

## CAPITOLUL 2

### REGIMUL DE COMUTAȚIE AL DISPOZITIVELOR SEMICONDUCTOARE

#### 2.1. Probleme generale

Un comutator este un dispozitiv care poate conecta sau deconecta două puncte dintr-un circuit electric sau electronic, deci are două stări, o data este închis, face contactul și ideal are rezistența zero și a doua oara este deschis, iar ideal are rezistența infinită. Simbolul general pentru un comutator ideal și denumirile curente ale stărilor sunt prezentate în figura 2.1.

Dispozitivele pot fi comutatoare mecanice cu acționare manuală sau cu acționare electrică (relee). La putere mare sunt denumite contactoare.

Dispozitivele electronice pot de asemenea juca rolul de comutator și capitolul este dedicat comportării lor în acest rol.

Un dispozitiv electronic este în regim de comutație atunci când tensiunile la borne și implicit curenții se modifică cu viteză foarte mare. Dispozitivele funcționează de fapt sub acțiunea unor semnale de comandă sub formă de impulsuri dreptunghiulare.

Comanda poate fi în tensiune sau în curent, funcție de tipul sursei de comandă. Rezultatul este de asemenea un impuls de tensiune sau/și de curent. Acesta este deformat, și aceasta deformare este esențială pentru funcționarea circuitului

Într-un astfel de regim au importanță timpii de tranziție sau de comutație și pentru analiză nu pot fi utilizate obișnuit schemele echivalente simplificate. Elementele reactive ale schemelor echivalente ale dispozitivelor trebuie luate în considerare.

Există două tranziții care poartă numele de:

- **comutație directă** (turn on) este atunci când dispozitivul trece din starea de blocare în starea de conducție.
- **comutație inversă** (turn off) este atunci când dispozitivul trece din starea de conducție în starea de blocare.

Comportarea unui dispozitiv în regim de comutație se determină experimental de producători, care trec apoi în foile de catalog datele obținute. Acestea sunt obișnuit diverse valori de timp specifice și valori ale capacităților echivalente ale dispozitivelor.

#### 2.2. Dioda în regim de comutație

Comportarea unei diode supusă unui regim de comutație directă (momentul  $t_1$ ) cât și unui regim de comutație inversă (momentul  $t_2$ ), este prezentată în figura 2.2.

