията на резисторите



Фиг. 1.12.

$R_1$  и  $R_2$ , при условие, че входното съпротивление  $R_{iA} = u_i / i_{in} = 1M\Omega$  и  $I_G = 0$ .

## 1.2. Анализ по променлив ток на усилвателни схеми с биполярни и униполярни транзистори

За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 2.2 – 2.6 и 1.4 – 1.6 от [5].



### Примери

**1.12.** За схемата, показана на фиг. 1.13, са известни:

–  $V_{CC} = 6V$ ,  $R_1 = 12k\Omega$ ,  $R_2 = 75k\Omega$ ,  
 $R_C = 500\Omega$ ,  $R_G = 1k\Omega$  и  $U_T = 30mV$ .

– работна точка на транзистора:  
 $I_C = 5,5mA$ ,  $U_{CE} = 3,25V$  и  $U_{BE} = 0,6V$ ;

– параметри на работната точка:  
 $\beta = 300$ ,  $r_{CE} = 30k\Omega$ ,  $r_{BB'} = 200\Omega$ ,  
 $f_T = 100MHz$  и  $C_{B'C} = 4pF$ .

Да се намерят:

а) съпротивлението  $r_{BE}$  и стръмността  $S$  на транзистора за избраната работна точка;

б) коефициентите на усилване по напрежение  $A_U = u_o / u_i$  и  $A = u_o / e_G$  за средни честоти;

в) капацитетът на кондензатора  $C_1$ , ако ниската гранична честота, обусловена от входната верига, е  $f_{bi} = 30Hz$  и  $M_{bi} = 3dB$ ;

г) високата гранична честота на усилвателя за  $M_{hi} = M_{ho} = 3dB$ .

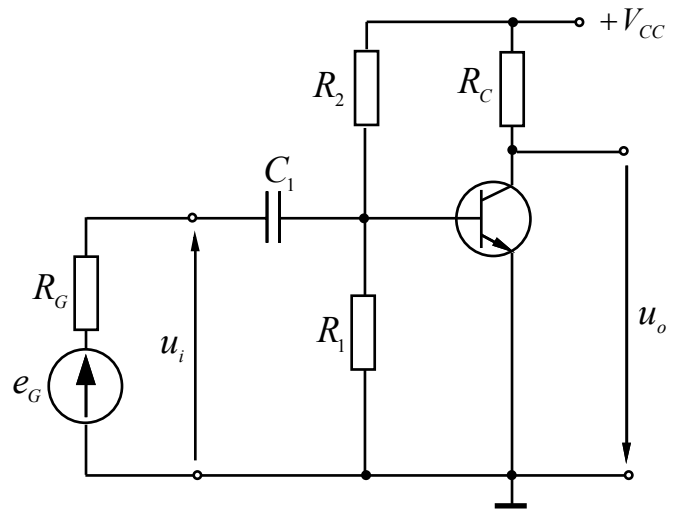
Решение:

$$а) I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{5,5mA}{300} \approx 18\mu A, r_{BE} \approx \frac{U_T}{I_B} \approx \frac{30mV}{18\mu A} \approx 1,67k\Omega \text{ и}$$

$$S \approx \frac{I_C}{U_T} \approx \frac{5,5mA}{30mV} \approx 183mS.$$

$$б) A_U = \frac{u_o}{u_i} = -S(R_C \parallel r_{CE}) = -183mS \cdot \frac{500\Omega \cdot 30k\Omega}{500\Omega + 30k\Omega} \approx -90 \text{ и}$$

$$A = \frac{u_o}{e_G} = A_U \frac{R_{iA}}{R_{iA} + R_G} = -90 \cdot \frac{1,4k\Omega}{1,4k\Omega + 1k\Omega} \approx -52,5,$$



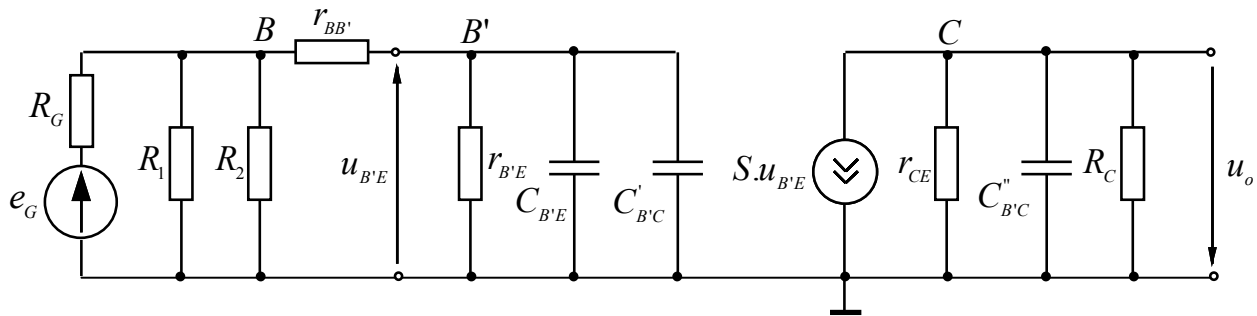
Фиг. 1.13.

където  $R_{iA} = R_1 \parallel R_2 \parallel r_{BE} \approx 1,4k\Omega$ .

$$b) f_{bi} = \frac{1}{2\pi(R_G + R_{iA})C_1\sqrt{M_{bi}^2 - 1}} \rightarrow$$

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f_{bi}(R_G + R_{iA})\sqrt{M_{bi}^2 - 1}} = \frac{1}{2\pi \cdot 30Hz(1k\Omega + 1,4k\Omega)\sqrt{1,41^2 - 1}} \approx 2,2\mu F.$$

г) Високата гранична честота се определя от еквивалентна схема на стъпалото ОЕ по променлив ток (фиг. 1.14). Тя се получава, като разделителният кондензатор  $C_1$  се разглежда като късо съединение за входния сигнал. Освен



Фиг. 1.14.

