

Биполярни ключови схеми

Транзисторите в тези схеми най-често работят в ключов режим. Той се характеризира с две статични състояния – режим на насищане (съответства на затворен ключ) и режим на отсечка (съответства на отворен ключ). Когато ключът е затворен изходното напрежение практически е равно на нула. При отворен ключ изходното напрежение е равно на захранващото. Транзисторът е в активен режим само по време на прехода между двете състояния. Бързодействието на ключа се определя от времето за преминаване на транзистора от едното състояние в другото.

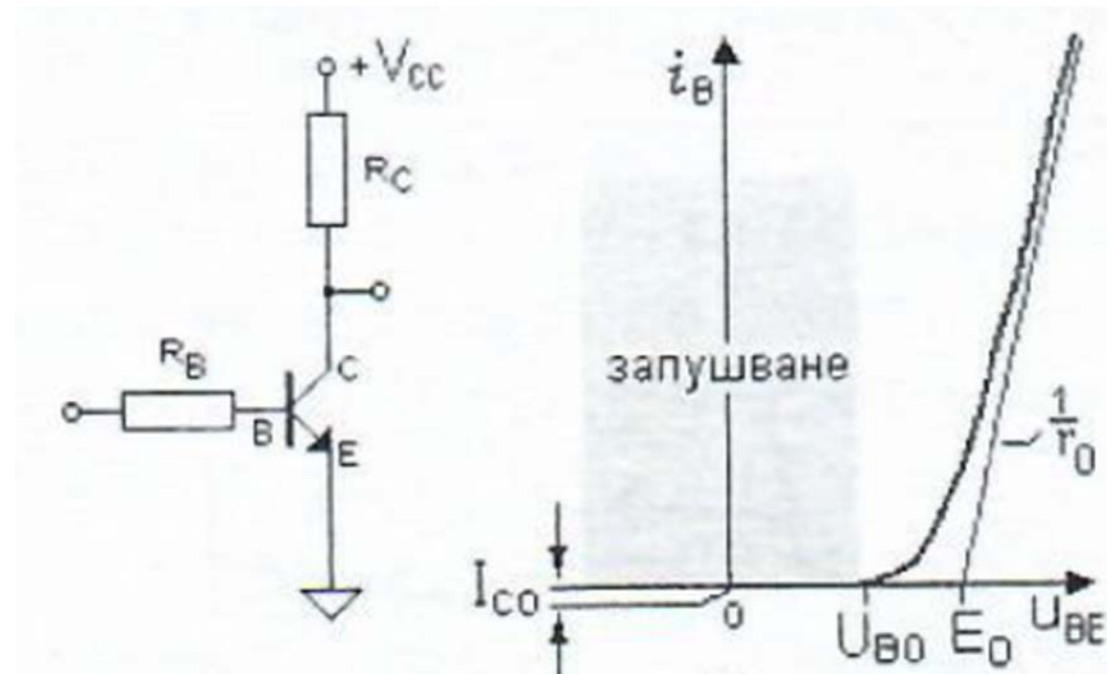
Биполярни ключови схеми

В зависимост от полярността на напреженията върху емитерния и колекторния преход транзисторът може да се намира в един от четири възможни режима. При работа най-често в схема на свързване с общ емитер се използват първите три режима (състояния).

NPN	PNP	Запушен	Активен режим	Наситен	Инверсен режим
U_{BE}	U_{EB}	<0	>0	>0	<0
U_{BC}	U_{CB}	<0	<0	>0	>0

