

I. Noțiuni introductive

1. Dioda semiconductoră

Dioda semiconductoră este cel mai simplu dispozitiv semiconductor. Structura diodei se bazează pe o joncțiune de tip **pn**, realizată în prezent din materiale semiconductoare din Siliciu. Diodele semiconductoare sunt întrebuințate în special în următoarele tipuri de circuite electronice:

- redresoare de tensiune
- circuite de detecție a valorii maxime a unei tensiuni
- circuite de limitare a valorii tensiunii
- circuite de exponențiere sau de logaritmare.

Dioda semiconductoră este un dispozitiv cu două terminale, fabricată de către producători sub diverse forme, una din cele mai uzuale fiind prezentată în Figura 1.



Figura 1. Dioda semiconductoră.

Cele două terminale ale diodei au “roluri” diferite, fiind referite sub denumiri diferite și anume **anod**, respectiv **catod**. Pentru a utiliza corect dioda în circuit, catodul diodei este, în general, indicat pe capsula acesteia prin intermediul unui inel, desenat ca în Figura 1. În circuitele electronice, dioda semiconductoră este simbolizată ca în Figura 2.

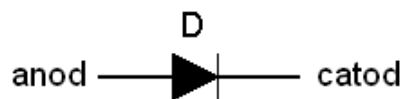


Figura 2. Simbolul electronic al diodei semiconductoră.

La terminalele diodei apar 2 mărimi electrice: curentul prin diodă, notat uzual i_A , care prin convenție are sensul de la anod spre catod, respectiv tensiunea pe diodă, notată uzual v_A , care, prin convenție, are referința de la anod spre catod. Mărimile electrice de terminal ale diodei, reprezentate în mărimi totale, sunt prezentate în Figura 3.

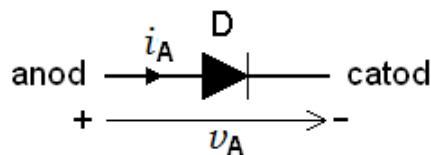


Figura 3. Mărimile electrice ale diodei semiconductoră.

2. Funcționarea diodei semiconductoră

Funcționarea diodei semiconductoră este descrisă pe baza relației care există între mărimile electrice de terminal curent-tensiune, notate i_A , respectiv v_A . Din punct de vedere analitic, funcționarea diodei semiconductoră este descrisă prin intermediul **ecuației de funcționare**, care furnizează o relație matematică între curentul prin diodă i_A și tensiunea de la terminalele sale v_A , ambele mărimi fiind exprimate în mărimi totale:

$$i_A = I_S \left[\exp\left(\frac{v_A}{V_T}\right) - 1 \right]$$

1

ecuația de funcționare a diodei semiconductoare

unde I_S reprezintă **curentul de saturație** al diodei, care este aproximativ egal cu curentul care trece prin diodă în conducție inversă ($10^{-16} \div 10^{-14}$ [A]), V_T reprezintă **tensiunea termică**, care depinde direct proporțional de temperatura de lucru (are valoarea de 25[mV] pentru $T=25[^\circ\text{C}]$), iar v_A și i_A sunt tensiunea, respectiv curentul total (curentul continuu plus curentul variabil) prin diodă.

Observații:

- Funcționarea diodei depinde de temperatura la care aceasta lucrează, (datorită dependenței curentului i_A de tensiunea termică V_T). La creșterea temperaturii de lucru, curentul prin diodă crește (în special curentul invers prin diodă), iar tensiunea de prag scade (cu aproximativ 2[mV/ $^\circ\text{C}$]).
- Dioda semiconductoare este un element neliniar de circuit; rezultă că circuitul care conține o diodă semiconductoare este un **circuit neliniar**.

Relația dintre mărimile de terminal ale diodei este descrisă grafic prin intermediul **caracteristicii de funcționare a diodei**, care furnizează informații despre modul în care curentul prin diodă i_A variază în funcție de tensiunea aplicată v_A între terminalele sale. Dacă pentru curent și tensiune se consideră sensurile de referință din Figura 3, atunci caracteristica de funcționare a diodei este reprezentată ca în Figura 4.

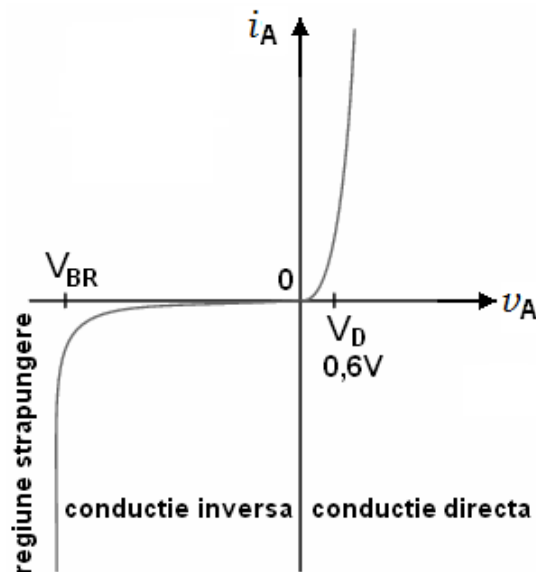


Figura 4. Caracteristica de funcționare a diodei semiconductoare.

Regiunile de funcționare ale diodei

În cazul în care, respectând sensul de referință al tensiunii pe diodă, adoptat în Figura 3, tensiunea continuă pe diodă este pozitivă (potențialul electric aplicat pe anod este mai mare decât potențialul electric de pe catod), se spune că aceasta funcționează în regiunea de **conducție directă**. În cazul în care tensiunea continuă pe diodă este negativă (potențialul

electric aplicat pe anod este mai mic decât potențialul electric de pe catod), se spune că aceasta funcționează în regiunea de **conducție inversă**.

Din caracteristica de funcționare a diodei, se remarcă o serie de aspecte care vor fi comentate în continuare.

