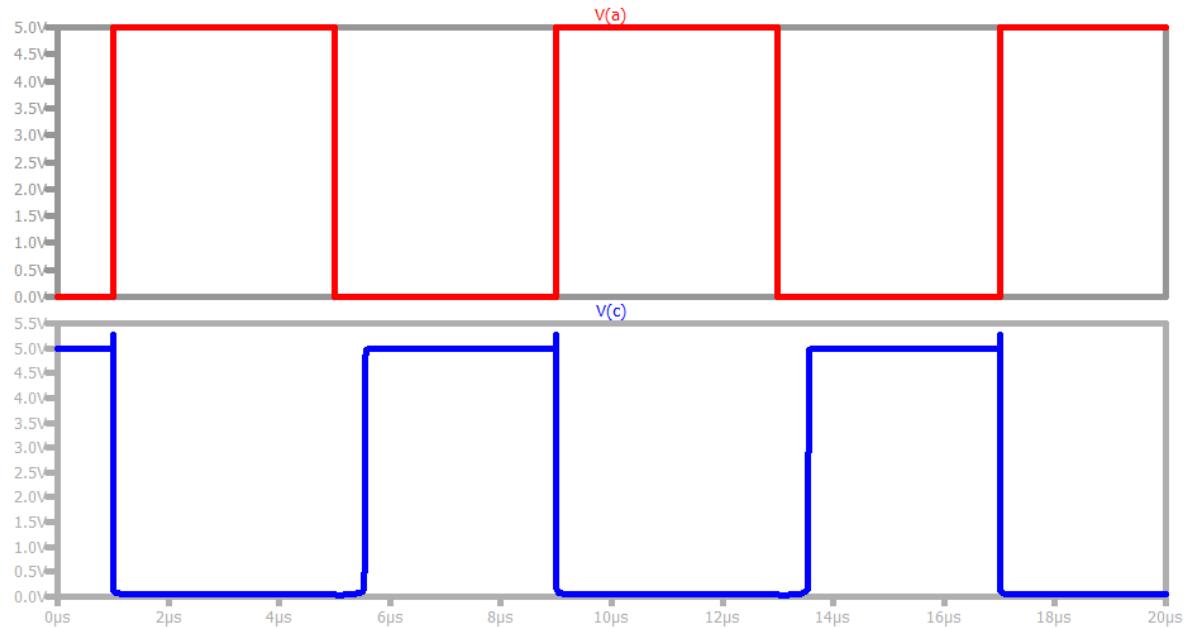
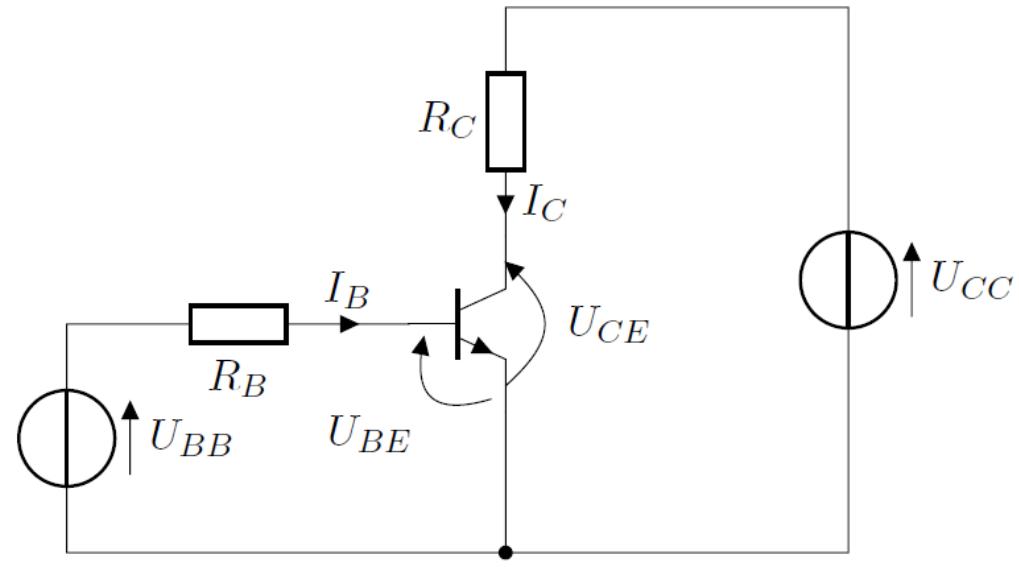




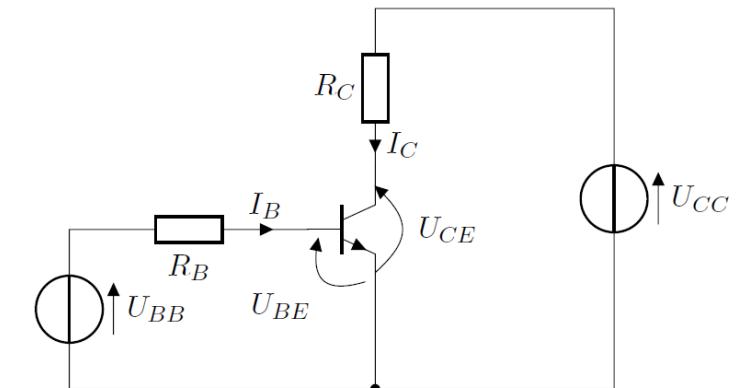
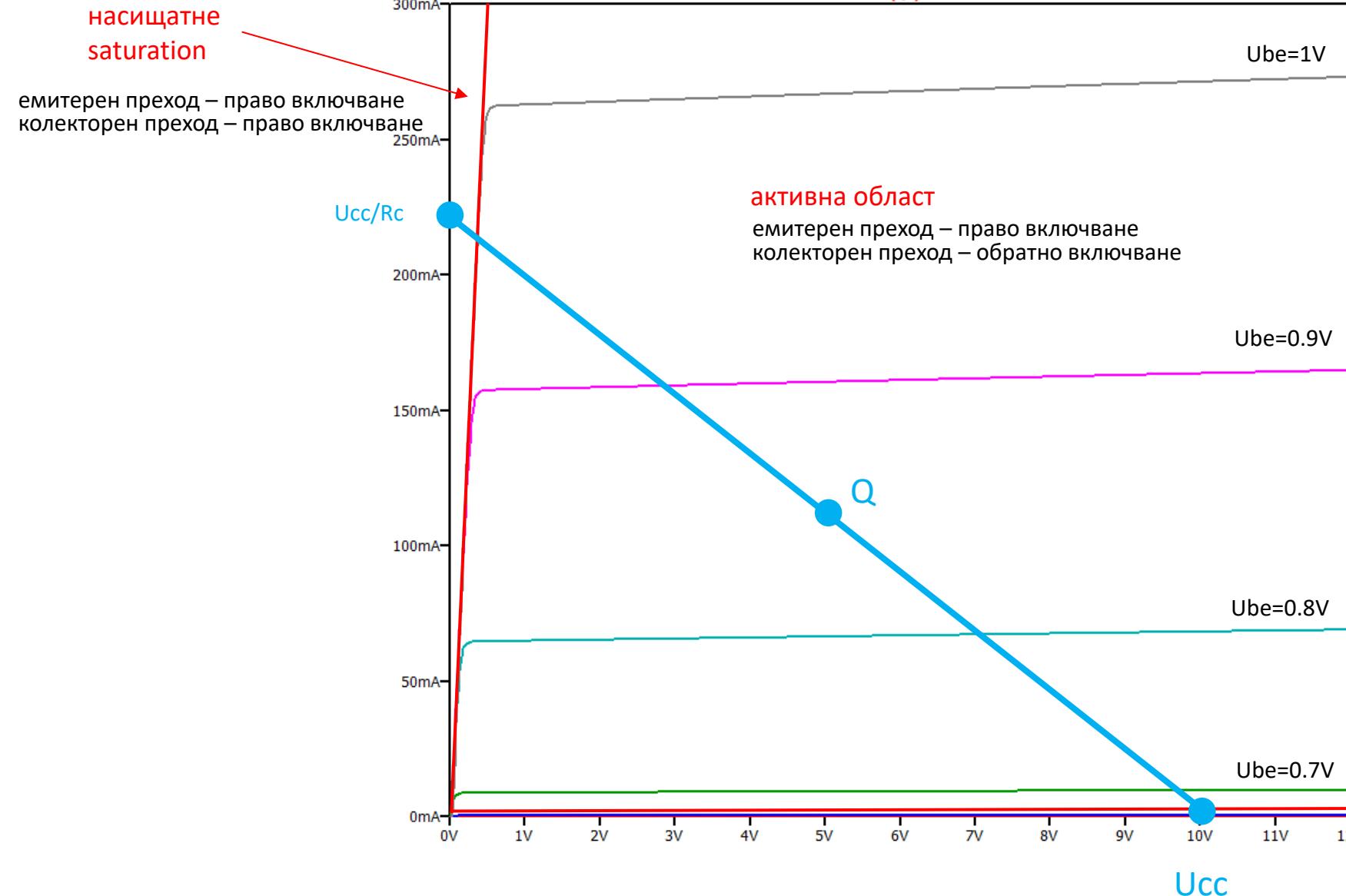
Работа на биполярен транзистор като ключ

Ключ общ емитер



Състоянието на ключа се определя от амплитудата на входния импулс.