това захранващият източник също се свързва накъсо, понеже паралелно на точката  $V_{CC}$  винаги има филтриращи кондензатори с голям капацитет. Накрая биполярният транзистор се замества с еквивалентната си схема при високи честоти, предложена от Джиаколето. Капацитетите  $C_{B'C}'$  и  $C_{B'C}''$  се получават въз основа на теоремата на Милер, която позволява да се разделят входната и изходната верига на усилвателя. По този начин може да се улесни анализът при високи честоти. Стойностите на капацитетите  $C_{B'C}'$  и  $C_{B'C}''$  са

$$C_{B'C}' = C_{B'C}(1 - A_U) = 4pF \cdot 91 = 364pF \text{ и}$$

$$C_{B'C}'' = C_{B'C} \left(1 - \frac{1}{A_U}\right) \approx 4pF \cdot 1,011 \approx 4,044pF.$$

Капацитетът на емитерния преход е

$$C_{B'E} = \frac{1}{2\pi \cdot f_{\beta} \cdot r_{B'E}} = \frac{\beta}{2\pi \cdot f_T \cdot r_{B'E}} = \frac{300}{2\pi \cdot 100MHz \cdot 1,47k\Omega} \approx 325pF.$$

Тогава за високите гранични честоти на усилвателя, обусловени от входната и от изходната верига, се намира:

$$f_{hi} = \frac{\sqrt{M_{hi}^2 - 1}}{2\pi(C_{B'E} + C_{B'C}') \cdot [r_{B'E} \parallel (r_{BB'} + R_G)]} =$$

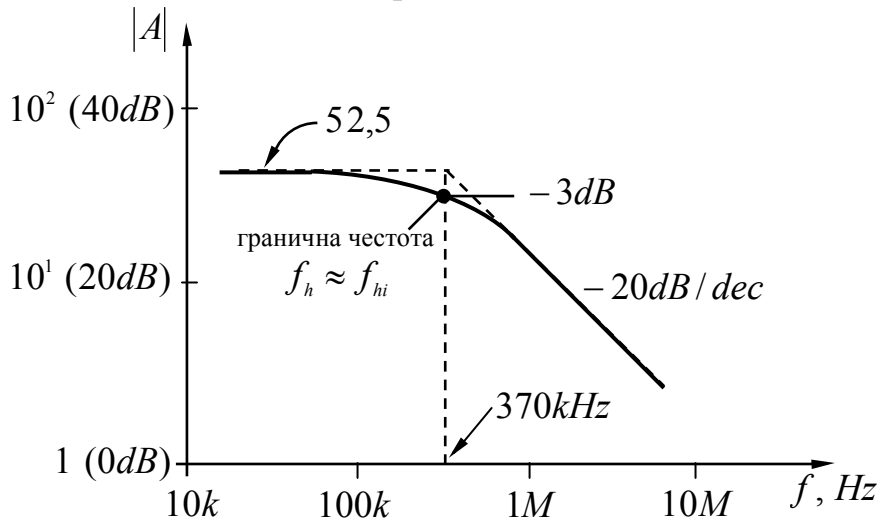
$$= \frac{1}{2\pi(325pF + 364pF) \cdot [1,47k\Omega \parallel (200\Omega + 900\Omega)]} \approx 370kHz,$$

където  $R_G' = R_G \parallel R_1 \parallel R_2$  и

$$f_{ho} = \frac{1}{2\pi C_{B'C}'' \cdot [r_{CE} \parallel R_C]} = \frac{1}{2\pi \cdot 4,044pF \cdot (30k\Omega \parallel 500\Omega)} \approx 80MHz.$$



От сравняването на стойностите за  $f_{hi}$  и  $f_{ho}$  по-ниската от двете определя високата гранична честота на стъпалото ОЕ, т.е.  $f_h \approx f_{hi} = 370\text{kHz}$ . На фиг. 1.15 е показана АЧХ на стъпалото ОЕ при високи честоти.



Фиг. 1.15.

**1.13.** На фиг. 1.16 е представена усилвателна схема общ колектор (ОК). За нея са известни:

- захранващо напрежение  $V_{CC} = 10\text{V}$ , вътрешно съпротивление на източника на входен сигнал  $R_G = 5\text{k}\Omega$  и товарно съпротивление  $R_L = 500\Omega$ ;
- работна точка на транзистора:  $I_C = 6\text{mA}$ ,  $U_{CE} = 4\text{V}$ ,  $I_B = 20\mu\text{A}$ ,  $U_{BE} = 0,6\text{V}$  и  $U_{CEsat} \approx 0,5\text{V}$ ;
- параметри на работната точка:  $\beta = 300$ ,  $S = 200\text{mS}$  и  $r_{BE} = 1,5\text{k}\Omega$ .

Да се намерят:

- а) съпротивленията на резисторите  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_E$ , ако  $I_{R1} = 5I_B$ ;
- б) входното и изходното съпротивление на усилвателната схема;
- в) коефициентите на усилване по напрежение  $A_U = u_o/u_i$  и  $A = u_o/e_G$  за средни честоти;
- г) капацитетите на разделителните кондензатори  $C_1$  и  $C_2$  за гранична честота  $f_b = 20\text{Hz}$  и  $M_b = 3\text{dB}$ ;
- д) долната и горната граница на изходното напрежение.

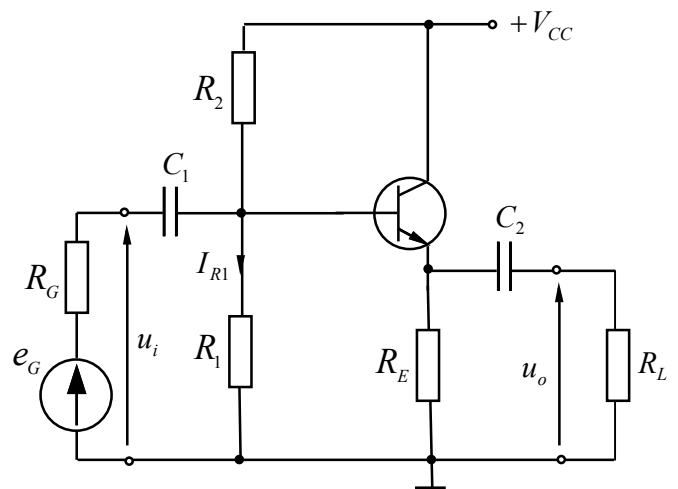
Решение:

$$\text{а) } R_E = \frac{V_{CC} - U_{CE}}{I_C} = \frac{10\text{V} - 4\text{V}}{6\text{mA}} = 1\text{k}\Omega,$$

$$R_1 = \frac{U_{BE} + I_E \cdot R_E}{I_{R1}} = \frac{0,6\text{V} + 6,02\text{V}}{5 \cdot 20\mu\text{A}} = 66,2\text{k}\Omega$$

(68kΩ за E24)

и



Фиг. 1.16.

$$R_2 = \frac{U_{CE} - U_{BE}}{I_B + I_{R1}} = \frac{4V - 0,6V}{6.20\mu A} = 28,3k\Omega \text{ (} 27k\Omega \text{ за E24).}$$

б)  $R_{iA} = R_1 \parallel R_2 \parallel [r_{BE} + \beta(R_E \parallel R_L)] \approx 16k\Omega$  и  $R_{oA} \approx \left( \frac{1}{S} + \frac{R_G \parallel R_1 \parallel R_2}{\beta} \right) \parallel R_E \approx 18\Omega$ .