În regiunea de conducție directă, se observă prezența unei **tensiuni de prag** (notată V_D în figură). Dacă valoarea tensiunii pe diodă este sub valoarea tensiunii de prag, aceasta funcționează în **regiunea de funcționare subprag**, iar valoarea curentului electric este neglijabilă (curentul electric are o valoare foarte mică și din acest motiv curentul respectiv poate fi aproximat ca fiind zero amperi).

Dacă valoarea tensiunii pe diodă crește, tinzând spre valoarea tensiunii de prag V_D , valoarea curentului electric prin diodă începe să crească, iar după atingerea valorii tensiunii de prag, dioda intră în **regiunea de funcționare peste prag**, în care curentul prin diodă manifestă o creștere semnificativă, de formă exponențială, în funcție de tensiunea aplicată pe diodă; totodată, se remarcă faptul că tensiunea la terminalele diodei nu manifestă variații semnificative, rămânând la o valoare apropiată de valoarea de prag V_D .

Pentru diodele semiconductoare realizate din siliciu, valoarea tensiunii de prag este cuprinsă între $0,5[V] \div 0,7[V]$. Uzual, în analiza circuitelor, se consideră pentru tensiunea de prag valoarea $V_D = 0,6[V]$.

Curentul prin diodă nu trebuie să depășească o anumită valoare maximă, notată I_F în cataloagele de diode, valoare impusă de puterea electrică maximă pe care o poate disipa dioda semiconductoare fără a se distruge termic (prin încălzire excesivă). Limitarea curentului prin diodă la o valoare mai mică decât valoarea I_F este asigurată de către circuitul în care este utilizată dioda, de obicei, prin intermediul unui rezistor, numit rezistor de polarizare.

În regiunea de conducție inversă, se remarcă o valoare specifică, denumită **tensiune de străpungere**, (notată V_{BR} în figură), la care curentul prin diodă crește necontrolat. Valoarea tensiunii de străpungere este de ordinul zecilor-sutelor de volți pentru diodele semiconductoare uzuale. Dacă valoarea în modul a tensiunii pe diodă este mai mică decât valoarea V_{BR} , curentul electric este foarte mic, cel mult de ordinul nanoamperilor și în consecință poate fi aproximat ca fiind zero amperi. Dacă valoarea tensiunii pe diodă atinge valoarea tensiunii de străpungere V_{BR} , atunci curentul electric prin diodă crește necontrolat, acest fenomen fiind denumit **fenomenul de străpungere** al diodei. În acest caz, se spune că dioda funcționează în **regiunea de străpungere**. Deoarece creșterea necontrolată a curentului electric duce la depășirea valorii maxim admise I_F , străpungerea diodei semiconductoare duce la distrugerea acesteia. Pentru evitarea distrugerii diodei semiconductoare, este necesar ca circuitul în care este utilizată aceasta să limiteze tensiunea negativă pe dioda respectivă la o valoare mai mică în modul decât valoarea V_{BR} .

În consecință, în funcționare normală (în funcționare în afara regiunii de străpungere) dioda semiconductoare reprezintă un element de circuit care permite trecerea curentului electric într-un singur sens, de la anod spre catod, în funcție de tensiunea aplicată la bornele sale.

3. Polarizarea diodelor

Așa cum s-a prezentat anterior, o diodă poate funcționa în 2 regiuni diferite și anume regiunea de conducție directă, respectiv regiunea de conducție inversă. **Regiunea de funcționare a diodei este stabilită prin polarizarea acesteia.**

Polarizarea diodei este realizată prin intermediul unui circuit special, numit **circuit de polarizare**. Circuitul de polarizare conține întotdeauna o sursă de alimentare (o sursă de tensiune continuă sau o sursă de curent continuu), care se mai numește și sursă de polarizare și un rezistor de polarizare, care are rolul de a limita curentul prin diodă astfel încât aceasta să nu se distrugă prin depășirea valorii maxim admise pentru curentul prin ea, valoare furnizată în cataloagele de diode.

Dacă circuitul de polarizare asigură un potențial electric superior pe anod față de cel aplicat pe catodul diodei (o tensiune pozitivă pe diodă), atunci dioda respectivă funcționează în regiunea de conducție directă și se spune că aceasta este polarizată direct.

Analog, dacă circuitul de polarizare asigură un potențial electric inferior pe anod față de cel aplicat pe catodul diodei (o tensiune negativă pe diodă), aceasta funcționează în regiunea de conducție inversă și se spune că dioda respectivă este polarizată invers.

Circuitul de polarizare al diodei este prezentat în Figura 5, în care sursa V_{CC} reprezintă sursa de polarizare, iar R reprezintă rezistorul de polarizare. Deoarece potențialul electric al anodului diodei este la o valoare superioară celui aplicat pe catod (borna + a sursei de polarizare V_{CC} se aplică pe anod prin rezistorul R , borna – a sursei de polarizare V_{CC} se aplică pe catod), dioda D funcționează în regiunea de conducție directă. În consecință, prin dioda D apare un curent continuu nenul, I_A iar pe diodă va cădea o tensiune V_A a cărei valoare este apropiată de valoarea tensiunii de prag V_D .

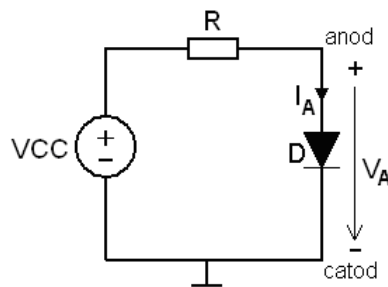


Figura 5. Circuitul de polarizare al diodei semiconductoare.

Perechea de mărimi electrice care apar la terminalele diodei (I_A - V_A), a căror valori sunt stabilite de circuitul de polarizare al diodei respective, se numește **Punct Static de Funcționare**, prescurtat **PSF**, al diodei. Punctul Static de Funcționare al diodei caracterizează complet funcționarea acesteia în regim de curent continuu, valoarea Punctului Static de Funcționare al diodei indicând regiunea de funcționare a acesteia, în regim de curent continuu.

