



АНАЛОГОВА СХЕМОТЕХНИКА

ДЕМОНСТРАТОР КЪМ МОДУЛ 7

Цел

Целта на демонстратора е да се затвърдят теоретичните познания и да се подпомогне самоподготовката.

Стъпала с динамичен товар. Каскодни усилватели и повторители.

Дейности

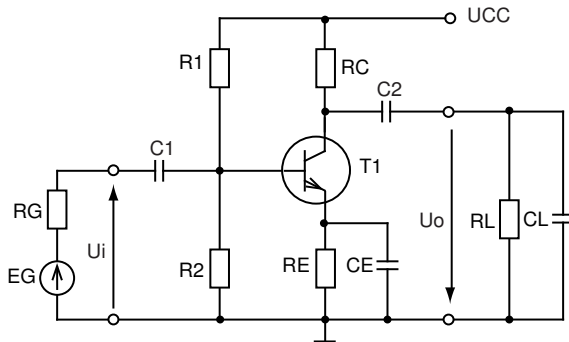
На фиг. 3.1 са представени основните едностъпални усилватели с биполярни и полеви транзистори, съответно: общ емитер - ОЕ (фиг. 3.1а) и общ сорс - ОС (фиг. 3.1б); общ колектор – ОК (фиг. 3.1в) и общ дрейн – ОД (фиг. 3.1г); обща база - ОБ (фиг. 3.1д) и общ гейт - ОГ (фиг. 3.1е). Основна усилвателна схема за променливотокови сигнали е схемата с ОЕ (фиг. 3.1а). В нея постояннотоковият режим се определя от резисторите R_1 , R_2 , R_C и R_E и захранващото напрежение U_{CC} . Отрицателният полюс на източника U_{CC} се включва към общия проводник, който в схемата от фиг. 3.1а представлява масата на електронната схема. Входът и изходът на схемата са отделени по постоянен ток съответно от източника на сигнала и товара с разделящите кондензатори C_1 и C_2 . Освен това паралелно на R_E е включен кондензатор C_E , който премахва U_{OVB} по променлив ток. Входният сигнал се подава между базата и масата на електронната схема, а изходният сигнал се получава върху товарното съпротивление R_L . Предполага се, че БТ работи като усилвател в режим на малък сигнал, за който променливите напрежения и токове в различните точки на транзистора са значително по-малки от постоянните напрежения и токове. Сравнението между различните схеми на свързване може да се направи, използвайки основните им експлоатационни параметри, а именно: коефициент на усилване по напрежение и по ток, входно и изходно съпротивление и капацитет. База при сравнителния анализ е стъпалото ОЕ с кондензатор C_E . За целта в таблица 3.1 са дадени изразите за



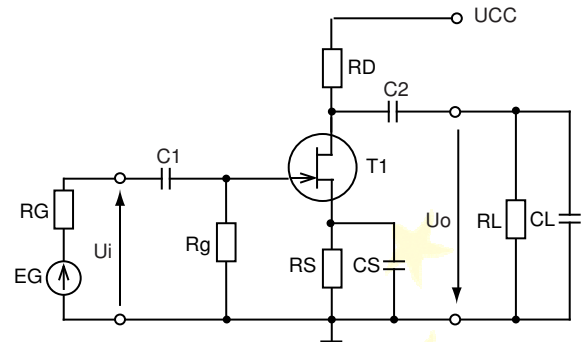
МИНИСТЕРСТВО НА ОБРАЗОВАНИЕТО И НАУКАТА

Проект BG051PO001-3.1.07-0048 „Актуализиране на учебните планове и програми на специалностите във ФЕТТ, ФТК и МТФ на ТУ-София и създаване на нова съвместна магистърска специалност в съответствие с потребностите на пазара на труда”

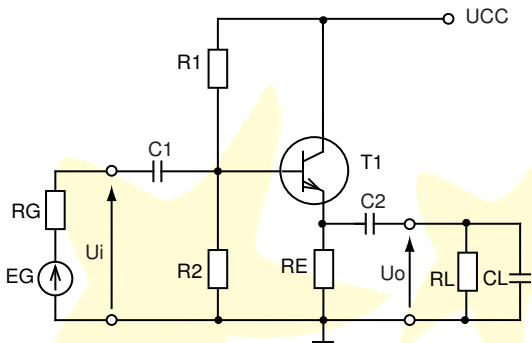
динамичните параметри на всички едностъпални усилватели с биполярни и полеви транзистори [2].



