



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI



Instrumente Structurale  
2007-2013



# Platformă de e-learning și curriculă e-content pentru învățământul superior tehnic

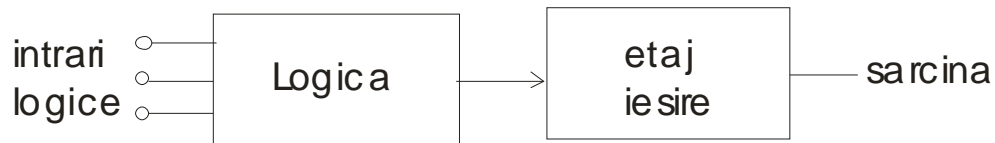
## Electronică Digitală

### 4. Comutator electronic cu TBIP

## Comutator cu TBIP

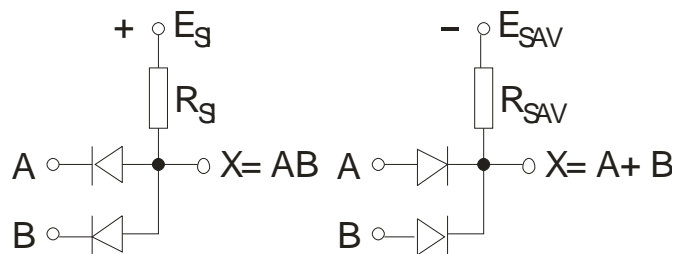
### Introducere. CL cu diode:

Schema bloc a unui CL cu TBIP:



\* semnale logice – logică pozitivă

\* funcții logice realizate cu diode și rezistențe: ȘI, SAU



Funcționare:

\* la circuitul SAU – la ieșire se obține cea mai mare dintre tensiunile de la intrări;

\* la circuitul ȘI – la ieșire se obține cea mai mică dintre tensiunile de la intrări:

\* dezavantaje:

- degradarea nivelelor logice;
- limitarea fan-out;
- răspuns tranzitoriu nesimetric;

- consum ridicat.

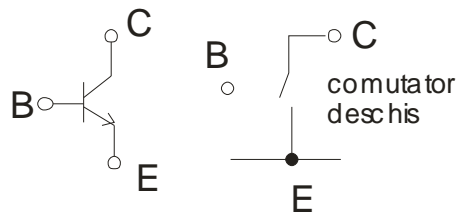
\* se realizează cu: diode, joncțiuni EB, prin însumare de curenți de colector sau cu tranzistoare multiemitor.

## Parametrii de comutație ai TBIP

Obs. parametrii de comutație  $\neq$  parametrii de regim armonic

1) parametrii statici:

a) TBIP blocat  $\rightarrow$  comutator deschis:



parametrii:

- curenț residual  $I_{ce0} = 10^{-7} \div 10^{-8} A$  (neglijabil);

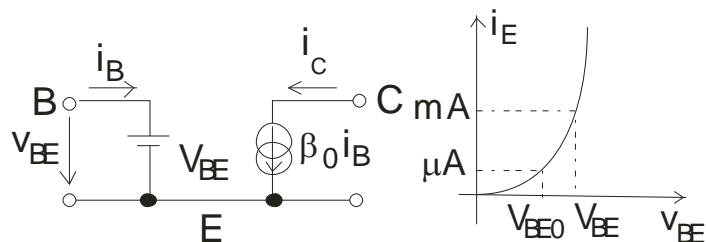
- rezistență de pierderi foarte mare (neglijabilă).

