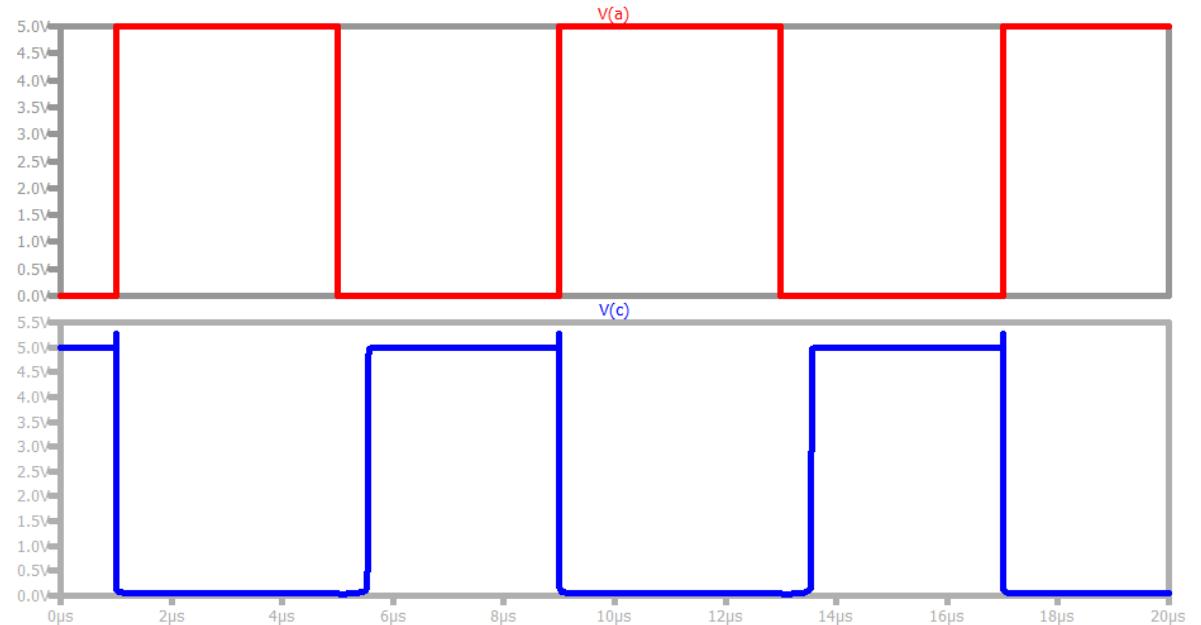
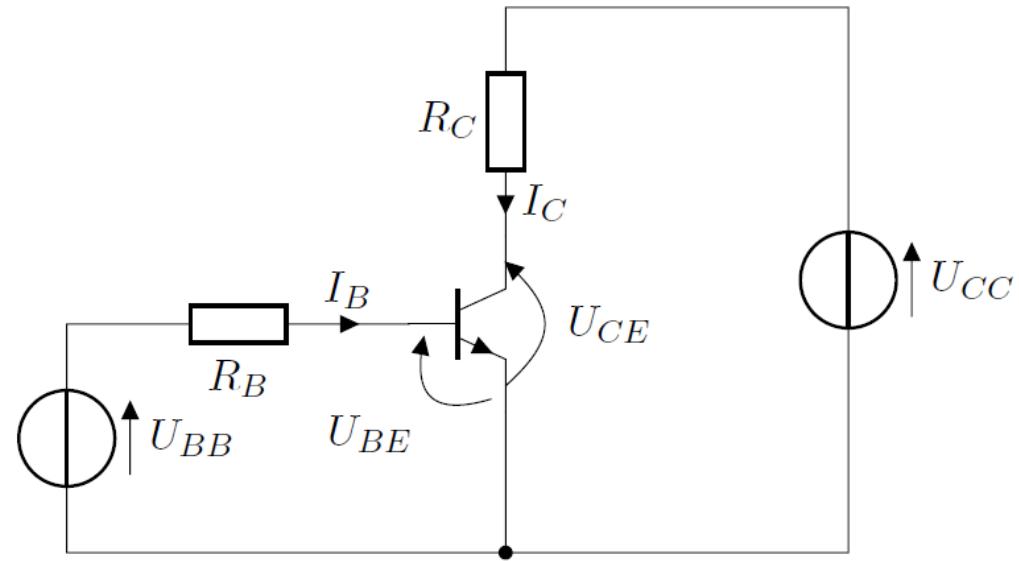




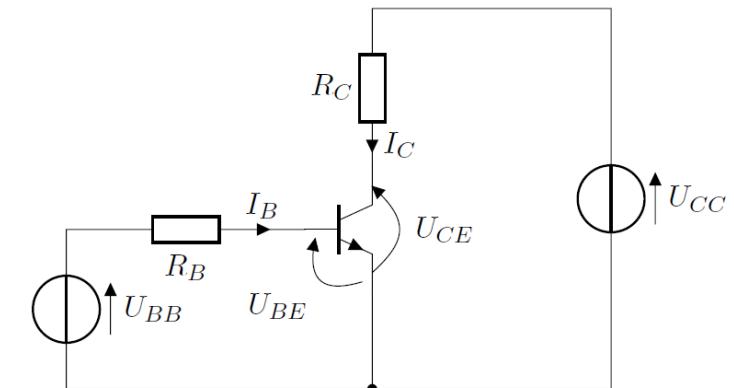
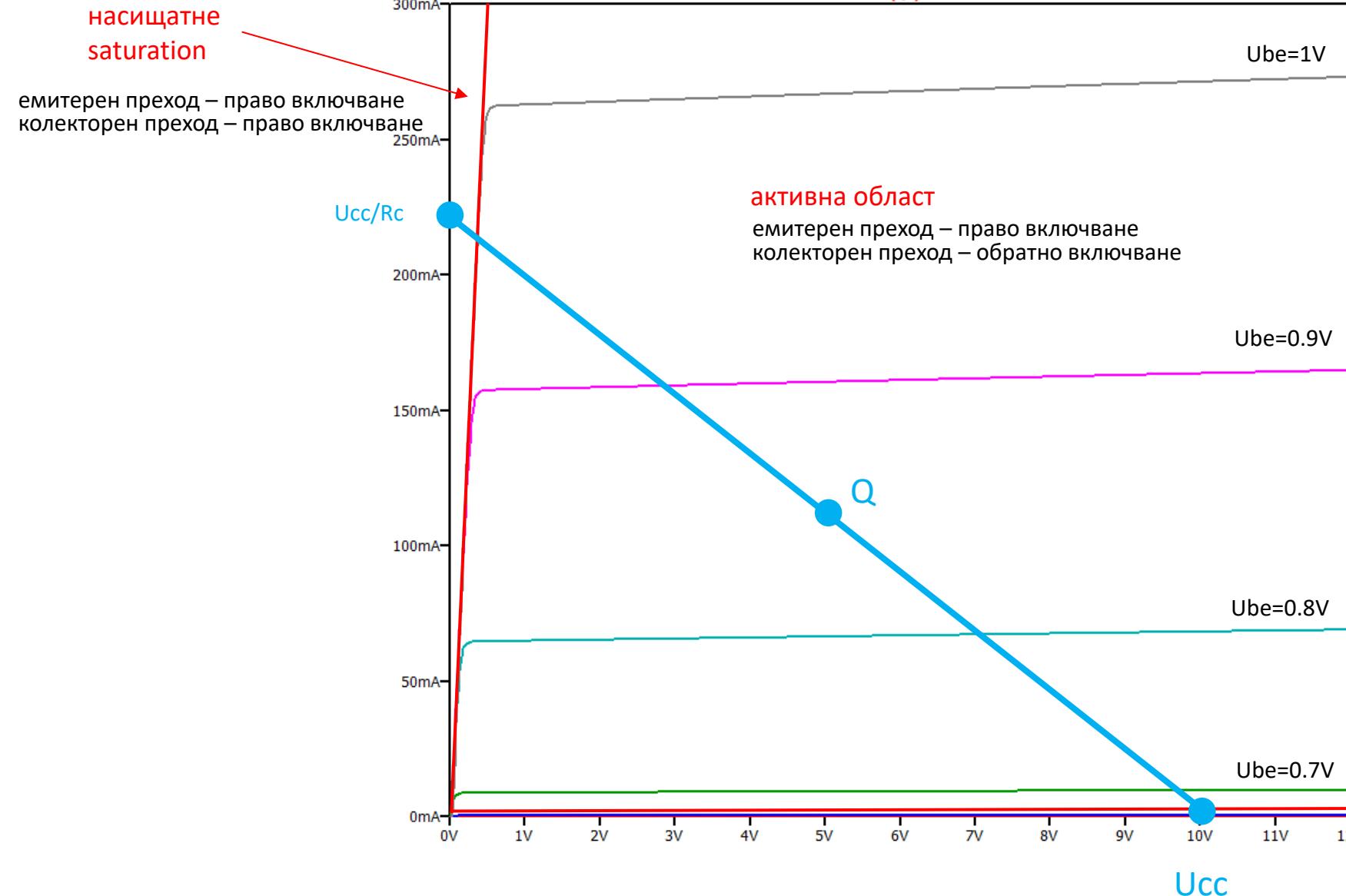
Работа на биполярен транзистор като ключ

