

2. ОСНОВНИ ГРАДИВНИ СЪПАЛА НА АНАЛОГОВИТЕ ИНТЕГРАЛНИ СХЕМИ

2.1. Източници на ток, токови огледала и източници на опорно напрежение

За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 4.1 и т. 4.2 от [4].



Пример

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

- съпротивленията на резисторите R_E и R_B ;
- изходното съпротивление на схемата.

Решение:

а) Прилагайки втория закон на Кирхоф за изходната верига на схемата, се получава:

$$V_{CC} = I_o R_E + U_{CE\text{min}} + I_o R_{L\text{max}} \rightarrow$$

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

Описвайки входната верига, се получава:

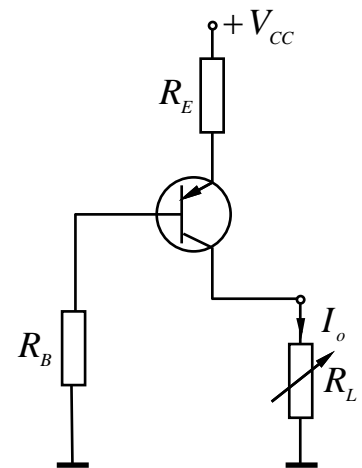
$$-\frac{I_o}{\beta} R_B + U_{CE\text{min}} - U_{BE} + I_o R_{L\text{max}} = 0 \rightarrow R_B = \frac{U_{CE\text{min}} - U_{BE} + I_o R_{L\text{max}}}{I_o / \beta} =$$

$$= \frac{2\text{V} - 0,7\text{V} + 3\text{V}}{3\text{mA} / 80} = 115\text{k}\Omega.$$

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

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

2.2. Дадено е $V_{DD}^+ = 3\text{V}$ използвайки, че $I_{REF} = 100\mu\text{A}$ да се проектира схемата от **фиг. 2.2**, така че да се получи изходен ток със стойност $100\mu\text{A}$. Да се намери съпротивлението на резистора R , ако M_1 и M_2 са изградени по една и съща технология и $L = 1\mu\text{m}$, $W = 10\mu\text{m}$, прагово напрежение $U_{TN} = 0,7\text{V}$ и $k_n' = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} = 200\mu\text{A}/\text{V}^2$. Каква е минималната възможна стойност на U_o ? Приемайки, че коефициентът на модулация на дължината на канала $\lambda = 0,05$ да



Фиг. 2.1.

се намери изходното съпротивление на източника на ток. Също така да се намери изменението на изходния ток в резултат от изменение на с +1V на U_o .

Решение:

$$I_{D1} = I_{REF} = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} (U_{GS} - U_{TN})^2 \text{ или}$$

$$100\mu\text{A} = \frac{1}{2} \frac{200\mu\text{A}}{V^2} \underbrace{(U_{GS} - U_{TN})^2}_{U_{ov}} \rightarrow$$

$$\rightarrow U_{ov} = 0,316V \rightarrow$$

$$\rightarrow U_{GS} = U_{TN} + U_{ov} = 0,7 + 0,316V \approx 1V.$$

$$\text{Тогава, } R = \frac{V_{DD}^+ - U_{GS}}{I_{REF}} = \frac{3V - 1V}{100\mu\text{A}} = 20k\Omega.$$

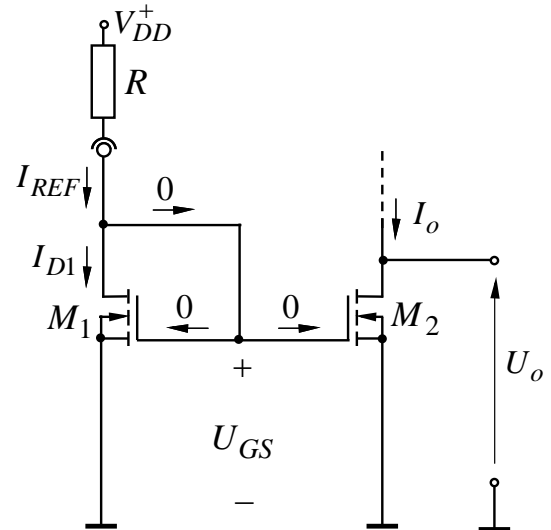
Минималната възможна стойност на изходното напрежение U_o , при която транзисторът M_2 е в режим на насищане е $U_{o\min} = U_{ov} \approx 0,3V$.

Изходното съпротивление на източника се определя от формулата

$$r_{o2} = r_{DS2} \approx \frac{1}{\lambda I_o} = \frac{1}{0,05 \times 100\mu\text{A}} = 200k\Omega.$$

Изходният ток ще бъде $100\mu\text{A}$ при $U_o = U_{GS} = 1V$. Ако U_o се промени с +1V, съответното изменение на I_o ще бъде

$$\Delta I_o = \frac{\Delta U_o}{r_{o2}} = \frac{1V}{200k\Omega} = 5\mu\text{A}.$$



Фиг. 2.2.