в)  $A_U = \frac{u_o}{u_i} = \frac{SR'_E}{1 + SR'_E} = \frac{200mS \cdot 333\Omega}{1 + 200mS \cdot 333\Omega} \approx 0,985$ , където  $R'_E = R_E \parallel R_L = 333\Omega$  и

$$A = \frac{u_o}{e_G} = A_U \frac{R_{iA}}{R_{iA} + R_G} = 0,985 \cdot \frac{16k\Omega}{16k\Omega + 5k\Omega} \approx 0,75.$$

г) Капацитетите на кондензаторите  $C_1$  и  $C_2$  могат да се намерят от анализа на входната и изходната верига на схемата при ниски честоти. Зададените честотни изкривявания  $M_b = 3dB$  се разделят на две части:  $M_{b1} = 0,5dB$  за кондензатора  $C_1$  и  $M_{b2} = 2,5dB$  за кондензатора  $C_2$ .

– За входната верига:  $f_b = \frac{1}{2\pi(R_G + R_{iA})C_1\sqrt{M_{b1}^2 - 1}} = 20Hz \rightarrow$

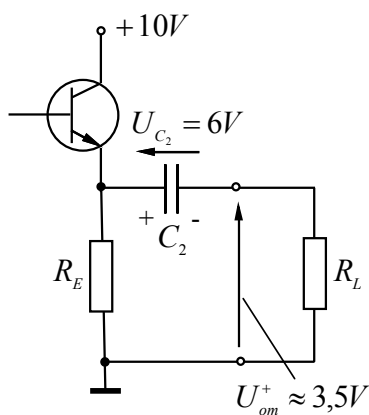
$$C_1 = \frac{1}{2\pi f_b (R_G + R_{iA})\sqrt{M_{b1}^2 - 1}} \approx 1,08\mu F \text{ (} 1,2\mu F \text{);}$$

– За изходната верига:  $f_b = \frac{1}{2\pi(R_{oA} + R_L)C_2\sqrt{M_{b2}^2 - 1}} = 20Hz \rightarrow$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi f_b (R_{oA} + R_L)\sqrt{M_{b2}^2 - 1}} \approx 17,4\mu F \text{ (} 20\mu F \text{).}$$

д) Горната и долната граница на изходното напрежение се определят за двете крайни положения на работната точка, при които транзисторът е наситен и запушен.

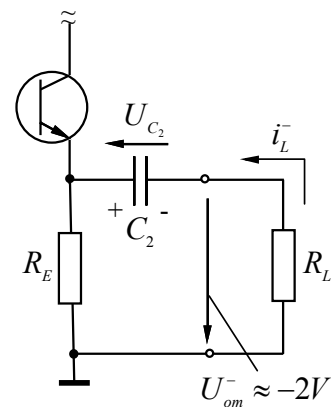
Определяне на горната граница  $U_{om}^+$   
(транзисторът е наситен)



$$U_{om}^+ = V_{CC} - U_{CEsat} - U_{C_2} \approx 3,5V,$$

където  $U_{C_2} = I_E \cdot R_E \approx 6V$ ;

Определяне на долната граница  $U_{om}^-$   
(транзисторът е запушен)



$$U_{om}^- = i_L^- R_L \approx I_E (R_E \parallel R_L) \approx -2V,$$

където  $i_L^- \approx \frac{-U_{C_2}}{R_L + R_E}$  и  $U_{C_2} = I_E \cdot R_E \approx 6V$ .

**1.14.** На фиг. 1.17 е представен двустъпален усилвател, съставен от две еднакви стъпала, свързани по схема ОС. Транзисторите  $T_1$  и  $T_2$  за  $I_D = 2\text{mA}$  и  $U_{DS} = 6\text{V}$  имат следните параметри:  $S = 2,5\text{mS}$ ,  $r_{DS} = 50\text{k}\Omega$ ,  $C_{GS} = 2\text{pF}$ ,  $C_{GD} = 1,5\text{pF}$  и  $C_{DS} = 1\text{pF}$ .

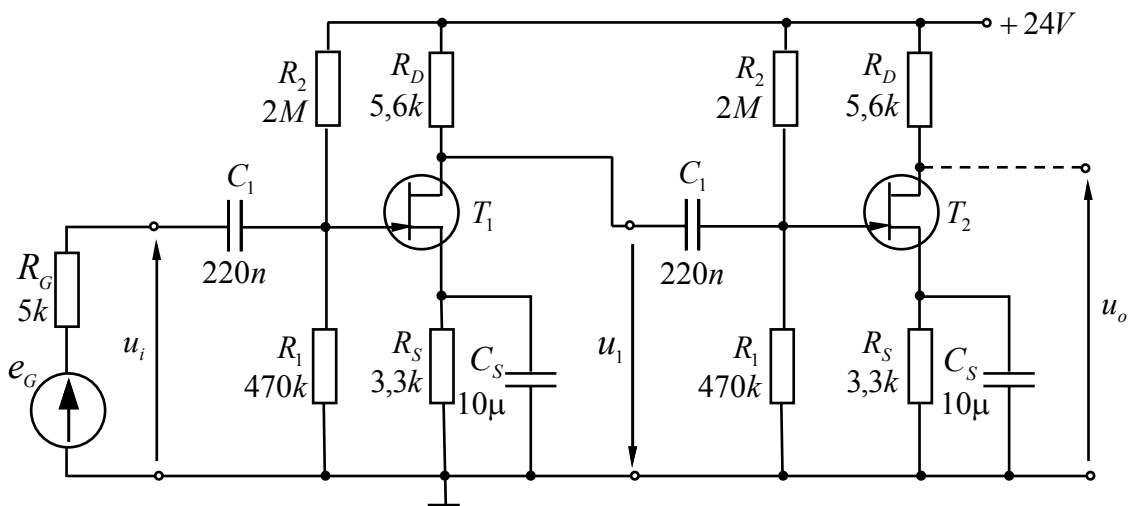
а) Да се изчисли коефициентът на усилване по напрежение  $A = u_o / e_G$  за средни честоти;

б) Да се изчисли ниската и високата гранична честота ( $f'_{b,07}$  и  $f'_{h,07}$ ) на усилвателната схема за  $M_b = 3\text{dB}$  и  $M_h = 3\text{dB}$ .