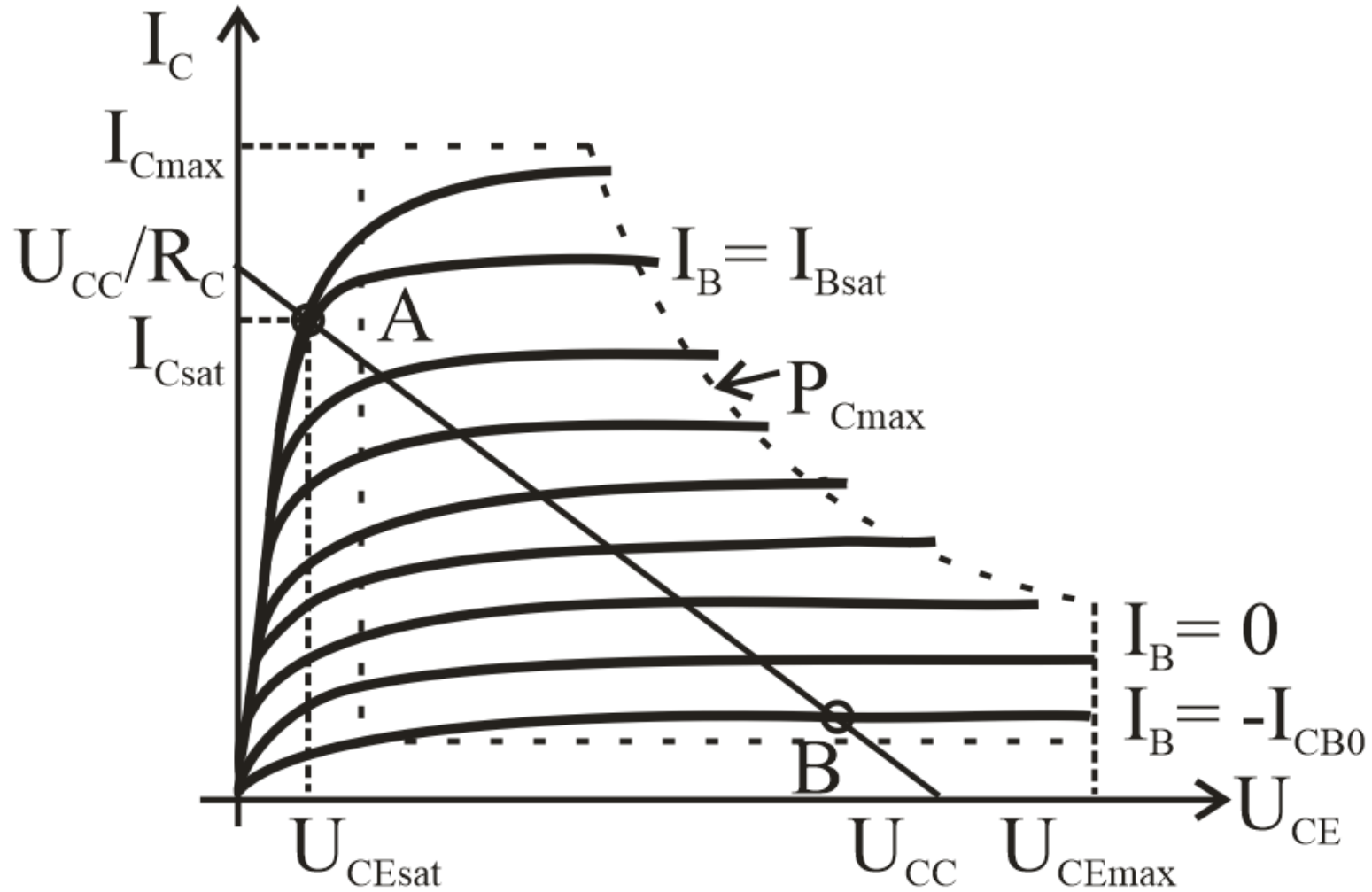
Биполярни ключови схеми

Линейните еквивалентни схеми на тези състояния могат да се получат от входните и изходните характеристики на транзистора за схема на свързване с общ емитер.



Входни характеристики

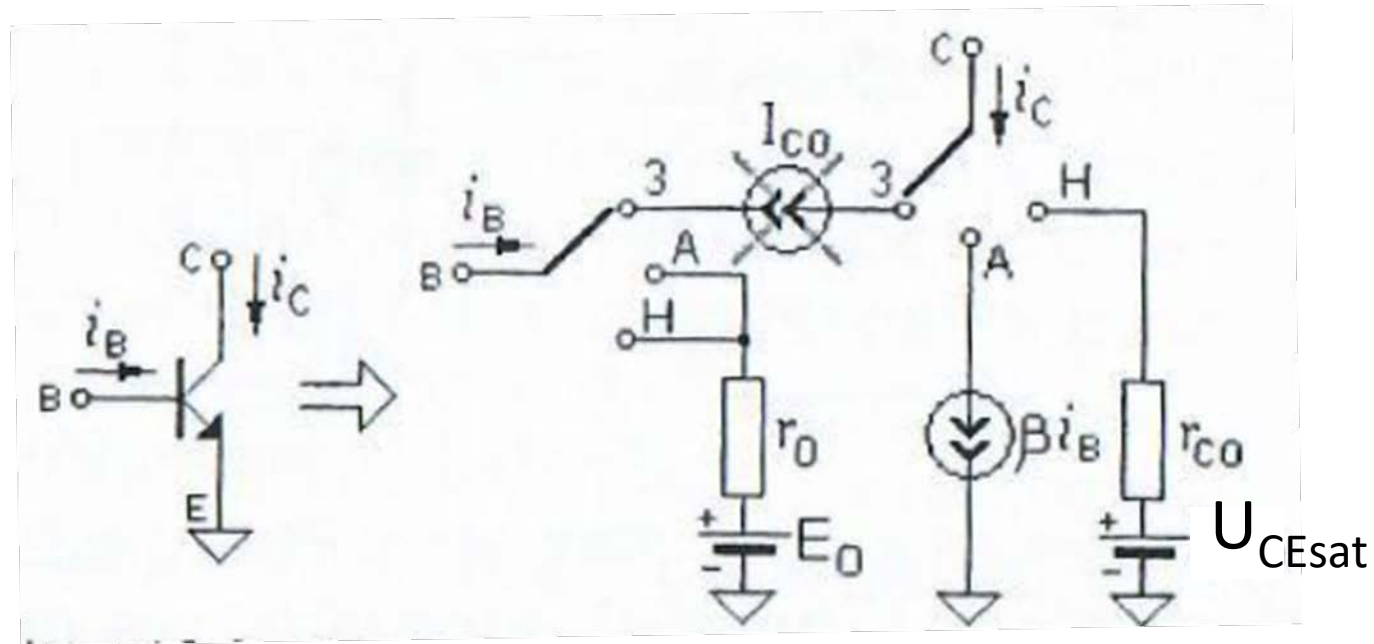
Биполярни ключови схеми



Исходни характеристики

Биполярни ключови схеми

В запушено състояние протича само топлинният (обратен) ток I_{CBO} , който е положителен за колекторната верига и е отрицателен за базовата. За съвременните силициеви транзистори той има много малка стойност и може да се пренебрегне.



