



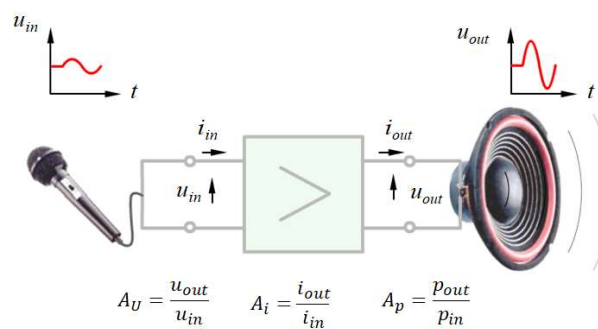
Работа на биполярен транзистор като усилвател

1

Какво е усилвател?

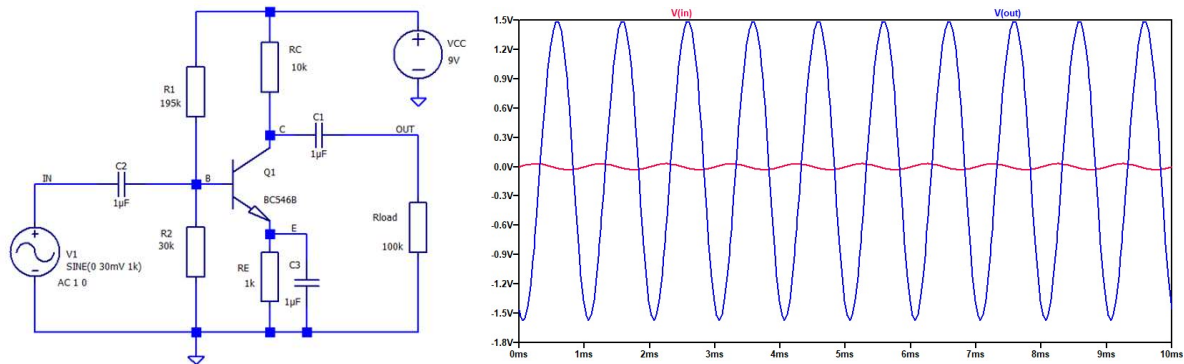
Усилвател е електронна схема, която увеличава амплитудата на сигнала.

Транзисторът работи като усилвател, ако при осигурен подходящ постоянно токов режим, към входа му е свързан **източник на променлив сигнал**, а в изхода – **товар**, върху който се получава усиленият променлив сигнал.



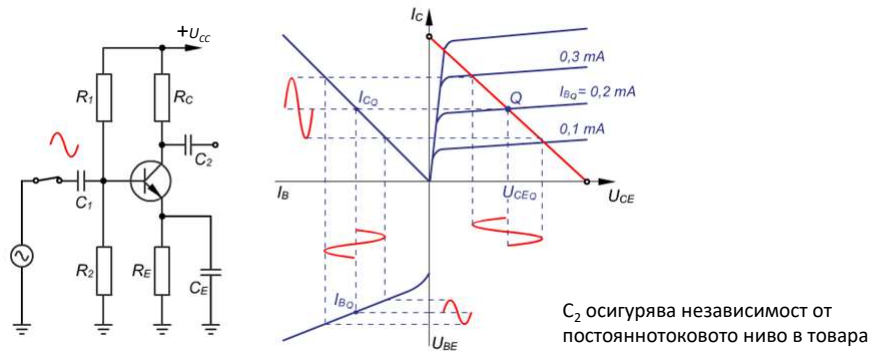
2

Пример за усилвател с биполярен транзистор



3

Графичен анализ



Променивото входно напрежение предизвиква появата на променлив ток в базата, което довежда до промяна в колекторния ток и съответно до промяна в изходното напрежение.