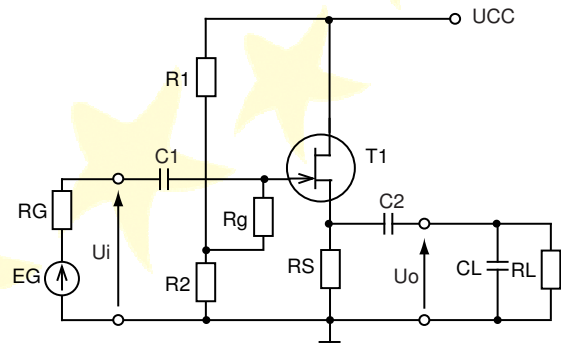
Фиг. 3.1а



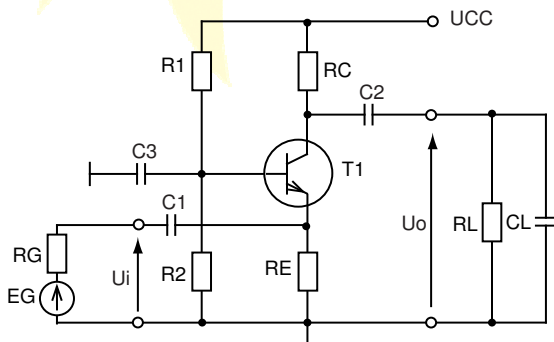
Фиг. 3.1б



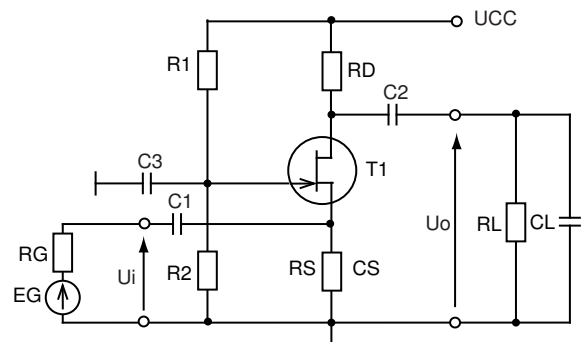
Фиг. 3.1в



Фиг. 3.1г



Фиг. 3.1д



Фиг. 3.1е



МИНИСТЕРСТВО НА ОБРАЗОВАНИЕТО И НАУКАТА

Проект BG051PO001-3.1.07-0048 „Актуализиране на учебните планове и програми на специалностите във ФЕТТ, ФТК и МТФ на ТУ-София и създаване на нова съвместна магистърска специалност в съответствие с потребностите на пазара на труда”