Ключ общ емитер

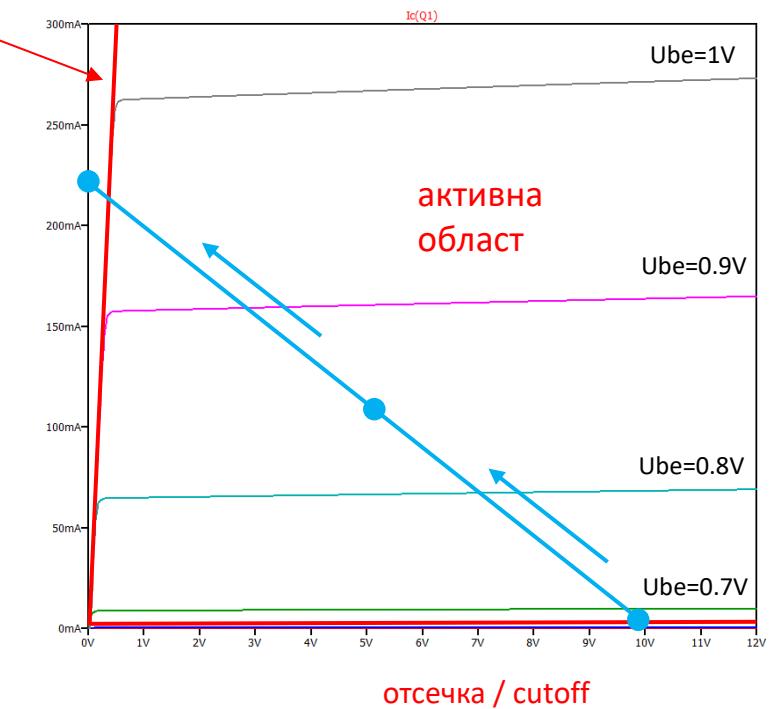
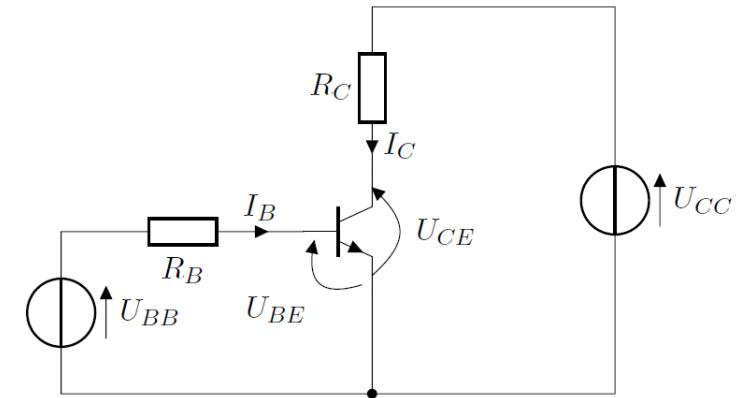
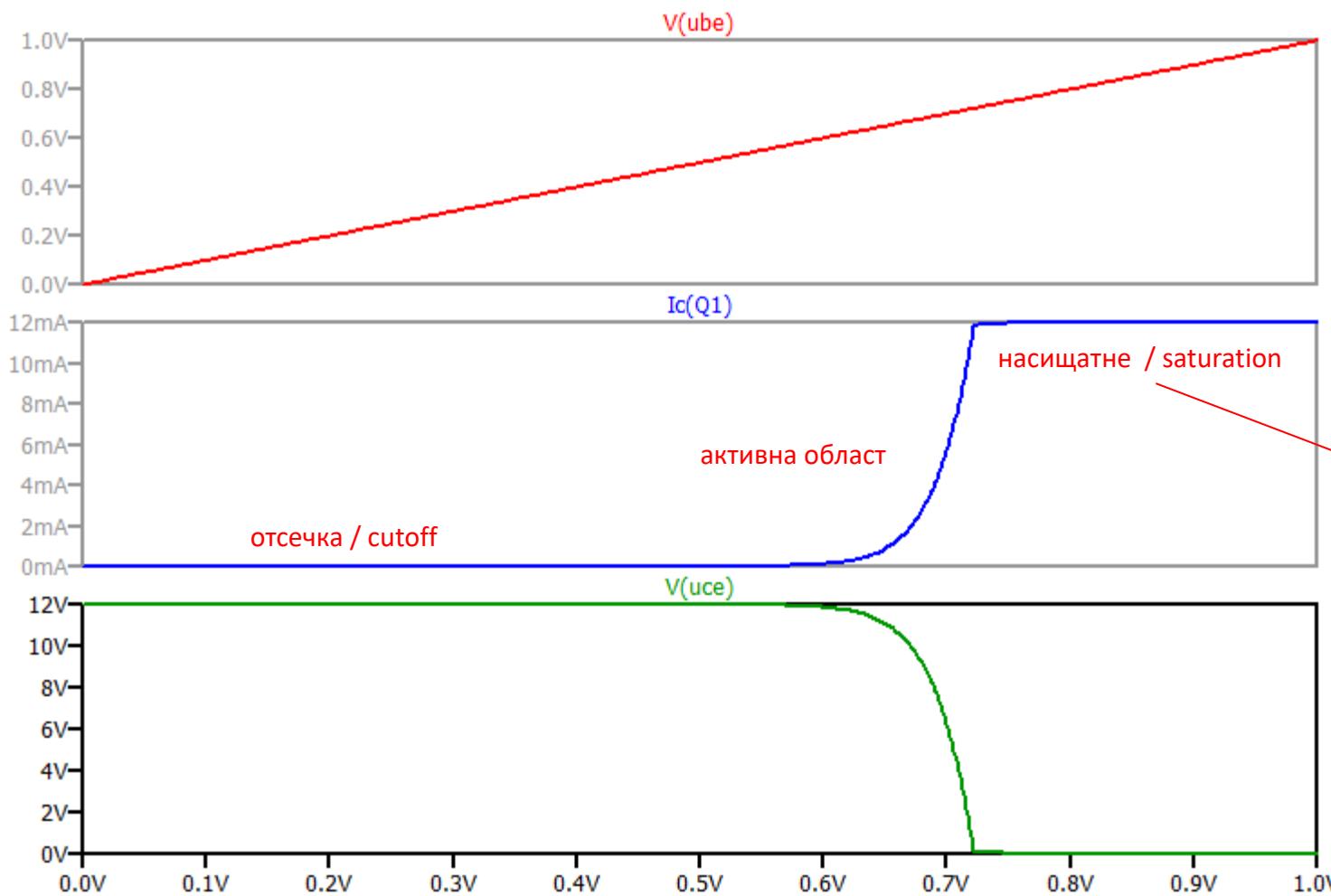