4

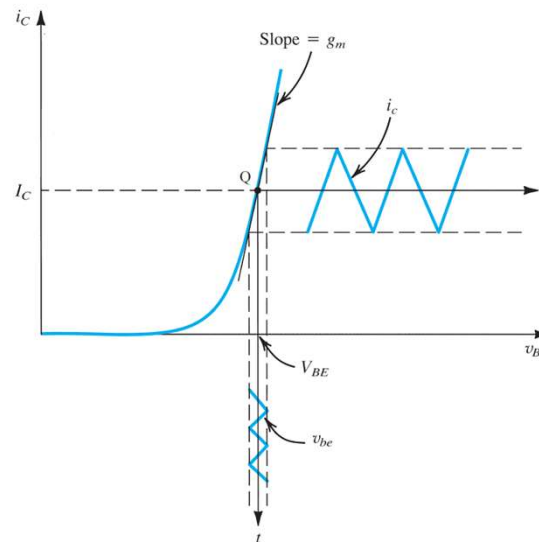
Принцип на работа на усилвател с биполярен транзистор

Предавателна характеристика

g_m – стръмност на предавателната х-ка
(transconductance)

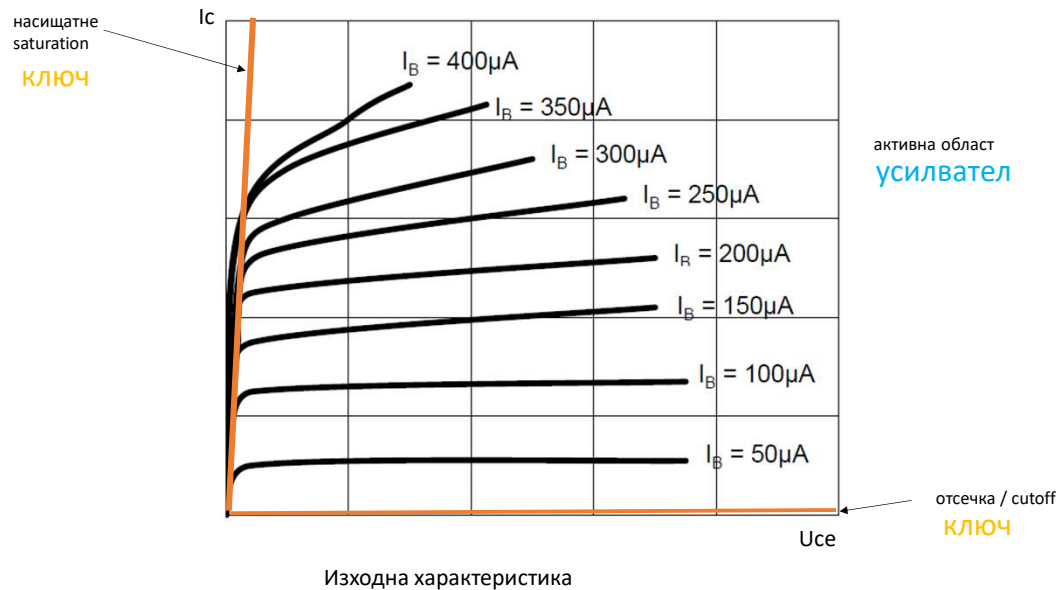
$$g_m = \left. \frac{\partial i_c}{\partial v_{be}} \right|_{i_c = I_c}$$

Как се избира работната точка Q?



5

Режими на работа на биполярен транзистор

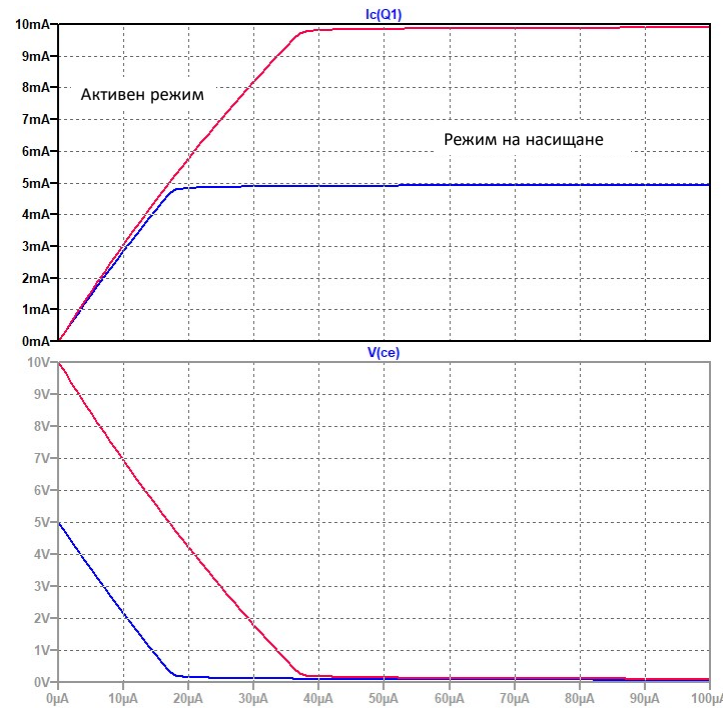
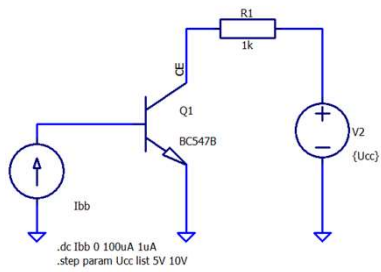