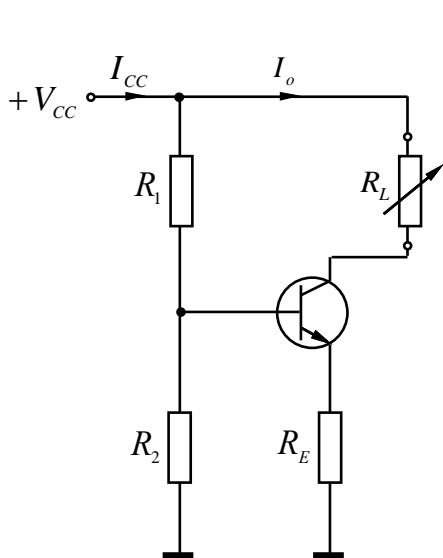
Задачи

2.3. За схемата на генератор на ток, показана на **фиг. 2.3**, са дадени: $V_{CC} = 20V$, $I_{CC} = 2mA$, $I_o = 1mA$, $R_{L\max} = 5k\Omega$, $U_{BE} = 0,6V$, $U_{CEsat} = 2V$, $r_{CE} = 60k\Omega$, $\beta = 200$, $\phi_T = 26mV$ и $I_B \ll I_{R2}$, I_o . Да се определят:

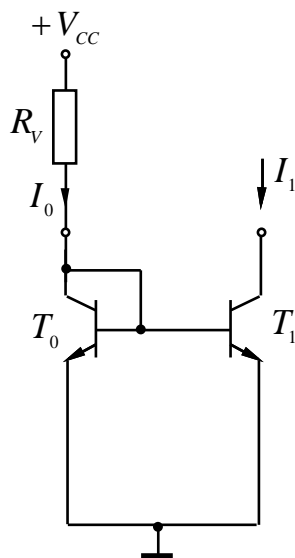
- съпротивленията на резисторите R_E , R_1 и R_2 ;
- изходното съпротивление на схемата.

2.4. За схемата на токово огледало, показана на **фиг. 2.4**, 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 .

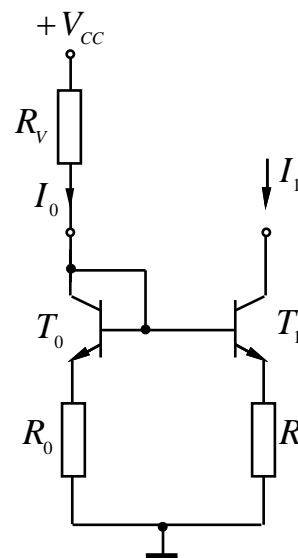
2.5. За схемата на токово огледало, показана на **фиг. 2.5**, са дадени: $V_{CC} = 12V$, $U_{BE} = 0,6V$, $R_0 = 15k\Omega$, $R_1 = 12k\Omega$ и $I_0 = 0,5mA$. Да се изчислят съпротивлението на резистора R_V и изходният ток I_1 .



Фиг. 2.3.



Фиг. 2.4.

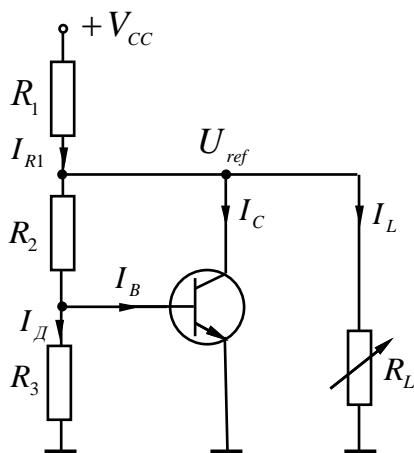


Фиг. 2.5.

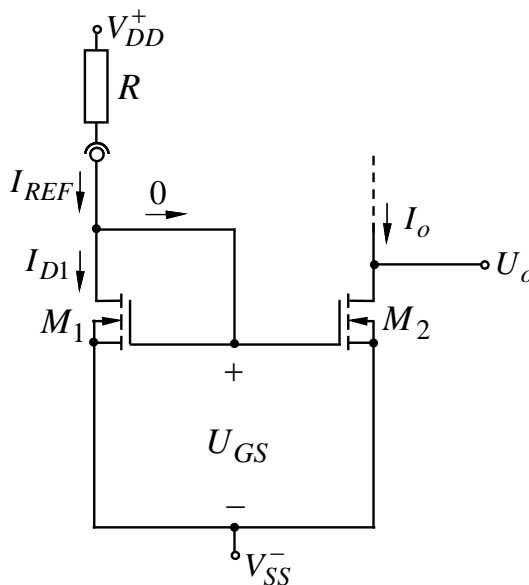
2.6. Да се начертае схема на генератор на опорно напрежение с три диода и един резистор. Да се определи големината на изходното (опорното) напрежение U_{ref} , ако се знае, че падът на напрежение върху всеки от диодите е $0,6V$.

2.7. За схемата на източник на опорно напрежение, показана на **фиг. 2.6**, 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. 2.6.



Фиг. 2.7.

2.8. Използвайки транзистори M_1 и M_2 с еднакви дължини на каналите и отношение на ширините $W_2/W_1 = 5$, да се проектира схемата от **фиг. 2.7**, така

че да се получи $I_o = 0,5\text{mA}$. За схемата са известни: $V_{DD} = -V_{SS} = 5\text{V}$, $k'_{n1} = 0,8\text{mA/V}^2$, $U_{TN} = 1\text{V}$ и $\lambda = 0$. Да се намери необходимата стойност на R . Какво е напрежението на гейтовете на M_1 и M_2 ? Какво е най-малкото възможно напрежение на дрейна на M_2 , до което M_2 остава в режим на насищане?

2.2. Усилватели с динамичен товар. Каскодни усилватели и повторители

За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 4.4 и 4.5 от [4].



Примери

2.9. На **фиг. 2.8а** е дадена усилвателно стъпало с динамичен товар с два комплементарни MOS транзистора, съответно с индуциран N – и P – канал (CMOS усилвателно стъпало). За схемата са известни: $g_{m1} = g_{m2} \approx 60\mu\text{A/V}$, $r_{DS1} \approx r_{DS2} \approx 500\text{k}\Omega$, $r_{GS1} \approx r_{GS2} \rightarrow \infty$ и $\lambda = 0$.