Състоянието на ключа се определя от амплитудата на входния импулс.

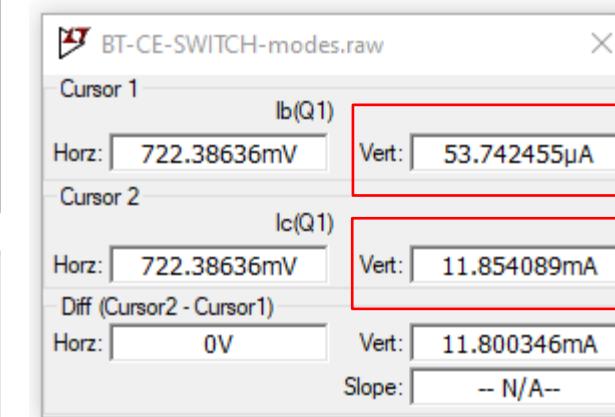
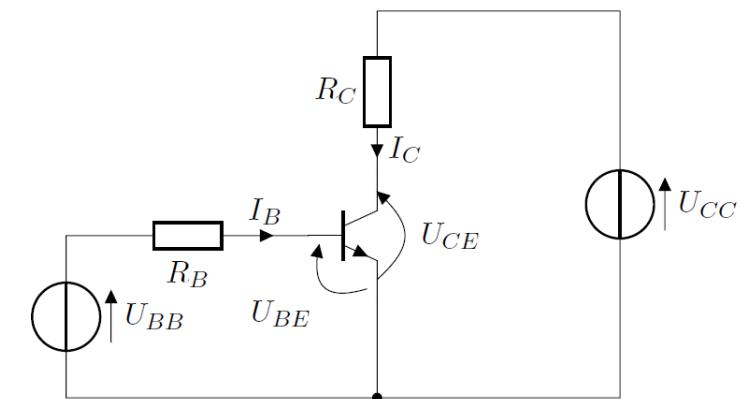
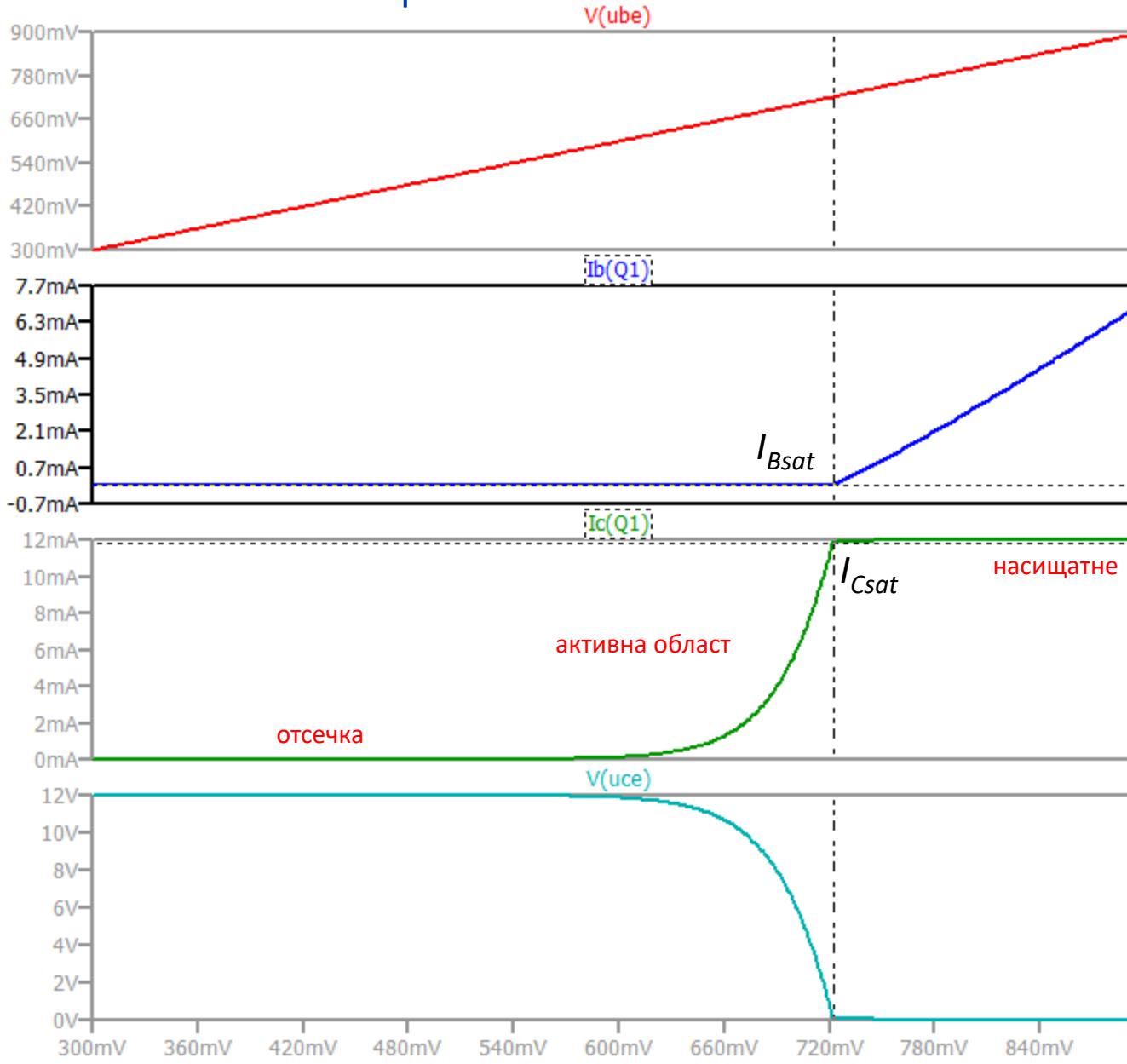
Режими на работа на биполярен транзистор