(aceste elemente pot conta numai în circuite cu rezistențe externe foarte mari);

Concluzie: la un TBIP blocat tensiunile pe joncțiuni depind numai de circuitul exterior și nu trebuie să depășească tensiunile maxim admisibile.

b) TBIP în conducție:

b1) în RAN:



parametrii:

- *tensiunea de deschidere a jonctiunii EB* (la curenți de emitor de zeci de  $\mu A$ ):

$$V_{BE0} = 0,55V \div 0,65V, \text{ valoare tipică: } V_{BE0} = 0,6V;$$

- *tensiunea directă pe jonctiunea EB* (la curenți de ordinul  $mA$ ):

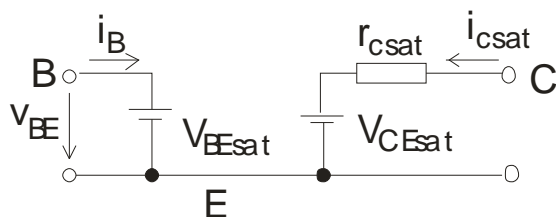
$$V_{BE} = 0,75V \div 0,85V, \text{ valoare tipică: } V_{BE} = 0,8V;$$

- *curentul rezidual al jonctiunii EB*:  $I_{eb0} < 10^{-12} A$  (aria jonctiunii foarte mică);

- *factorul de curent al tranzistorului*: tipic,  $\beta_0 = 40 \div 60$ , dar și  $\beta_0 < 40$ ;

- *rezistența generatorului de curent* este foarte mare, neglijabilă.

b2) în SAT (comutator închis):



parametrii:

- *tensiunea directă pe jonctiunea EB la saturație* (la curenți de ordinul  $mA$ ):

$$V_{BEsat} = 0,75V \div 0,85V, \text{ valoare tipică: } V_{BEsat} = 0,8V;$$

- *tensiunea de saturație intrinsecă*:  $V_{CEsat} \cong 0,1V$  (valoare tipică);

- *rezistența de saturație*,  $r_{csat} \cong 10\Omega$  (măsurii tehnologice pentru micșorare).

Concluzie: la un TBIP în saturație, curenții prin joncțiuni sunt stabiliți numai de circuitul exterior și nu trebuie să depășească curenții maxim admisibili; tensiunile pe joncțiuni sunt mici și bine precizate.

c) RAI

- de obicei, apare în mod neintenționat;
- se caracterizează prin parametrul  $\alpha_i$  cu valoare tipică  $< 10^{-1}$ , cu o mare dispersie de fabricație.

**Observație:** toți parametrii TBIP sunt dependenți de curenții prin tranzistor (deci și de tensiunile de alimentare) și de temperatură.

2) parametrii dinamici:

- capacitățile de barieră:

$$C_{be} = \frac{C_{be0}}{\left(1 - \frac{u_E}{U_0}\right)^n}; \quad C_{bc} = \frac{C_{bc0}}{\left(1 - \frac{u_C}{U_0'}\right)^{n'}} \quad \text{cu:}$$

-  $C_{be0}, C_{bc0}$ , capacitățile de barieră ale celor două joncțiuni la polarizare nulă, neliniare, distribuite, proporționale cu ariile joncțiunilor, de ordinul  $pF$  sau mai mici;

-  $u_E, u_C$  tensiunile de pe cele două joncțiuni;

-  $U_0, U_0'$ , înălțimile de barieră ale celor două joncțiuni;

-  $n, n'$ , exponenți cu valori între 0,3 și 0,5.

- constantele de timp de viață ale purtătorilor minoritari în exces,  $\tau_p$  și  $\tau_n$  și constanta de timp de stocare,  $\tau_s$ , cu valori de ordinul ns;

- capacitățile parazite ale conexiunilor, distribuite și neliniare.

### **Avantajele comutatorului cu TBIP:**

- putere disipată mică în BL; curenții de valoare mică; tensiuni determinate de circuitul exterior;

- putere disipată mică în SAT; tensiunile pe joncțiuni de valoare mică și precizată; curenți determinați de circuitul exterior;

### **Dezavantajele comutatorului cu TBIP:**

- comutarea din starea de blocare în starea de conducție și invers presupune deplasarea unei cantități de sarcină în (din) bază și în (din) capacitățile parazite ceea ce presupune timpi de comutare diferiți de zero.