в) Да се начертае на обща координатна система АЧХ на двустъпалния усилвател и на отделно усилвателно стъпало.

*Решение:*

а) Понеже усилвателят от фиг. 1.17 е съставен от две стъпала ОС, свързани каскадно (верижно), общият коефициент на усилване по напрежение  $A = u_o / e_G$  се получава като произведение от коефициентите на усилване на отделните стъпала ( $A_1$  и  $A_2$ ) или  $A = A_1 \cdot A_2$ .



Фиг. 1.17.

$$A_1 = \frac{u_1}{e_G} = A_{U1} \frac{R_{iA}}{R_{iA} + R_G} = -12,6 \cdot \frac{380\text{k}\Omega}{380\text{k}\Omega + 5\text{k}\Omega} \approx -12,4,$$

$$\text{където } A_{U1} = \frac{u_1}{u_i} = -S(R_D \parallel r_{DS}) = -2,5\text{mS} \cdot \frac{5,6\text{k}\Omega \cdot 50\text{k}\Omega}{5,6\text{k}\Omega + 50\text{k}\Omega} \approx -12,6 \text{ и}$$

$$R_{iA} = R_1 \parallel R_2 \approx 380\text{k}\Omega;$$

$$A_2 = \frac{u_o}{u_1} = A_{U2} \frac{R'_{iA}}{R'_{iA} + R'_G} = -12,6 \cdot \frac{380\text{k}\Omega}{380\text{k}\Omega + 5\text{k}\Omega} \approx -12,4,$$

$$\text{където } A_{U2} = A_{U1} \approx -12,6, R'_{iA} = R_{iA} = R_1 \parallel R_2 \approx 380\text{k}\Omega \text{ и } R'_G = R_D \parallel r_{DS} \approx 5\text{k}\Omega.$$

Тогава

$$A = \frac{u_o}{e_G} = \underbrace{\frac{u_1}{e_G}}_{A_1} \cdot \underbrace{\frac{u_o}{u_1}}_{A_2} = A_1 \cdot A_2 = (-12,4) \cdot (-12,4) \approx 154 \text{ или } A_{dB} = 20 \log_{10} 154 \approx 43,75\text{dB}.$$

б) Ниските и високите гранични честоти, обусловени от входната и от изходната верига на всяко от стъпалата ОС, се определят от следните формули:

– ниски гранични честоти

$$f_{b1} = \frac{1}{2\pi(R_G + R_{iA})C_1} \approx 2\text{Hz} \text{ и } f_{bS} = \frac{1}{2\pi C_S \left( \frac{1}{S} \parallel R_S \right)} \approx 45\text{Hz}, \text{ тогава}$$

$$f_{b,07} \approx f_{bS} = 45\text{Hz};$$

– високи гранични честоти

$$f_{hi} = \frac{1}{2\pi(C_{GS} + C'_{GD})(R_G \parallel R_{iA})} \approx 1,4\text{MHz} \text{ и } f_{ho} = \frac{1}{2\pi(C_{DS} + C''_{GD})(r_{DS} \parallel R_D)} \approx 12\text{MHz},$$

където  $C'_{GD} = C_{GD}(1 - A_{U1}) = 1,5\text{pF} \cdot [1 - (-12,6)] \approx 20\text{pF}$  и

$$C''_{GD} = C_{GD} \left( 1 - \frac{1}{A_{U1}} \right) \approx 1,5\text{pF} \cdot 1,08 \approx 1,62\text{pF}. \text{ Тогава } f_{h,07} \approx f_{hi} = 1,4\text{MHz}.$$

Тъй като усилвателят включва две стъпала, които са еднакви (реализирани с еднакви транзистори, работещи при един и същ постоянен ток режим) и имат високо входно съпротивление, за честотната характеристика в областта на ниските честоти се получава

$$|\dot{A}| = \frac{12,4}{\sqrt{1 + \left( \frac{f_{b,07}}{f} \right)^2}} \cdot \frac{12,4}{\sqrt{1 + \left( \frac{f_{b,07}}{f} \right)^2}} = \frac{154}{1 + \left( \frac{f_{b,07}}{f} \right)^2}.$$

Тогава за честота  $f'_b$ , където  $|\dot{A}|$  спада с 3dB (или  $1/\sqrt{2}$ ), се намира

$$\frac{154}{\sqrt{2}} = \frac{154}{1 + \left( \frac{f_{b,07}}{f'_b} \right)^2} \rightarrow f'_{b,07} = \frac{f_{b,07}}{\sqrt{\sqrt{2} - 1}} \approx \frac{45\text{Hz}}{0,64} \approx 70\text{Hz}.$$

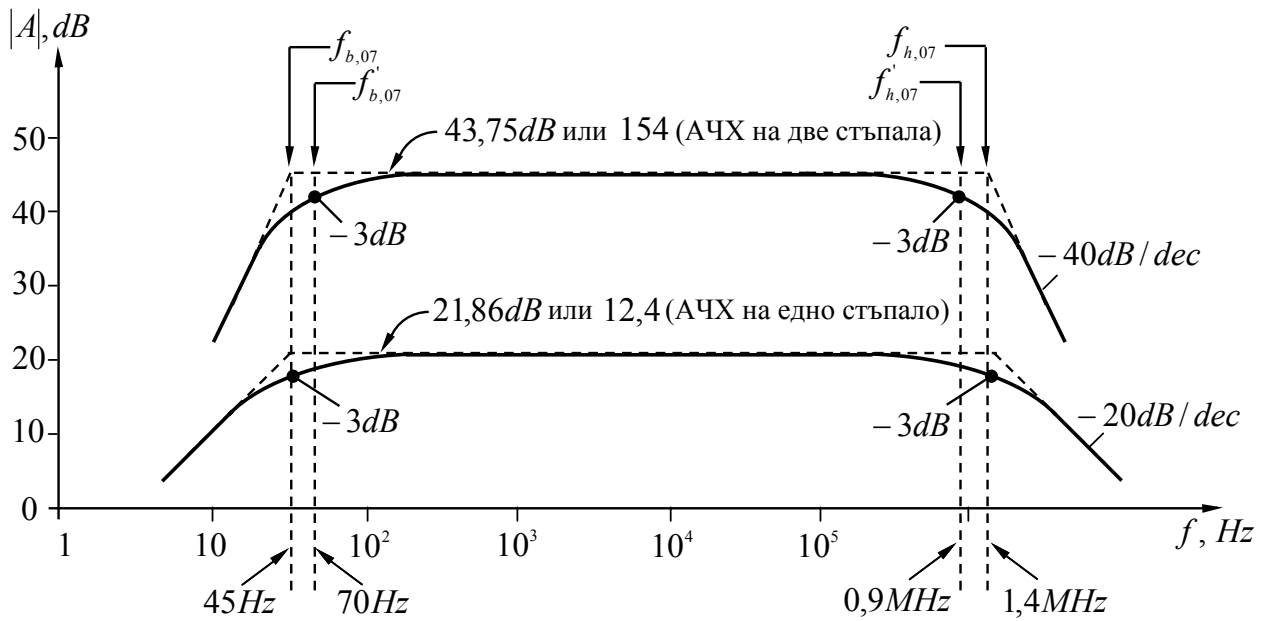
За честотната характеристика в областта на високите честоти се получава