6

Режими на работа на БТ

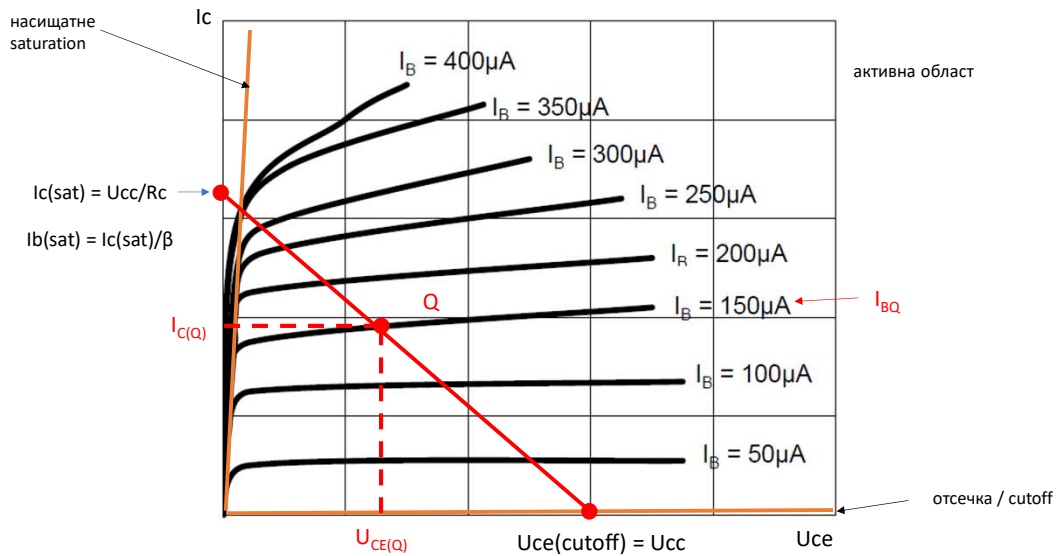
Активен режим: $I_C = h_{FE} \cdot I_B$

Режим на насищане: $I_C < h_{FE} \cdot I_B$



7

Товарна права

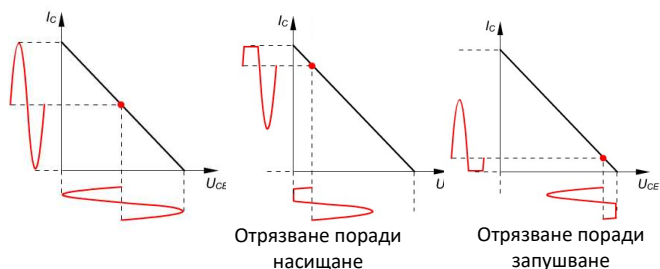
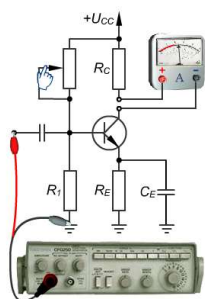


Пресечната точка на товарната права с характеристика на транзистора определя постояннотоквата **работна точка** със стойности I_{BQ} , I_{CQ} , U_{CEQ} .

При промяна на поточнотоквия режим (нови стойности на I_B , I_C , U_{CE}) работната точка се движи **само по товарната права**.

8

Влияние на работната точка



Основно изискване на усилвателите е да осигуряват линейност на усилването, т.е. да не променят формата на сигнала, а само амплитудата му.

Изкривявания се получават, когато работната точка се избере в близост до областта на насищане или на отсечка.

