

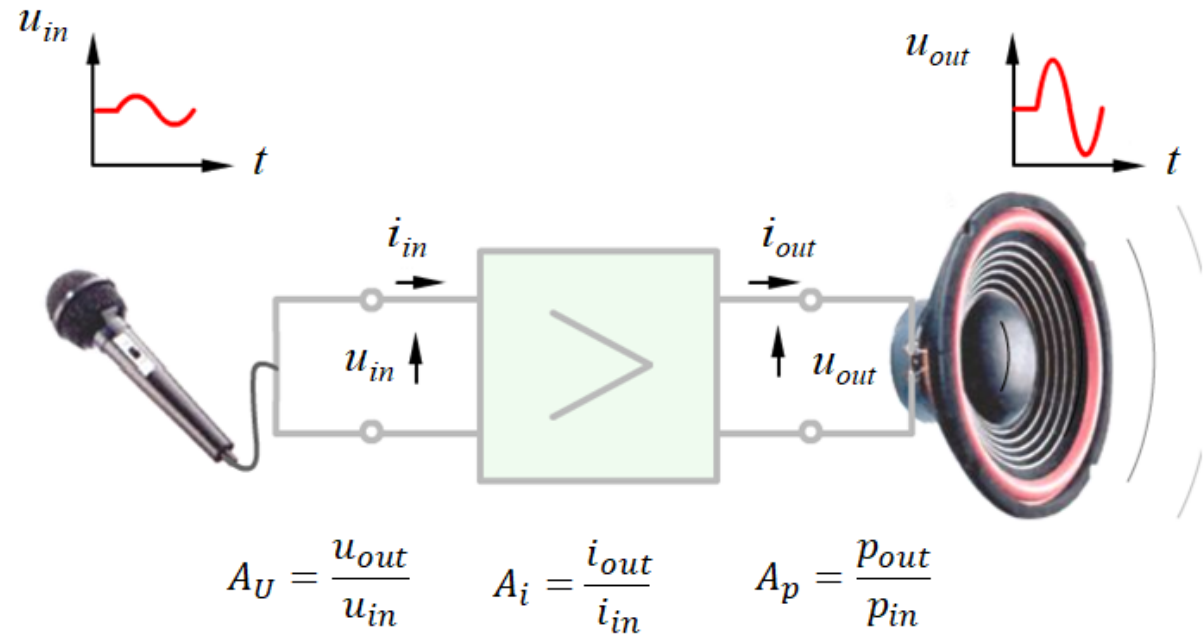


Работа на биполярен транзистор като усилвател

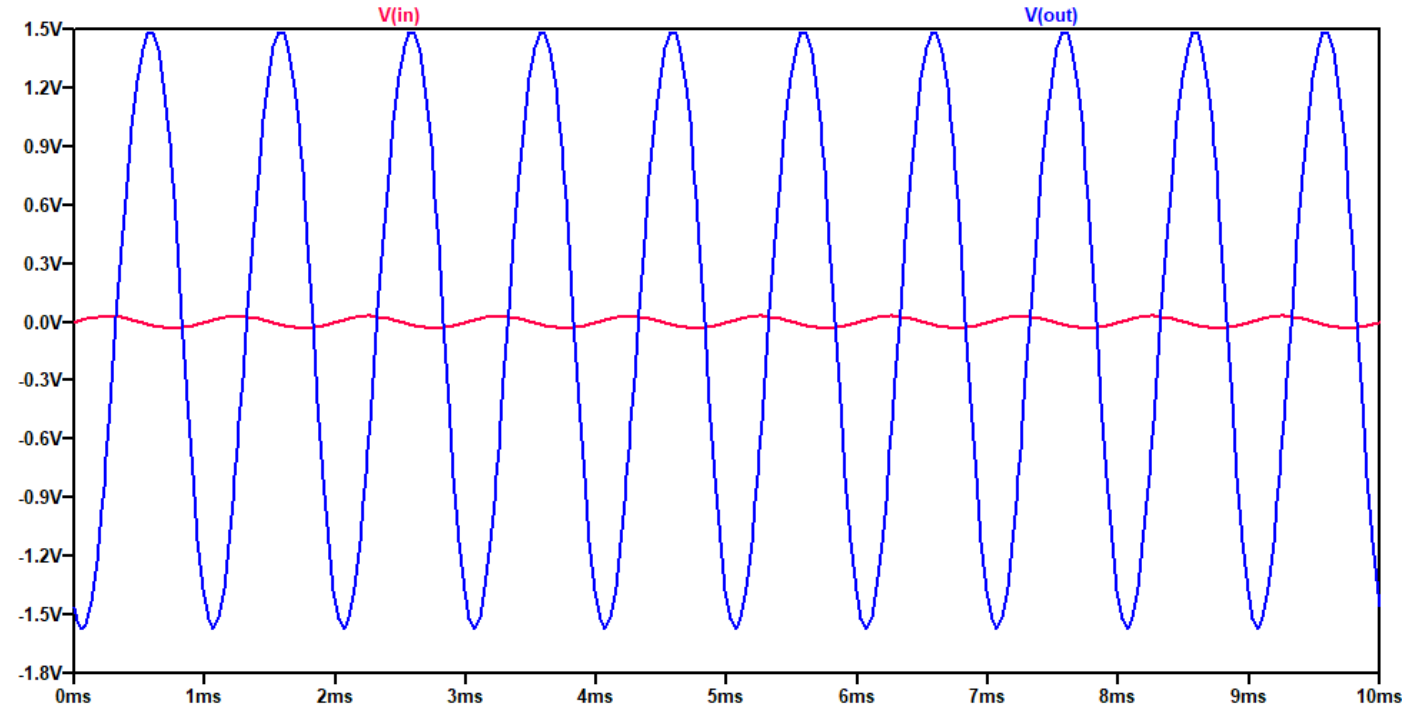
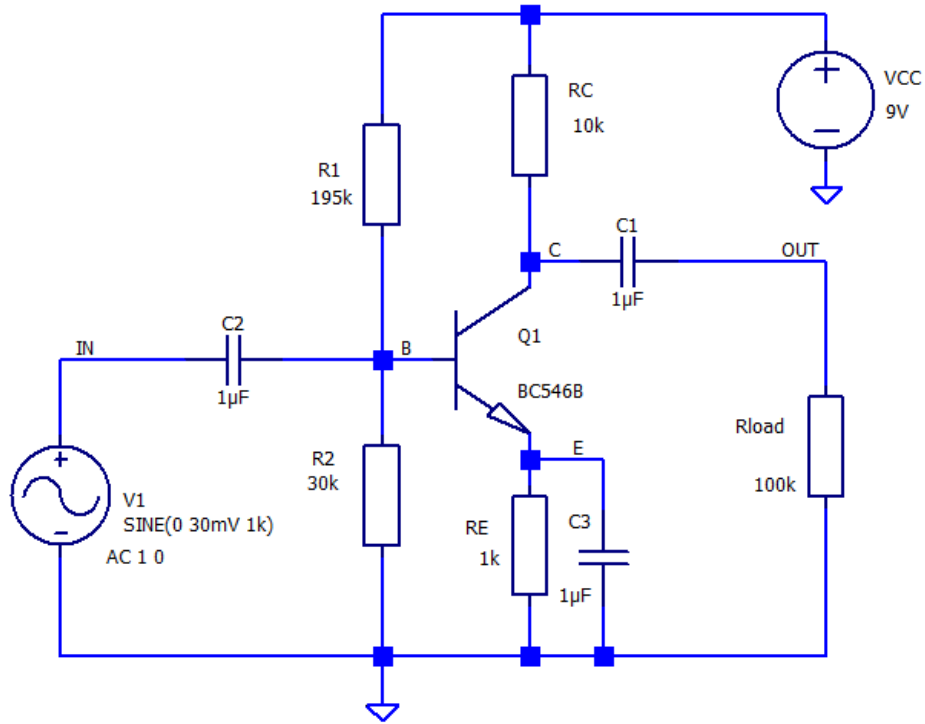
Какво е усилвател?

Усилвател е електронна схема, която увеличава амплитудата на сигнала.