Determinarea Punctului Static de Funcționare

Determinarea PSFului diodei constă în determinarea valorilor curentului continuu prin diodă I_A , respectiv a tensiunii continue pe diodă, notată V_A . Calculul valorilor PSFului se realizează pe circuitul de polarizare al acesteia prezentat în Figura 5.

Mărimile electrice ale PSFului diodei D se determină pe baza a două ecuații care conțin necunoscutele respective. Prima ecuație este dată de ecuația de funcționare a diodei semiconductoare, particularizată pentru mărimi electrice continue:

$$I_A = I_S \left[\exp\left(\frac{V_A}{V_T}\right) - 1 \right]$$

A doua relație este o relație de circuit, obținută prin aplicarea teoremei lui Kirchhoff 2 pe bucla de circuit compusă din elementele circuitului respectiv.

$$-V_{CC} + R \cdot I_A + V_A = 0$$

S-a obținut astfel un sistem neliniar de ecuații, care se poate rezolva prin metode numerice, soluție care complică analiza circuitului electronic.

O alternativă la determinarea analitică a valorilor mărimilor electrice de terminal ale diodei în Punctul Static de Funcționare este reprezentată de metoda grafică de determinare a acestuia, sugerată în Figura 6, pe baza căreia, valorile respective reprezintă coordonatele punctului de intersecție ale graficelor relațiilor de mai sus în planul I_A - V_A pe axele graficului. Prin intersectarea celor 2 grafice, se determină Punctul Static de Funcționare al diodei, de coordonate I_{A0} și V_{A0} .

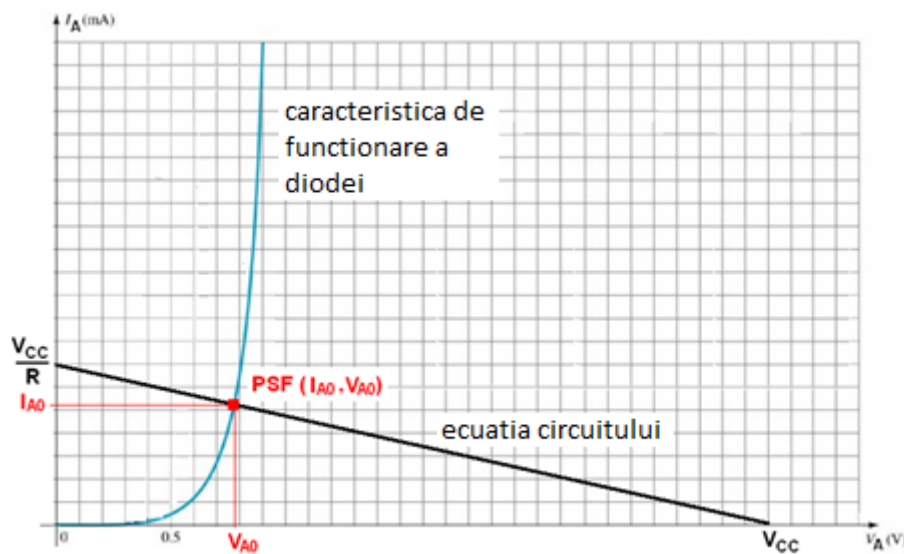


Figura 6. Determinarea grafică a Punctului Static de Funcționare al diodei.

Pentru rezolvarea analitică a sistemului de ecuații care permite determinarea valorii Punctului Static de Funcționare, este necesar ca pentru dioda semiconductoră să se dezvolte un **circuit echivalent liniar**, care modelează comportamentul acesteia în diverse regimuri de funcționare. În acest mod se poate obține un sistem de ecuații liniar, ușor de rezolvat.

4. Dioda Zener

Dioda Zener este un tip special de diodă, care nu se distruge în regiunea de străpungere. Această caracteristică specifică diodei Zener o face utilă în circuitele în care este necesară păstrarea unei tensiuni electrice la o valoare constantă, în condițiile în care valoarea curentului electric prezintă variații.

Dioda Zener este furnizată de către producători sub diverse capsule, iar în Figura 7 este prezentată una din variantele întâlnite. Terminalele sale poartă aceeași denumire ca și în cazul diodei semiconductoră, respectiv se numesc **anod** și **catod**, acesta din urmă fiind indicat pe capsula diodei Zener prin intermediul unui inel desenat.



Figura 7. Dioda Zener.

În circuitele electronice, dioda Zener este simbolizată ca în Figura 8.

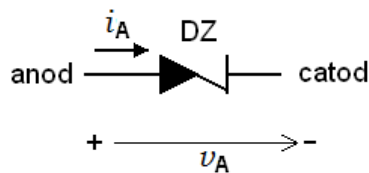


Figura 8. Simbolul electronic al diodei Zener.

Caracteristica de funcționare a diodei Zener este prezentată în Figura 9. După cum se observă din aceasta, în regiunea de străpungere, **dioda Zener menține tensiunea de la terminalele sale la o valoare constantă, în condițiile în care prin aceasta curentul poate avea oricare valori cuprinse într-un domeniu de valori** stabilit de parametrii de catalog ai diodei, identificați prin [I_{ZMIN} , I_{ZMAX}].

Din Figura 9 se remarcă faptul că, dacă valoarea curentului prin diodă este în intervalul de valori [I_{ZMIN} , I_{ZMAX}], tensiunea între catod și anod este aproximativ egală cu tensiunea de străpungere, care, pentru dioda Zener este notată V_Z .

Un astfel de comportament poate fi util pentru construirea unui circuit electronic special, numit **referință de tensiune**, care furnizează între două borne o tensiune de valoare constantă, indiferent de variația curentului electric la bornele respective. Referința de tensiune este utilizată în **stabilizatoarele de tensiune**, circuite electronice pe baza cărora se construiesc sursele de tensiune continuă.