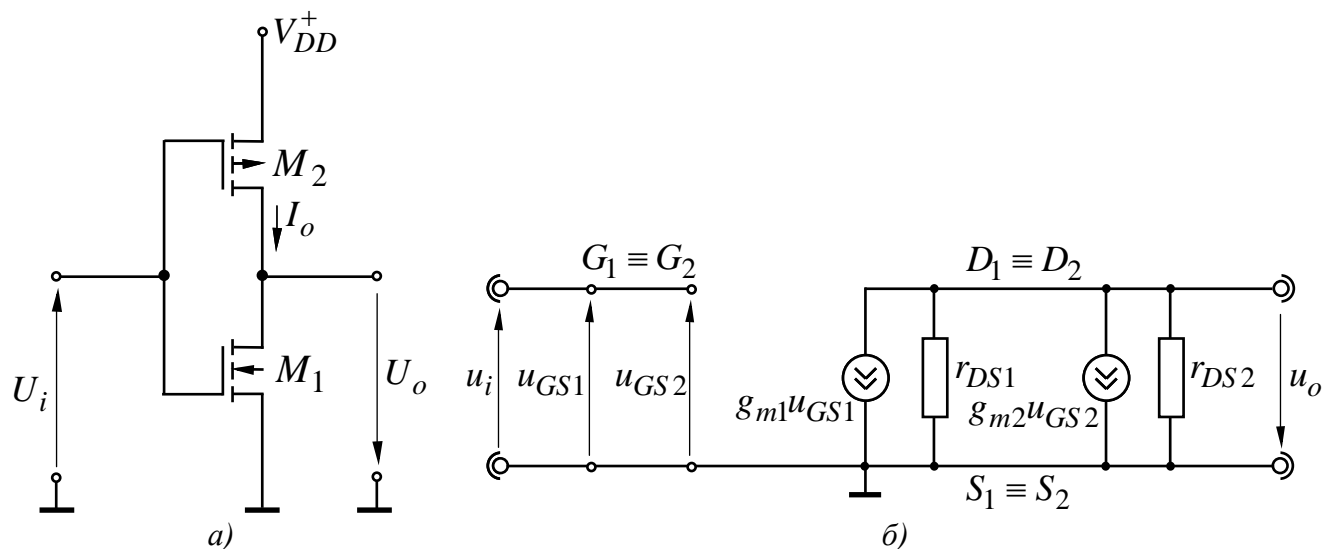
а) Да се начертае малосигналната еквивалентна схема по променлив ток за средни честоти.

б) Да се намерят в общ вид формулите за коефициента на усилване по напрежение $A_U = u_o / u_i$, входното съпротивление r_{iA} и изходното съпротивление r_{oA} .

в) Да се изчислят параметрите A_U , r_{iA} и r_{oA} .

Решение:

а) Построява се еквивалентната схема по променлив ток (**фиг. 2.8б**). За целта захранващият източник V_{DD}^+ се дава накъсо, а транзисторите M_1 и M_2 се заместват с малосигналните си модели (вж. **фиг. П1.2**).



Фиг. 2.8. CMOS усилвателно стъпало: а) електрическа схема; б) малосигнална еквивалентна електрическа схема.

б) От анализ на изходната верига, съгласно закона на Ом, за изходното променливо напрежение се намира

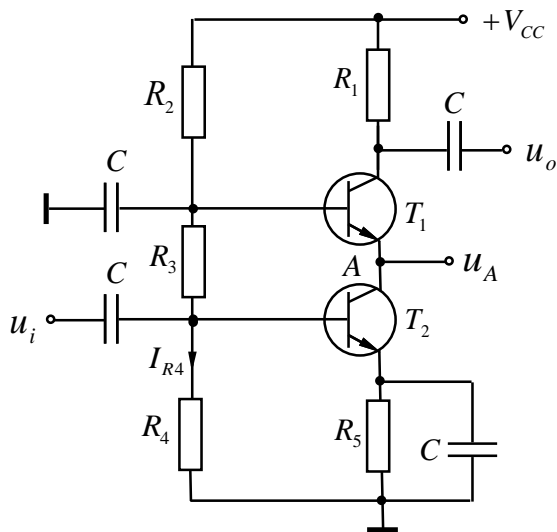
$$u_o = -(g_{m1}u_{GS1} + g_{m2}u_{GS2})(r_{DS1} \parallel r_{DS2}) \text{ или}$$

$$A_U = \frac{u_o}{u_i} \Big|_{i_o=0} = -(g_{m1} + g_{m2})(r_{DS1} \parallel r_{DS2}).$$

Освен това за входното и изходното съпротивление се получават формулите: $r_{iA} = \infty$ и $r_{oA} = r_{DS1} \parallel r_{DS2}$.

в) $A_U = -(g_{m1} + g_{m2})(r_{DS1} \parallel r_{DS2}) = -(60\mu S + 60\mu S)(500k\Omega \parallel 500k\Omega) \rightarrow$
 $A_U = -30$; $r_{iA} = \infty$ и $r_{oA} = r_{DS1} \parallel r_{DS2} = 500k\Omega \parallel 500k\Omega = 250k\Omega$.

2.10. На **фиг. 2.9** 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: $V_{CC} = 3V$, $I_{C1} = I_{C2} = 5mA$, $\beta_{1,2} = 150$, $\varphi_T = 26mV$, $U_{BE1,2} = 0,7V$, $U_{R5} = 0,5V$, $U_A = 1,5V$, $I_{R4} = 0,5mA$, $r_{CE1,2} \rightarrow \infty$ и $\omega C \rightarrow \infty$. Да се изчислят:



Фиг. 2.9.

а) коефициентът на усилване по напрежение $A_{UT2} = u_A / u_i$;

б) съпротивленията на резисторите R_5 , R_4 , R_3 и R_2 ;

в) съпротивлението на резистора R_1 , ако се знае, че коефициентът на усилване на каскодния усилвател е $|A_U| = u_o / u_i = 20$.