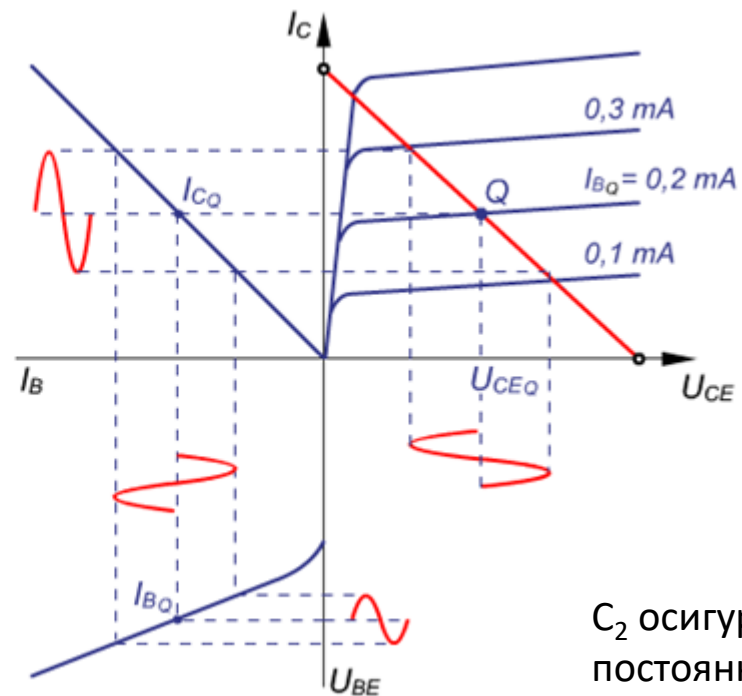
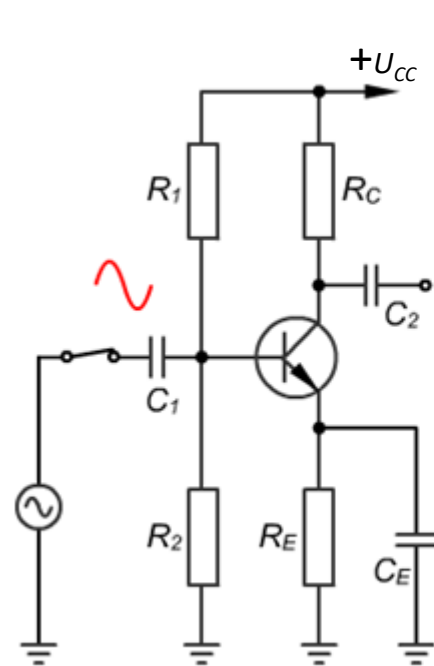
Транзисторът работи като усилвател, ако при осигурен подходящ постоянно токов режим, към входа му е свързан **източник на променлив сигнал**, а в изхода – **товар**, върху който се получава усиленият променлив сигнал.



Пример за усилвател с биполярен транзистор



Графичен анализ



C_2 осигурява независимост от
постояннотоковото ниво в товара

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

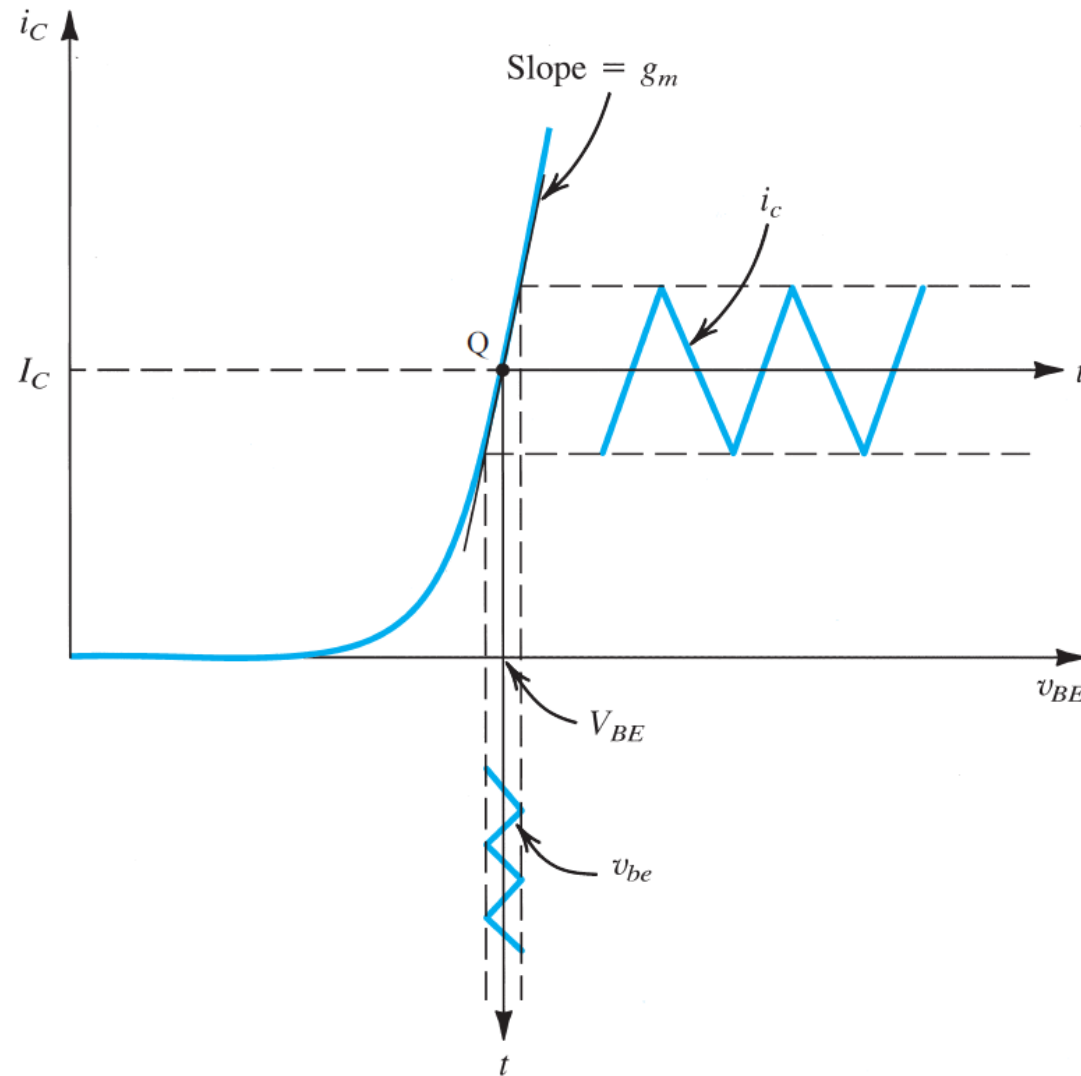
Принцип на работа на усилвател с биполярен транзистор

Предавателна характеристика

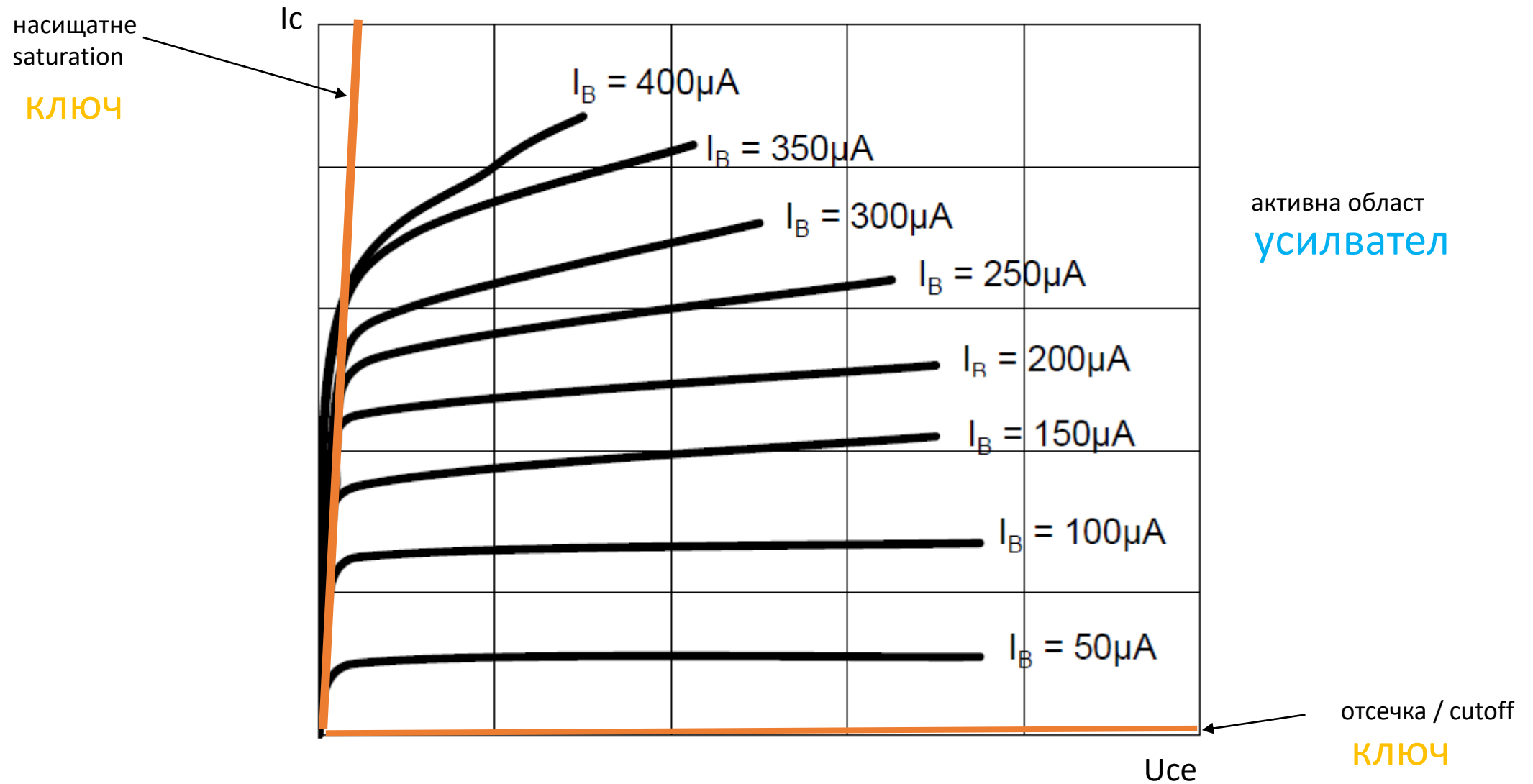
g_m – стръмност на предавателната х-ка
(transconductance)

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

Как се избира работната точка Q?