Режими на работа на биполярен транзистор



Режим на насищане



I_{Bsat}

I_{Csat}

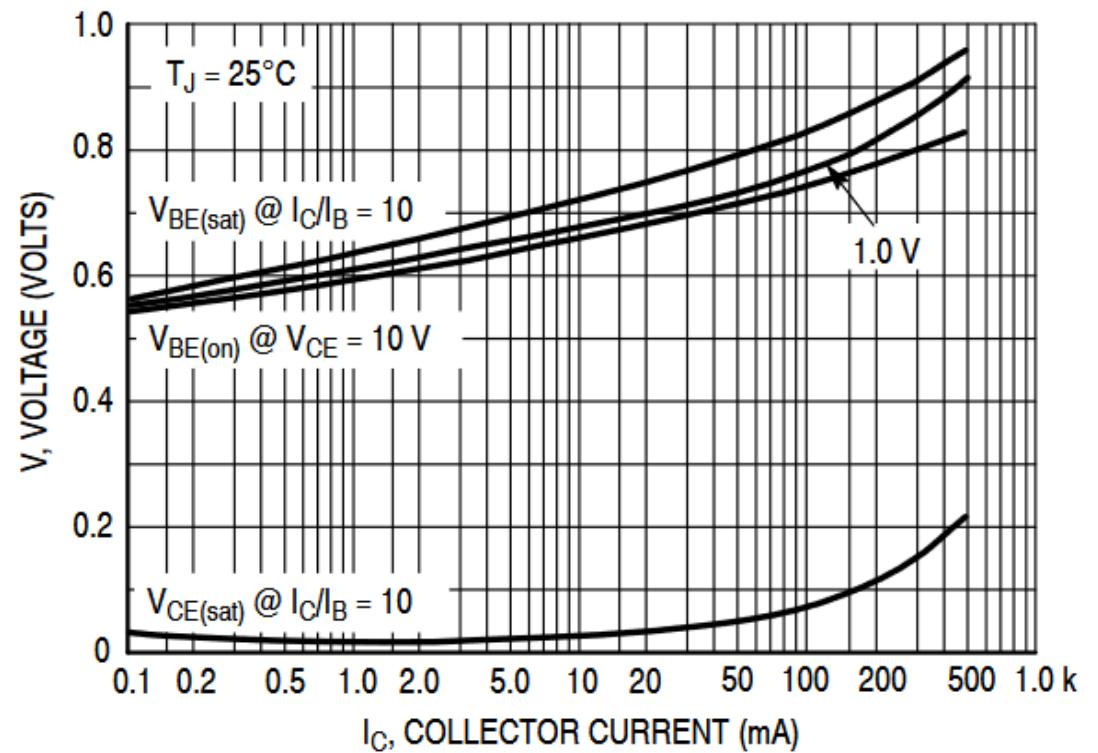
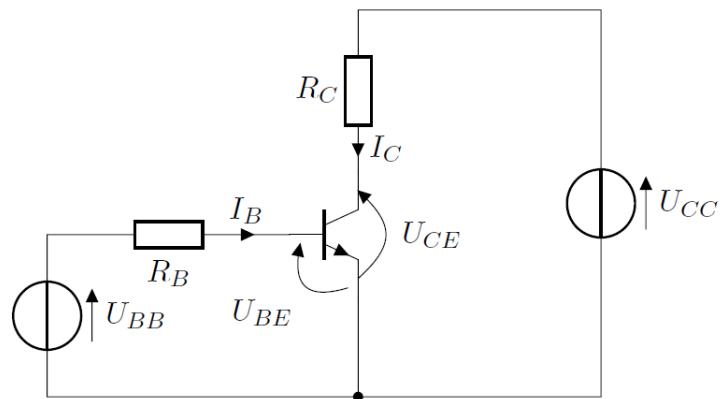
Режим на насищане

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

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

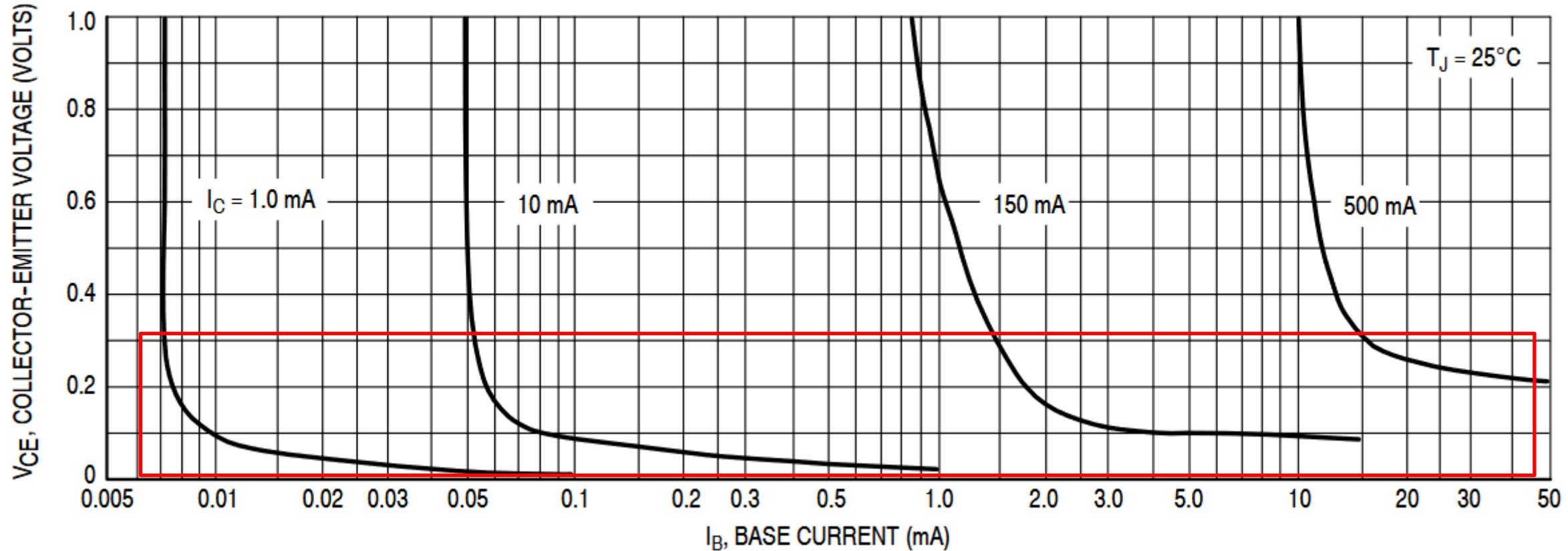
В режим на насищане **не важи условието** $I_C = \beta \cdot I_B$

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.