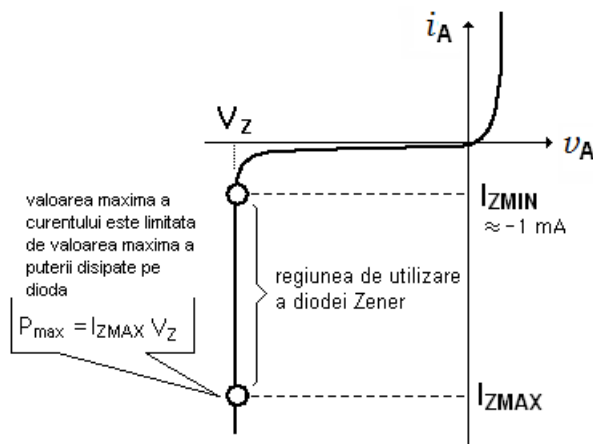


Figura 9. Caracteristica de funcționare a diodei Zener.

Cu excepția comportamentului nedistructiv în regiunea de străpungere, în rest, dioda Zener se comportă ca o diodă semiconductoare obișnuită.

Caracteristica de funcționare a diodei Zener se modifică la variația temperaturii de lucru. Parametrul care caracterizează funcționarea diodei Zener în condițiile în care temperatura variază, este coeficientul termic al diodei Zener, notat CTV_Z . Este de dorit ca acest parametru să fie de valoare cât mai mică. În acest caz, funcționarea unei astfel de diode devine aproximativ independentă de variația temperaturii la care aceasta lucrează.

5. Dioda electroluminiscentă – LED-ul

La fel ca și dioda semiconductoare, LED-ul permite trecerea curentului prin el doar în cazul în care lucrează în regiunea de conducție directă, iar trecerea curentului electric prin LED este semnalizată prin iluminarea acestuia.

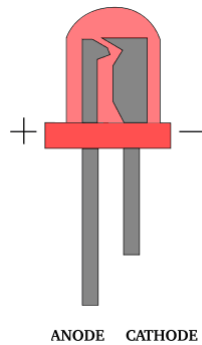


Figura 10. LED-ul – sau dioda electroluminiscentă.

LED-ul este furnizat de către producători sub diverse forme, una dintre aceste variante fiind prezentată în Figura 10. Terminale sale se numesc **anod**, respectiv **catod**, acesta din urmă fiind indicat prin intermediul terminalului mai scurt al LED-ului. În circuitele electronice, LED-ul este simbolizat ca în Figura 11.

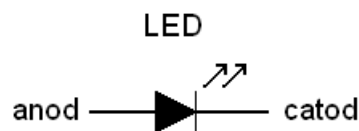


Figura 11. Simbolul electronic al LED-ului.

Spre deosebire de dioda semiconductoare, LED-ul are o tensiune de prag V_{LED} de aproximativ **1,6÷1,8 [V]**.

II. Modelarea comportamentului diodei

Pentru simplificarea analizei circuitelor electronice care conțin diode este necesară dezvoltarea unor modele liniare, care să descrie funcționarea diodei. Modelul diodei depinde de **regimul** în care aceasta funcționează și de **regiunea** în care aceasta funcționează (regiunea de conducție directă, respectiv regiunea de conducție inversă). Din acest motiv, există mai multe modele utilizate pentru descrierea funcționării diodei, decizia asupra modelului utilizat fiind luată după **identificarea regimului și a regiunii de funcționare ale diodei**.

Regimurile de funcționare considerate sunt:

- regimul de curent continuu,
- respectiv regimul variabil.

Într-un circuit electronic, regimul de curent continuu este determinat de prezența în circuit fie a unei surse de tensiune continuă, fie a unei surse de curent continuu și este caracterizat prin faptul că valorile mărimilor electrice sunt constante în timp.

Într-un circuit electronic, regimul variabil este determinat de prezența în circuit fie a unei surse de tensiune variabilă, fie a unei surse de curent variabil și este caracterizat prin faptul că valorile mărimilor electrice sunt variabile în timp. În funcție de valoarea variațiilor mărimilor electrice, regimul variabil se poate clasifica în:

- regim variabil de semnal mare, caracterizat prin valori relativ mari ale variațiilor,
- regim variabil de semnal mic, caracterizat prin valori foarte mici ale variațiilor.

Regimul în care funcționează dioda se decide observând tipul surselor din circuitul în care dioda respectivă este utilizată. Astfel, dacă în circuit sunt numai surse de energie electrică continue, dioda funcționează în regim de curent continuu, dacă în circuit sunt numai surse de energie electrică variabile, dioda funcționează în regim variabil, iar dacă în circuit există atât surse de energie electrică continuă, cât și variabilă, atunci dioda funcționează atât în regim de curent continuu cât și în regim variabil.

Regiunile de funcționare ale diodei considerate sunt regiunea de conducție directă, respectiv regiunea de conducție inversă. Regiunea de străpungere, cea de a 3a regiune în care dioda poate funcționa, este distructivă pentru marea majoritate a tipurilor de diode și din acest motiv nu va fi luată în considerare în acest paragraf.

Regiunea în care funcționează dioda se decide estimând valorile potențialelor electrice din anodul diodei, notat V_{ANOD} și din catodul diodei, notat V_{CATOD} . Astfel, dacă inspectând circuitul electronic în care dioda este utilizată, se constată că:

- $V_{ANOD} \geq V_{CATOD}$, atunci dioda funcționează în regiunea de conducție directă,
- $V_{ANOD} < V_{CATOD}$, atunci dioda funcționează în regiunea de conducție inversă.

1. Modelarea funcționării diodei semiconductoare în regim de curent continuu și în regim variabil de semnal mare

Atât în regim de regim de curent continuu cât și în regim variabil de semnal mare, comportamentul diodei semiconductoare poate fi modelat prin intermediul unui model liniar. Modelul respectiv ține cont de comportamentul diodei semiconductoare atât în regiunea de conducție inversă, unde curentul prin diodă este considerat nul, cât și în regiunea de conducție directă, în regiunea subprag (regiunea în care tensiunea electrică care cade pe diodă este mai mică decât tensiunea de prag), unde curentul este, de asemenea considerat nul, respectiv în regiunea superioară pragului, unde creșterea curentului este considerată, în modelul liniar, ca fiind liniară. Modelul liniar al diodei neglijează comportamentul acesteia în regiunea de străpungere.