Линеаризирана еквивалентна схема на NPN транзистор в схема с общ емитер

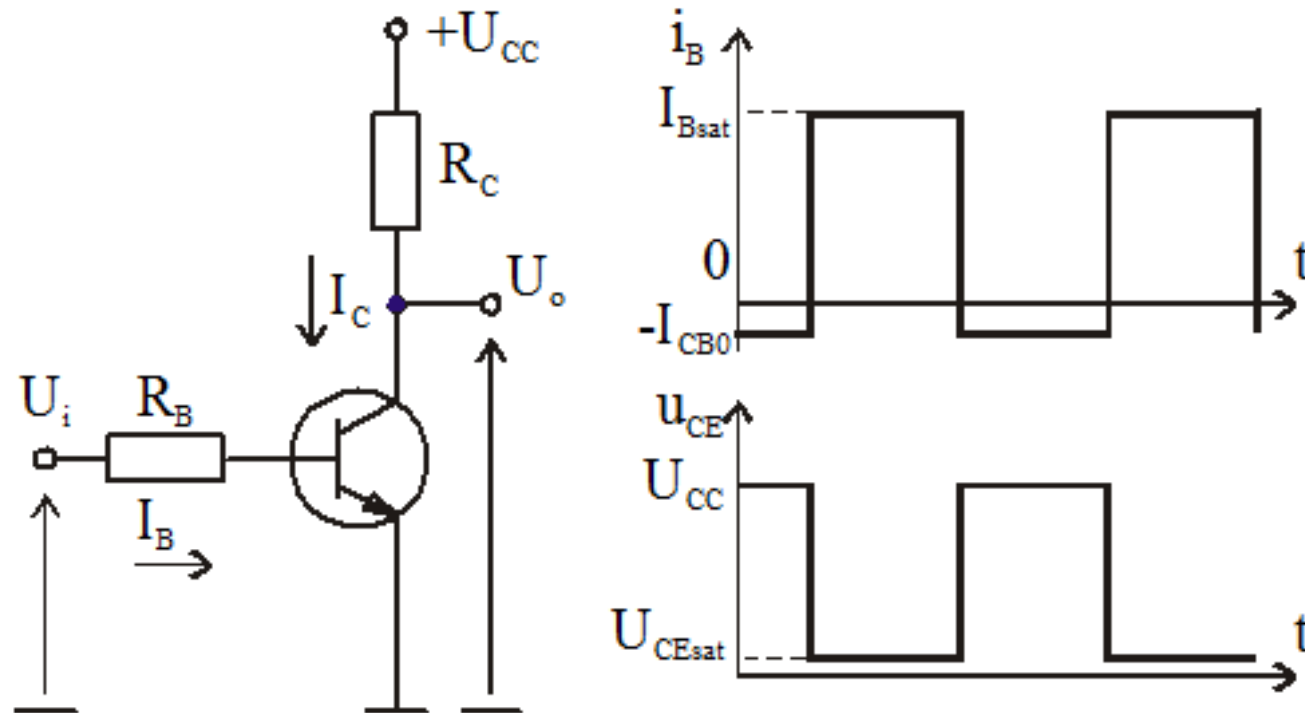
Биполярни ключови схеми

За състоянията на активен режим и насищане входната верига се представя с източник на напрежение E_0 и резистор r_0 . В активен режим колекторната верига се представя с еквивалентен генератор на ток $i_C = \beta i_B$, а в режим на насищане с двуполюсник, съставен от източник на напрежение U_{CEsat} и резистор r_{CO} .

Транзисторът е близък до ключ, ако работната му точка последователно заема двете крайни положения на изходната характеристика, означени с А и В.

Биполярни ключови схеми

Това се постига, като на базата на транзистора се подава последователно запушващ сигнал (т. В) и отпушващ сигнал (т. А).



Биполярни ключови схеми

За да се запуши NPN транзисторът е необходимо базовият ток да бъде равен на нула, или да протече ток в обратна посока. За тази цел входното напрежение трябва да стане отрицателно и да се изпълни условието $U_i \leq I_{CBO} \cdot R_B$. Увеличаването на напрежението в отрицателна посока след тази стойност не е необходимо, тъй като токовете на транзистора на практика повече не се променят. В този случай колекторният ток $I_C = I_{CBO}$. При измеряването на схемата не трябва да се допуска обратното напрежение на емитерния преход да надвиши $1 \div 1,5V$, което би довело до повреда.

Биполярни ключови схеми

В схема с едно захранващо положително напрежение това е невъзможно и е необходимо усложняване на основната ключова схема, което е неприемливо. Входната характеристика на силициевите транзистори е отместена в положителна посока на стойност $U_{B0} = 0,4 \div 0,5V$, и за по-ниски стойности на входното напрежение транзисторът може да се смята за запушен. Прието е условието за запушване да бъде $u_{BE} < U_{B0}$. За всеки транзистор U_{B0} се определя за стойност на u_{BE} , при която колекторният ток е пренебрежимо малък за конкретното приложение.

