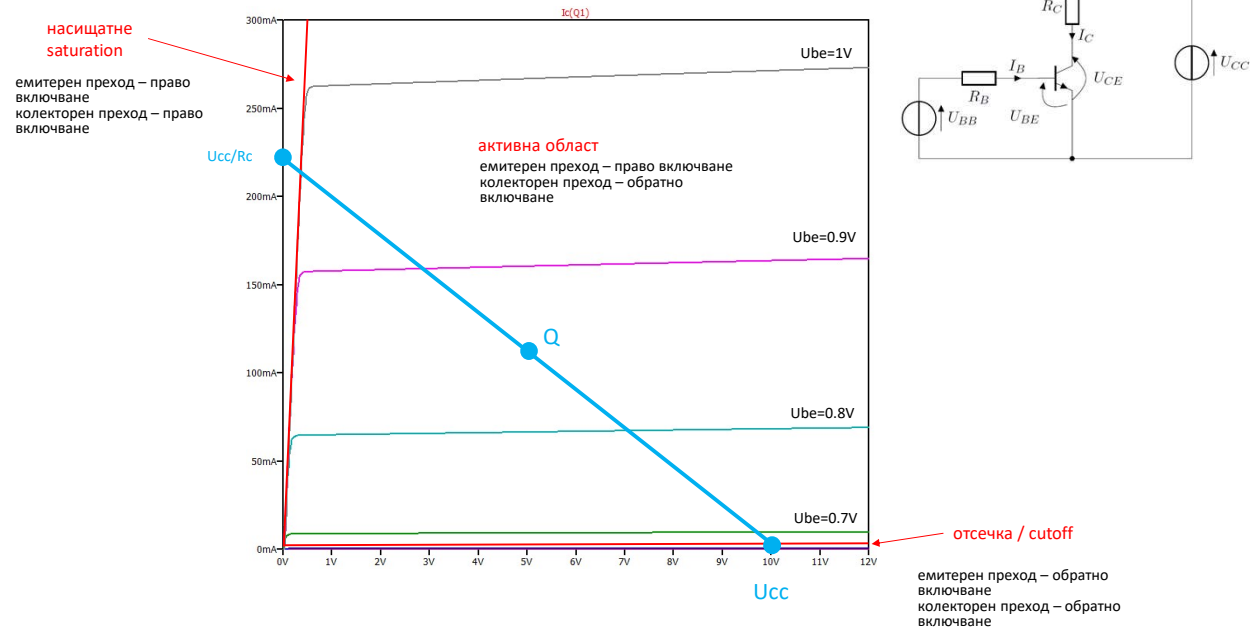




Работа на биполярен транзистор като ключ

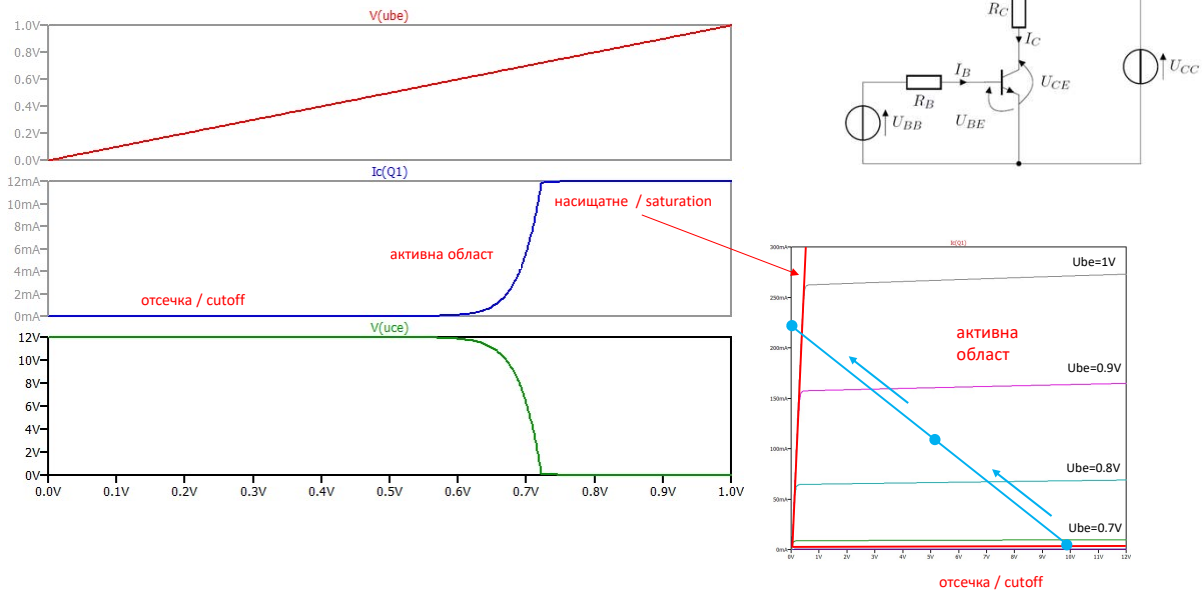
1

Режими на работа на биполярен транзистор



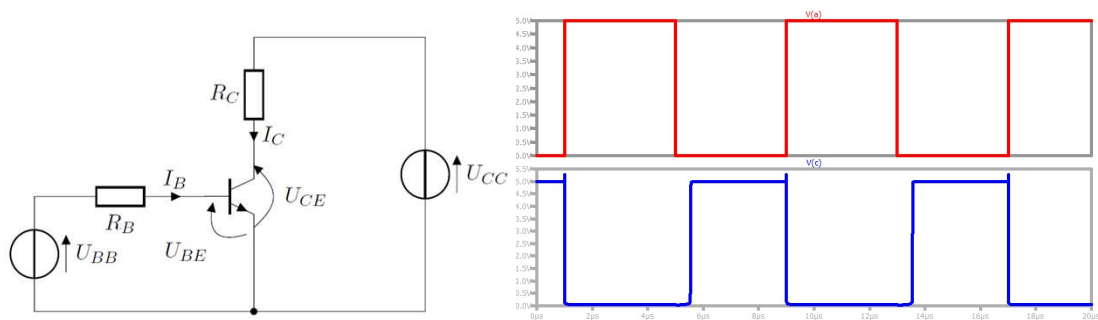
2

Режими на работа на биполярен транзистор



3

Ключ общ емитер

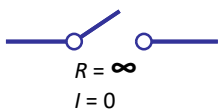


Състоянието на ключа се определя от амплитудата на входния импулс.