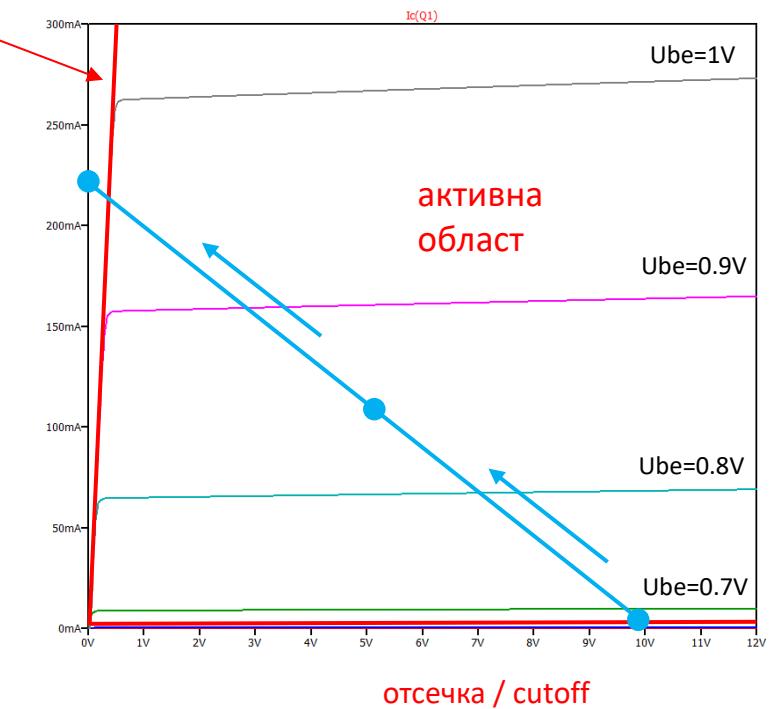
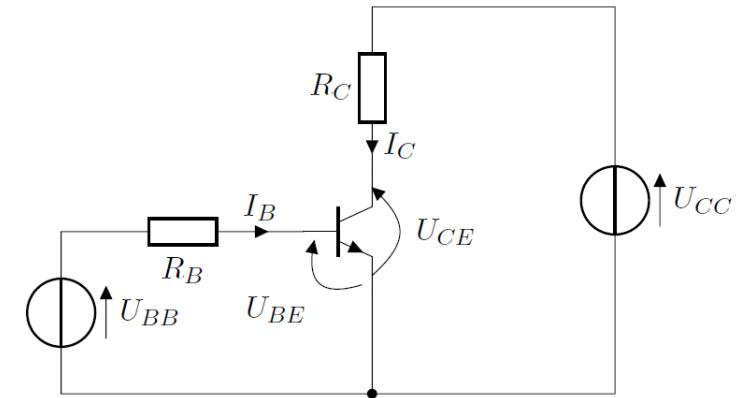
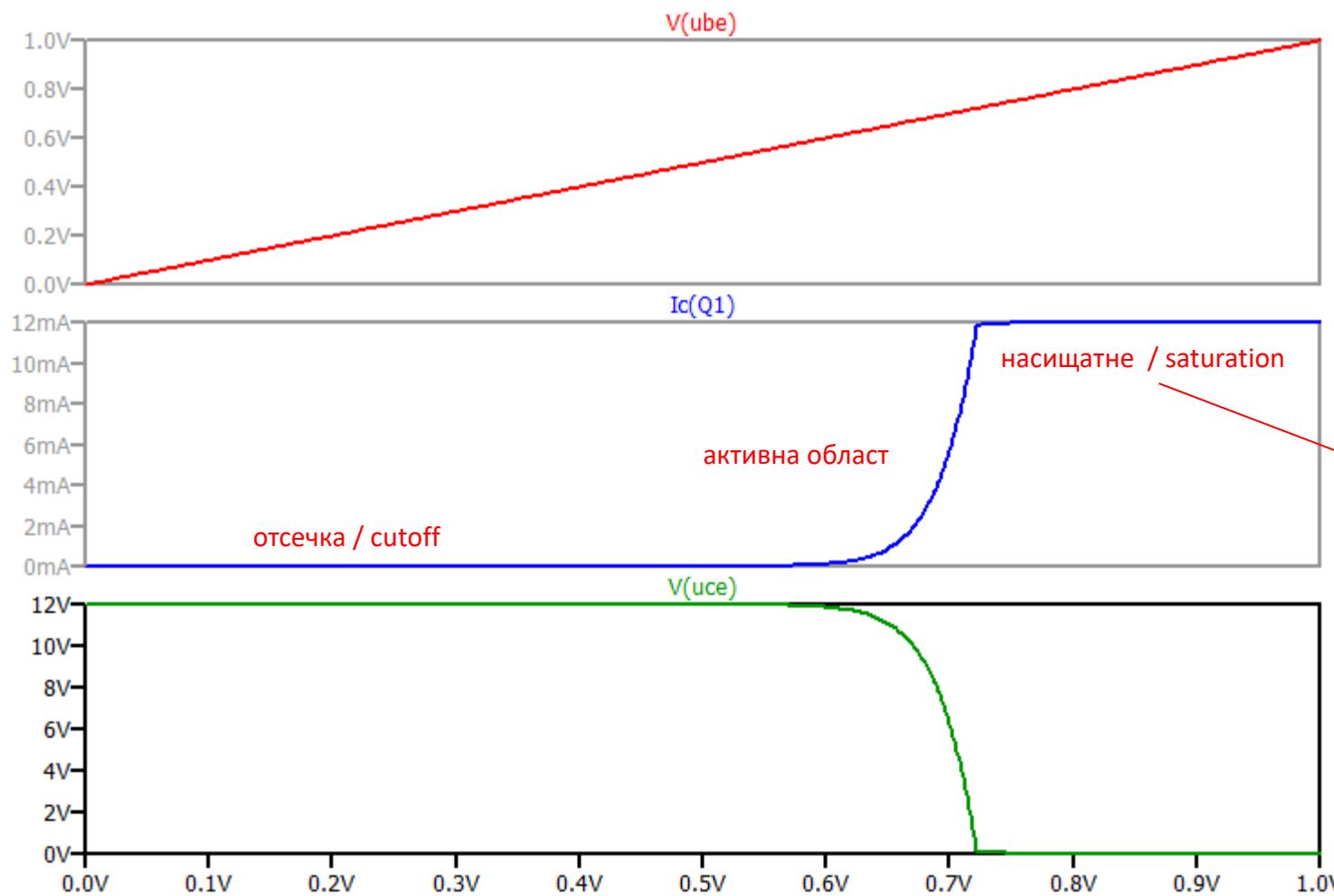
Режими на работа на биполярен транзистор



