Съдържание

Предговор 7

1. Транзисторни усилвателни схеми 9
1.1. Постояннотоково захранване на усилвателни схеми с биполярни и униполярни (полеви) транзистори 9
1.2. Анализ по променлив ток на усилвателни схеми с биполярни и униполярни транзистори 15

2. Основни градивни стъпала в аналоговите интегрални схеми 26
2.1. Задаващи източници на ток, токови огледала и генератори на опорно напрежение 26
2.2. Съставни транзистори, каскодни усилватели и диференциални усилватели 28
2.3. Изходни (крайни) стъпала. 33

3. Основни усилвателни схеми с операционни усилватели 35
3.1. Инвертиращи и неинвертиращи усилвателни схеми 35
3.2. Диференциални усилватели с ОУ. Инструменталии (измервателни) усилватели 41
3.3. Усилватели на мощност 45
3.4. Основни усилвателни схеми с програмируем коефициент на усилване по напрежение. 48

4. Активни RC филтри и активни индуктивности 49
4.1. Активни RC филтри. 49
4.2. Активни индуктивности, реализирани с жиратори и обобщени импедансни преобразуватели 52

5. Линейни и нелинейни операционни схеми 54
5.1. Аналогови суматори 54
5.2. Интегратори и диференциатори 56
5.3. Логаритмични и антилогаритмични усилватели. Многофункционални устройства. 58
5.4. Аналогови умножители 59
5.5. Аналогови компаратори 60

6. Преобразуватели на ток в напрежение, на напрежение в ток и на ток в ток 62
6.1. Източници на напрежение, управлявани с ток (преобразуватели на ток в напрежение) 62
6.2. Източници на ток, управлявани с напрежение (преобразуватели на напрежение в ток) и изтоници на ток, управлявани с ток (преобразуватели на ток в ток) 65

7. Генератори на сигнали 67
7.1. LC генератор с трансформаторна обратна връзка (схема на Майснер). Триточкови LC генератори 67
7.2. RC генератори. Функционални генератори 69

Отговори на задачите 71

Приложение А. Теорема на Милер 79
Приложение В. Стандартни стойности на резистори 80
Приложение С. Основни математически функции в графичен вид 80

Литература 81

Предговор

Сборникът включва решени примери и задачи по Аналогова схемотехника I и II част от следните раздели: транзисторни усилвателни схеми; основни градивни стъпала в аналоговите интегрални схеми; усилвателни схеми с операционни усилватели; активни филтри; линейни и нелинейни операционни схеми; преобразуватели на напрежение в ток, ток в напрежение и ток в ток; генератори на сигнали.

Подборът на задачите, тяхното подреждане и методично изграждане са съобразени с действащите учебни програми по дисциплините Аналогова схемотехника I и II част. Част от примерите са разработени за семинарните упражнения, за контролни работи и писмен изпит. В други случаи се използват идеите на задачи, публикувани в цитираните в литературата към сборника източници.

За успешното решаване на задачите са необходими предварителни знания по следните теми:

- анализ на елементарни електрически вериги и основни аналогови електронни схеми в постояннотокова, честотна и времева област;
- структура и принцип на действие на полупроводниковите елементи (диоди, транзистори – биполярни и униполярни и оптоелектронни елементи) и операционните усилватели;
- основи от теорията на автоматичното регулиране и висшата математика.

Материалът в сборника е разпределен в седем глави, а всяка глава е разделена на отделни теми. В началото на всяка глава са дефинирани образователните цели и са фиксирани ключовите думи. При излагането на материала във всички теми е използван единен подход. Той се изразява в следната последователност на отделните рубрики (подточки на темата): (1) анотация на автора за темата от учебниците по Аналогова схемотехника (№ 5 и № 6 от литературата), към която да се насочат студентите преди решаването на задачи, (2) един или няколко решени примера и (3) задачи за самостоятелна работа без решенията. За проверка на изпълнените изчисления от студентите в края на сборника са дадени отговорите на задачите.

Като пръв опит за написване на такъв сборник и ограничения обем той няма да бъде лишен от недостатъци, затова авторът с благодарност ще приеме всички забележки и препоръки и особено на преподавателите, които ползват сборника в процеса на обучение по едноименната дисциплина.

Накрая авторът изказва благодарност на рецензента доц. д-р инж. Димитър Илиев Стаменов, който със своите забележки и препоръки допринесе много за подобряване качеството на пособието.

София, март 2008 г.

Авторът

Таблица 1. Физически константи.

№	Име	Означение и стойност
1.	Заряд на електрона	$q = 1{,}60219.10^{-19}\,C$
2.	Константа на Болцман	$k = 1{,}38062.10^{-23}\,J/K$
3.	Константа на Планк	$h = 6{,}62.10^{-34}\,J.sec$
4.	Маса на електрона във вакуум	$m_o = 9{,}106.10^{-31}\,kg$
5.	Електрическа проницаемост на вакуума	$\varepsilon_o = 8{,}86.10^{-12}\,F/m$
6.	Магнитна проницаемост	$\mu_o = 1{,}257.10^{-6}\,mH$

Таблица 2. Представки за образуване на десетични кратни и дробни на измервателните единици.

	Представка		Множител
	име	означение	
кратни	екса	E	$10^{18} = 1000000000000000000$
	пета	P	$10^{15} = 1000000000000000$
	тера	T	$10^{12} = 1000000000000$
	гига	G	$10^{9} = 1000000000$
	мега	M	$10^{6} = 1000000$
	кило	k	$10^{3} = 1000$
	хекто	h	$10^{2} = 100$
	дека	da	$10^{1} = 10$
дробни	деци	d	$10^{-1} = 0{,}1$
	санти	c	$10^{-2} = 0{,}01$
	мили	m	$10^{-3} = 0{,}001$
	микро	μ	$10^{-6} = 0{,}000001$
	нано	n	$10^{-9} = 0{,}000000001$
	пико	p	$10^{-12} = 0{,}000000000001$
	фемто	f	$10^{-15} = 0{,}000000000000001$
	ато	a	$10^{-18} = 0{,}000000000000000001$

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

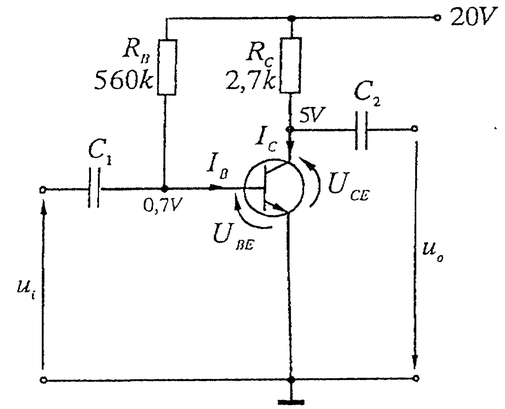
1.1. На фиг. 1.1 е дадена усилвателна схема с общ емитер (ОЕ) с биполярен транзистор 2N3904. Да се намерят:

а) координатите на работната точка на транзистора ($U_{CE,A}$, $I_{C,A}$, $I_{B,A}$ и $U_{BE,A}$);

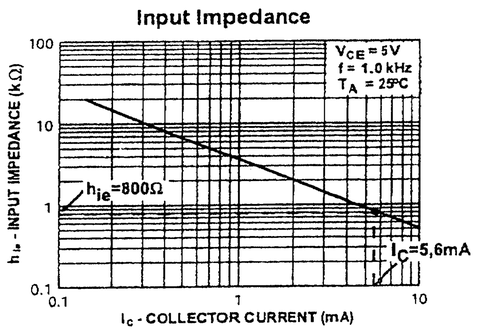
б) четириполюсните параметри h_{11e} (или h_{ie}), h_{12e} (h_{re}), h_{21e} (h_{fe}) и h_{22e} (h_{oe}) от графиките, показани на фиг. 1.2а, 1.2б, 1.2в и 1.2г за определената работна точка;

в) четириполюсните параметри y_{11e}, y_{12e}, y_{21e} и y_{22e} от h–параметрите;

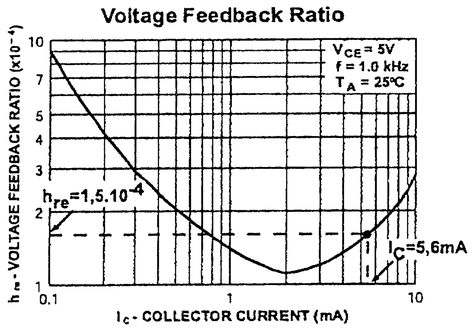
г) диференциалните параметри r_{BE}, β, S, S_r и r_{CE} от h– и y–параметрите.



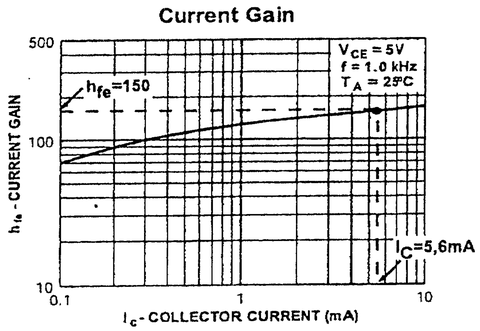
Фиг. 1.1.



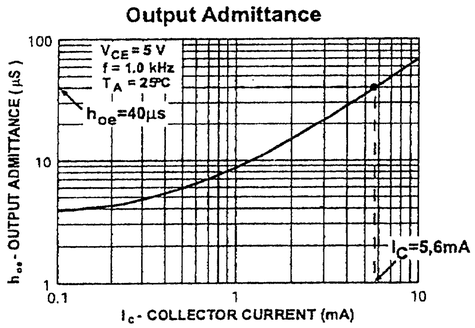
Фиг. 1.2а.



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: $V_{CC} = U_{CE,A} + I_{C,A}R_C \rightarrow I_{C,A} = \dfrac{V_{CC} - U_{CE,A}}{R_C} = \dfrac{20V - 5V}{2,7k\Omega} \approx 5,6mA$.

За напрежението между B и E 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: $h_{11e} = 800\Omega$, $h_{12e} = 1,5.10^{-4}$, $h_{21e} = 150$ и $h_{22e} = 40\mu S$.

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

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

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

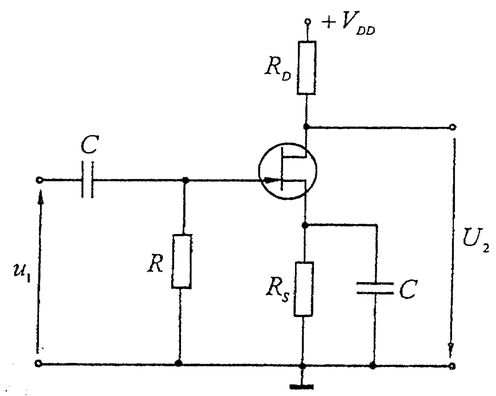
$S_r = -\dfrac{h_{12e}}{h_{11e}} = y_{12e} = -\dfrac{1,5.10^{-4}}{800\Omega} = -187,5nS$ и

$$r_{CE} = \frac{h_{11e}}{h_{11e}h_{22e} - h_{12e}h_{21e}} = \frac{1}{y_{22e}} = \frac{800\Omega}{800\Omega.40\mu S - 1,5.10^{-4}.150} = 84,2k\Omega.$$

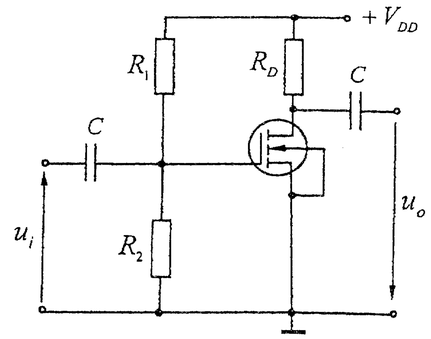
1.2. На фиг. 1.3 е дадена усилвателна схема с общ сорс (ОС) с полеви транзистор 2N4222. За схемата са известни: $V_{DD} = 10V$, $I_{DSS} = 10mA$ и $U_{GS} = -1,2V$. Да се изчислят:

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

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

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 $\omega C \to \infty$. Да се определи:

а) отношението на резисторите R_1/R_2 за $I_G = 0$;

б) стръмността на транзистора за избраната работна точка;

в) коефициентът на усилване по напрежение и изходното съпротивление на схемата при $r_{DS} \to \infty$.

Решение:

а) От формулата за дрейновия ток $I_D = I_{D0}\left(\dfrac{U_{GS}}{U_{Th}} - 1\right)^2$ напрежението U_{GS} се получава: $U_{GS,A} = U_{Th}\left(\sqrt{\dfrac{I_D}{I_{D0}}} + 1\right) = 3{,}5V.\left(\sqrt{\dfrac{1mA}{58{,}8mA}} + 1\right) \approx 3{,}96V$.

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

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

в) $A_U \approx -SR_D = -4{,}41mS.5k\Omega = -22{,}05$ и $R_{oA} = r_{DS} \| R_D \approx R_D = 5k\Omega$ за $r_{DS} \to \infty$.

Задачи

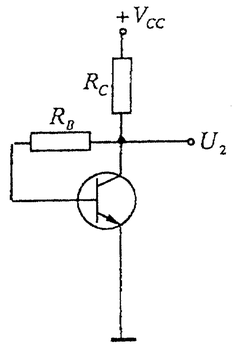
1.4. На фиг. 1.5 е представена схема за постояннотоково захранване на биполярен транзистор. За схемата са дадени: $V_{CC} = 10V$, $I_C = 10mA$, $U_2 = 5V$, $\beta = 100$ и $U_{BE} = 0{,}7V$. Да се изчислят:

а) съпротивлението на резистора R_C;

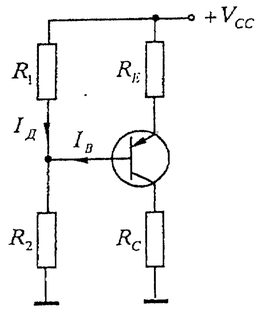
б) съпротивлението на резистора R_B.

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: $V_{CC} = 15V$, $I_C = 1mA$, $I_Д = 10I_B$, $\beta = 100$, $U_{BE} = 0{,}7V$, $U_{CE} = 9V$ 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:

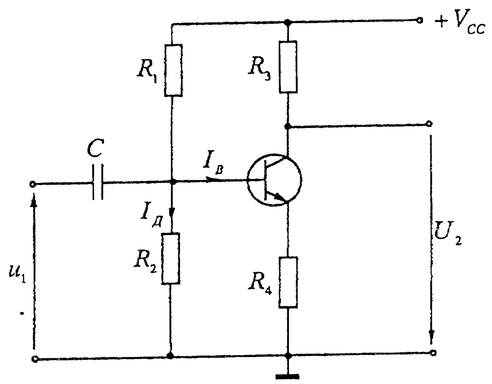
а) съпротивленията на резисторите R_3 и R_4, ако се знае, че $U_{R4} = 1V$;

б) съпротивленията на резисторите R_1 и R_2, ако $I_Д = 10I_B$.

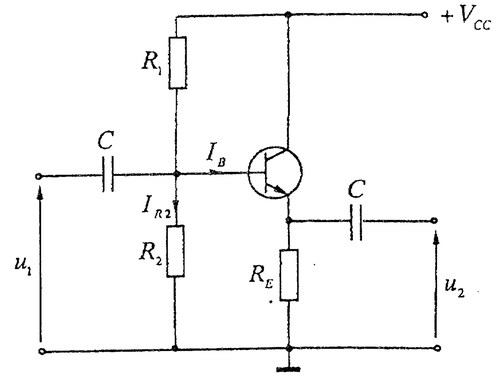
1.7. За схемата на фиг. 1.8 са дадени: $V_{CC} = 5V$, $I_C = 0{,}5mA$, $\beta = 100$, $U_T = 26mV$ $I_{R2} = 10I_B$, $U_{BE} = 0{,}7V$ и $R_E = 510\Omega$. Да се изчислят:

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.

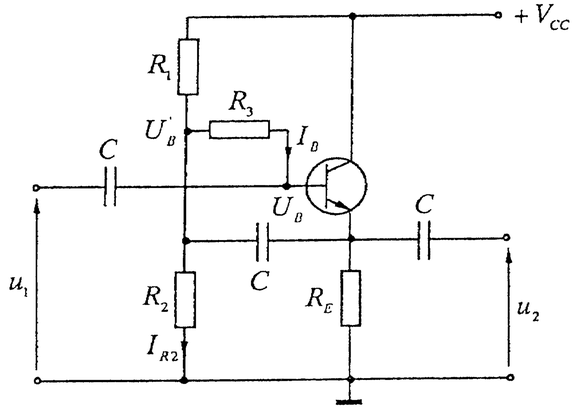


Фиг. 1.8.

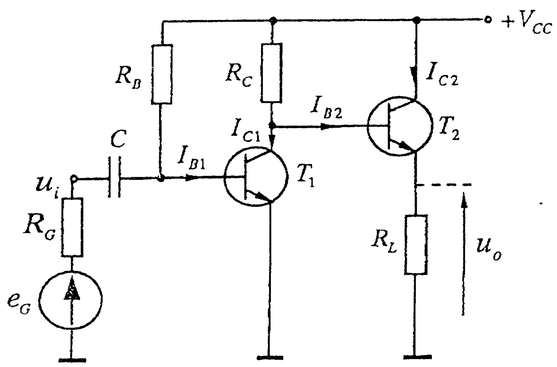
1.8. За стъпало общ колектор (ОК) с Bootstrap – ефект, дадено на фиг. 1.9, $V_{CC} = 10V$, $U_T = 26mV$, $U_{BE} = 0{,}6V$, $I_E = 1mA$, $I_{R2} = 20I_B$, $\beta = 200$, $R_E = 5k\Omega$ и $R_3 = 20k\Omega$. Да се намерят съпротивленията на резисторите R_1 и R_2.

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

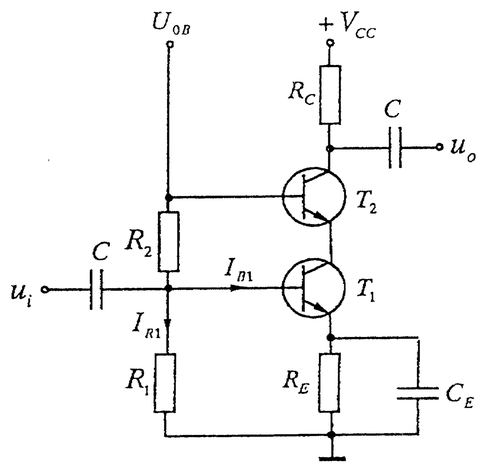
1.10. За схемата на каскодния усилвател, показана на фиг. 1.11, са известни: $V_{CC} = 10V$, $U_{CE1} = 3{,}3V$, $U_{CE2} = 3{,}7V$, $U_{BE} = 0{,}7V$, $U_T = 26mV$, $I_C = 1mA$, $\beta_{1,2} = 100$, $R_1 = 3k\Omega$, $R_C = 2R_E$, $\omega C, \omega C_E \to \infty$ и $r_{CE1,2} \to \infty$. Да се определят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



Фиг. 1.9.



Фиг. 1.10.

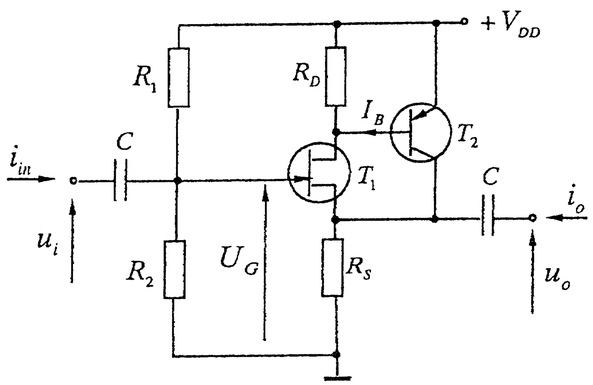


Фиг. 1.11.

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 $\omega C \to \infty$. 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:

а) съпротивленията на резисторите R_D и R_S;

б) 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:

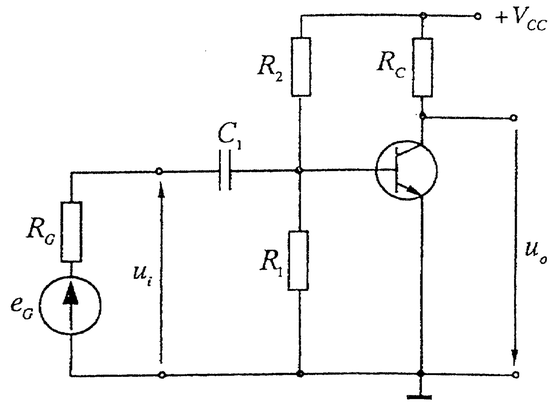
– $V_{CC} = 6V$, $R_1 = 12k\Omega$, $R_2 = 75k\Omega$, $R_C = 500\Omega$, $R_G = 1k\Omega$ и $U_T = 30mV$.

– 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;



Фиг. 1.13.

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

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

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

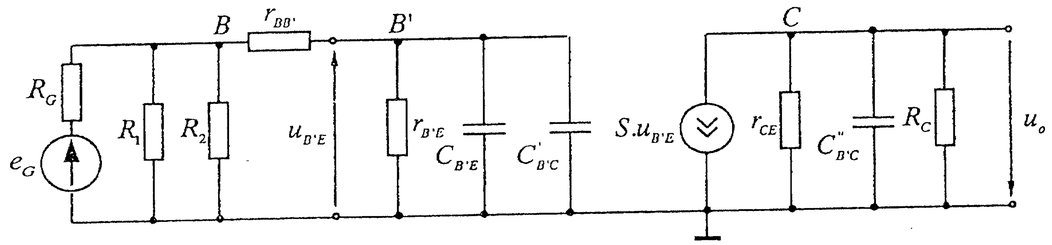
$$A = \frac{u_o}{e_G} = A_U \frac{R_{iA}}{R_{iA} + R_G} = -90.\frac{1{,}4k\Omega}{1{,}4k\Omega + 1k\Omega} \approx -52{,}5,$$

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

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

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

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 заменя 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

$C'_{B'C} = C_{B'C}(1 - A_U) = 4pF.91 = 364pF$ и

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

Капацитетът на емитерния преход е

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

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

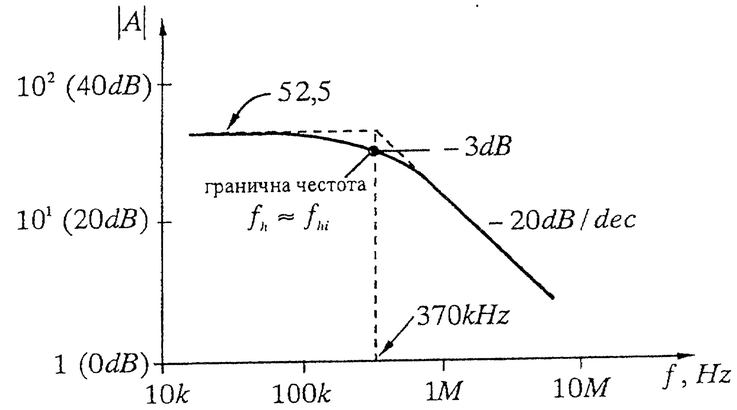
$$f_{hi} = \frac{\sqrt{M_{hi}^2 - 1}}{2\pi(C_{B'E} + C'_{B'C})[r_{B'E} \| (r_{BB'} + R'_G)]} =$$

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

където $R'_G = R_G \| R_1 \| R_2$ и

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

От сравняването на стойностите за f_{hi} и f_{ho} по-ниската от двете определя високата гранична честота на стъпалото ОЕ, т.е. $f_h \approx f_{hi} = 370kHz$. 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 $V_{CC} = 10V$, вътрешно съпротивление на източника на входен сигнал $R_G = 5k\Omega$ и товарно съпротивление $R_L = 500\Omega$;

– работна точка на транзистора: $I_C = 6mA$, $U_{CE} = 4V$, $I_B = 20\mu A$, $U_{BE} = 0{,}6V$ и $U_{CEsat} \approx 0{,}5V$;

– параметри на работната точка: $\beta = 300$, $S = 200mS$ и $r_{BE} = 1{,}5k\Omega$.

Да се намерят:

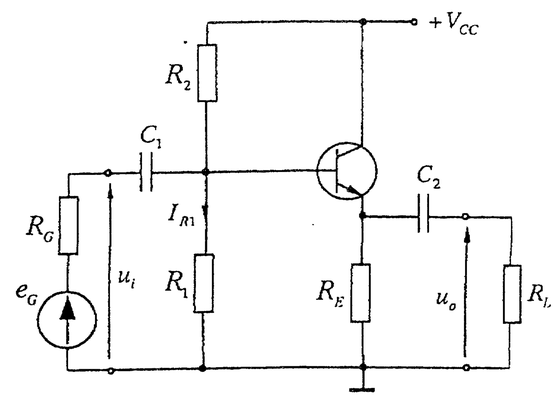
а) съпротивленията на резисторите R_1, R_2 и R_E, ако $I_{R1} = 5I_B$;

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 $f_b = 20Hz$ и $M_b = 3dB$;

д) долната и горната граница на изходното напрежение.



Фиг. 1.16.