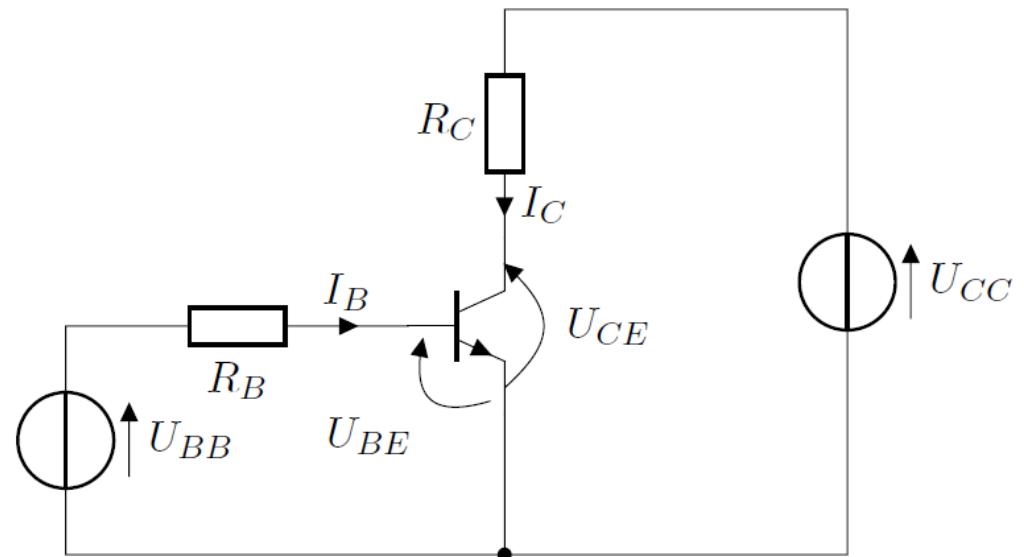
- 3) Проверка на режима

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.

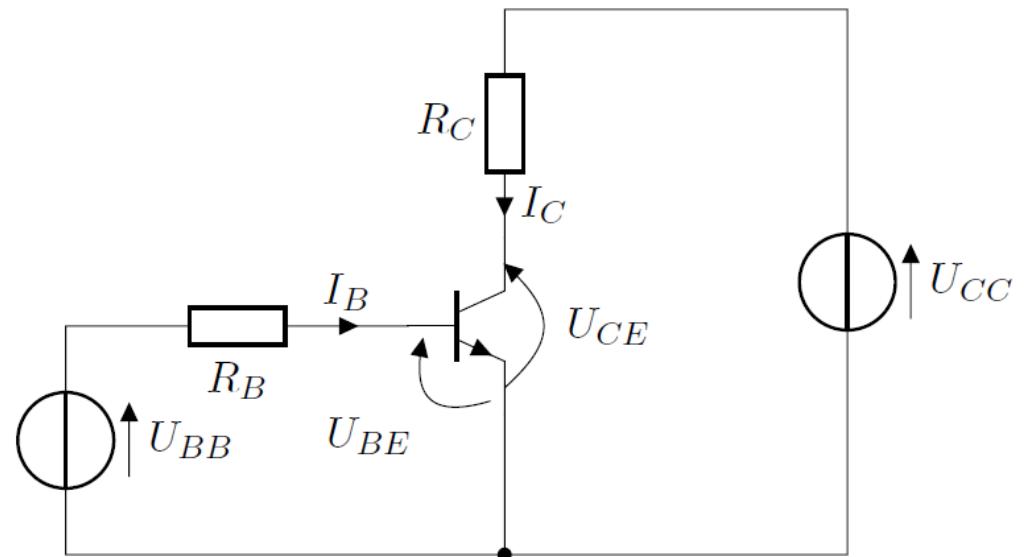
Задачи за постоянно-токов режим

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}

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

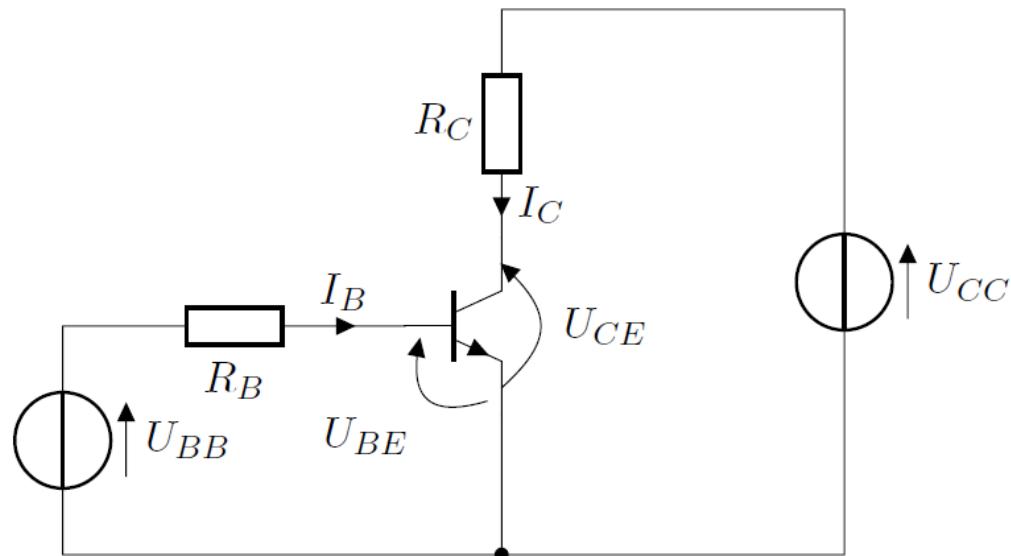
$$I_{Csat} = \frac{U_{CC}}{R_C} \quad I_{Bsat} = \frac{I_{Csat}}{\beta} = \frac{U_{CC}}{R_C \beta}$$

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

$I_B < I_{Bsat}$ – **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}

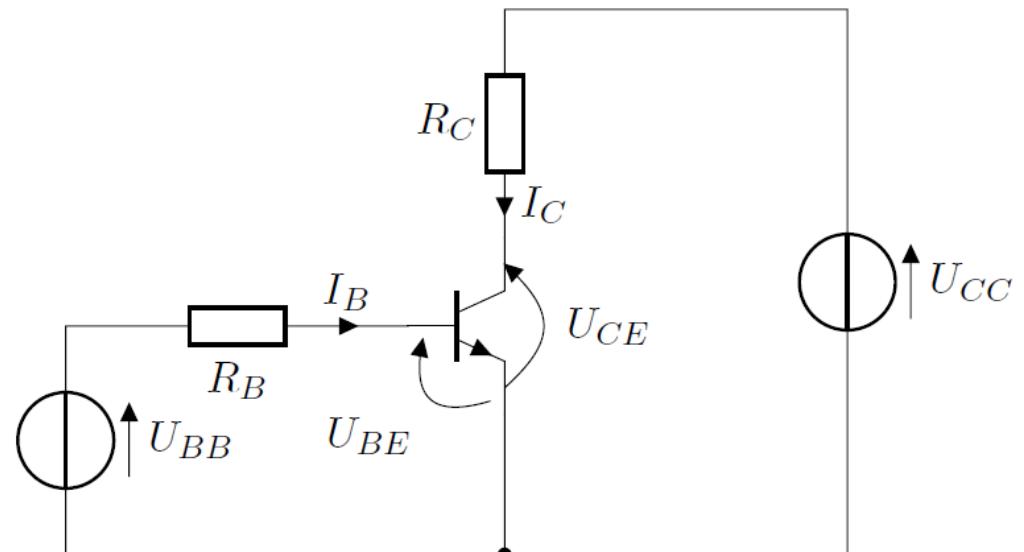
$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} = \frac{4.7 - 0.7}{10 \cdot 10^3} = 0,4 \cdot 10^{-3} A = 0,4 \text{ mA}$$