Режими на работа на биполярен транзистор

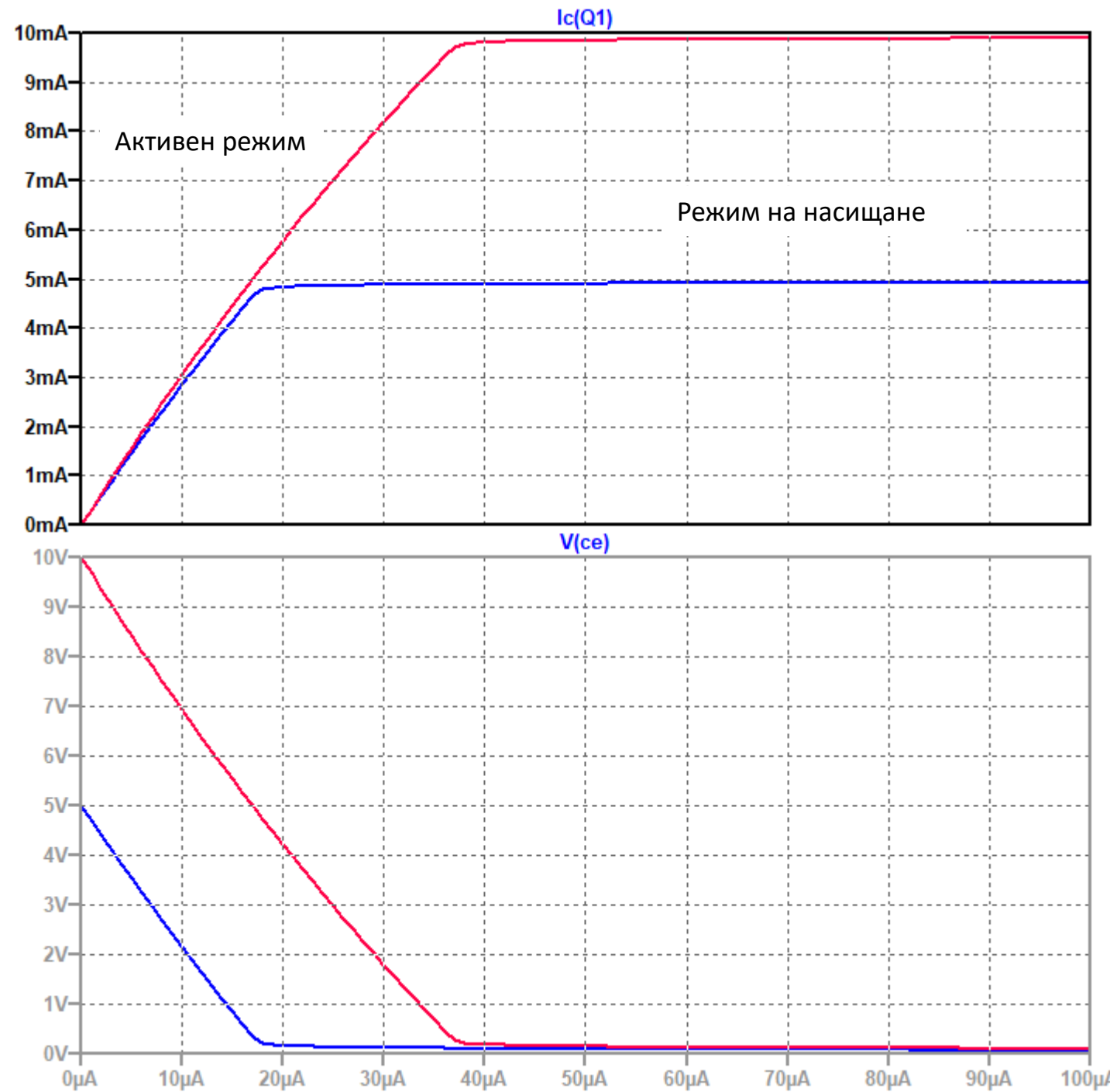
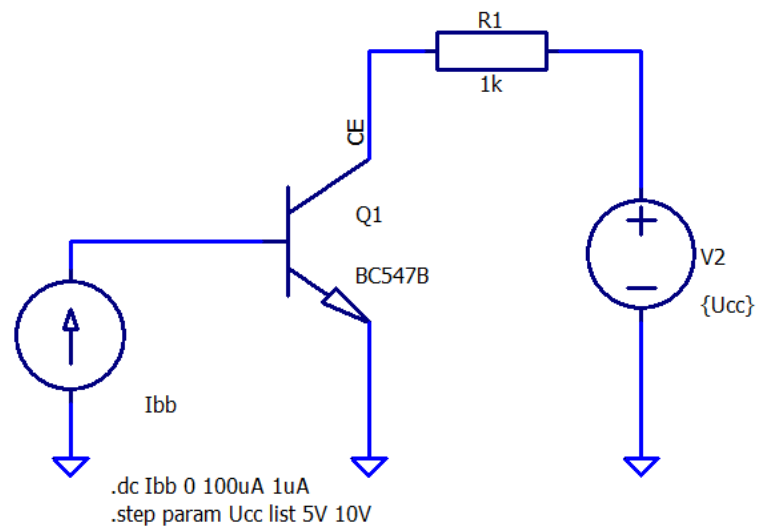