Решение:

а) Коефициентът на усилване по напрежение на първото стъпало е $A_{U1} = \frac{u_A}{u_i} \approx -g_{m2}R'_L \approx -g_{m2} \frac{1}{g_{m1}} \approx -1$, където $R'_L \approx r_{iA1} \approx 1/g_{m1}$ (транзисторът T_2 е свързан по схема с ОЕ).

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

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

където $I_{B2} = \frac{I_{C2}}{\beta_2} = \frac{5mA}{150} = 33\mu A$

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

$$I_{B1} = \frac{I_{C1}}{\beta_1} = \frac{5mA}{150} = 33\mu A.$$

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

$$A_{U2} = \frac{u_o}{u_A} \approx g_{m1} R_1 \text{ (транзисторът } T_1 \text{ е свързан по схема с ОБ).}$$

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

$$|A_U| = \frac{u_o}{u_i} = \frac{u_A u_o}{\underbrace{u_i}_{A_{U1}} \underbrace{u_A}_{A_{U2}}} = A_{U1} A_{U2} \approx S_1 R_1, \quad g_{m1} \approx \frac{I_{C1}}{\varphi_T} = \frac{5mA}{26mV} = 192mS \rightarrow$$

$$\rightarrow R_1 \approx \frac{|A_U|}{g_{m1}} = \frac{20}{192mS} \approx 104\Omega.$$

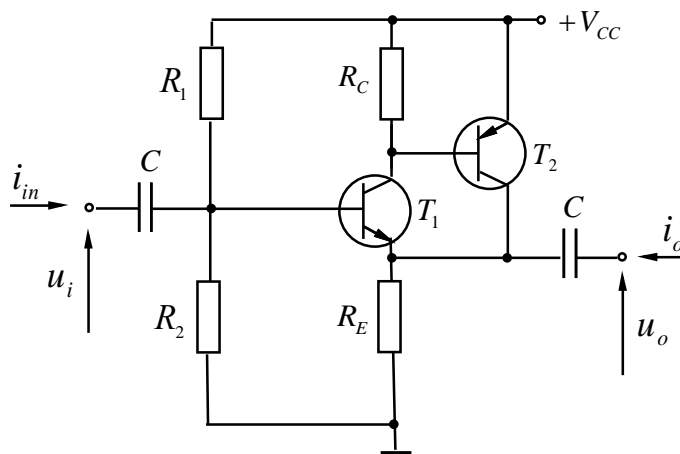


Задачи

2.11. На **фиг. 2.10** е показана схема на двустъпален усилвател ОБ – ОБ със 100% последователна ООВ по напрежение. За схемата е известно: $V_{CC} = 15V$, $\varphi_T = 26mV$, $\beta_{1,2} = 100$, $R_1 = R_2 = 22k\Omega$, $R_E = 2k\Omega$, $R_C = 5k\Omega$, $r_{CE1,2} \rightarrow \infty$ 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 $i_{in} = 0$).



Фиг. 2.10.

2.12. За двустъпалния усилвател ОС – ОБ (**фиг. 1.11**) от пример **задача 1.10** да намери коефициентът на усилване по напрежение $A_U = u_o / u_i$.

2.13. На **фиг. 2.11** е дадена усилвателна схема с два еднотипни MOS транзистора с индуциран N-канал. При $I_{D1,2} \approx 100\mu A$ за схемата са известни: $g_{m1} = 900\mu S$, $g_{m2} = 90\mu S$, $r_{DS1} \approx r_{DS2} \approx 1M\Omega$ и $r_{GS1} \approx r_{GS2} \rightarrow \infty$ (геометричните

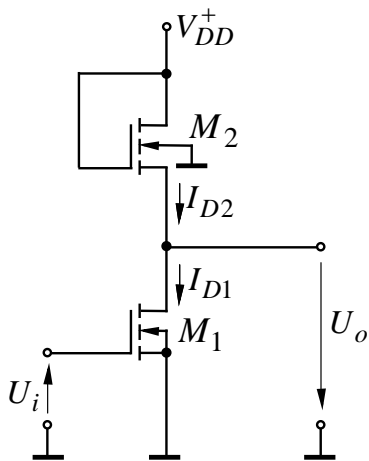
размери на транзисторите са $W_1/L_1 = 200$, $W_2/L_2 = 2$, като $k'_n = 20\mu\text{A}/\text{V}^2$ и $\lambda = 0,01$).

а) Да се начертае малосигналната еквивалентна схема по променлив ток за средни честоти.

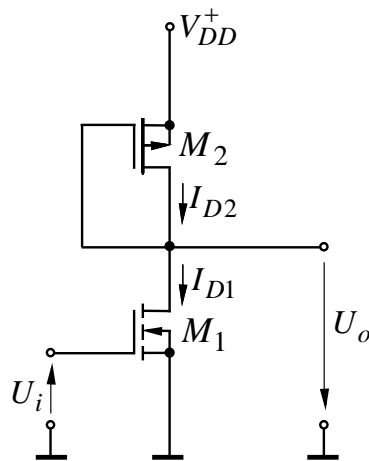
б) Да се изведат в общ вид формулите за коефициента на усилване по напрежение A_U , входното съпротивление r_{iA} и изходното съпротивление r_{oA} .

в) Да се изчислят A_U , r_{iA} и r_{oA} за дадените по-горе параметри.

2.14. На **фиг. 2.12** е дадена усилвателна схема с два комплементарни MOS транзистора, съответно с индуциран N-канал и вграден P-канал. При $I_{D1,2} \approx 200\mu\text{A}$ за схемата са известни: $g_{m1} = 1,4\text{mS}$, $g_{m2} = 70\mu\text{S}$, $r_{DS1} \approx r_{DS2} \approx 500\text{k}\Omega$ и $r_{GS1} \approx r_{GS2} \rightarrow \infty$ (геометричните размери на транзисторите са $W_1/L_1 = 200$, $W_2/L_2 = 0,5$, като $k'_n = 25\mu\text{A}/\text{V}^2$ и $\lambda = 0,01$).