Решение:

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

$$R_1 = \frac{U_{BE} + I_E.R_E}{I_{R1}} = \frac{0{,}6V + 6{,}02V}{5.20\mu A} = 66{,}2k\Omega$$

($68k\Omega$ за $E24$)

и

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

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

в) $A_U = \frac{u_o}{u_i} = \frac{SR_E^{'}}{1 + SR_E^{'}} = \frac{200mS.333\Omega}{1 + 200mS.333\Omega} \approx 0{,}985$, където $R_E^{'} = R_E \| R_L = 333\Omega$ и

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

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

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

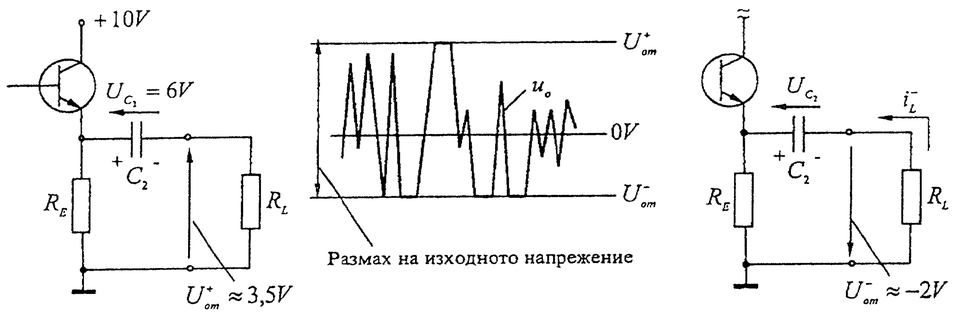
– За изходната верига: $f_b = \frac{1}{2\pi(R_{oA} + R_L)C_2\sqrt{M_{b2}^2 - 1}} = 20Hz \rightarrow$

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

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)

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



$U_{om}^+ = V_{CC} - U_{CEsat} - U_{C_1} \approx 3{,}5V$,

където $U_{C_1} = I_E.R_E \approx 6V$;

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

където $i_L^- \approx \frac{-U_{C_2}}{R_L + R_E}$ и $U_{C_1} = I_E.R_E \approx 6V$.

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 $I_D = 2mA$ и $U_{DS} = 6V$ имат следните параметри: $S = 2{,}5mS$, $r_{DS} = 50k\Omega$, $C_{GS} = 2pF$, $C_{GD} = 1{,}5pF$ и $C_{DS} = 1pF$.

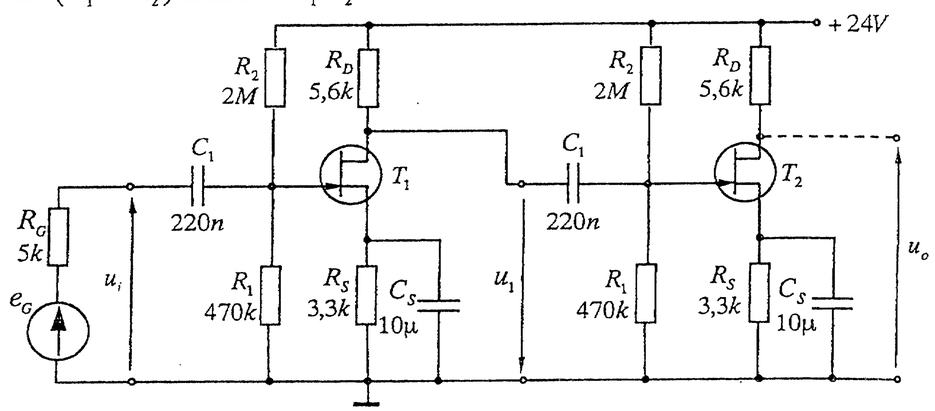
а) Да се изчисли коефициентът на усилване по напрежение $A = u_o / e_G$ за средни честоти;

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

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 $A = A_1.A_2$.



Фиг. 1.17.

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

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

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

$$A_2 = \frac{u_o}{u_1} = A_{U2}\frac{R_{iA}^{'}}{R_{iA}^{'} + R_G^{'}} = -12{,}6.\frac{380k\Omega}{380k\Omega + 5k\Omega} \approx -12{,}4,$$

където $A_{U2} = A_{U1} \approx -12{,}6$, $R_{iA}^{'} = R_{iA} = R_1 \| R_2 \approx 380k\Omega$ и $R_G^{'} = R_D \| r_{DS} \approx 5k\Omega$.

Тогава

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

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

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

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

– високи гранични честоти

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

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

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

Тъй като усилвателят включва две стъпала, които са еднакви (реализирани с еднакви транзистори, работещи при един и същ постояннотоков 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

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

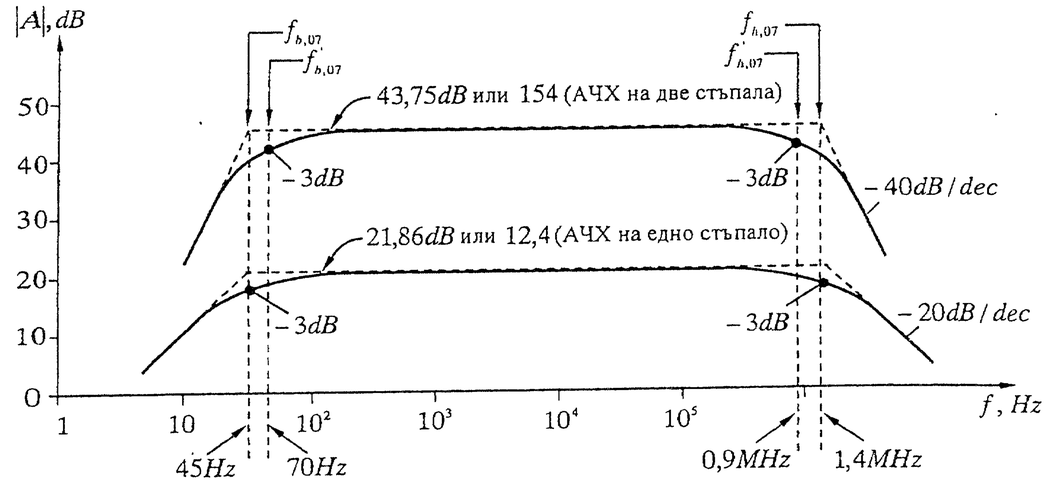
За честотната характеристика в областта на високите честоти се получава

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

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

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

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



Фиг. 1.18.

Задачи

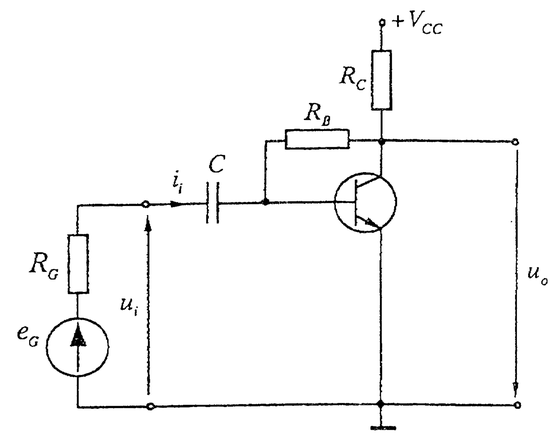
1.15. На фиг. 1.19 е дадена схема ОЕ. За схемата са известни: $V_{CC} = 10V$, $R_B = 560k\Omega$, $R_C = 3{,}9k\Omega$, $R_G = 1k\Omega$, $U_T = 26mV$ и $r_{CE} \rightarrow \infty$.

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: $I_C = 1mA$, $I_{R2} = 0{,}1mA$, $U_{BE} = 0{,}7V$, $I_{R2} >> I_B$, $R_{E1} + R_{E2} = R_C$, $U_T = 26mV$, $R_L \rightarrow \infty$, $\omega C \rightarrow \infty$ 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 $R_L = 500\Omega$;

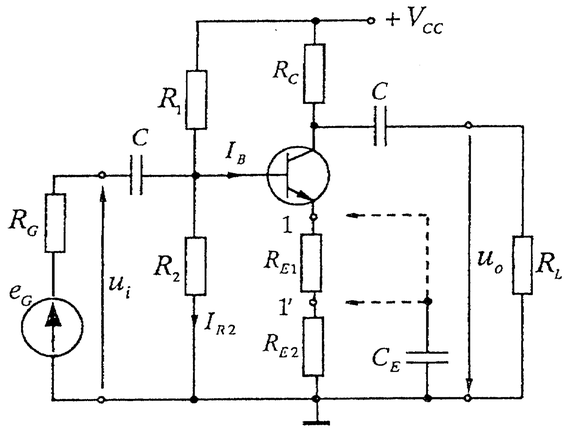
– транзистор с $I_C = 6mA$ и $U_{CE} = 4V$ и с параметри: $r_{BE} = 1{,}5k\Omega$, $\beta = 300$, $S = 200mS$ и $r_{CE} = 30k\Omega$.

Да се изчислят:

а) напрежението $U_{1'}$ (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;

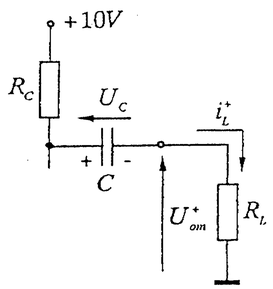
в) долната и горната граница на изходното напрежение (U^+_{om} и U^-_{om}).



Фиг. 1.20.

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

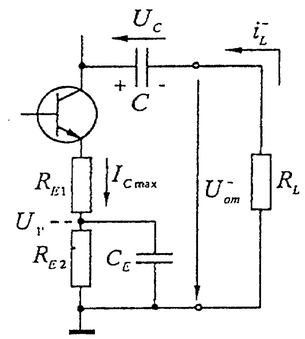
Определяне на горната граница U^+_{om} (транзисторът е запушен)



$U^+_{om} = i_L^+ R_L$, където

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

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



$$U^-_{om} \approx U_C - (I_{Cmax} R_{E1} + U_{1'}),$$

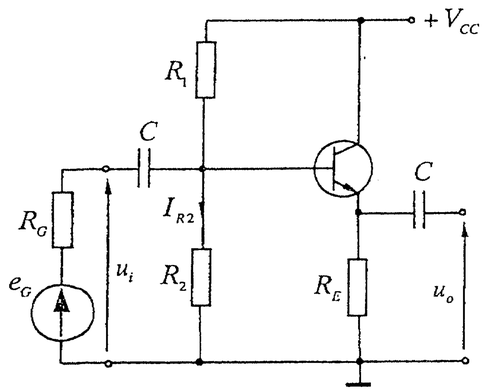
където $I_{Cmax} = I_C + \dfrac{U_{CE}}{R_C \| R_L + R_{E1}}$.

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

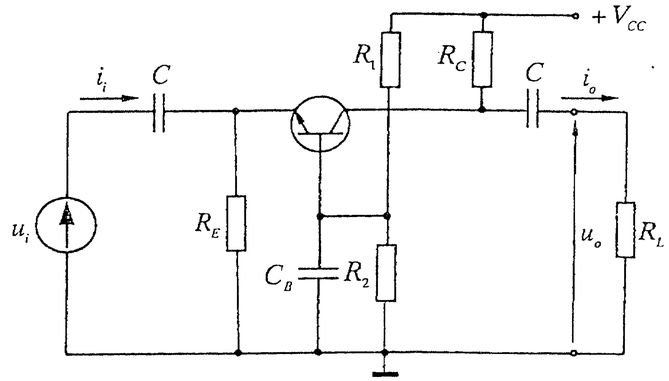
а) стойностите на съпротивленията на резисторите R_1 и R_2;

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: $R_E = 2k\Omega$, $R_C = 10k\Omega$, $R_L = 10k\Omega$, $r_{BE} = 5k\Omega$, $\beta = 200$, $r_{CE} \to \infty$, $\omega C \to \infty$ и $\omega C_B \to \infty$. Да се изчисли:

а) коефициентът на усилване по напрежение $A_U = u_o / u_i$;

б) коефициентът 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: $V_{DD} = 24V$, $R_1 = 1M\Omega$, $R_2 = 620k\Omega$, $R_S = 3{,}3k\Omega$, $S = 3{,}5mS$, $C_{DS} = 1pF$, $C_{GS} = 2pF$, $C_{GD} = 1{,}5pF$, $C_L = 50pF$ $\omega C_1 \to \infty$ и $\omega C_2 \to \infty$. Да се намерят:

а) входното и изходното съпротивление на схемата (R_{iA} и R_{oA});

б) коефициентите на усилване по напрежение на стъпалото $A_U = u_o / u_i$ и $A = u_o / e_G$ за $R_G = 5k\Omega$ и $R_L = 10k\Omega$;

в) 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:

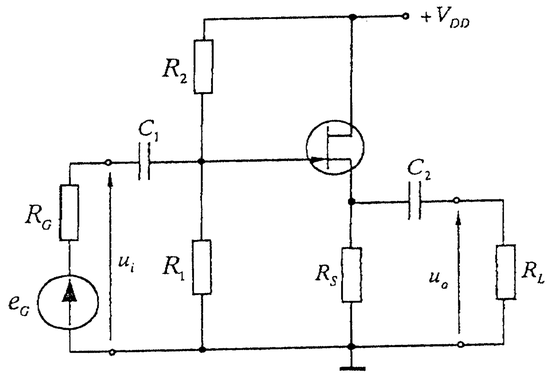
а) съпротивленията на резисторите R_S и R_D;

б) входното и изходното съпротивление на схемата (R_{iA} и R_{oA});

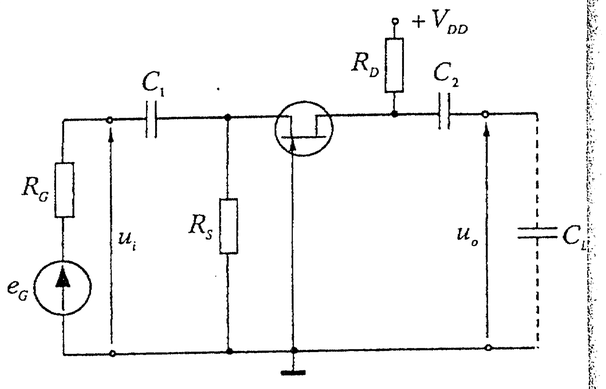
в) коефициентите на усилване по напрежение на стъпалото $A_U = u_o / u_i$ и $A = u_o / e_G$;

г) високата гранична честота f_{ho}, обусловена от изходната верига, ако в из-

хода е включен товар с капацитет $C_L = 3pF$.



Фиг. 1.23.

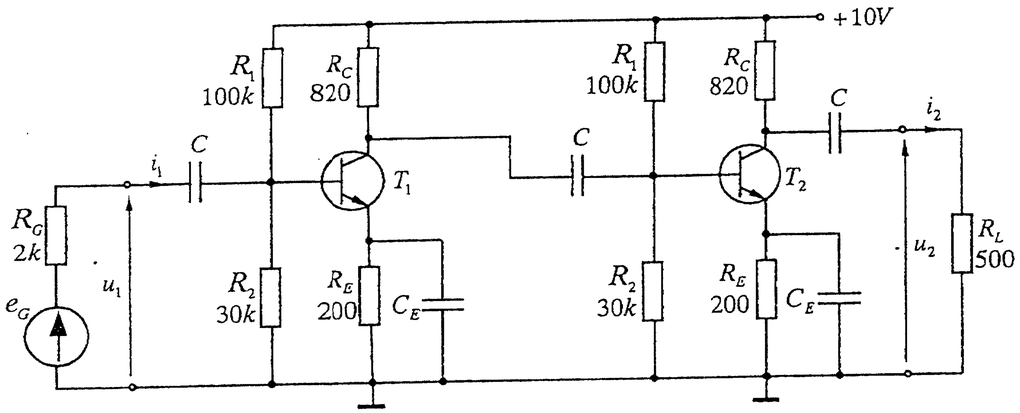


Фиг. 1.24.

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 $I_C = 6mA$ и $U_{CE} = 4V$ имат следните параметри: $S = 200mS$, $r_{BE} = 1{,}5k\Omega$, $\beta = 300$ и $r_{CE} = 30k\Omega$. Да се изчисли:

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

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 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 $A = 1V/mV$ и на обратната верига $\beta = 0{,}1V/V$. Входното и изходното съпротивление на усилвателя без ОВ 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 ОВ 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 $r_{CE1} = 40k\Omega$;

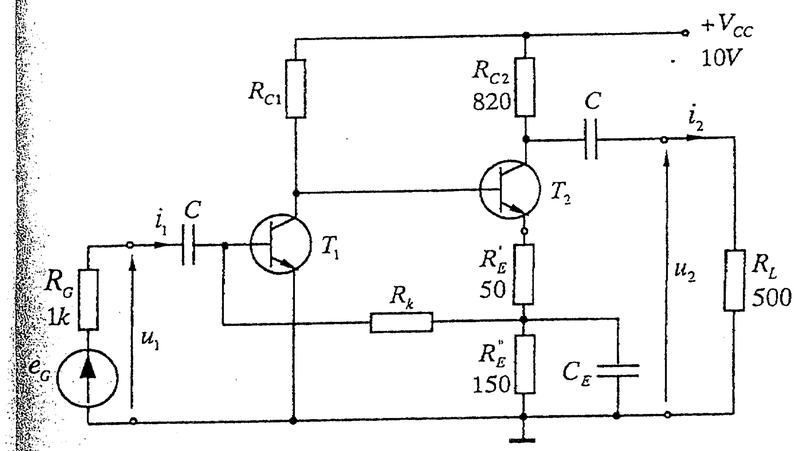
– транзистор T_2 с параметри: $I_{C2} = 6mA$, $U_{CE2} = 4V$, $U_{BE2} = 0{,}63V$, $\beta_2 = 300$, $r_{BE2} = 1{,}5k\Omega$, $S_2 = 200mS$ и $r_{CE2} = 30k\Omega$;

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 ($\omega C \to \infty$ и $\omega C_E \to \infty$).



Фиг. 1.26.

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 $R_G = 1k\Omega$.

2 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 η.

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

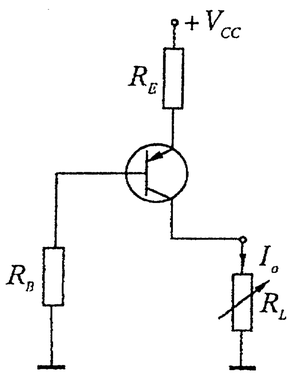
2.1. За схемата на генератор на ток, показана на фиг. 2.1, са дадени: $I_o = 3mA$, $V_{CC} = 9V$, $R_{L\max} = 1k\Omega$, $U_{BE} = -0{,}7V$, $U_{CE\min} = 2V$, $U_T = 26mV$, $r_{CE} = 20k\Omega$ и $\beta = 80$. Да се определят:

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

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

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

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

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

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

Задачи

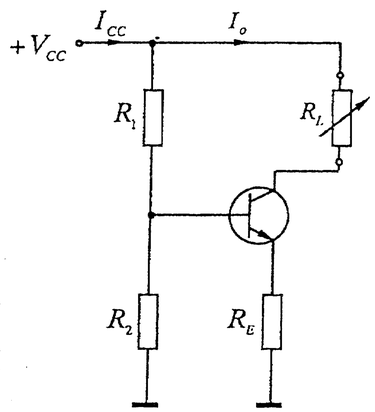
2.2. За схемата на генератор на ток, показана на фиг. 2.2, са дадени: $V_{CC} = 20V$, $I_{CC} = 2mA$, $I_o = 1mA$, $R_{L\max} = 5k\Omega$, $U_{BE} = 0{,}6V$, $U_{CEsat} = 2V$, $r_{CE} = 60k\Omega$, $\beta = 200$, $U_T = 26mV$ и $I_B << I_{R2}$, I_o. Да се определят:

а) съпротивленията на резисторите R_E, R_1 и R_2;

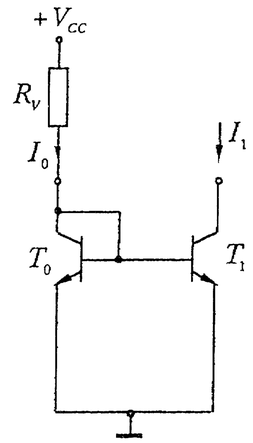
б) изходното съпротивление на схемата.

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.

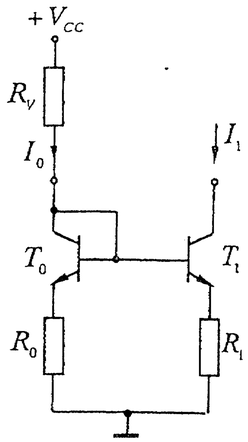
2.4. За схемата на токово огледало, показана на фиг. 2.4, са дадени: $V_{CC} = 12V$, $U_{BE} = 0{,}6V$, $R_0 = 15k\Omega$, $R_1 = 12k\Omega$ и $I_0 = 0{,}5mA$. Да се изчислят съпротивлението на резистора R_V и изходният ток I_1.



Фиг. 2.2.

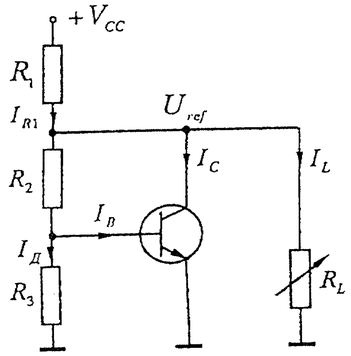


Фиг. 2.3.



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 $0{,}6V$.



Фиг. 2.5.

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

а) съпротивлението на резистора R_2;

б) съпротивлението на резистора R_1 при $I_L = 0$;

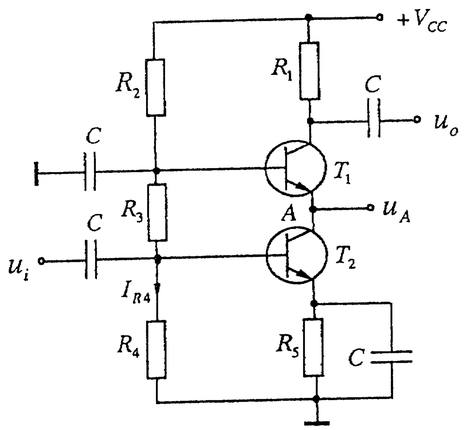
в) изходното съпротивление на източника на опорно напрежение R_{oA}.

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



Фиг. 2.6.

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 $A_{U1} = \frac{u_A}{u_i} \approx -S_2 R_L' \approx -S_2 \frac{1}{S_1} \approx -1$, където $R_L' \approx R_{iA1} \approx 1/S_1$ (транзисторът T_2 е свързан по схема 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 $I_{B2} = \frac{I_{C2}}{\beta_2} = \frac{5mA}{150} = 33\mu A$

$R_2 = \frac{V_{CC} - (U_A + U_{BE})}{I_{R4} + I_{B1} + I_{B2}} = \frac{3V - (1{,}5V + 0{,}7V)}{0{,}5mA + 2.33\mu A} = 1{,}41k\Omega$, 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 $A_{U2} = \frac{u_o}{u_A} \approx S_1 R_1$ (транзисторът T_1 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.

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

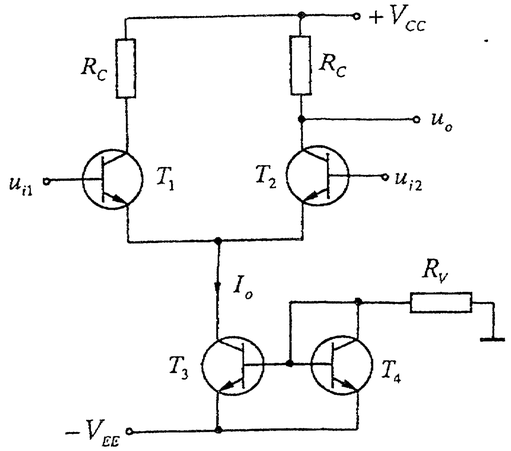
$$\rightarrow R_1 \approx \frac{|A_U|}{S_1} = \frac{20}{192mS} \approx 104\Omega.$$

2.8. На фиг. 2.7 е дадена схема на диференциален усилвател, чийто постояннотоков режим 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.



Фиг. 2.7.

Решение:

а) Коефициентът на усилване за диференциалните сигнали е

$|A_d| \approx \frac{1}{2} S R_C \rightarrow R_C = \frac{2|A_d|}{S} = \frac{2.70}{25mS} = 5{,}6k\Omega$, където $S = \frac{\beta_{1,2}}{r_{BE1,2}} = \frac{100}{4k\Omega} = 25mS$.