### **Observatii:**

#### **1. $t_{com}$ cât mai mic:**

-  $C_{be}$  și  $C_{bc}$  cât mai mici  $\Rightarrow$  arii ale joncțiunilor cât mai mici cu consecințele:

-  $I_{max adm}$ ,  $P_{d max adm}$  mici;

-  $I_{eb0}$ ,  $I_{cb0}$  foarte mici ( $< 10^{-11} A$ );

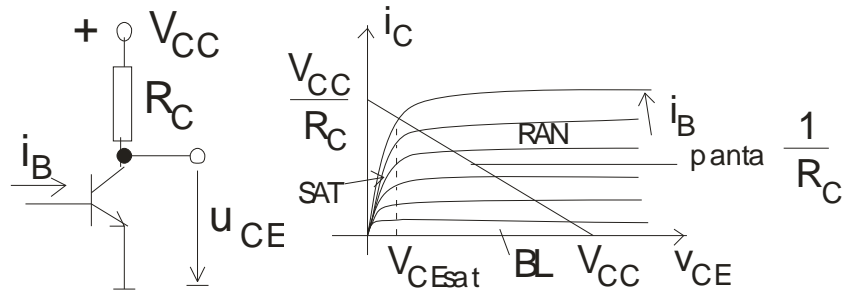
-  $\tau_n$ ,  $\tau_p$ ,  $\tau_s$  cât mai mici  $\Rightarrow$  dopare cu Aur  $\Rightarrow$  crește recombinarea în bază și scade factorul de curent al tranzistorului  $\beta_0$  la valori  $< 50$ ;

$\Rightarrow$  concentrații de impurități,  $N_a$  și  $N_d$  cât mai mari

$\Rightarrow I_{eb0}$ ,  $I_{cb0}$  mici;

- deoarece  $I_{eb0}$  este foarte mic rezultă tensiunea directă bază emitor la curenți de ordinul  $mA$  cu valori ridicate  $0,75V \div 0,85V$  cu valoarea tipică  $0,8V$ .

## 2. regimurile de lucru ale TBIP – pe caracteristicile statice:



- blocare:  $i_B = 0, i_C = I_{ce0}$ , neglijabil;

- RAN:  $0 < i_B \leq i_{Bsi}; 0 < i_C \leq i_{Csat}$ ;

- SAT:  $i_B \geq i_{Bsi}, i_C = i_{Csat} = \frac{V_{CC} - V_{CEsat}}{R_c}$ .

Comportarea tranzistorului în saturație depinde și de  $i_B$ . Cantitativ:

- grad de saturație:  $n = \frac{i_B - i_{Bsi}}{i_{Bsi}}$ ;

- factor de supracomandă:  $n' = \frac{i_B}{i_{Bsi}} = n + 1$ .

## 3. Dependența $V_{CEsat}$ de curenți și de temperatură:

Ecuțiile Ebers Moll:  $v_T = \frac{kT}{q}$ ;  $B_e = e^{\frac{V_{BE}}{v_T}} - 1$ ;  $B_c = e^{\frac{V_{BC}}{v_T}} - 1$ .

$$I_{es}B_e - \alpha_i I_{cs}B_c = i_E = i_C + i_B$$

$$\alpha_0 I_{es}B_e - I_{cs}B_c = i_C$$

Se elimină  $B_e$ :  $-I_{cs}(1 - \alpha_0 \alpha_i)B_c = (1 - \alpha_0)i_C - \alpha_0 i_B$

$$I_{es}(1 - \alpha_0 \alpha_i) B_e = (1 - \alpha_i) i_C + i_B$$

Rezultă:

$$V_{BC} = v_T \ln \left( 1 + \frac{(1 - \alpha_0) i_C - \alpha_0 i_B}{-I_{cs}(1 - \alpha_0 \alpha_i)} \right) \cong v_T \ln \frac{\alpha_0 i - (1 - \alpha_0) i_C}{I_{cs}(1 - \alpha_0 \alpha_i)}$$

$$V_{BE} = v_T \ln \left( 1 + \frac{(1 - \alpha_i) i_C + i_B}{I_{es}(1 - \alpha_0 \alpha_i)} \right) \cong v_T \ln \frac{i_B + (1 - \alpha_i) i_C + i_B}{I_{es}(1 - \alpha_0 \alpha_i)}$$