За максимално неизкривена амплитуда на сигнала работната точка се избира **в средата на товарната права** по постоянен ток между насищане и запушване.

9

Установяване на работна точка – фиксиран базов ток

$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} = \frac{5 - 0,7}{20 \cdot 10^3} = 215 \mu A$$

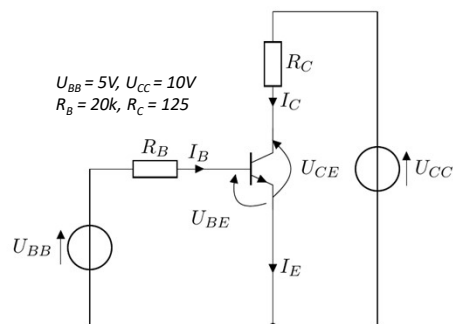
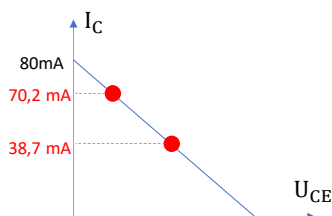
$$I_C = \beta \cdot I_B$$

hFE values are classified as follows :

rank	Q	R	S
hFE	120-270	180-390	270-560

$$I_{Cmin} = 180 \cdot 215 \cdot 10^{-6} = 38,7 \text{ mA}$$

$$I_{Cmax} = 390 \cdot 215 \cdot 10^{-6} = 70,2 \text{ mA}$$



Недостатък на схемата – силна зависимост на I_C от параметъра β , който има големи производствени толеранси и също така зависи от температурата и режима на транзистора.

В зависимост от конкретната стойност на β , транзисторът може да е както в активен режим, така и в режим на насищане.

10

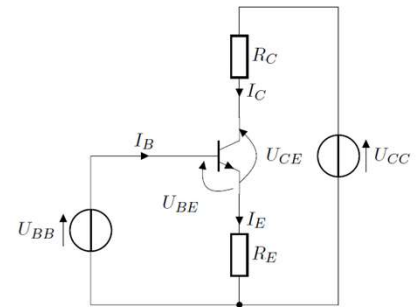
Установяване на работна точка – фиксиран емитерен ток

$$U_{BB} = U_{BE} + U_E = U_{BE} + I_E R_E$$

$$I_E = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_E}$$

$$I_C \approx I_E$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C(R_C + R_E)$$



Стойността на I_C в работната точка **не зависи от β** , което гарантира стабилност на работната точка.

11

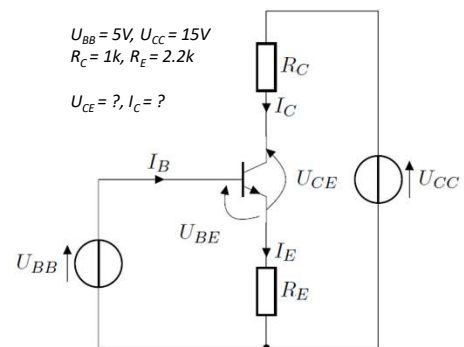
Пример - фиксиран емитерен ток

$$U_{BB} = U_{BE} + U_E = U_{BE} + I_E R_E$$

$$I_E = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_E} = \frac{5 - 0,7}{2,2 \cdot 10^3} = 1,95 \text{ mA}$$

$$I_C \approx I_E = 1,95 \text{ mA}$$

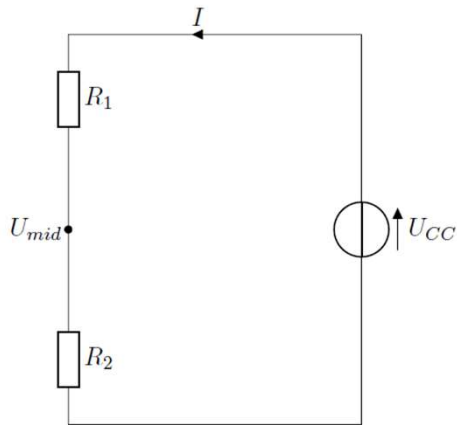
$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C - U_E = 15 \text{ V} - 1,95 \text{ mA} \cdot 1 \text{ k}\Omega - 4,3 \text{ V} = 8,8 \text{ V}$$



Стойността на I_C в работната точка **не зависи от β** , поради което **не е нужно да се определя режима на транзистора** (насищане или активен).