Изходна характеристика

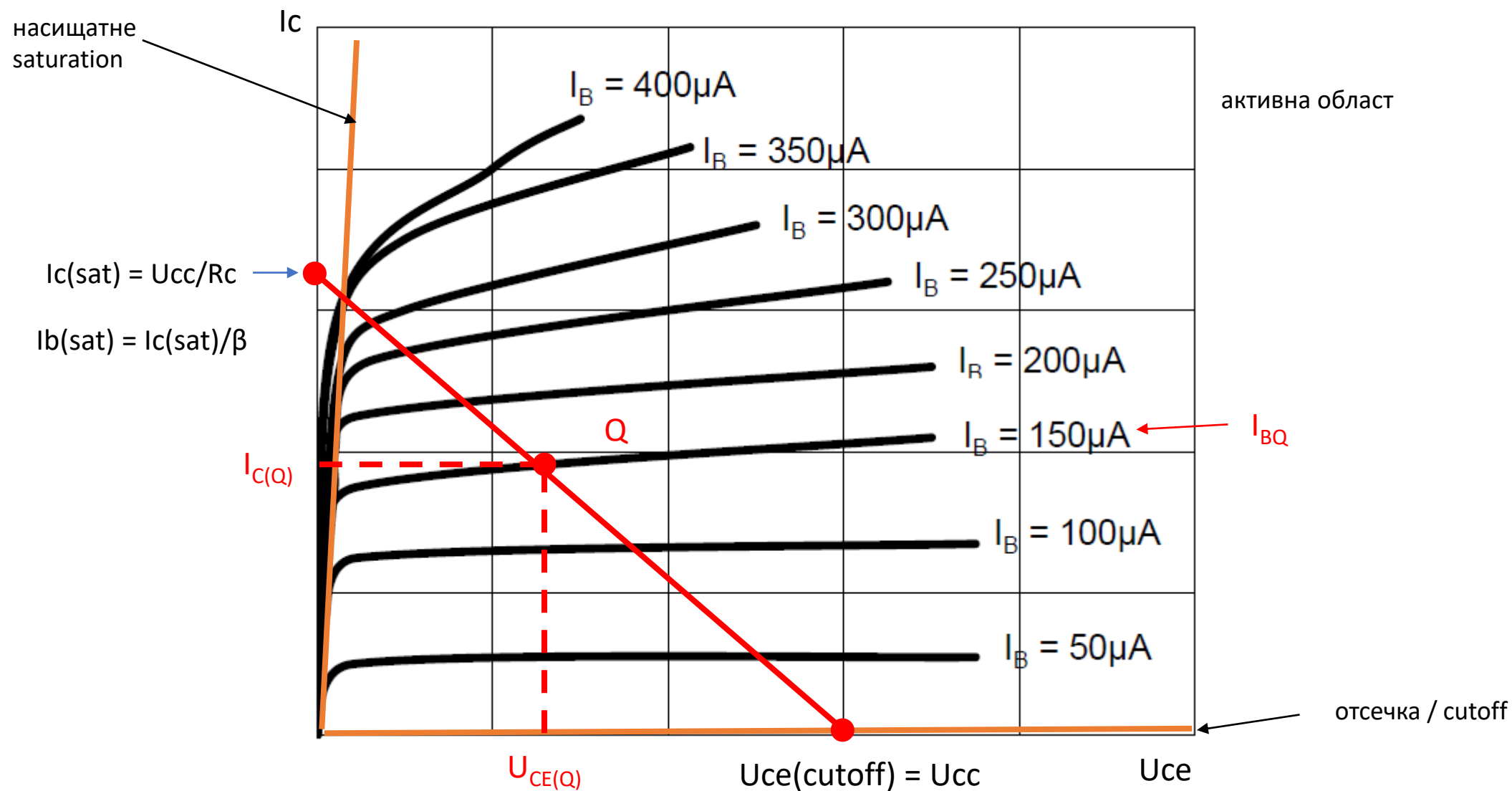
Режими на работа на БТ

Активен режим: $I_c = h_{FE} \cdot I_b$

Режим на насищане: $I_c < h_{FE} \cdot I_b$



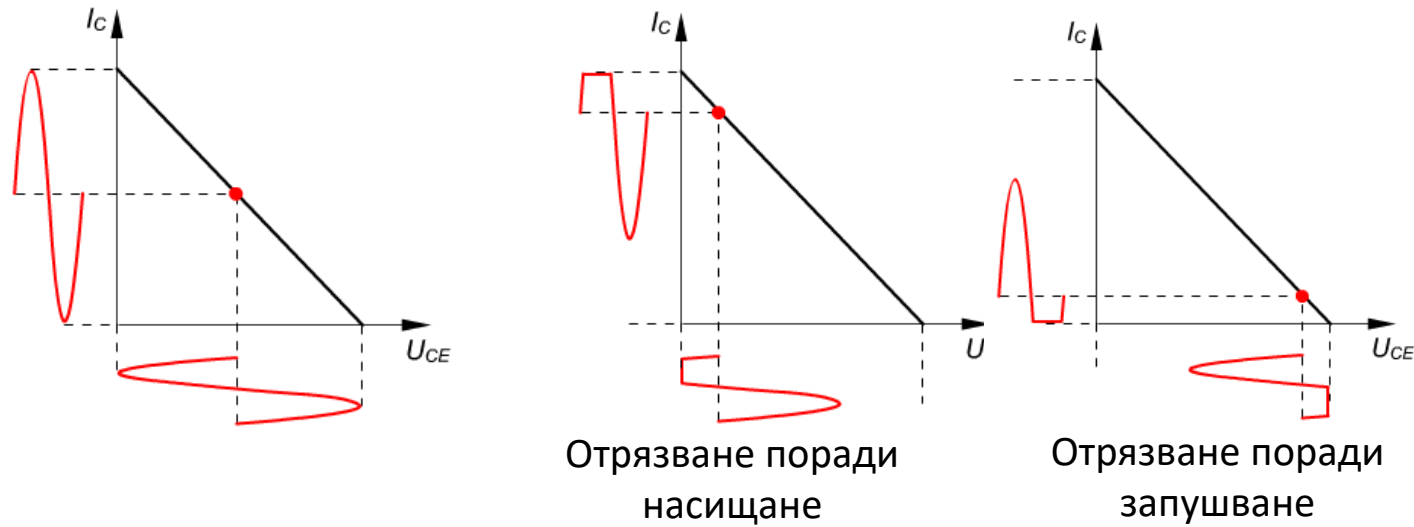
Товарна права



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

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

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.**

Установяване на работна точка – фиксиран базов ток

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

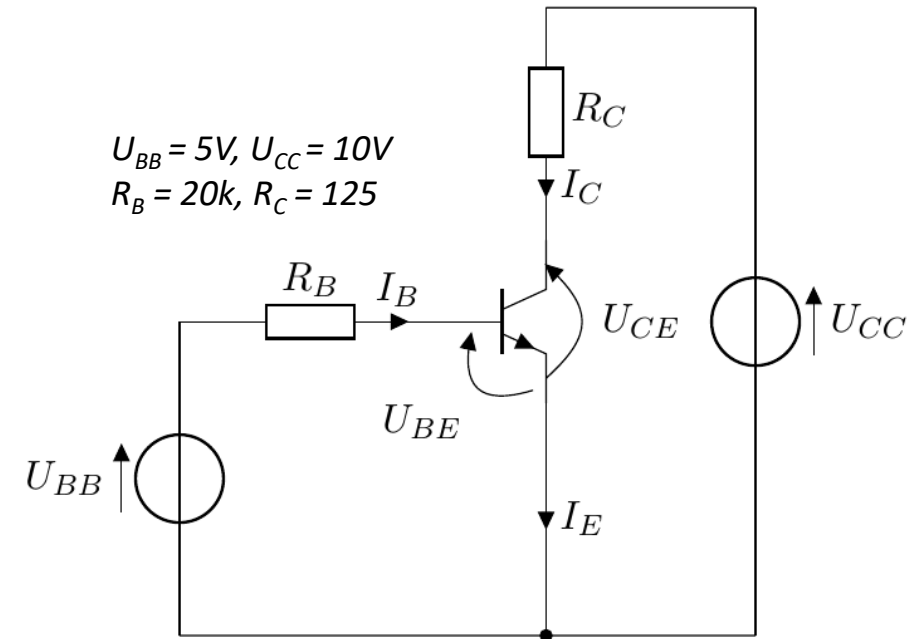
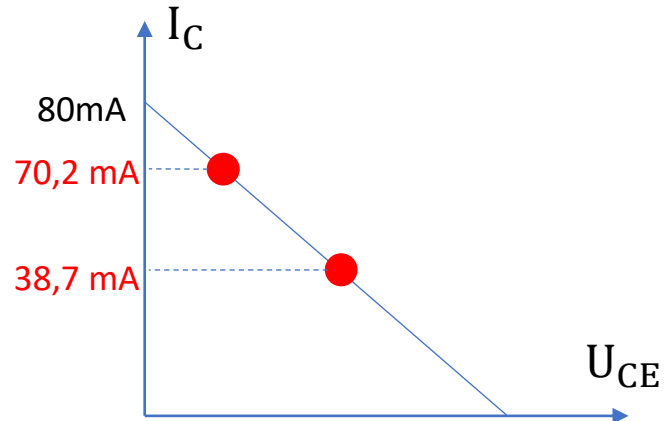
$$I_C = \beta \cdot I_B$$

h_{FE} values are classified as follows :

rank	Q	R	S
h_{FE}	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.

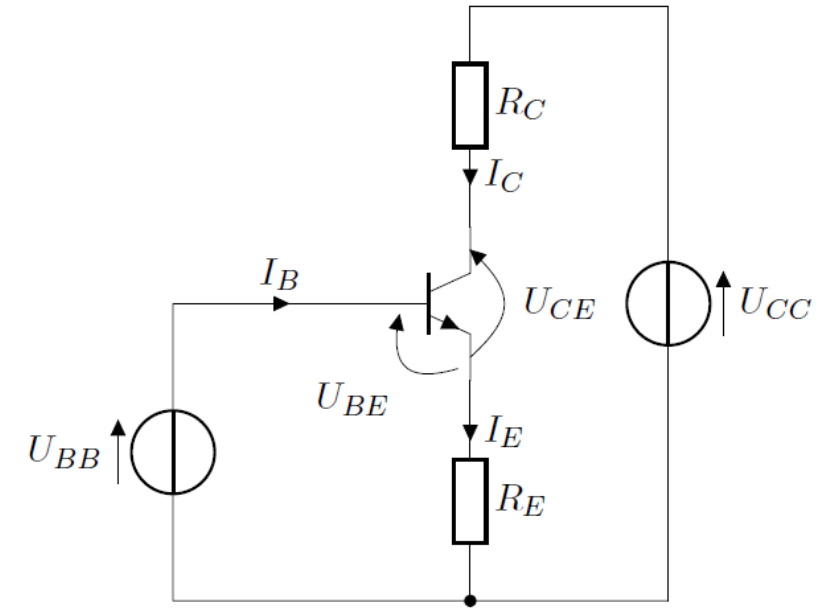
Установяване на работна точка – фиксиран емитерен ток

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

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

$$I_C \approx I_E$$

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



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

Пример - фиксиран емитерен ток

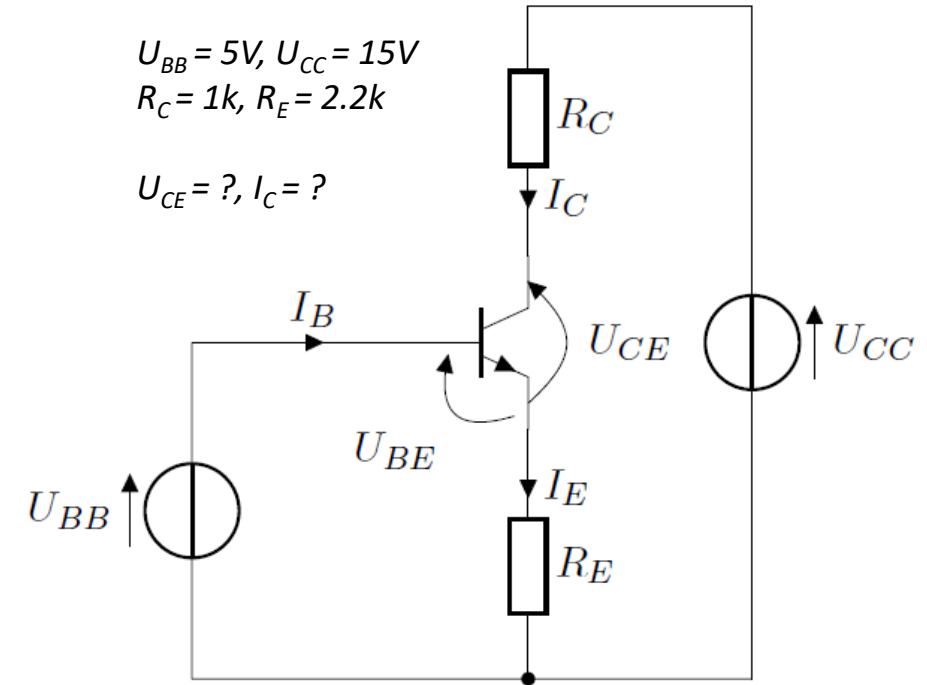
$$U_{BB} = U_{BE} + U_E = U_{BE} + I_E R_E$$