Биполярни ключови схеми

За да премине NPN транзисторът в наситено състояние е необходимо стойността на базовия ток да стане равна или по-голяма от I_{Bsat} . За целта входното напрежение трябва да бъде положително. Тогава транзисторът губи усилвателните си свойства, а двата PN прехода са поляризирани в права посока. Колекторният ток в режим на насищане I_{Csat} се определя с израза:

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

Биполярни ключови схеми

За сигурно насищане на транзистора се избира коефициент на насищане N :

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

Обикновено се избира $1 \leq N \leq 2$. При по-големи стойности на коефициента на насищане колекторният ток няма да се промени, а се натрупва голямо количество неосновни токоносители в базата на транзистора, което ще забави неговото запусване. Също така се повишава температурата на емитерния преход. Необходимият базов ток при избран коефициент на насищане се получава с израза:

Биполярни ключови схеми

$$I_B = \frac{NI_{Csat}}{\beta}$$

При проектиране на схемата най-напред се избират U_{CC} и R_C . Техните стойности се определят от заданието за изходна мощност. След това се определя базовия резистор – $R_B < (\beta_{min} - 1)R_C$.

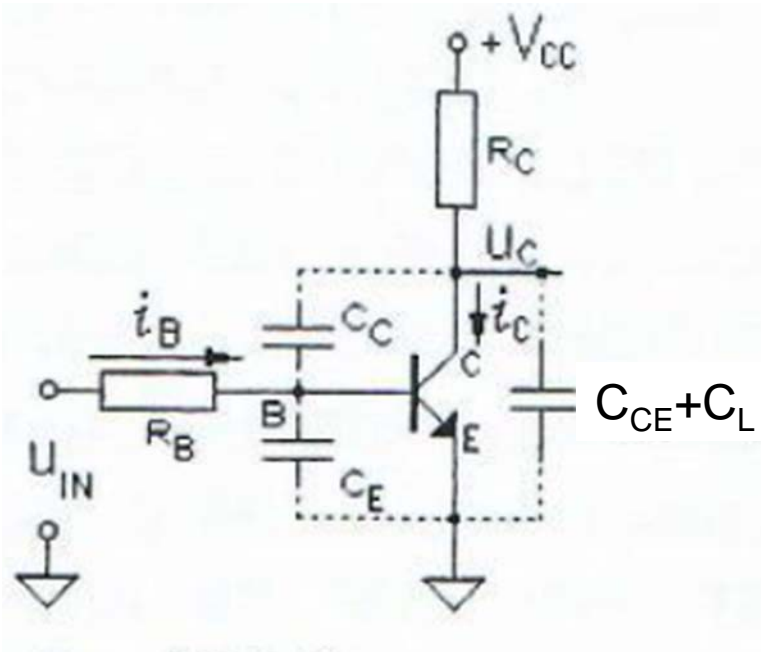
Следователно минималната стойност на входното напрежение, необходима за насищането на транзистора е:

$$U_i \geq \frac{NI_{Csat}}{\beta} R_B$$

Биполярни ключови схеми

Преходни процеси

Продължителността на преходните процеси в импулсните схеми с биполярни транзистори се определя от инертността при пренасяне на зарядите в транзистора и паразитните капацитети.



Паразитните капацитети на запушените преходи C_E и C_C оказват влияние при запушено състояние на транзистора. В отпушено състояние те могат да се пренебрегнат защото са шунтирани от малкото съпротивление на прехода тогава.

Биполярни ключови схеми

Преходни процеси

При инвертираща схема като ОЕ капацитетът на колекторния преход понижава бързодействието поради т.нар. интегриращ ефект при който времето на живот на токоносителите се увеличава β пъти и става $\beta R_C C_C$. Капацитетът в изхода се определя от собствения капацитет на транзистора C_{CE} и товарния капацитет C_L .

В състояние на насищане колекторният преход е отпушен. Зарядът реагира по-бавно на измененията на входния ток и времеконстантата при насищане се увеличава многократно. При скокообразно изменение на

базовия ток зарядът се изменя за време t : $t = \tau \ln \frac{Q(\infty) - Q(0)}{Q(\infty) - Q(t)}$.