Rezultă:

$$V_{CEsat} = V_{BE} - V_{BC} = v_T \ln \frac{I_{cs}}{I_{es}} \frac{i_B + (1 - \alpha_i) i_C}{\alpha_0 i_B - (1 - \alpha_0) i_C} = v_T \ln \frac{\alpha_0}{\alpha_i} \frac{\frac{i_B}{i_C} + 1 - \alpha_i}{\alpha_0 \frac{i_B}{i_C} - (1 - \alpha_0)}$$

$$\text{Dar: } i_C = i_{Csat} = \beta_0 i_{Bsi}; \quad i_B = n' i_{Bsi}; \quad \Rightarrow \quad \frac{i_B}{i_C} = \frac{n'}{\beta_0}.$$

$$\text{Deci: } V_{CEsat} = v_T \ln \frac{\alpha_0}{\alpha_i} \frac{\frac{n'}{\beta_0} + (1 - \alpha_i)}{\alpha_0 \frac{n'}{\beta_0} - (1 - \alpha_0)} = v_T \ln \frac{1}{\alpha_i} \frac{n' + \beta_0(1 - \alpha_i)}{n' - 1}.$$

Dacă:  $n'$  scade,  $V_{CEsat}$  scade;

Ex.:  $\beta_0 = 40; n' = 5, \alpha_i = 0,1 \Rightarrow V_{CEsat} = 0,115V$  (neglijabil, dar dependent de curenți și de temperatură).

#### 4. TBIP este comutator electronic

comutare directă  $BL \Rightarrow RAN, SAT$

comutare inversă  $RAN, SAT \Rightarrow BL$



## Comutarea TBIP

### Ecuțiile metodei sarcinii

- se integrează ecuația de continuitate pe toată lungimea bazei; rezultă:

$$\frac{dQ(t)}{dt} + \frac{Q(t)}{\tau_n} = i_B(t) \quad \text{cu:}$$

-  $i_B(t)$  curentul de bază, constant sau variabil, pentru  $t > 0$ ;

-  $\frac{Q(t)}{\tau_n}$  curentul de recombinare din bază;

-  $\frac{dQ(t)}{dt}$  variația sarcinii din bază determinată de aportul de purtători al curentului de bază și datorită recombinării.

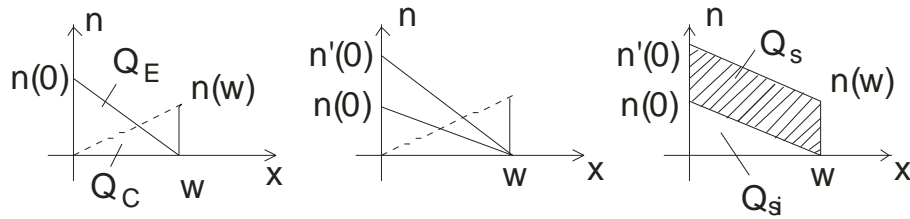
- în regim staționar, în RAN:  $i_B = \frac{Q}{\tau_n} \Rightarrow i_C = \beta_0 i_B = \beta_0 \frac{Q}{\tau_n}$ ;

- se presupune că și în regim staționar se păstrează proporționalitatea:

$$i_C(t) = \beta_0 \frac{Q(t)}{\tau_n} \quad \text{și rezultă:}$$

$$\frac{d}{dt} \left( \tau_n \frac{i_C(t)}{\beta_0} \right) + \frac{i_C(t)}{\beta_0} = i_B(t) \Rightarrow \tau_n \frac{di_C(t)}{dt} + i_C(t) = \beta_0 i_B(t)$$

- în saturație:



- injecție de purtători de la emitor;
- injecție de purtători de la colector (polarizat direct);
- injecție suplimentară de la emitor pentru menținerea constantă a curentului de colector, dat de panta concentrației de purtători;

Rezultă:

- sarcina de purtători injectați până la saturație incipientă,  $Q_{si}$ ;
- sarcina de purtători injectați în saturație de ambele joncțiuni,  $Q_s$

Ecuatiile metodei sarcinii vor fi:

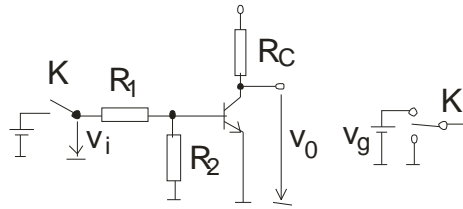
$$\text{- pentru RAN: } \begin{cases} \frac{dQ(t)}{dt} + \frac{Q(t)}{\tau_n} = i_B(t) \\ i_C(t) = \beta_0 \frac{Q(t)}{\tau_n} \end{cases} \quad \text{sau} \quad \tau_n \frac{di_C(t)}{dt} + i_C(t) = \beta_0 i_B(t);$$

$$\text{- pentru SAT: } \begin{cases} \frac{dQ_s(t)}{dt} + \frac{Q_s(t)}{\tau_s} + \frac{Q_{si}}{\tau_n} = i_B(t) \\ i_C(t) = i_{C_{sat}} \end{cases}; \quad \text{cu } \tau_s = \frac{\tau_n}{1 + \beta_0(1 - \gamma)};$$

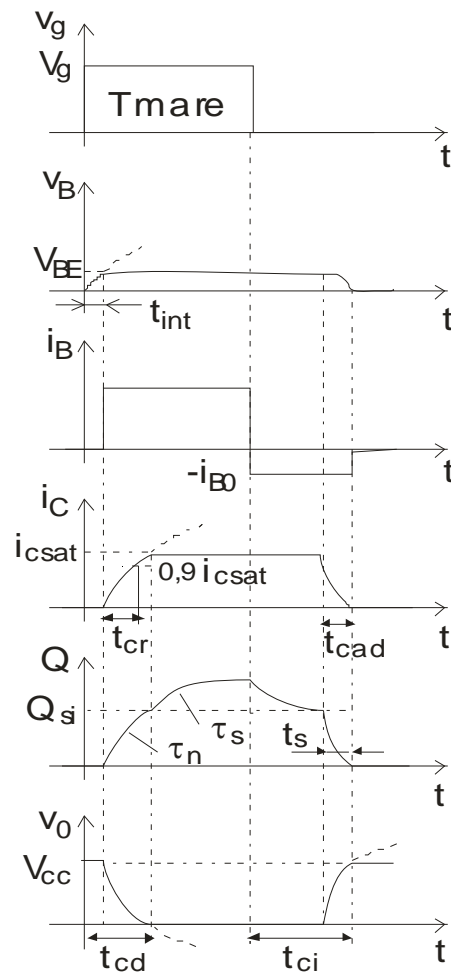
( $\tau_s$  este *constanta de timp de stocare*, dată de relația semiempirică în care  $\gamma$  este eficiența emitorului și cu valori comparabile cu ale lui  $\tau_n$ ).

### Comutarea TBIP

Schema de comandă:



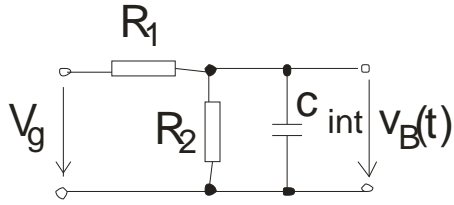
Graficele mărimilor electrice din circuit:



a) comutarea directă:

a1) timpul de întârziere:

- schema echivalentă pentru circuitul de intrare



- variația tensiunii pe baza tranzistorului după aplicarea saltului de tensiune de comandă:

$$v_B(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_g \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \quad \text{cu} \quad \tau_1 = C_{\text{int}} R_1 \parallel R_2; \quad \text{cu:} \quad C_{\text{int}} \cong C_{be} + C_{bc}$$

- se atinge tensiunea de deschidere a TBIP dacă  $v_B(t_{\text{int}}) = V_{BE0}$ ; rezultă:

$$t_{\text{int}} = C_{\text{int}} R_1 \parallel R_2 \ln \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_g}{\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_g - V_{BE0}} = C_{\text{int}} R_1 \parallel R_2 \ln \frac{1}{1 - \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \frac{V_{BE0}}{V_g}}$$

a2) timpul de creștere:

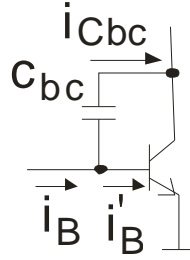
- se stabilește curentul de bază:  $i_B = \frac{V_g - V_{BE}}{R_1} - \frac{V_{BE}}{R_2} = \frac{V_g}{R_1} - \frac{V_{BE}}{R_1 \parallel R_2}$ ;

- se aplică metoda sarcinii pentru RAN:

$\frac{dQ(t)}{dt} + \frac{Q(t)}{\tau_n} = i_B$  cu condiția inițială:  $Q(0) = 0$  și rezultă:

$$Q(t) = \tau_n i_B \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}} \right); \quad i_C(t) = \beta_0 i_B \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_n}} \right).$$

- influența capacității de barieră a joncțiunii Colector-Bază,  $C_{bc}$ :



$$i'_B(t) = i_B - i_{C_{bc}} = i_B - C_{bc} \frac{dv_{BC}}{dt} \quad (\text{curentul care susține acumularea de}$$

sarcină în bază, conform ecuației metodei sarcinii,  $i_B$  fiind curentul de bază determinat de circuitul exterior);

$$v_{BC} = -v_{CB} = -(V_{cc} - R_c i_C - v_{BE}) \Rightarrow \frac{dv_{BC}}{dt} = R_c \frac{di_C}{dt};$$

Rezultă:  $\tau_n \frac{di_C(t)}{dt} + i_C(t) = \beta_0 \left( i_B - C_{bc} R_c \frac{di_C(t)}{dt} \right)$  sau:

$$\tau'_n \frac{di_C(t)}{dt} + i_C(t) = \beta_0 i_B \quad \text{cu: } \tau'_n = \tau_n + \beta_0 C_{bc} R_c .$$

- se remarcă influența foarte mare a celui de al doilea termen și a lui  $\beta_0$ . Deci:

$$Q(t) = \tau'_n i_B \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau'_n}} \right); \quad i_C(t) = \beta_0 i_B \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau'_n}} \right).$$

Terminarea comutării directe:

- în RAN: pentru  $i_C(t_{cr}) = 0,9\beta_0 i_B \Rightarrow t_{cr} = 2,3\tau'_n$  (mare);

- în SAT: pentru  $i_C(t_{cr}) = 0,9i_{C_{sat}} \Rightarrow t_{cr} = \tau'_n \ln \frac{1}{1 - \frac{0,9i_{C_{sat}}}{\beta_0 i_B}}$ ;

- dar;  $n' = \frac{i_B}{i_{Bsi}} = \frac{i_B}{\frac{i_{Csat}}{\beta_0}} = \frac{\beta_0 i_B}{i_{Csat}}$  și:  $t_{cr} = \tau_n' \ln \frac{1}{1 - \frac{0,9}{n'}}$ .

- prin dezvoltare în serie:  $t_{cr} \cong 0,9 \frac{\tau_n'}{n'}$ .

- se observă:  $t_{cr} = t_{cr}(\tau_n, R_c, \beta_0, C_{bc})$ ;

- pentru ca  $t_{cr} \rightarrow 0$  este necesar ca:  $\beta_0$  cât mai mic,  $\tau_n, C_{bc}$  cât mai mici,  $R_c$  cât mai mic (contradicție cu  $P_d = \frac{V_{CC}^2}{2R_c}$  cât mai mică).