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

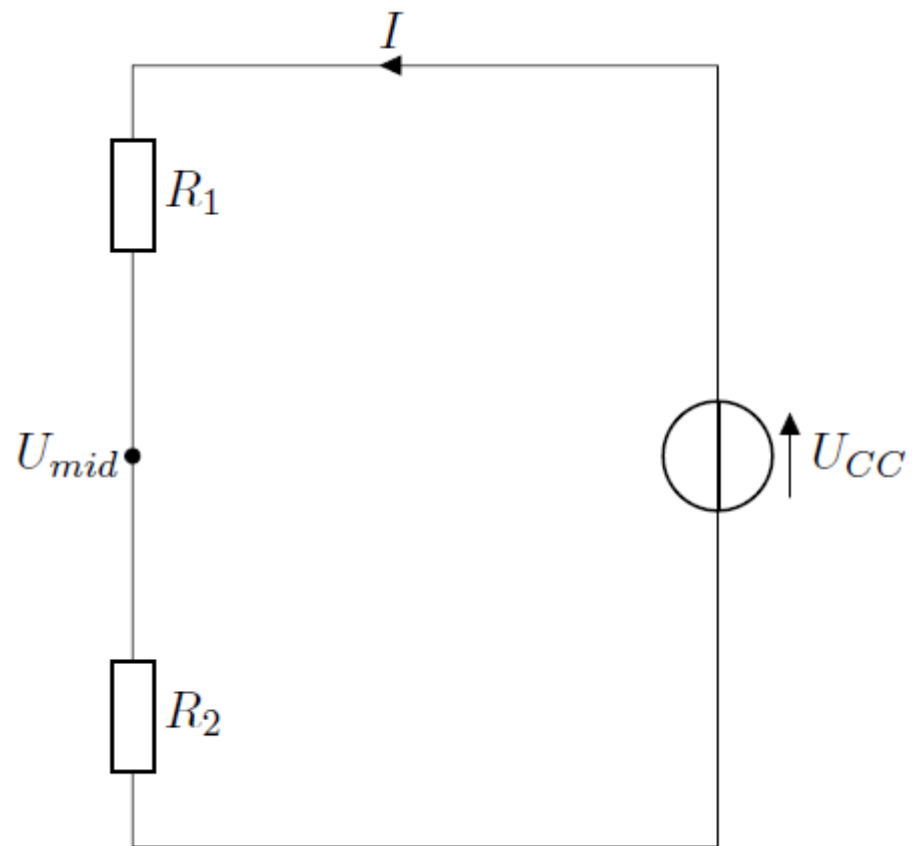
$$I_C \approx I_E = 1.95 \text{mA}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C - U_E = 15 \text{V} - 1,95 \text{mA} \cdot 1 \text{k}\Omega - 4.3 \text{V} = 8,8 \text{V}$$

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).



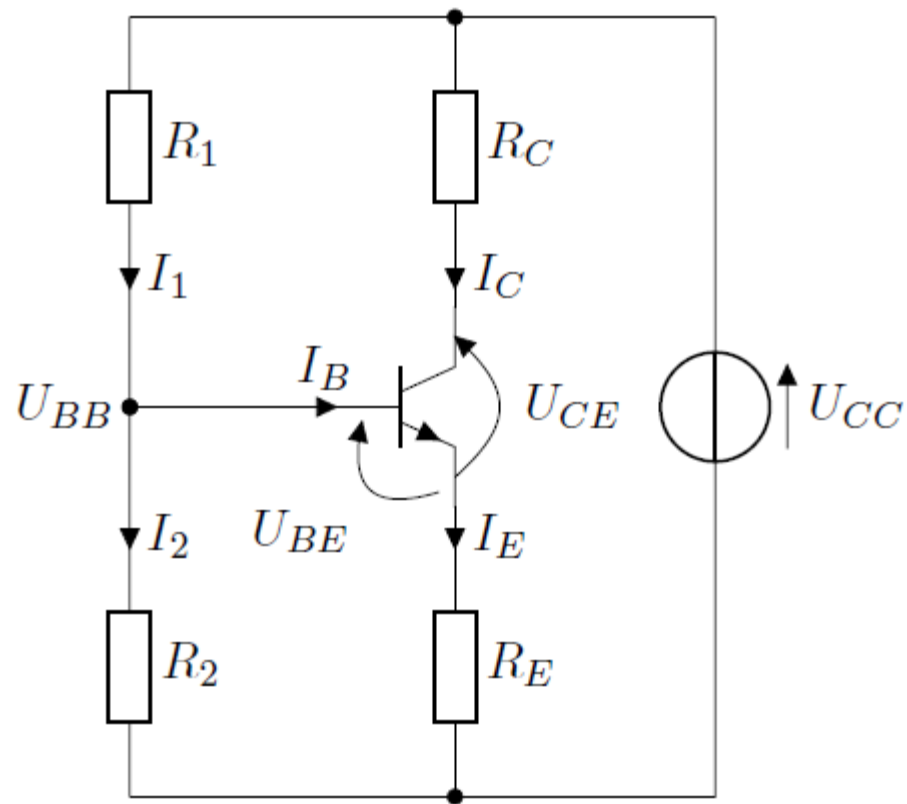
Делител на напрежение



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

$$\begin{aligned} U_{mid} &= I \cdot R_2 \\ &= \frac{U_{CC} \cdot R_2}{R_1 + R_2} \end{aligned}$$

Установяване на работна точка с делител на напрежение



Когато $I_2 \gg I_B \therefore$

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

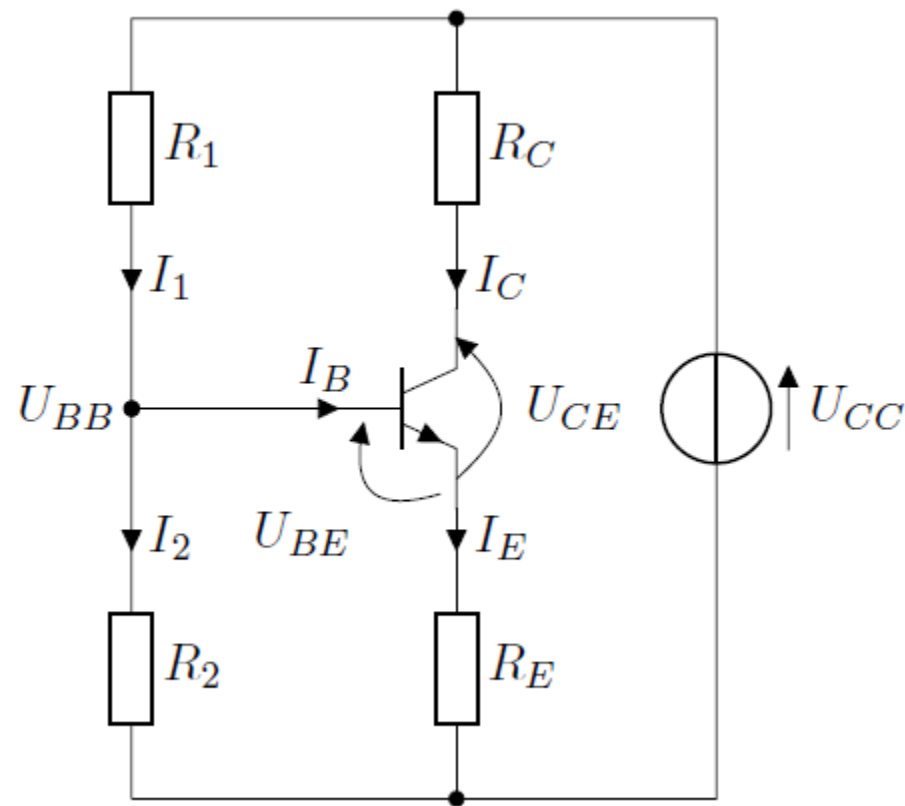
$$\begin{aligned} U_{BB} &= I_2 \cdot R_2 \\ &= \frac{U_{CC} \cdot R_2}{R_1 + R_2} \end{aligned}$$

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

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

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

Пример – Определяне на постоянно-токов режим на усилвател



$$U_{CC} = 9V, R_C = 10k\Omega, R_E = 1k\Omega$$
$$R_1 = 195k\Omega, R_2 = 30k\Omega$$