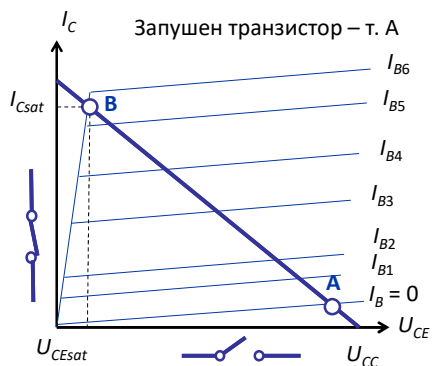
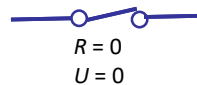
4

Крайни състояния на ключа

Отворен



Затворен

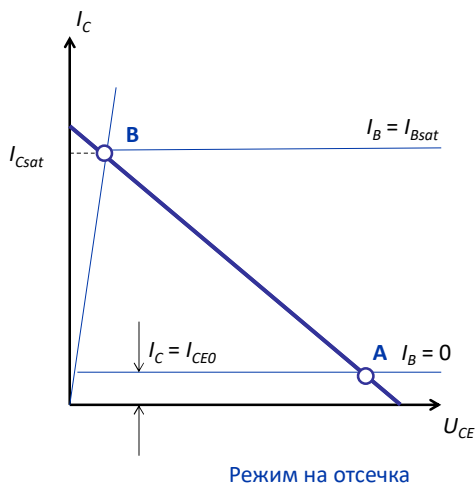


В двете крайни състояния на ключа транзисторът е пасивен елемент и не може да се управлява.

При превключване работната точка се движи по **товарната права**, изминавайки всички точки между т. А и т. В

5

Режим на отсечка



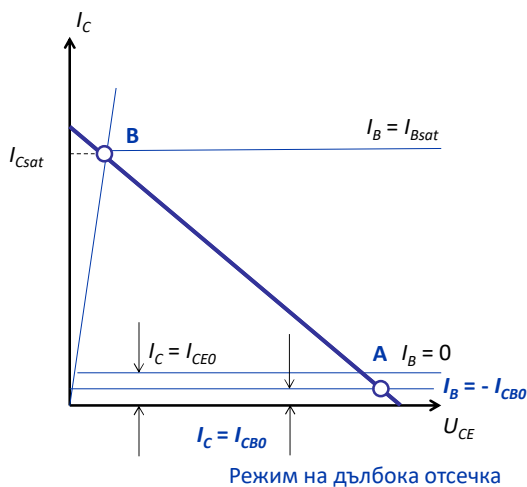
$$I_C = \beta \cdot I_B + (1 + \beta) \cdot I_{CBO}$$

$$\text{Ако } I_B = 0$$

$$I_C = (1 + \beta) I_{CBO} = I_{CEO}$$

6

Режим на дълбока отсечка

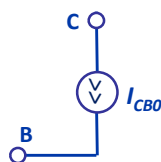


$$I_C = \beta \cdot I_B + (1 + \beta) \cdot I_{CBO}$$

Ако $I_B = -I_{CBO}$

$$I_C = I_{CBO}$$

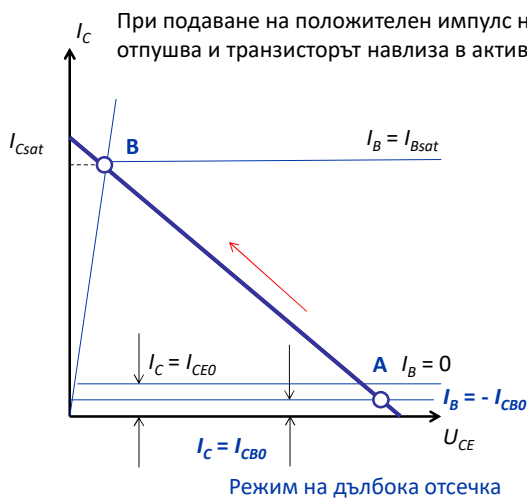
Режим на дълбока отсечка
— т. А



Еквивалентна
схема в режим на
отсечка

7

Активен режим



При подаване на положителен импулс на входа $u_{IN} > 0$, емитерният преход се отпушва и транзисторът навлиза в активен нормален режим.

С нарастване на входното напрежение работната точка се движи по товарната права.

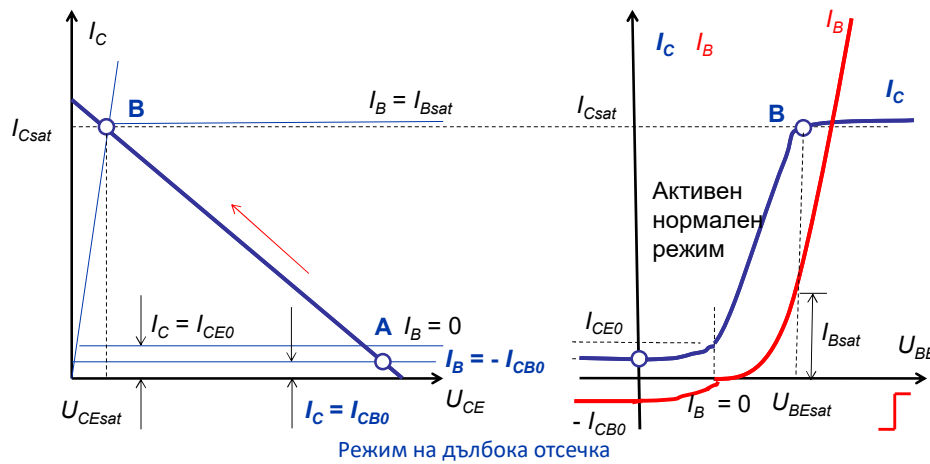
Моментните стойности на токовете в базата и колектора са съответно:

$$i_B = \frac{u_{IN} - u_{BE}}{R_B}$$

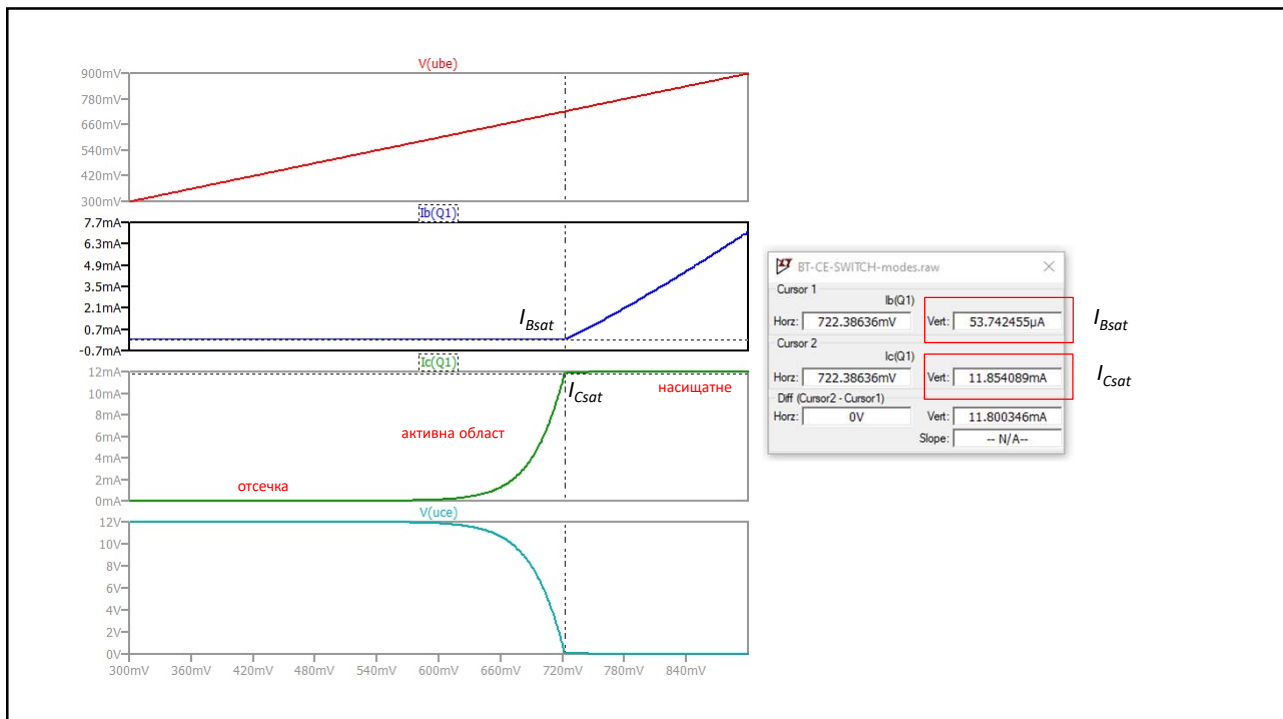
$$i_C = \beta i_B = \beta \frac{u_{IN} - u_{BE}}{R_B}$$