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

$I_B > I_{Bsat}$ – **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

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

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

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

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

$$U_E = I_E \cdot R_E$$

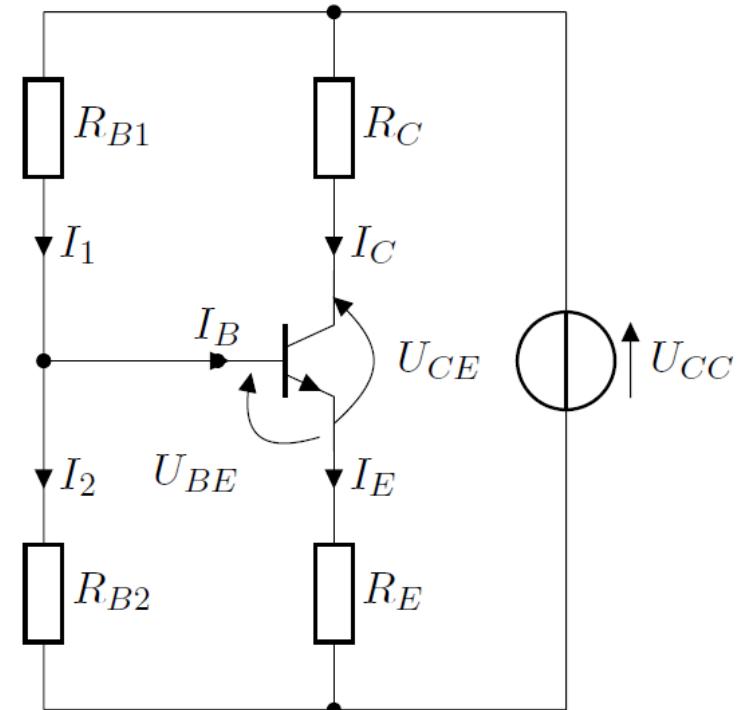
$$I_E = \frac{1}{1 \cdot 10^3} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 1 \text{ mA}$$

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

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

$I_B < I_{Bsat}$ \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

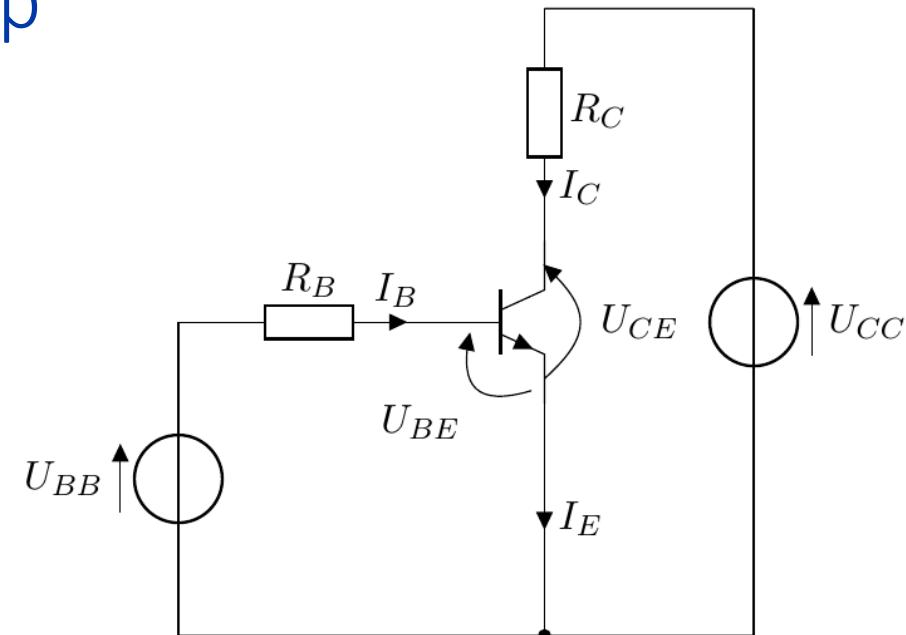
$$R_C = \frac{U_{CC} - U_{CE(sat)}}{I_C}, \text{ където } U_{CE(sat)} \text{ се взема от каталог.}$$