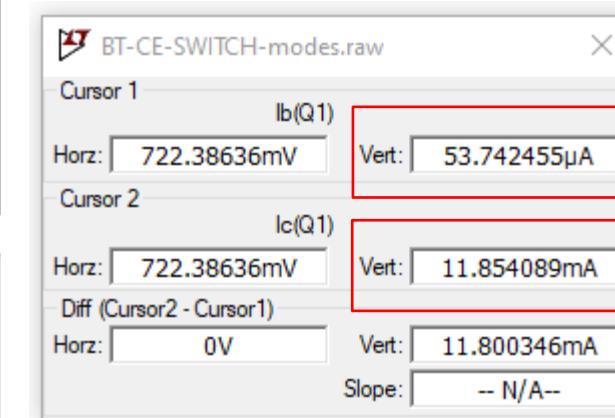
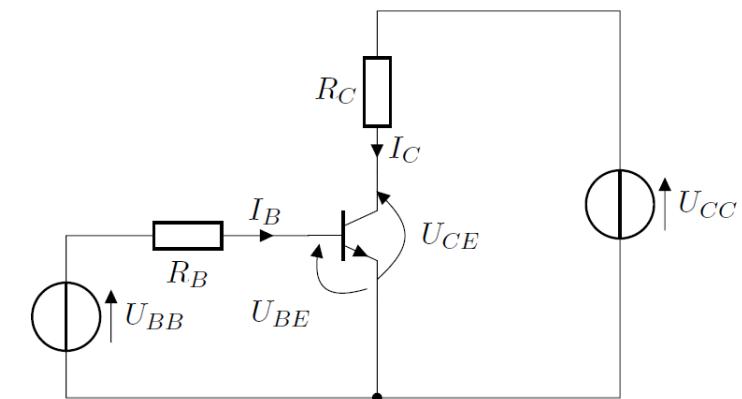
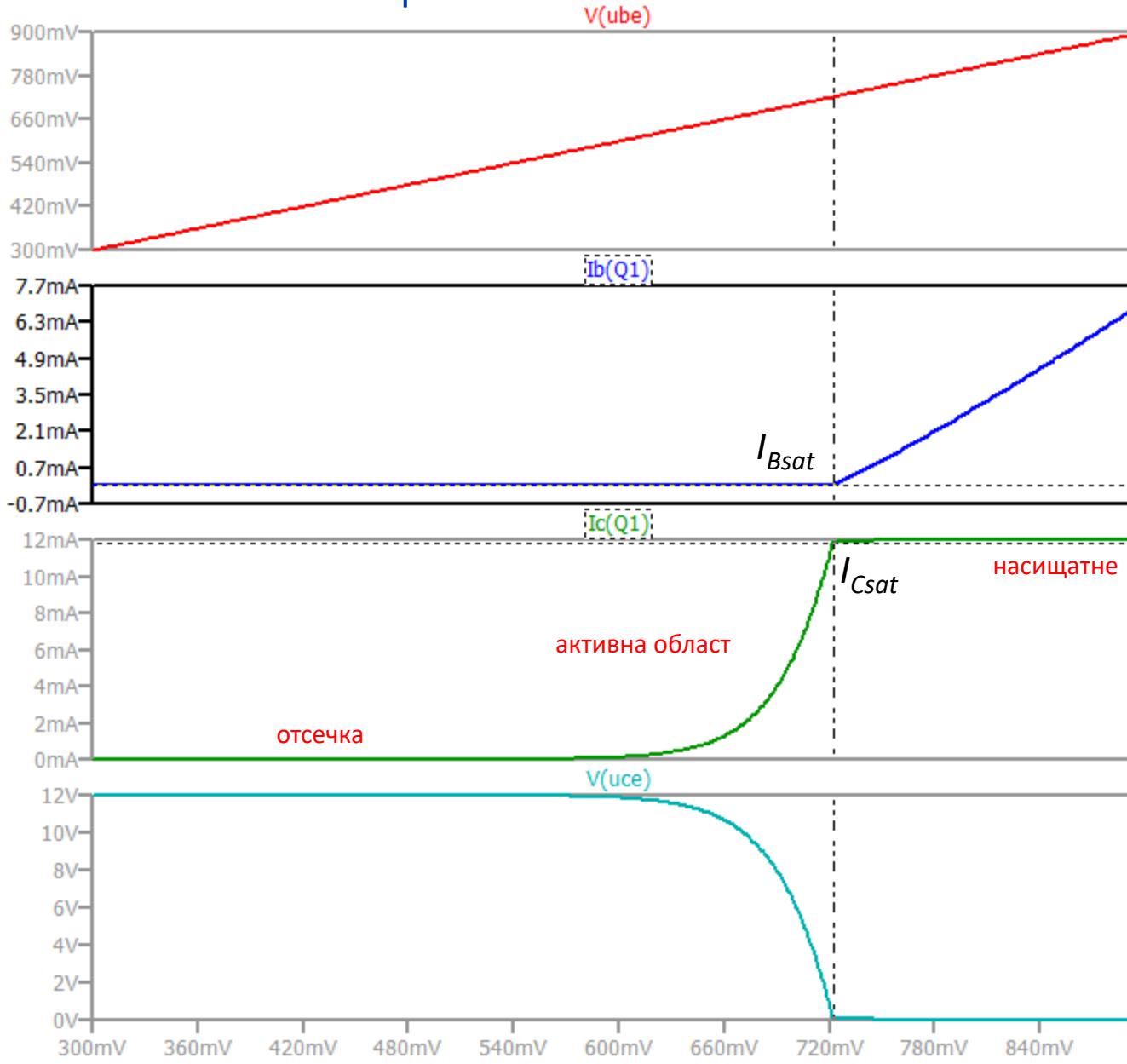
отсечка / cutoff

емитерен преход – обратно включване
колекторен преход – обратно включване

Режими на работа на биполярен транзистор



Режим на насищане



I_{Bsat}

I_{Csat}

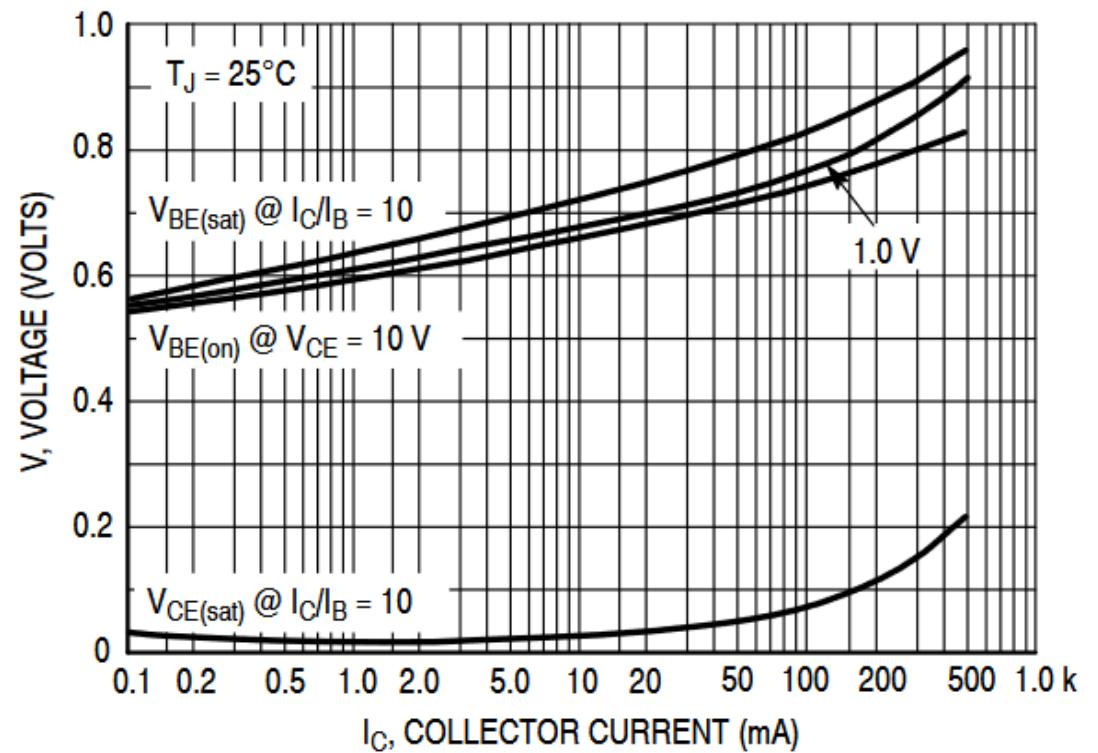
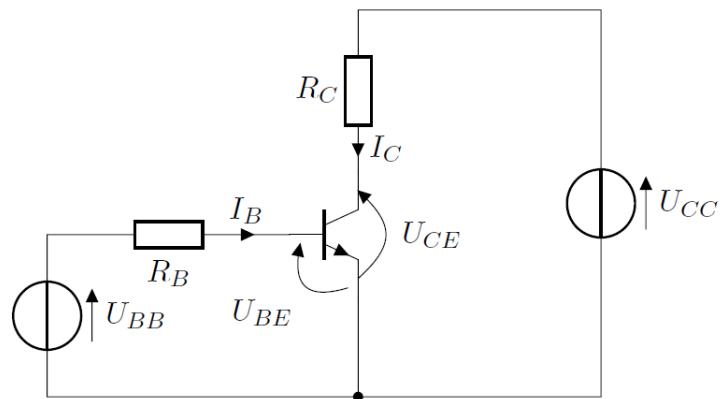
Режим на насищане

В режим на насищане **двета прехода се включват в права посока**. Те инжектират токоносители в базата и напрежението $U_{CE} = U_{CE(sat)} \approx 0,1 \div 0,3$ V.