Таблица 3.1

СХЕМА → ИЗРАЗ↓	ОЕ и ОС	ОК и ОД	ОБ и ОГ
Коефициент на усилване по напрежение			
$A_u = \frac{U_o}{U_i}$	$-SR'_L, (R'_L = R_{oA} \parallel R_L)$	$\frac{SR'_L}{1 + SR'_L}$	SR'_L
Коефициент на предаване на входната верига			
$K_{iN} = \frac{U_i}{E_G}$	$\frac{R_{iA}}{R_{iA} + R_G}$	$\frac{R_{iA}}{R_{iA} + R_G}$	$\frac{R_{iA}}{R_{iA} + R_G}$
Пълнен коефициент на усилване по напрежение			
$A = \frac{U_o}{E_G}$	$A_u \cdot K_{iN}$	$A_u \cdot K_{iN}$	$A_u \cdot K_{iN}$
Входно съпротивление			
R_{iA}	ОЕ: $h_{11} \parallel \underbrace{R_1 \parallel R_2}_{R_B}$ ОС: $r_g \parallel R_g \approx R_g$	ОК: $R_B \parallel [h_{11}(1 + SR'_L)]$ ОД: $(R_g + R_B) \parallel [r_g(1 + SR'_L)]$	$\frac{1}{S} \parallel R_{E,(S)}$
Изходно съпротивление			
R_{oA}	$R_o \parallel R_{C,(D)}$ ОЕ: $R_o \approx r_{CE} \approx \frac{1}{h_{22}}$ ОС: $R_o = r_{DS}$	$\frac{1}{S} \parallel R_{E,(S)}$	ОБ: $\frac{1 + SR'_E}{h_{22}} \parallel R_C \approx R_C$ ОГ: $r_{DS}(1 + SR'_S) \parallel R_D \approx R_D$
Входен капацитет			
C_{iA}	ОЕ: $C_{b'e} + C_{b'c}(1 + A_u)$ ОС: $C_{gs} + C_{gd}(1 + A_u)$	ОК: $C_{b'c} + C_{b'e}(1 - A_u)$ ОД: $C_{gd} + C_{gs}(1 - A_u)$	ОБ: $C_{b'e} + C_{ce}(1 - A_u)$ ОГ: $C_{gs} + C_{ds}(1 - A_u)$
Изходен капацитет			
C_{oA}	ОЕ: $C_{b'c}$ ОС: $C_{gd} + C_{ds}$	ОК: $C_{ce} - C_{b'e} \frac{A-1}{A}$ ОД: C_{ds}	ОБ: $C_{b'c} + C_{ce} \frac{A-1}{A} \approx C_{b'c}$ ОГ: C_{gd}
Амплитуда на изходния ток			
I_{cm}	$=0,9I_C$		
Амплитуда на изходното напрежение			



МИНИСТЕРСТВО НА ОБРАЗОВАНИЕТО И НАУКАТА

Проект BG051PO001-3.1.07-0048 „Актуализиране на учебните планове и програми на специалностите във ФЕТТ, ФТК и МТФ на ТУ-София и създаване на нова съвместна магистърска специалност в съответствие с потребностите на пазара на труда“

U_{om1}	$= I_{cm} R_L$
Амплитуда на изходното напрежение	
U_{om2}	$= U_{CE} - U_{CEsat}$
Капацитет на входния разделящ кондензатор	
C_1	$\geq \frac{1}{2\pi f_b (R_G + R_{iA}) \sqrt{M_{bi}^2 - 1}}$
Капацитет на изходния разделящ кондензатор	
C_2	$\geq \frac{1}{2\pi f_b (R_{oA} + R_L) \sqrt{M_{bo}^2 - 1}}$
Капацитет на блокиращия кондензатор	
$C_{E, (S)}$	$\geq \frac{S}{2\pi f_b \sqrt{M_{C_{E(S)}}^2 - 1}}$
Капацитет на блокиращия кондензатор за схема ОБ и ОГ	
C_3	$\geq \frac{1}{2\pi f_b R_B} \sqrt{\frac{(1+p)^2 - M_{C3}^2}{M_{C3}^2 - 1}}$, където $p = \frac{R_B}{h_{21} R_G + h_{11}}$.
Времеkonстанта на входната верига за ниски честоти	
τ_{bi}	$= C_1 (R_G + R_{iA})$
Гранична честота на входната верига	
f_{bi}	$= \frac{1}{2\pi \tau_{bi}}$
Амплитудно-честотни изкривявания, обусловени от C_1	
M_{bi}	$= \sqrt{1 + \left(\frac{1}{2\pi f_b \tau_{bi}}\right)^2} = \sqrt{1 + \left(\frac{f_{bi}}{f_b}\right)^2}$
Времеkonстанта на изходната верига за ниски честоти	
τ_{bo}	$= C_2 (R_{oA} + R_L)$
Гранична честота на изходната верига	
f_{bo}	$= \frac{1}{2\pi \tau_{bo}}$
Амплитудно-честотни изкривявания, обусловени от C_2	
M_{bo}	$= \sqrt{1 + \left(\frac{1}{2\pi f_b \tau_{bo}}\right)^2} = \sqrt{1 + \left(\frac{f_{bo}}{f_b}\right)^2}$