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

където $\frac{I_o}{I_{R_V}} = \frac{S_{E_{T1}}}{S_{E_{T4}}} = 1$ или $I_{R_V} = I_o$, $I_o = 2.I_C$, $I_C \approx S.U_T = \frac{\beta_{1,2}}{\underbrace{r_{BE1,2}}_{S=25mS}}.U_T = 750\mu A$, тогава

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

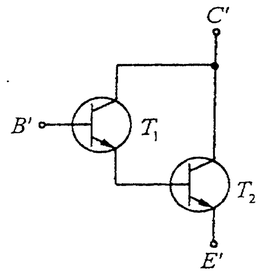
б) $R_{id} \approx 2.r_{BE1,2} = 2.4k\Omega = 8k\Omega$ и $R_{od} \approx R_C = 5{,}6k\Omega$;

в) $A_{CM} \approx \frac{R_C}{2.r_{CE3}} = \frac{5{,}6k\Omega}{2.20k\Omega} = 0{,}14 \rightarrow CMRR = \frac{A_d}{A_{CM}} = \frac{70}{0{,}14} = 500$

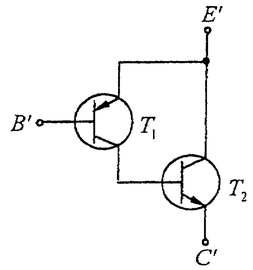
(или $CMRR_{dB} = 20.\log_{10} 500 \approx 54dB$).

Задачи

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

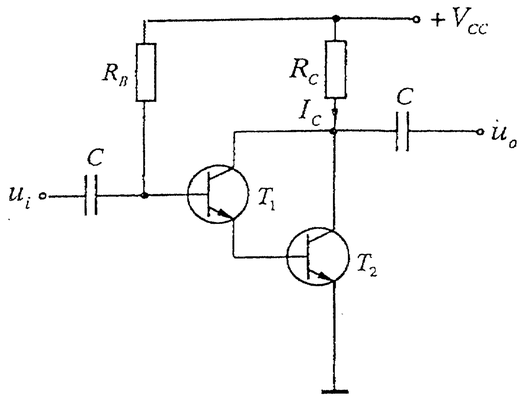
2.11. За схемата, показана на фиг. 2.10, са дадени: $V_{CC} = 7V$, $U_{BE} = 0{,}7V$, $U^+_{om} = 3V$, $U_{CEsat} = 0{,}3V$, $R_C = 50\Omega$, $\beta_1 = 100$, $\beta_2 = 20$, $U_T = 30mV$, $r_{CE1,2} \rightarrow \infty$ и $\omega C \rightarrow \infty$. Да се намерят:

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 постояннотоков режим.



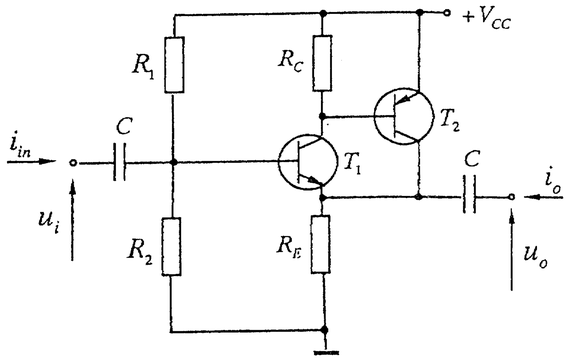
Фиг. 2.10.

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 постояннотоков 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 $i_{in} = 0$).



Фиг. 2.11.

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

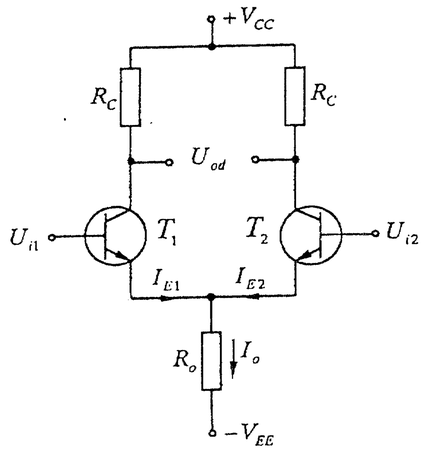
2.16. На фиг. 2.12 е показана схема на диференциален усилвател (ДУ) с биполярни транзистори, като $T_1 \equiv T_2$. За схемата е известно: $V_{CC} = 15V$, $V_{EE} = -15V$, $R_C = 15k\Omega$, $I_o = 1mA$, $\beta_{1,2} = 100$, $U_{BE1,2} = 0{,}7V$, $U_T = 26mV$ и $r_{CE1,2} \rightarrow \infty$.

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 $CMRR$.



Фиг. 2.12.

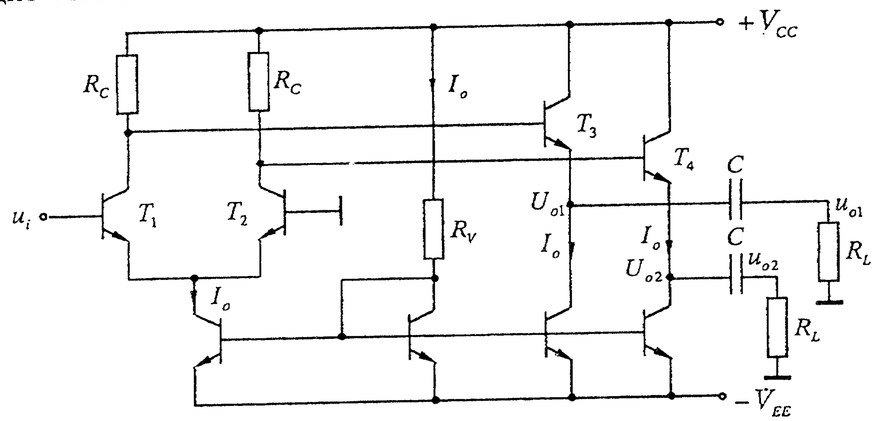
2.17. На фиг. 2.7 е дадена схема на диференциален усилвател с биполярни транзистори, като $T_1 \equiv T_2$. За схемата са дадени:
$V_{CC} = -V_{EE} = 12V$, $U_{BE} = 0{,}6V$, $U_{CT_2} = 6V$,
$U_T = 30mV$, $S_{1,2} = 16{,}7mS$, $\beta_{1,2} = 80$,
$r_{CE1,...,4} = 30k\Omega$ и $S_{E_{T3}} / S_{E_{T4}} = 1{,}5$. 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.

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



Фиг. 2.13.

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

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

усилвател при условие, че двете схеми са реализирани с един и същи транзистор и работят при еднакъв постояннотоков 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 η 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 η, ако в изхода се включи озвучително тяло (високоговорител или тонколона) 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, $P_L = \frac{1}{2}\frac{U_{cm}^2}{R_L} = \frac{1}{2}.\frac{(10V)^2}{8\Omega} = 6{,}25W$;

– консумирана мощност от захранващия източник

$$P_{CC} = 0{,}636 U_{CC}\frac{U_{cm}}{R_L} = 0{,}636.12V.\frac{10V}{8\Omega} \approx 10W;$$

– 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 η 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 (звуковата 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

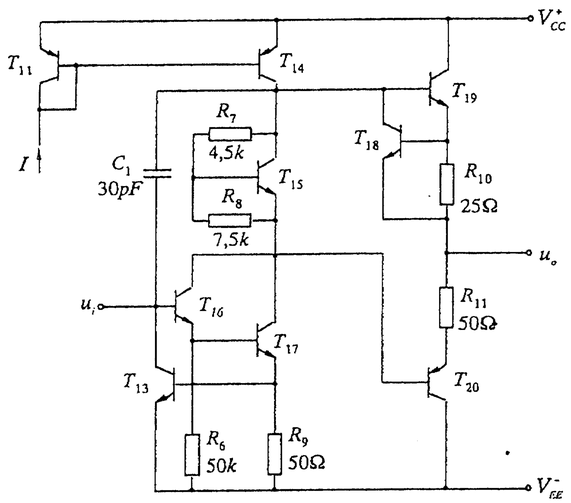
2.21. Да се изчислят амплитудата на изходното напрежение и ток (U_{cm} и I_{cm}) върху товара R_L, необходимата стойност на захранващото напрежение $V_{CC} = -V_{EE}$ и максималната загубна мощност $P_{C\max}$ на крайно стъпало с комплементарна двойка биполярни транзистори, ако са дадени: $P_L = 30W$,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

2.22. Начертайте и обяснете действието на крайно стъпало с комплементарна двойка биполярни транзистори, работещо в *клас B*. 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 $P_{C\max}$ 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 741C 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 B* или *клас AB*), 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.

3 Основни усилвателни схеми с операционни усилватели

Образователни цели

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

- Да изясняват принципа на действие на инвертиращата и неинвертиращата усилвателна схема с ОУ и да изчисляват основните постояннотокови и променливотокови параметри.
- Да анализират поведението на основните променливотокови усилвателни схеми с ОУ при ниски, средни и високи честоти и да определят съответните им гранични честоти.
- Да чертаят схемите на ДУ с един ОУ и инструментален усилвател с три ОУ и да изчисляват динамичните им параметри при подаване на диференциален и синфазен входен сигнал.
- Да анализират поведението на усилвателите на мощност, включващи предусилвател с ОУ, и да изчисляват техните енергийни параметри.

Ключови думи: инвертиращ и неинвертиращ усилвател, гранични честоти, диференциален и инструментален усилвател, усилвател на мощност, максимално допустима разсейвана мощност.

3.1. Инвертиращи и неинвертиращи усилвателни схеми

За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 5.1 и 5.4 от [5].

Примери

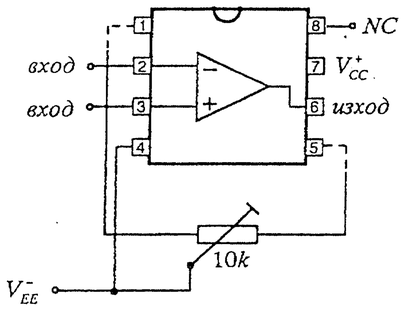
3.1. Даден е ОУ тип 741C (фиг. 3.1) със следните параметри за температура $25°C$: $A_d = 10^5$, $U_{io} = \pm 2mV$, $\alpha_{U_{io}} = \dfrac{\partial U_{io}}{\partial T} = \pm 10\mu V/°C$, $I_{iB} = 300nA$, $I_{io} = \pm 50nA$ и $\alpha_{I_{io}} = \dfrac{\partial I_{io}}{\partial T} = \pm 50pA/°C$.

а) Да се състави схема на неинвертиращ усилвател с ОУ 741C 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 $25°C$.

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 $T = 45°C$, ако е компенсирана стойността му при $T = 25°C$.



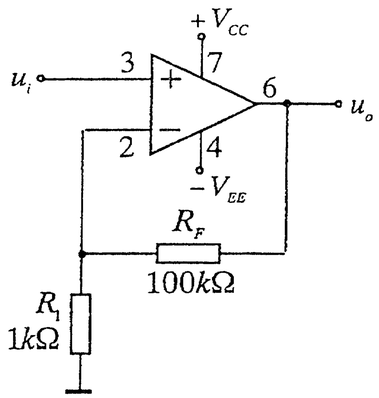
Фиг. 3.1.

Решение:

а) Електронната схема на неинвертиращ усилвател, реализирана с ОУ 741С, е представена на фиг. 3.2. 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 ($A_d \approx \infty$), за коефициента на усилване по напрежение се намира

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



Фиг. 3.2.

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

$$u_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right).u_i + U_{o,err},$$

където $U_{o,err}$ 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

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

Входният поляризиращ ток на инвертиращия вход на ОУ I_B^- се получава от решението на системата уравнения (вж. тема 4.2 от учебника):

$$\left| \begin{array}{l} I_{iB} = \dfrac{I_B^+ + I_B^-}{2} \\ I_{io} = I_B^+ - I_B^- \end{array} \right. \rightarrow I_B^- = I_{iB} - \frac{I_{io}}{2}, \text{ тогава}$$

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

$U_{o,err} \approx 101.(2mV - 275nA.1k\Omega) \approx 175mV$ и

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

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

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

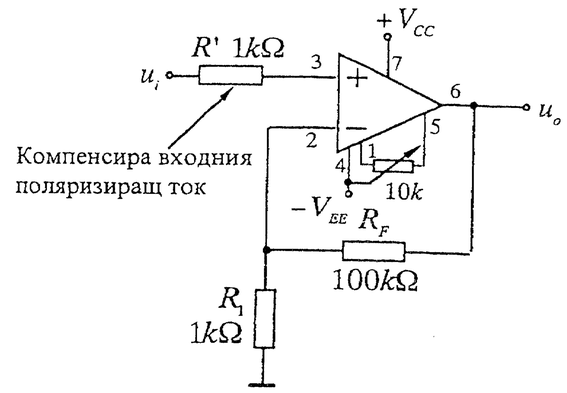
$-235mV < U_{o,err} < 175mV$.

в) Компенсация на входния поляризиращ ток I_B^- може да се постигне, ако последователно на неинвертиращия вход на ОУ се включи резистор $R' = R_1 \| R_F \approx 1k\Omega$ (фиг. 3.3). В този случай

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

където $I_B^+ = I_{iB} + \dfrac{I_{io}}{2}$ 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. 3.1), към които се включва многооборотен 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 плъзгача наляво или надясно, се компенсира напрежението на несиметрия.



Фиг. 3.3.

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

При $T = 45°C$: $U_{o,err} \approx 101.\left(\dfrac{\partial U_{io}}{\partial T}.\Delta T + \dfrac{\partial I_{io}}{\partial T}.\Delta T.R'\right) \rightarrow$

$\rightarrow |U_{o,err}| \le 101.\left(\dfrac{10\mu V}{°C} + \dfrac{50pA}{°C}.1k\Omega\right).20°C \le 20mV$.

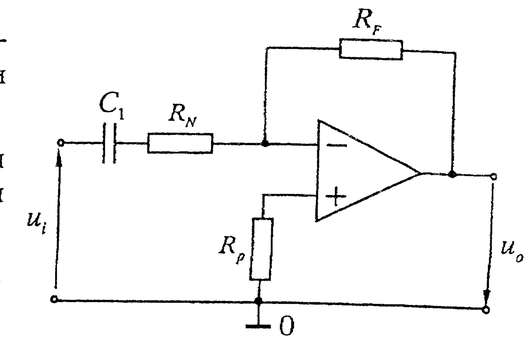
3.2. За схемата на инвертиращ променливотоков усилвател, показана на фиг. 3.4, са известни:

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

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

Да се определят следните характеристики и параметри на схемата:

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



Фиг. 3.4.

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 начертае АЧХ и асимптотичната диаграма на Боде на усилвателя.

Решение:

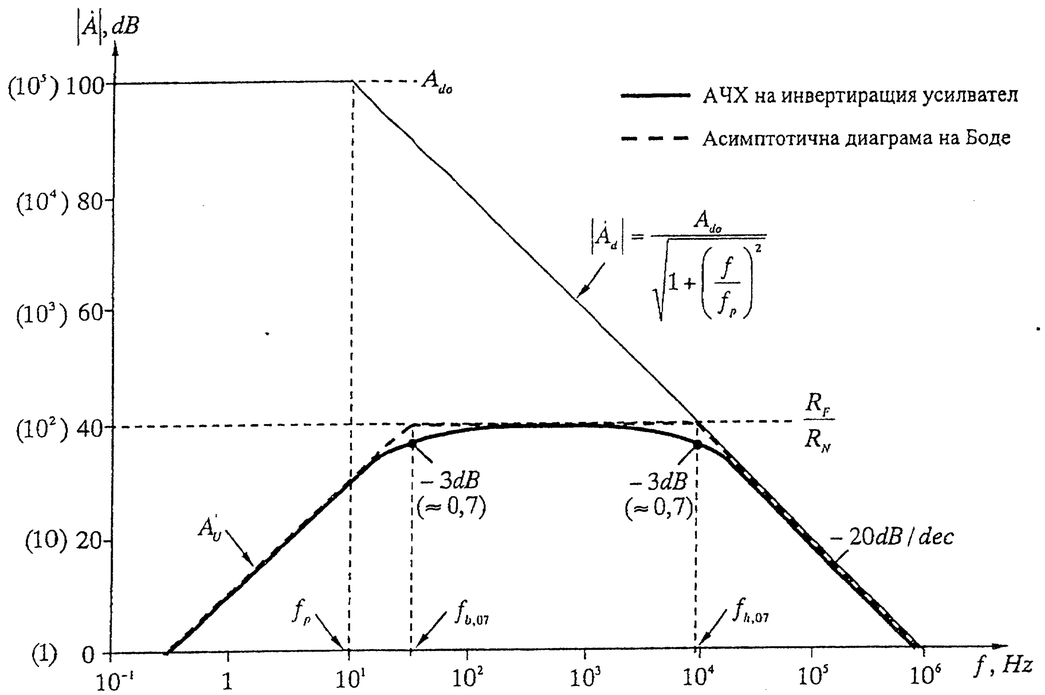
а) Изходното напрежение на грешката $U_{o,err}$ се изчислява при липса на входен сигнал ($u_i = 0$). В този случай кондензаторът C_1 може да се разглежда като отворена верига ($\omega C_1 \to 0$), като през резистора R_N няма да протича постоянен ток. Следователно схемата действа като повторител за напреженията,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

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

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

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

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



Фиг. 3.5.

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

$$\dot{A}_U' = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx -\frac{R_F}{R_N}\frac{1}{1+\frac{1}{\beta\dot{A}_d}} = -\frac{R_F}{R_N}\frac{\beta A_{do}}{(1+\beta A_{do})\left(1 + j\frac{f}{f_{h,07}}\right)} \overset{\beta A_{do} >> 1}{\approx} -\frac{R_F}{R_N}\frac{1}{1 + j\frac{f}{f_{h0,7}}},$$ където

$\beta = \frac{R_N}{R_N + R_F}$ е коефициентът на предаване на ООВ, а $f_{h,07} = f_p(1+\beta A_{do}) \approx$

$\approx f_p A_{do}\frac{R_N}{R_N + R_F} \approx 10kHz$ 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. 3.5.

Задачи

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

– операционен усилвател 741C с параметри: $A_d = 10^5$, $R_{id} = 1M\Omega$ и $R_o = 100\Omega$;

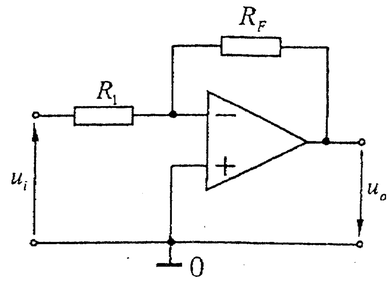
– резистори със съпротивления: $R_1 = 1k\Omega$ и $R_F = 10k\Omega$.

Да се определят следните параметри на схемата:

а) В ходното 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}.



Фиг. 3.6.

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

– операционен усилвател 741C с параметри: $A_d = 10^5$, $R_{id} = 1M\Omega$, $R_{icm} = 10M\Omega$ и $R_o = 100\Omega$;

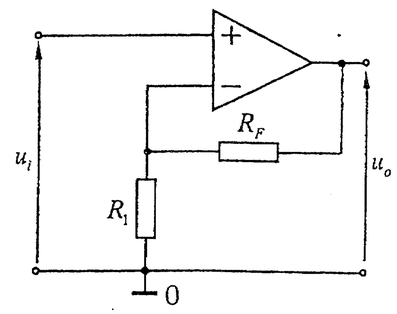
– резистори със съпротивления $R_1 = 100,5\Omega$ и $R_F = 20k\Omega$.

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}.



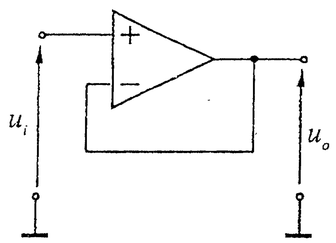
Фиг. 3.7.

3.5. За схемите на повторител и инвертор на напрежение (фиг. 3.8а и фиг. 3.8б) е използван ОУ OPA27 с параметри: $A_d = 10^6$, $R_{id} = 10M\Omega$, $R_{icm} = 5000M\Omega$, $R_o = 100\Omega$ и $SR = 1{,}5V/\mu s$. Да се изчисли:

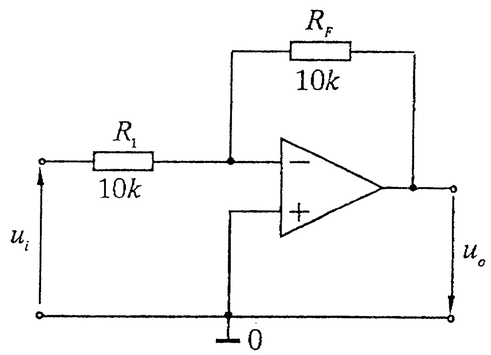
а) коефициентът на усилване по напрежение $A_U = u_o / u_i$ при условие, че ОУ е идеален;

б) входното и изходното съпротивление на схемите (R_{iA} и R_{oA});

в) ширината на честотната лента за голям сигнал f_{max}, ако амплитудата на изходното напрежение е $10V$.



Фиг. 3.8а.



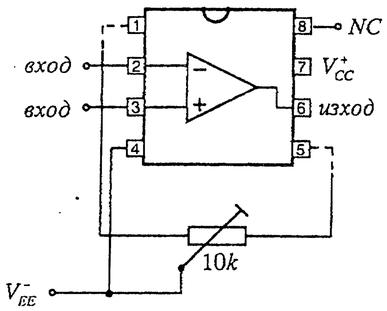
Фиг. 3.8б.

3.6. Даден е ОУ тип 741C (фиг. 3.9) със следните параметри за температура $25°C$: $A_d = 10^5$, $U_{io} = \pm 2mV$, $\alpha_{U_{io}} = \dfrac{\partial U_{io}}{\partial T} = \pm 10\mu V/°C$, $I_{iB} = 300nA$, $I_{io} = \pm 50nA$ и $\alpha_{I_{io}} = \dfrac{\partial I_{io}}{\partial T} = \pm 50pA/°C$.

а) Да се състави схема на инвертиращ усилвател с ОУ 741C 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 $25°C$.

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



Фиг. 3.9.

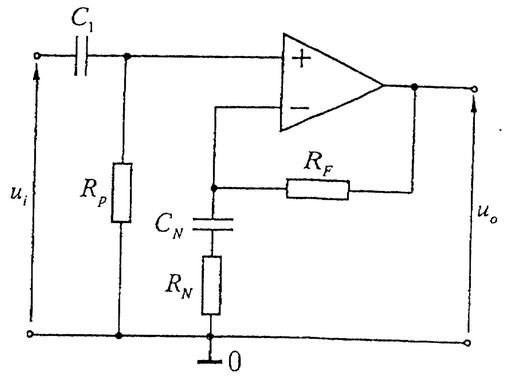
г) Да се изчисли напрежението на грешката $U_{o,err}$ при $T = 45°C$, ако е компенсирана стойността му при $25°C$.

3.7. 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 β, дължащо се на отклонения на съпротивленията R_F и R_1 спрямо номиналните им стойности.

3.8. За схемата на неинвертиращ променливотоков усилвател, показана на фиг. 3.10, са известни:

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

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



Фиг. 3.10.

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.

3.2. Диференциални усилватели с ОУ. Инструменталии (измервателни) усилватели

За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 5.3 от [5].

Примери

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

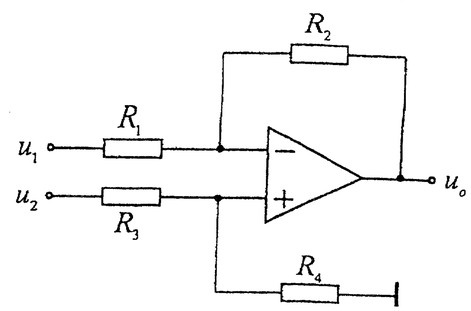
Да се определят:

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



Фиг. 3.11.

съответно на инвертиращия и неинвертиращия вход.

При входно напрежение, въздействащо на инвертиращия вход u_1 и в случай, че ОУ се приеме за идеален, за изходното напрежение се получава

$$u_o\big|_{u_2=0} = -\frac{R_2}{R_1}u_1 .$$

При входно напрежение, въздействащо на неинвертиращия вход u_2, изходното напрежение е

$$u_o\big|_{u_1=0} = \left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)u_{+in} = \left(1+\frac{R_2}{R_1}\right).\frac{R_4}{R_4+R_3}u_2 \text{, където } u_{+in} = \frac{R_4}{R_4+R_3}u_2 .$$

Според принципа на суперпозицията при едновременно въздействие на напреженията на двата входа на диференциалния усилвател за изходното напрежение се намира

$$u_o = -\frac{R_2}{R_1}u_1 + \left(1+\frac{R_2}{R_1}\right).\frac{R_4}{R_4+R_3}u_2 .$$

За $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$ горната формула се опростява и добива вида

$$u_o = \frac{R_2}{R_1}(u_2 - u_1).$$

б) $R_{i1} = 12k\Omega \rightarrow R_{i1} = R_1 = 12k\Omega$, $A_{ДУ} = \frac{R_2}{R_1} = 5 \rightarrow R_2 = 5.R_1 = 60k\Omega$.

По условие $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} = 5$ и $R_{i2} = R_3 + R_4 = 12k\Omega$, тогава за съпротивленията на резисторите се намира $R_3 = 2k\Omega$ и $R_4 = 10k\Omega$.