8

Графично изменение на токовете



9



10

Преминаване към насищане

В активен режим, с нарастването на U_{BE} се увеличава и тока на базата I_B , което води до намаляване на U_{CE}

$$I_B \uparrow \Rightarrow I_C = \beta \cdot I_B \uparrow \Rightarrow I_C R_C \uparrow \Rightarrow \downarrow U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C$$

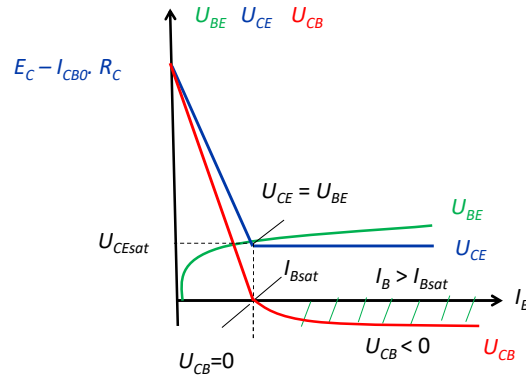
Между напреженията в транзистора има връзка

$$U_{CE} = U_{CB} + U_{BE}$$

откъдето за напрежението U_{CB} се получава

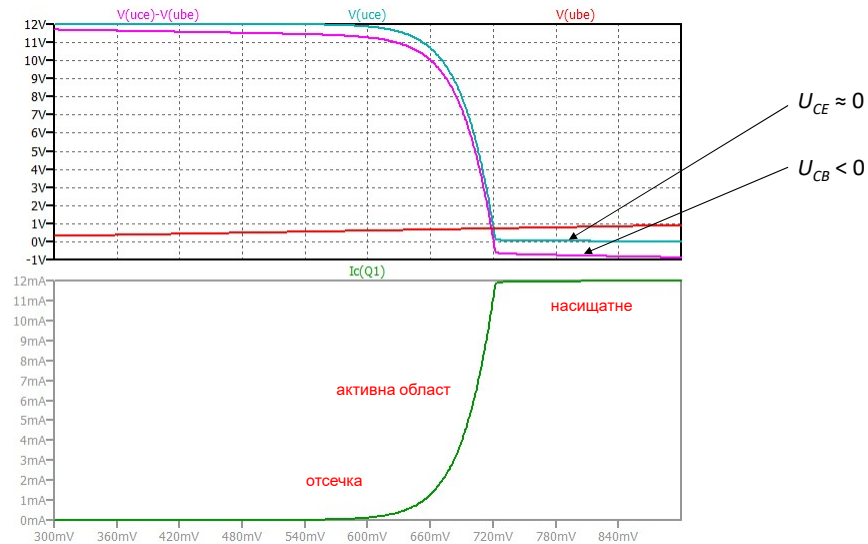
$$U_{CB} = U_{CE} - U_{BE}$$

При ток на базата I_{Bsat} напреженията $U_{CE} = U_{BE}$ и $U_{CB} = 0$



За ток $I_B > I_{Bsat}$ напрежението $U_{CB} < 0$ и двата прехода са в право включване – транзисторът **навлиза в режим на насищане**

11



12

Режим на насищане

В режим на насищане двата прехода се включват в права посока. Те инжектират токоносителни в базата и напрежението $U_{CEsat} \approx 0$. Реално $U_{CEsat} \approx 0,1 \div 0,4$ V (виж следващият слайд).

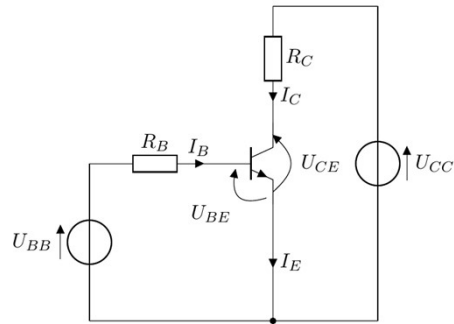
Колекторният ток в режим на насищане е

$$I_{Csat} = \frac{U_{CC} - U_{CEsat}}{R_C} \approx \frac{U_{CC}}{R_C}$$

I_{Csat} не зависи от транзистора

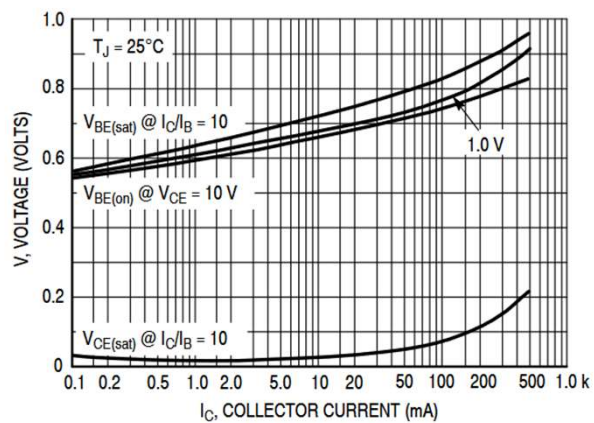
Токът на базата в режим на насищане е

$$I_{Bsat} = \frac{I_{Csat}}{\beta}$$



13

U_{CEsat}



2N2222

14

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**.

$$I_B > I_{Bsat} \quad \text{Тогава } I_C = I_{Csat} = \frac{U_{CC}}{R_C}$$

При $I_B > I_{Bsat}$ се сменя поляритета на напрежението U_{CB} и двата прехода се включват в права посока. В режим на насищане **не важи условието** $I_C = \beta \cdot I_B$.