МИНИСТЕРСТВО НА ОБРАЗОВАНИЕТО И НАУКАТА

Проект BG051PO001-3.1.07-0048 „Актуализиране на учебните планове и програми на специалностите във ФЕТТ, ФТК и МТФ на ТУ-София и създаване на нова съвместна магистърска специалност в съответствие с потребностите на пазара на труда”

Времеконстанта на входната верига за високи честоти	
τ_{hi}	$= [(R_G + r_{b'b}) \parallel R_{iA}] (C_{iA} + C_{Mi}), C_{Mi} = 5 \div 15 \text{ pF}$ - монтажен капацитет
Полюсна честота на входната верига	
f_{pi}	$= \frac{1}{2\pi\tau_{hi}}$
Амплитудно-честотни изкривявания, обусловени от входната верига	
M_{hi}	$= \sqrt{1 + (2\pi f_h \tau_{hi})^2} = \sqrt{1 + \left(\frac{f_h}{f_{pi}}\right)^2}$
Времеконстанта на изходната верига за високи честоти	
τ_{ho}	$= (R_{oA} \parallel R_L) (C_{oA} + C_L + C_{Mo}), C_{Mo} = 5 \div 15 \text{ pF}$ - монтажен капацитет
Полюсна честота на изходната верига	
f_{po}	$= \frac{1}{2\pi\tau_{ho}}$
Амплитудно-честотни изкривявания, обусловени от изходната верига	
M_{ho}	$= \sqrt{1 + (2\pi f_h \tau_{ho})^2} = \sqrt{1 + \left(\frac{f_h}{f_{po}}\right)^2}$
Амплитудно-честотни изкривявания обусловени от входната и изходната верига	
M_h	$= M_{hi} \cdot M_{ho} \text{ (нъму)}; (M_{hi \text{ dB}} + M_{ho \text{ dB}}), (dB - \text{децибели})$
Време на нарастване на изходния сигнал	
t_r	$\approx 0,35 / f_p$
Спадане в плоската част на импулса на преходната характеристика	
Δ	$= 2\pi f_z t_p, t_p$ - продължителност на импулса

Въз основа на сравнителния анализ на трите основни схеми с биполярни и полеви транзистори се установява следното:

1. При биполярните транзистори, свързани по схема ОЕ, входното съпротивление се определя главно от транзистора или $R_{iA} \approx h_{11}$ (при високоомен делител R_1-R_2 , а при полевите транзистори, свързани по схема ОС – от външно включения резистор R_g . При това $R_{iA,OE} < R_{iA,OC}$.

2. Изходното съпротивление за схемите ОЕ и ОС, в режим на празен ход, се определя от самите транзистори и режимните съпротивления $R_{C,(D)}$, т.е. $R_{oA,OE} \approx R_{oA,OC}$.

3. Коефициентът на усилване за схемите с ОЕ и ОС се определя от стръмността на транзистора S и от режимните съпротивления $R_{C,(D)}$.