Modelul liniar pe porțiuni modelează comportamentul diodei semiconductoare atât în regim de curent continuu, unde valorile mărimilor electrice de terminal ale diodei semiconductoare sunt constante în timp, cât și în regim variabil de semnal mare, unde valoarea tensiunii electrice a diodei semiconductoare este caracterizată de variații de amplitudine mai mare decât ordinul zecilor de milivolți.

Modelul liniar pe porțiuni al diodei conține 2 parametri de model, care sunt determinați din caracteristica reală de funcționare a diodei respective și anume, tensiunea de prag V_D , care, dacă dioda semiconductoare este fabricată din Siliciu, are valoarea $V_D = 0,6[V]$, respectiv rezistența diodei semiconductoare, care se particularizează în funcție de regimul de funcționare al diodei, de curent continuu, sau variabil de semnal mare. Astfel, în cazul în care dioda semiconductoare lucrează în regim de curent continuu, rezistența diodei semiconductoare se numește rezistență de curent continuu a diodei și se notează cu R_D , iar dacă dioda semiconductoare lucrează în regim variabil de semnal mare, rezistența diodei semiconductoare se numește rezistența electrică de semnal mare a diodei și se notează cu r_D .

În Figura 1 se prezintă caracteristica de funcționare specifică modelului liniar pe porțiuni al diodei. După cum se observă, caracteristica reală de funcționare a diodei semiconductoare, prezentată în cursul anterior, a fost aproximată prin 3 segmente de dreaptă, fiecare corespunzând câte unei regiuni de funcționare (conducție inversă - 1, conducție subprag - 2, respectiv conducție peste prag - 3).

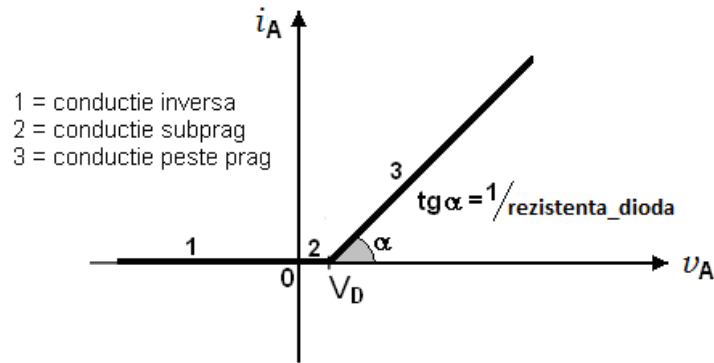


Figura 1. Caracteristica de funcționare corespunzătoare modelului liniar pe porțiuni al diodei semiconductoare.

Modelul liniar pe porțiuni al diodei semiconductoare este caracterizat de ecuația următoare, care, descrie matematic fiecare din cele 3 segmente ale caracteristicii de funcționare, conform regiunii de funcționare a acesteia:

$$i_A = \begin{cases} 0 & v_A < 0 & \text{conductie_inversă} \\ 0 & 0 \leq v_A < V_D & \text{conductie_subprag} \\ \frac{v_A - V_D}{\text{rezistenta_dioda}} & V_D \leq v_A & \text{conductie_peste_prag} \end{cases}$$

Circuitul echivalent al modelului liniar pe porțiuni al diodei semiconductoare

În analiza circuitelor electronice care conțin diode este utilizat un circuit echivalent determinat pentru modelul liniar pe porțiuni al diodei semiconductoare, dedus prin introducerea elementelor care modelează comportamentul diodei, în funcție de regimul său de funcționare.

Astfel, deoarece în regiunea de conducție inversă curentul electric prin diodă este nul, indiferent de valoarea tensiunii pe aceasta,

$$i_A = 0 \quad (\forall) v_A$$

circuitul echivalent al diodei în regiunea de conducție inversă este reprezentat printr-un gol (circuit întrerupt), deoarece prin gol curentul electric este întotdeauna nul, indiferent de valoarea tensiunii care cade pe acesta.

În regiunea de conducție directă, circuitul echivalent al diodei semiconductoare se deduce pe baza relației tensiunii electrice care cade pe diodă în această regiune de funcționare. Din ecuația de funcționare a modelului liniar pe porțiuni a diodei semiconductoare, se poate deduce că, pentru întreaga regiune de conducție directă (atât pentru regiunea subprag cât și pentru regiunea peste prag) variația tensiunii pe diodă, considerând ca sens de referință sensul reprezentat de la anodul spre catodul diodei, este descrisă de relația:

$$v_A = V_D + \text{rezistenta_dioda} \cdot i_A$$

unde,

$$rezistenta_dioda = \begin{cases} R_D & \text{daca } dioda_functioneaza_in_curent_continuu \\ r_D & \text{daca } dioda_functioneaza_in_regim_variabil_semnal_mare \end{cases}$$

- **R_D** : rezistența de curent continuu a diodei
- **r_D** : rezistența în regim variabil de semnal mare a diodei

Circuitul echivalent care modelează comportamentul descris de relația de mai sus este compus dintr-o sursă de tensiune care generează o tensiune electrică de valoare V_D , conectată cu borna pozitivă spre anod și cea negativă spre catod, înseriată cu rezistența diodei semiconductoare.