Фиг. 2.11.



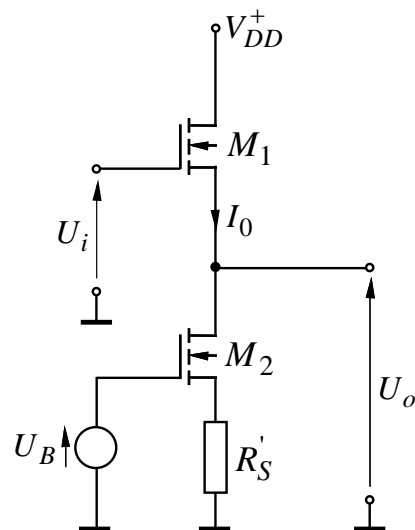
Фиг. 2.12.

а) Да се начертае малосигналната еквивалентна схема по променлив ток за средни честоти.

б) Да се изведат в общ вид формулите за коефициента на усилване по напрежение A_U , входното съпротивление r_{iA} и изходното съпротивление r_{oA} .

в) Да се изчислят A_U , r_{iA} и r_{oA} за дадените по-горе параметри.

2.15. За схемата каскоден повторител с ОД, показана на **фиг. 2.13** да се анализира принципът на работа и да се изведат в общ вид формулите за коефициента на усилване по напрежение за средни честоти, входното съпротивление и изходното съпротивление. Да се сравни каскодният повторител с ОД и каскодният повторител с ОК. Да се посочат предимствата и недостатъците на каскодният повторител с ОД.



Фиг. 2.13.

2.3. Диференциални усилватели

За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 4.6 от [4].



Примери

2.16. На **фиг. 2.14** е дадена схема на диференциален усилвател, чийто постоянен ток режим се задава с генератор на ток. За схемата са дадени: $V_{CC} = -V_{EE} = 12V$, $U_{BE1...4} = 0,6V$, $\varphi_T = 30mV$, $\beta_{1,2} = 100$, $r_{BE1,2} = 4k\Omega$, $r_{CE1,2,3,4} = 20k\Omega$ ($T_1 \equiv T_2$) и $A_d = u_o / u_{id} = -70$. Отношението на площите на емитерните преходи на T_3 и T_4 е $S_{E_{T_3}} / S_{E_{T_4}} = 1$. Да се изчислят:

а) съпротивленията на резисторите R_C и R_V ;

б) входното и изходното диференциално съпротивление (r_{id} и r_{od});

в) коефициентът на потискане на синфазните сигнали $CMRR$.

Решение:

а) Коефициентът на усилване за диференциалните сигнали е

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

Прилагайки втори закон на Кирхоф, за задаващия клон на генератора на ток се получава $V_{EE} + U_{BE} + I_{R_V} \cdot R_V = 0 \rightarrow$

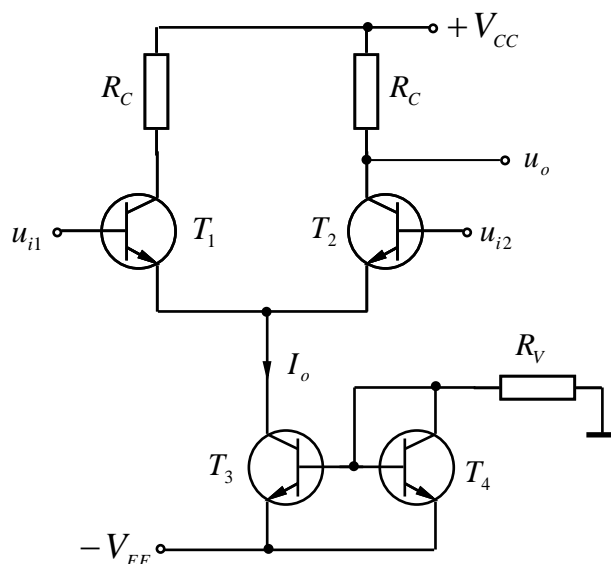
$$R_V = -\frac{V_{EE} + U_{BE}}{I_{R_V}} = -\frac{-12V + 0,6V}{1,5mA} = 7,6k\Omega, \text{ където } \frac{I_o}{I_{R_V}} = \frac{S_{E_{T_3}}}{S_{E_{T_4}}} = 1 \text{ или } I_{R_V} = I_o,$$

$$I_o = 2 \cdot I_C, I_C \approx g_m \cdot U_T = \frac{\beta_{1,2}}{r_{BE1,2}} \cdot U_T = 750\mu A, \text{ тогава } I_{R_V} = I_o = 2 \cdot I_C = 1,5mA;$$

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

$$\text{в) } A_{CM} \approx \frac{R_C}{2 \cdot r_{CE3}} = \frac{5,6k\Omega}{2 \cdot 20k\Omega} = 0,14 \rightarrow CMRR = \frac{A_d}{A_{CM}} = \frac{70}{0,14} = 500$$

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



Фиг. 2.14.

2.17. За ДУ от **фиг. 2.15** общият ток е $2I_0 = 0,8mA$, отношението W/L на транзисторите е равно на 100, $\mu_n C_{ox} = 0,2mA/V^2$, $\lambda = 0,05$ и $R_D = 5k\Omega$. Да се определят $U_{oV} = U_{GS} - U_{TN}$, g_m , $r_{o,D}$ и A_D .