Колекторният ток в режим на насищане е

$$I_{C(sat)} = \frac{U_{CC} - U_{CE(sat)}}{R_C} \approx \frac{U_{CC}}{R_C}$$

$I_{C(sat)}$ не зависи от транзистора



Условие за настъпване на насищане

Условието транзисторът да навлезе в режим на насищане е **базисният ток да е по-голям от базисния ток на насищане.**

$$I_B > I_{Bsat}$$

Тогава $I_C = I_{C_{sat}} = \frac{U_{CC}}{R_C}$

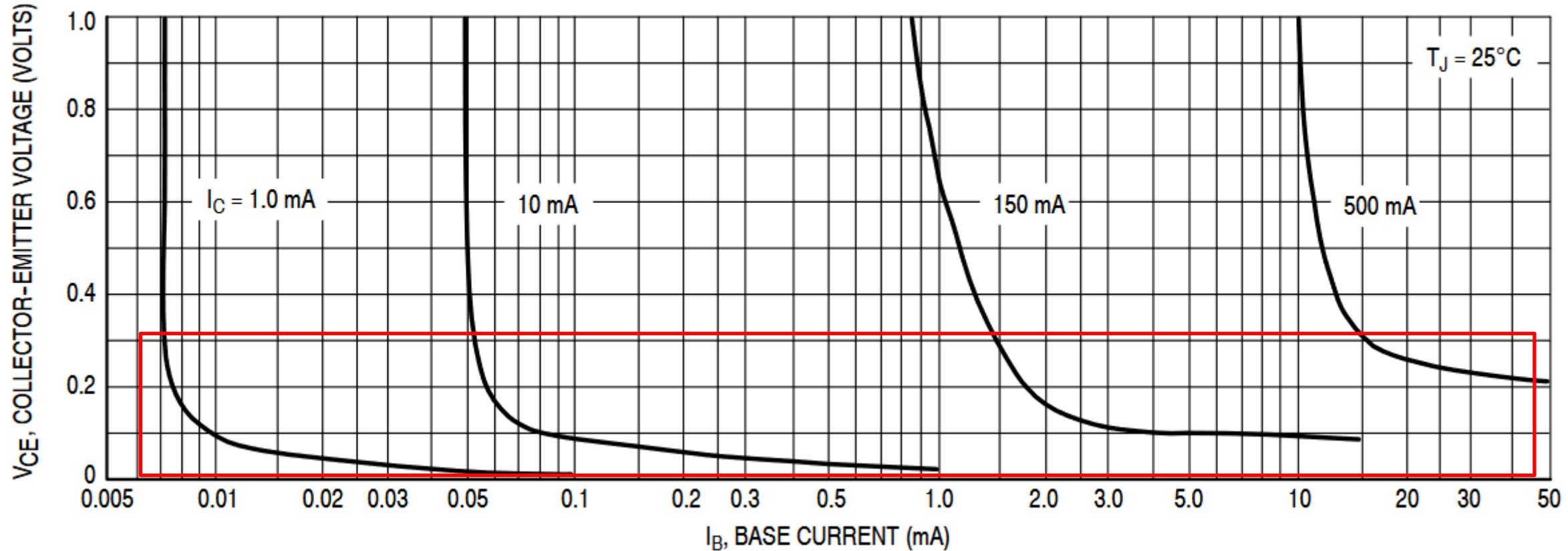
В режим на насищане **не важи условието** $I_C = \beta \cdot I_B$

Насищане може да настъпи при много малки токове, тъй като то не зависи от големината на тока, а от **съотношението** между токовете I_B и I_{Bsat} .

Степен на насищане

$$N = \frac{I_B}{I_{Bsat}} \quad I_B > I_{Bsat} \quad N = 2 \div 5$$

Collector saturation region



насищане

Определяне на режима, I_C и U_{CE}

Алгоритъм за решаване

- 1) Ако $U_{BB} < 0.7V$ Транзисторът е запущен $\rightarrow I_B = 0, I_C = \beta I_B = 0, U_{CE} = U_{CC}$

С това задачата е решена.

- 2) Ако $U_{BB} > 0.7V$ Транзисторът е отпущен (*).

Необходимо е да се определи режима – активен или насищане.

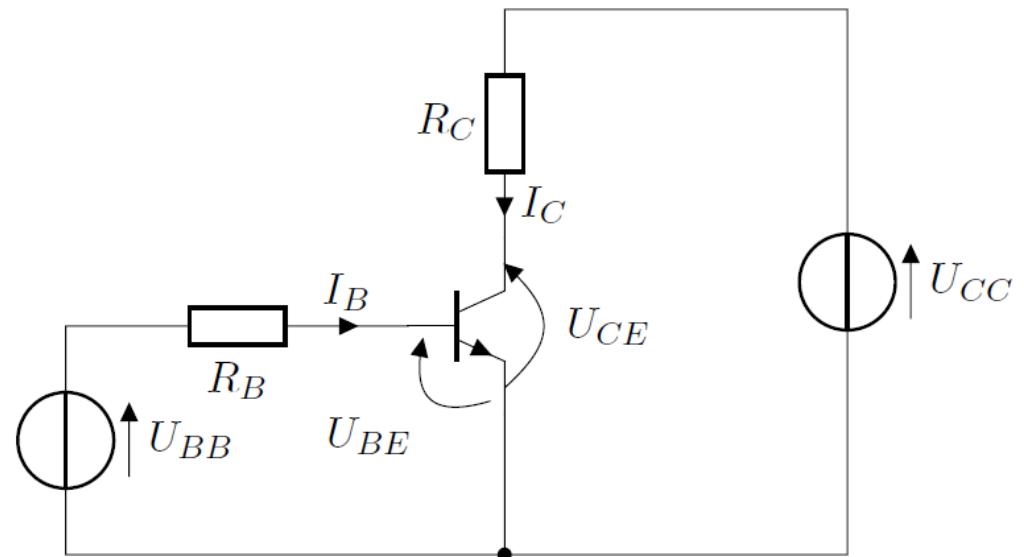
- 3) Проверка на режима

Изчисляват се I_B и I_{Bsat}

$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} \quad I_{Bsat} = \frac{I_{Csat}}{\beta} \quad I_{Csat} = \frac{U_{CC}}{R_C}$$

- 4) Ако $I_B \leq I_{Bsat} \rightarrow$ Активен режим $\rightarrow I_C = \beta \cdot I_B$ и $U_{CE} = U_{CC} - I_C \cdot R_C$

- 5) Ако $I_B > I_{Bsat} \rightarrow$ Режим на насищане $\rightarrow I_C = I_{Csat}$ и $U_{CE} = U_{CC} - I_{Csat} \cdot R_C = 0V$



(*) Това предположение е валидно ако R_B не е твърде голямо – например стотици мега Ома.