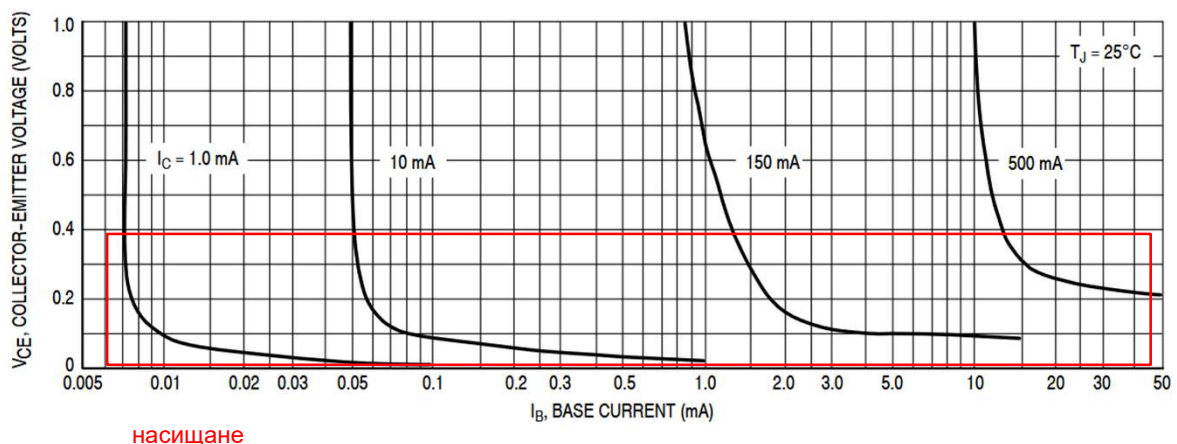
Насищане може да настъпи при много малки токове, тъй като то не зависи от големината на тока, а от **съотношението** между токовете I_B и I_{Bsat} .

Степен на насищане

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

15

Collector saturation region



2N2222

16

Определяне на режима, I_C и U_{CE}

Алгоритъм за решаване

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

С това задачата е решена.

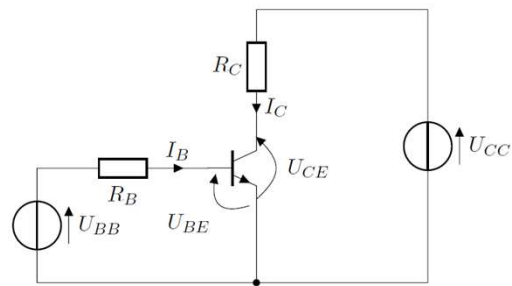
- 2) Ако $U_{BB} > 0.7V$ Транзисторът е **отпушен**.
 Необходимо е да се определи режима – активен или насищане.

- 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 $U_{CE} = U_{CC} - I_{Csat} \cdot R_C = 0V$

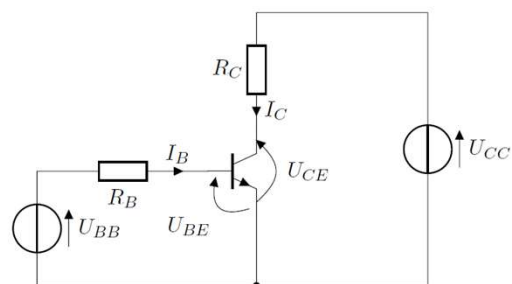


17

Задачи за постоянно-токов режим

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

$$I_B = 0 \quad I_C = \beta \cdot I_B = 0, \\ U_{CE} = U_{CC} - I_C \cdot R_C = U_{CC} - 0 \cdot R_C = U_{CC} = 12V$$



$$U_{BB} = 400mV, U_{CC} = 12V \\ R_C = 1k, R_B = 100k \\ \beta = 100 \\ \dots \\ I_C = ?, U_{CE} = ?$$

18

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}

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

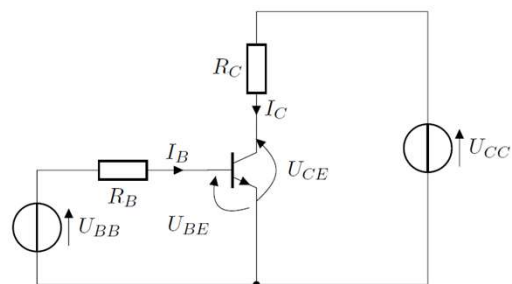
$$I_{Csat} = \frac{U_{CC}}{R_C} \quad I_{Bsat} = \frac{I_{Csat}}{\beta} = \frac{U_{CC}}{R_C \beta}$$

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

$$I_B < I_{Bsat} - \text{Активен режим}$$

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

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



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

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

$$\beta = 120$$

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

19

Задачи за постоянно-токов режим

Проверка за отпушен транзистор.

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

Правим проверка за режима – активен или насищане

Изчисляват се I_B и I_{Bsat}

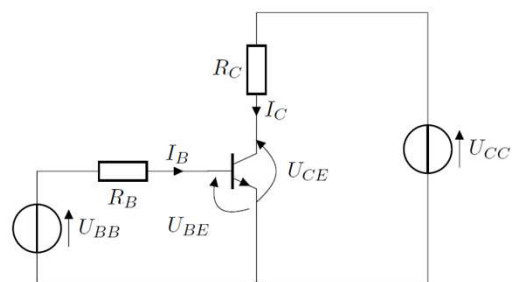
$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} = \frac{4,7 - 0,7}{10 \cdot 10^3} = 0,4 \cdot 10^{-3} A = 0,4 \text{ mA}$$

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

$$I_B > I_{Bsat} - \text{Насищане}$$

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

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



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

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

$$\beta = 60$$

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

20

Задачи за постоянно-токов режим

$U_B > 0,7V \therefore$ транзисторът е отпушен

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

$$I_{Bsat} = \frac{I_{Csat}}{\beta} = \frac{12 \cdot 10^{-3}}{300} = 4 \cdot 10^{-5} = 40\mu A$$

От закона на Кирхоф за входната верига

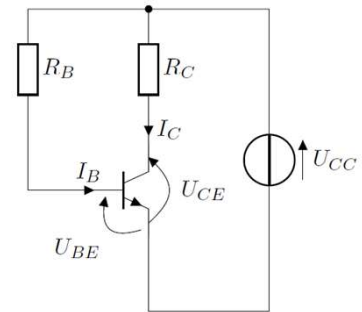
$$U_{CC} = I_B R_B + U_{BE}$$

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B} = \frac{6 - 0,7}{100 \cdot 10^3} = \frac{5,3}{1 \cdot 10^5} = 5,3 \cdot 10^{-5} = 53\mu A$$

$I_B > I_{Bsat} \therefore$ транзисторът е в режим на насищане

$$\therefore I_C = I_{Csat} = 12mA$$

$$\therefore U_{CE} = 0V$$



$$U_{CC} = 6V$$

$$R_C = 500, R_B = 100k$$

$$\beta = 300$$

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

21

Задачи за постоянно-токов режим

Да се определи минималната стойност на R_B , при която транзисторът от фигурата ще работи в режим на насищане.