Решение:

Напрежението $U_{oV} = U_{GS} - U_{TN}$ може да се определи, използвайки формулата за дрейновия ток в режим на насищане, при това през всеки от транзисторите в режим на покой протича ток, равен на I_0 :

$$\frac{2I_0}{2} = \frac{1}{2} k_n' \frac{W}{L} (U_{GS} - U_{TN})^2 \rightarrow$$

$$U_{oV} = U_{GS} - U_{TN} = \sqrt{\frac{2I_0}{k_n' \frac{W}{L}}} = \sqrt{\frac{0,8mA}{0,2 \frac{mA}{V^2} 100}} = 0,2V;$$

След диференциране на формулата за дрейновия ток за стръмността g_m се

$$\text{намира } g_m = \left. \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} \right|_{U_{DS} = const} \approx \sqrt{2\mu_n C_{ox} \frac{W}{L} I_D} = \sqrt{2 \cdot 0,2 \frac{mA}{V^2} \cdot 100 \cdot 0,8mA} = 4mS,$$

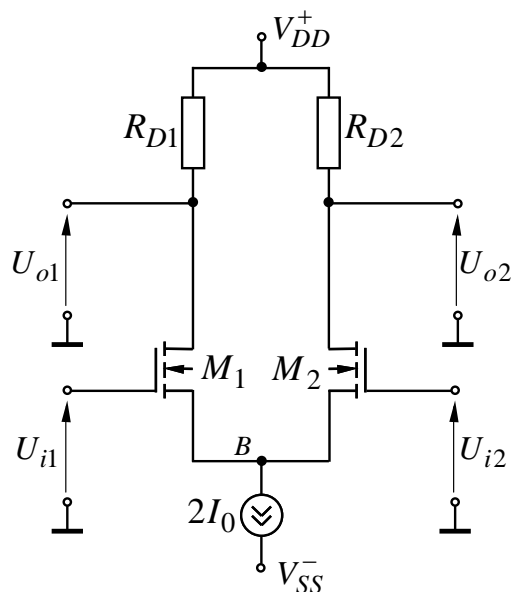
където $I_D = I_0 = 0,4mA$;

Изходното съпротивление за диференциалните сигнали има вида:

$$r_{o,D} = \left. \frac{u_{o1}}{i_{o1}} \right|_{\substack{u_{o1} = -u_{o2} \\ u_{iD} = 0, u_{iCM} = 0}} = \left. \frac{u_o}{i_o} \right|_{u_i = 0} = r_{oA,OC} \approx r_{DS} \approx \frac{1}{\lambda I_D} = \frac{1}{0,05 \cdot 0,4mA} = 50k\Omega;$$

Тогава за коефициента на усилване за диференциалните сигнали се намира

$$A_D = \left. \frac{u_{o1}}{u_{iD}} \right|_{\substack{i_{o1} = i_{o2} = 0 \\ u_{iCM} = 0}} = \left. \frac{u_o}{2u_i} \right|_{i_o = 0} = A_{U,OC} \approx -g_m (R_C \parallel r_{o,D}) = -18,2.$$



Фиг. 2.15.



Задачи

2.18. На **фиг. 2.16** е показана схема на диференциален усилвател (ДУ) с биполярни транзистори, като $T_1 \equiv T_2$. За схемата е известно: $V_{CC} = 15V$, $V_{EE} = -15V$, $R_C = 15k\Omega$, $I_o = 1mA$, $\beta_{1,2} = 100$, $U_{BE1,2} = 0,7V$, $\varphi_T = 26mV$ 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 $r_{BE1,2}$ и $g_{m1,2}$;

в) коефициентът на усилване за диференциалните сигнали A_D , коефициентът на усилване за синфазните сигнали A_{CM} и коефициентът на потискане на синфазните сигнали $CMRR$.

2.19. На **фиг. 2.14** е дадена схема на диференциален усилвател с биполярни транзистори, като $T_1 \equiv T_2$. За схемата са дадени: $V_{CC} = -V_{EE} = 12V$, $U_{BE} = 0,6V$, $U_{CT_2} = 6V$, $\varphi_T = 30mV$, $g_{m1,2} = 16,7mS$, $\beta_{1,2} = 80$, $r_{CE1,\dots,4} = 30k\Omega$ и $S_{E_{T_3}} / S_{E_{T_4}} = 1,5$. 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.

2.20. За ДУ от **фиг. 2.17** общият ток е $2I_0 = 0,8mA$, отношението W/L на транзисторите е равно на 100, $\mu_n C_{ox} = 0,2mA/V^2$, $R_D = 5k\Omega$ и $R_{SS} = 25k\Omega$.

а) Да се определят A_D , A_{CM} и $CMRR$ за несиметричен изход и при условие, че схемата е напълно симетрична.

б) Да се повтори подточка а) за симетричен (диференциален) изход ($U_{oD} = U_{o1} - U_{o2}$).

в) Да се повтори подточка а) за симетричен изход, но при условие, че товарът на M_1 е R_D , товарът M_2 е $R_D + \Delta R_D$ ($\Delta R_D / R_D = 0,01$ или 1%).