МИНИСТЕРСТВО НА ОБРАЗОВАНИЕТО И НАУКАТА

Проект BG051PO001-3.1.07-0048 „Актуализиране на учебните планове и програми на специалностите във ФЕТТ, ФТК и МТФ на ТУ-София и създаване на нова съвместна магистърска специалност в съответствие с потребностите на пазара на труда“

4. За схемите ОК и ОД коефициентът на усилване по напрежение е

$$A_u = \frac{SR'_L}{1 + SR'_L} \approx 1 \text{ при } SR'_L \gg 1, \text{ входното съпротивление е голямо, а}$$

$$\text{изходното малко } R_{oA} = \frac{1}{S} \parallel R_{E,(S)} \approx \frac{1}{S}.$$

5. При премахване на блокиращия кондензатор C_E , съответно C_S , входното и изходното съпротивление нарастват, усилването намалява и става почти независимо от параметрите на транзистора при $SR_E \gg 1$, т.е.

$$A_u = -\frac{SR'_L}{1 + SR_E} \approx -\frac{R'_L}{R_E},$$

Пример 3.1

Да се оразмери стъпало по схема с ОЕ (фиг. 3.1а) при $I_C=1\text{mA}$ и $U_{CE}=5\text{V}$ и $U_{CC}=12\text{V}$. Да се намерят всички променливотокови параметри, ако $R_G = 100\Omega$, $R_L = 10\text{k}\Omega$, $C_L = 100\text{pF}$, $f_b=20\text{Hz}$, $f_h=100\text{kHz}$ и $M_b = M_h \leq 2\text{dB}$. За стойностите на параметрите на елементите, определящи постояннотоковия режим, са използвани резултатите от пример 2.1, а именно: $R_E=1,6\text{k}\Omega$, $R_B = R_1 \parallel R_2 = 91\text{k}\Omega \parallel 22\text{k}\Omega \approx 17,7\text{k}\Omega$ и $R_C=5,6\text{k}\Omega$. Да се използват формулите от таблица 3.1.

Решение:

1. Изчислява се товарното съпротивление $R'_L = R_{oA} \parallel R_L$, където

$$R_{oA} = \frac{1}{h_{22}} \parallel R_C. \text{ От графиките } h_{22}(I_C) \text{ се отчита за } 2\text{T}3168\text{A } h_{22} = 25\mu\text{S}. \text{ Тогава}$$

$$R_{oA} = \frac{1}{25 \cdot 10^{-6} \text{ S}} \parallel 5,6\text{k}\Omega = 40\text{k}\Omega \parallel 5,6\text{k}\Omega = 4,9\text{k}\Omega.$$

$$\text{Следователно } R'_L = 4,9\text{k}\Omega \parallel 10\text{k}\Omega = 3,3\text{k}\Omega.$$

2. Изчислява се коефициентът на усилване по напрежение $A_u = -SR'_L$,

където $S = \frac{h_{21}}{h_{11}}$. От каталожните данни за избраната работна точка се

отчита коефициентът на усилване $h_{21}=150$ и $h_{11}=4\text{k}\Omega$. Тогава

$$S = \frac{150}{4\text{k}\Omega} = 37,5\text{mA/V}.$$

$$\text{Следователно } A_u = -37,5\text{mS} \cdot 3,3\text{k}\Omega = 123,75.$$

3. Изчисляват се входното съпротивление $R_{iA} = h_{11} \parallel R_B = 4\text{k}\Omega \parallel 17,7\text{k}\Omega = 3,26\text{k}\Omega$ и входният съпротивление кондензатор



МИНИСТЕРСТВО НА ОБРАЗОВАНИЕТО И НАУКАТА

Проект BG051PO001-3.1.07-0048 „Актуализиране на учебните планове и програми на специалностите във ФЕТТ, ФТК и МТФ на ТУ-София и създаване на нова съвместна магистърска специалност в съответствие с потребностите на пазара на труда”

$C_{iA} = C_{b'e} + C_{b'c} (1 + |A_u|) = 12 pF + 6 pF \cdot 123,75 = 760,5 pF$. За целта от каталожните данни са отчетени: $C_{b'c} = 6 pF$ и $C_{b'e} = 12 pF$.

4. Изчислява се изходният капацитет $C_{oA} = C_{b'c} = 6 pF$.