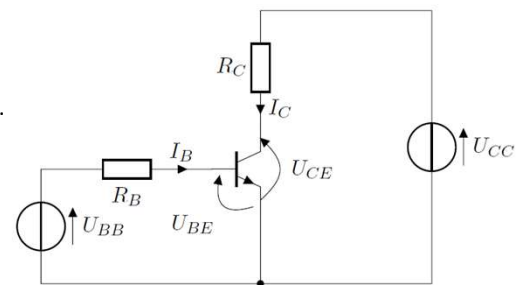
Условие за насищане $I_B > I_{Bsat}$

$$I_B = \frac{U_{IN} - U_{BE}}{R_B} > I_{Bsat} = \frac{U_{CC}}{R_C \beta}$$

$$\frac{U_{IN} - U_{BE}}{R_B} > \frac{U_{CC}}{R_C \beta}$$

$$R_B < \frac{(U_{IN} - U_{BE}) R_C \beta}{U_{CC}}$$

$$R_B < \frac{(6 - 0,7) 1 \cdot 10^3 \cdot 60}{12} < 26,5 \cdot 10^3 \Omega < 26,5 k\Omega$$



$$U_{BB} = 6V, U_{CC} = 12V$$

$$R_C = 1k, \beta = 60$$

$$R_{Bmin} = ?$$

22

Задачи за постоянно-токов режим

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

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

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

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

$$U_E = I_E \cdot R_E$$

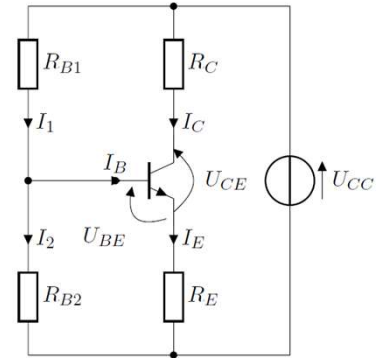
$$I_E = \frac{1}{1 \cdot 10^3} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 1 \text{ mA}$$

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

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

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

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



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

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

$$\beta = 100$$

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

23

Бързодействие на ключ с биполярен транзистор

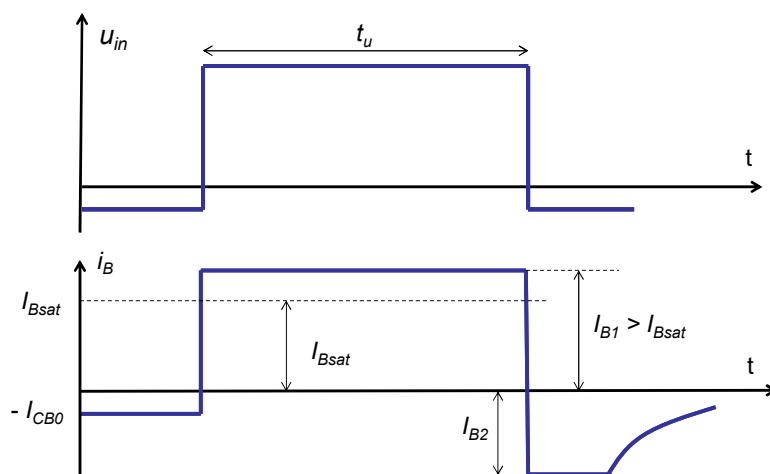
Бързодействието на ключа зависи от продължителността на преходните процеси при превключване. Преходните процеси се дължат на:

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

В изходно състояние транзисторът е запушен. На входа му се подава отпушващ положителен импулс. Пренебрегват се преходните процеси в базата и се предполага, че напрежението е достатъчно транзисторът да влезе в насищане. След време, равно на продължителността на импулса, поляритетът на входното напрежение се променя.

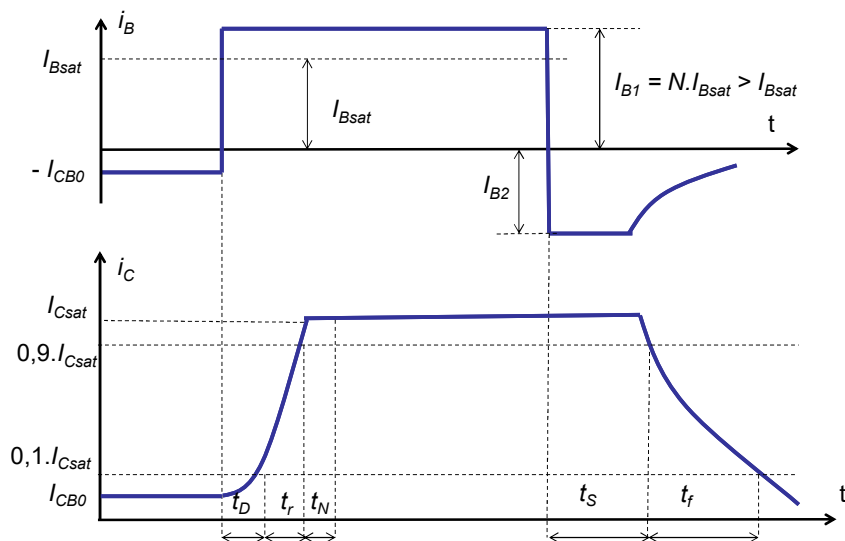
24

Преходни процеси при превключване



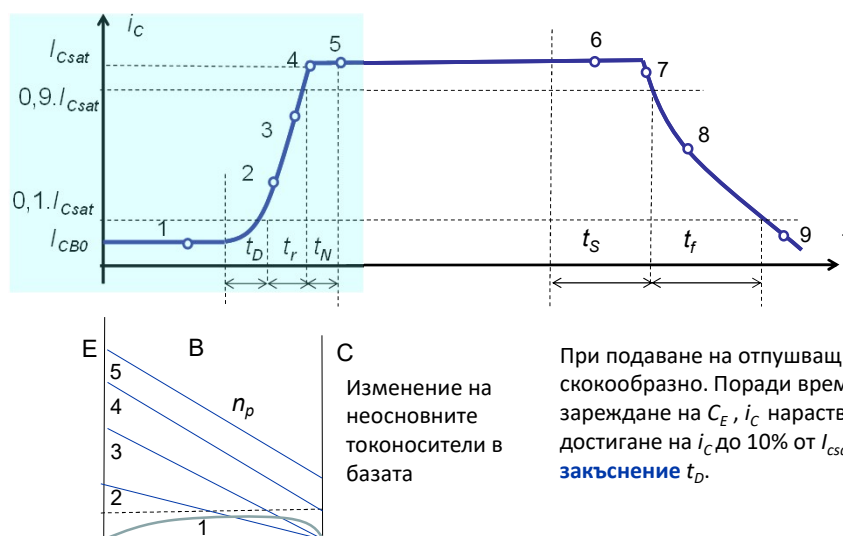
25

Преходни процеси при превключване



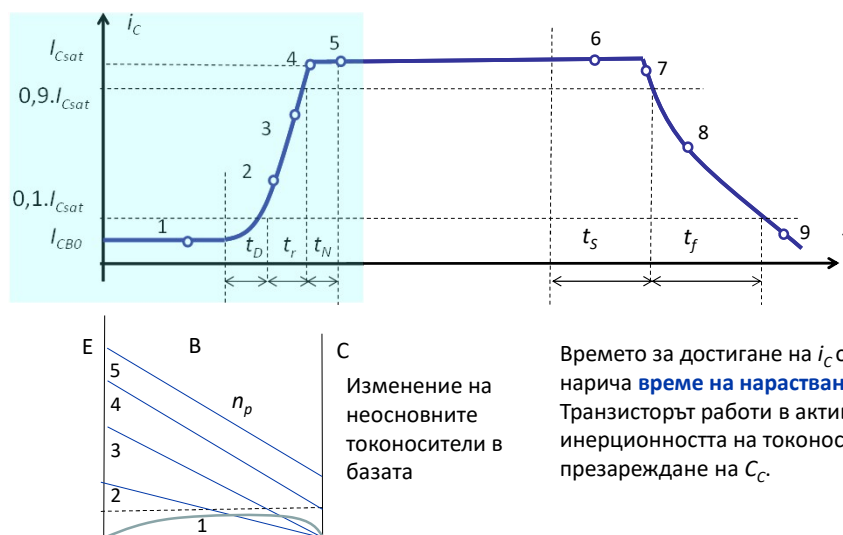
26

Преходни процеси при превключване



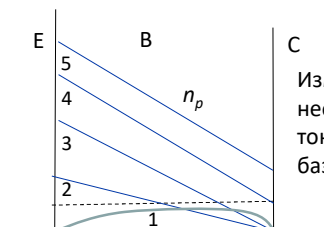
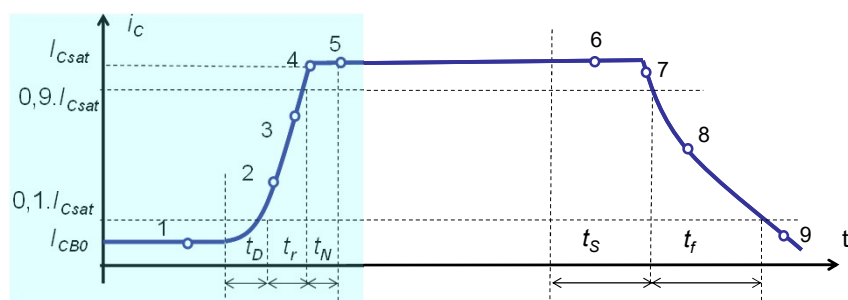
27

Преходни процеси при превключване



28

Преходни процеси при превключване

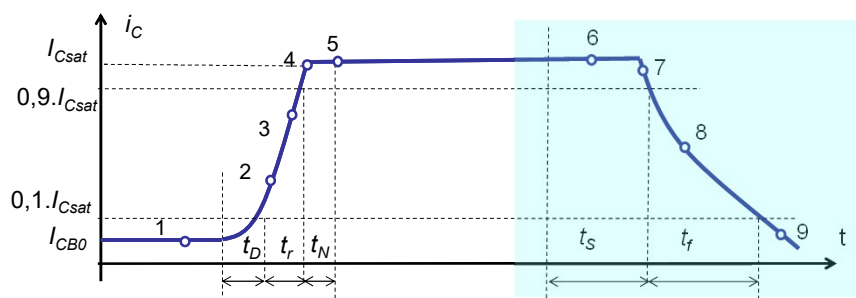


Изменение на неосновните токоносители в базата

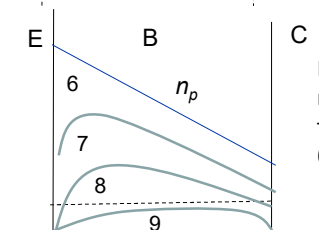
При навлизане на транзистора в насищане, i_C достига I_{Csat} , но натрупването на токоносители продължава в зависимост от степента на насищане N за **време за натрупване** t_N с което преходният процес при включване завършва.

29

Преходни процеси при превключване



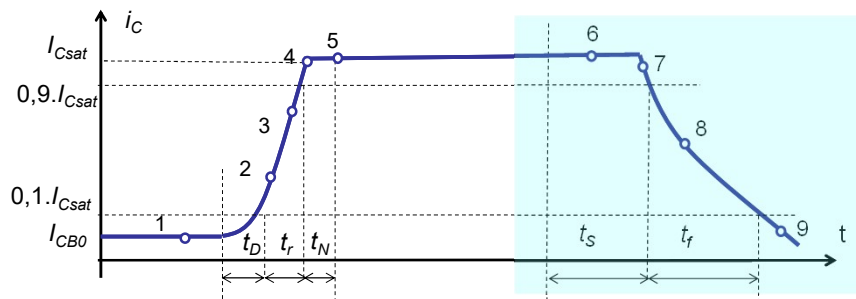
При подаване на запущащ импулс i_B сменя знака си. Започва разнасяне на натрупаните токоносители, но $i_C = I_{Csat}$. Дефинира се **време за разнасяне на токоносители** t_S , за което i_C спада до 90% от I_{Csat} .



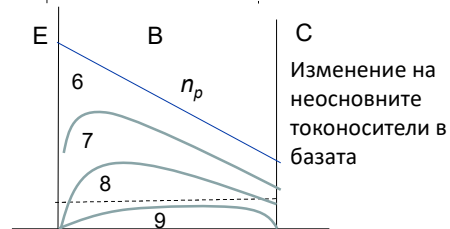
Изменение на неосновните токоносители в базата

30

Преходни процеси при превключване

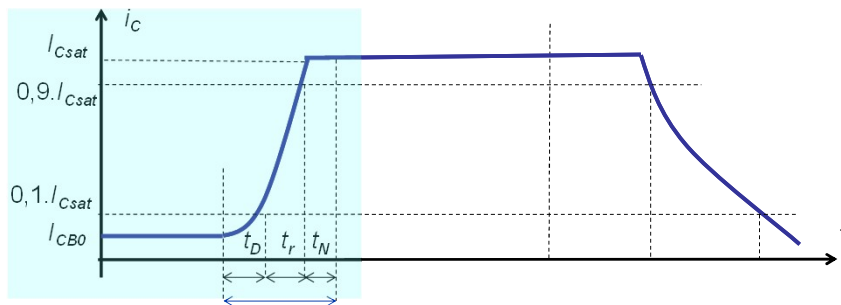


След t_s колекторният ток започва да спада. Дефинира се **време за спадане** t_f за което i_C спада от 90% до 10% от I_{Csat} , където се приема, че транзисторът се запушва.



31

Импулсни параметри



$$t_{ON} = t_D + t_r + t_N \quad t_{ON} - \text{време на включване}$$

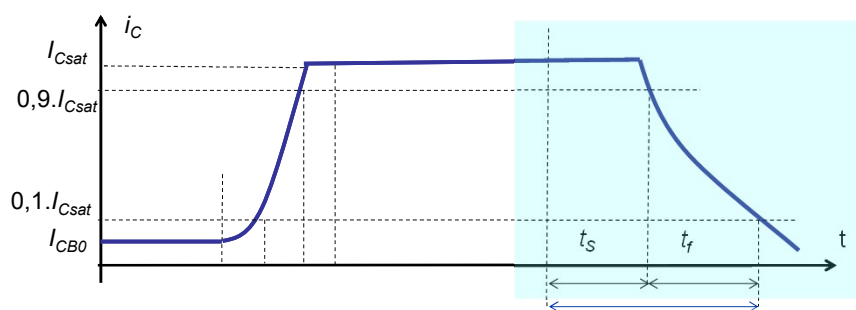
t_D – време на закъснение – времето от подаване на отпушващ импулс до достигане на $i_C = 0,1.I_{Csat}$

t_r – време за нарастване – времето нарастване на i_C от $0,1.I_{Csat}$ до $0,9.I_{Csat}$

t_N – време за натрупване – времето за натрупване на токоносителите, съответстващи на $i_B = N.I_{Bsat}$

32

Импульсни параметри



t_{OFF} – време на изключване

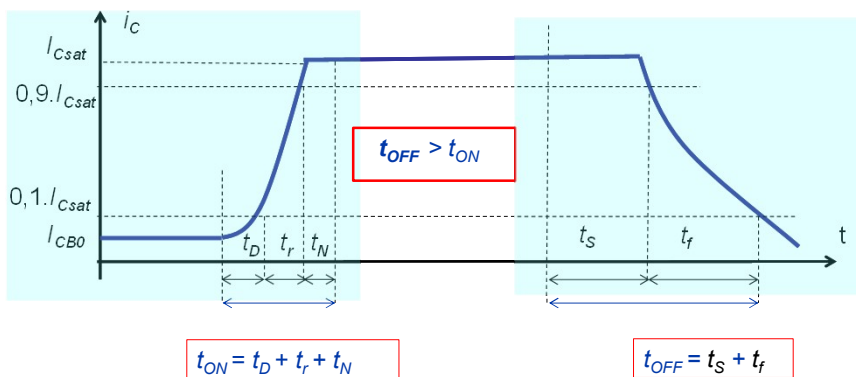
$$t_{OFF} = t_s + t_f$$

t_s – време на разнасяне – времето от подаване на запущащ импулс до достигане на $i_C = 0,9.I_{Csat}$

t_f – време за спадане – времето спадане на i_C от $0,9.I_{Csat}$ до $0,1.I_{Csat}$

33

Импульсни параметри



$$t_{ON} = t_D + t_r + t_N$$

$$t_{OFF} = t_s + t_f$$

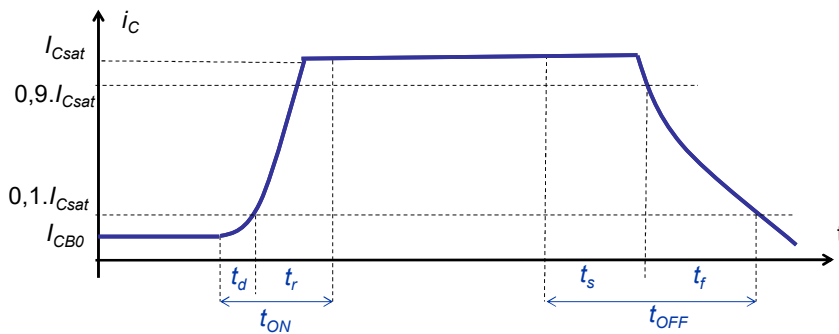
t_{ON} – време на включване

t_{OFF} – време на изключване

Времето на изключване t_{OFF} е много по-голямо от времето за включване t_{ON} .

34

Импулсни параметри



SWITCHING CHARACTERISTICS

Delay Time	$(V_{CC} = 30 \text{ Vdc}, V_{BE(off)} = -2.0 \text{ Vdc}, I_C = 150 \text{ mAdc}, I_{B1} = 15 \text{ mAdc})$ (Figure 1)	t_d	-	10	ns
Rise Time		t_r	-	25	ns
Storage Time	$(V_{CC} = 30 \text{ Vdc}, I_C = 150 \text{ mAdc}, I_{B1} = I_{B2} = 15 \text{ mAdc})$ (Figure 2)	t_s	-	225	ns
Fall Time		t_f	-	60	ns

2N2222

35

Импулсни параметри

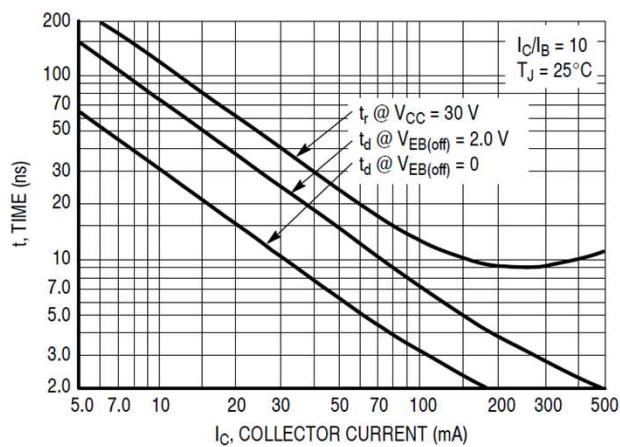


Figure 5. Turn-On Time

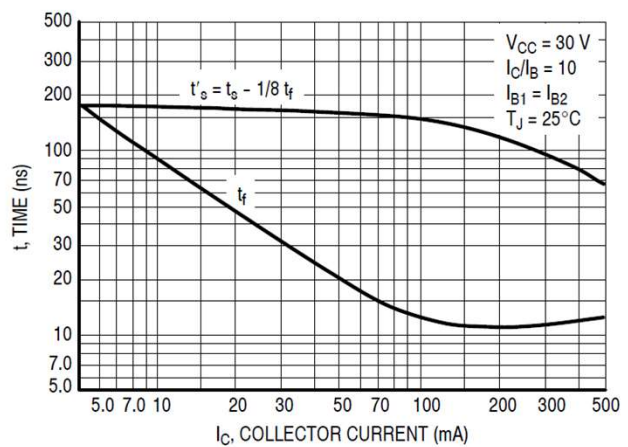


Figure 6. Turn-Off Time

2N2222

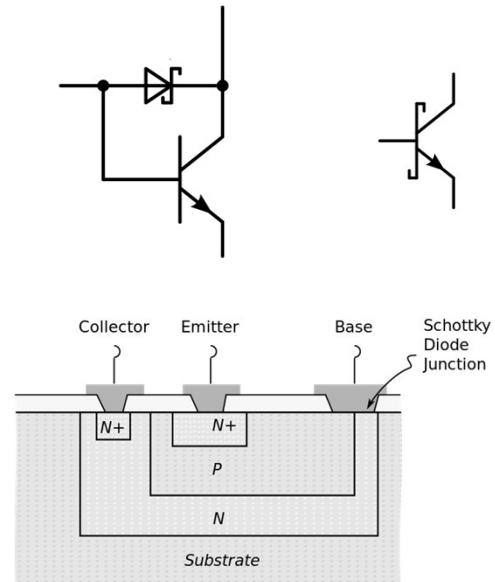
36

Импульсни параметри

- Времената t_s и t_f зависят от I_{B2} 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 I_{B1} (от степента на насищане N)