Биполярни ключови схеми

Преходни процеси

$$t_{30} = R_B C_i \ln \frac{U^1 - U^0}{U^1 - E_0}$$

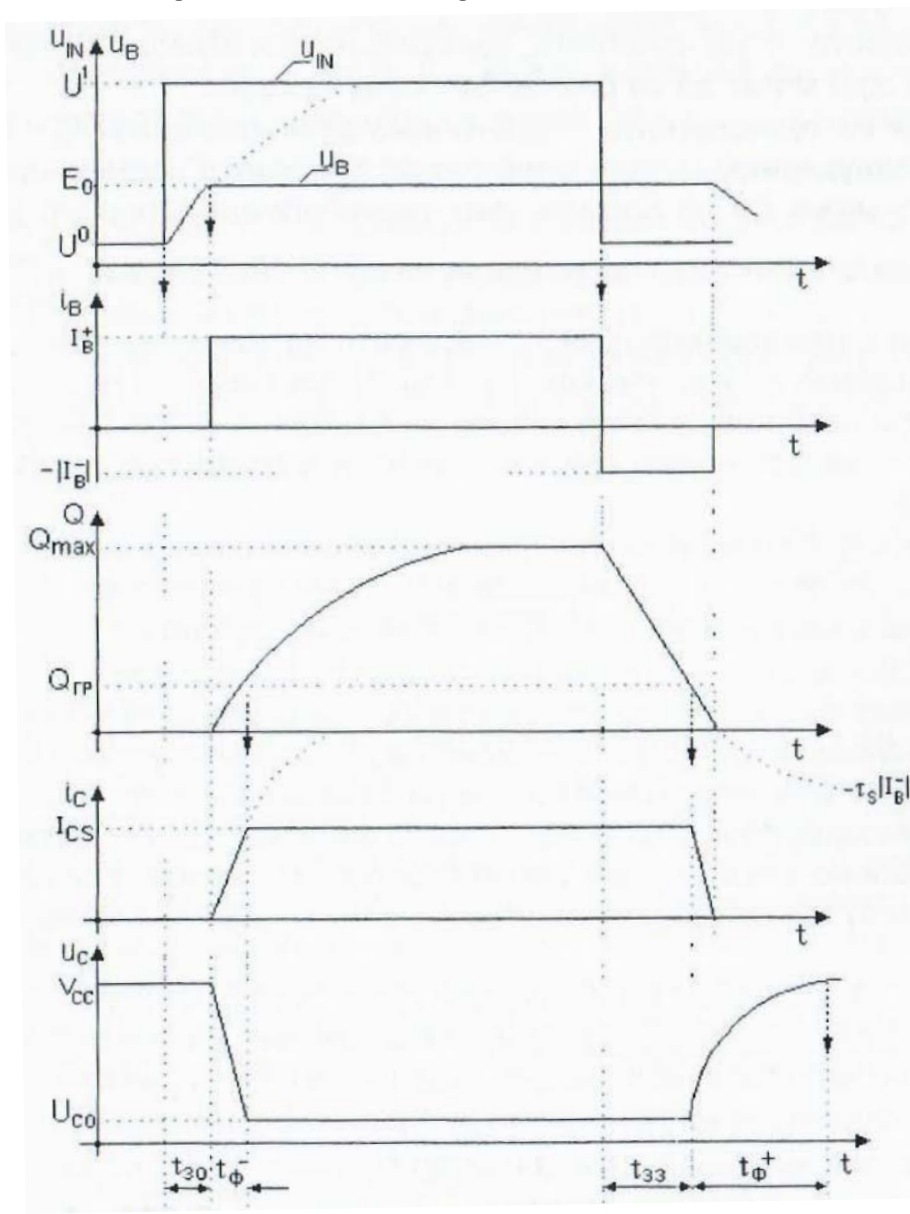
$$C_i = C_B + C_C$$

$$t_{\phi}^- = \tau_{OE} \ln \frac{I_B^+}{I_B^+ - I_{Bsat}}$$

$$\tau_{OE} = \tau_{\beta} + (\beta + 1) R_C C_C$$

$$t_{33} = \tau_s \ln \frac{Q_{max} + \tau_s |I_B^-|}{Q_{\Gamma P} + \tau_s |I_B^-|}$$

$$t_{\phi}^+ \approx 3 R_C (C_{CE} + C_L)$$

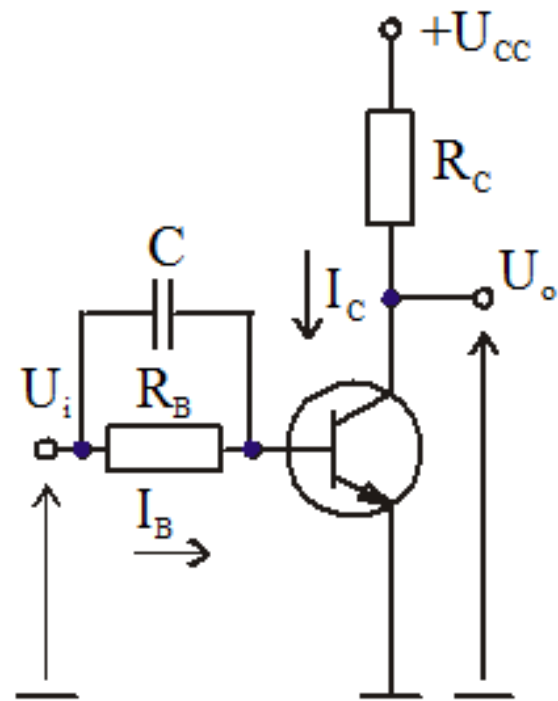


Биполярни ключови схеми

Преходни процеси

За да се постигне бързо насищане на транзистора е необходим голям базов ток. От друга страна това води до забавяне на запусването. Тези противоречиви изисквания се удовлетворяват, като в схемата се включи ускоряващ кондензатор C .

При включване базовият ток се увеличава за сметка на зарядния ток на кондензатора. При изключване на транзистора времето за разсейване на токоносителите също намалява поради “изключващия” отрицателен базов ток, получен от разреждането на кондензатора.



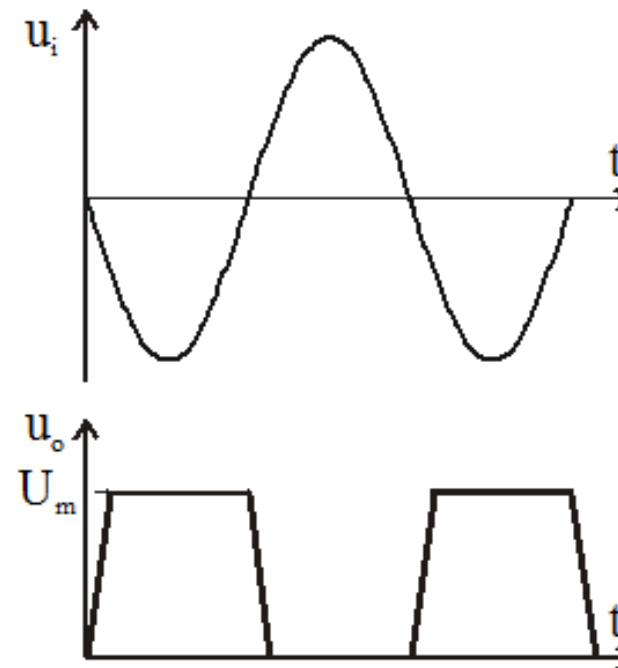
Биполярни ключови схеми

Преходни процеси

Оптималната стойност на ускоряващия кондензатор се намира: $C = \frac{\tau_{\beta}}{R_B}$