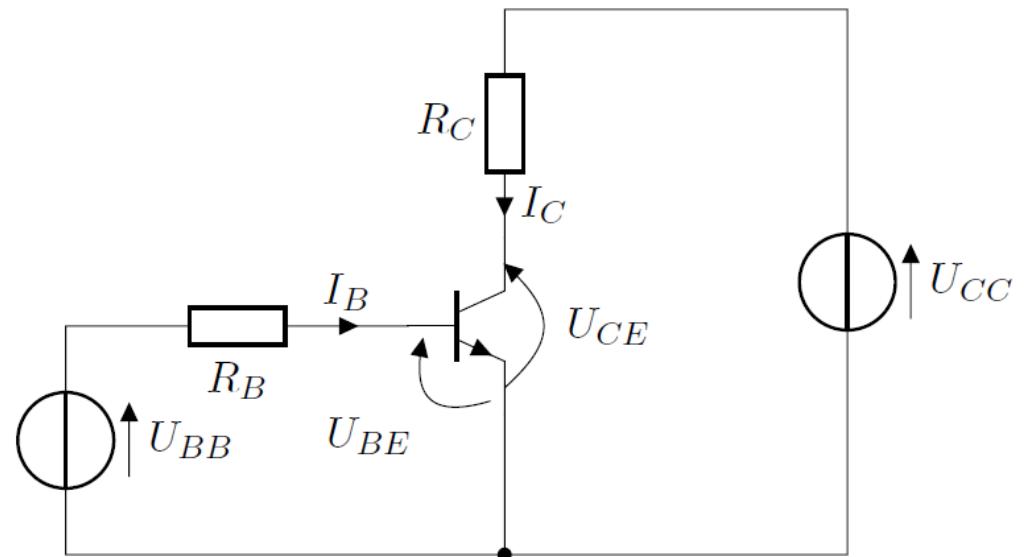
Задачи за постоянно-токов режим

Проверка за отпушен транзистор.

$U_{BB} = 400\text{mV} = 0,4\text{V} < 0,7\text{V}$ Следователно транзисторът е **запущен**.

$$I_B = 0 \quad I_C = \beta \cdot I_B = 0,$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C = U_{CC} - 0 \cdot R_C = U_{CC} = 12\text{V}$$



$$U_{BB} = 400\text{mV}, U_{CC} = 12\text{V}$$

$$R_C = 1k, R_B = 100k$$

$$\beta = 100$$

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

Задачи за постоянно-токов режим

Проверка за отпушен транзистор.

$U_{BB} = 5,7V > 0,7V$ Следователно транзисторът е **отпушен**.

Правим проверка за режима – активен или насищане

Изчисляват се I_B и I_{bsat}

$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} = \frac{5,7 - 0,7}{100 \cdot 10^3} = 0,05 \cdot 10^{-3} A = 0,05 \text{ mA}$$

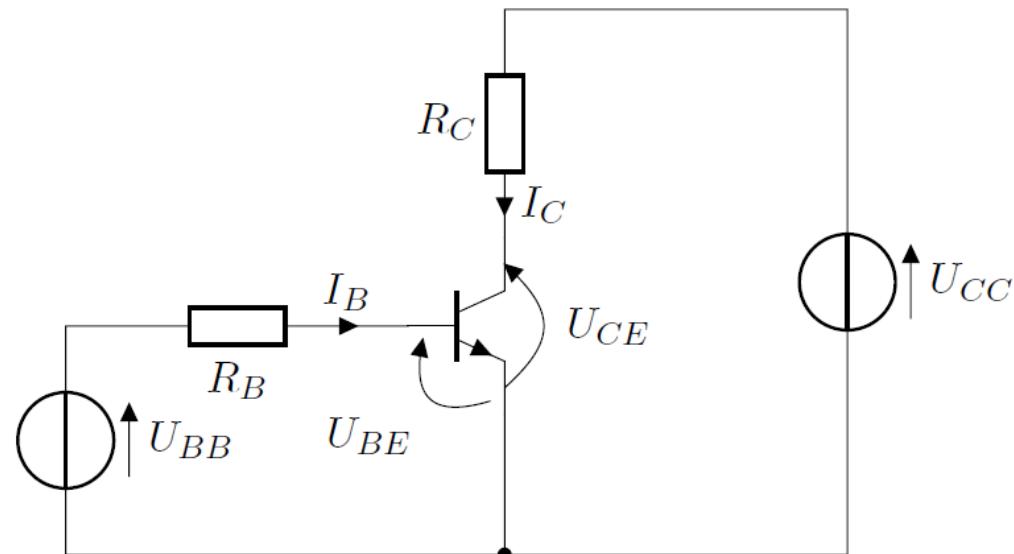
$$I_{Csat} = \frac{U_{CC}}{R_C} \quad I_{Bsat} = \frac{I_{Csat}}{\beta} = \frac{U_{CC}}{R_C \beta}$$

$$I_{Bsat} = \frac{U_{CC}}{R_C \beta} = \frac{12}{1 \cdot 10^3 \cdot 120} = 0,1 \cdot 10^{-3} A = 0,1 \text{ mA}$$

$I_B < I_{Bsat}$ – **Активен режим**

$$I_C = \beta \cdot I_B = 120 \cdot 0,05 \cdot 10^{-3} = 6 \cdot 10^{-3} A = 6 \text{ mA}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C \cdot R_C = 12 - 6 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^3 = 6 \text{ V}$$



$$U_{BB} = 5,7V, U_{CC} = 12V$$

$$R_C = 1k, R_B = 100k$$

$$\beta = 120$$

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

Задачи за постоянно-токов режим

Проверка за отпущен транзистор.

$U_{BB} = 4,7V > 0,7V$ Следователно транзисторът е **отпущен**.

Правим проверка за режима – активен или насищане

Изчисляват се I_B и I_{bsat}

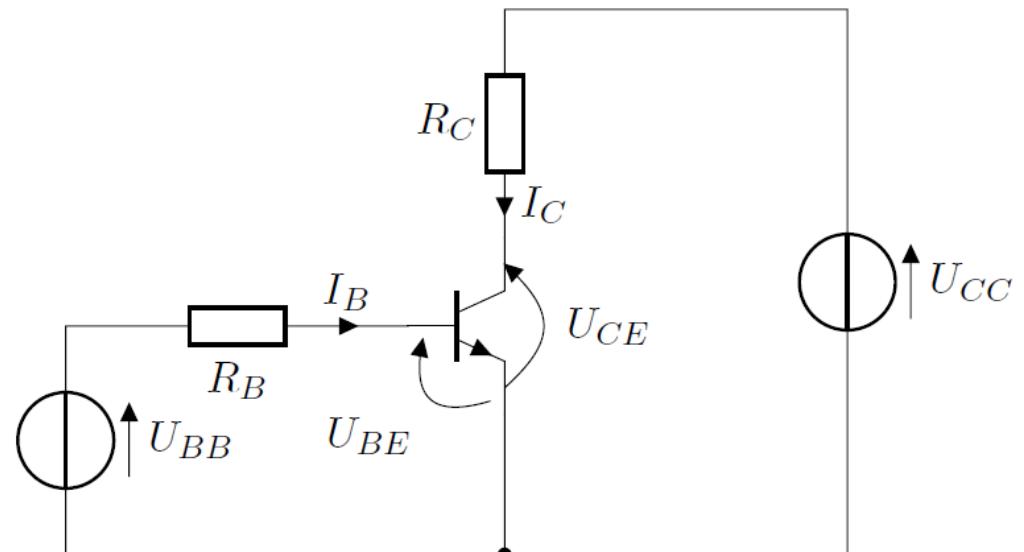
$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} = \frac{4.7 - 0.7}{10 \cdot 10^3} = 0,4 \cdot 10^{-3} A = 0,4 \text{ mA}$$

$$I_{Bsat} = \frac{U_{CC}}{R_C \beta} = \frac{6}{1 \cdot 10^3 \cdot 60} = 0,1 \cdot 10^{-3} A = 0,1 \text{ mA}$$