5. Определят се стойностите на капацитетите на разделящите и блокиращия кондензатор C_1 , C_2 и C_E .

Зададените амплитудно-честотни изкривявания $M_b = 2dB$ се разпределят по следния начин: $M_{bi} = 0,7dB$ ($M_{bi} = 1,08$), $M_{bo} = 0,7dB$ ($M_{bo} = 1,08$) и $M_{bCE} = 0,6dB$ ($M_{bCE} = 1,07$).

$$C_1 \geq \frac{1}{2\pi \cdot 20 \sqrt{1,08^2 - 1} \cdot (0,1 + 3,26)} = 4,92 \mu F. \text{ Избира се } C_1 = 6,2 \mu F.$$

$$C_2 \geq \frac{1}{2\pi \cdot 20 \sqrt{1,08^2 - 1} \cdot (4,9 + 10)} = 1,3 \mu F. \text{ Избира се } C_2 = 1,3 \mu F.$$

$$C_E \geq \frac{S}{2\pi f_b \sqrt{M_{CE}^2 - 1}} = \frac{37,5 \cdot 10^{-3}}{2\pi \cdot 20 \sqrt{1,07^2 - 1}} = 796 \mu F. \text{ Избира се } C_E = 820 \mu F.$$

6. Изчисляват се амплитудно-честотните изкривявания M_h , като за целта се определят времеконстантите τ_{pi} и τ_{po} , и полюсните честоти f_{pi} и f_{po} , обусловени от входната и изходната верига

- $\tau_{hi} = (C_{iA} + C_{Mi})(R_{iA} \parallel R_G) = 765,5 \cdot 10^{-12} \cdot (3260 \parallel 100) = 74,2 ns$, където $C_{Mi} = 5 pF$;

- $\tau_{ho} = (C_{oA} + C_L + C_{Mo})(R_{oA} \parallel R_L) = (6 + 100 + 5) \cdot 10^{-12} \cdot (49 \parallel 10) \cdot 10^3 = 366 ns$, където $C_{Mo} = 5 pF$;

- $f_{pi} = 2,14 MHz$;

- $f_{po} = 0,43 MHz$;

- $M_{hi} = \sqrt{1 + \left(\frac{f_h}{f_{pi}}\right)^2} = \sqrt{1 + \left(\frac{0,1}{2,14}\right)^2} = 1,001$ (0,009dB);

- $M_{ho} = \sqrt{1 + \left(\frac{f_h}{f_{po}}\right)^2} = \sqrt{1 + \left(\frac{0,1}{0,43}\right)^2} = 1,026$ (0,22dB);

- $M_h = M_{hi} M_{ho} = 1,027$ (0,2377dB), което е по-малко от зададената стойност 2dB.

Пример 3.2

Да се изчислят параметрите на съпалото по схема с ОЕ от пример 3.1 при въведена ООВ по променлив ток ($C_E=0$).



МИНИСТЕРСТВО НА ОБРАЗОВАНИЕТО И НАУКАТА

Проект BG051PO001-3.1.07-0048 „Актуализиране на учебните планове и програми на специалностите във ФЕТТ, ФТК и МТФ на ТУ-София и създаване на нова съвместна магистърска специалност в съответствие с потребностите на пазара на труда“

1. Определя се коефициентът на усилване по напрежение

$$A_{uF(-)} = -\frac{R'_L}{R_E} = \frac{3,3k\Omega}{1,6k\Omega} = -2,06, \text{ при } SR_E \gg 1.$$

2. Изчислява се входното съпротивление

$$R'_{iAF} = R_B \parallel R_{iA_F} = 16,5k\Omega, \text{ където } R_{iA_F} = h_{11}(1 + SR_E) = 4k\Omega \cdot 61 = 244k\Omega.$$

3. Определя се изходното съпротивление $R_{oA} \approx R_C = 5,6k\Omega$.