$$|\dot{A}_U| = \frac{12,4}{\sqrt{1 + \left( \frac{f}{f_{h,0,7}} \right)^2}} \cdot \frac{12,4}{\sqrt{1 + \left( \frac{f}{f_{h,07}} \right)^2}} = \frac{154}{\sqrt{1 + \left( \frac{f}{f_{h,07}} \right)^2}}.$$

Тогава за честота  $f'_{h,07}$ , където  $|\dot{A}|$  спада с 3dB (или  $1/\sqrt{2}$ ), се намира

$$\frac{154}{\sqrt{2}} = \frac{154}{\sqrt{1 + \left( \frac{f'_{h,07}}{f_{h,07}} \right)^2}} \rightarrow f'_{h,07} = f_{h,07} \cdot \sqrt{\sqrt{2} - 1} \approx 1,4\text{MHz} \cdot 0,64 \approx 0,9\text{MHz}.$$

в) АЧХ на двустъпалния усилвател и на отделно усилвателно стъпало, свързано по схема ОС са дадени на фиг. 1.18.



Фиг. 1.18.



**Задачи**

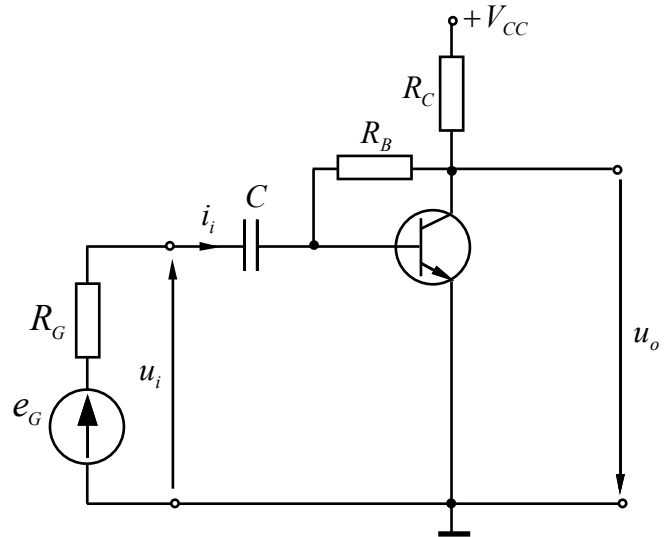
**1.15.** На фиг. 1.19 е дадена схема ОЕ. За схемата са известни:  $V_{CC} = 10V$ ,  $R_B = 560k\Omega$ ,  $R_C = 3,9k\Omega$ ,  $R_G = 1k\Omega$ ,  $U_T = 26mV$  и  $r_{CE} \rightarrow \infty$ .

Да се изчислят:

а) съпротивлението  $r_{BE}$  и стръмността  $S$  на транзистора за  $I_C = 1mA$  и  $\beta = 100$ ;

б) входното съпротивление  $R_{iA} = u_i / i_i$  и ниската гранична честота  $f_{bi}$ , обусловена от входната верига, ако  $C = 1\mu F$  и  $M_b = 3dB$ ;

в) коефициентите на усилване по напрежение  $A_U = u_o / u_i$  и  $A = u_o / e_G$  за средни честоти.



Фиг. 1.19.

**1.16.** За схемата на фиг. 1.20 коефициентът на усилване по напрежение е

$A_U = -200$  при включване на  $C_E$  към точка 1 и  $A'_U = -10$  при включване на  $C_E$  към точка 1'. Дадени са:  $I_C = 1mA$ ,  $I_{R2} = 0,1mA$ ,  $U_{BE} = 0,7V$ ,  $I_{R2} \gg I_B$ ,  $R_{E1} + R_{E2} = R_C$ ,  $U_T = 26mV$ ,  $R_L \rightarrow \infty$ ,  $\omega C \rightarrow \infty$  и  $\omega C_E \rightarrow \infty$ . Да се определят:

- а) Съпротивленията на резисторите  $R_C$ ,  $R_{E1}$  и  $R_{E2}$ ;
- б) Съпротивленията на резисторите  $R_1$  и  $R_2$ , ако  $V_{CC} = 18V$ .

**1.17.** За схемата на фиг. 1.20 при включване на кондензатора  $C_E$  към точка 1' и  $V_{CC} = 10V$  са дадени:

– резистори със съпротивления:  $R_{E1} = 50\Omega$ ,  $R_{E2} = 150\Omega$ ,  $R_1 = 100k\Omega$ ,  $R_2 = 30k\Omega$ ,  $R_C = 820\Omega$ , вътрешното съпротивление на източника на сигнал е  $R_G = 1k\Omega$  и еквивалентното съпротивление на товара е  $R_L = 500\Omega$ ;

– транзистор с  $I_C = 6mA$  и  $U_{CE} = 4V$  и с параметри:  $r_{BE} = 1,5k\Omega$ ,  $\beta = 300$ ,  $S = 200mS$  и  $r_{CE} = 30k\Omega$ .