3.10. На фиг. 3.12 е представена схема, в която ОУ е включен към делител с два резистора. Съпротивлението на единия резистор $R_x = R(1+x)$ за $x << 1$ зависи от температурата или друга неелектрическа величина. Освен това за схемата е известно:

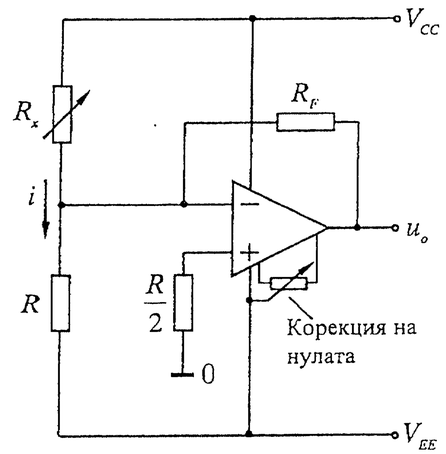
– ОУ OP-177 със зависимост на входното напрежение на несиметрия от изменението на захранващото напрежение $SVR = \frac{\partial U_{io}}{\partial V_{CC}} = \pm 100\mu V/V$;

– резистори със съпротивления: $R = 1k\Omega$ и $R_F = 100k\Omega$.

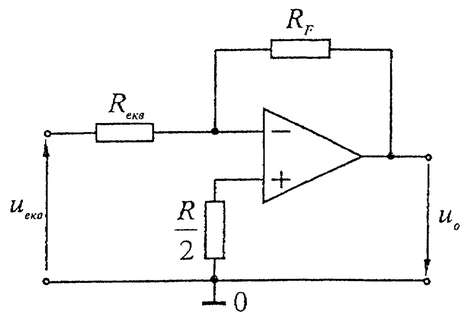
Да се определи:

а) изходното напрежение u_o във функция от съпротивлението на резистора R_x за малки стойности на параметъра x, ако ОУ и делителят са захранени от симетричен източник с напрежения $V_{CC} = -V_{EE} = 10V$;

б) изходното напрежение на грешката $U_{o,err}$ при изменение на захранващото напрежение с $\Delta V_{CC} = \pm 10mV$.



Фиг. 3.12.



Фиг. 3.13.

Решение:

а) За опростяване на анализа входната верига на схемата се представя съгласно теоремата на Тевенен като идеален източник на напрежение $u_{екв}$ и еквивалентно съпротивление $R_{екв}$. В резултат от преобразуването се получава схемата от фиг. 3.13, като стойностите на $u_{екв}$ и $R_{екв}$ са

$$i \approx \frac{2V_{CC}}{R+R_x} \rightarrow u_{екв} = i.R - V_{CC} \approx 2V_{CC}\frac{R}{2R+R.x} - V_{CC} \approx -V_{CC}\frac{x}{2} \text{ и}$$

$$R_{екв} \approx R \| R_x \approx \frac{R}{2} = 500\Omega .$$

Тогава за изходното напрежение се намира формулата

$$u_o \approx u_{екв}.\left(-\frac{R_F}{R_{екв}}\right) \approx -V_{CC}\frac{x}{2}.\left(-\frac{R_F}{R_{екв}}\right) \approx 1000V.x .$$

За да работи ОУ в линеен режим, е необходимо $x << 1$, при което $u_o < 10V$. Освен това с помощта на многооборотния потенциометър, включен между допълнителните изводи и отрицателното захранващо напрежение на ОУ, предварително се компенсира изходното напрежение на грешката.

б) Изходното напрежение на грешката $U_{o,err}$, предизвикано от изменението на захранващото напрежение, се определя, като първоначално се изчисляват изменения на напреженията $u_{екв}$ и U_{io}.

$$\Delta u_{екв} \approx \Delta V_{CC}\frac{R}{2R+R.x} \approx \frac{\Delta V_{CC}}{2}\left(1-\frac{x}{2}\right) = \pm 5mV.\left(1-\frac{x}{2}\right) \text{ и}$$

$$\Delta U_{io} \approx \frac{\partial U_{io}}{\partial V_{CC}}.\Delta V_{CC} = \pm 100\frac{\mu V}{V}.(\pm 10mV) = \pm 1\mu V \text{, следователно}$$

$$U_{o,err} \approx \Delta u_{екв}.\left(-\frac{R_F}{R_{екв}}\right) - \Delta U_{io}.\left(1+\frac{R_F}{R_{екв}}\right) \rightarrow \left|U_{o,err}\right| \le 1V.\left(1-\frac{x}{2}\right) + 200\mu V \approx 1V .$$

Задачи

3.11. За схемата на диференциалния усилвател с ОУ, показана на фиг. 3.11, 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:

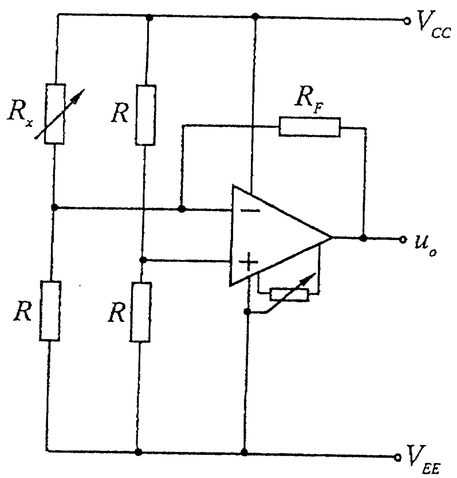
а) в общ вид предавателната функция на схемата $U_o = f(U_1, U_2)$;

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

3.12. На фиг. 3.14 е представена схема, в която ОУ е включен към мост на Уитстън. Съпротивлението на единия резистор $R_x = R(1+x)$ за $x << 1$ зависи от температурата или друга неелектрическа величина. По този начин се измерва разликата между еквивалентните напрежения на двата делителя $R - R_x$ и $R - R$. За схемата е известно:

– операционен усилвател OP-177 със зависимост на входното напрежение на несиметрия от изменението на захранващото напрежение $SVR = \frac{\partial U_{io}}{\partial V_{CC}} = \pm 100\mu V/V$;

– резистори със съпротивления: $R = 1k\Omega$ и $R_F = 100k\Omega$.



Фиг. 3.14.

Да се определи:

а) изходното напрежение u_o във функция от съпротивлението на резистора R_x за малки стойности на параметъра x, ако ОУ и делителят са захранени от симетричен източник с напрежения $V_{CC} = -V_{EE} = 10V$;

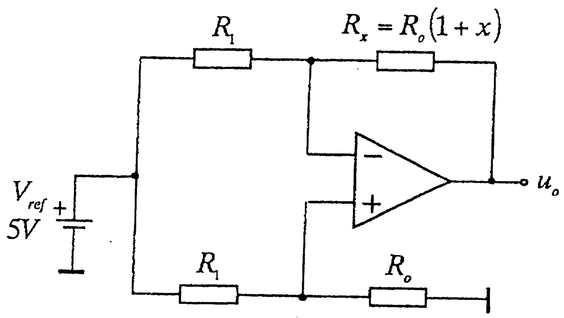
б) изходното напрежение на грешката $U_{o,err}$ при изменение на захранващото напрежение с $\Delta V_{CC} = \pm 10mV$.

3.13. На фиг. 3.15 е даден диференциален усилвател, в който резисторът $R_x = R_o(1+x)$ за $0 < x < 1$ зависи от температурата. За схемата е известно:

– операционен усилвател OP-177 с параметри: $A_d = 10^6$, $U_{io} = \pm 0{,}1mV$, $I_{io} = \pm 0{,}3nA$ и $I_{io} = \pm 0{,}5nA$;

– резистори със съпротивления $R_1 = 100\Omega$ и $R_o = 900\Omega$.

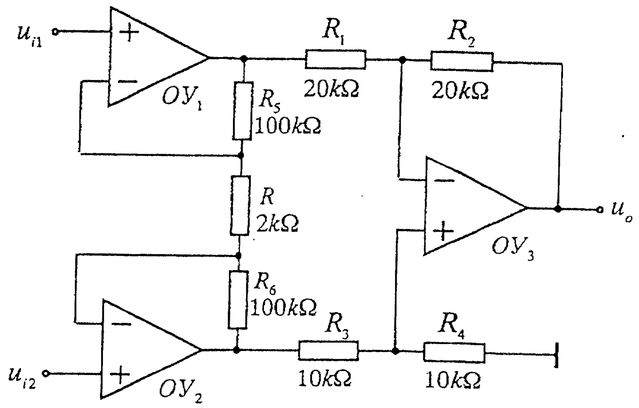
Да се определи:



Фиг. 3.15.

а) изходното напрежение u_o във функция от съпротивлението на резистора R_x за $0 < x < 1$, ако ОУ се приеме за идеален;

б) изходното напрежение на грешката $U_{o,err}$, предизвикано от входния поляризиращ ток и входното напрежение на несиметрия.



Фиг. 3.16.

3.14. На фиг. 3.16 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 $CMRR_{OУ} = 80dB$.

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.

3.3. Усилватели на мощност

За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 3.5 и 5.5 от [5].

Пример

3.15. Да се определят динамичните параметри и стойностите на съпротивленията на R_1 и $R_F = R_{F1} + R_{F2}$ в схемата на аудиоусилвател на мощност с операционен усилвател (фиг. 3.17), ако са дадени:

– захранващо напрежение – $V_{CC} = -V_{EE} = 12V$;

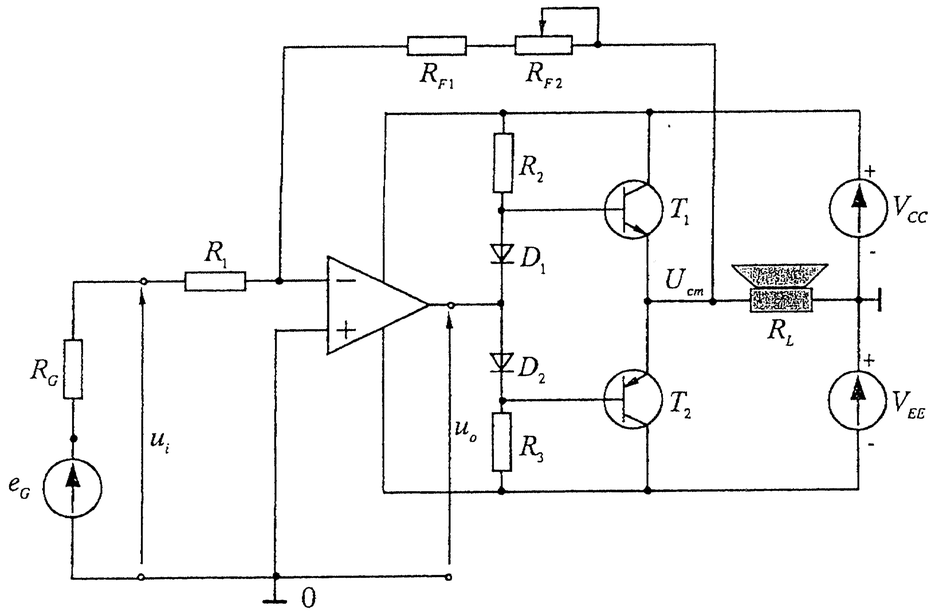
– максимално изходно напрежение $U_{om}^{+} = -U_{om}^{-} = 11{,}3V$ и максимален изходен ток на ОУ $I_{o\max,OУ} = 10mA$;

– максимално входно напрежение $e_{G\max} = 1V$;

– еквивалентно съпротивление на озвучителното тяло $R_L = 8\Omega$.

Решение:

– Определя се амплитудата на напрежението върху товара U_{cm}. За да остане ОУ в линеен режим на работа, изходното му напрежение u_o трябва да бъде по-



Фиг. 3.17.

малко от $U^+_{om} = 11{,}3V$. Освен това, за да работят транзисторите T_1 и T_2 в активен режим, емитерните им преходи трябва да бъдат в права посока или $U_{BE1} = U_{BE2} = 0{,}65V$. Тогава напрежението U_{cm} трябва да бъде още по-малко:

$U_{cm} = U^+_{om} - 0{,}65V = 11{,}3V - 0{,}65V = 10{,}65V$.

– Определя се максималната отдадена мощност върху товара:

$$P_{L\max} = \frac{1}{2}\frac{U^2_{cm}}{R_L} = \frac{1}{2}\frac{(10{,}65V)^2}{8\Omega} \approx 7W.$$

– Определят се максималният ток през товара, който усилвателят може да осигури, и необходимите стойности на коефициентите на усилване по ток на транзисторите:

$$I_{cm} = \sqrt{\frac{2.P_{L\max}}{R_L}} \approx \sqrt{\frac{2.7W}{8\Omega}} \approx 1{,}3A.$$ Тогава $\beta_1 = \beta_2 \geq \frac{I_{cm}}{I_{omax,OY}} = \frac{1{,}3A}{0{,}01A} \approx 130$.

– Определя се максималната загубна мощност $P^{`}_{C\max 1,2}$, която се разсейва в колекторния преход на всеки от транзисторите T_1 и T_2:

$$P_{C\max 1,2} = \frac{U^2_{CC}}{\pi^2 R_L} = \frac{(12V)^2}{\pi^2 8\Omega} \approx 2W \text{ при } U_{cm} = \frac{2}{\pi}U_{CC} = 0{,}636.U_{CC}.$$

Тогава номиналната мощност на всеки от транзисторите T_1 и T_2 трябва да бъде по-голяма от $P_{C\max 1,2} \approx 2W$.

– Определя се консумираната мощност от токозахранващите източници:

$$P_{CC} = \frac{2}{\pi}I_{cm}U_{CC} = \frac{2}{\pi}1{,}3A.12V \approx 10W.$$

– Определя се коефициентът на полезно действие на стъпалото:

$$\eta = \frac{P_L}{P_{CC}} = \frac{\pi}{4}.\frac{U_{cm}}{U_{CC}} = \frac{\pi}{4}.\frac{10{,}65V}{12V} \approx 0{,}697 \ (\eta = 69{,}7\%).$$

Тази стойност е по-малка от максималната изчислена 0,785 ($\eta_{\max} = 78{,}5\%$), определена за крайно стъпало, работещо в *клас B*, тъй като $U_{cm} < V_{CC}$.

– Определят се необходимата стойност на коефициента на усилване по напрежение A_F и стойностите на съпротивленията на R_1 и $R_F = R_{F1} + R_{F2}$ (приема се, че коефициентът на усилване по напрежение на крайното стъпало е приблизително равен на единица):

$$|A| = \frac{U_{cm}}{e_{G\max}} = \frac{10{,}65V}{1V} = 10{,}65.$$

– Избира се съпротивлението $R'_1 = R_G + R_1$, равно на $10k\Omega$ (приема се, че в него е включено вътрешното съпротивление на източника на входен сигнал R_G), а съпротивлението R_F се изчислява от израза

$$R_F = R'_1.|A| = 10k\Omega.10{,}65 = 100{,}65k\Omega..$$

При реализацията на R_F съпротивлението на потенциометъра R_{F2} трябва да бъде 20% от съпротивлението R_F, а съпротивлението на резистора R_{F1} трябва да бъде 90% от R_F. Това позволява ±10% настройка на коефициента на усилване по напрежение. По този начин може да се компенсира влиянието на толеранса на резистора R_1 и приблизителната стойност на коефициента на усилване по напрежение на крайното стъпало.

Задачи

3.16. Транзистор BD201 с топлинно съпротивление $R_{thj-c} = 2{,}08°C/W$ трябва да разсее мощност 15W. Монтиран е на радиатор с топлинно съпротивление $R_{thr-a} = 2{,}5°C/W$ и е изолиран от него чрез слюдена пластина с $R_{thc-r} = 0{,}8°C/W$. Каква е температурата на прехода, ако температурата на околната среда е $T_a = 35°C$?

3.17. Мощен транзистор BD241 има топлинно съпротивление преход – корпус $R_{thj-c} = 3{,}12°C/W$ и разсейва максимална мощност $8W$. Температурата на прехода е $T_j = 75°C$. Топлинното съпротивление корпус – радиатор е $R_{thc-r} = 0{,}7°C/W$. Да се определи топлинното съпротивление радиатор – околна среда, ако температурата на околната среда е $25°C$.

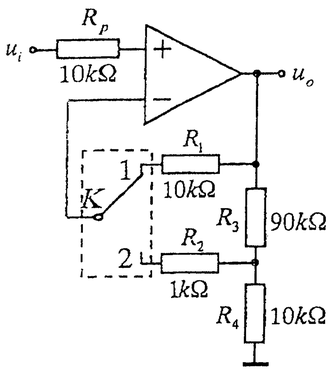
3.18. За мощен транзистор BD135 е осигурено общо топлинно съпротивление $R_{thj-a} = 20°C/W$. Максимално допустимата температура на прехода е $T_{j\max} = 150°C$. Да се определи максималният ток, който е допустимо да протече в колектора на транзистора при напрежение $U_{CE} = 5V$ и температура на околната среда $T_a = 40°C$.

3.4. Основни усилвателни схеми с програмируем коефициент на усилване по напрежение

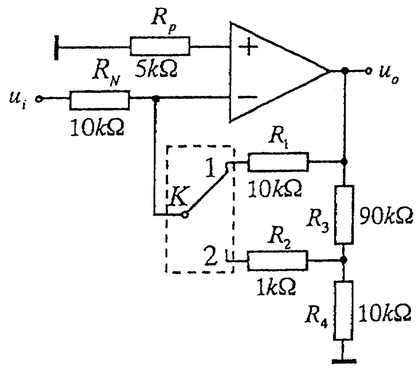
За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 5.1 и 5.2 от [6].

Задачи

3.19. За схемата на програмируем неинвертиращ усилвател, показана на фиг. 3.18, 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.



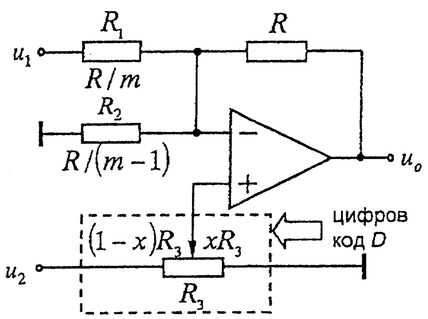
Фиг. 3.18.



Фиг. 3.19.

3.20. За схемата на програмируем инвертиращ усилвател, показана на фиг. 3.19, 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 амплитуда на изходното напрежение 10V.

3.21. На фиг. 3.20 е дадена схема на програмируем усилвател. В нея към $+in$ на ОУ е включен цифров потенциометър R_3. Позицията на средната точка се определя от параметъра x, чиято стойност зависи от цифровия код D ($x = D/2^n$, $0 \le D \le 2^n$, като n е разредността на цифровия код): а) Да се изведе в общ вид предавателната функция $u_o = f(u_1, u_2)$; б) Да се представи в графичен вид зависимостта $A_U = f(x)$ ($A_U = u_o / u_i$, където $u_i = u_1 = u_2$ – двата входа, свързани накъсо) за $m = 100$ и $0 \le x \le 1$.



Фиг. 3.20.

4 Активни RC филтри и активни индуктивности

Образователни цели

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

- Да обясняват принципа на действие на основните схеми на активни RC филтри и да извеждат в общ вид изразите за предавателните им функции.
- Да определят АЧХ и ФЧХ на основните схеми на активни филтри от предавателните функции по напрежение.
- Да изясняват същността на активните индуктивности, реализирани с жиратори и обобщени импедансни преобразуватели, и да изчисляват динамичните им параметри.

Ключови думи: активен филтър, лента на пропускане, активна индуктивност, жиратор и обобщен импедансен преобразувател.

4.1. Активни RC филтри

За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 6.2 от [5] и [7].

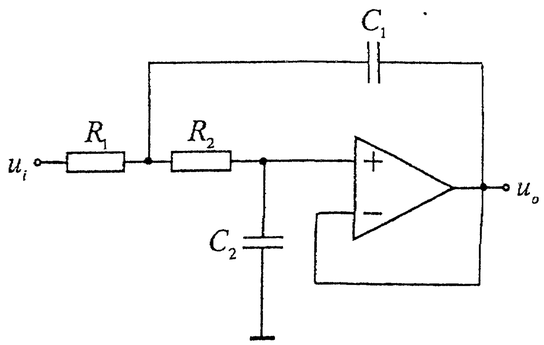
Пример

4.1. За схемата на активен RC филтър, показана на фиг. 4.1, ако $R_1 = R_2 = R$ и $C_1 = C_2 = C$, да се определят следните характеристики и параметри:

а) предавателната функция по напрежение $A_U(p) = U_o(p)/U_i(p)$ при условие, че ОУ се приеме за идеален;

б) АЧХ на схемата (чрез формула и в графичен вид) за $R = 3{,}3k\Omega$ и $C = 4{,}7nF$;

в) типът на филтъра, който схемата реализира.



Фиг. 4.1.

Решение:

а) Предавателната функция по напрежение може да се намери от анализа на схемата по метода с възловите напрежения. За целта се построява еквивалентна схема по променлив

ток и се съставя матрица на проводимостите. Предавателната функция се получава като отношение на адюнгираните количества на матрицата на схемата, т.е.

$$A_U(p)=\frac{U_o(p)}{U_i(p)}=\frac{\dfrac{1}{R_1R_2C_1C_2}}{p^2+p\left(\dfrac{1}{R_1C_1}+\dfrac{1}{R_2C_1}\right)+\dfrac{1}{R_1R_2C_1C_2}}.$$

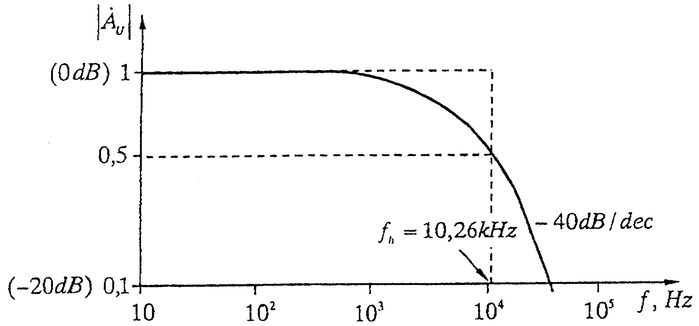
В случай, че $R_1=R_2=R$ и $C_1=C_2=C$, предавателната функция на схемата се опростява:

$$A_U(p)=\frac{1}{p^2R^2C^2+2pRC+1}=\frac{1}{(pRC+1)^2}.$$

б) След заместване на комплексната променлива на Лаплас p с $j\omega$ в предавателната функция, определена в подточка а), за АЧХ се намира

$$|A_U(j\omega)|=\frac{1}{1+\left(\dfrac{f}{f_h}\right)^2},$$

където $f_h=\dfrac{1}{2\pi RC}=10{,}26kHz$ е високата гранична честота на активния RC филтър.



Фиг. 4.2.

АЧХ на активния RC филтър в графичен вид е дадена на фиг. 4.2.

в) Въз основа на формата на АЧХ следва, че схемата от фиг. 4.1 реализира нискочестотен филтър от втори ред.

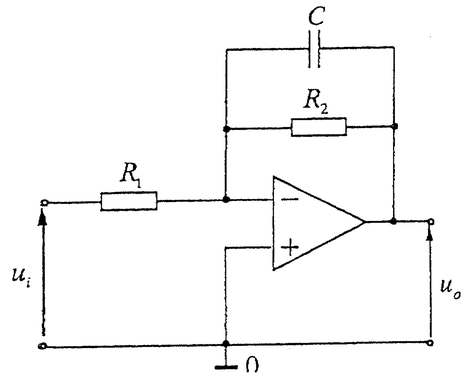
Задачи

4.2. За схемите, показани на фиг. 4.3а и 4.3б, ако $R_1=10k\Omega$, $R_2=100k\Omega$ и $C=1nF$, да се определят следните характеристики и параметри:

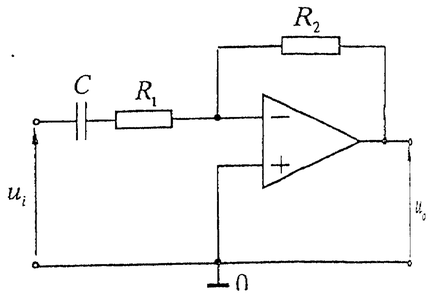
а) предавателната функция по напрежение $A_U(p)=U_o(p)/U_i(p)$ при условие, че ОУ се приеме за идеален;

б) АЧХ и ФЧХ на схемата (чрез формули и в графичен вид);

в) типа на филтъра, който схемата реализира.

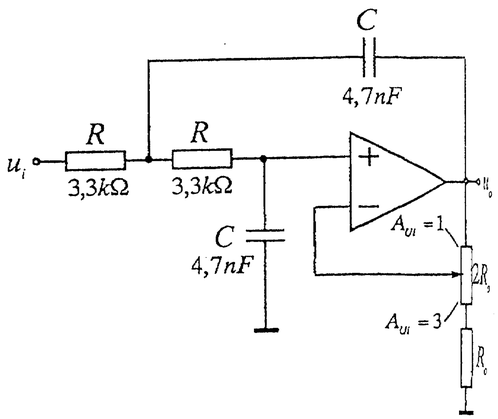


Фиг. 4.3а.



Фиг. 4.3б.