Транзисторното стъпало, работещо в ключов режим може да се използва за формиране на правоъгълни импулси. Фронтовете на изходните импулси ще се определят от скоростта на нарастване на входния сигнал и коефициента на усилване на стъпалото в активен режим.

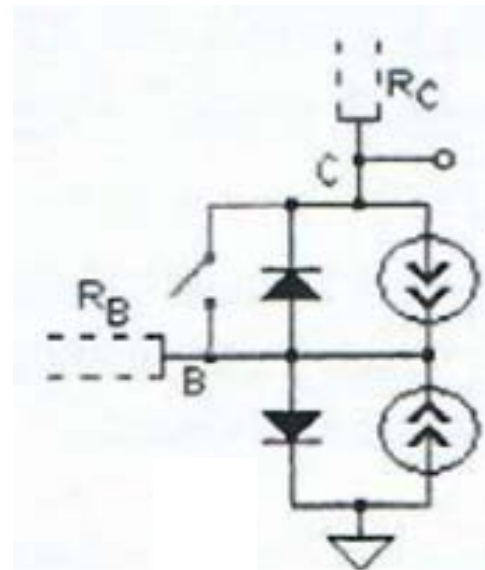
$$t_{\phi} = \frac{U_m}{A_u \frac{dU}{dt}_{\max}}$$



Биполярни ключови схеми

Преходни процеси

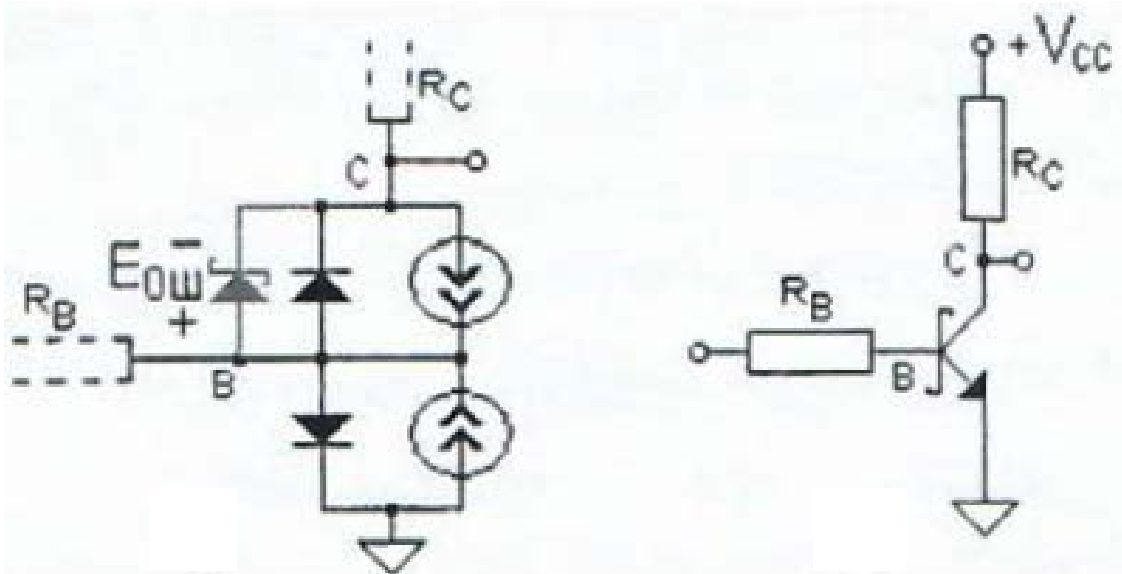
Голямото закъснение $t_{зз}$, дължащо се на насищането на транзистора може да се премахне чрез въвеждане на нелинейна отрицателна обратна връзка с диод. Целта е при спадане на колекторното напрежение до прага на отпушване на колекторния преход ключът да се затвори и усилването на схемата да клони към нула. Така преходът няма да стигне до отпушване, а транзисторът до насищане.