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

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

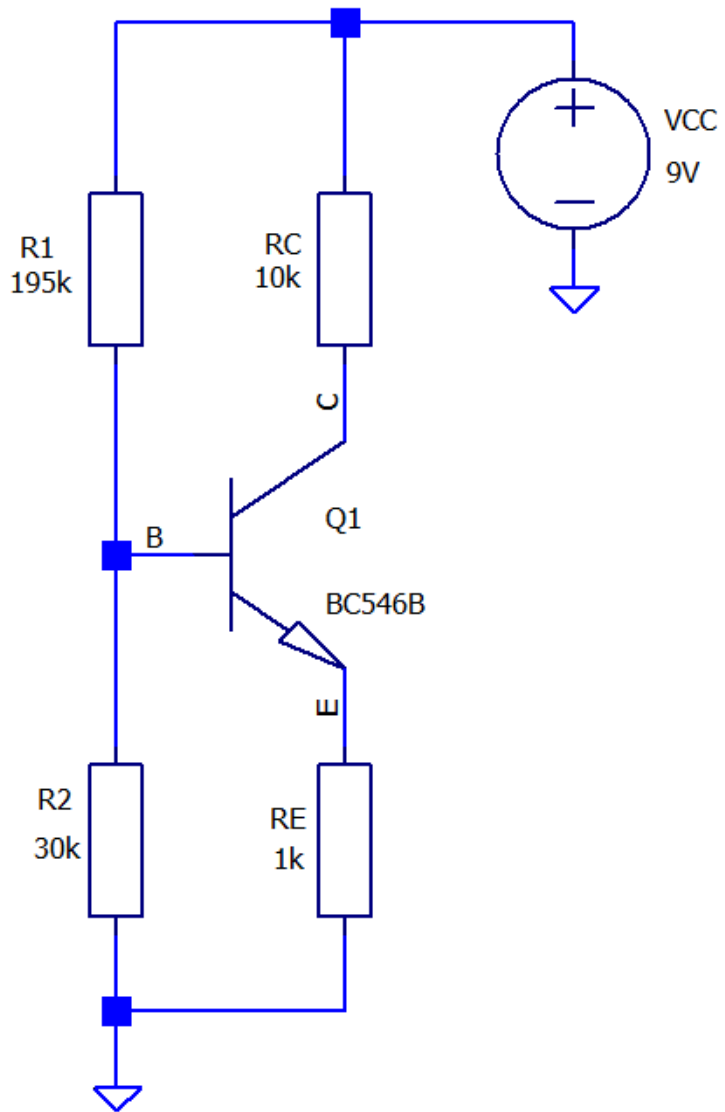
$$I_C \approx I_E = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_E}$$
$$= \frac{1,2V - 0,7V}{1k\Omega}$$
$$= 0,5mA$$

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

Проверка с LTSpice

AMP-CE-OP.asc

.op



Резултати от приблизителните изчисления

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

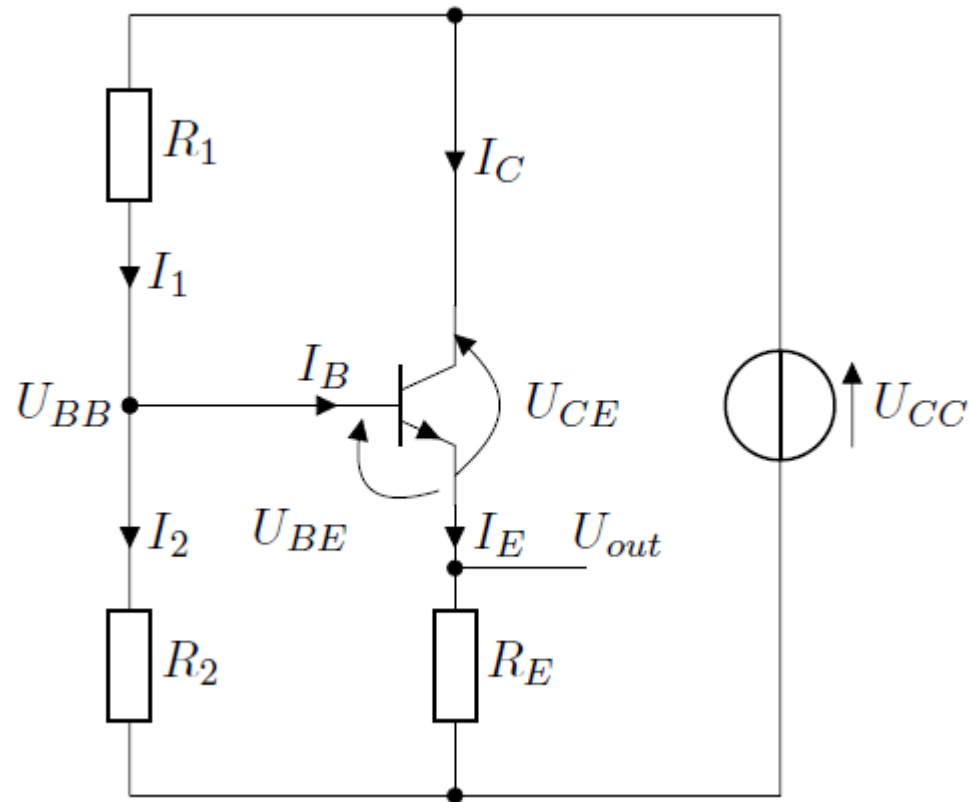
$$I_c = 0,5mA$$

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

--- 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

Пример – Усилвател общ колектор



$$U_{CC} = 10V, R_E = 1k\Omega$$
$$R_1 = 100k\Omega, R_2 = 150k\Omega$$

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

$$U_{BB} = U_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$
$$= 10V \cdot \frac{150k\Omega}{100k\Omega + 150k\Omega}$$
$$= 10 \cdot \frac{150}{250} = 6V$$

$$I_C \approx I_E = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_E}$$
$$= \frac{6V - 0,7V}{1k\Omega}$$
$$= 6,3mA$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C \cdot R_E$$
$$= 10V - 6,3mA \cdot 1k\Omega$$
$$= 10V - 6,3V = 3,7V$$

Динамични параметри

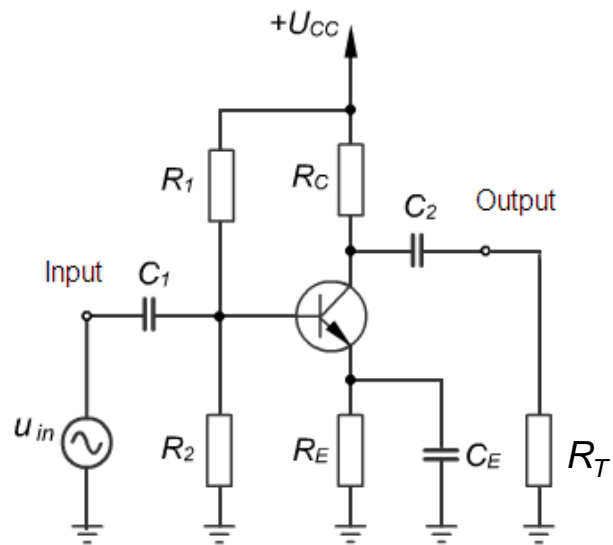


Динамичните параметри характеризират поведението на транзисторните усилватели по променлив ток.

