



## АНАЛОГОВА СХЕМОТЕХНИКА

### ДЕМОНСТРАТОР КЪМ МОДУЛ 3

#### Цел

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

#### *Едностъпални транзисторни усилватели*

#### Дейности

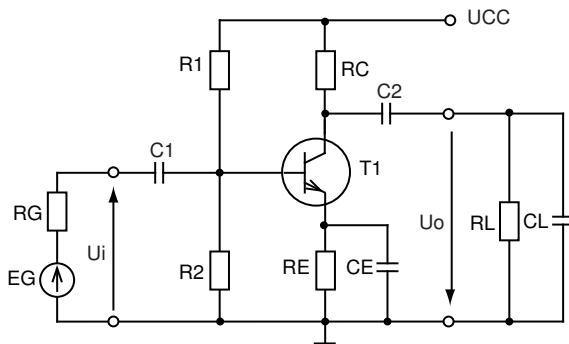
На фиг. 3.1 са представени основните едностъпални усилватели с биполярни и полеви транзистори, съответно: общ емитер - ОЕ (фиг. 3.1а) и общ сорс - ОС (фиг. 3.1б); общ колектор – ОК (фиг. 3.1в) и общ дрейн – ОД (фиг. 3.1г); обща база - ОБ (фиг. 3.1д) и общ гейт - ОГ (фиг. 3.1е). Основна усилвателна схема 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



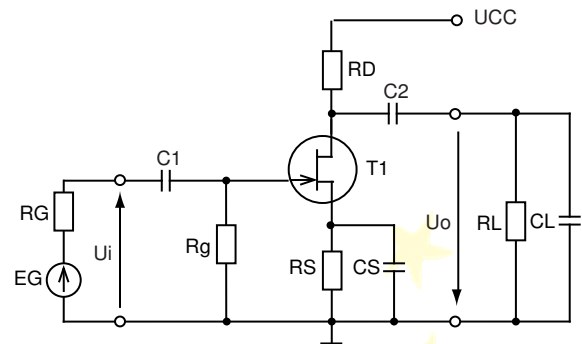
МИНИСТЕРСТВО НА ОБРАЗОВАНИЕТО И НАУКАТА

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”

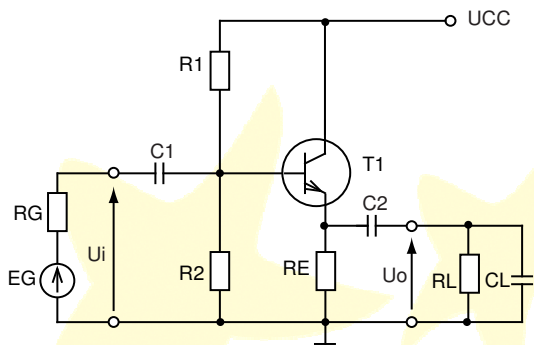
динамичните параметри на всички едностъпални усилватели с биполярни и полеви транзистори [2].



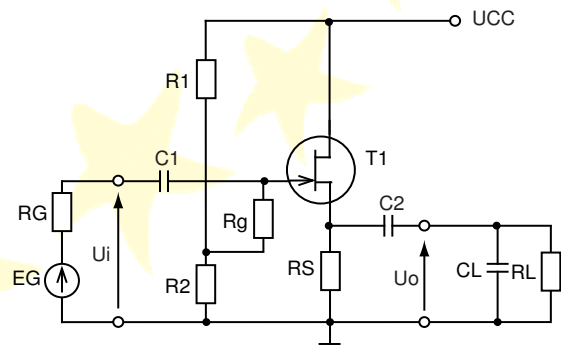
Фиг. 3.1а



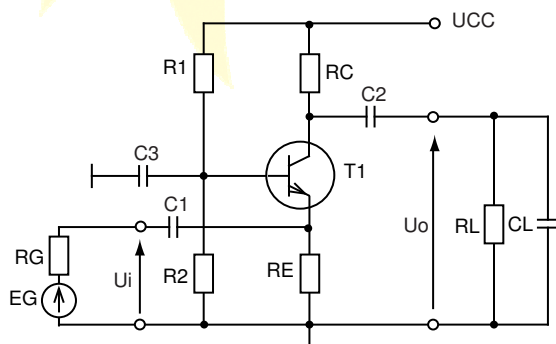
Фиг. 3.1б



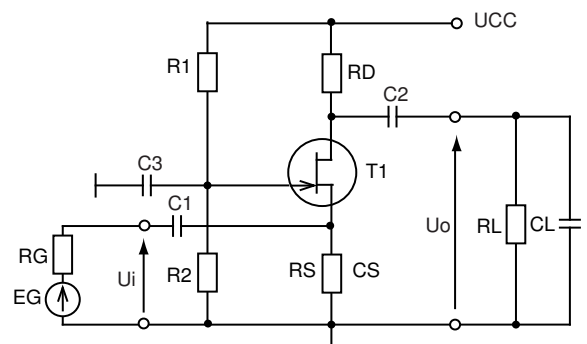
Фиг. 3.1в



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
<b>Коефициент на усилване по напрежение</b>			
$A_u = \frac{U_o}{U_i}$	$-SR'_L, (R'_L = R_{oA} \parallel R_L)$	$\frac{SR'_L}{1 + SR'_L}$	$SR'_L$
<b>Коефициент на предаване на входната верига</b>			
$K_{iN} = \frac{U_i}{E_G}$	$\frac{R_{iA}}{R_{iA} + R_G}$	$\frac{R_{iA}}{R_{iA} + R_G}$	$\frac{R_{iA}}{R_{iA} + R_G}$
<b>Пълн коефициент на усилване по напрежение</b>			
$A = \frac{U_o}{E_G}$	$A_u \cdot K_{iN}$	$A_u \cdot K_{iN}$	$A_u \cdot K_{iN}$
<b>Входно съпротивление</b>			
$R_{iA}$	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: $(R_g + R_B) \parallel [r_g (1 + SR'_L)]$	$\frac{1}{S} \parallel R_{E,(S)}$
<b>Изходно съпротивление</b>			
$R_{oA}$	$R_o \parallel R_{C,(D)}$ 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: $r_{DS} (1 + SR'_S) \parallel R_D \approx R_D$
<b>Входен капацитет</b>			
$C_{iA}$	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: $C_{gs} + C_{ds} (1 - A_u)$
<b>Изходен капацитет</b>			
$C_{oA}$	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: $C_{gd}$
<b>Амплитуда на изходния ток</b>			
$I_{cm}$	$= 0,9 I_C$		
<b>Амплитуда на изходното напрежение</b>			



## 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“

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



## 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”

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

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

$$R_{oA} = \frac{1}{h_{22}} \parallel R_C. \text{ От графиките } h_{22}(I_C) \text{ се отчита за 2Т3168А } h_{22} = 25\mu\text{S}. \text{ Тогава}$$

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

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

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

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

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

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 капацитет



## 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  $\tau_{pi}$  и  $\tau_{po}$ , 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  $R_{oA} \approx R_C = 5,6k\Omega$ .