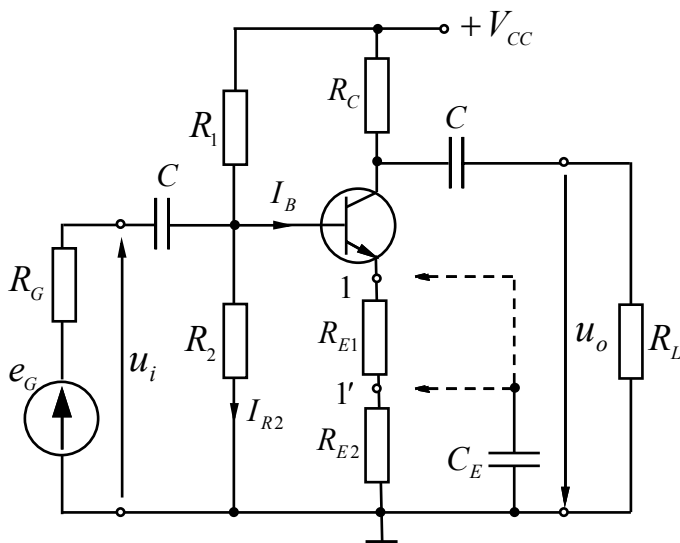
Да се изчислят:

а) напрежението  $U_{V'}$  (върху кондензатора  $C_E$ ) и напрежението  $U_C$  (върху изходния разделителен кондензатор  $C$ );

б) коефициентите на усилване по напрежение  $A_U = u_o / u_i$  и  $A = u_o / e_G$  за средни честоти;

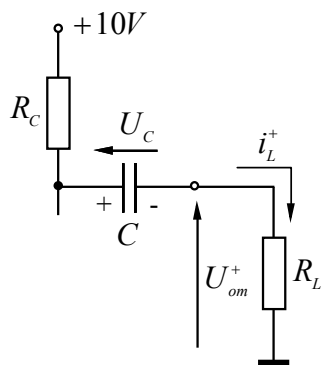
в) долната и горната граница на изходното напрежение ( $U_{om}^+$  и  $U_{om}^-$ ).

**Упътване:** При изчисляване на напреженията  $U_{om}^+$  и  $U_{om}^-$  да се използват зависимостите, дадени на фигурите по-долу.



Фиг. 1.20.

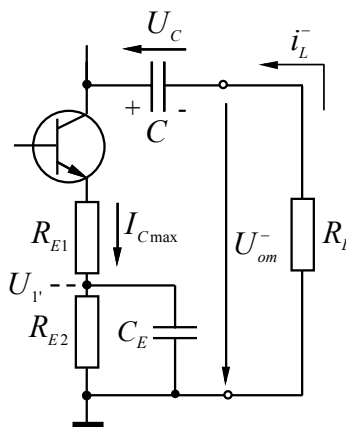
Определяне на горната граница  $U_{om}^+$  (транзисторът е запушен)



$U_{om}^+ = i_L^+ R_L$ , където

$$i_L^+ = \frac{V_{CC} - U_C}{R_C + R_L}.$$

Определяне на долната граница  $U_{om}^-$  (транзисторът е наситен  $U_{CEsat} \approx 0$ )



$$U_{om}^- \approx U_C - (I_{Cmax} R_{E1} + U_{V'}),$$

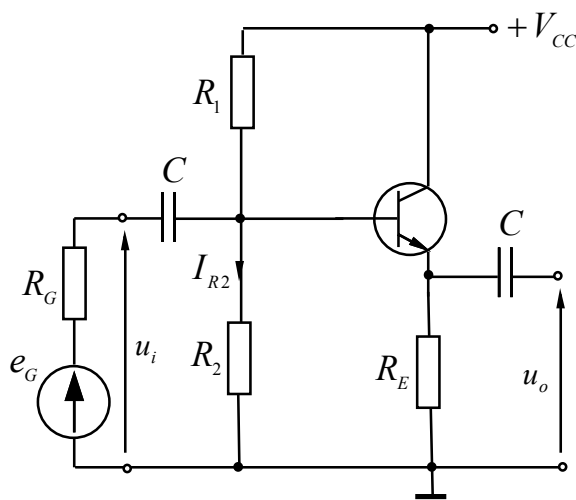
$$\text{където } I_{Cmax} = I_C + \frac{U_{CE}}{R_C \parallel R_L + R_{E1}}.$$

**1.18.** За схемата, показана на фиг. 1.21, са дадени:  $V_{CC} = 5V$ ,  $U_{BE} = 0,6V$ ,  $U_T = 26mV$ ,  $I_C = 0,5mA$ ,  $\beta = 100$ ,  $I_{R2} = 10I_B$ ,  $R_E = 5k\Omega$ ,  $\omega C \rightarrow \infty$  и  $r_{CE} \rightarrow \infty$ . Да се определят:

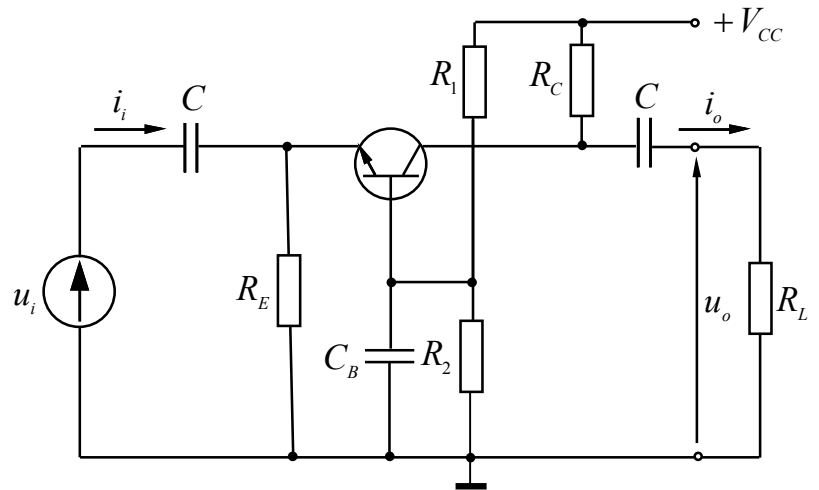
а) стойностите на съпротивленията на резисторите  $R_1$  и  $R_2$ ;

б) входното съпротивление на схемата и коефициентът на предаване на входната верига, ако  $R_G = 5k\Omega$ ;

в) коефициентът на усилване по напрежение с отчитане на влиянието на  $R_G$ .



Фиг. 1.21.



Фиг. 2.22.