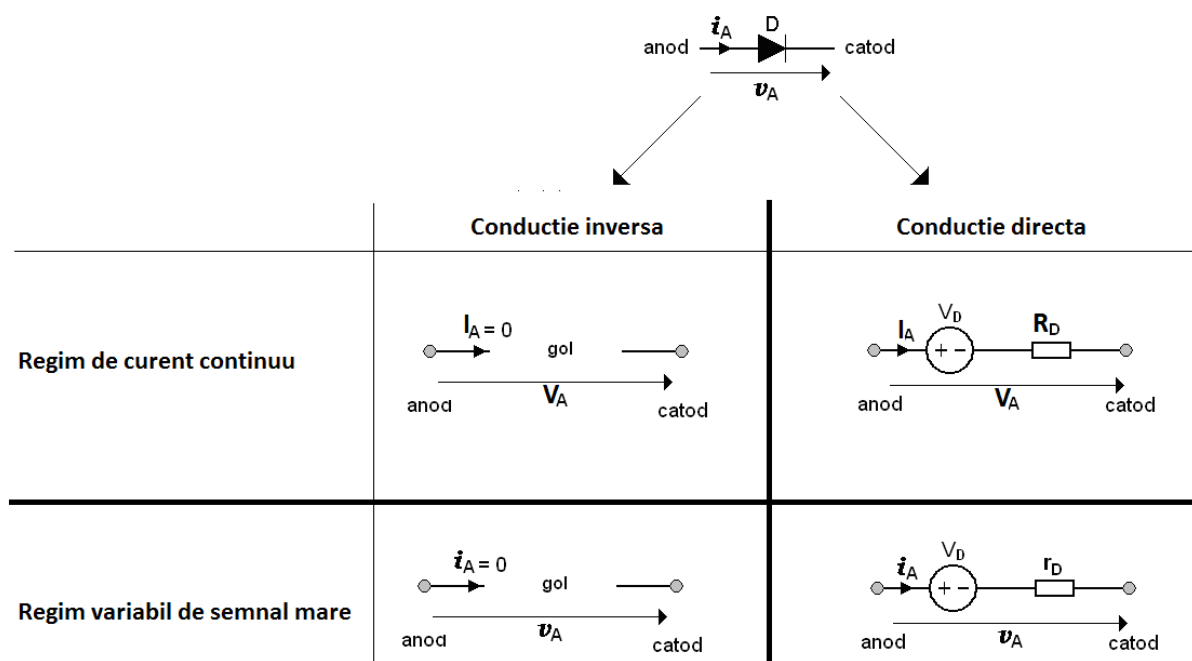


Figura 2. Circuitul echivalent al modelului liniar pe porțiuni:
în regim de curent continuu
în regim variabil de semnal mare

Pe baza celor descrise mai sus, circuitele echivalente ale modelului liniar pe porțiuni al diodei semiconductoare, în funcție de regimul de funcționare și de regiunea de funcționare ale diodei, sunt prezentate în Figura 2; pe linia 1 sunt prezentate circuitele echivalente ale diodei în regim de curent continuu, pentru conducție inversă, respectiv directă, iar pe linia doi, sunt prezentate circuitele echivalente ale diodei în regim variabil de semn al mare pentru conducție inversă, respectiv directă.

Rezistența de curent continuu a diodei

Dioda semiconductoare funcționează în regim de curent continuu dacă valorile mărimilor electrice de terminal, curent prin diodă, respectiv tensiune pe diodă, sunt constante în timp. În acest caz, tensiunea pe diodă se notează V_A , curentul electric prin diodă se notează I_A , perechea de mărimi electrice amintite purtând denumirea de Punct Static de Funcționare.

Raportul dintre aceste mărimi electrice determină rezistența de curent continuu a diodei, notată R_D :

$$R_D = \frac{V_A - V_D}{I_A}$$

rezistența de curent continuu a diodei; $V_D = 0,6$ [V]

Rezistența de semnal mare a diodei

Dioda semiconductoare funcționează în regim de variabil de semnal mare dacă valoarea tensiunii pe diodă este caracterizată de variații de amplitudini mai mari decât **12,5[mV]**. În regim variabil, valoarea tensiunii pe diodă variază într-un domeniu de valori $\Delta v_A = [V_{AMIN}, V_{AMAX}]$, iar valoarea curentului electric variază într-un domeniu de valori $\Delta i_A = [I_{AMIN}, I_{AMAX}]$. Raportul acestor variații determină rezistența diodei în regim variabil de semnal mare, notată r_D :

$$r_D = \frac{\Delta v_A}{\Delta i_A} = \frac{V_{AMAX} - V_{AMIN}}{I_{AMAX} - I_{AMIN}}$$

rezistența de semnal mare a diodei

Relațiile indicate mai sus sunt utilizate pentru determinarea valorilor parametrilor modelelor diodei semiconductoare, indicate în Figura 2.

Neglijarea efectului introdus de către rezistența diodei

a. În cazul în care dioda semiconductoare lucrează în regim de curent continuu, dacă aceasta este conectată în **serie** cu un rezistor a cărui rezistență electrică R este mult mai mare decât valoarea rezistenței diodei, efectul acesteia se poate neglija, caz în care rezistența electrică respectivă se consideră că are valoarea zero ohmi. Un element de circuit a cărui rezistență electrică este zero ohmi se modelează într-un circuit electronic printr-un scurtcircuit.

Motivul pentru care rezistența electrică a diodei poate fi neglijată este determinat de faptul că rezistența electrică echivalentă a grupării serie diodă - rezistor poate fi aproximată cu valoarea rezistenței electrice a rezistorului R :

$$R + r_D \cong R \quad \text{daca} \quad R \gg r_D$$

Observația de mai sus este valabilă atât pentru cazul în care dioda funcționează în regim de curent continuu cât și pentru cazul în care dioda funcționează în regim variabil de semnal mare.

În ipoteza discutată mai sus (diodă înseriată cu rezistor de rezistență electrică mult mai mare decât cea a diodei), circuitul echivalent la diodei, respectiv caracteristica de funcționare a modelului liniar pe porțiuni, devin cele prezentate în Figura 3 (notațiile pot fi particularizate în funcție de regimul de funcționare a diodei).