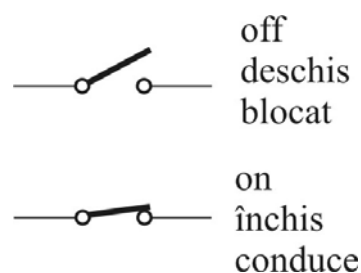


Fig. 2.1. Simbolul  
comutatorului ideal

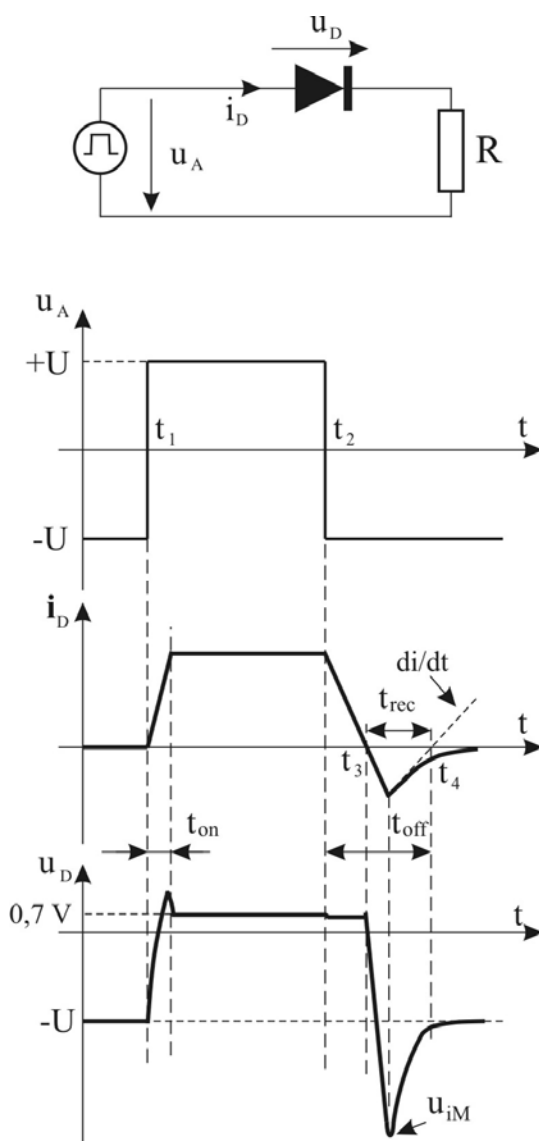


Fig. 2.2. Comutația diodei

comutație:

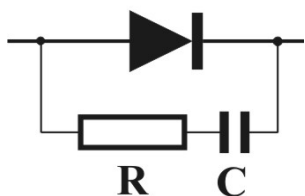


Fig. 2.3. Circuit de protecție a diodei la supratensiuni

Comanda se face în tensiune cu un impuls bipolar și este evaluat răspunsul atât în tensiune cât și în curent.

La comutația directă curentul prin dioda nu crește instantaneu (tensiunea  $U$  de comanda fiind presupusa ideală, cu timp de comutație zero), ci într-un timp numit timp de creștere sau de comutație directă,  $t_{cr}$  sau  $t_{on}$ . Similar evoluează tensiunea la bornele diodei.

La comutația inversă curentul prin dioda ajunge aproape de valoarea zero după un interval de timp numit timp de cădere sau de comutație inversă,  $t_{cd}$  sau  $t_{off}$ . Fenomenul de comutație inversă cuprinde și un interval de timp, numit timp de revenire, în care există un curent invers prin diodă. Simultan, tensiunea inversă la bornele diodei are o supracreștere inversă accentuată,  $u_{iM}$ , care depinde de panta inițială  $di/dt$  cu care revine curentul invers la zero. Dacă panta de revenire a curentului este mare atunci avem *comutație hard* (hard recovery), cu supratensiuni foarte mari, dacă este mică atunci avem *comutație soft* (soft recovery), cu supratensiuni mai mici. Aceste supratensiuni pot distruge dioda. Pentru limitarea acestora sunt utilizate elemente de protecție, cel mai des un grup rezistență-condensator (grup  $RC$ ) conectat la bornele diodei (figura 2.3).

Diodele se împart în două categorii mari d.p.d.v. al funcționării în regim de

- redresoare (rectifier), care sunt diode lente, cu timpii de comutație de ordinul microsecundelor
- diode rapide sau de comutație (fast, switching) dacă acești timpi sunt de ordinul nanosecundelor sau mai mici.

Pentru diodele rapide și ultrarapide timpii de comutație sunt de ordinul de mărime:

$t_{on}$  – nanosecunde, fracțiuni de nanosecunde;

$t_{off}$  – zeci de nanosecunde, nanosecunde

## 2.3. Tranzistorul în regim de comutație

Dioda, prin natura ei este un comutator cu două stări, conductie-blocare, iar schema echivalentă simplificată este un comutator ideal care depinde de polaritatea tensiunii la borne.

Pentru tranzistor lucrurile sunt mai complicate, el poate fi un comutator între colector și emitor deoarece are două stări în care pentru acest spațiu este la rândul lui echivalat simplificat cu un contact deschis, când este în stare de blocare și cu un contact închis când este în stare de saturație. Atingerea celor două stări depinde însă de comanda pe bază (care se face în curent) dar și de alte lucruri cum sunt conexiunea tranzistorului, tensiunea de alimentare de c.c. sau factorul de amplificare.