4.3. На фиг. 4.4 е показана схема на активен нискочестотен филтър. В нея ОУ е обхванат от последователна ООВ по напрежение чрез делителя $2R_o-R_o$ ($2R_o$ – потенциометър), като коефициентът на усилване на така получения неинвертиращ усилвател е означен с A_{Ui}. Да се определят следните характеристики и параметри:



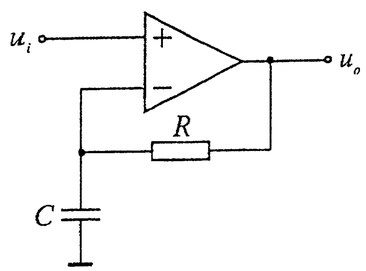
Фиг. 4.4.

а) предавателната функция по напрежение $A_U(p)=U_o(p)/U_i(p)$ при условие, че ОУ се приеме за идеален;

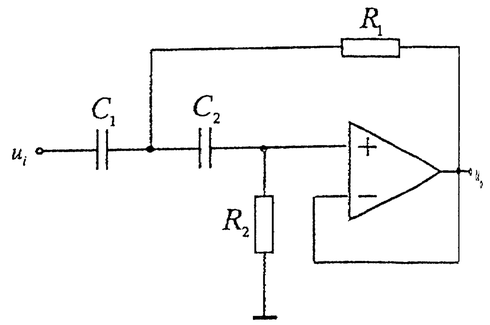
б) АЧХ и ФЧХ на схемата (чрез формули и в графичен вид) за коефициенти на усилване на неинвертиращия усилвател $A_{Ui}=1$, 1,5, 2,2 и 3.

4.4. За схемата от фиг. 4.5, при условие че операционният усилвател е идеален да се определят:

а) предавателната функция по напрежение $A_U(p)=U_o(p)/U_i(p)$;



Фиг. 4.5.



Фиг. 4.6.

б) АЧХ и ФЧХ на схемата (чрез формули и в графичен вид).

4.5. За схемата на активен RC филтър, показана на фиг. 4.6, ако $R_1 = R_2 = R$ и $C_1 = C_2 = C$, да се определят следните характеристики и параметри:

а) предавателната функция по напрежение $A_U(p) = U_o(p)/U_i(p)$ при условие, че ОУ е идеален;

б) АЧХ и ФЧХ на схемата (чрез формули и в графичен вид) за $R = 10k\Omega$ и $C = 10nF$;

в) типа на филтъра, който схемата реализира.

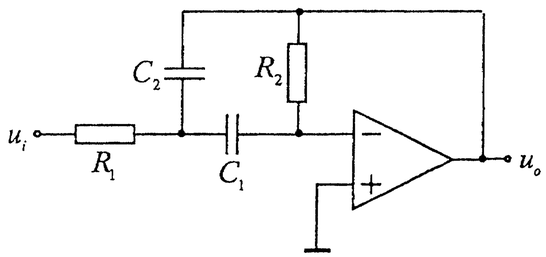
4.6. За схемата на активен RC филтър, показана на фиг. 4.7, ако $R_2 = 2R_1$ и $C_1 = C_2 = C$, да се определят следните характеристики и параметри:

а) предавателната функция по напрежение $A_U(p) = U_o(p)/U_i(p)$ при условие, че ОУ е идеален;

б) АЧХ и ФЧХ на схемата (чрез формули и в графичен вид);

в) максималния коефициент на предаване за честота $f = f_o$ и стойността на f_o за $R_1 = 10k\Omega$ и $C = 2{,}2nF$;

г) типа на филтъра, който схемата реализира.



Фиг. 4.7.

4.2. Активни индуктивности, реализирани с жиратори и обобщени импедансни преобразуватели

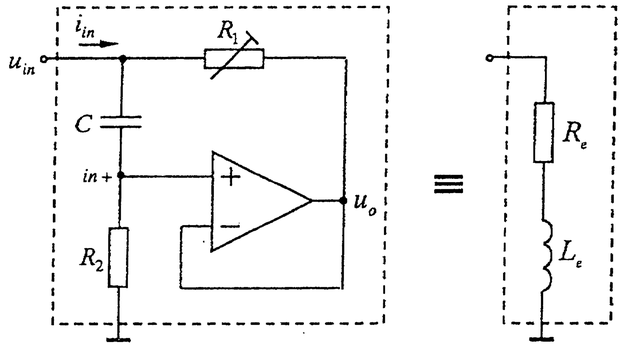
За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 6.3 от [5].

Задачи

4.7. За схемата на активна индуктивност (фиг. 4.8), реализирана на базата на жиратор, ако ОУ се приеме за идеален, да се намерят:

а) входният импеданс $z_{in}(j\omega) = U_{in}(j\omega)/I_{in}(j\omega)$;

б) стойностите на еквивалентната индуктивност L_e и еквивалентното съпротивление R_e за $R_1 = 150\Omega$, $R_2 = 50k\Omega$ и $C = 10nF$.



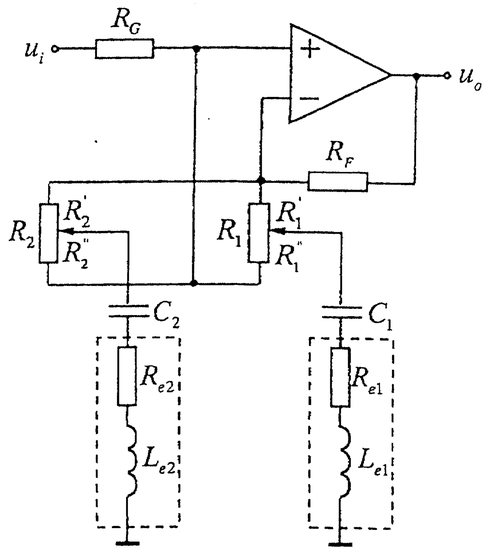
Фиг. 4.8.

4.8. На фиг. 4.9 е представена схема на избирателен усилвател с жиратори. В нея при реализацията на двете активни индуктивности е използвана схемата от фиг. 4.8. За избирателния усилвател от фиг. 4.9 са дадени: $R_F = 100k\Omega$, $R_1 = 10k\Omega$, $R_1' = 5k\Omega$, $R_2 = 20k\Omega$, $R_2' = 10k\Omega$, $C_1 = 25{,}35nF$, $R_{e1} = 100\Omega$, $L_{e1} = 1H$, $C_2 = 2{,}53nF$, $R_{e2} = 100\Omega$, $L_{e2} = 100mH$, $R_G = 50\Omega$ и ОУ тип 741C.

а) Да се обясни принципът на действие на схемата и да се изведат в общ вид формулите за коефициентите на предаване при резонансните честоти f_{o1} и f_{o2}.

б) Да се изчислят стойностите на резонансните честоти f_{o1} и f_{o2} и коефициентите на усилване за тях, ако $R_1'' >> R_G$ и $R_2'' >> R_G$.

в) Да се начертае амплитудно-честотната характеристика на избирателния усилвател.

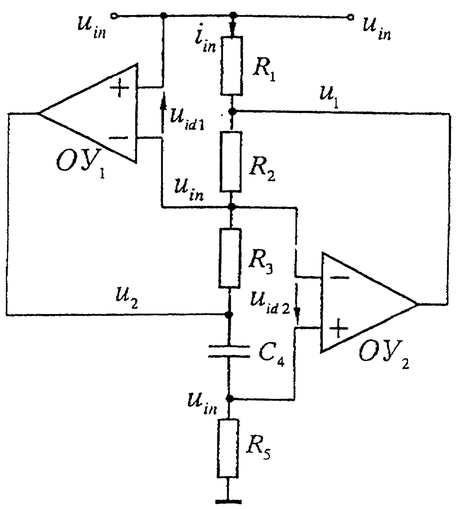


Фиг. 4.9.

4.9. За схемата на активна индуктивност (фиг. 4.10), реализирана на базата на обобщен импедансен преобразувател (General Impedance Converter – GIC), ако операционните усилватели се приемат за идеални, да се намери:

а) входният импеданс $z_{in}(p) = U_{in}(p)/I_{in}(p)$;

б) стойността на еквивалентната индуктивност L_e за $R_1 = R_2 = R_3 = R = 10k\Omega$, $R_5 = 5k\Omega$ и $C_4 = 4{,}7nF$.



Фиг. 4.10.

Упътване: При определяне на входния импеданс да се използват следните зависимости: $u_2 = u_{in}\left(1 + \frac{z_4}{R_5}\right)$, $\frac{u_1 - u_{in}}{R_2} = \frac{u_{in} - u_2}{R_3}$ и $i_{in} = \frac{u_{in} - u_1}{R_1}$, където $z_4 = 1/pC_4$.

4.10. За схемата, дадена на фиг. 4.10, ако резисторите R_3 и R_5 се заменят с кондензатори C_3 и C_5, а кондензаторът C_4 се замени с резистор R_4, да се намери в общ вид входният импеданс $z_{in}(p) = U_{in}(p)/I_{in}(p)$. Какъв е характерът на входния импеданс на схемата?

5 Линейни и нелинейни операционни схеми

Образователни цели

Тази глава ще насочи вниманието на студентите към основните линейни и нелинейни операционни схеми, реализирани на базата на инвертиращата и неинвертиращата схема с ОУ. От класа на линейните електронни схеми са дадени задачи за анализ на суматори, интегратори и диференциатори, а от нелинейните схеми се разглеждат логаритматори, антилогаритматори и многофункционални електронни схеми. Освен това са дадени задачи с аналогови умножители и аналогови компаратори. Осмислянето на предавателните функции и вникването в методите за анализ и проектиране на основните операционни схеми е важна предпоставка за овладяване на разнообразната схемотехника, застъпена в електронните уреди и системи.

Ключови думи: аналогов суматор, интегратор, диференциатор, логаритматор, антилогаритматор, аналогов умножител и аналогов компаратор.

5.1. Аналогови суматори

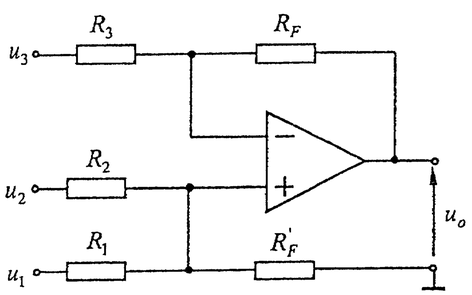
За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 1.1 от [6].

Задачи

5.1. За схемата на аналогов суматор, показана на фиг. 5.1, резисторите са със съпротивления: $R_F = R_F' = 20k\Omega$, $R_1 = 20k\Omega$, $R_2 = 5k\Omega$ и $R_3 = 4k\Omega$. Ако се приеме, че ОУ е идеален, да се намери:

а) предавателната функция по напрежение $u_o = f(u_1, u_2, u_3)$;

б) изходното напрежение u_o за $u_1 = u_2 = 1V$ и $u_3 = 0{,}2V$.

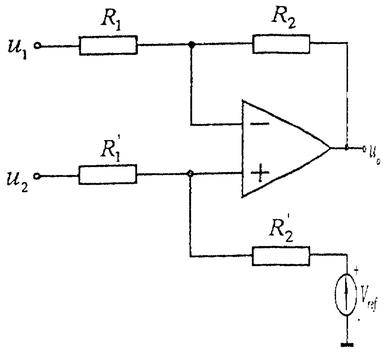


Фиг. 5.1.

5.2. На фиг. 5.2 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 $u_o = f(u_1, u_2, V_{ref})$;

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

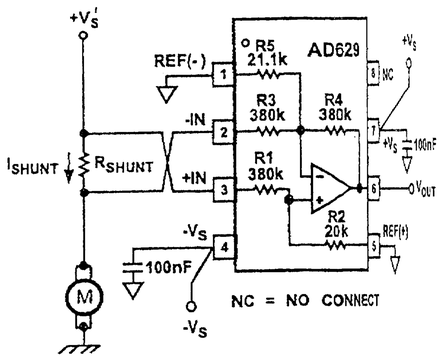


Фиг. 5.2.

5.3. На фиг. 5.3 е дадена принципна схема на диференциален усилвател (ДУ), реализиран с ИС 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 ($A_d \to \infty$, $R_{id} \to \infty$ и $R_o = 0$) и резисторите са подбрани така, че $R_2 = R_3 \| R_5$, да се намери:

а) в общ вид предавателната функция на схемата $V_{out} = f(V_{+in}, V_{-in})$;

б) изходното напрежение V_{out}, ако се знае, че $I_{SHUNT} = 10A$ и $R_{SHUNT} = 0{,}1\Omega$.

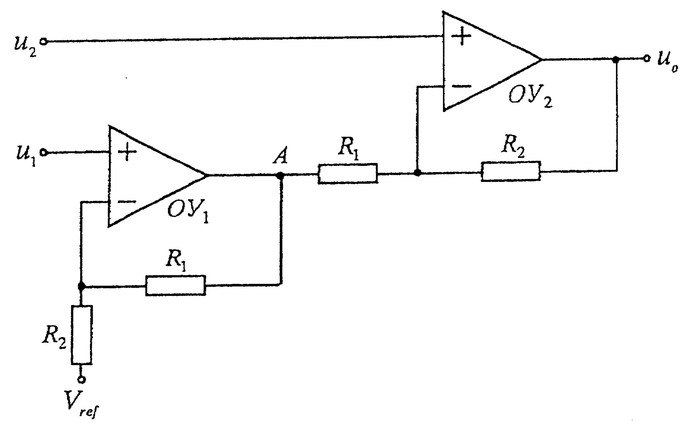


Фиг. 5.3.

5.4. На фиг. 5.4 е дадена електронна схема на инструментален усилвател с два ОУ. Ако се знае, че $ОУ_1$ и $ОУ_2$ са идеални ($A_d \to \infty$, $R_{id} \to \infty$ и $R_o = 0$), $R_1 = 10k\Omega$, $R_2 = 990k\Omega$ и $U_{ref} = 2{,}5V$, да се определи:

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

б) изходното напрежение u_o, ако входното диференциално напрежение е $u_{id} = u_2 - u_1 = 10mV$.



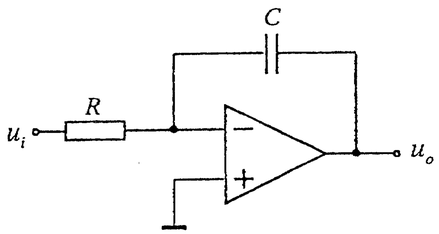
Фиг. 5.4.

5.2. Интегратори и диференциатори

За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 1.2 и 1.3 от [6].

Задачи

5.5. За схемата на интегратора от фиг. 5.5 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 $0 \le t < 5ms$); $u_i = 0V$ (за $5 \le t \le 15ms$) и $u_i = -2V$ (за $15ms < t \le 30ms$).

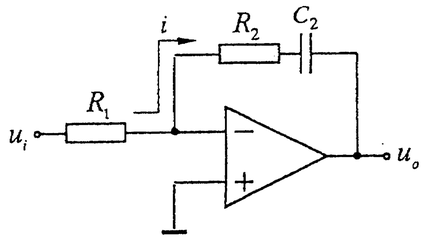


Фиг. 5.5.

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

5.6. На входа на интегратор – усилвател (фиг. 5.6) с коефициент $A_U = R_2/R_1 = 10$ е подадено напрежение с параметри:

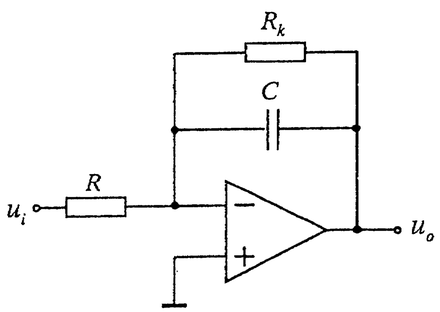
$$u_i(t) = \begin{cases} 0 \text{ за } t < 0 \\ U_i \text{ за } t \ge 0 \text{ с } U_i = 1V. \end{cases}$$



Фиг. 5.6.

Да се изведе изразът за изходното напрежение u_o и да се начертае формата му за три стойности на времеконстантата τ_2: $\tau_2 = R_2C_2 = \{1s,\ 2s \text{ и } 5s\}$.

5.7. На фиг. 5.7 е дадена схема на интегратор, като $R_k = 100k\Omega$ и $R = 10k\Omega$.



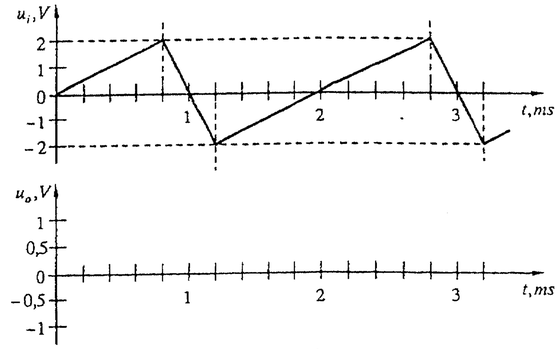
Фиг. 5.7.

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 $10nF$.

5.8. На входа на диференциатор с $R = 10k\Omega$ и $C = 10nF$ е подаден периодичен сигнал u_i с триъгълна форма, показан на фиг. 5.8.



Фиг. 5.8.

Да се начертае в съответен мащаб формата на изходното напрежение u_o!

5.9. На фиг. 5.9 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);

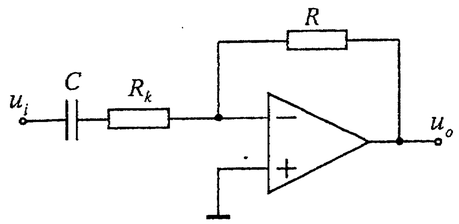
в) Да се начертаят АЧХ на схемата за $C = 270nF$, $27nF$ и $2{,}7nF$.

5.10. На фиг. 5.10 е представена схема на диференциатор, като $R_1 = 1{,}59k\Omega$, $C_1 = 10nF$, $R_2 = 15{,}9k\Omega$ и $C_2 = 1nF$.

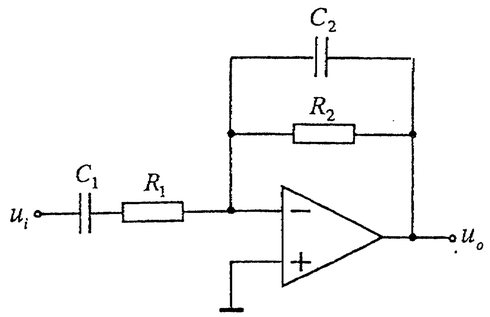
а) Да се намери в общ вид комплексната предавателна функция по напрежение на схемата $\dot{A}_U(j\omega) = \dot{U}_o/\dot{U}_i$;

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 на схемата за параметрите на елементите, дадени по-горе.



Фиг. 5.9.

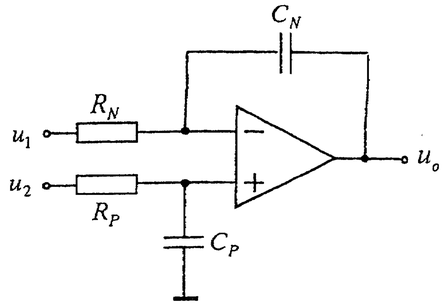


Фиг. 5.10.

5.11. На фиг. 5.11 е дадена електронна схема, в която ОУ е обхванат от честотно зависима ОВ. Ако се знае, че ОУ е идеален ($A_d \to \infty$, $R_{id} \to \infty$ и $R_o = 0$) и $R_NC_N = R_PC_P$, да се определи:

а) предавателната функция по напрежение $u_o = f(u_1,\ u_2)$;

б) типът на операционната схема, която конфигурацията от фиг. 5.11 реализира.



Фиг. 5.11.

5.3. Логаритмични и антилогаритмични усилватели. Многофункционални устройства

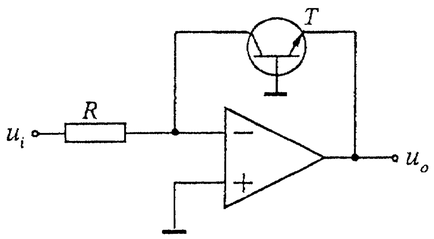
За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 1.4 – 1.7 от [6].

Задачи

5.12. За схемата, показана на фиг. 5.12, са известни: $R = 1k\Omega$, $U_T = 26mV$ и транзистор 2N3904 с параметри $I_{ES} = 10fA$ и $\beta = 150$. Да се определи:

а) в общ вид предавателната функция на схемата $u_o = f(u_i)$;

б) напрежението в изхода U_o, ако се знае, че на входа е подадено постоянно напрежение $U_i = 0{,}1V$, $0{,}5V$ и $2V$;

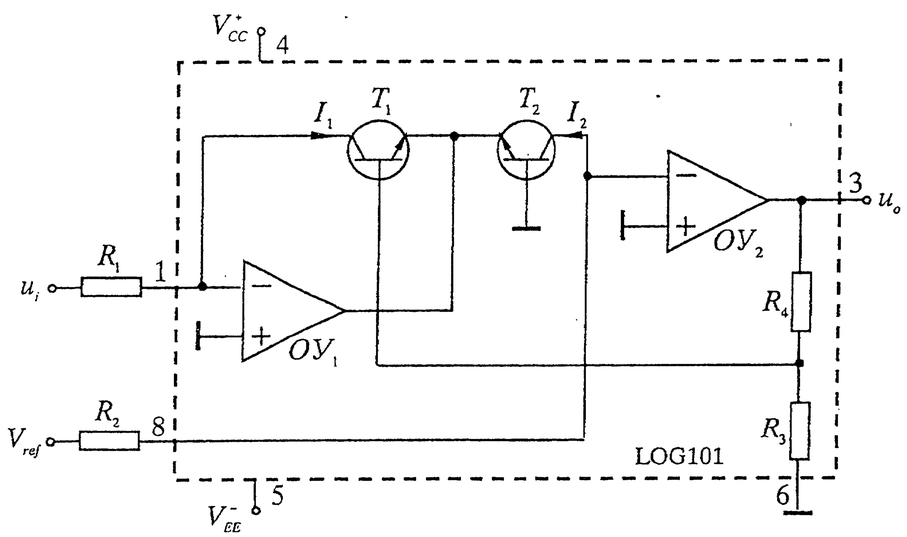


Фиг. 5.12.

в) грешката от обемното съпротивление на базата $\delta_{r_{BB'}}$ за $I_C \approx U_i / R = 0{,}5mA$ ($U_i = 0{,}5V$), ако се знае, че $r_{BB'} = 50\Omega$.

5.13. На фиг. 5.13 е показана схема на логаритмичен усилвател, реализирана с ИС LOG101 (Texas Instruments). За схемата са известни: $R_1 = R_2 = 25k\Omega$, $R_3 = 1k\Omega$, $R_4 = 15{,}7k\Omega$, $V_{ref} = 2{,}5V$, $U_T = 26mV$ и $T_1 \equiv T_2$ ($I_{ES1} = I_{ES2}$).

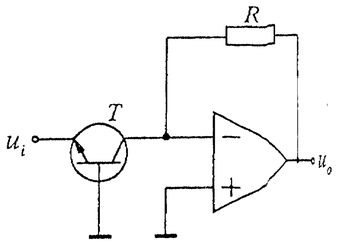
а) Да се изведе в общ вид формулата за предавателната функция на схемата $u_o = f(u_i, V_{ref})$.



Фиг. 5.13.

б) Да се изчисли изходното напрежение u_o, ако входното напрежение е $u_i = 25mV$.

5.14. За схемата от фиг. 5.14 се знае, че $R = 1k\Omega$, $U_T = 26mV$, $I_{ES} = 10fA$ (2N3904) и ОУ с параметри $U_{io} = 5mV$, $I_{iB} = 20nA$, $I_{io} = 2nA$ и $U_{om}^+ = 12V$. Да се определи:



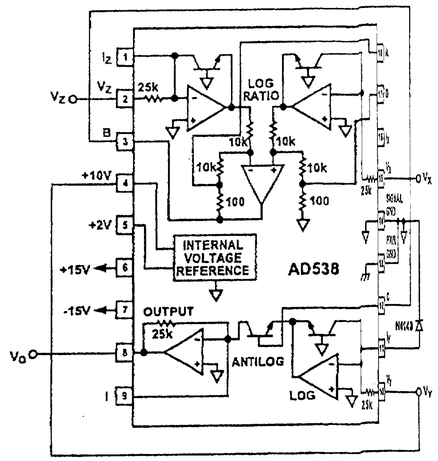
Фиг. 5.14.

а) в общ вид предавателната функция на схемата $u_o = f(u_i)$;

б) напрежението в изхода U_o, ако се знае, че на входа е подадено постоянно напрежение $U_i = -0{,}5$, $-0{,}7$ и $-0{,}75V$;

в) напрежението в изхода U_o, ако $U_i = +0{,}5V$.

5.15. Да се начертае схемата на термокомпенсиран антилогаритматор и да се изведе в общ вид предавателната функция по напрежение. Как може да се осъществи температурната компенсация на изходното напрежение?



Фиг. 5.15.

5.16. Електронната схема от фиг. 5.15 е реализирана с ИС на многофункционално устройство AD538, предназначена за изпълнение на математически операции. Да се определи:

а) в общ вид предавателната функция на схемата $V_o = f(V_x, V_y, V_z)$;

б) изходното напрежение V_o, ако се знае, че $V_x = 2V$ и $V_z = 1V$;

в) типът на операционната схема, която конфигурацията от фиг. 5.15 реализира.