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 $I_B = 0.1 I_C = 1mA$

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

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

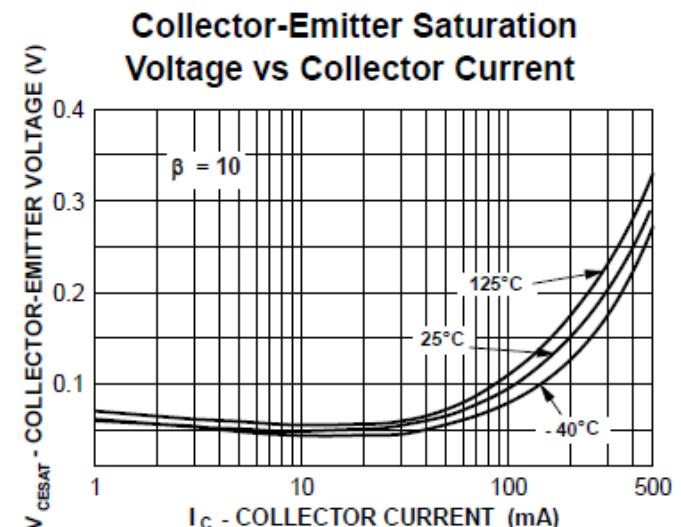
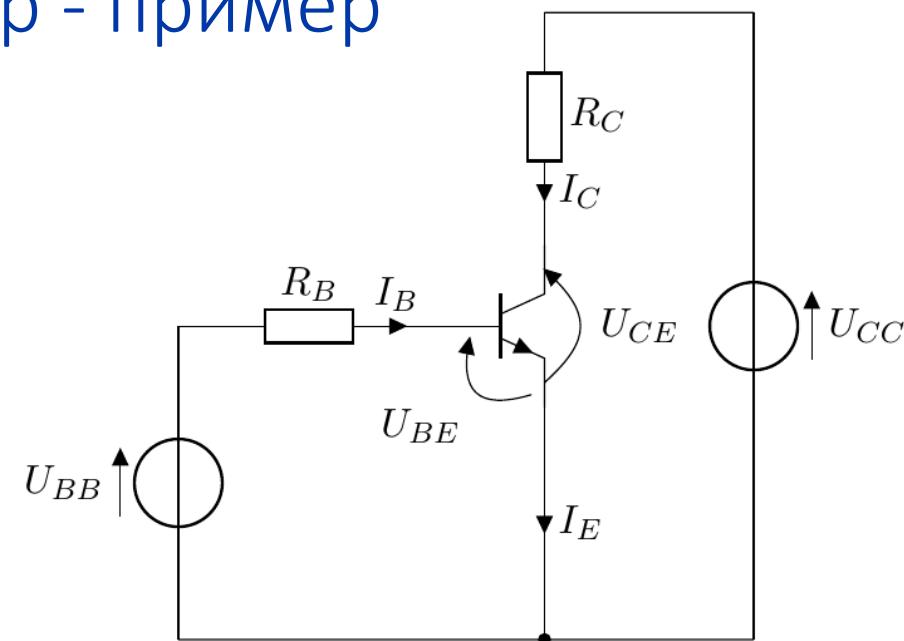
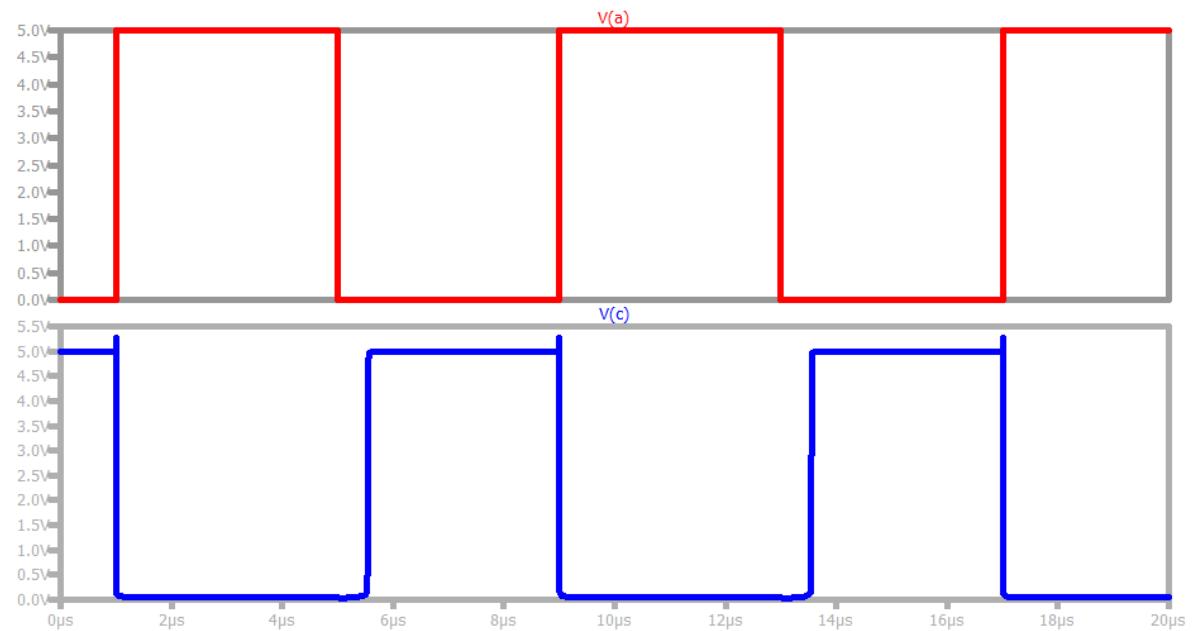
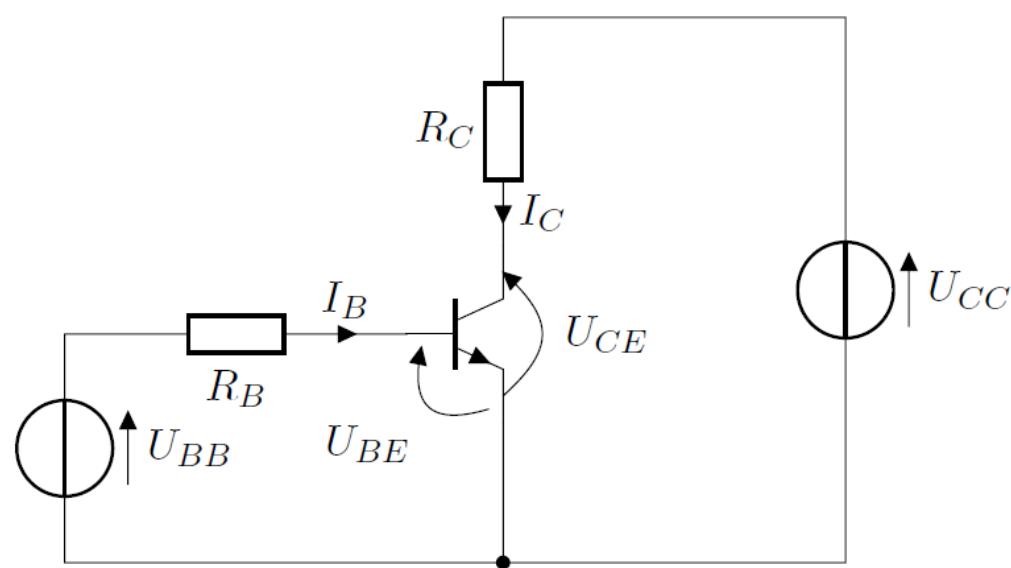