12

Установяване на работна точка – делител на напрежение

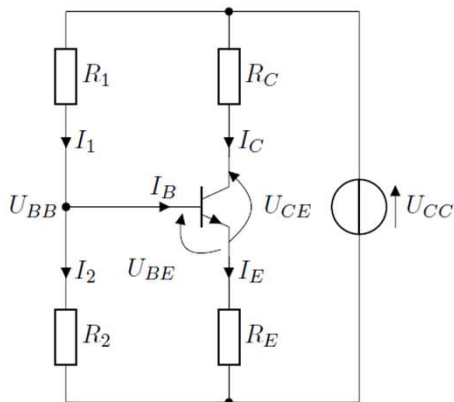


$$I = \frac{U_{CC}}{R_1 + R_2}$$

$$U_{mid} = I \cdot R_2 = \frac{U_{CC} \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

13

Установяване на работна точка – делител на напрежение



Когато $I_2 \gg I_B \therefore$

$$I_1 \approx I_2 = \frac{U_{CC}}{R_1 + R_2}$$

$$U_{BB} = I_2 \cdot R_2 = \frac{U_{CC} \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

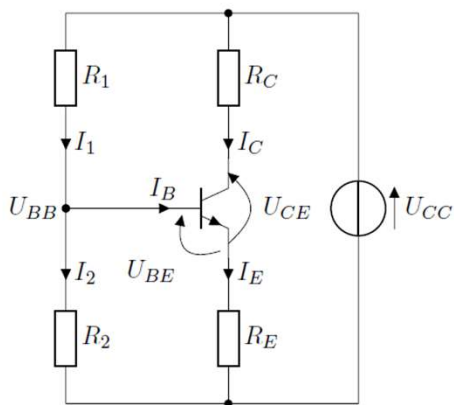
$$I_C \approx I_E = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_E}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C(R_C + R_E)$$

Предимство на схемата – не е необходим отделен източник за U_{BB}

14

Пример – Определяне на постоянно-токов режим на усилвател



$$U_{CC} = 9V, R_C = 10k\Omega, R_E = 1k\Omega$$

$$R_1 = 195k\Omega, R_2 = 30k\Omega$$

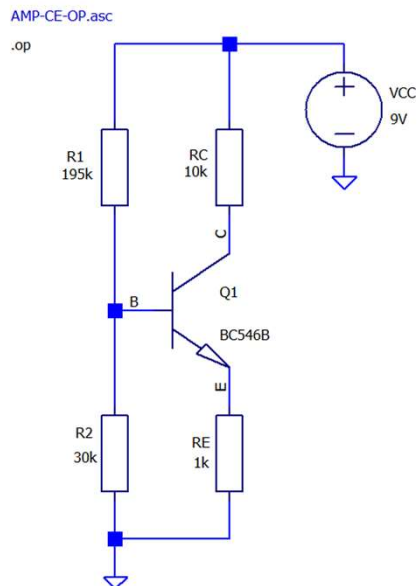
$$I_C = ?, U_{CE} = ?$$

$$\begin{aligned} U_{BB} &= U_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \\ &= 9V \cdot \frac{30k\Omega}{195k\Omega + 30k\Omega} \\ &= 9 \cdot \frac{30}{225} = 1,2V \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_C \approx I_E &= \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_E} \\ &= \frac{1,2V - 0,7V}{1k\Omega} \\ &= 0,5mA \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{CE} &= U_{CC} - I_C(R_C + R_E) \\ &= 9V - 0,5mA(10k\Omega + 1k\Omega) \\ &= 9V - 0,5mA \cdot 11k\Omega \\ &= 9V - 5,5V = 3,5V \end{aligned}$$