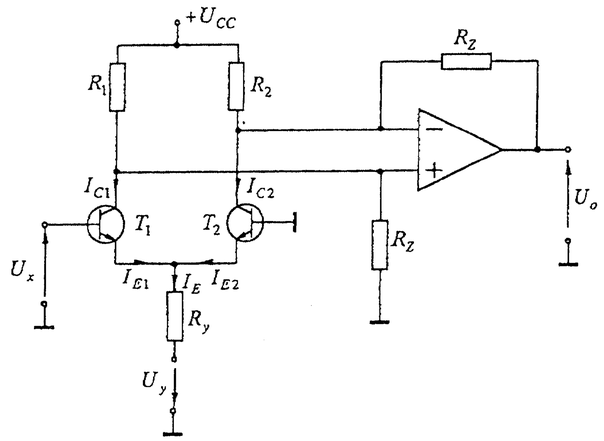
5.4. Аналогови умножители

За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 1.8 от [6].

Задачи

5.17. На фиг. 5.16 е дадена схема на аналогов умножител с променлива стръмност на транзисторите T_1 и T_2. За схемата са известни: $R_1 = R_2 = R$,

$|U_x| << U_T$, $|U_y| >> U_{BE}$, $T_1 \equiv T_2$ ($I_{ES1} = I_{ES2}$), $I_{C1} \approx I_{E1}$ и $I_{C2} \approx I_{E2}$. Да се изведе формулата за предавателната функция на схемата $U_o = f(U_x, U_y)$. При анализа на схемата да се използва формулата $\tanh(x) = \frac{e^{2x}-1}{e^{2x}+1}$, където x е произволна променлива. Каква трябва да бъде полярността на напрежението U_y за нормалната работа на умножителя?



Фиг. 5.16.

5.18. Да се начертае електронна схема за повдигане на квадрат (квадратор) с аналогов умножител (АУ) и да се изведе в общ вид предавателната функция по напрежение. Да се определят формата, амплитудата и честотата на изходното напрежение, ако е известно, че на входа на схемата е подаден синусоидален сигнал с амплитуда $1V$ и честота $10kHz$, а мащабният коефициент на АУ е $k = 0{,}1V^{-1}$.

Да се начертаят времедиаграмите на входното и на изходното напрежение.

5.19. Да се начертае електронна схема за делене на напрежения (U_x и U_y) с АУ и един ОУ, за която U_x се подава на $+in$ на ОУ. Да се изведе в общ вид предавателната функция по напрежение. Каква трябва да бъде полярността на напреженията U_x и U_y за нормалната работа на схемата?

5.20. Да се начертае електронна схема за извличане на квадратен корен с АУ и един ОУ, за която входното напрежение U_i се подава директно на $+in$ на ОУ. Да се изведе в общ вид предавателната функция по напрежение. Каква трябва да бъде полярността на напрежението U_i за нормалната работа на схемата?

5.5. Аналогови компаратори

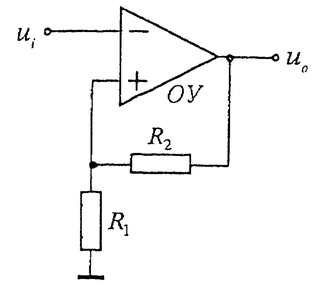
За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 1.9 от [6].

Задачи

5.21. За схемата на аналогов компаратор с ПОВ (тригер на Шмит), показана на фиг. 5.17, са известни $R_1 = R_2 = 10k\Omega$ и максимално/минимално изходно напрежение на ОУ $U^+_{om} = -U^-_{om} = 10V$.

а) Да се изчислят за тригера високият и ниският праг на превключване (U^+_p и U^-_p), както и да се начертае статичната му предавателна характеристика $u_o = f(u_i)$;

б) Да се начертаят времедиаграмите на входния и на изходния сигнал, ако е известно, че на входа се подава периодичен симетричен сигнал с триъгълна форма, с амплитуда $7{,}5V$ и честота $1kHz$.

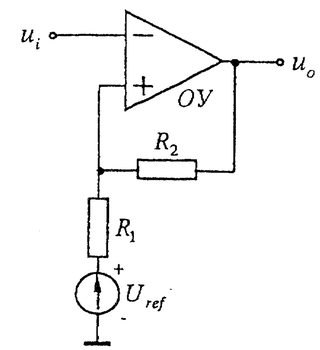


Фиг. 5.17.

5.22. За схемата на аналогов компаратор с ПОВ (тригер на Шмит), показана на фиг. 5.18, са известни: $R_1 = R_2 = 10k\Omega$, допълнително опорно напрежение $U_{ref} = 1V$ и максимално/минимално изходно напрежение на ОУ $U^+_{om} = -U^-_{om} = 5V$.

а) Да се изчислят за тригера високият и ниският праг (U^+_p и U^-_p), както и да се начертае статичната му предавателна характеристика $u_o = f(u_i)$;

б) Да се начертаят времедиаграмите на входния и на изходния сигнал, ако е известно, че на входа се подава периодичен симетричен сигнал с триъгълна форма, с амплитуда $4V$ и честота $1kHz$.

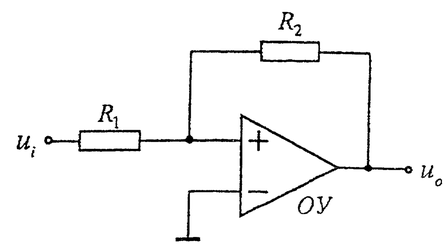


Фиг. 5.18.

5.23. За схемата на аналогов компаратор с ПОВ (тригер на Шмит), показана на фиг. 5.19, са известни: $R_1 = 10k\Omega$, $R_2 = 30k\Omega$ и максимално/минимално изходно напрежение на ОУ $U^+_{om} = -U^-_{om} = 12V$.

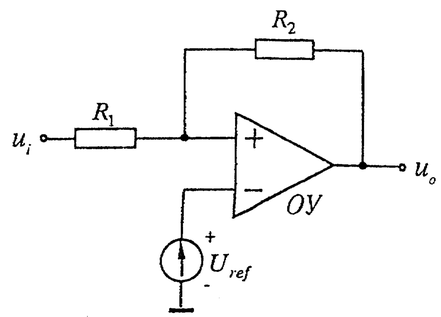
а) Да се изчислят за тригера високият и ниският праг на превключване (U^+_p и U^-_p), както и да се начертае статичната му предавателна характеристика $u_o = f(u_i)$;

б) Да се начертаят времедиаграмите на входния и на изходния сигнал, ако е известно, че на входа се подава периодичен симетричен сигнал с триъгълна форма, с амплитуда $8V$ и честота $1kHz$.



Фиг. 5.19.

5.24. За тригера на Шмит, показан на фиг. 5.20, са известни: $R_1 = 10k\Omega$, $R_2 = 100k\Omega$, $U_{ref} = 1V$ и $U^+_{om} = -U^-_{om} = 10V$. Да се изчислят за тригера високият и ниският праг (U^+_p и U^-_p), както и да се начертае статичната му предавателна характеристика $u_o = f(u_i)$.



Фиг. 5.20.

6 Преобразуватели на ток в напрежение, на напрежение в ток и на ток в ток

Образователни цели

Тази глава ще насочи вниманието на студентите към решаване на задачи за анализ и проектиране на преобразуватели на ток в напрежение, напрежение в ток и ток в ток. Преобразуване на ток в напрежение се осъществява например във фотодиодните схеми за измерване на светлинен поток (или ниво на осветеност), в схемите за измерване на постоянен ток (амперметри), в РН – метрите, в ЦАП с токов изход, детекторите на дим и др. Преобразувателите на напрежение в ток намират приложение в схеми за управление на електромагнитни релета, електрически двигатели, галванични вани за метализация и др. Също така управляеми източници на ток се използват в измервателната техника за тестване на диоди, транзистори, резистори и др.

Вникването в принципите на действие и методите за оразмеряване на най-важните представители на преобразувателите на ток в напрежение и напрежение в ток ще позволи на бъдещия специалист да се ориентира в проблемите, свързани с приложението на тези електронни схеми в практиката.

Ключови думи: източник на напрежение, управляван с ток, източник на ток, управляван с напрежение, и източник на ток, управляван с ток.

6.1. Източници на напрежение, управлявани с ток (преобразуватели на ток в напрежение)

За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 2.1 от [6].

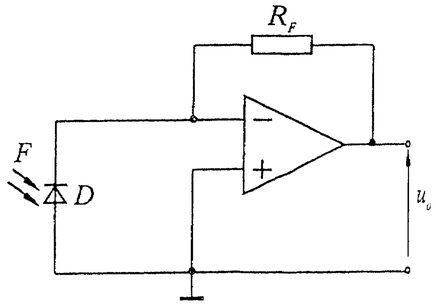
Пример

6.1. За схемата на преобразувател на ток в напрежение, показана на фиг. 6.1, са известни:

– фотодиод с параметри: ток на тъмно $I_S = 10nA$, коефициент на чувствителност $k_\Phi = 0{,}5A/W$, $U_T = 26mV$ и $m = 1{,}92$, като $i = I_S\left(e^{\frac{u_D}{mU_T}} - 1\right) - k_\Phi.F$, където F е светлинният поток;

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

Да се изчисли:



Фиг. 6.1.

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

б) диференциалното съпротивление R_G на фотодиода за $U_D = 0V$;

в) входното и изходното съпротивление на схемата;

г) изходното напрежение 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 $f_1 = 0{,}001Hz$ до $f_2 = 10Hz$;

е) минималният светлинен поток ($F_{\min}$), който може да се регистрира като изходно напрежение $u_{o\min} \geq \overline{U}_{oN,tot}$. 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 $u_o = i_F.R_F \approx k_\Phi.F.R_F$, където фототокът $i_F \approx k_\Phi.F$, тогава $R_F = \dfrac{u_o}{k_\Phi.F} \approx \dfrac{1V.W}{1\mu W.0{,}5A} = 2M\Omega$.

б) В общ вид формулата за тока през диода е

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

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

в) $R_{iA} \approx \dfrac{R_F}{1 + A_d} \overset{A_d >> 1}{\approx} \dfrac{R_F}{A_d} = \dfrac{2M\Omega}{10^6} = 2\Omega$ (ефект на Милер) и

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

г) $U_{o,err} \approx \left(1 + \dfrac{R_F}{R_G}\right).\left[U_{io} - I_B^-(R_G \| R_F)\right] \rightarrow$

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

д) изходното напрежение на грешката е $\overline{U}'_{o,err} \approx \left(1 + \dfrac{R_F}{R_G}\right).\overline{U}_N$, където $\overline{U}_N$ е шумовото напрежение на ОУ.

$$\overline{U}_N = \sqrt{\int_{0,001Hz}^{10Hz} \frac{\overline{S}_{Uo}^2}{\Delta f}.df} = \sqrt{\int_{0,001Hz}^{10Hz} \frac{5,69.10^{-15}V^2}{f}.df} = \sqrt{5,69.10^{-15}.\ln\frac{10}{0,001}V^2} \approx 229nV.$$

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

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 $T = 300K$:

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

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

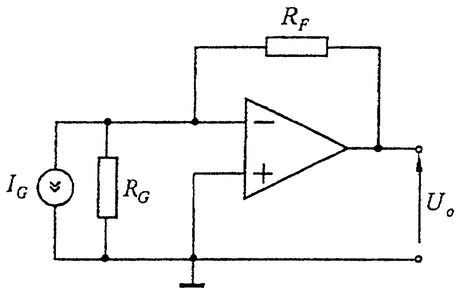
$$U_{oN,tot} = \sqrt{0,32^2 + \left(\frac{R_F}{R_G}.0,9\right)^2 + 0,57^2}\ \mu V \approx 0,74\mu V \rightarrow F_{min} \approx \frac{0,74\mu V}{1V/\mu W} = 0,74.10^{-12}W.$$

Задачи

6.2. За схемата на преобразувател на ток в напрежение от фиг. 6.2 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. 6.2.

6.3. На фиг. 6.3 е показана схема на преобразувател на ток в напрежение с допълнителен делител $R_1 - R_2$. За схемата е известно:

– ОУ тип OP-177A с параметри: $U_{io} = 4\mu V$, $I_{iB} = 1,5nA$ и $I_{io} = 0,3nA$;

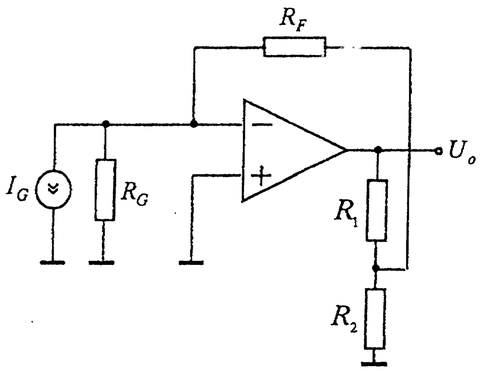
– резистори със съпротивления: $R_F = 1M\Omega$, $R_1 = 9k\Omega$ и $R_2 = 1k\Omega$.

Да се определи следното:

а) в общ вид предавателната функция на схемата;

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

в) изходното напрежение на грешката $U_{o,err}$, ако вътрешното съпротивление на източника на сигнал е $R_G = 10^9\Omega$.



Фиг. 6.3.

6.2. Източници на ток, управлявани с напрежение (преобразуватели на напрежение в ток) и източници на ток, управлявани с ток (преобразуватели на ток в ток)

За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 2.2 и 2.3 от [6].

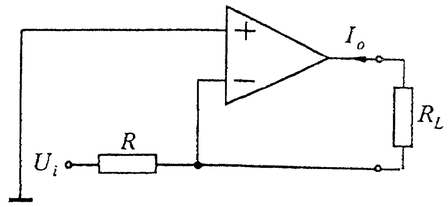
Задачи

6.4. За схемата на преобразувател на напрежение в ток, показана на фиг. 6.4 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 $I_{o,err}$.



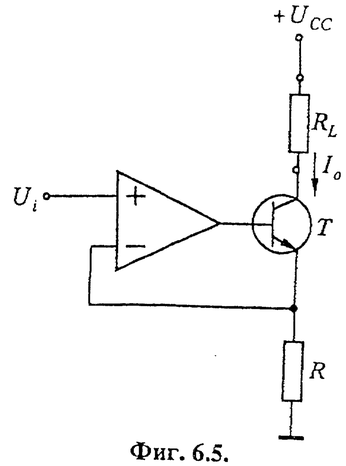
Фиг. 6.4.

6.5. На фиг. 6.5 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 усилване по ток на транзистора $\beta = 100$, да се определят:

а) в общ вид предавателната функция $I_o = f(U_i)$;

б) изходният ток I_o за $U_i = 0V$, $2V$ и $5V$;

в) граничните стойности на R_L, за които токът I_o не се променя, при $U_i = 1V$ и $2V$ (приема се $U_{CEsat} \approx 0V$).

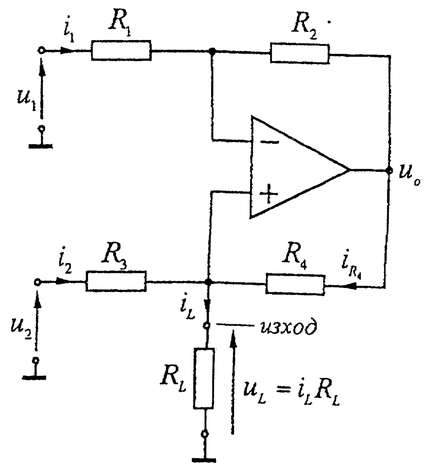


Фиг. 6.5.

6.6. За схемата на преобразувател напрежение – ток със заземен товар, показана на фиг. 6.6, са известни: $u_1 = 1V$, $u_2 = 0V$ и $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 1k\Omega$. Да се намерят:

а) в общ вид предавателната функция $i_L|_{u_2=0} = f(u_1)$ и условието, при което схемата реализира независим източник на ток.

б) стойностите на i_L, i_1, i_{R_4} и u_o за $R_L = 1k\Omega$ и $2k\Omega$.



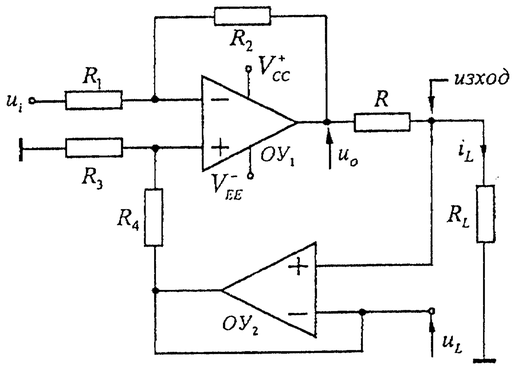
Фиг. 6.6.

6.7. За схемата на преобразувател напрежение – ток със заземен товар, показана на фиг. 6.6, са известни: $u_1 = 0V$, $u_2 = 1V$ и $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 1k\Omega$. Да се намери:

а) в общ вид предавателната функция $i_L\big|_{u_1=0} = f(u_2)$ и условието, при което схемата реализира независим източник на ток.

б) стойностите на i_L, i_2, i_{R_4} и u_o за $R_L = 1k\Omega$ и $2k\Omega$.

6.8. На фиг. 6.7 е показана схема на инвертиращ преобразувател напрежение – ток със заземен товар. Схемата е съставена от един ДУ с мощен ОУ PA09, един повторител на напрежение с ОУ 741C и допълнителен токозадаващ резистор R. За схемата са известни: максимален изходен ток $i_{L\max} = 250mA$ за $u_i = -10V$ и напрежение върху резистора R за максималния ток $u_o - u_L = 2{,}5V$. Да се определи:



Фиг. 6.7.

а) 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;

б) съпротивлението на резистора R за $i_{L\max} = 250mA$ и $u_o - u_L = 2{,}5V$;

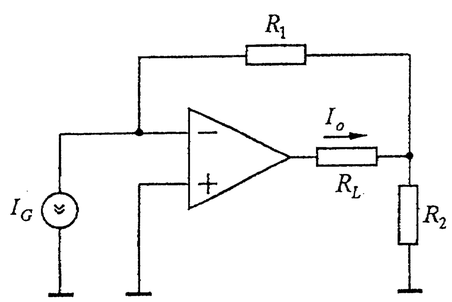
в) отношението на съпротивленията на резисторите R_2 / R_1;

г) разсейваната мощност в резистора R за $i_{L\max} = 250mA$;

д) граничната стойност на товарното съпротивление R_L, за която изходният ток $i_{L\max}$ остава непроменен, както и максималната консумирана мощност на $ОУ_1$ от захранващия източник, ако за $ОУ_1$ $V_{CC}^+ = -V_{EE}^- = 15V$ и $U_{om}^+ = -U_{om}^- = 12V$.

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

6.9. На фиг. 6.8 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:



Фиг. 6.8.

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 $\delta_{I_{iB}} = \left(I_{iB}^- / I_G\right).100\%$, ако се знае, че $I_G = 1\mu A$.

7 Генератори на сигнали

Образователни цели

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

- Да обясняват за генератора на Майснер процеса на самовъзбуждане и достигане до установен (стационарен) режим.
- Да обясняват принципа на действие на основните триточкови LC генератори и да извеждат в общ вид формулите за амплитудното и фазовото условие за самовъзбуждане.
- Да обясняват принципа на действие на основните RC генератори и да извеждат в общ вид формулите за амплитудното и фазовото условие за самовъзбуждане.
- Да използват изразите за амплитудното и фазовото условие за самовъзбуждане на генератори при решаване на конкретни практически задачи.
- Да описват структурата и да изчисляват основните динамични параметри на функционалните RC генератори.

Ключови думи: генератор на Майснер, условия за самовъзбуждане, установен режим, триточков генератор, кварцов генератор, RC генератор и функционален генератор.

7.1. LC генератор с трансформаторна обратна връзка (схема на Майснер). Триточкови LC генератори

За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 4.2 - 4.4 от [6].

Задачи

7.1. Начертайте принципната схема на генератор на Майснер с биполярен транзистор, свързан по схема ОЕ и изведете в общ вид формулите за амплитудното и фазовото условие за самовъзбуждане. Обяснете принципа на действие на схемата от момента на включване на захранващото напрежение до момента на установяване на генерации в изхода с постоянна амплитуда и честота.

7.2. Да се начертае обобщена триточкова схема на LC генератор, използвайки импеданси Z_1, Z_2 и Z_3.

а) При какви условия от обобщената схема се получава генератор на Хартли?

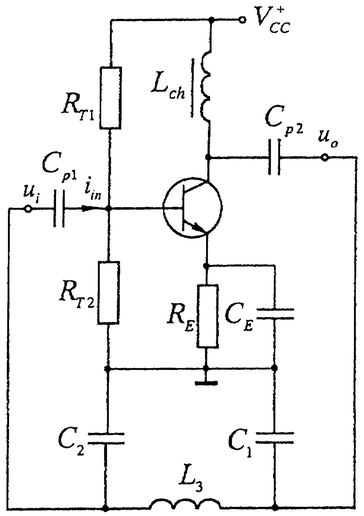
б) Да се намери формулата за честота, при която схемата ще започне да ге-

нерира трептения.

7.3. За LC генератора на Колпитц, показан на фиг. 7.1, са известни: $V_{CC}^{+}=15V$, $R_{T2}=27k\Omega$, $I_C=2mA$, $U_{CE}=6V$, $I_B=10\mu A$, $U_{BE}=0{,}575V$, $\omega_o C_{p1}, \omega_o C_{p2}, \omega_o C_E \to \infty$, съпротивлението на блокиращата бобина по променлив ток е $\omega_o L_{ch} \to \infty$ и качественият фактор на LC кръга е $Q_e >> 1$. Да се изчислят:

а) съпротивленията на резисторите R_E и R_{T1};

б) входното съпротивление R_{iA} и максималният коефициент на усилване по напрежение $A_{U\,max}=u_o/u_i$ на усилвателната част, ако се знае, че параметрите на транзистора в установен режим на работа на генератора са: $h_{11e}=r_{BE}=2{,}5k\Omega$, $h_{21e}=\beta=100$, $h_{12e}=0$ и $h_{22e}=0$.



Фиг. 7.1.

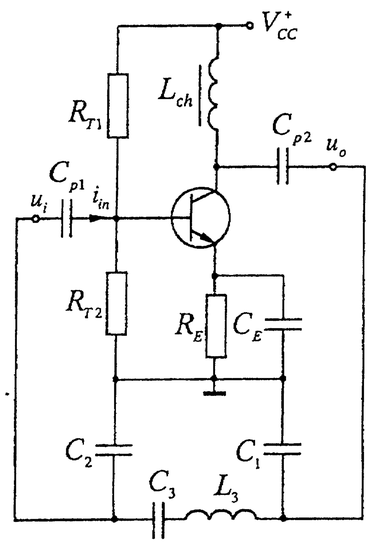
в) капацитетите на кондензаторите C_1 и C_2, ако се знае, че честотата на генерираните трептения е $f_o=50kHz$ и индуктивността на бобината $L_3=10mH$.

7.4. На фиг. 7.2 е дадена схема на LC генератор на Клап с транзистор, свързан по схема общ емитер. За схемата са известни: $V_{CC}^{+}=15V$, $R_{T2}=27k\Omega$, $I_C=2mA$, $U_{CE}=6V$, $I_B=10\mu A$, $U_{BE}=0{,}575V$, $\omega_o C_{p1}, \omega_o C_{p2}, \omega_o C_E \to \infty$ и съпротивление на блокиращата бобина по променлив ток $\omega_o L_{ch} \to \infty$. Да се изчислят:

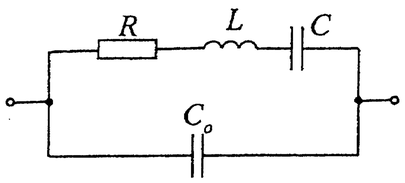
а) съпротивленията на резисторите R_E и R_{T1};

б) входното съпротивление R_{iA} и максималният коефициент на усилване по напрежение $A_{U\,max}=u_o/u_i$ на усилвателната част, ако се знае, че параметрите на транзистора в установен режим на работа на генератора са: $h_{11e}=r_{BE}=2{,}5k\Omega$, $h_{21e}=\beta=100$, $h_{12e}=0$ и $h_{22e}=0$.

в) капацитетите на кондензаторите C_1 и C_2 ако се знае, че честотата на генерираните трептения е $f_o=150kHz$, $L_3=1mH$ и $C_3=10nF$.



Фиг. 7.2.



Фиг. 7.3.

7.5. Типичните стойности на параметрите на заместващата еквивалентна схема (фиг. 7.3) на един кварцов резонатор за $1MHz$ са:

$L=100mH$, $R=60\Omega$, $C=0{,}25pF$ и $C_o=5pF$.

а) Да се намери в общ вид пълното съпротивление на резонатора за $R \to 0$.

б) Да се изчисли характеристичното съпротивление ρ, еквивалентният качествен фактор Q, както и да се намерят честотите на серийния (последователния) и на паралелния резонанс (f_S и f_P).

7.6. Да се начертае принципна схема на генератор на Пирс с биполярен транзистор, свързан по схема ОЕ, и кварцов резонатор в ПОВ.

а) Да се анализира схемата на генератора и да се изведат в общ вид формулите за амплитудното и фазовото условие за самовъзбуждане.