Упътване: за изчисляване на A_{CM} да се използва формулата

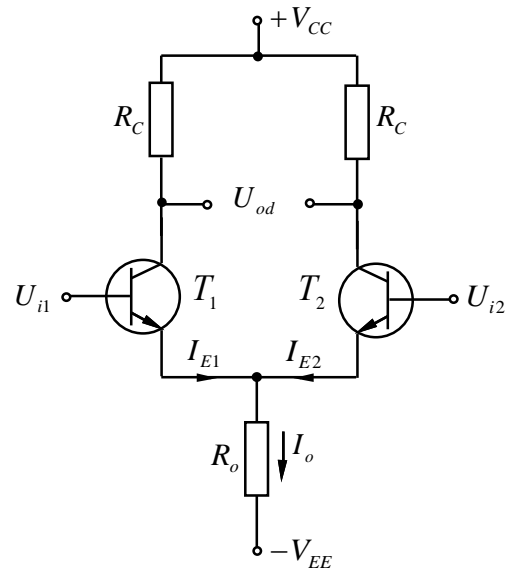
$$A_{CM} = \frac{U_{o2} - U_{o1}}{U_{iCM}} = -\frac{\Delta R_D}{2\Delta R_{SS}},$$

тогава за коефициента на потискане на

$$\text{синфазните сигнали се намира } CMRR = \left| \frac{A_D}{A_{CM}} \right| = 2g_m R_{SS} / \left(\frac{\Delta R_D}{R_D} \right).$$

2.21. 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} , $CMRR$, $r_{i,D}$ и r_o , и ги сравнете с тези на основната схема на диференциален усилвател при условие, че двете схеми са реализирани с един и същи транзистор и работят при еднакъв постояннотоков режим.

2.22. На **фиг. 2.18** е дадена схема на диференциален усилвател с динамичен товар. За схемата са известни: отношението W/L на всички транзистори е равно на 20, $\mu_n C_{ox} = 378\mu A/V^2$, $\mu_p C_{ox} = 86\mu A/V^2$, $\lambda_n = 0,55$ и $\lambda_p = 0,46$.



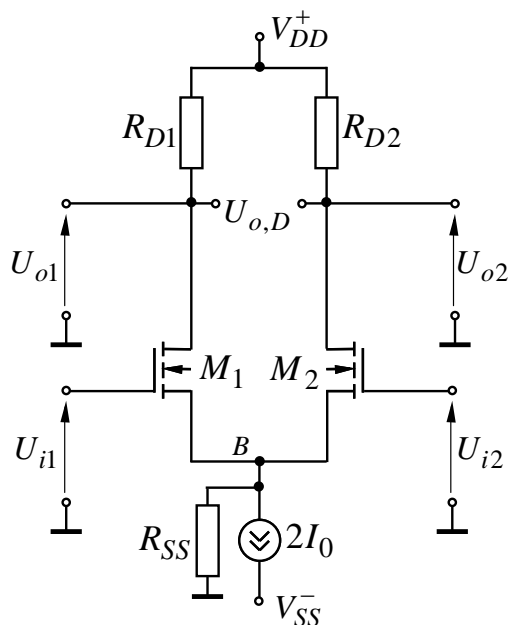
Фиг. 2.16.

Също така $C_{GS} = 20\text{ fF}$ и $C_{Gd} = 5\text{ fF}$. Общият ток на източника е $200\mu\text{A}$, изходното му съпротивление е $R_{SS} = 25\text{ k}\Omega$, а изходният капацитет е $C_{SS} = 0,2\text{ pF}$.

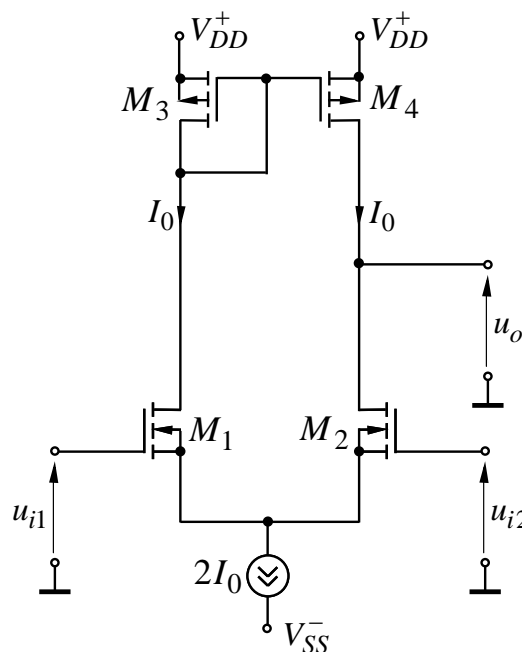
а) Да се определят A_D , A_{CM} и $CMRR$ за средни честоти.

б) Да се изчислят високата гранична честота на коефициента A_D обусловена от изходната верига и високата гранична честота на коефициента $CMRR$.

Упътване: Високата гранична честота на коефициента $CMRR$ да се определи, като се използва формулата $f_{h,CMRR} = 1/(2\pi C_{SS} R_{SS})$.



Фиг. 2.17.



Фиг. 2.18.

2.4. Изходни (крайни) стъпала

За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 4.7 от [4].



Пример

2.23. За емитерния повторител на **фиг. 2.19** $V_{CC} = 15\text{ V}$, $V_{EE} = -15\text{ V}$, $U_{CEsat} = 0,2\text{ V}$, $U_{BE} = 0,7\text{ V}$ и е константа и β е с достатъчно голяма стойност ($\gg 1$). Транзисторите T_2 и T_3 са с еднакви геометрични размери.

а) Да се намери стойността на R , която ще установи достатъчно голям ток I , така че да се получи максимален размах на изходния сигнал за $R_L = 1\text{ k}\Omega$.

б) Да се определи размахът на изходния сигнал и минималната и максималната стойност на емитерния ток.