$I_B > I_{Bsat}$ – **Насищане**

$$I_C = I_{Csat} = \frac{U_{CC}}{R_C} = 6 \cdot 10^{-3} A = 6 \text{ mA}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C = 6 - 6 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^3 = 0V$$



$$U_{BB} = 4,7V, U_{CC} = 6V$$

$$R_C = 1k, R_B = 10k$$

$$\beta = 60$$

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

Задачи за постоянно-токов режим

$$U_B = \frac{U_{CC} \cdot R_{B2}}{(R_{B1} + R_{B2})} = \frac{10 \cdot 10 \cdot 10^3}{(47 \cdot 10^3 + 10 \cdot 10^3)} = 1,75 \text{ V} > 0,7 \text{ V} \rightarrow \text{транзисторът е отпущен}$$

$$I_{Csat} = \frac{U_{CC}}{R_C} = \frac{6}{500} = 0,012 \text{ A} = 12 \text{ mA}$$

$$I_{Bsat} = \frac{I_{Csat}}{\beta} = \frac{1,75 \cdot 10^{-3}}{100} = 17,5 \cdot 10^{-6} \text{ A} = 17,5 \mu\text{A}$$

$$U_E = U_B - U_{BE} = 1,75 - 0,7 = 1,05 \text{ V} \approx 1 \text{ V}$$

$$U_E = I_E \cdot R_E$$

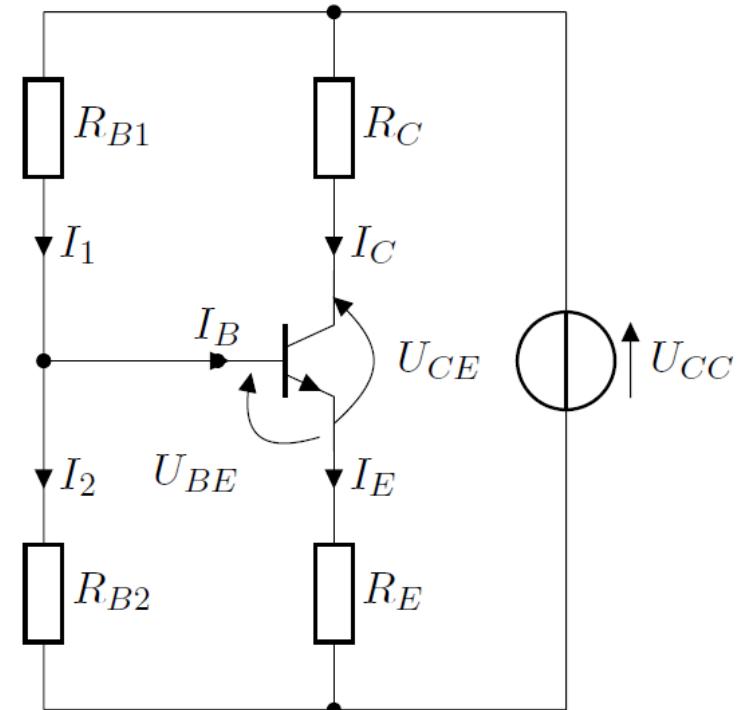
$$I_E = \frac{1}{1 \cdot 10^3} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 1 \text{ mA}$$

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

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{100} = 0,01 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ A} = 10 \mu\text{A}$$

$I_B < I_{Bsat}$ \rightarrow Активен режим

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C - I_E R_E = 10 - 1 \cdot 10^{-3} \cdot 4,7 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^3 = 10 - 5,7 = 4,3 \text{ V}$$



$$U_{CC} = 10 \text{ V}$$

$$R_C = 4,7 \text{ k}, R_{B1} = 47 \text{ k}, R_{B2} = 10 \text{ k}, R_E = 1 \text{ k}$$

$$\beta = 100$$

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

Проектиране на ключ с биполярен транзистор

Дадени са следните величини:

- Захранване U_{CC}
- Колекторен ток I_C
- Входно напрежение U_{BB}
- $U_{CE(sat)}$

Да се определят стойностите на R_C и R_B

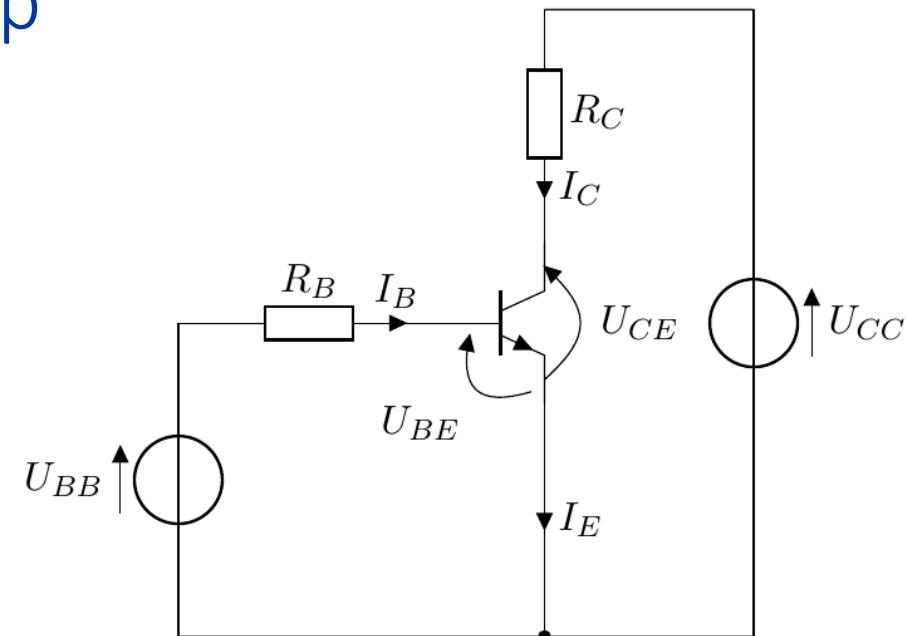
$$R_C = \frac{U_{CC} - U_{CE(sat)}}{I_C}, \text{ където } U_{CE(sat)} \text{ се взема от каталог.}$$

За да е сигурно, че транзисторът е в режим на насищане, ще изберем базов ток десет пъти по-малък от колекторния (т.нар. „forced beta“)

При $I_B = 0.1 I_C$ всеки транзистор с $\beta > 10$ ще работи в режим на насищане.

$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} = \frac{I_C}{10}$$

$$R_B = \frac{10 \cdot (U_{BB} - U_{BE})}{I_C}$$



Проектиране на ключ с биполярен транзистор - пример

Дадено:

- Транзистор PN2222A
- Захранване $U_{CC} = 10V$
- Колекторен ток $I_C = 10mA$
- Входно напрежение $U_{BB} = 5V$
- $U_{CE(sat)}$

Да се определят стойностите на R_C и R_B

От каталог определяме $U_{CE(sat)} = 0.05V @ I_C = 10mA$

$$R_C = \frac{U_{CC} - U_{CE(sat)}}{I_C} = \frac{10V - 0.05V}{10mA} = 0.995k\Omega.$$

За да е сигурно, че транзисторът е в режим на насищане, ще изберем базов ток десет пъти по-малък от колекторния $I_B = 0.1 I_C = 1mA$

$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B}$$

$$R_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{I_B} = \frac{5V - 0.7V}{1mA} = 4.3k\Omega$$