**1.19.** На фиг. 1.22 е дадена схема с обща база (ОБ). За нея са известни:  $R_E = 2k\Omega$ ,  $R_C = 10k\Omega$ ,  $R_L = 10k\Omega$ ,  $r_{BE} = 5k\Omega$ ,  $\beta = 200$ ,  $r_{CE} \rightarrow \infty$ ,  $\omega C \rightarrow \infty$  и  $\omega C_B \rightarrow \infty$ . Да се изчисли:

- коэффициентът на усилване по напрежение  $A_U = u_o / u_i$ ;
- коэффициентът на усилване по ток  $A_I = i_o / i_i$ .

**1.20.** На фиг. 1.23 е представена усилвателна схема с общ дрейн (ОД). За схемата са известни:  $V_{DD} = 24V$ ,  $R_1 = 1M\Omega$ ,  $R_2 = 620k\Omega$ ,  $R_S = 3,3k\Omega$ ,  $S = 3,5mS$ ,  $C_{DS} = 1pF$ ,  $C_{GS} = 2pF$ ,  $C_{GD} = 1,5pF$ ,  $C_L = 50pF$ ,  $\omega C_1 \rightarrow \infty$  и  $\omega C_2 \rightarrow \infty$ . Да се намерят:

- входното и изходното съпротивление на схемата ( $R_{iA}$  и  $R_{oA}$ );
- коэффициентите на усилване по напрежение на стъпалото  $A_U = u_o / u_i$  и  $A = u_o / e_G$  за  $R_G = 5k\Omega$  и  $R_L = 10k\Omega$ ;
- високите гранични честоти, обусловени от входната и от изходната верига ( $f_{hi}$  и  $f_{ho}$ ) за  $M_h = 3dB$ .

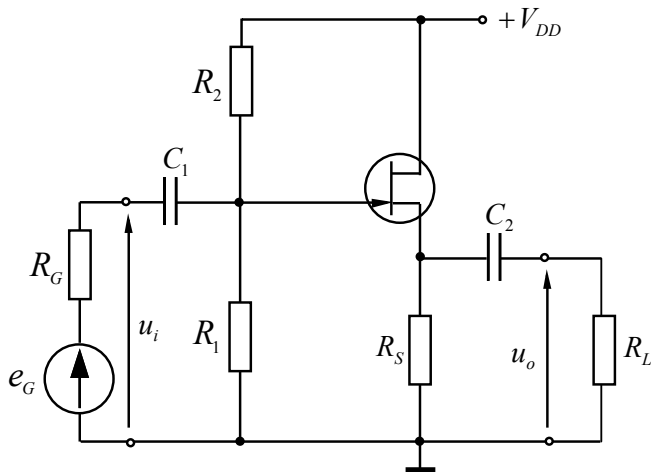
**1.21.** На фиг. 1.24 е представена схема общ гейт (ОГ) с  $U_{DD} = 20V$ . За схемата са известни:

- източник на сигнал с вътрешно съпротивление  $R_G = 50\Omega$ ;
- транзистор с параметри:  $I_D = 2,5mA$ ,  $U_{DS} = 8V$ ,  $U_{GS} = -2V$ ,  $S = 2,5mS$ ,  $r_{DS} = 50k\Omega$ ,  $C_{DS} = 1pF$ ,  $C_{GS} = 2pF$  и  $C_{GD} = 1,5pF$ .

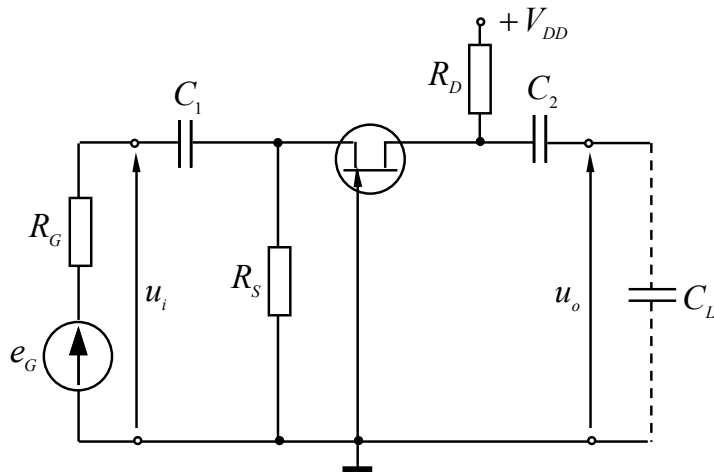
Да се намерят:

- съпротивленията на резисторите  $R_S$  и  $R_D$ ;
- входното и изходното съпротивление на схемата ( $R_{iA}$  и  $R_{oA}$ );
- коэффициентите на усилване по напрежение на стъпалото  $A_U = u_o / u_i$  и  $A = u_o / e_G$ ;
- високата гранична честота  $f_{ho}$ , обусловена от изходната верига, ако в из-

хода е включен товар с капацитет  $C_L = 3\text{pF}$ .



Фиг. 1.23.

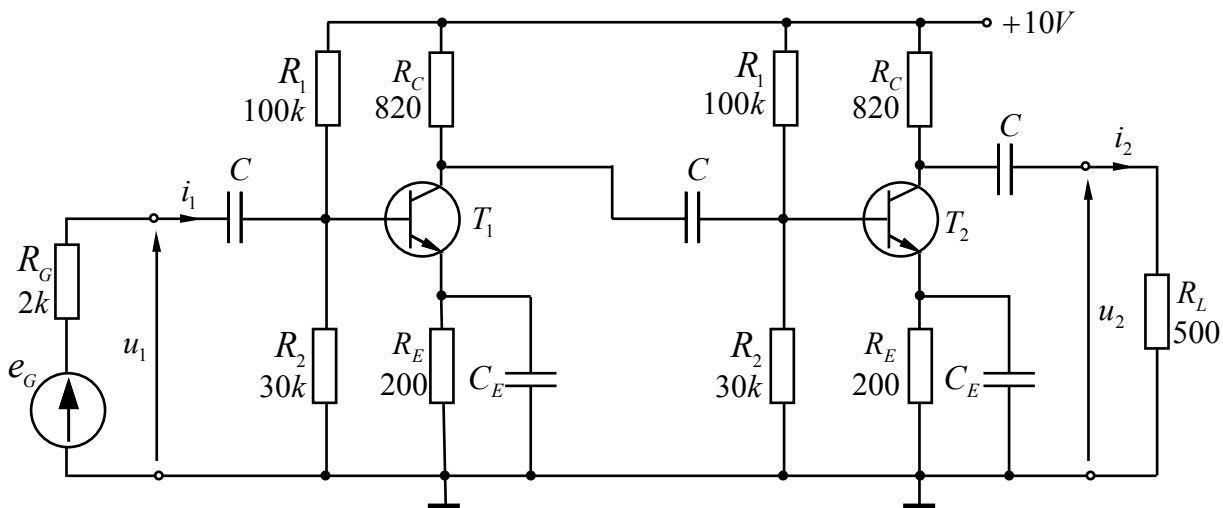


Фиг. 1.24.