б) Да се намери формулата за честота, при която схемата ще започне да генерира хармонично трептение.

7.2. RC генератори. Функционални генератори

За успешното решаване на задачите от тази тема се насочете към т. 4.5 и 4.6 от [6].

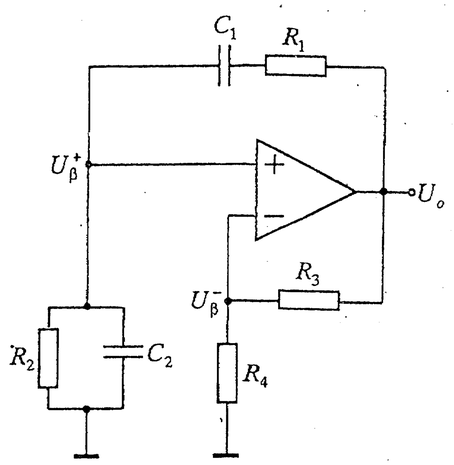
Задачи

7.7. На фиг. 7.4 е дадена схема на нискочестотен RC генератор с мост на Вин – Робинзон.

а) Да се анализира схемата на генератора и да се определят условията на самовъзбуждане.

б) Да се определят модулът (АЧХ) и фазата (ФЧХ) на коефициента на честотно зависимата ОВ $\dot{\beta}^{+}=\dot{U}_{\beta}^{+}/\dot{U}_o$ (чрез формули и графики) за $R_1=R_2=R$ и $C_1=C_2=C$.

в) Да се изчисли честотата на генерираното трептение f_o, коефициентът $|\dot{\beta}_o^{+}|$ за тази честота и необходимият минимален коефициент на усилване $A_{U\,min}=U_o/U_{\beta}^{-}$ за следните стойности на параметрите: $R=15{,}9k\Omega$ и $C=100pF$.



Фиг. 7.4.

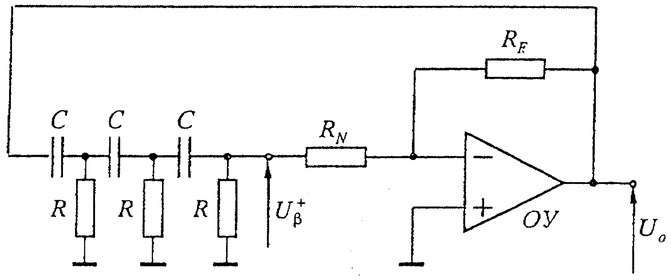
7.8. На фиг. 7.5 е дадена схема на RC генератор с високочестотна избирателна верига, съставена от три еднакви резистора R и три еднакви кондензатора C.

а) Да се изведе в общ вид формулата за коефициента на предаване по напрежение на веригата на ОВ $\dot{\beta}=\dot{U}_{\beta}^{+}/\dot{U}_o$ за $R_N >> R$.

б) Да се изчисли съпротивлението на резисторите R, ако всеки от конденза-

торите C е с капацитет $10nF$, така че честотата на генерираното трептение да е $f_o = 64kHz$.

в) Прието е, че ОУ е идеален ($A_d \to \infty$, $R_{id} \to \infty$ и $R_o = 0$). Как трябва да се оразмери съпротивлението на резистора R_F, така че да се изпълни условието за самовъзбуждане, ако е избрано $R_N = 100R$?

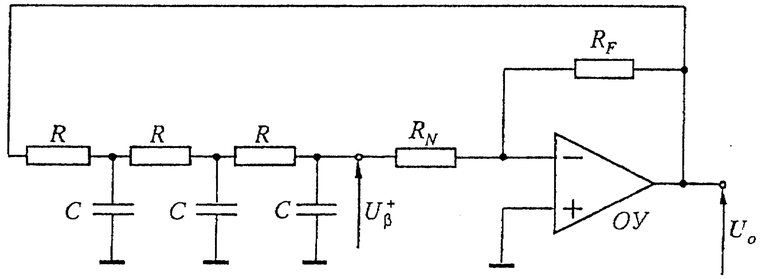


Фиг. 7.5.

7.9. На фиг. 7.6 е дадена схема на RC генератор с нискочестотна избирателна верига, съставена от три еднакви резистора R и три еднакви кондензатора C.

а) Да се изведе в общ вид формулата за коефициента на предаване по напрежение на веригата на ОВ $\dot{\beta} = \dot{U}_\beta^+ / \dot{U}_o$ за $R_N >> R$.

б) Да се изчисли съпротивлението на резисторите R, ако всеки от кондензаторите C е с капацитет $10nF$, така че честотата на генерираното трептение да е $f_o = 100kHz$.



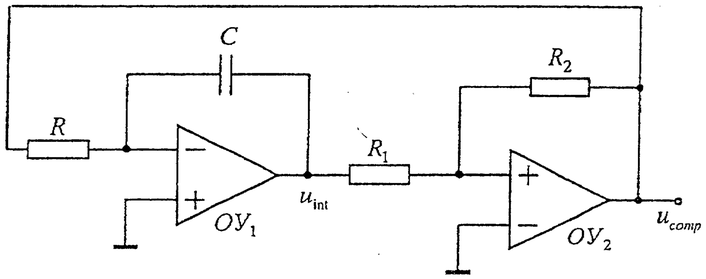
Фиг. 7.6.

в) Прието е, че ОУ е идеален. Как трябва да се оразмери съпротивлението на резистора R_F, така че да се изпълни условието за самовъзбуждане, ако е избрано $R_N = 100R$?

7.10. На фиг. 7.7 е представена схема на функционален генератор, съставен от интегратор и компаратор, обхванати от обща обратна връзка.

а) Да се анализира схемата и да се изведе в общ вид формулата за честотата f_o на генерираните трептения.

б) Да се определи честотата f_o, амплитудата на напрежението в изхода на интегратора u_{int} и амплитудата в изхода на компаратора u_{comp} за следните стойности на параметрите: $R = 100k\Omega$, $C = 10nF$, $R_1 = 10k\Omega$, $R_2 = 100k\Omega$ и максимално/минимално изходно напрежение на $ОУ_2$ $U_{om}^+ = -U_{om}^- = 11V$.



Фиг. 7.7.

Отговори на задачите

Глава 1.

Тема 1.1.

1.4. а) $R_C = 495\Omega$; б) $R_B = 43k\Omega$. Чрез резистора R_B е въведена паралелна ООВ по напрежение.

1.5. $R_1 = 57{,}5k\Omega$, $R_2 = 84{,}1k\Omega$ и $R_C = 0{,}95k\Omega$.

1.6. а) $R_3 = 1k\Omega$ и $R_4 = 198\Omega$; б) $R_1 = 15{,}1k\Omega$ и $R_2 = 3{,}4k\Omega$.

1.7. а) $R_1 \approx 73{,}5k\Omega$ и $R_2 \approx 19{,}2k\Omega$; б) $S = 19{,}2mS$.

1.8. $R_1 = 41{,}2k\Omega$ и $R_2 = 57{,}3k\Omega$ ($U_B = 5{,}6V$, $U_B' = 5{,}7V$).

1.9. $I_{C1} = 2{,}99mA$ и $R_B \approx 147k\Omega$.

1.10. $R_E = 0{,}99k\Omega$, $R_C = 1{,}98k\Omega$, $U_{0B} = 5V$ и $R_2 = 5{,}82k\Omega$.

1.11. а) $U_{GS} = 0V$, $R_D \approx 1{,}2k\Omega$ и $R_S \approx 984\Omega$; б) $R_1 = 1{,}67M\Omega$ и $R_2 = 2{,}5M\Omega$.

Тема 1.2.

1.15. а) $r_{BE} = 2{,}6k\Omega$ и $S \approx 38{,}5mS$; б) $R_{iA} = r_{BE} \parallel R_B' = 1{,}5k\Omega$ ($R_B' = R_B/(1 - A_U) = 3{,}7k\Omega$) и $f_{bi} = 64Hz$ за $C = 1\mu F$ и $M_b = 3dB$; в) $A_U \approx -150$ и $A \approx -90$.

1.16. а) $R_C = 5{,}2k\Omega$, $R_{E1} = 520\Omega$ и $R_{E2} = 4{,}68k\Omega$; б) $R_1 = 121k\Omega$ и $R_2 = 59k\Omega$.

1.17. а) $U_{1'} = 0{,}9V$ и $U_C = 5{,}08V$; б) $A_U \approx -5{,}6$ и $A \approx -5$; в) $U_{om}^+ = 1{,}9V$ и $U_{om}^- = 3{,}25V$.

1.18. а) $R_1 = 34k\Omega$ и $R_2 = 62{,}5k\Omega$; б) $R_{iA} = 21k\Omega$ и $A_{in} \approx 0{,}8$; в) $A \approx 0{,}79$.

1.19. а) $A_U = 200$; б) $A_I = -0{,}5$.

1.20. а) $R_{iA} \approx 383k\Omega$ и $R_{oA} \approx 262\Omega$; б) $A_U \approx 0{,}9$ и $A \approx 0{,}89$; в) $f_{hi} \approx 19MHz$ и $f_{ho} \approx 12MHz$.

1.21. а) $R_S = 800\Omega$ и $R_D = 4k\Omega$; б) $R_{iA} \approx 267\Omega$ и $R_{oA} \approx 3{,}7k\Omega$; в) $A_U \approx 9{,}3$ и $A \approx 7{,}8$; г) $f_{ho} \approx 8MHz$.

1.22. а) $A = A_1.A_2 = 1638$ ($A_1 \approx -42$ – първо стъпало и $A_2 \approx -39$ – второ стъпало); б) $R_{iA} \approx 1{,}4k\Omega$ и $R_{oA} \approx 800\Omega$.

1.23. б) $A_{F(-)} = A/(1 + \beta A)$, $R_{iA} = R_i(1 + \beta A)$ и $R_{oA} = R_o/(1 + \beta A)$; в) $A_{F(-)} \approx 10V/V$, $R_{iA} \approx 1M\Omega$ и $R_{oA} \approx 50\Omega$.

1.24. б) $A_{F(-)} = A/(1 + \beta A)$, $R_{iA} = R_i(1 + \beta A)$ и $R_{oA} = R_o(1 + \beta A)$; в) $A_{F(-)} \approx 1mA/V$, $R_{iA} \approx 40k\Omega$ и $R_{oA} \approx 60k\Omega$.

1.25. а) $R_k \approx 81k\Omega$ ($82k\Omega$ стойност – E24) и $R_{C1} \approx 8k\Omega$ ($8{,}2k\Omega$ стойност – E24) чрез резистора R_k е въведена паралелна ООВ по постоянен ток; б) $R_{iA} = r_{BE} \parallel R_k \approx 6{,}5k\Omega$ и $R_{oA} \approx R_{C2} = 820\Omega$; в) $A_U \approx 1200$ и $A \approx 1040$.

1.26. $R_{iA} = 0{,}99k\Omega$ и $A = -45{,}8$.

Глава 2.

Тема 2.1.

2.2. а) $R_E = 13k\Omega$, $R_1 = 6{,}4k\Omega$ и $R_2 = 13{,}6k\Omega$; б) $R_{oA} \approx 30M\Omega$.

2.3. $I_0 = 100\mu A$ и $I_1 = 120\mu A$.

2.4. $R_V = 7{,}8k\Omega$ и $I_1 = 625\mu A$.

2.5. $U_{ref} \approx 1{,}8V$.

2.6. а) $R_2 \approx 3k\Omega$; б) $R_1 = 772\Omega$; в) $R_{oA} \approx R_2/\beta = 30\Omega$.

Тема 2.2.

2.9. $\beta \approx \beta_1\beta_2$, $R_{iA}^{(C)} \approx 2r_{BE1} = 2\beta_1 r_{BE2}$, $S_C = S_2/2$ и $R_{oA}^{(C)} \overset{\substack{\beta_2 >> 1 \\ r_{CE1} >> r_{BE2}}}{\approx} \dfrac{r_{CE1}}{\beta_2} \| r_{CE2}$.

2.10. $\beta \approx \beta_1\beta_2$, $R_{iA}^{(C)} \approx r_{BE1}$, $S_C = S_2$ и $R_{oA} \overset{\substack{\beta_2 >> 1 \\ r_{CE1} >> r_{BE1}}}{\approx} \dfrac{r_{CE1}}{\beta_2} \| r_{CE2}$.

2.11. а) $I_C = 60mA$, $\beta \approx 2000$, $I_{B1} = 30\mu A$, $I_{C1} = 3mA$, $I_{C2} = I_C - I_{C1} = 57mA$ и $S_C = S_2/2 \approx 1000mS$; б) $R_B \approx 187k\Omega$; в) $A_U \approx -50$ и $U_{om}^- = -3{,}7V$.

2.12. Параметри на схема ОЕ с динамичен товар:
$A_U \approx -S_1\{r_{CE1} \| [r_{CE2}(1 + S_2R_{E2})] \| R_L\}$, $R_{iA} = R_1 \| R_2 \| r_{BE1}$,

$C_{iA} = C_{B'E1} + C_{B'C1}(1 - A_U)$, $R_{oA} = r_{CE1} \| [r_{CE2}(1 + S_2R_{E2})]$ и $C_{oA} = C_{B'C1}\left(1 - \dfrac{1}{A_U}\right)$.

2.13. Параметри на каскода ОК – ОБ: $A_U = \dfrac{1}{2}S_2(R_C \| r_{CE2} \| R_L)$,

$R_{iA} \approx R_1 \| R_2 \| \left[r_{BE1} + (1 + \beta_1)\dfrac{1}{S_2}\right]$, $C_{iA} = C_{B'C} + (1 - A_{U1})C_{B'E}$, $A_{U1} = 0{,}5$, $R_{oA} \approx R_C \| r_{CE2}$ и $C_{oA} = C_{B'C}$.

2.14. а) $U_{E1} \approx 6{,}85V$, $I_{C1} = 162{,}5\mu A$ и $I_{C2} = 3{,}26mA$; б) $A_U \approx 1$ и $R_{oA} \approx 0{,}64\Omega$.

2.15. $A_U \approx 1$.

2.16. а) $R_o = 14{,}3k\Omega$, $I_{E1,2} = 500\mu A$, $I_{C1,2} = 495\mu A$, $I_{B1,2} = 4{,}95\mu A$ и $U_{CE1,2} = 8{,}27V$; б) $r_{BE1,2} = 5{,}25k\Omega$ и $S_{1,2} = 19mS$; в) $A_d = 285$, $A_{CM} = 0{,}524$ и $CMRR = 543$ ($54{,}7dB$).

2.17. а) $R_C = 12k\Omega$ и $R_V = 17k\Omega$; б) $R_{id} \approx 9{,}6k\Omega$ и $R_{od} \approx 12k\Omega$; в) $A_d = -100$, $A_{CM} = -0{,}2$.

2.18. а) $I_o \approx 1{,}08mA$ и $R_V \approx 10{,}6k\Omega$; б) $R_{id} \approx 5{,}6k\Omega$; в) $A_{U1} \approx -43$ и $A_{U2} \approx 43$.

2.19. $A_d \approx S_2[r_{CE2} \| (1 + S_4R_{E4})r_{CE4} \| R_L]$, $A_{CM} \approx \dfrac{S_2[r_{CE2} \| (1 + S_4R_{E4})r_{CE4} \| R_L]}{2[1 + S_2(1 + S_5R_{E5})r_{CE5}]}$,

$CMRR \approx 2S_2(1 + S_5R_{E5})r_{CE5}$, $R_{id} = 2.r_{BE1}$ и $R_o = r_{CE2} \| (1 + S_4R_{E4})r_{CE4}$.

Тема 2.3.

2.21. $U_{cm1} = 15{,}5V$, $I_{cm1} \approx 3{,}9A$, $V_{CC} = U_{cm} + U_{CEsat} = 17V$ и $P_{C\max} \approx 7{,}2W$.

2.22. $P_{C\max} \approx 4W$ и $P_{CC} \approx 26W$.

2.23. а) $U_{ref} = U_{BT_{19}} - U_{BT_{20}} \approx 1{,}12V$. Транзисторите T_{19} и T_{20} работят в клас АВ на усилване; б) $I_{ET_{19},\max} = \dfrac{U_{BE}}{R_{10}} \approx 28mA$ и $I_{ET_{20},\max} = \dfrac{-2.U_{BE}}{R_{11}} \approx -28mA$ за $U_{BE} \approx 0{,}7V$.

Глава 3.

Тема 3.1.

3.3. а) $R_{iA} = 1k\Omega$; б) $A_U = -10$; в) $R_{oA} \approx 0{,}01\Omega$.

3.4. а) $R_{iA} \approx 10M\Omega$; б) $A_U = 200$; в) $R_{oA} \approx 0{,}2\Omega$.

3.5.

– За схемата от фиг. 3.8а: а) $A_U = 1$; б) $R_{iA} \approx 5000M\Omega$ и $R_{oA} \approx 0{,}1m\Omega$; в) $f_{\max} \approx 24kHz$.

– За схемата от фиг. 3.8б: а) $A_U = -1$; б) $R_{iA} = 10k\Omega$ и $R_{oA} \approx 0{,}2m\Omega$; в) $f_{\max} \approx 24kHz$.

3.6. б) $u_o = -\dfrac{R_F}{R_1}.u_i + U_{o,err}$, където $-235mV < U_{o,err} < 175mV$, $R_F = 100k\Omega$ и $R_1 = 1k\Omega$; в) Компенсация на входния поляризиращ ток I_B^- може да се постигне, ако последователно на $+in$ на ОУ се включи резистор $R' = R_1 \| R_F \approx 1k\Omega$. Също така за намаляване на $U_{o,err}$ в ОУ 741С са предвидени допълнителни изводи 1, 5 и 4 (фиг. 3.9), към които се включва потенциометър $10k\Omega$; г) $|U_{o,err}| \le 20mV$.

3.7. $\dfrac{\Delta\beta}{\beta} \approx 2\%$.

3.8. а) $U_{o,err} \approx \pm 7mV$; б) $\dot{A}_U \approx \dfrac{R_p}{R_p + \dfrac{1}{j\omega C_1}}.\left(1 + \dfrac{R_F}{R_N + \dfrac{1}{j\omega C_N}}\right) = \left(1 + \dfrac{R_F}{R_N}\right).\dfrac{1}{1 - j\dfrac{f_{b,07}}{f}}$

за $C_1R_p = C_N(R_N + R_F)$ и $f_{b,07} = \dfrac{1}{2\pi R_N C_N} \approx 32Hz$; в) $\dot{A}_U' = \dfrac{\dot{A}_d}{1 + \beta\dot{A}_d} \approx \left(1 + \dfrac{R_F}{R_N}\right).\dfrac{1}{1 + j\dfrac{f}{f_{h,07}}}$,

където $\beta = \dfrac{R_N}{R_N + R_F}$ и $f_{h,07} = f_p(1 + \beta A_{do}) \approx 10kHz$.

Тема 3.2.

3.11. а) $U_o = \dfrac{R_2}{R_1}(U_2 - U_1)$ за $\dfrac{R_2}{R_1} = \dfrac{R_4}{R_3}$; б) $R_1 = 100k\Omega$, $R_2 = 1M\Omega$, $R_3 = 9{,}09k\Omega$ и $R_4 = 90{,}9k\Omega$.

3.12. а) $u_o \approx u_{екв}.\left(-\dfrac{R_F}{R_{екв}}\right) \approx -V_{CC}\dfrac{x}{2}.\left(-\dfrac{R_F}{R_{екв}}\right) \approx 1000V.x$, където $u_{екв} \approx -V_{CC}\dfrac{x}{2}$ и $R_{екв} \approx R \| R_x \approx \dfrac{R}{2} = 500\Omega$;

б) $U_{o,err} \approx \Delta u_{екв}.\left(-\frac{R_F}{R_{екв}}\right) - \Delta U_{io}.\left(1+\frac{R_F}{R_{екв}}\right) + \frac{\Delta V_{CC}}{2}.\left(1+\frac{R_F}{R_{екв}}\right) \rightarrow |U_{o,err}| \approx 5{,}2mV + 1V.\frac{x}{2}$,

където $\Delta u_{екв} \approx \pm 5mV.\left(1-\frac{x}{2}\right)$ и $\Delta U_{io} \approx \pm 1\mu V$.

3.13. а) $u_o \approx \left(1+\frac{R_x}{R_1}\right).\frac{R_o}{R_o+R_1}V_{ref} - \frac{R_x}{R_1}V_{ref} = -V_{ref}\frac{R_o.x}{R_o+R_1} = -4{,}5V.x$;

б) $U_{o,err} \approx \left(1+\frac{R_x}{R_1}\right)\left[I_B^+(R_1 \| R_o) - I_B^-(R_1 \| R_x) - U_{io}\right]$, $|U_{o,err}| \approx 2mV$ при $x=1$ и $|U_{o,err}| \approx 1mV$ при $x=0$.

3.14. а) $A_U \approx 101$ и $CMRR_{IN-AMP} \approx 10^6$ $(120dB)$; б) $R_{iA} \approx 20M\Omega$ и $R_{oA} \approx 0{,}002\Omega$.

Тема 3.3.

3.16. $T_j = 115{,}7°C$.

3.17. $R_{thr-a} = 2{,}43°C/W$.

3.18. $P_{max} = 5{,}5W$ и $I_{C\,max} = P_{C\,max}/U_{CE} = 1{,}1A$.

Тема 3.4.

3.19. а) за положение 1 на ключа K: $A_U = 1$ и за положение 2: $A_U = 10$; б) за положение 1: $R_{iA} \approx 5000M\Omega$ и $R_{oA} \approx 0{,}01\Omega$ и за положение 2: $R_{iA} \approx 5000M\Omega$ и $R_{oA} \approx 0{,}1\Omega$; в) $f_{max} \approx 16kHz$.

3.20. а) за положение 1 на ключа K: $A_U = -1$ и за положение 2: $A_U = -10$; б) за положение 1: $R_{iA} = 10k\Omega$ и $R_{oA} \approx 0{,}02\Omega$ и $R_{iA} = 10k\Omega$ и за положение 2: $R_{oA} \approx 0{,}2\Omega$; в) $f_{max} \approx 16kHz$.

3.21. а) $u_o = m.(2x.u_2 - u_1)$; б) $-100 \le A_U \le 100$ за $0 \le x \le 1$.

Глава 4.

Тема 4.1.

4.2. За схемата на свързване от фиг. 4.3а: а) $\dot{A} \approx -\frac{A_o}{1+j\frac{f}{f_p}}$, $A_o = \frac{R_2}{R_1} = 10$ и

$f_p = \frac{1}{2\pi R_2 C} \approx 1{,}6kHz$; б) $|\dot{A}| = \frac{A_o}{\sqrt{1+(f/f_p)^2}}$ и $\varphi = 180° - \arctan\left(\frac{f}{f_p}\right)$; в) НЧФ;

За схемата на свързване от фиг. 4.3б: а) $\dot{A} \approx -\frac{A_o}{1-j(f_z/f)}$, $A_o = \frac{R_2}{R_1} = 10$ и

$f_z = \frac{1}{2\pi R_1 C} \approx 16kHz$; б) $|\dot{A}| = \frac{A_o}{\sqrt{1+(f_z/f)^2}}$ и $\varphi = 180° + \arctan\left(\frac{f_z}{f}\right)$; в) ВЧФ.

4.3. а) $A_U(p) = \frac{A_{Ui}}{p^2R^2C^2 + pRC(3-A_{Ui})+1}$;

б) $|A_U(j\omega)| = \frac{A_{Ui}}{\sqrt{\left[1-\left(\frac{f}{f_p}\right)^2\right]^2 + \left[(3-A_{Ui})\frac{f}{f_p}\right]^2}}$ и $\varphi(\omega) = -acr\tan\frac{(3-A_{Ui})\frac{f}{f_p}}{1-(f/f_p)^2}$, където

$f_p = \frac{1}{2\pi RC} = 10{,}26kHz$.

4.4. а) $A_U(p) = 1 + pRC$; б) $|A_U(j\omega)| = \sqrt{1+(\omega RC)^2}$ и $\varphi(\omega) = -acr\tan(\omega RC)$.

4.5. а) $A_U(p) = \frac{U_o(p)}{U_i(p)} = \frac{p^2\frac{1}{R_1R_2C_1C_2}}{p^2 + p\left(\frac{1}{R_1C_1}+\frac{1}{R_2C_1}\right) + \frac{1}{R_1R_2C_1C_2}} = \frac{p^2R^2C^2}{(pRC+1)^2}$ за

$R_1 = R_2 = R$ и $C_1 = C_2 = C$; б) $|A_U(j\omega)| = \frac{(f/f_z)^2}{1+(f/f_z)^2}$ и $\varphi(\omega) = acr\tan\frac{2f/f_z}{(f/f_z)^2-1}$,

където $f_z = 1/(2\pi RC) \approx 1{,}6kHz$; в) ВЧФ.