15



Резултати от приблизителните изчисления

$$U_{bb} = 1,2V$$

$$I_c = 0,5mA$$

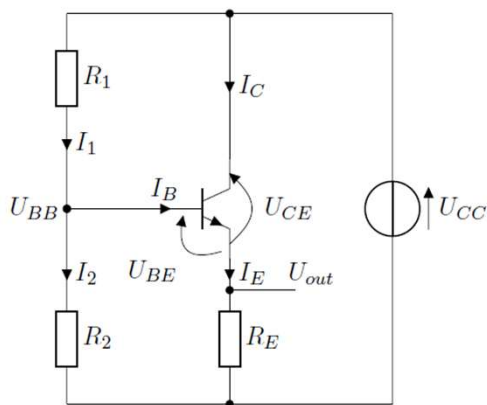
$$U_{ce} = 3,5V$$

--- Operating Point ---

V(c):	3.69657	voltage
V(b):	1.15318	voltage
V(e):	0.532144	voltage
V(n001):	9	voltage
Ic(Q1):	0.000530343	device_current
Ib(Q1):	1.80065e-006	device_current
Ie(Q1):	-0.000532144	device_current
I(R2):	3.84394e-005	device_current
I(Re):	0.000532144	device_current
I(Rc):	0.000530343	device_current
I(R1):	4.02401e-005	device_current
I(Vcc):	-0.000570584	device_current

16

Пример - Схема общ колектор



$$U_{CC} = 10V, R_E = 1k\Omega$$

$$R_1 = 100k\Omega, R_2 = 150k\Omega$$

$$I_C = ?, U_{CE} = ?$$

$$U_{BB} = U_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$= 10V \cdot \frac{150k\Omega}{100k\Omega + 150k\Omega}$$

$$= 10 \cdot \frac{150}{250} = 6V$$

$$I_C \approx I_E = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_E}$$

$$= \frac{6V - 0,7V}{1k\Omega}$$

$$= 6,3mA$$

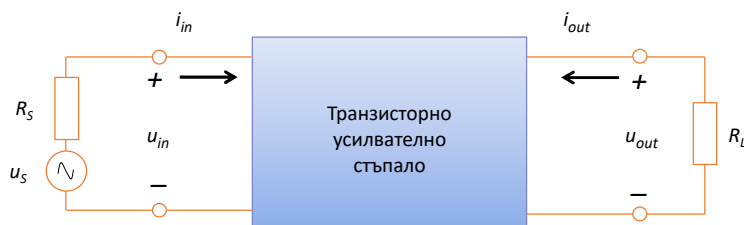
$$U_{CE} = U_{CC} - I_C \cdot R_E$$

$$= 10V - 6,3mA \cdot 1k\Omega$$

$$= 10V - 6,3V = 3,7V$$

17

Динамични параметри



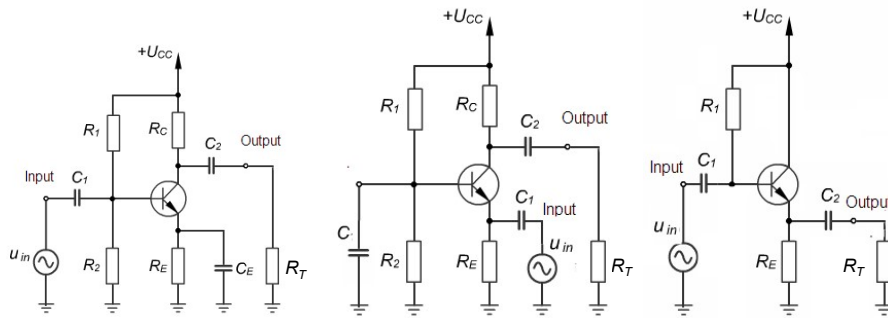
Динамичните параметри характеризират поведението на транзисторните усилватели по променлив ток.

$$A_U = \frac{u_{out}}{u_{in}} \quad A_I = \frac{i_{out}}{i_{in}} \quad A_P = A_U A_I \quad r_{in} = \frac{u_{in}}{i_{in}} \quad r_{out} = \frac{u_{out}}{i_{out}}$$

За изчисления им се използват еквивалентни схеми на транзисторите по променлив ток.