Решение:

а) При условие, че транзисторите T_2 и T_3 са с еднакви геометрични размери и $\beta \gg 1$ за стойността на R се получава:

$$R = \frac{|U_{o\min}|}{I} = \frac{14,8V}{14,8mA} = 1k\Omega, \text{ където } I \geq \frac{|V_{EE}^- + U_{CEsat}|}{R_L} = \frac{14,8V}{1k\Omega} = 14,8mA \text{ и}$$

$$U_{o\min} = V_{EE}^- + U_{CEsat} = -15V + 0,2V = -14,8V ;$$

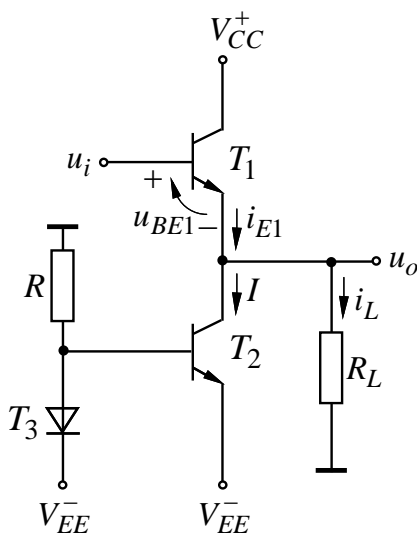
б) Ограничението при положителен сигнал е определено от насищането на T_1 , т.е. $U_{o\max} = V_{CC}^+ - U_{CE1sat} = 15V - 0,2V = 14,8V$.

При отрицателен входен сигнал в зависимост от стойностите на I и R_L ограничението се достига при запусване на T_1 :

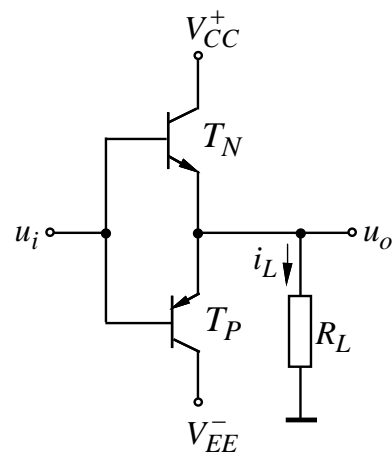
$$U_{o\min} = -IR_L = -14,8V \cdot 1k\Omega = -14,8V .$$

Минималният емитерен ток е равен на нула, той се получава при запусване на T_1 . Максималният емитерен ток се получава почти при насищането на T_1 :

$$i_{E1} = I + i_L = 14,8mA + 14,8mA = 29,6mA, \text{ където } i_L = \frac{U_{o\max}}{R_L} = 14,8mA .$$



Фиг. 2.19.



Фиг. 2.20.

2.24. Да се проектира изходно стъпало, работещо в клас В (фиг. 2.20), така че да се получи изходна мощност $20W$ при товар 8Ω . Захранващото напрежение да се избере, така че стойността $V_{CC}^+ = -V_{EE}^-$ да бъде около $5V$ по-голяма от максималното изходно напрежение. Да се определи необходимата стойност на $V_{CC}^+ = -V_{EE}^-$, максималният ток на консумация от всеки захранващ източник, максималната консумирана мощност и к.п.д. Също така да се определи максималната загубна мощност за всеки един от транзисторите.

Решение:

Мощността, която може да се отдаде в товар $R_L = 8\Omega$, е

$$P_L = \frac{1}{2} U_{Lm} I_{Lm} = \frac{1}{2} \frac{U_{Lm}^2}{R_L}, \text{ тогава } U_{Lm} = \sqrt{2P_L R_L} = \sqrt{2 \cdot 20W \cdot 8\Omega} = 17,9V.$$

Следователно се избира $V_{CC}^+ = -V_{EE}^- \geq U_{Lm} + 5V \approx 23V$.

Максималният ток на консумация от всеки захранващ източник, е

$$I_{CC \max} = \frac{U_{Lm}}{R_L} = \frac{17,9V}{8\Omega} \approx 2,24A.$$

Максималната консумирана от всеки захранващ източник, е

$$P_{CC \max}^+ = P_{CC \max}^- = \frac{1}{\pi} I_{CC \max} V_{CC}^+ = \frac{1}{\pi} 2,24A \cdot 23V \approx 16,4W.$$

Общата консумирана мощност е $32,8W$.

Коефициентът на полезно действие (к.п.д.) на стъпалото, е

$$\eta = \frac{P_L}{P_{CC}} = \frac{20W}{32,8W} \cdot 100\% \approx 61\%.$$

Максималната загубна мощност за всеки един от транзисторите, е

$$P_{C \max(NPN)} = P_{C \max(PNP)} = \frac{V_{CC}^2}{\pi^2 R_L} = \frac{(23V)^2}{\pi^2 8\Omega} \approx 6,7W.$$



Задачи

2.25. Да се изчислят амплитудата на изходното напрежение и ток (U_{Lm} и I_{Lm}) върху товара R_L , необходимата стойност на захранващото напрежение $V_{CC} = -V_{EE}$ и максималната загубна мощност $P_{C \max}$ на крайно стъпало с комплементарна двойка биполярни транзистори (фиг. 2.20), ако са дадени: $P_L = 30W$, $R_L = 4\Omega$ и $U_{CEsat} = 1,5V$.

2.26. За биполярен транзистор, работещ без охлаждащ радиатор максималната разсейвана мощност P_0 е $2W$ при околна температура T_{A0} , равна на $25^\circ C$ и максимална температура на прехода $T_{j \max} = 150^\circ C$. Да се намерят:

а) топлинното съпротивление преход – околна среда $R_{th j-a}$;

б) максималната мощност, която може да разсейва транзисторът при околна температура $50^\circ C$;

в) температурата на прехода, ако транзисторът работи при $T_A = 25^\circ C$ и разсейва $1W$.

2.27. Биполярен транзистор е с $T_{j \max} = 150^\circ C$ и може да разсейва максимална мощност, както следва:

$$40W \text{ при } T_C = 25^\circ C$$

$$2W \text{ при } T_A = 25^\circ C.$$

При температура над $25^\circ C$ максималната разсейвана мощност намалява линейно с $R_{th j-c} = 3,12^\circ C/W$ и $R_{th j-a} = 62,5^\circ C/W$. Да се намерят:

