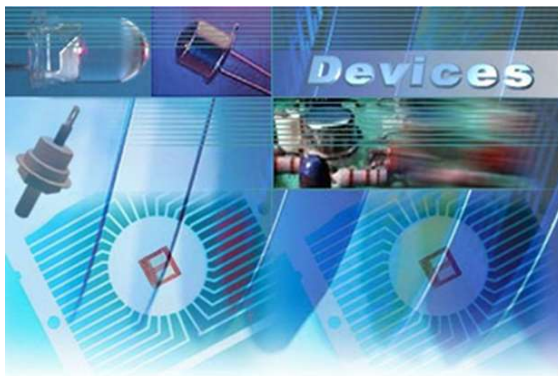


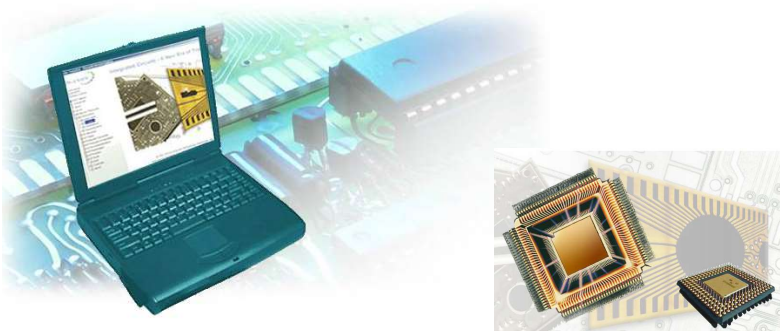


Ключов режим на биполярни транзистори



Полупроводникови
елементи

Основни приложения



Транзисторът **като ключ** се използва във всички цифрови схеми, които са в основата на компютърната техника. В този режим работят транзисторите в микропроцесорите, микроконтролерите, полупроводниковите памети и др. Компютри и компютризирано управление на машини и оборудване се срещат навсякъде в индустрията, транспорта и в ежедневиия ни живот.

Цели и предпоставки

Разглежда се работата на транзистора като ключ, преходните процеси и импулсните параметри на транзистора

Познавате

Разбирате

Анализирате

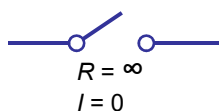
След изучаване на материала вие би трябвало да:

- ✦ Състоянията на транзистора като ключ
- ✦ Ключ в схема общ емитер
- ✦ Режими на работа в крайните състояния на ключа
- ✦ Причината за навлизане на транзистора в режим на насищане
- ✦ Процесите, протичащи при превключване
- ✦ Факторите, влияещи върху импулсните параметри
- ✦ Връзката между токовете в транзистора при насищане
- ✦ Токовете и напреженията в схеми с транзистори

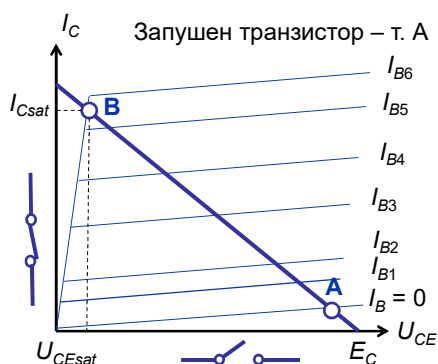
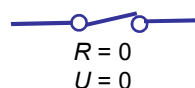
Предпоставки: биполярен транзистор

Крайни състояния на ключа

Отворен



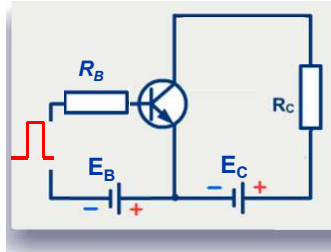
Затворен



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

Ключ общ емитер



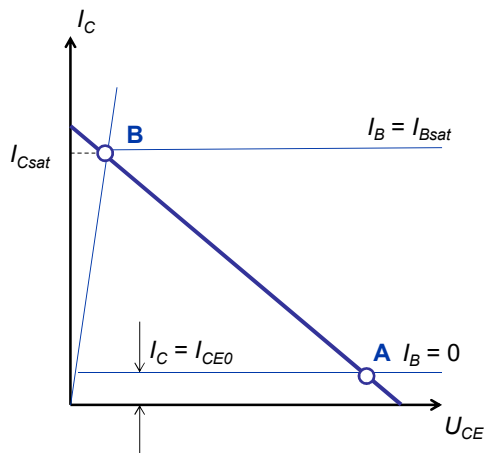
Предимства:

- ✦ Малка мощност на управление
- ✦ Малко съпротивление при включено състояние

В изходно състояние транзисторът е запушен (емитерният и колекторният преход са в обратно включване) поради подаденото преднапрежение E_B .

Състоянието на ключа се определя от амплитудата на входния положителен отпушващ импулс.

Режим на отсечка



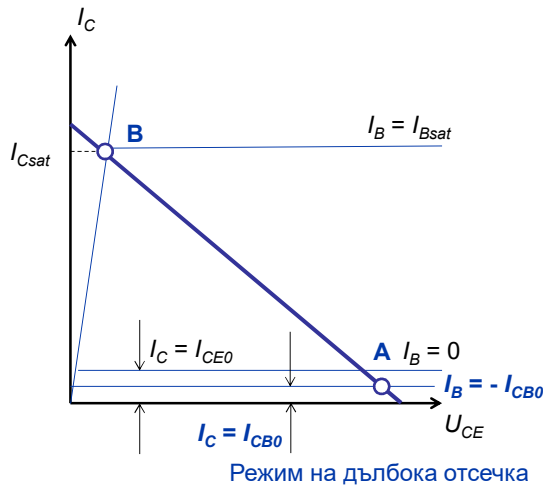
$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CB0}$$

$$\text{Ако } I_B = 0$$

$$I_C = (1 + \beta) I_{CB0} = I_{CE0}$$

Режим на отсечка

Режим на дълбока отсечка

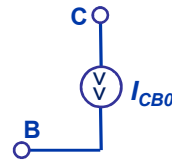


$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CB0}$$

Ако $I_B = -I_{CB0}$

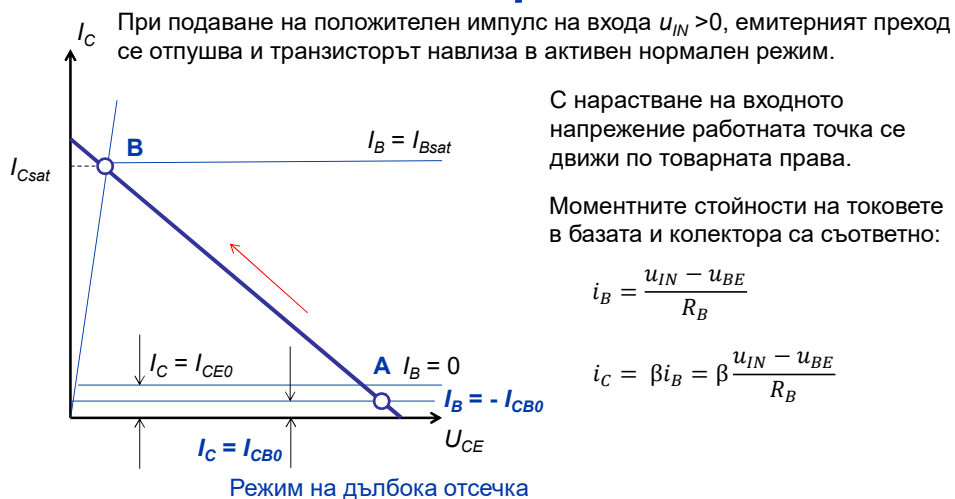
$$I_C = I_{CB0}$$

Режим на дълбока отсечка – т. А



Еквивалентна схема в режим на отсечка

Активен режим



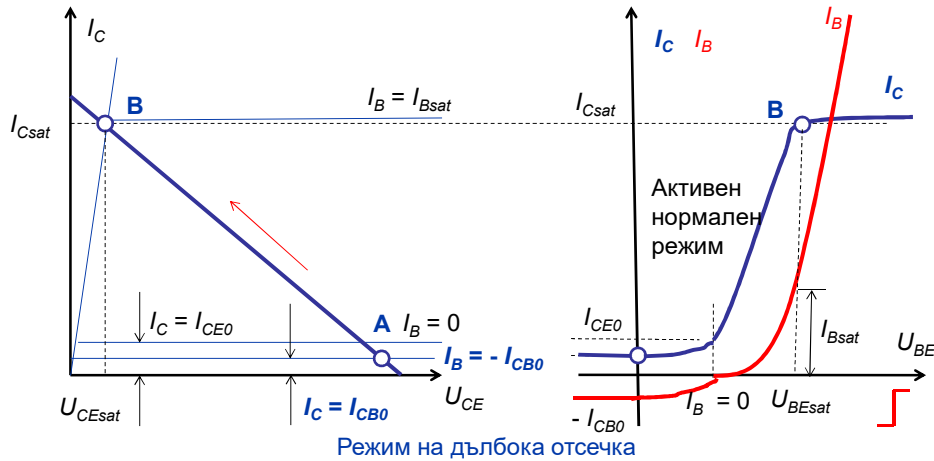
С нарастване на входното напрежение работната точка се движи по товарната права.

Моментните стойности на токовете в базата и колектора са съответно:

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

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

Графично изменение на токовете



Преминаване към насищане

В активен режим, когато се увеличава базисният ток I_B

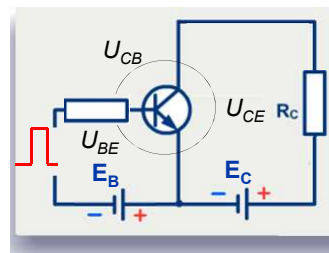
- ✦ **Нараства** U_{BE} съгласно входните характеристики
- ✦ **Намалява** U_{CE} , защото

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

Между напреженията в транзистора има връзка

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

откъдето за напрежението на колекторния преход U_{CB} се получава



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

Изменение на напряженията

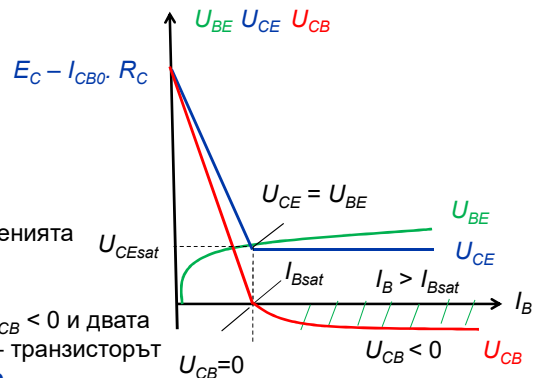
В активен режим, когато се увеличава базисният ток

- ✦ Нараства U_{BE}
- ✦ Намалява U_{CE}

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

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

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



Режим на насищане

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

Колекторният ток в режим на насищане I_{Csat} е

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

I_{Csat} не зависи от транзистора

Базисният ток на насищане I_{Bsat} е

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

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**.

$$I_B > I_{Bsat}$$

$$\text{Тогава } I_C = I_{Csat} = \text{const} = \frac{E_C}{R_C}$$

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} .

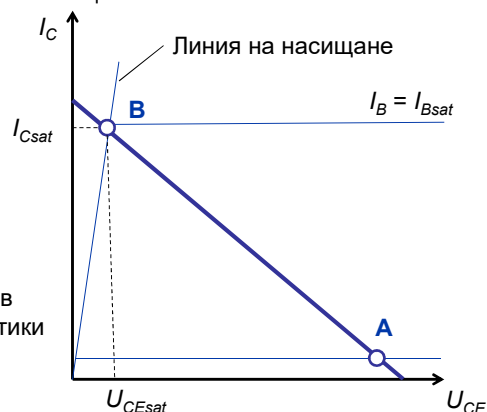
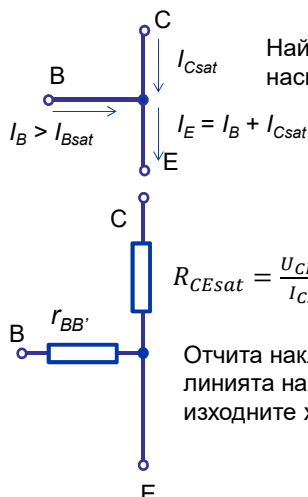
Степен на насищане

$$N = \frac{I_B}{I_{Bsat}}$$

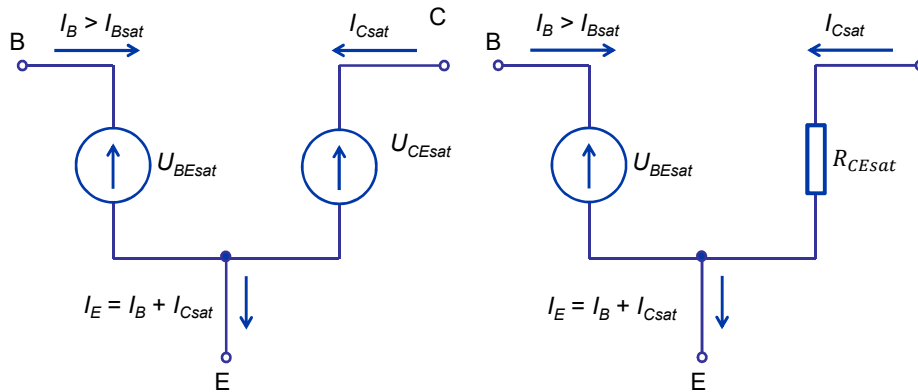
$$I_B > I_{Bsat}$$

$$N = 2 \div 5$$

Еквивалентни схеми в насищане



Еквивалентни схеми в насищане



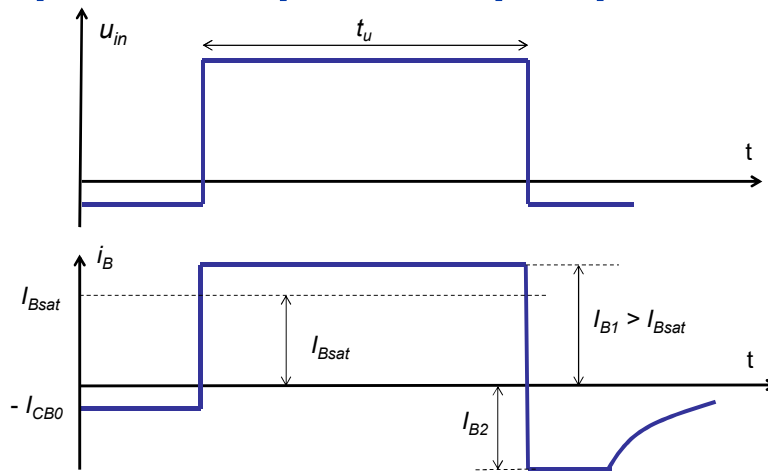
Бързодействие на ключа

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

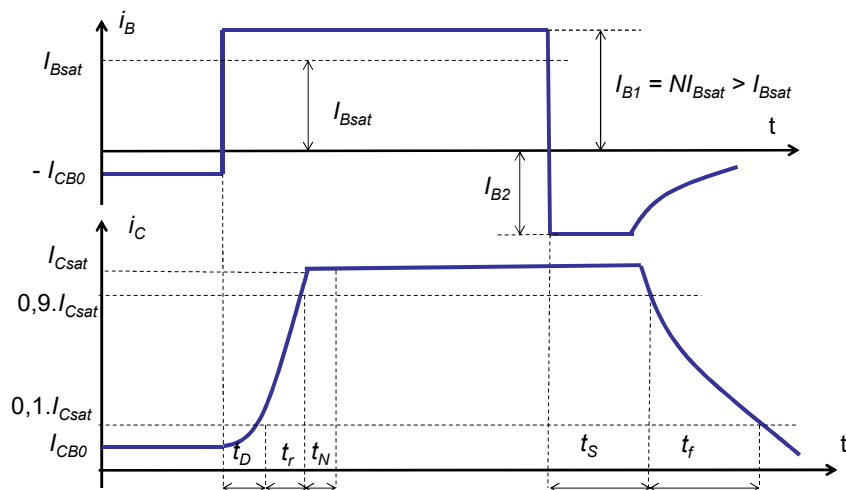
- ✦ **Инерционността на процесите на пренасяне, натрупване и разнасяне на токоносителите в базата и колекторния транзистора**
- ✦ **Времето, необходимо за презареждане на кондензаторите на преходите**
- ✦ **Наличието на паразитни кондензатори на корпуса и индуктивности на изводите**

В изходно състояние транзисторът е запушен. На входа му се подава отпущаващ 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.

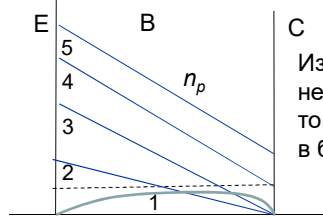
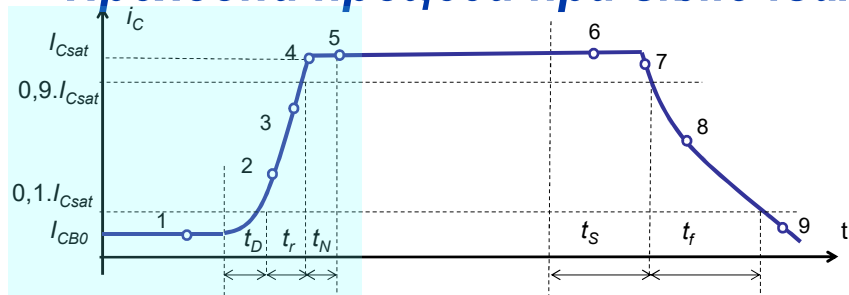
Преходни процеси при превключване



Преходни процеси при превключване



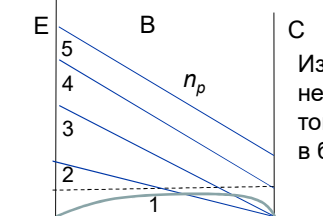
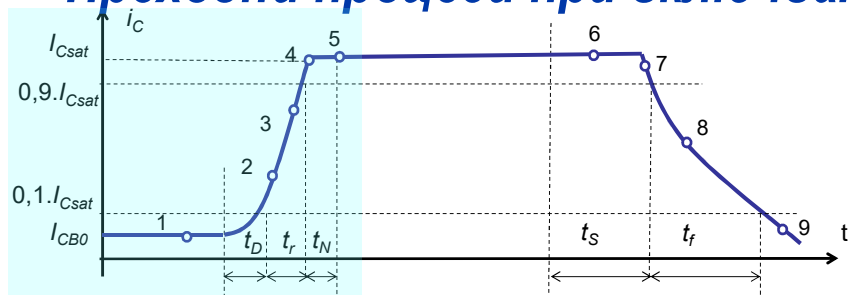
Преходни процеси при включване



Изменение на неосновните токоносители в базата

При подаване на отпушващ импулс i_B нараства скокообразно. Поради времето, необходимо за зареждане на C_E , i_C нараства бавно. Времето за достигане на i_C до 10% от I_{Csat} се нарича **време на закъснение** t_D .

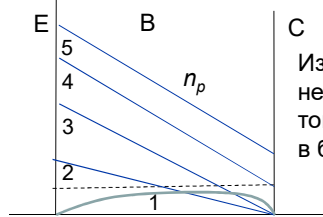
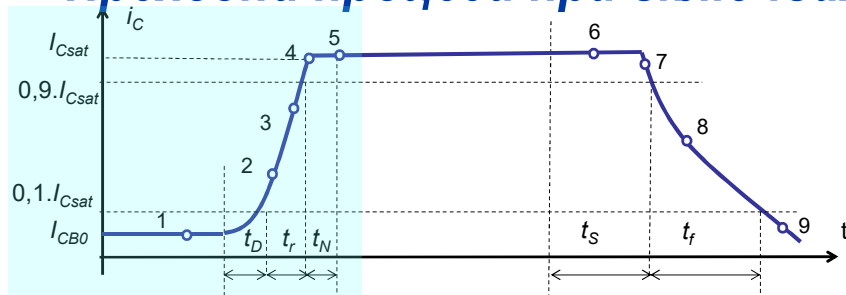
Преходни процеси при включване



Изменение на неосновните токоносители в базата

Времето за достигане на i_C от 10% до 90% от I_{Csat} се нарича **време на нарастване** t_r . Транзисторът работи в активен режим. Тук влияе инерционността на токоносителите и времето за презареждане на C_C .

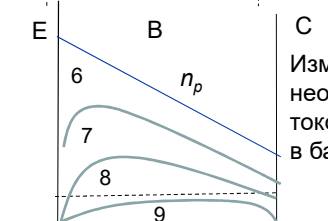
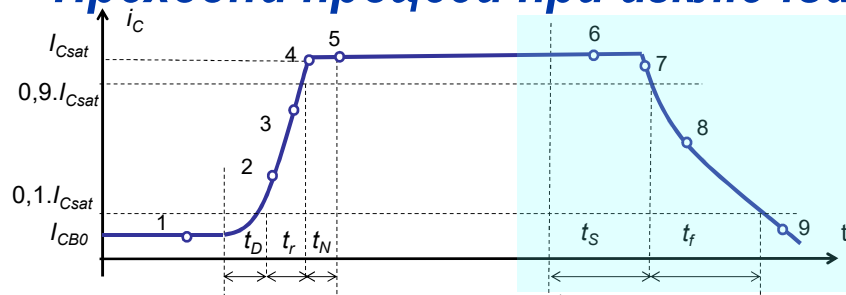
Преходни процеси при включване



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.

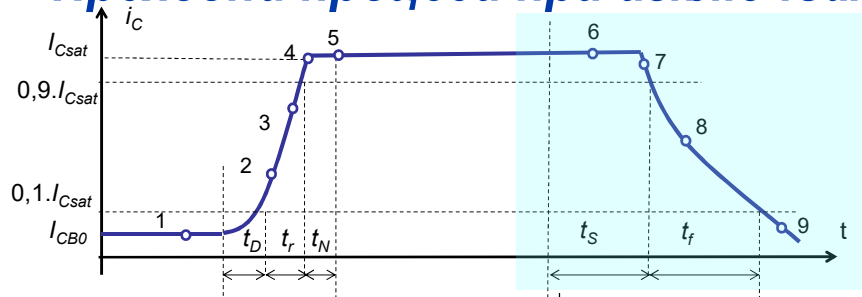
Преходни процеси при изключване



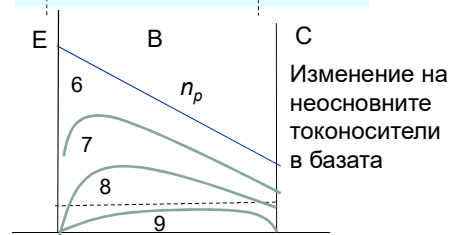
При подаване на запущащ импулс i_B сменя знака си. Започва разнасяне на натрупаните токоносители, но $i_C = I_{Csat}$. Дефинира се **време за разнасяне на токоносители** t_S , за което i_C спада до 90% от I_{Csat} .

Изменение на неосновните токоносители в базата

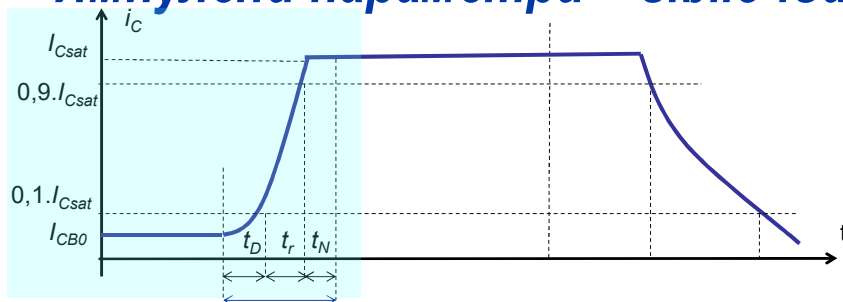
Преходни процеси при изключване



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.



Импулсни параметри – включване



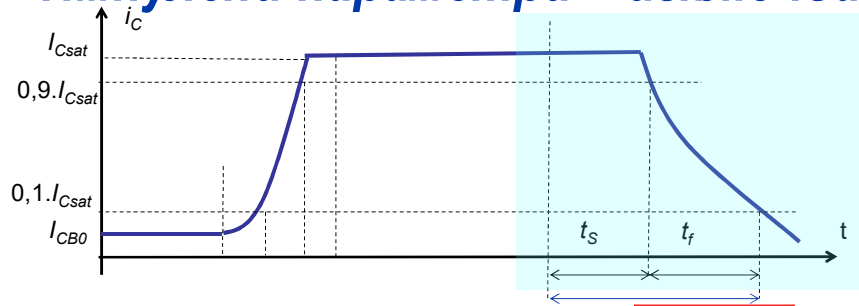
$$t_{ON} = t_D + t_r + t_N \quad t_{ON} - \text{време на включване}$$

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

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

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

Импулсни параметри – изключване



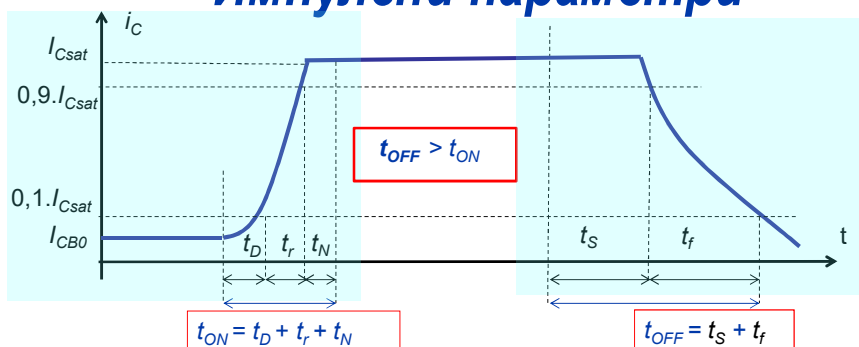
t_{OFF} – време на изключване

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

t_S – време на разнасяне – времето от подаване на запущаващ импулс до достигане на $i_C = 0,9 \cdot I_{Csat}$

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

Импулсни 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

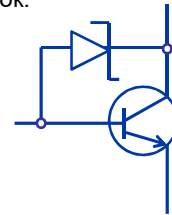
Времето на изключване t_{OFF} е много по-голямо от времето за включване t_{ON} .

Импулсни параметри – зависимости

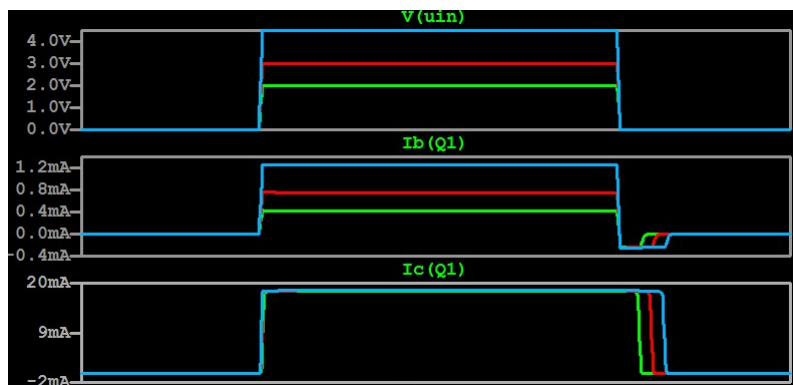
- ✦ Времената t_s и t_f зависят от I_{B2} и от честотните свойства на транзистора (геометрични размери и време на живот)
- ✦ Времето за разнасяне зависи от пълното количество носители натрупани в базата – т.е от I_{B1} (от степента на насищане N)

За по-голямо бързодействие времето на разнасяне се намалява, чрез по-малко време на живот на токоносителите (легиране със злато). Това, обаче, намалява коефициента на усилване и увеличава обратния ток.

В интегралните схеми колекторният преход 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 токоносителите, откъдето t_s рязко намалява. При Шотки диода липсва инжекция на неосновни токоносителите.

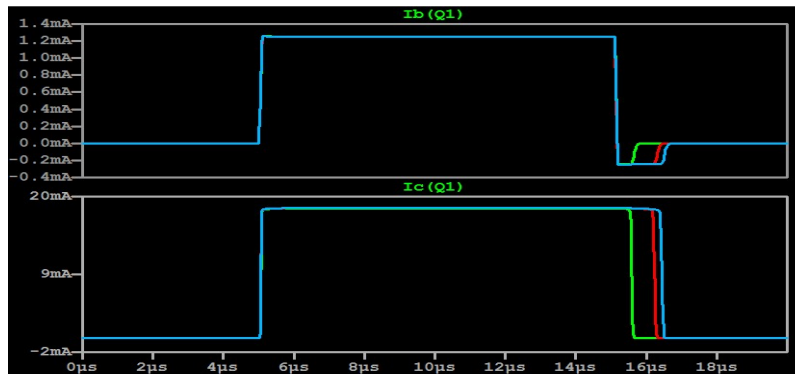


Влияние на входното напрежение



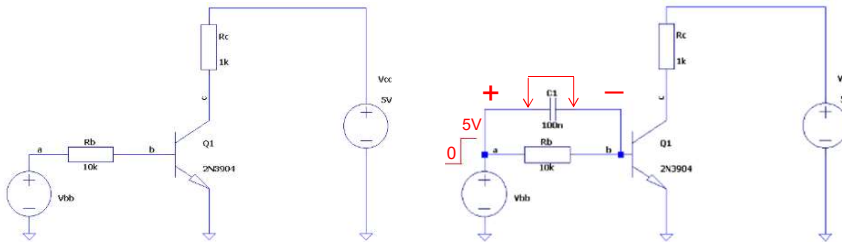
$$U_{in} \uparrow \Rightarrow I_B = \frac{U_{in} - U_{BE}}{R_B} \uparrow \Rightarrow I_{Bsat} = \frac{I_{Csat}}{\beta} = \frac{E_C}{R_C \beta} \Rightarrow N = \frac{I_B}{I_{Bsat}} \uparrow \Rightarrow t_{OFF} \uparrow$$

Влияние на коэффициента β



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

Влияние на кондензатор в базата

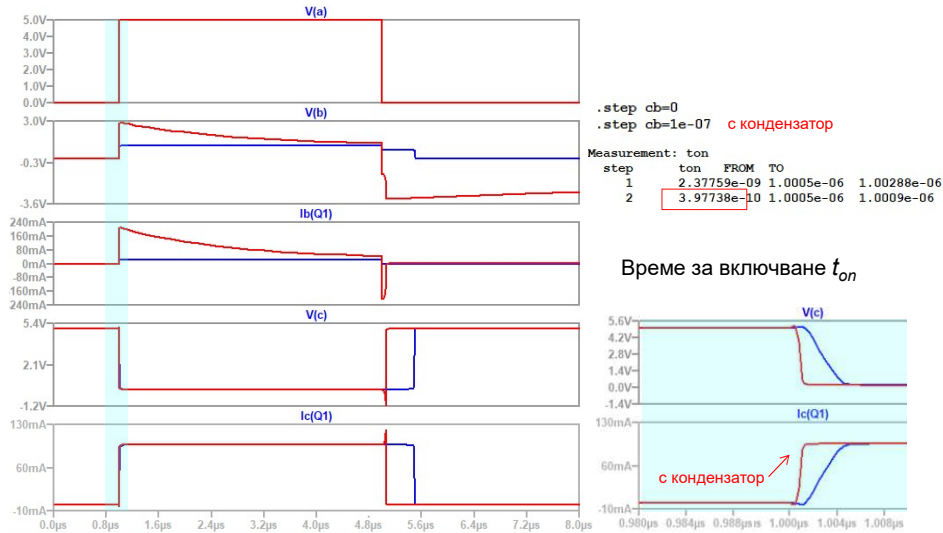


Включването на **ускоряващ кондензатор** в базовата верига на транзистора спомага за подобряване на бързодействието на електронния ключ.

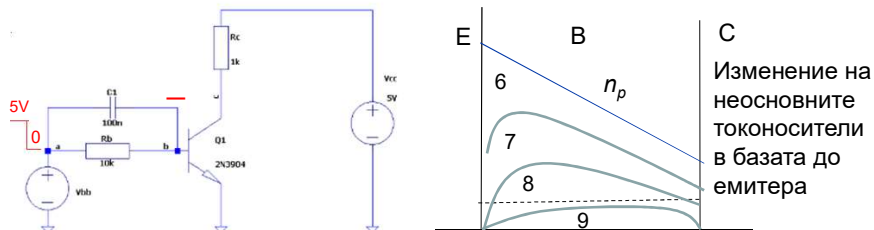
При подаване на положителен отпушващ импулс кондензаторът първоначално не е зареден, шунтира R_b , осигурявайки голям първоначален ток при включване на транзистора, с което **се намалява t_{on}** .

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.

Влияние на кондензатор в базата

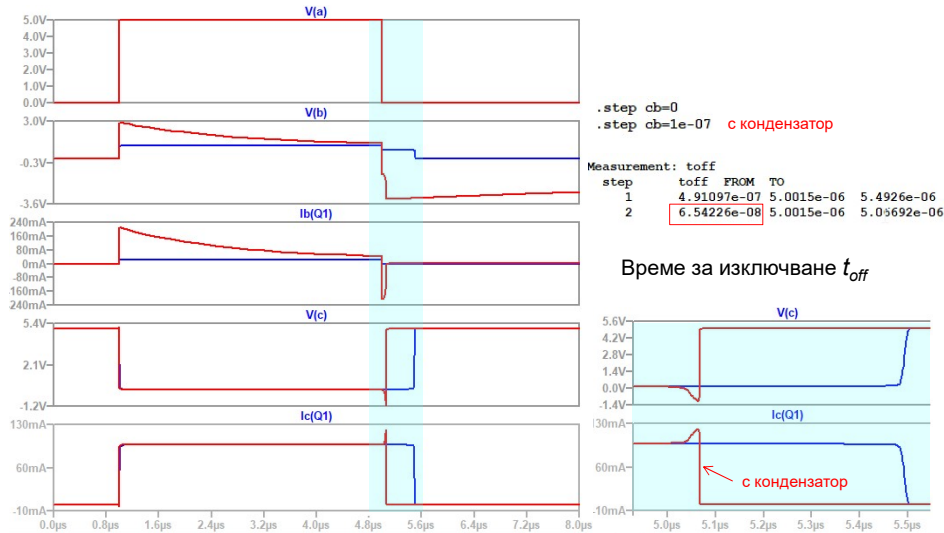


Влияние на кондензатор в базата

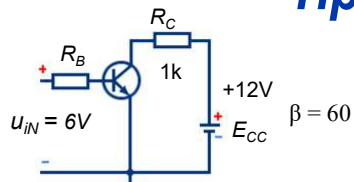


При насищане, в базата се натрупва заряд, който трябва да се разнесе, за да се запуши транзисторът. В първия момент, при подаване на запущащ импулс (от 5V до 0V), кондензаторът е зареден и напрежението върху него се подава като голямо отрицателно (обратно) напрежение към прехода база-емитер. Това рязко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

Влияние на кондензатор в базата



Примери



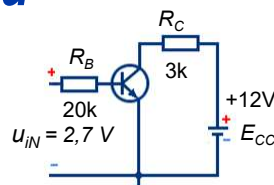
Да се определи максималната стойност на R_B , при която транзисторът от фигурата ще работи в режим на насищане.

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

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

$$R_B < \frac{(6 - 0.7) \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 60}{12} < 26.5 \cdot 10^3 < 26.5 \text{ k}\Omega$$

$$R_B = 25 \text{ k}\Omega$$



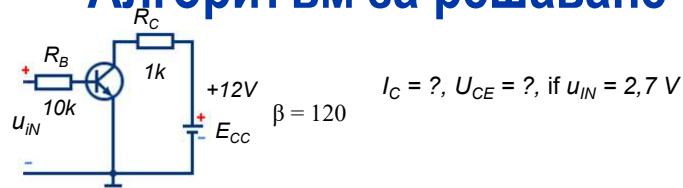
Да се определи минималната стойност на коефициента β , при която транзисторът от фигурата ще работи в режим на насищане.

$$\beta > \frac{R_B E_C}{R_C (U_{IN} - U_{BE})}$$

$$\beta > \frac{20 \cdot 10^3 \cdot 12}{(2.7 - 0.7) \cdot 3 \cdot 10^3} > 40$$

$$\beta = 50$$

Алгоритъм за решаване



1. Проверка за отпушен транзистор.

- a) Ако $U_{IN} < 0.7V$ Транзисторът е **запушен** $\rightarrow I_B = 0, I_C = \beta I_B = 0, U_{CE} = E_C$
 b) Ако $U_{IN} > 0.7V$ Транзисторът е **отпушен**. Тогава:

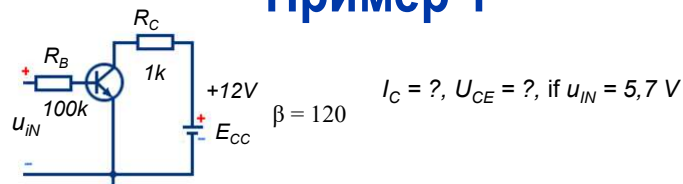
2. Проверка за режима – активен или насищане

Изчисляват се I_B и I_{Bsat}
$$I_B = \frac{U_{IN} - U_{BE}}{R_B} \quad I_{Bsat} = \frac{E_{CC}}{R_C \beta}$$

a) Ако $I_B \leq I_{Bsat}$ – Активен режим $I_C = \beta \cdot I_B$ $U_{CE} = E_C - I_C \cdot R_C$

b) Ако $I_B > I_{Bsat}$ – Насищане $I_C = I_{Csat}$ $U_{CE} = E_C - I_C \cdot R_C = 0V$

Пример 1



1. Проверка за отпушен транзистор.

$U_{IN} = 2.7V > 0.7V$ следователно транзисторът е **отпушен**. Тогава :

2. Проверка за режима – активен или насищане Изчисляват се I_B и I_{Bsat}

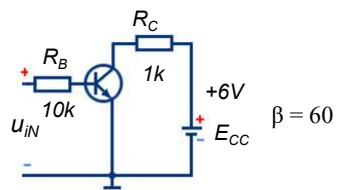
$$I_B = \frac{U_{IN} - U_{BE}}{R_B} = \frac{5.7 - 0.7}{100 \cdot 10^3} = 0.05 \cdot 10^{-3} A = 0.05 \text{ mA}$$

$$I_{Bsat} = \frac{E_{CC}}{R_C \beta} = \frac{12}{1 \cdot 10^3 \cdot 120} = 0.1 \cdot 10^{-3} A = 0.1 \text{ mA} \quad I_B < I_{Bsat} \text{ – Активен режим}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 120 \cdot 0.05 \cdot 10^{-3} = 6 \cdot 10^{-3} A = 6 \text{ mA}$$

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

Пример 2



$$I_C = ?, U_{CE} = ?, \text{ if } u_{IN} = 4,7 \text{ V}$$

$$\beta = 60$$

1. Проверка за отпушен транзистор.
 $U_{IN} = 4.7\text{V} > 0.7\text{V}$ Следователно транзисторът е отпушен. Тогава:
2. Проверка за режима – активен или насищане Изчисляват се I_B и I_{Bsat}

$$I_B = \frac{U_{IN} - U_{BE}}{R_B} = \frac{4.7 - 0.7}{10 \cdot 10^3} = 0.4 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 0.4 \text{ mA}$$

$$I_{Bsat} = \frac{E_{CC}}{R_C \beta} = \frac{6}{1 \cdot 10^3 \cdot 60} = 0.1 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 0.1 \text{ mA}$$

$$I_B > I_{Bsat} - \text{Насищане. Следователно } I_C = I_{Csat} = \frac{E_{CC}}{R_C} = 6 \cdot 10^{-3} = 6 \text{ mA}$$

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