Биполярни ключови схеми

Преходни процеси

Най-подходящият електронен елемент за реализирането на ключа е диодът на Шотки. При запушен колекторен преход напрежението на анода му е обратно и той също е запушен. При отпушване на транзистора напрежението колектор-база става отрицателно и диодът също се отпушва. Тогава върху прехода се установява напрежение $E_{0ш} \approx 0,4V$.



$$U_{CEsat} = U_{BE} - U_{BC} = 0,7V - 0,4V = 0,3V$$

$$U_{BC} = E_{0ш} = 0,4V$$

Биполярни ключови схеми

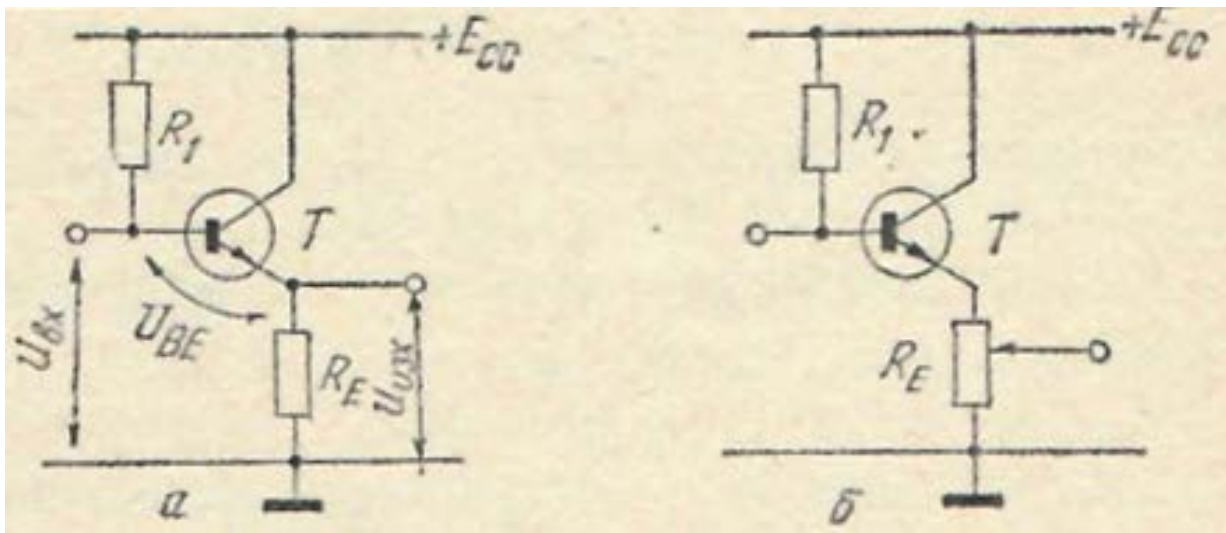
Приложение на емитерни повторители

Съществен недостатък на схемите с общ емитер и обща база е ниското входно съпротивление, което натоварва предното стъпало и намалява коефициента на усилване. Противоположно на тях схемата с общ колектор (емитерен повторител) има високо входно съпротивление - $R_i = \beta R_E$. Също така товарният резистор е включен в емитерната верига и създава дълбока отрицателна обратна връзка по напрежение. В следствие на това изходното напрежение повтаря входното по фаза и със слабо намаление на амплитудата.

Биполярни ключови схеми

Приложение на емитерни повторители

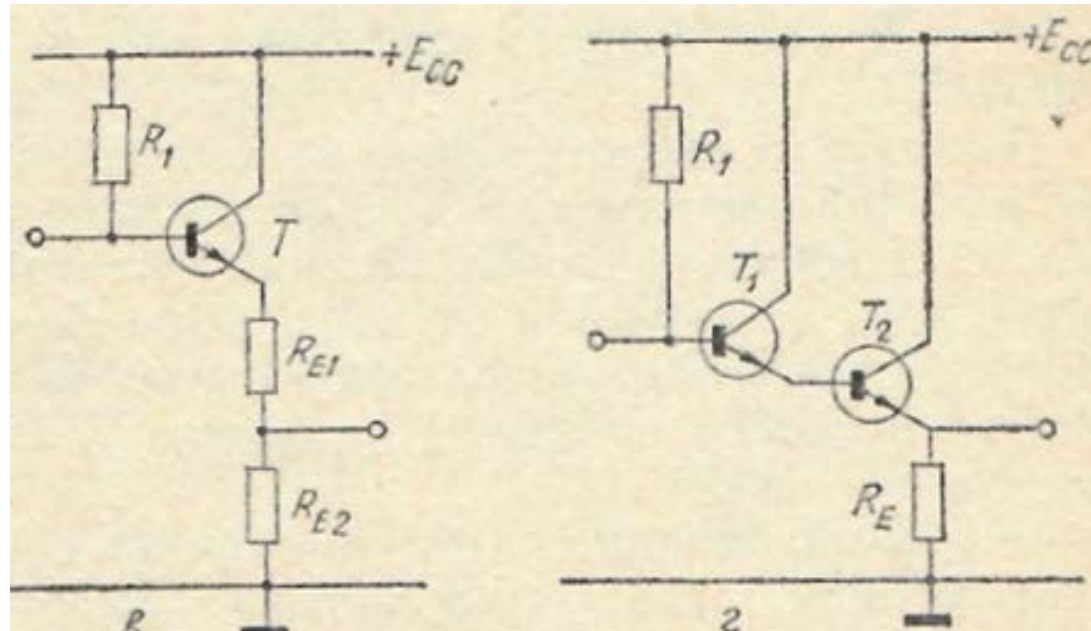
Като се вземе предвид съпротивлението R_1 , което определя работната точка, входното съпротивление на схемата е $R_i = \frac{R_1 \beta R_E}{R_1 + \beta R_E}$. Ниското изходно съпротивление на схемата позволява добро съгласуване със следващото стъпало или с товара и бързо презареждане на изходните капацитети.