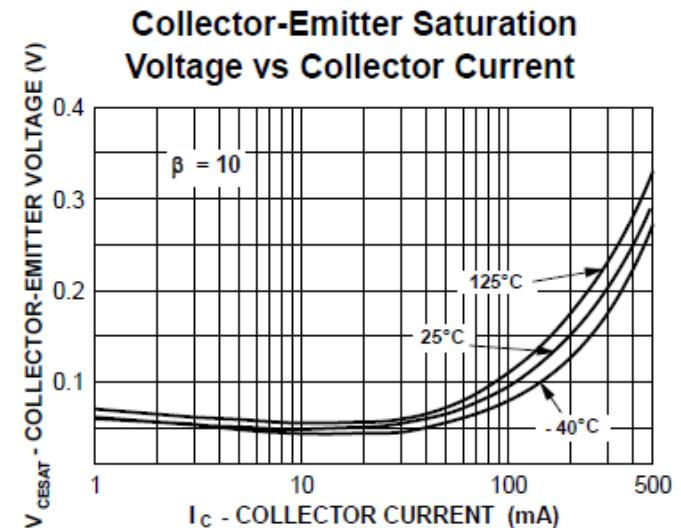
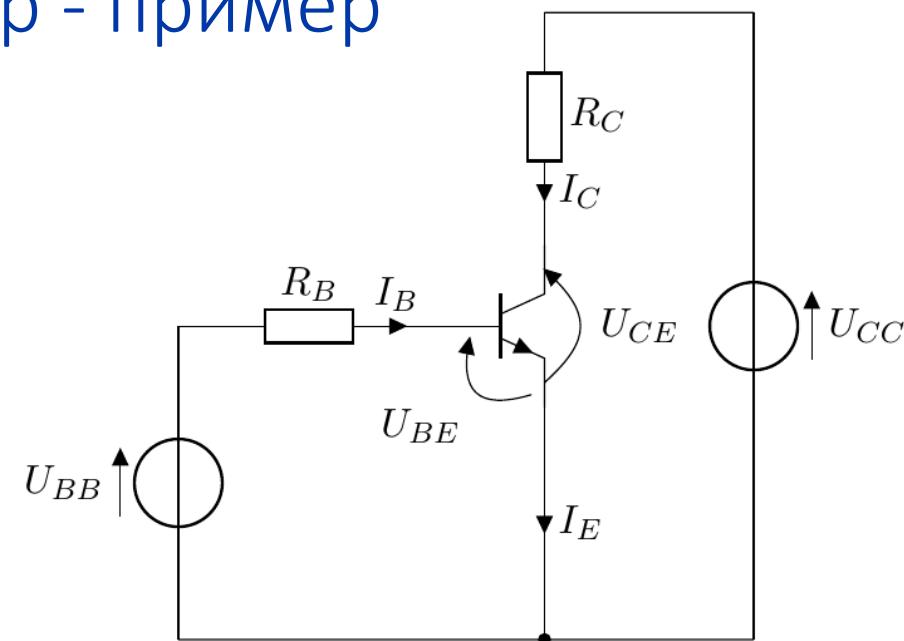
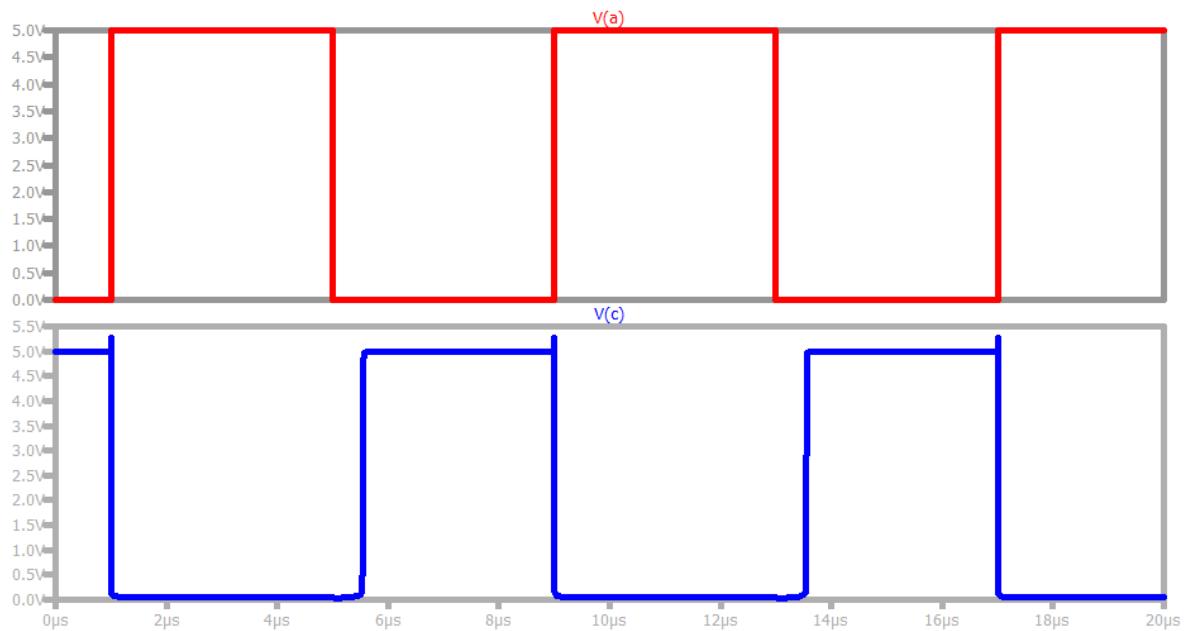
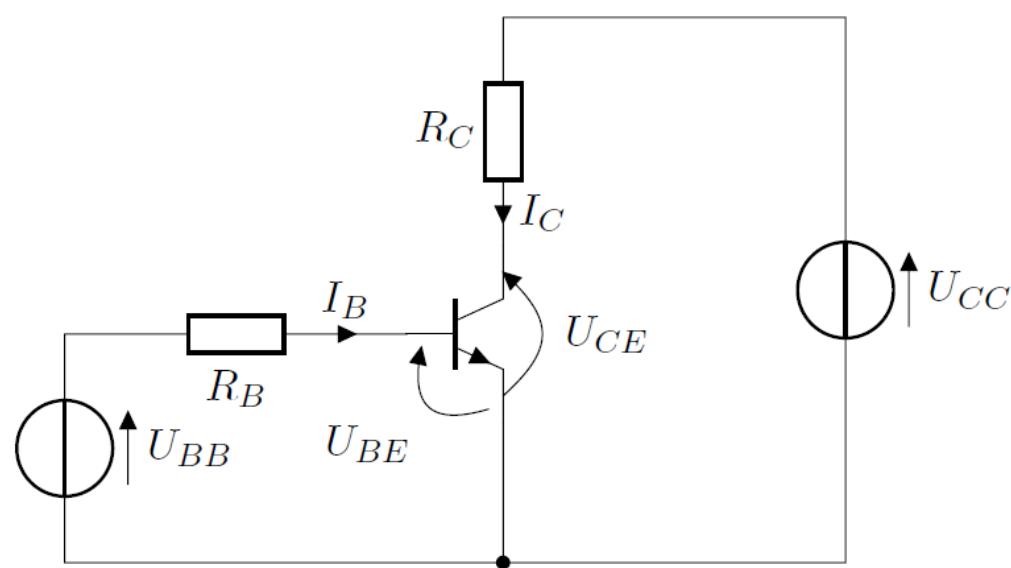