4.6. а) $A_U(p) = \frac{-2pR_1C}{2p^2R_1^2C^2 + 2pR_1C + 1}$ за $R_2 = 2R_1$ и $C_1 = C_2 = C$;

б) $|A_U(j\omega)| = \frac{2\omega R_1C}{\sqrt{\left[1-2(\omega R_1C)^2\right]^2 + (2\omega R_1C)^2}}$ и $\varphi(\omega) = \pi + \frac{\pi}{2} - acr\tan\frac{2\omega R_1C}{2(\omega R_1C)^2-1}$;

в) $f_o = \frac{1}{2\sqrt{2}\pi R_1C} \approx 5kHz$ и $|A_U(f_o)| = 1$; г) ЛФ.

Тема 4.2.

4.7. а) $Z_{in} = R_1 + j\omega R_1R_2C = R_e + j\omega L_e$, където $R_e = R_1$ и $L_e = R_1R_2C$; б) $R_e = 150\Omega$ и $L_e = 75mH$.

4.8. а) $A_{U1\max} = 1 + R_F/(R_1' + R_{e1})$ за $f_{o1} = 1/2\pi\sqrt{L_{e1}C_1}$; $A_{U2\max} = 1 + R_F/(R_2' + R_{e2})$ за $f_{o2} = 1/2\pi\sqrt{L_{e2}C_2}$; б) $A_{U1\max} \approx 21$ за $f_{o1} = 1kHz$ и $A_{U2\max} \approx 11$ за $f_{o2} = 10kHz$.

4.9. а) $Z_{in} = pC_4\frac{R_1R_3R_5}{R_2}$; б) $L_e = 235mH$.

4.10. $Z_{in} = -\frac{R_1}{R_2R_4\omega^2C^2}$ при $C_3 = C_5 = C$, честотно зависима отрицателна проводимост (Frequency – Dependent Negative Converter – FDNC).

Глава 5.

Тема 5.1.

5.1. а) $u_o = \frac{R_F'}{R_1}u_1 + \frac{R_F'}{R_2}u_2 - \frac{R_F}{R_3}u_3 = u_1 + 4.u_2 - 5.u_3$; б) $u_o = 4V$.

5.2. а) $u_o = \frac{R_2}{R_1}(u_2 - u_1) + V_{ref}$; б) $u_o = 400mV + 2{,}5V\big|_{ref}$.

5.3. а) $V_{out} = 1.(V_{+in} - V_{-in})$; б) $V_{out} = 1V$.

5.4. а) $u_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right).(u_2 - u_1) + V_{ref}$; б) $u_o = 1V + 2{,}5V\big|_{ref}$.

Тема 5.2.

5.5. $u_o = -0{,}5V$ за $t = 0{,}5ms$, $u_o = -0{,}5V$ за $t = 15ms$ и $u_o = 2{,}5V$ за $t = 30ms$; $\frac{du_o}{dt} = -0{,}1V/ms$ за $0 \le t < 5ms$, $\frac{du_o}{dt} = 0V/ms$ за $5 \le t \le 15ms$ и $\frac{du_o}{dt} = 0{,}2V/ms$ за $15ms < t \le 30ms$.

5.6. $u_o = -\frac{R_2}{R_1}\left(u_i + \frac{1}{R_2C_2}\int_0^t u_i dt\right) = -\frac{R_2}{R_1}U_i.\left(1 + \frac{t}{\tau_2}\right)$, където $\tau_2 = R_2C_2$ и $u_i = U_i$ за $t \ge 0$.

5.7. а) $\dot{A}_U \approx -\frac{A_o}{1 + j\frac{f}{f_p}}$, $A_o = \frac{R_k}{R} = 10$ и $f_p = 1/2\pi R_k C$; б) $|\dot{A}_U| = \frac{A_o}{\sqrt{1 + (f/f_p)^2}}$ и $\varphi = 180° - \arctan(f/f_p)$; в) за $C = 2{,}2nF$ $f_{p1} \approx 724Hz$, за $C = 4{,}7nF$ $f_{p2} \approx 340Hz$ и за $C = 10nF$ $f_{p3} \approx 160Hz$.

5.8. за $0 \le t < 0{,}8ms$, $u_i = a.t$, $a = \frac{du_i}{dt} = 2{,}5V/ms$ $\rightarrow$ $u_o = -\tau.a = -0{,}25V$ ($\tau = R.C = 0{,}1ms$); за $0{,}8ms \le t < 1{,}2ms$, $u_i = b.\left(t - \frac{T}{2}\right)$ (по условие $T = 2ms$), $b = \frac{du_i}{dt} = -10V/ms \rightarrow u_o = -\tau.b = 1V$; за $1{,}2ms \le t < 2{,}8ms$, $u_i = a.(t - T)$ $\rightarrow$ $u_o = -\tau.a = -0{,}25V$.

5.9. а) $\dot{A}_U \approx -\frac{A_o}{1 - j\frac{f_z}{f}}$, $A_o = \frac{R}{R_k} = 10$ и $f_z = 1/2\pi R_k C$; б) $|\dot{A}_U| = \frac{A_o}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_z}{f}\right)^2}}$ и $\varphi = 180° + \arctan(f_z/f)$; в) за $C = 270nF$ $f_{z1} \approx 100Hz$, за $C = 27nF$ $f_{z2} \approx 1kHz$ и за $C = 2{,}7nF$ $f_{z3} \approx 10kHz$.

5.10. а) $\dot{A}_U(j\omega) = -\frac{R_2/R_1}{(1 + j\omega R_2C_2).\left(1 + j\frac{1}{j\omega R_1C_1}\right)}$; б) $|\dot{A}_U| = \frac{A_{Uo}}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{f}{f_2}\right)^2\right].\left[1 + \left(\frac{f_1}{f}\right)^2\right]}}$, където $A_{Uo} = \frac{R_2}{R_1} = 10$ и $f_1 = f_2 \approx 10kHz$; б) $\varphi = 180° - acr\tan\left(\frac{f}{f_2}\right) + acr\tan\left(\frac{f_1}{f}\right)$ и ($R_1C_1 = R_2C_2 = 15{,}9\mu s$).

5.11. а) $u_o = \frac{1}{R_NC_N}\int_0^t (u_2 - u_1)dt$; б) интегратор с диференциален вход.

Тема 5.3.

5.12. а) $u_o = -U_T \ln(u_i / I_{ES}R)$; б) $U_o = -600mV$, $-640mV$ и $-680mV$; в) $\delta_{r_{BB'}} = \Delta U_{o,err}/U_o \approx 0{,}026\%$, където $\Delta U_{o,err} = I_B r_{BB'} \approx 167\mu V$ и $I_B = I_C/\beta$.

5.13. а) $u_o = 2{,}3.U_T\frac{R_3 + R_4}{R_4}\lg\frac{u_i}{V_{ref}} = 1V\lg\frac{u_i}{V_{ref}}$; б) $u_o = -2V$.

5.14. а) $u_o = I_{ES}R.e^{-u_i/U_T}$; б) $U_o \approx 2{,}25mV$, $4{,}9V$ и $34V$ (в изхода на схемата напрежението се ограничава до $U^+_{om} = 12V$); в) за $U_i = +0{,}5V$ (транзисторът е запушен) $\rightarrow$ $U_{o,err} = U_{io} + (I_B^- + I_{ES}).R = 5mV + 19nA.1k\Omega \approx 5{,}02mV$.

5.16. а) $V_o = 10V\left(\frac{V_Z}{V_X}\right)$; б) $V_o = 5V$; в) схема за делене на напрежения.

Тема 5.4.

5.17. $U_o \approx \frac{R_Z}{R_Y}.\frac{U_XU_Y}{2U_T}$. За нормалната работа на схемата трябва $U_Y < 0$.

5.18. $u_o = \frac{kU^2_{im}}{2} - \frac{kU^2_{im}}{2}\cos 2\omega t$, $U_{om} = 50mV$ и $f_o = 20kHz$.

5.19. $U_o = \frac{1}{K}\frac{U_X}{U_Z}$ ($K\left[V^{-1}\right]$ – мащабен коефициент на АУ) при $U_Z > 0$.

5.20. $U_o = \sqrt{\frac{U_i}{K}}$ ($K\left[V^{-1}\right]$ – мащабен коефициент на АУ) при $U_i > 0$.

Тема 5.5.

5.21. а) $U^+_p = [R_1/(R_1 + R_2)]U^+_{om} = 5V$ и $U^-_p = [R_1/(R_1 + R_2)]U^-_{om} = -5V$.

5.22. а) $U^+_p = 3V$ и $U^-_p = -2V$.

5.23. а) $U^+_p = -U^-_{om}R_1/R_2 = 4V$ и $U^-_p = -U^+_{om}R_1/R_2 = -4V$.

5.24. $U^+_p = U_{ref}\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) - U^-_{om}\frac{R_1}{R_2} = 2{,}1V$ и $U^-_p = U_{ref}\left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) - U^+_{om}\frac{R_1}{R_2} = 0{,}1V$.

Глава 6.

Тема 6.1.

6.2. а) $U_o = 2V$; б) $|U_{o,err}| \approx 2{,}55mV$.

6.3. а) $U_o \approx I_GR_F.[(R_1 + R_2)/R_2]$ за $R_F >> R_1$; б) $U_o = 1V$; в) $U_{o,err} = 13{,}5mV$.

Тема 6.2.

6.4. а) $R = 2k\Omega$; б) $R_{iA} = 2k\Omega$ и $R_{oA} = 200M\Omega$; в) $|I_{o,err}| = 1{,}275\mu A$.

6.5. а) $I_o = \frac{1}{1 + 1/\beta}.\frac{U_i}{R}$; б) $I_o \approx 0mA$, $40mA$ и $100mA$; в) $R_{L,zp} = 700\Omega$ за $U_i = 1V$ и $R_{L,zp} = 325\Omega$ за $U_i = 2V$.

6.6. а) $i_L\big|_{u_2=0} = -\dfrac{R_2}{R_1R_4}u_1$ за $\dfrac{R_2}{R_1}=\dfrac{R_4}{R_3}$; б) за $R_L = 1k\Omega \rightarrow i_L = -1mA$, $i_1 = 2mA$, $i_{R_4} = -2mA$ и $u_o = -3V$; за $R_L = 2k\Omega \rightarrow i_L = -1mA$, $i_1 = 3mA$, $i_{R_4} = -3mA$ и $u_o = -5V$.

6.7. а) $i_L\big|_{u_1=0} = \dfrac{u_2}{R_3}$ за $\dfrac{R_2}{R_1}=\dfrac{R_4}{R_3}$; б) за $R_L = 1k\Omega \rightarrow i_L = 1mA$, $i_2 = 0A$, $i_{R_4} = 1mA$ и $u_o = 2V$; за $R_L = 2k\Omega \rightarrow i_L = 1mA$, $i_2 = -1mA$, $i_{R_4} = 2mA$ и $u_o = 4V$.

6.8. а) $i_L = -\dfrac{R_2}{R_1}\dfrac{u_i}{R}$ за $\dfrac{R_1+R_2}{R_3+R_4}.\dfrac{R_3}{R_1}=1$; б) $R = 10\Omega$; в) $R_2/R_1 = 1/4$; г) $P_R = i^2_{L\max}R = 625mW$; д) $R_{L\max} = 9{,}5V/250mA = 38\Omega$ и $P_{CC} = V^+_{CC}i_{L\max} = 3{,}75W$.

6.9. а) $A_I = 1 + R_1/R_2$; б) $I_o \approx 101\mu A$; в) $\delta_{I_{ив}} = 0{,}0025\%$.

Глава 7.

Тема 7.1.

7.3. а) $R_E \approx 4{,}5k\Omega$ и $R_{T1} \approx 15{,}3k\Omega$; б) $R_{iA} \approx 2k\Omega$ и $A_{U\max} = SR_{oe} \approx 80$ ($R_{oe} \approx R_{iA}$ за $Q_e >> 1$); в) $C_1 \approx 1nF$ и $C_2 \approx 81nF$.

7.4. а) $R_E \approx 4{,}5k\Omega$ и $R_{T1} \approx 15{,}3k\Omega$; б) $R_{iA} \approx 2k\Omega$ и $A_{U\max} = SR_{oe} \approx 80$ ($R_{oe} \approx R_{iA}$ за $Q_e >> 1$); в) $C_1 = 1{,}27nF$ и $C_2 = 102nF$.

7.5. а) $Z_q = \dfrac{j}{\omega}.\dfrac{\omega^2LC-1}{C+C_o-\omega^2LCC_o}$; б) $\rho = 632k\Omega$, $Q = 10540$, $f_S = 1007{,}09kHz$ и $f_P = 1031{,}96kHz$.

Тема 7.2.

7.7. а) $|\dot\beta^+||\dot A_U| = 1$ и $\varphi_{A_U} + \varphi_{\beta^+} = 0$, където $A_U = 1 + \dfrac{R_3}{R_4}$ и

$$\dot\beta^+ = \frac{\dot U_{\beta^+}}{\dot U_o} = \frac{1}{1+\dfrac{R_1}{R_2}+\dfrac{C_2}{C_1}+j\left(\omega R_1C_2-\dfrac{1}{\omega R_2C_1}\right)};\ \text{б)}\ \dot\beta^+ = \frac{1}{3+j\left(\omega RC-\dfrac{1}{\omega RC}\right)}\ \text{и}$$

$$\varphi_{\beta^+} = acr\tan\frac{\mathrm{Im}g\left[\dot\beta^+\right]}{\mathrm{Re}\left[\dot\beta^+\right]} = -\frac{\omega RC-1/\omega RC}{3};\ \text{в)}\ f_o = 100kHz,\ |\dot\beta^+_o| = 1/3\ \text{и}\ A_{U\min} = 3.$$

7.8. а) $\dot\beta^+ = \dfrac{\dot U^+_\beta}{\dot U_o} = \dfrac{1}{1-\dfrac{5}{(\omega RC)^2}+\dfrac{1}{j\omega RC}\left[6-\dfrac{1}{(\omega RC)^2}\right]}$; б) $f_o = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{6}RC} \rightarrow$

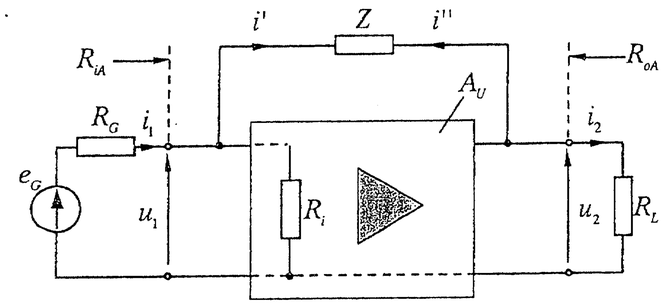
$R = 1/(2\pi\sqrt{6}f_oC) = 101{,}5\Omega$; в) $R_N = 100R = 10{,}15k\Omega$ и $R_F \geq 294{,}4k\Omega$.

7.9. а) $\dot\beta^+ = \dfrac{\dot U^+_\beta}{\dot U_o} = \dfrac{1}{1-5(\omega RC)^2+j\omega RC\left[6-(\omega RC)^2\right]}$; б) $f_o = \dfrac{\sqrt{6}}{2\pi RC} \rightarrow R = \dfrac{\sqrt{6}}{2\pi f_oC} = 390\Omega$; в) $R_N = 39k\Omega$ и $R_F \geq 1{,}13M\Omega$.

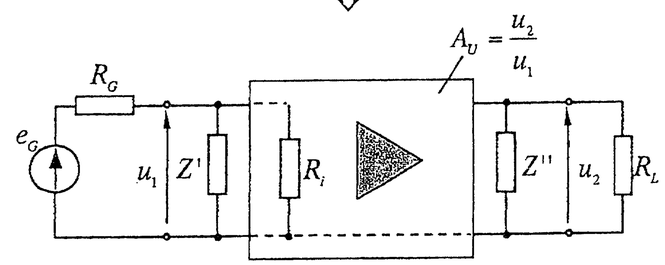
7.10. а) $f_o = R_2/(4R_1RC)$; б) $f_o = 2{,}5kHz$, $U^+_{comp,m} = -U^-_{comp,m} = 11V$, $U^+_{\text{int},m} = -(R_1/R_2)U^-_{comp,m} = 1{,}1V$ и $U^-_{\text{int},m} = -(R_1/R_2)U^+_{comp,m} = -1{,}1V$.

Приложение А

Теорема на Милер



Фиг. 1А.



Фиг. 2А.

Усилвателят, представен като четириполюсник от фиг. 1А, може да бъде заменен с усилвателя от фиг. 2А при условие, че $Z' = \dfrac{Z}{1-A_U}$ и $Z'' = \dfrac{Z}{1-\dfrac{1}{A_U}}$, където $A_U = u_2/u_1$ е коефициентът на усилване по напрежение.

Доказателство:

Двата четириполюсника ще бъдат еквивалентни, ако входните и изходните им токове и напрежения са еднакви.

Токът i', отразяващ влиянието на Z на входа на двете схеми, е

$$i' = \frac{u_1-u_2}{Z} = \frac{u_1.(1-A_U)}{Z} = \frac{u_1}{Z'} \rightarrow Z' = \frac{Z}{1-A_U}.$$

Токът i'', отразяващ влиянието на Z на изхода на двете схеми, е

$$i'' = -i_2 = \frac{u_2-u_1}{Z} = \frac{u_2.\left(1-\dfrac{1}{A_U}\right)}{Z} = \frac{u_2}{Z''} \rightarrow Z'' = \frac{Z}{1-\dfrac{1}{A_U}}.$$

Тогава, ако $Z = R$ (съпротивление), за входното съпротивление на усилвателя се получава $R_{iA} = R'\|R_i$.

Изходното съпротивление на усилвателя се определя от израза

$$R_{oA} = \frac{u_{2пх}}{i_{2,кс}} = \frac{\textit{Изходно напрежение на празен ход}}{\textit{Изходен ток на късо съединение}}.$$

В случай, че $Z = 1/j\omega C$ (капацитивен характер на импеданса), входният и изходният еквивалентен капацитет на усилвателя са:

$$C' = C.(1-A_U)\ \text{и}\ C'' = C.\left(1-\frac{1}{A_U}\right).$$

Приложение B

Стандартни стойности на резистори

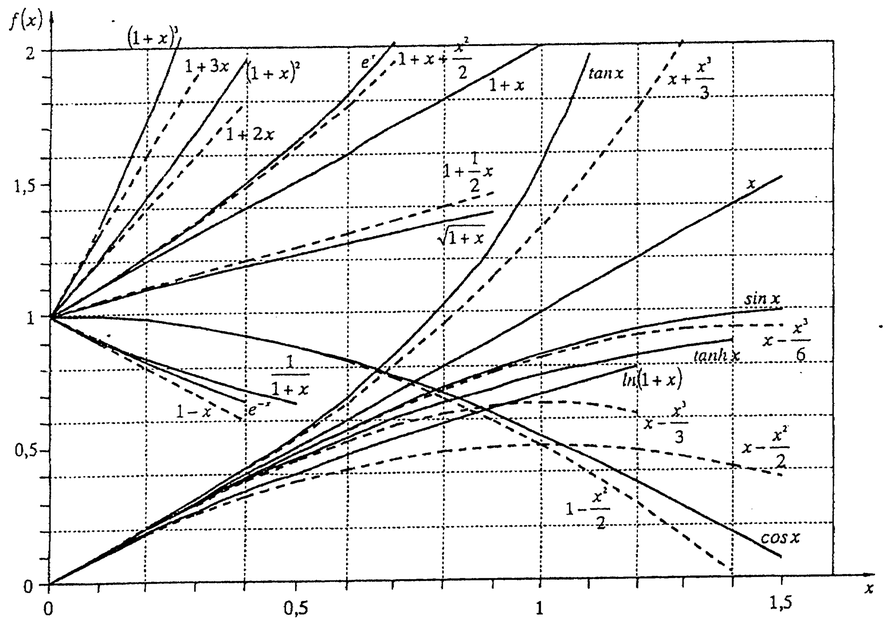
Таблица 1А. Нормирани стойности за съпротивления на резистори

E24:	1.0	1.1	1.2	1.3	1.5	1.6	1.8	2.0	2.2	2.4	2.7	3.0	3.3	3.6	3.9	4.3	4.7	5.1	5.6
(±5%)	6.2	6.8	7.5	8.2	9.1														
E96:	1.00	1,02	1.05	1.07	1.10	1.13	1.15	1.18	1.21	1.24	1.27	1.30	1.33	1.37	1.40				
(±1%)	1.43	1.47	1.50	1.54	1.58	1.62	1.65	1.69	1.74	1.78	1.82	1.87	1.91	1.96	2.00				
	2.05	2.10	2.15	2.21	2.26	2.32	2.37	2.43	2.49	2.55	2.61	2.67	2.74	2.80	2.87				
	2.94	3.01	3.09	3.16	3.24	3.32	3.40	3.48	3.57	3.65	3.74	3.83	3.92	4.02	4.12				
	4.22	4.32	4.42	4.53	4.64	4.75	4.87	4.99	5.11	5.23	5.36	5.49	5.62	5.76	5.90				
	6.04	6.19	6.34	6.49	6.65	6.81	6.98	7.15	7.32	7.50	7.68	7.87	8.06	8.25	8.45				
	8.66	8.87	9.09	9.31	9.53	9.76													

Денормираните стандартни стойности за съпротивленията на резисторите се получават, като числата от съответния ред E24 (±5%) или E96 (±1%) се умножат с 10^n (n е цяло положително/отрицателно число или нула, напр. –1, 0, 1, 2, 3 и т.н.).

Приложение C

Основни математически функции в графичен вид [1]



За някои от функциите при $x << 1$ важат следните приблизителни равенства:

$$\frac{1}{1\pm x}\approx 1\mp x,\quad \sqrt{1\pm x}\approx 1\pm\frac{1}{2}x,\quad e^{\pm x}\approx 1\pm x.$$

[1] Функциите $1+2x$, $1+3x$, $1+\frac{1}{2}x$, $\frac{1}{1+x}$, $x-\frac{x^3}{6}$, $1-\frac{x^2}{2}$, $x+\frac{x^3}{3}$, $x-\frac{x^3}{3}$ и $1+x+\frac{x^2}{2}$, дадени с прекъсвана линия, са съставени от първите няколко члена (до четвърти) от разложението в ред на Тейлор, съответно на функциите $(1+x)^2$, $(1+x)^3$, $\sqrt{1+x}$, $1-x$, $\sin x$, $\cos x$, $\tan x$, $\tanh x$ и e^x.

Литература

[1] Вълков, Ст. Аналогова електроника. С., Техника, 2002.

[2] Златаров, В., Л. Доневска, Д. Стаменов, И. Немигенчев. Електронни аналогови схеми и устройства. С., Техника, 1994.

[3] Златаров, В., Д. Дойчев, И. Пандиев. Справочник за усилвателни интегрални схеми – операционни, нискочестотни, широколентови. С., Техника, 2004.

[4] Клейтън, Д., Б. Нюбай. Операционни усилватели. С., Техника, 1997.

[5] Пандиев, И., Л. Доневска, Д. Стаменов. Аналогова схемотехника – I. С. ТУ-София, 2008.

[6] Пандиев, И., Л. Доневска, Д. Стаменов. Аналогова схемотехника – II. С. ТУ-София, 2008.

[7] Шойкова, Е. Синтез на активни филтри. С., ТУ- София, 2000.

[8] Bernstein, H. Analoge Schaltungstechnik mit diskreten und integrierten Bauelementen, Hüthig, 1997.

[9] Böhmer, E. Rechenübungen zur angewandten Elektronik. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage, Vieweg, 1987.

[10] Cappy, M. Module du Tronc Commun (TC2): Electronique, USTL, 1997.

[11] Geiger, R., Ph. Allen, N. Strader. VLSI design technologies for analog and digital circuits. McGraw-Hill, 1997.

[12] Jung, W. Op Amp Applications. Analog Devices, MA, USA, 2002.

[13] Kester, W. Analog-Digital Conversion. Analog Devices, MA, USA, 2004.

[14] Kitchin, Ch., L. Counts. A Designer's Guide to Instrumentation Amplifiers. 3rd Edition. Analog Devices, MA, USA, 2006.

[15] Mancini, R. Op Amps for Everyone. Design Reference. Texas Instruments, 2002.

[16] Meier, U., W. Nerreter. Analoge Schaltungen. Entrwurf, Berechnung und Simulation, Hanser, 1997.

[17] Naundorf, U. Analoge Elektronik. Hüthig, 2001.

[18] Peyton, A., V. Walsh. Analog Electronics with Op Amps. A source book of practical circuits. Cambridge University Press, 1994.

[19] Schumacher, H. Electronic Circuit Design. Lecture and Laboratory Courses. University of Ulm, 2001.

[20] Schwarz, W. Analoge Schaltungstechnik. Aufgabensammlung, Technische Universität Dresden, 2004.

[21] Stoianov, I. Electronique Analogique. Documentation. University Technique - Sofia, 2000.

[22] Seifart, M. Analoge Schaltungen. 6. Auflage. Verlag Technik Berlin, 2003.

[23] Siegl, J. Schaltungstechnik – Analog und gemischt analog/digital. 2. Auflage. Springer- Verlag, 2005.

[24] Tietze, V., Ch. Schenk. Halbleiterschaltungstechnik. 12. Auflage. Berlin, Heidelberg, New Yourk, Springer-Verlag 2002.

[25] Weddigen, Ch., W. Jüngst. Elektronik. Springer-Verlag, 1993.