În continuare, se acumulează sarcină în bază:

$$\frac{dQ_s(t)}{dt} + \frac{Q_s(t)}{\tau_s} + \frac{Q_{si}}{\tau_n'} = i_B \text{ cu: } Q_{si} = \tau_n' i_{Bsi}; \quad Q_s(0) = 0.$$

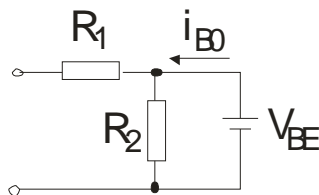
Rezultă:

$$Q_s(t) = \tau_s (i_B - i_{Bsi}) \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_s}} \right);$$

$$Q_s(\infty) = \tau_s (i_B - i_{Bsi}) = (n' - 1) Q_{si} = n Q_{si}.$$

### b) comutarea inversă

- până la eliminarea sarcinii din bază, tensiunea  $V_{BE}$  rămâne la valoarea de deschidere; circuitul echivalent:



- curentul de bază va fi:  $i_{B0} = \frac{V_{BE}}{R_2}$  (sau  $R_1 \parallel R_2$ , în funcție de circuit);

b1) eliminarea sarcinii suplimentare:

$$\frac{dQ_s(t)}{dt} + \frac{Q_s(t)}{\tau_s} + \frac{Q_{si}}{\tau'_n} = -i_{B0} \quad \text{cu: } Q_s(0) = \tau_s(i_B - i_{Bsi});$$

$$Q_s(t) = -\tau_s(i_{B0} + i_{Bsi}) + \tau_s(i_B + i_{B0}) e^{-\frac{t}{\tau_s}}.$$

La anularea sarcinii,  $Q_s(t_s) = 0$ , se obține *timpul de stocare*:

$$t_s = \tau_s \ln \frac{i_B + i_{B0}}{i_{Bsi} + i_{B0}}. \quad \text{comentarii.}$$

b2) comutarea de la saturația incipientă la blocare:

$$\tau'_n \frac{di_C(t)}{dt} + i_C = -\beta_0 i_{B0}, \quad \text{cu: } i_C(0) = i_{Csat} = \beta_0 i_{Bsi};$$

Rezultă:

$$i_C(t) = -\beta_0 i_{B0} + \beta_0(i_{B0} + i_{Bsi}) e^{-\frac{t}{\tau'_n}};$$

Se calculează timpul de cădere din condiția:  $i_C(t_{cad}) = 0$ :

$$t_{cad} = \tau'_n \ln \left( 1 + \frac{i_{Bsi}}{i_{B0}} \right).$$

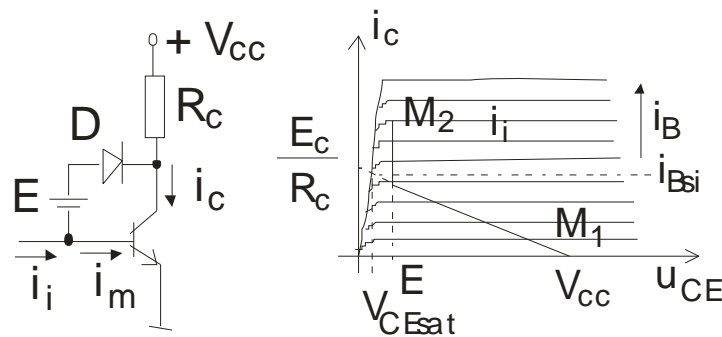
Concluzii:

$$t_{cd} = t_{int} + t_{cr} \quad \text{comentarii.}$$

$$t_{ci} = t_s + t_{cad}$$

## Evitarea intrării în saturație

- \* eliminare  $t_s$ , dar menținere în apropierea regiunii de saturație;
- \* circuit de reacție negativă neliniară:



funcționare:

- pentru  $i_i < i_{B1}$ ,  $D$  blocată și PSF, în RAN, parcurge zona  $M_1 \div M$
- pentru  $i_i > i_{B1}$ ,  $D$  deschisă, se stabilește tensiunea de ieșire la valoarea:  $V_{oL} = -V_D + E + V_{BE} \cong E$  și PSF, tot în RAN, parcurge zona  $M \div M_2$ ; curentul de colector se stabilește la valoarea:  $i_C = \alpha_0 i_E = \alpha_0 \left( i_i + \frac{V_{CC} - E}{R_c} \right)$
- tensiunea  $E$  se simulează cu rezistențe sau se poate folosi o diodă Schottky:

**Sursa:** Nicolae Cupcea, *Structura circuitelor digitale*, Editura Matrix Rom, București.