Figure 2. Collector-Emitter Saturation Voltage vs Collector Current

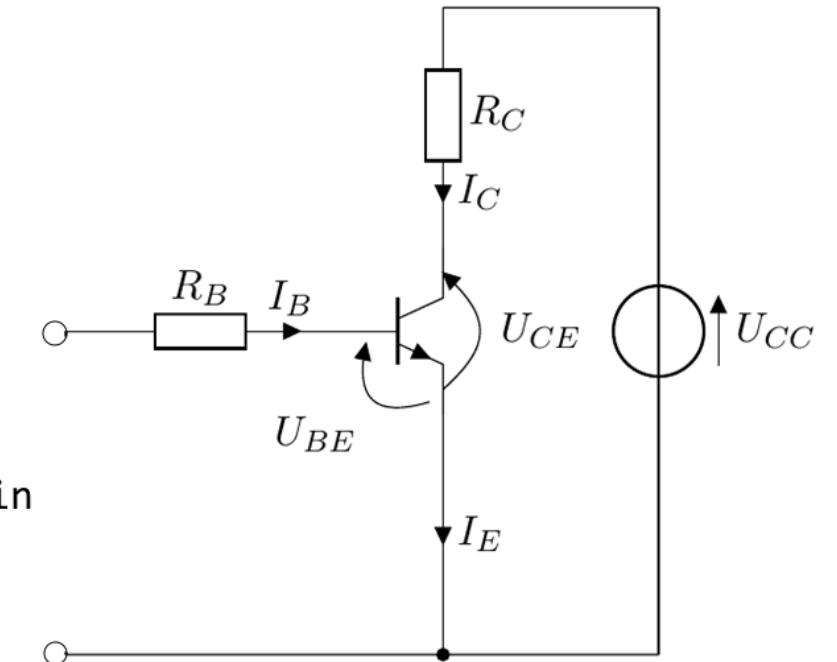
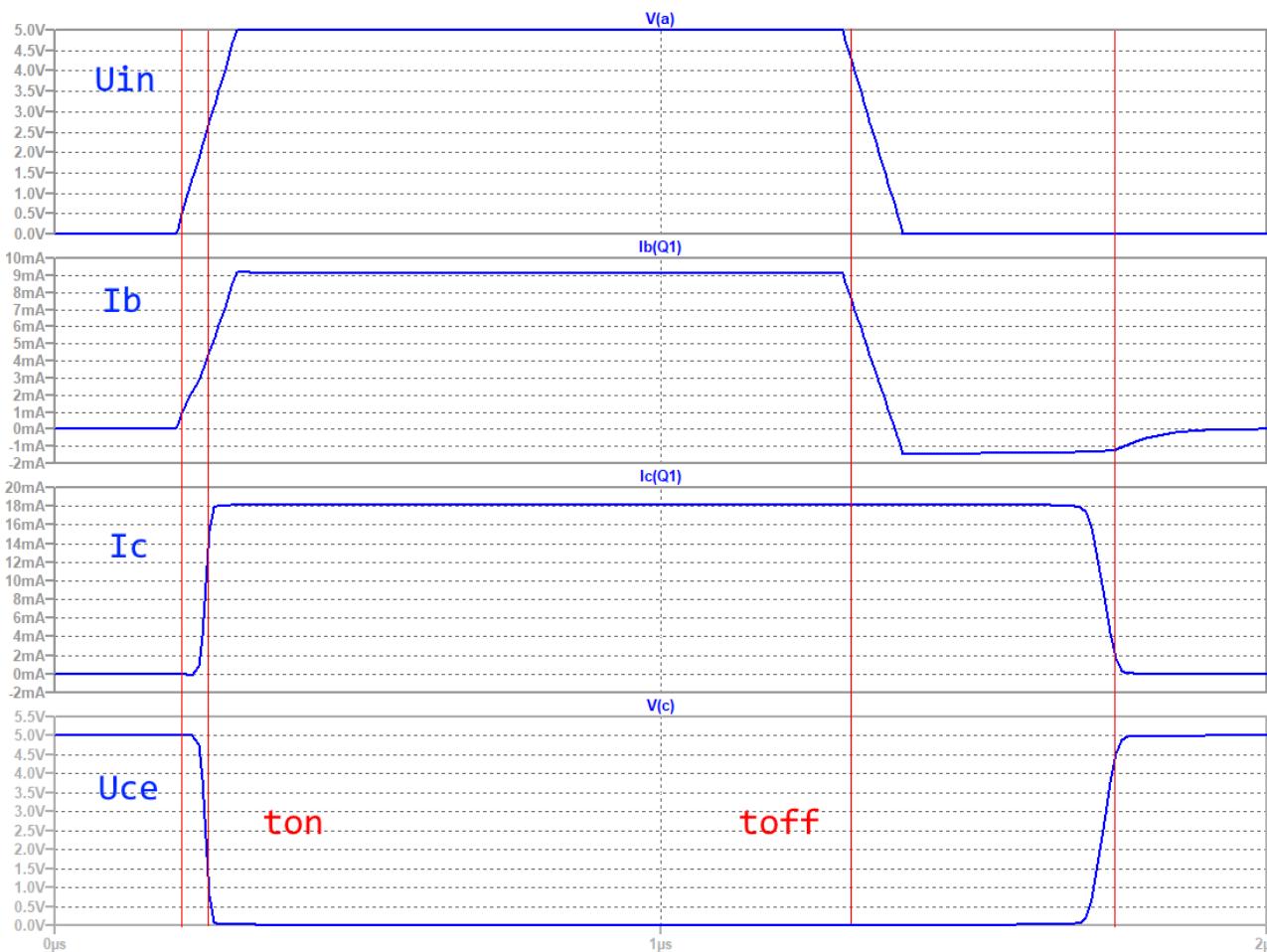
Бързодействие на ключ с биполярен транзистор

Бързодействието на ключа зависи от продължителността на преходните процеси при превключване.
Преходните процеси се дължат на:

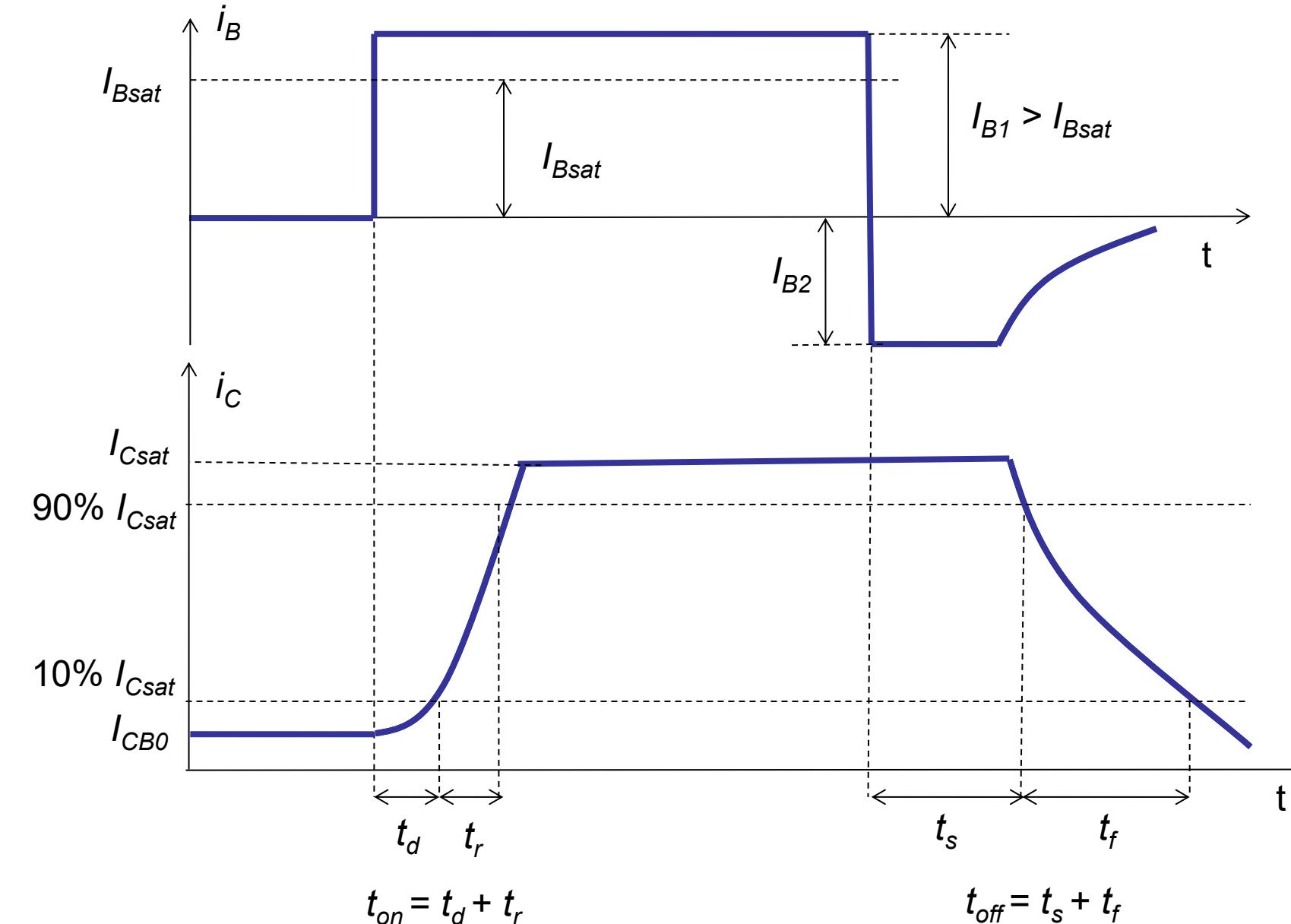
- Инерционността на процесите на пренасяне, натрупване и разнасяне на токоносителите в базата и колектора на транзистора
- Времето, необходимо за презареждане на капацитетите на преходите
- Наличието на паразитни капацитети на корпуса и индуктивности на изводите



Преходни процеси при превключване



Преходни процеси при превключване



t_d – време на закъснение
(turn-on delay time) – от подаване на
отпушващ импулс до достигане на i_c
= 10% от I_{Csat}

t_r – време за нарастване
(rise time) – i_c нараства от 10% до
90% I_{Csat}

t_s – време на разнасяне на
токоносителите от базата
(storage time) – от подаване на
запушващ импулс до достигане на
90% I_{Csat}

t_f – време за спадане
(fall time) – времето спадане на i_c от
90% до 10% I_{Csat}

Импулсни параметри

- Времената t_s и t_f зависят от I_B и от честотните свойства на транзистора (геометрични размери и време на живот)
- Времето за разнасяне зависи от пълното количество носители натрупани в базата – т.е от степента на насищане N .

В интегралните схеми преходът база-колектор се шунтира с диод на Шотки, където $U_F = 0,1 - 0,3$ V. Това ограничава тока през колекторния преход при право включване и натрупването на токоносители, откъдето t_s рязко намалява.

При Шотки диода липсва инжекция на неосновни токоносители и той не допринася за натрупването им при право включване.