Figure 2. Collector-Emitter Saturation Voltage vs Collector Current

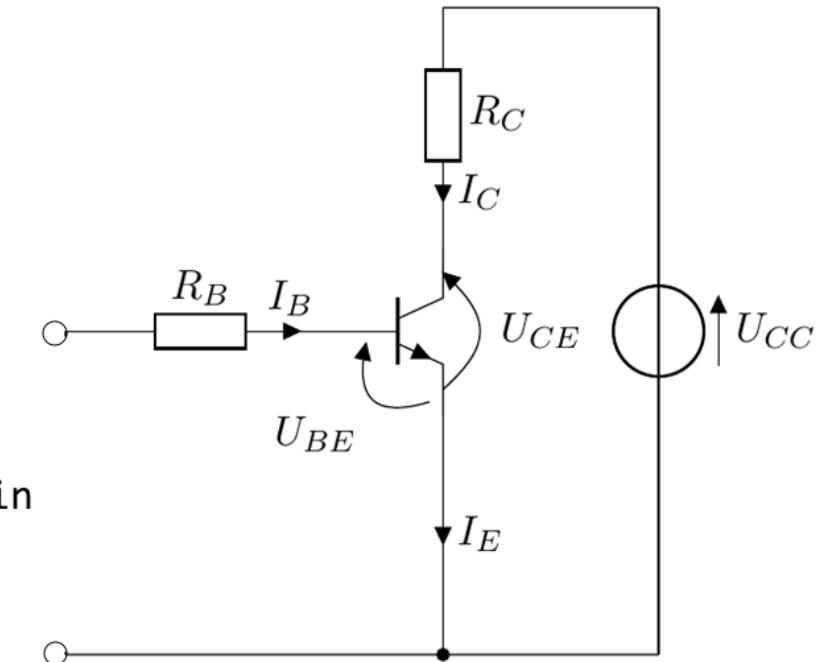
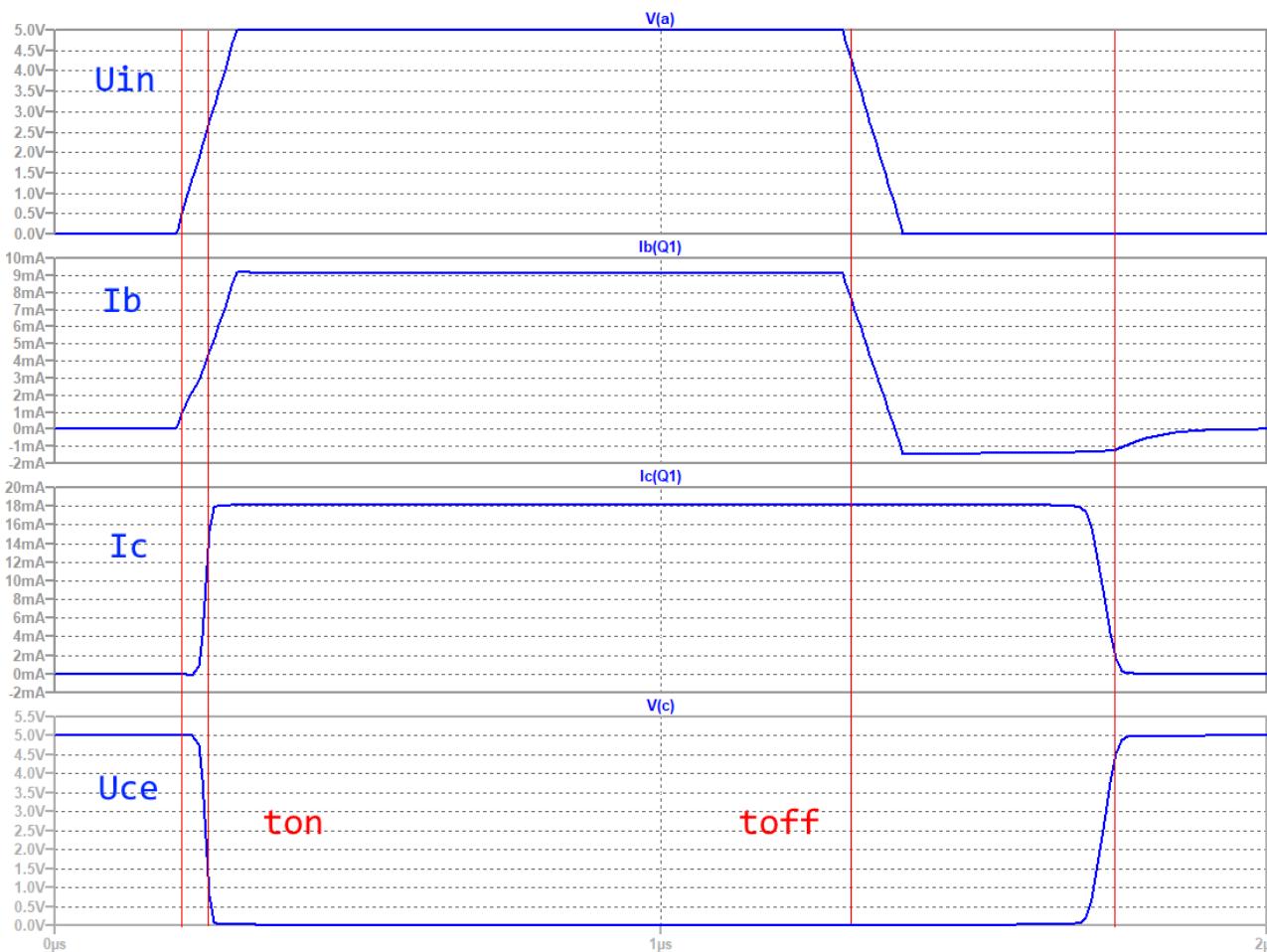
Бързодействие на ключ с биполярен транзистор

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

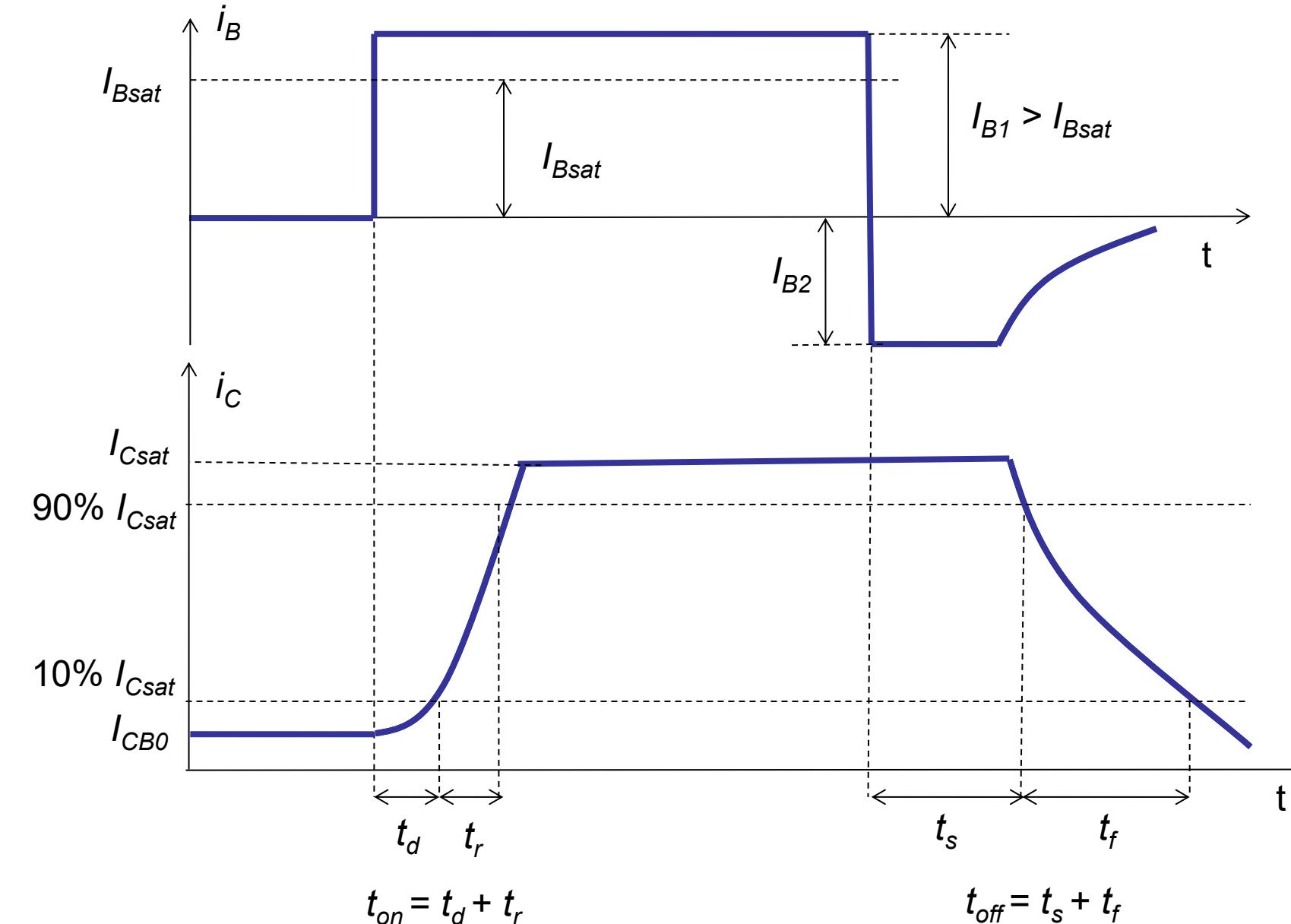
- Инерционността на процесите на пренасяне, натрупване и разнасяне на токоносителите в базата и колектора на транзистора
- Времето, необходимо за презареждане на капацитетите на преходите
- Наличието на паразитни капацитети на корпуса и индуктивности на изводите



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.