### 2.3.1. Tranzistorul bipolar în conexiune EC în rolul de comutator

Cel mai des tranzistorul este în conexiune EC când are rol de comutator și este comandat de la o sursă de tensiune care va furniza bazei un curent de comandă. Desigur că el poate funcționa ca un comutator și în celelalte conexiuni, lucrurile fiind similare cu cele de la amplificatoare.

Există și în cazul tranzistorului comutația directă, când tranzistorul trece din starea de blocare în starea de conductie, de obicei conductie în saturație sau la limita intrării în saturație și comutația inversă atunci când tranzistorul trece din starea de conductie în starea de blocare.

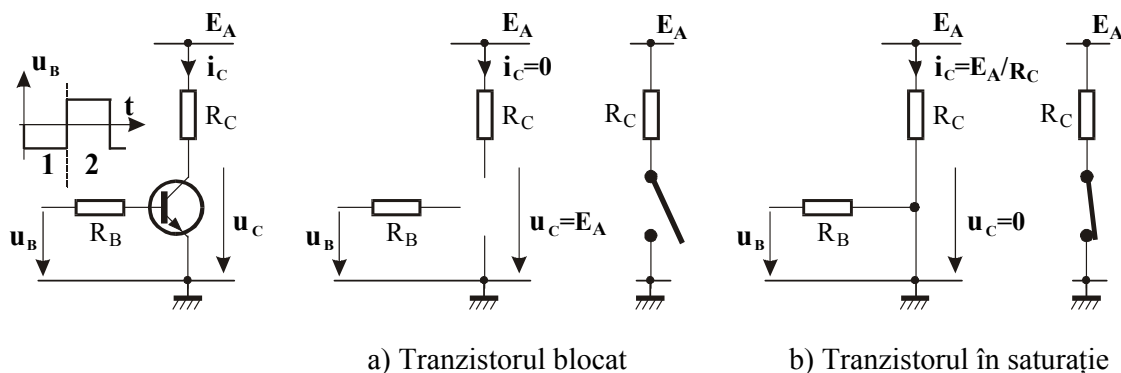


Fig. 2.4. Tranzistorul comandat cu impulsuri de tensiune

Tensiunea de comandă  $u_B$  este sub forma de impulsuri (figura 2.4), cu o valoare mică (sub 0,7 volți) sau cu valoare negativă pentru blocare (intervalul 1 de comandă) și cu o valoare sensibil peste 0,7 volți pentru saturație (intervalul 2 de comandă). Tranzistorul se comportă în acest caz ca un comutator.

Pentru intervalul 1 de comandă tranzistorul este blocat și dacă este înlocuit prin schema echivalentă simplificată pentru zona de blocare atunci curentul principal  $i_C$  este zero iar tensiunea de ieșire,  $u_{CE}$  este egală cu tensiunea sursei (figura 2.4 a). În

acest caz tranzistorul este echivalent între bornele principale colector-emitor cu un comutator deschis.

Pentru intervalul 2 de comanda tranzistorul este deschis la saturatie si daca este inlocuit prin schema echivalenta simplificata pentru zona de saturatie atunci curentul principal  $i_C$  este  $E_A/R$  conform legii lui Ohm iar tensiunea de iesire,  $u_{CE}$  este egala zero (figura 2.4 b). In acest caz tranzistorul este echivalent între bornele principale colector-emitor cu un comutator inchis.

Tranzistorul se comporta ca un comutator comandat, care se inchide sau se deschide sub actiunea tensiunii de comanda din circuitul de intrare.

### 2.3.2. Tranzistorul bipolar în regim de comutație

Tranzitia de la o stare la alta nu se face în realitate instantaneu. Atunci au importanta timpii de tranzitie sau de comutatie si nu pot fi utilizate schemele echivalente simplificate. Evolutia în timp a marimilor principale pe intervalele de tranzitie este prezentata în figura 2.5.