18

Схеми на усилватели



Усилвател OE

 A_I – висок A_U – висок

Усилвател ОБ

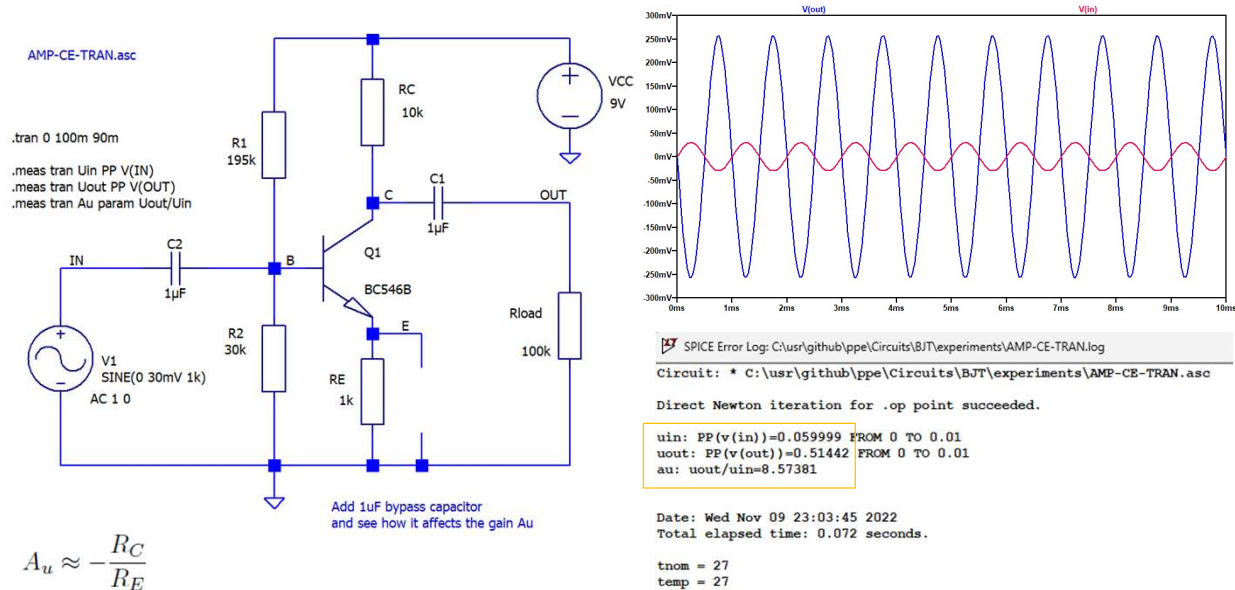
 $A_I < 1$ A_U – висок

Усилвател ОК

 A_I – висок $A_U < 1$

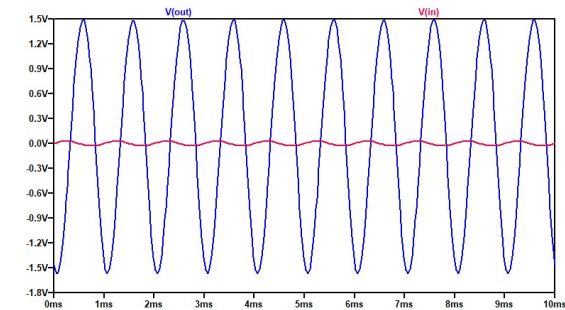
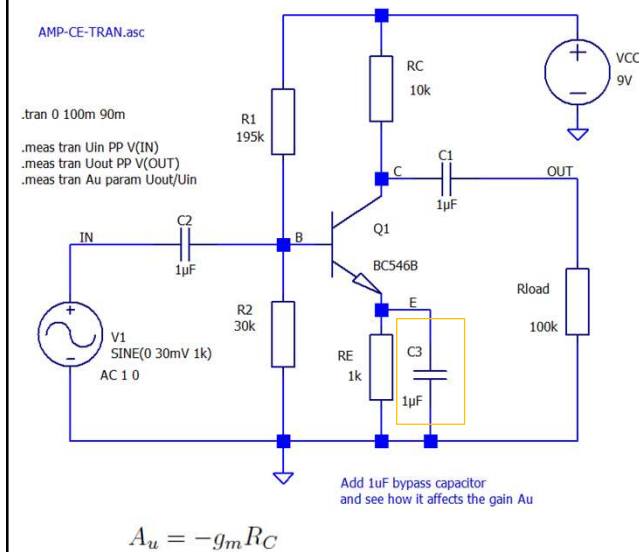
19