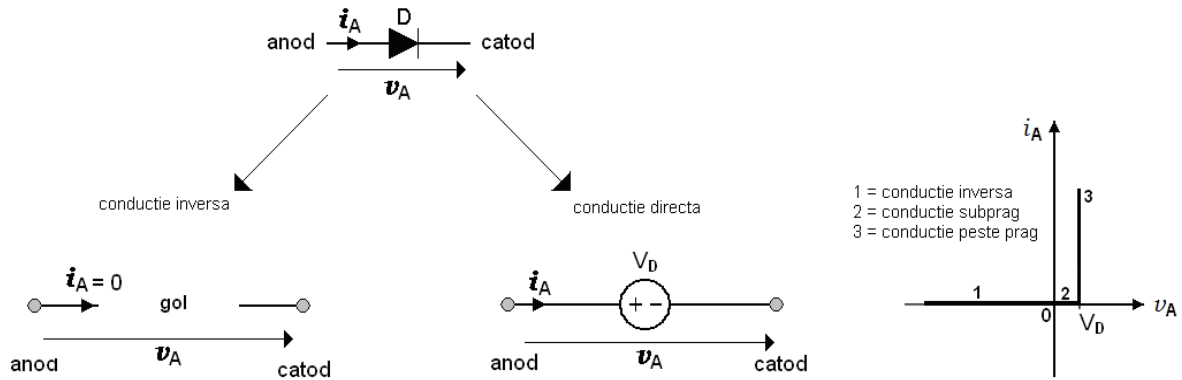


Figura 3. Circuitul echivalent ale modelului liniar pe porțiuni pentru cazul în care dioda este înseriată cu un rezistor de rezistență electrică mult mai mare decât rezistența diodei.

În regim de curent continuu, în regiunea de conducție, după atingerea tensiunii de prag, se observă din caracteristica de funcționare a diodei semiconductoare, faptul că valoarea tensiunii pe aceasta este de ordinul sutelor de milivolți (valori în jurul valorii $V_D = 600[\text{mV}]$), în timp ce valoarea curentului electric este de ordinul miliamperilor. Din acest motiv, valoarea rezistenței diodei în regim de curent continuu este, în general maxim de ordinul sutelor de ohmi. De exemplu, pentru $V_A = V_D = 600 [\text{mV}]$ și $I_A = 2[\text{mA}]$ rezultă $R_D = 300[\Omega]$.

În regim variabil de semnal mare, în regiunea de conducție, după atingerea tensiunii de prag, se observă din caracteristica de funcționare a diodei semiconductoare faptul că variația tensiunii pe aceasta este foarte mică, în timp ce valoarea curentului electric variază semnificativ, datorită dependenței exponențiale a curentului electric prin diodă în funcție de tensiunea pe diodă. Din acest motiv, valoarea rezistenței diodei în regim variabil de semnal mare este redusă, în general maxim de ordinul zecilor de ohmi. De exemplu, pentru $\Delta v_A = 100 [\text{mV}]$ și $\Delta i_A = 10[\text{mA}]$ rezultă $r_D = 10[\Omega]$.

Aceste estimări ale ordinului de mărime al rezistenței diodei permit stabilirea, în funcție de circuitul analizat, a variantei de circuit echivalent al modelului liniar pe porțiuni. Astfel, dacă rezistența electrică a rezistorului R este cel puțin de zece ori mai mare decât cea a rezistenței diodei semiconductoare, atunci este indicat să se utilizeze circuitul echivalent din Figura 3, în care rezistența electrică a diodei este neglijată.

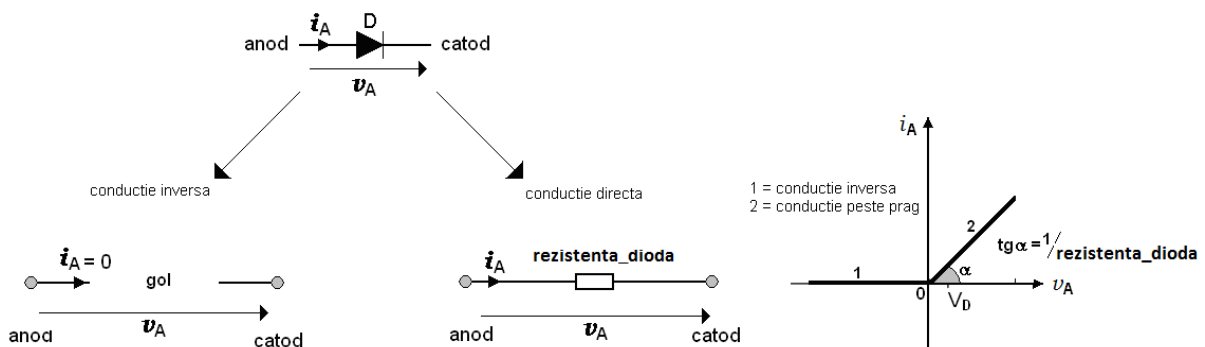


Figura 4. Circuitul echivalent ale modelului liniar pe porțiuni pentru cazul în care tensiunea în circuit este mult mai mare decât valoarea tensiunii de prag V_D .

Neglijarea efectului introdus de către tensiunea de prag V_D

În cazul în care circuitul electronic în care este utilizată dioda semiconductoră lucrează la tensiuni de valori mult mai mari decât valoarea tensiunii de prag $V_D = 600[mV]$ a diodei, atunci sursa de tensiune V_D se poate neglija în circuitul echivalent al modelului liniar pe porțiuni al diodei.

În ipoteza discutată mai sus, circuitul echivalent la diodei, respectiv caracteristica de funcționare a modelului liniar pe porțiuni, devin cele prezentate în Figura 4 (notațiile pot fi particularizate în funcție de regimul de funcționare a diodei).

Circuitul echivalent al diodei ideale

Dacă circuitul electronic în care este utilizată dioda semiconductoră lucrează la tensiuni mult mai mari decât tensiunea de prag V_D a diodei și aceasta este înseriată cu un rezistor de rezistență electrică mult mai mare decât cea a diodei, atunci, în circuitul echivalent al modelului liniar pe porțiuni se pot neglija efectele introduse atât de către sursa de tensiune V_D cât și de către rezistența diodei, ambele fiind înlocuite cu un scurtcircuit. În acest caz, circuitul echivalent la diodei, respectiv caracteristica de funcționare a modelului liniar pe porțiuni, devin cele prezentate în Figura 5 (notațiile pot fi particularizate în funcție de regimul de funcționare a diodei).