S-a presupus o tensiune ideala de comanda, cu timp zero de tranzitie. Raspunsul tranzistorului, curentul de intrare  $i_B$  si cel de iesire  $i_C$  se face în intervale de timp distincte.

În primul rand, raspunsul la comutatiea directa. Curentul de baza raspunde rapid, dar cel de colector are în primul rand un interval de intarziere pana incepe crestera,  $t_d$  (delay) iar apoi un interval de crestere,  $t_r$ . Împreuna reprezinta timpul de comutatie directa,  $t_{on}$ .

La comutatiea inversa curentul de baza scade un interval de timp si trece la o valoare negativa maxima, pastrata o durata de timp dupa care revine la zero. Importanta este comportarea curentului de colector deoarece acesta este răspunsul final în procesul de comutație. El ramane la valoarea maxima pozitiva un interval de timp, denumit timp de stocare  $t_s$  (store), si doar apoi incepe se scada la zero într-un alt interval de timp numit timp de cadere,  $t_f$ . Împreuna timpul de stocare si cel de cadere reprezinta timpul de comutatie inversa a tranzistorului,  $t_{off}$ .

Timpii de comutatie sunt parametri importanti ai tranzistorului, ei determinand de fapt limita vitezei de functionare a tranzistorului în circuitele de impulsuri sau mai precis limita maxima a frecventei impulsurilor care pot fi generate sau prelucrate de un anumit tranzistor.

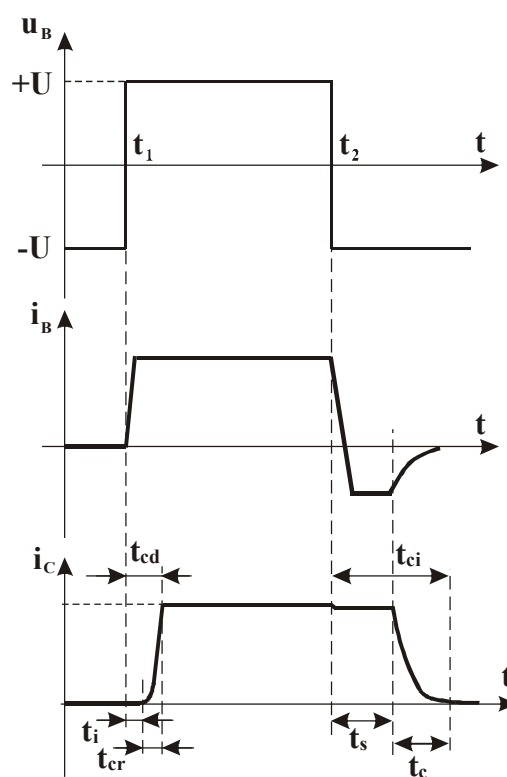


Fig. 2.5 Tranzistorul în regim de comutație; forma în timp a mărimilor principale

### 2.3.3. Comutație și saturație pentru tranzistorul bipolar

Pentru ca tranzistorul să se comporte cât mai aproape de un contact ideal închis, adică rezistență zero după comutația directă, el trebuie să fie adus în regim de saturație.

Pentru cazul schemei de comutație cu tranzistor în conexiune EC alegerea elementelor pentru a fi îndeplinită această condiție se face printr-un calcul simplu (figura 2.6).

Condiția ca tranzistorul să fie la limita de intrare în saturație este ca tensiunea  $U_{CE}$  să fie mai mică decât tensiunea  $U_{BE} \approx 0,7V$ . Se poate neglija această tensiune de  $0,7V$  cât și tensiunea  $U_{CE}$  atunci când tranzistorul este în saturație (prin comparație cu tensiunea de alimentare  $E_{CC}$  mult mai mare) și se va considera condiția de saturație îndeplinită dacă curentul de colector provoacă o cădere de tensiune pe  $R_C$  egală cu tensiunea de alimentare. Vom nota acest curent  $I_{Csat}$  și rezultă relația:

$$I_{Csat} R_C = E_{CC} \quad (2.1)$$

Atingerea curentului de saturație depinde de nivelul curentului de bază. Neglijând  $U_{BE} \approx 0,7V$ , mult mai mică decât  $E_{CC}$  avem :

$$I_B R_B = E_{CC} \quad (2.2)$$

La limita de intrare în saturație există relația principală dintre curenții unui tranzistor :

$$I_{Csat} = \beta I_{Bsat} \quad (2.3)$$

Pentru saturație sigură trebuie să avem îndeplinită condiția :

$$I_B > I_{Bsat} \quad (2.4)$$

Calculul simplificat se face astfel :

- Se alege un curent de saturație,  $I_{Csat}$
  - Se calculează  $R_C$  din (2.1) ;
  - Se alege o rezistență de valoare apropiată celei rezultate din calcul ;
  - Se recalculează  $I_{Csat}$  cu (2.1) ;
  - Se determină  $I_{Bsat}$  cu (2.3)
  - Se alege  $I_B$  conform (2.4)
- Se calculează  $R_B$  din (2.2)

Dacă condiția de saturație (2.4) este îndeplinită la limită,  $I_B = I_{Bsat}$ , se spune că tranzistorul este în saturație incipientă. Cu cât curentul de bază este mai mare decât această limită cu atât saturația tranzistorului este mai “adâncă”.

Pentru a fi aproape de contact ideal închis nu are mare importanță dacă tranzistorul este la limită sau în saturație accentuată, dar pentru regimul de comutație are.

Timpul de stocare, care mărește timpul de comutație inversă este direct dependent de gradul de saturație astfel că ideal ar fi ca întotdeauna comutația directă să se facă doar la limita de intrare în saturație.

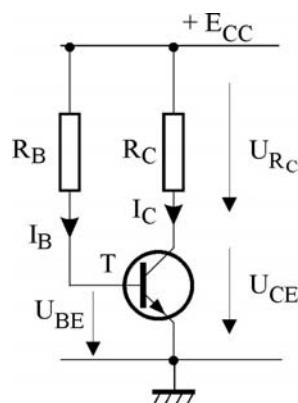


Fig. 2.6. Amplificator conexiune EC

Calculul prezentat nu dă garanții deoarece depinde de factorul de amplificare în curent, diferit chiar la tranzistoare din același lot iar de altfel calculul se face pentru un factor de amplificare minim. De aceea se utilizează, pentru a evita saturația profundă, diverse soluții dintre care s-a impus utilizarea diodelor Schottky.

Acestea au o tensiune de deschidere mai mică decât joncțiunile p-n pe siliciu și dacă sunt conectate ca în figura 2.7 pot evita intrarea în saturație a tranzistorului și deci duc la timpi de comutație mai mici.

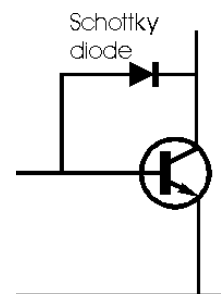


Fig. 2.7. Tranzistor cu diodă Schottky pentru evitarea saturației

### 2.3.4. Comutator elementar cu tranzistor bipolar

Elementul principal utilizat în circuitele de impulsuri pentru a obține sau transmite fronturi rapide este tranzistorul, folosit în regim de comutație.

În circuitele de impulsuri se utilizează prioritar conexiunea emitor comun a tranzistorului și în majoritatea situațiilor rezistența de stabilizare termică din emitor lipsește, astfel ca tranzistorul apare obisnuit ca în figura 2.4, unde  $u_B$  este un impuls de intrare iar  $u_C$  impulsul de ieșire.

În primul rând trebuie amintit că, utilizat în acest mod, ca și la amplificatoare și privind doar forma tensiunilor de intrare și ieșire, tranzistorul provoacă o schimbare de sens a frontului de intrare. Un front de intrare crescător este transformat într-unul descrescător la ieșire și invers (figura 2.9).