Пример – Коефициент A_u и входно съпротивление на усилвател



20

Пример – Коефициент A_u и входно съпротивление на усилвател



```
SPICE Error Log: C:\usr\github\ppe\Circuits\BJT\experiments\AMP-CE-TRAN.log
Circuit: * C:\usr\github\ppe\Circuits\BJT\experiments\AMP-CE-TRAN.asc
Direct Newton iteration for .op point succeeded.

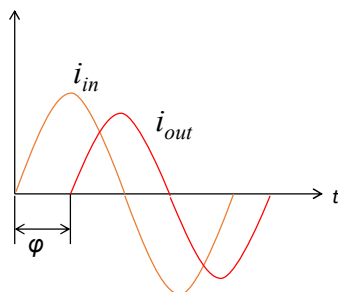
uin: PP(v(in))=0.0599976 FROM 0 TO 0.01
uout: PP(v(out))=3.05542 FROM 0 TO 0.01
au: uout/uin=50.9257

Date: Wed Nov 09 23:08:56 2022
Total elapsed time: 0.038 seconds.

tnom = 27
temp = 27
```

21

Робота при високи честоти



При високи честоти върху поведението на транзистора започват да оказват влияние:

- инерционността на процесите на пренасяне на токоносителите от емитерния до колекторния преход
- капацитетите на преходите
- паразитните капацитети на корпуса и индуктивности на изводите

В резултат се наблюдава намаляване на амплитудата на изходния сигнал и изоставането му по фаза (закъсняване) спрямо входния.

За оценка на усилвателните свойства на транзистора при високи честоти се използват **граничните честоти**.

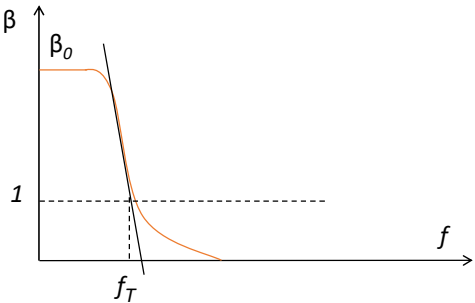
22

Транзитна честота

Произведението на модула на диференциалния коефициент на усилване β и текущата честота се нарича транзитна честота f_T .

$$\beta \cdot f = f_T$$

Ако $f = f_T$, $\beta \approx 1$



Транзитната честота f_T може да се дефинира и като честотата, при която модулет на коефициента β става приблизително единица.

23

Транзитна честота (gain bandwidth product) и Noise Figure

SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS					
Current - Gain - Bandwidth Product ($I_C = 10\text{ mA}$, $V_{CE} = 5.0\text{ V}$, $f = 100\text{ MHz}$)	BC546 BC547 BC548	f_T	150 150 150	300 300 300	– – –
Output Capacitance ($V_{CE} = 10\text{ V}$, $I_C = 0$, $f = 1.0\text{ MHz}$)		C_{obo}	–	1.7	4.5
Input Capacitance ($V_{BE} = 0.5\text{ V}$, $I_C = 0$, $f = 1.0\text{ MHz}$)		C_{ibo}	–	10	–
Small - Signal Current Gain ($I_C = 2.0\text{ mA}$, $V_{CE} = 5.0\text{ V}$, $f = 1.0\text{ kHz}$)	BC546 BC547/548 BC547A BC546B/547B/548B BC547C/548C	β_{fe}	125 125 125 240 450	– – 220 330 600	500 900 260 500 900
Noise Figure ($I_C = 0.2\text{ mA}$, $V_{CE} = 5.0\text{ V}$, $R_S = 2\text{ k}\Omega$, $f = 1.0\text{ kHz}$, $\Delta f = 200\text{ Hz}$)	BC546 BC547 BC548	NF	– – –	2.0 2.0 2.0	10 10 10

$NF = SNR_{in,dB} - SNR_{out,dB}$

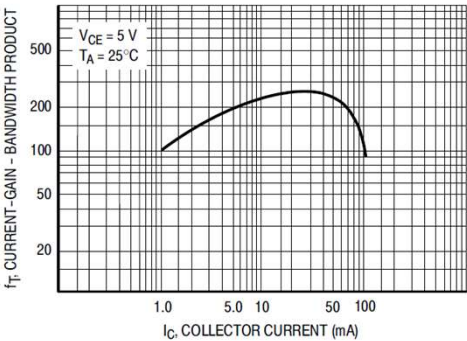


Figure 12. Current-Gain - Bandwidth Product

BC546

24

Пример – променливо-токов анализ на усилвател

Weniger, aber besser