Биполярни ключови схеми

Приложение на емитерни повторители

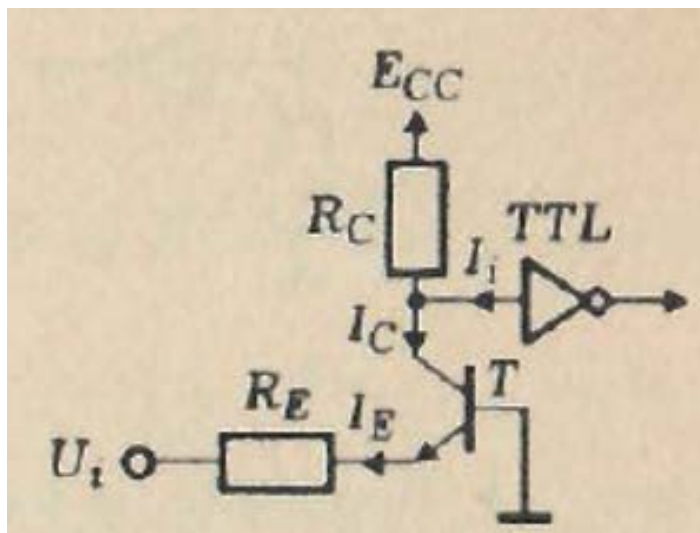
Изходният транзистор ще се повреди, ако изходът се свърже накъсо. Затова е предвиден резистора R_{E1} . Този резистор е със съпротивление 70Ω и се включва за съгласуване на входа на коаксиален кабел с характеристично съпротивление 75Ω .



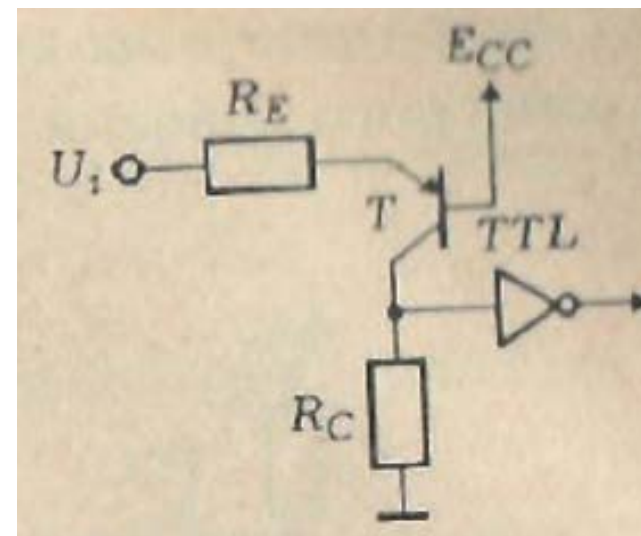
Биполярни ключови схеми

Приложение на схеми с обща база

Биполярният транзистор се използва в схема на свързване с обща база най-често когато се налага съгласуване между схеми с различни захранващи напрежения (т.нар. **транслатори на нива**). Следващите схеми преобразуват нестандартните входни нива в стандартни логически нива за положителна логика със захранващо напрежение $+E_{CC}$ (+5V; +3,3V).



$U_i < 0$

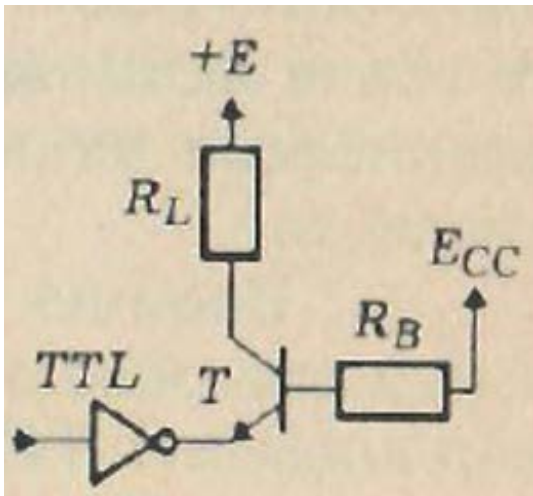


$U_i > E_{CC}$

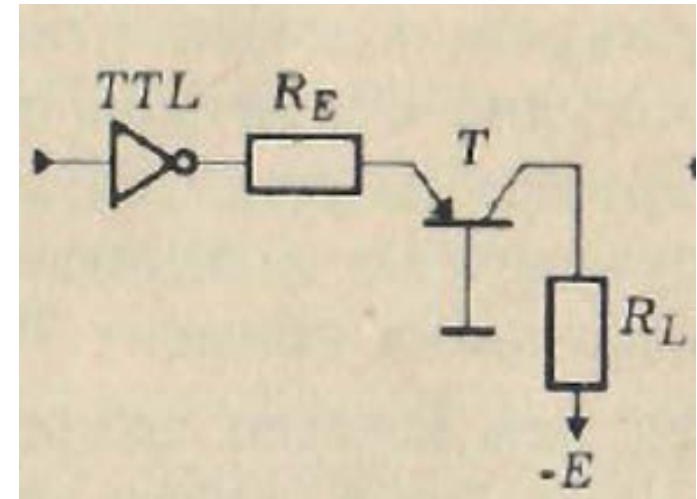
Биполярни ключови схеми

Приложение на схеми с обща база

За преобразуване на стандартни изходни логически нива на схеми с положителна логика със захранващо напрежение $+E_{CC}$ (+5V; +3,3V) към схеми с нестандартно захранващо напрежение също се използва свързване на биполярния транзистор с обща база.



$$0 < U_o < +E$$



$$0 > U_o > -E$$