Tranzistorul are un efect dublu asupra duratei fronturilor. Îmbunătățește fronturile lente dar în același timp strică fronturile rapide. Esențiali sunt timpii de comutație ai tranzistorului.

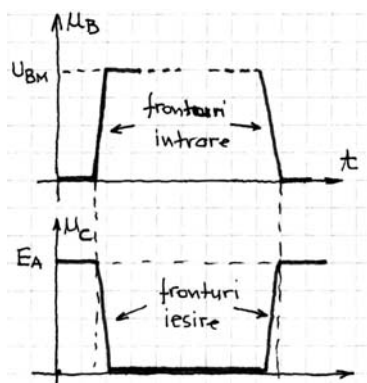


Fig. 2.9. Schimbarea sensului fronturilor la tranzistor

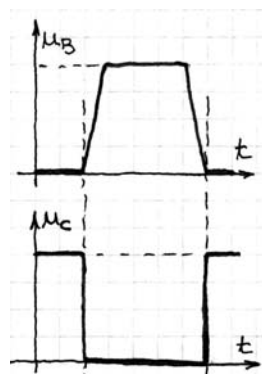


Fig. 2.10. Îmbunătățirea fronturilor la frecvențe joase

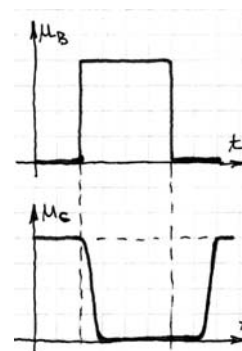


Fig. 2.11. Deteriorarea fronturilor la frecvențe înalte

La frecvențe joase, unde timpii de comutație ai tranzistorului sunt neglijabili, un impuls cu fronturi lente se va transforma (respectând schimbarea de sens) într-un impuls cu fronturi rapide (figura 2.10) iar la frecvențe ridicate, unde timpii de comutație sunt comparabili cu timpul impulsului un impuls cu fronturi rapide la intrare se transforma la ieșire la fel ca în figura 2.11.

O succesiune de impulsuri se poate modifica la fel ca in figura 2.12. Se produce la limita o deformare puternica dar care inca poate fi considerata o succesiune de impulsuri (figura 2.12.a). Peste o anumita limita a frecventei impulsurilor de intrare la iesire nu mai exista o succesiune de impulsuri (figura 2.12.b)

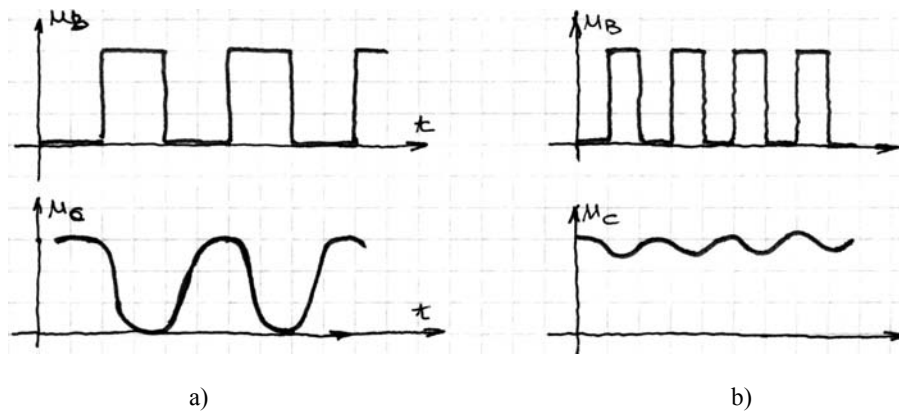


Fig. 2.12. Modificarea impulsurilor o data cu cresterea frecventei: la limita de functionare (a); peste limita de functionare (b).