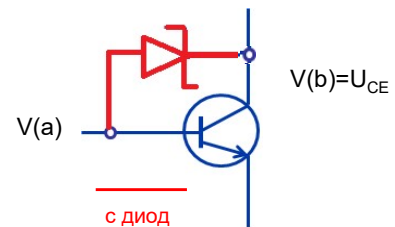
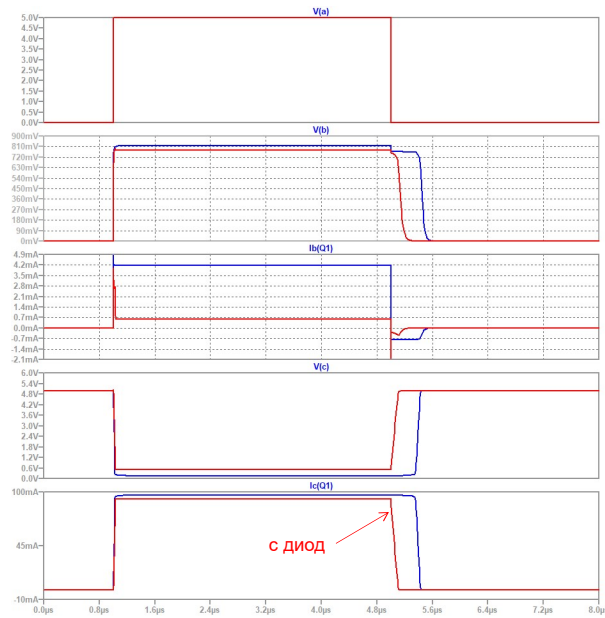
В интегралните схеми преходът база-колектор се шунтира с диод на Шотки, където $U_F = 0,1 - 0,3$ V. Това ограничава тока през колекторния преход при право включване и натрупването на токоносители, откъдето t_s рязко намалява.

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



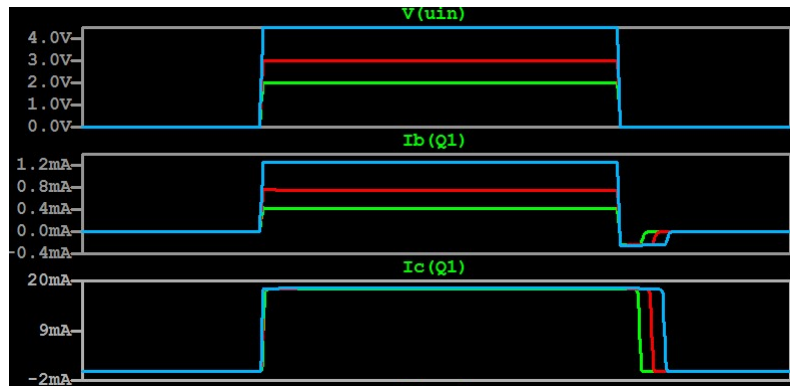
37

Влияние на Шотки диод



38

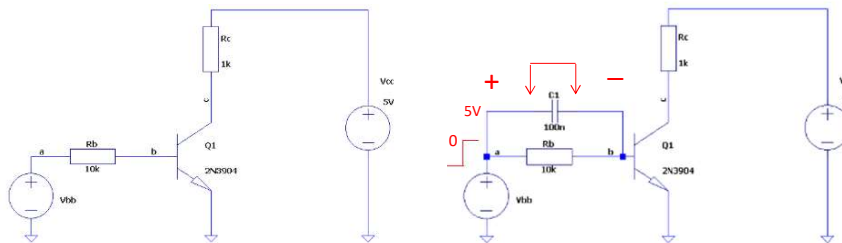
Влияние на входното напрежение



$$U_{in} \uparrow \Rightarrow I_B = \frac{U_{in} - U_{BE}}{R_B} \uparrow \quad I_{Bsat} = \frac{I_{Csat}}{\beta} = \frac{E_C}{R_C \beta} \Rightarrow N = \frac{I_B}{I_{Bsat}} \uparrow \Rightarrow t_{OFF} \uparrow$$

39

Влияние на кондензатор в базовата верига



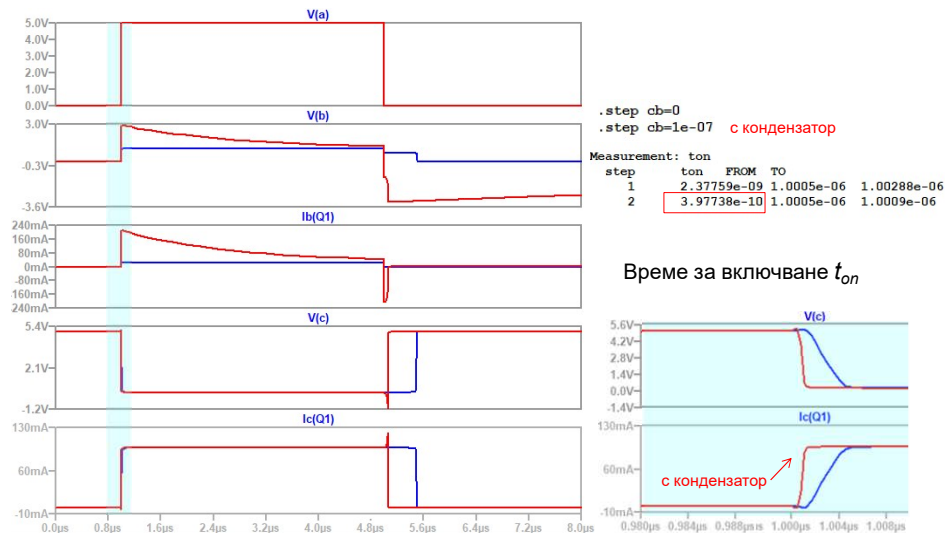
Включването на **ускоряващ кондензатор** в базовата верига на транзистора спомага за подобряване на бързодействието на електронния ключ.

При подаване на положителен отпущащ импулс кондензаторът първоначално не е зареден, шунтира R_b , осигурявайки голям първоначален ток при включване на транзистора, с което **се намалява** t_{on} .

Постепенно кондензаторът се зарежда до стойността на напрежението върху R_b $U_{Rb} = V_{bb} - U_{be}$. Базовият ток постепенно намалява, докато достигне стойността си без наличие на кондензатор и транзисторът се установява в насищане.

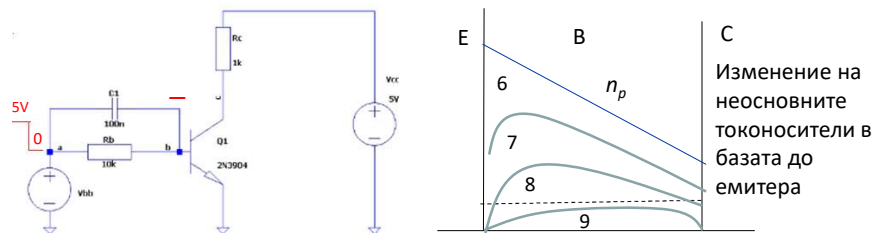
40

Влияние на кондензатор в базовата верига



41

Влияние на кондензатор в базовата верига



При насищане, в базата се натрупва заряд, който трябва да се разнесе, за да се запуши транзисторът. В първия момент, при подаване на запущащ импулс (от 5V до 0V), кондензаторът е зареден и напрежението върху него се подава като голямо отрицателно (обратно) напрежение към прехода база-емитер.

Това рязко увеличава обратния базов ток по време на превключването, който буквално "изсмуква" натрупания заряд в базовата област, ускорявайки разнасянето на токоносителите. Така се **намалява** t_{off} и транзисторът се запуща по-бързо.

42

Влияние на кондензатор в базовата верига