1.22. На фиг. 1.25 е представен двустъпален усилвател, съставен от две еднакви стъпала, свързани по схема ОЕ. Транзисторите  $T_1$  и  $T_2$  за  $I_C = 6\text{mA}$  и  $U_{CE} = 4\text{V}$  имат следните параметри:  $S = 200\text{mS}$ ,  $r_{BE} = 1,5\text{k}\Omega$ ,  $\beta = 300$  и  $r_{CE} = 30\text{k}\Omega$ . Да се изчисли:

а) коефициентът на усиление по напрежение  $A = u_2 / e_G$  за средни честоти ( $\omega C \rightarrow \infty$  и  $\omega C_E \rightarrow \infty$ );

б) входното съпротивление  $R_{iA}$  и изходното съпротивление  $R_{oA}$  на усилвателя.



Фиг. 1.25.

1.23. В електронен усилвател е приложена последователна отрицателна обратна връзка по напрежение.

а) Начертайте обобщената еквивалентна схема на усилвателя с блока за обратна връзка (ОВ);

б) Анализирайте еквивалентната схема и изведете формулите за коефициен-



та на усилване  $A_{F(-)}$ , входното съпротивление  $R_{iA}$  и изходното съпротивление  $R_{oA}$ ;

в) Изчислете  $A_{F(-)}$ ,  $R_{iA}$  и  $R_{oA}$ , ако предавателната функция на правата верига  $A = 1V/mV$  и на обратната верига  $\beta = 0,1V/V$ . Входното и изходното съпротивление на усилвателя без ОБ са  $R_i = 10k\Omega$  и  $R_o = 5k\Omega$ .

**1.24.** В електронен усилвател е приложена последователна отрицателна обратна връзка по ток.

а) Начертайте обобщената еквивалентна схема на усилвателя с блока за обратна връзка (ОВ);

б) Анализирайте еквивалентната схема и изведете формулите за коефициента на усилване  $A_{F(-)}$ , входното съпротивление  $R_{iA}$  и изходното съпротивление  $R_{oA}$ ;

в) Изчислете  $A_{F(-)}$ ,  $R_{iA}$  и  $R_{oA}$ , ако предавателната функция на правата верига  $A = 40mA/V$  и на обратната верига  $\beta = 1V/mA$ . Входното и изходното съпротивление на усилвателя без ОБ са  $R_i = 1k\Omega$  и  $R_o = 1,5k\Omega$ .

**1.25.** На фиг. 1.26. е даден двустъпален усилвател, в който всяко от стъпалата е схема ОЕ. За усилвателя са известни:

– транзистор  $T_1$  с параметри:  $I_{C1} = 1mA$ ,  $U_{BE1} = 0,6V$ ,  $\beta_1 = 270$ ,  $r_{BE1} = 7k\Omega$ ,  $S_1 = 39mS$  и  $r_{CE1} = 40k\Omega$ ;

– транзистор  $T_2$  с параметри:  $I_{C2} = 6mA$ ,  $U_{CE2} = 4V$ ,  $U_{BE2} = 0,63V$ ,  $\beta_2 = 300$ ,  $r_{BE2} = 1,5k\Omega$ ,  $S_2 = 200mS$  и  $r_{CE2} = 30k\Omega$ ;

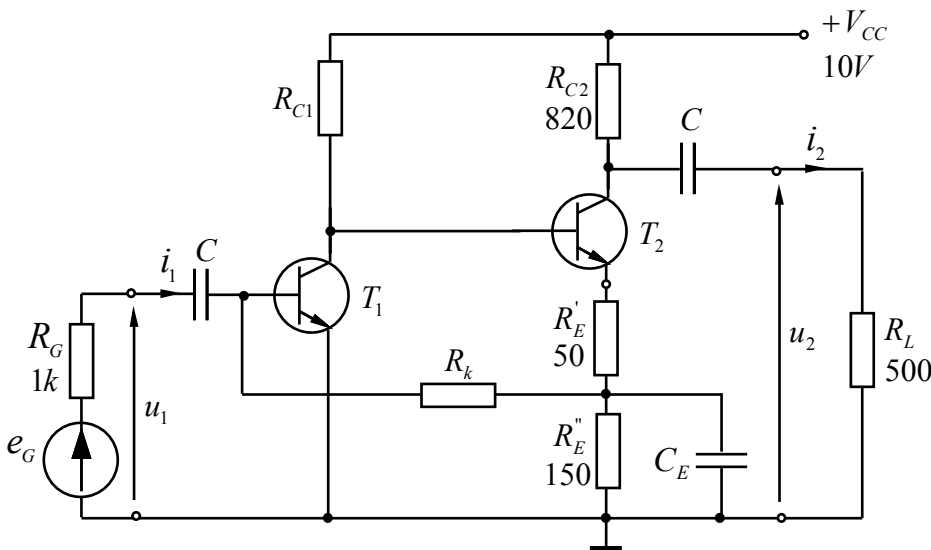
Да се изчислят:

а) съпротивленията на резисторите  $R_k$  и  $R_{C1}$ . Какъв тип обратна връзка е въведена с резистора  $R_k$ ?

б) входното и изходното съпротивление на усилвателя  $R_{iA}$  и  $R_{oA}$ ;

в) коефициентите на усилване по напрежение  $A_U = u_2/u_1$  и  $A = u_2/e_G$  за средни честоти ( $\omega C \rightarrow \infty$  и  $\omega C_E \rightarrow \infty$ ).

**1.26.** За схемата на двустъпалния усилвател (фиг. 1.10) от задача 1.9 да се намерят входното съпротивление  $R_{iA}$  и коефициентът на усилване по напрежение  $A = u_2/e_G$  за  $R_G = 1k\Omega$ .



Фиг. 1.26.