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

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

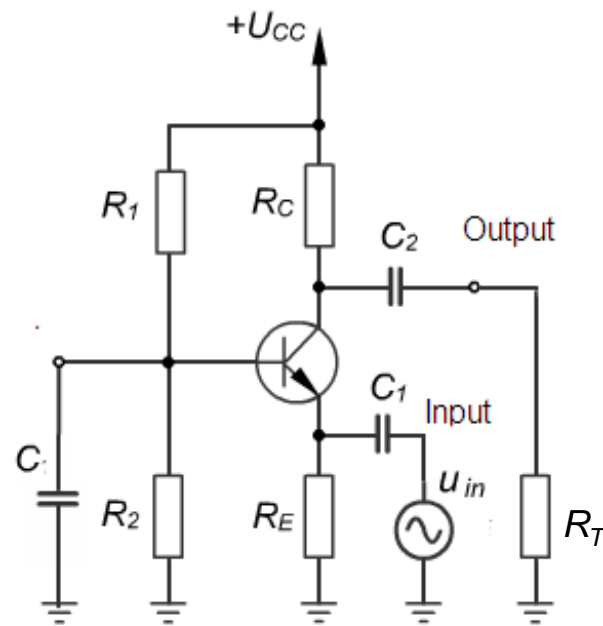
Схеми на усилватели



Усилвател ОЕ

A_I – висок

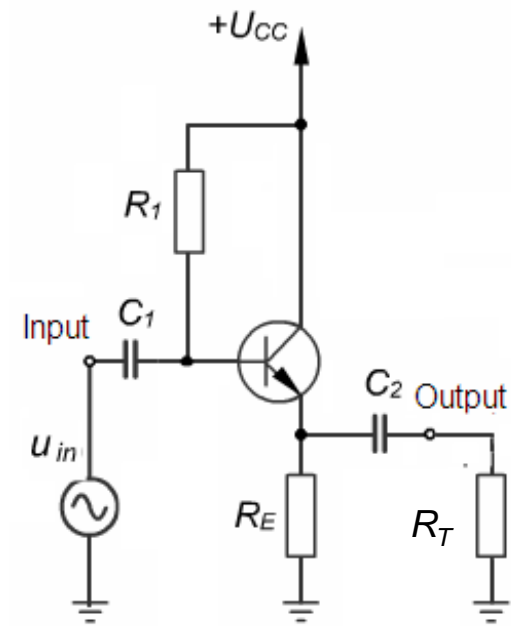
A_U – висок



Усилвател ОБ

$A_I < 1$

A_U – висок

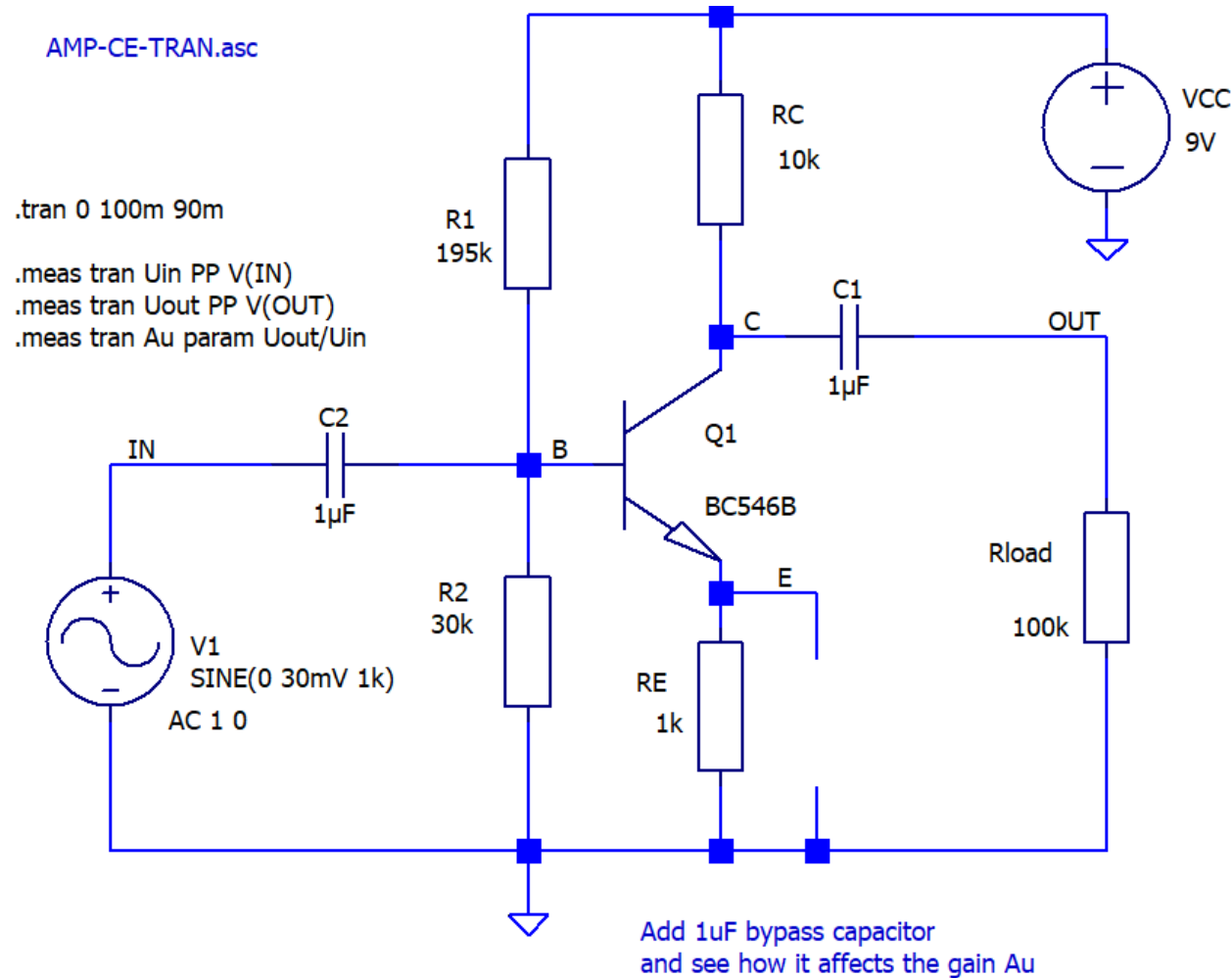


Усилвател ОК

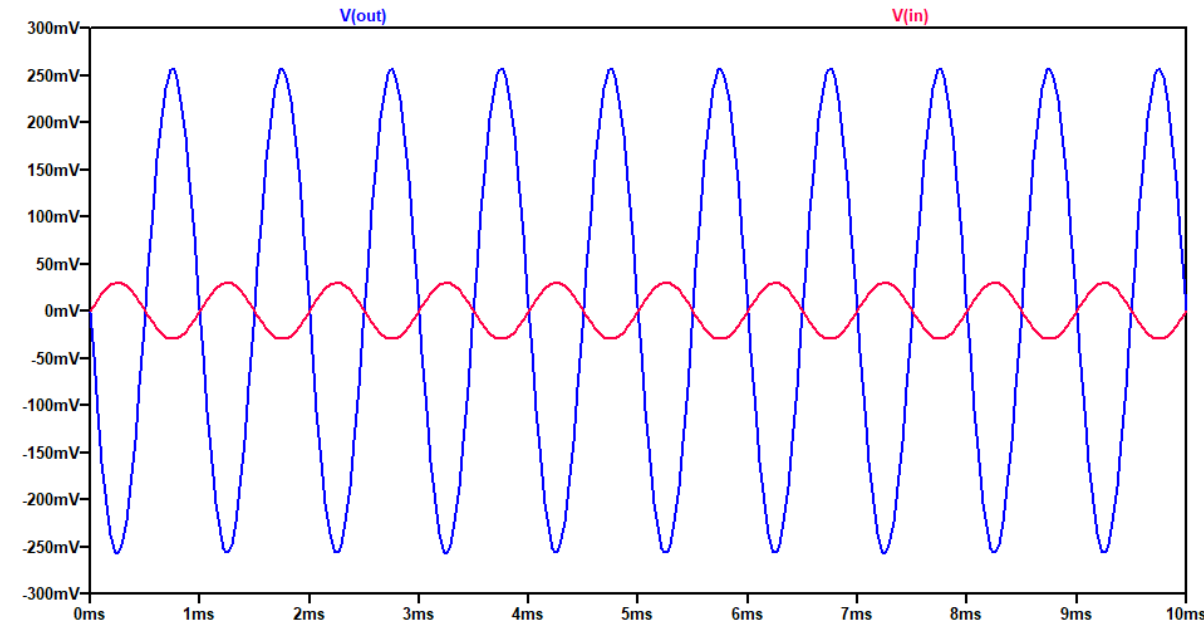
A_I – висок

$A_U < 1$

Пример – Коефициент A_u и входно съпротивление на усилвател



$$A_u \approx -\frac{R_C}{R_E}$$



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))=0.059999 FROM 0 TO 0.01
uout: PP(v(out))=0.51442 FROM 0 TO 0.01
au: uout/uin=8.57381

Date: Wed Nov 09 23:03:45 2022

Total elapsed time: 0.072 seconds.

tnom = 27

temp = 27

Пример – Коефициент A_u и входно съпротивление на усилвател

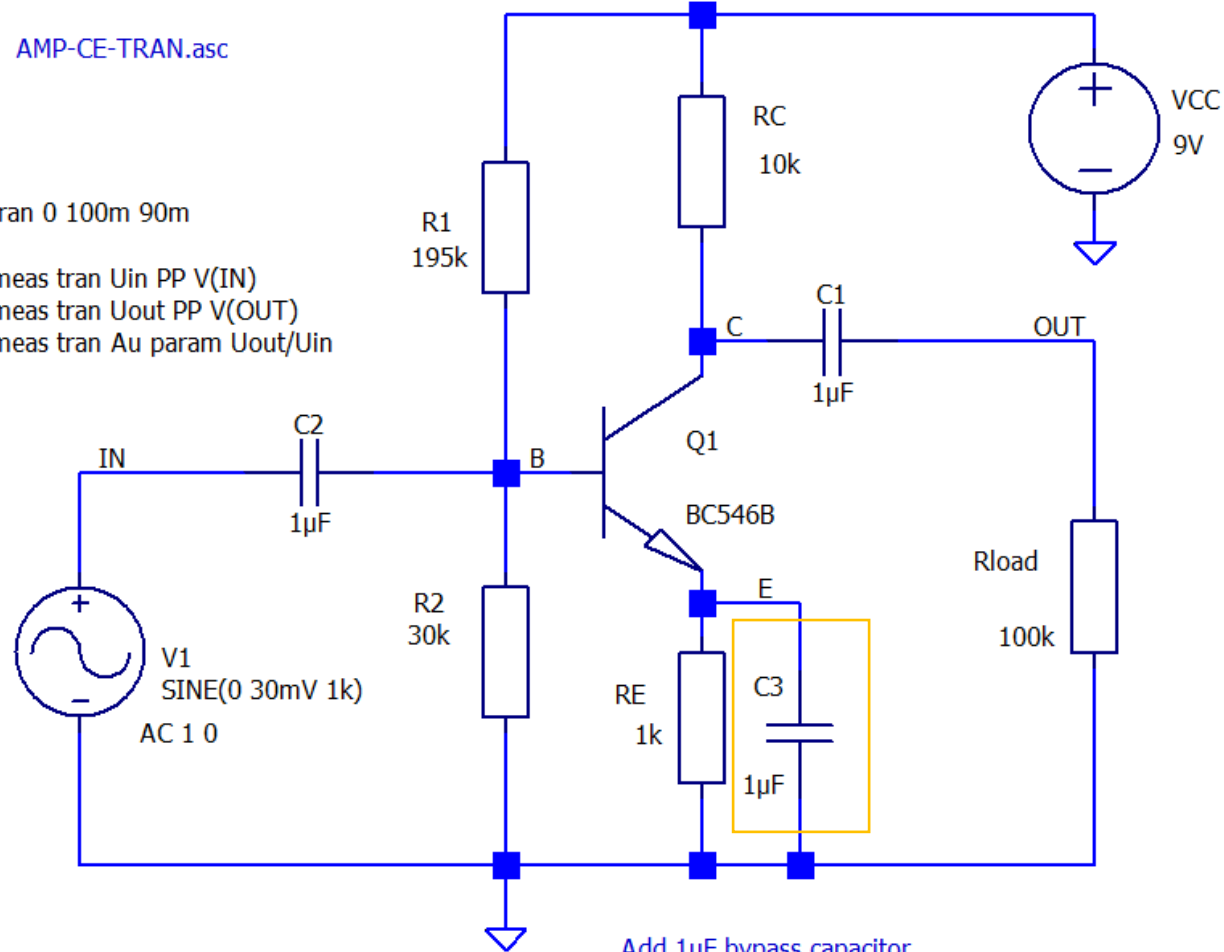
AMP-CE-TRAN.asc

```
.tran 0 100m 90m
```

```
.meas tran Uin PP V(IN)
```

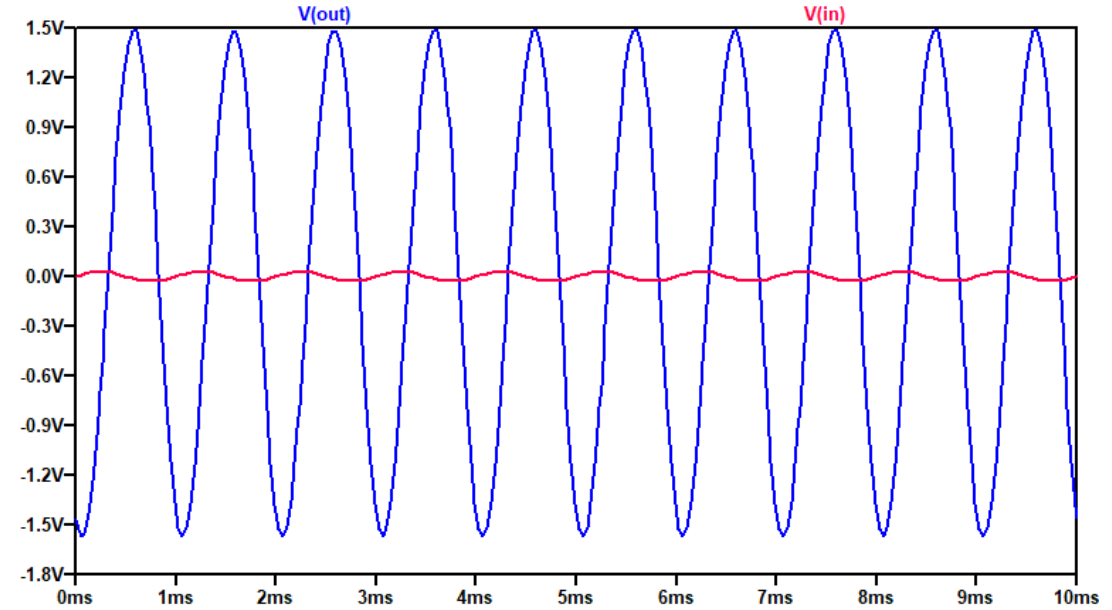
```
.meas tran Uout PP V(OUT)
```

```
.meas tran Au param Uout/Uin
```



Add 1μF bypass capacitor
and see how it affects the gain A_u

$$A_u = -g_m R_C$$



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

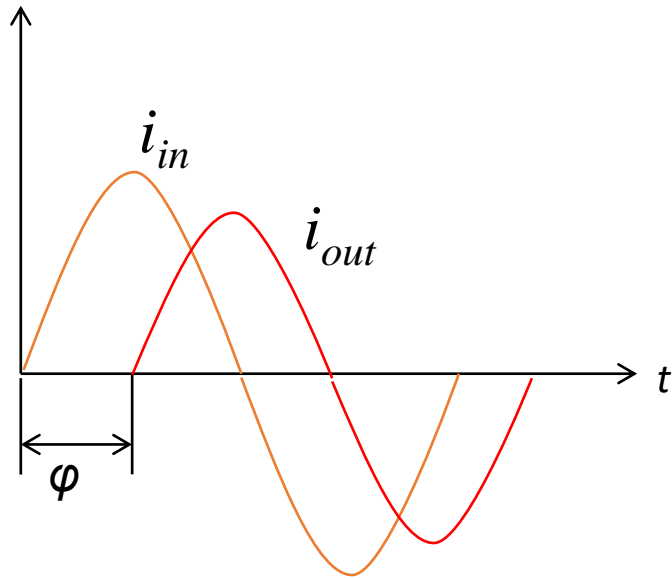
Date: Wed Nov 09 23:08:56 2022

Total elapsed time: 0.038 seconds.

tnom = 27

temp = 27

Работа 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.

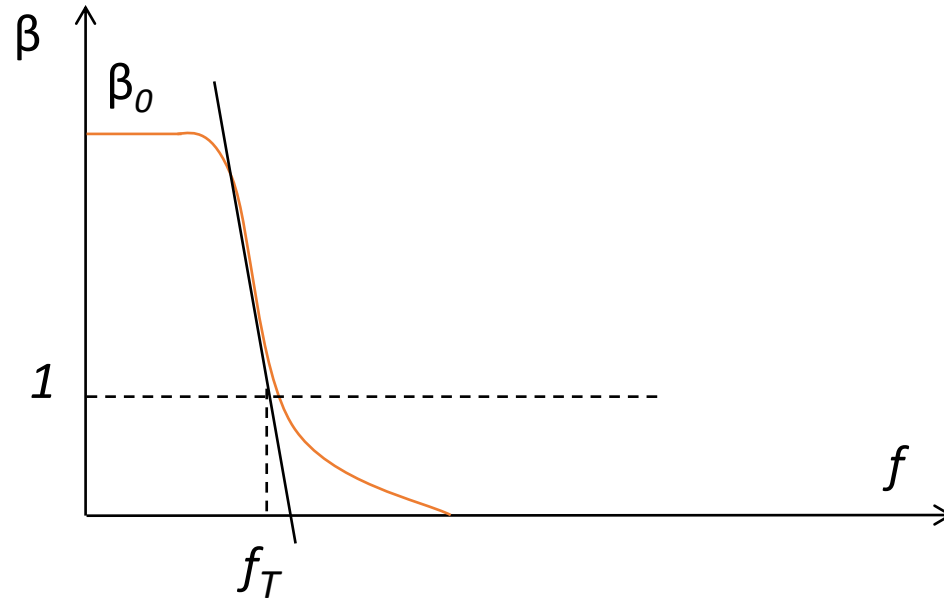
За оценка на усилвателните свойства на транзистора при високи честоти се използват **граничните честоти**.

Транзитна честота

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

$$\beta \cdot f = f_T$$

$$\text{Ако } f = f_T, \beta \approx 1$$



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

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	– – –	MHz
Output Capacitance ($V_{CB} = 10\text{ V}$, $I_C = 0$, $f = 1.0\text{ MHz}$)		C_{obo}	–	1.7	4.5	pF
Input Capacitance ($V_{EB} = 0.5\text{ V}$, $I_C = 0$, $f = 1.0\text{ MHz}$)		C_{ibo}	–	10	–	pF
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	h_{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	dB

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

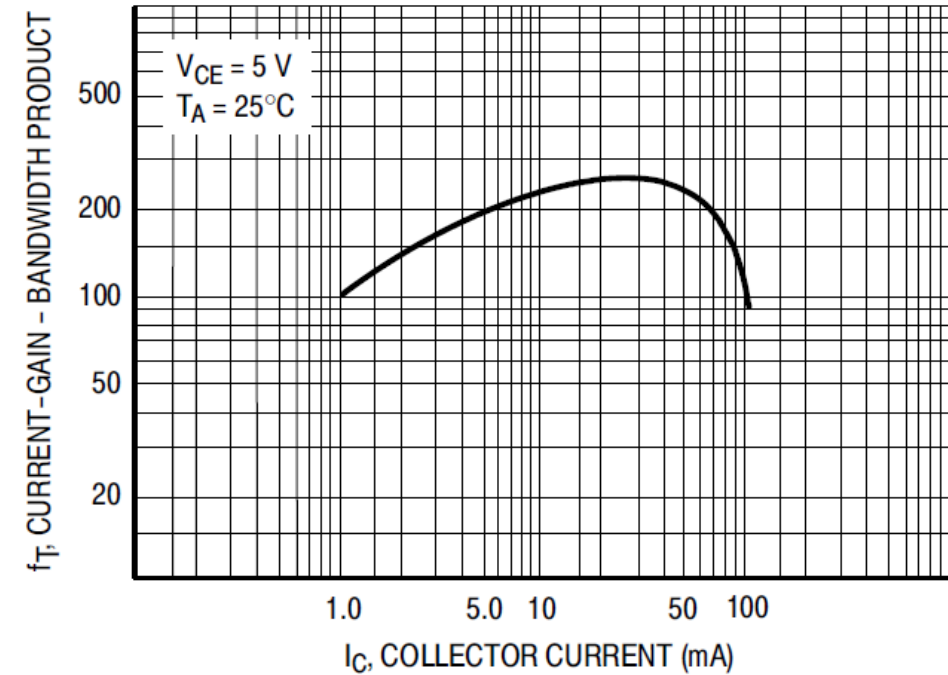


Figure 12. Current–Gain – Bandwidth Product

Пример – променливо-токов анализ на усилвател

Weniger, aber besser