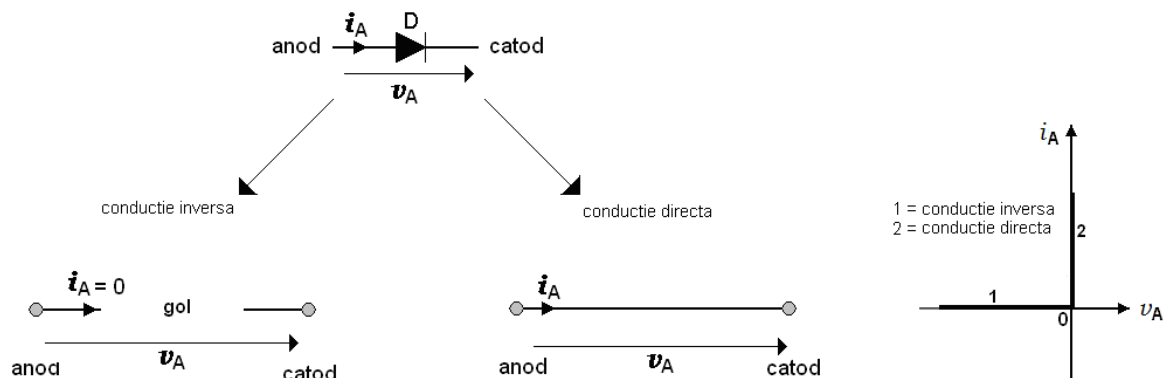


Figura 5. Circuitul echivalent ale modelului liniar pe porțiuni pentru dioda ideală.

Noul circuit echivalent astfel obținut, modelează comportamentul ideal al diodei semiconductoră și din acest motiv modelul propus se numește **modelul diodei ideale**. Conform acestui model, dioda ideală se comportă astfel:

- în regiunea de **conducție inversă**, dioda ideală se comportă ca un **gol** (nu permite trecerea curentului electric prin ea);
- în regiunea de **conducție directă**, dioda ideală se comportă ca un **scurtcircuit** (permite trecerea curentului electric prin ea și tensiunea electrică care cade între terminalele sale este nulă);

2. Modelarea diodei semiconductoră în regim variabil de semnal mic

Acest model se poate aplica numai în cazul în care dioda funcționează în regim variabil de semnal mic. O diodă semiconductoră funcționează în regim variabil de semnal mic dacă tensiunea care cade pe terminalele acesteia este caracterizată de variații a căror amplitudine este mai mică decât aproximativ $12,5[mV]$.

Dacă variația mărimilor electrice ale diodei este extrem de mică, comportamentul diodei se poate considera ca fiind **liniar** și se bazează pe aproximarea caracteristicii reale de funcționare a diodei cu tangenta la aceasta, dusă în Punctul Static de Funcționare al diodei. Tangenta respectivă reprezintă chiar conductanța electrică a diodei și este calculată conform relației de mai jos, unde I_A este curentul prin diodă calculat în Punctul Static de Funcționare

$$g_d = \frac{I_A}{V_T} \quad [g_d] = \text{Siemens} = \frac{1}{\Omega}$$

relație care este determinată pe baza definiției tangentei la graficul $i_D=f(v_D)$, calculată în Punctul Static de Funcționare (I_A , V_A):

$$g_d = \left. \frac{\partial i_A}{\partial v_A} \right|_{i_A=I_A, v_A=V_A}$$

Modelul depinde de frecvența la care lucrează dioda semiconductoră. Pentru frecvențe mai mici decât aproximativ **1[MHz]**, modelul este caracterizat de un singur parametru și anume **rezistența de semnal mic a diodei**, notată r_d , care se determină ca inversa conductanței electrice din relația de mai sus:

$$r_d = \frac{V_T}{I_A}$$

rezistența diodei în regim variabil de semnal mic

Observație: În cazul în care dioda funcționează în regiunea de **conducție inversă**, curentul continuu prin diodă $I_A = 0[A]$, iar rezistența de semnal mic a diodei este $r_d \rightarrow \infty[\Omega]$.

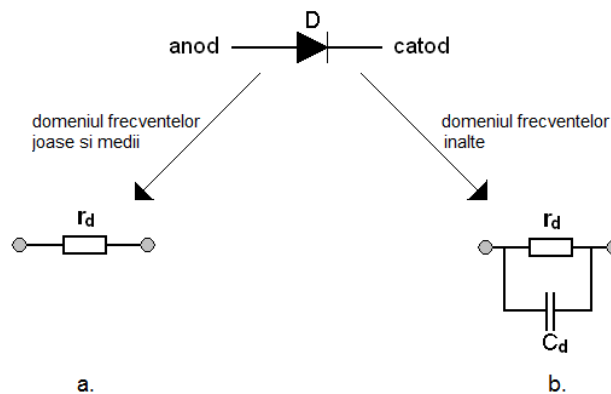


Figura 6. Circuitele echivalente ale diodei în regim variabil de semnal mic.

Circuitul echivalent care modelează comportamentul diodei în aceste condiții este prezentat în Figura 6.a. În cazul în care dioda funcționează în regiunea de conducție inversă, modelul se particularizează pentru $r_d \rightarrow \infty[\Omega]$.

Pentru frecvențe mai mari decât aproximativ **1[MHz]**, funcționarea diodei este afectată de anumite fenomene dinamice, de natură capacitivă, care pot fi modelate prin intermediul unor, așa numite “capacități parazite”, reunite în parametrul notat C_d . Circuitul echivalent care modelează comportamentul diodei semiconductoră la frecvențe de funcționare mai mari decât **1[MHz]** este prezentat în Figura 6.b.

III. Analiza funcționării circuitelor cu diode în diferite regimuri de funcționare

1. Metoda de analiză a circuitelor electronice cu diode în diferite regimuri de funcționare

Un circuit electronic în care sunt prezente atât surse de tensiune/curent continuu cât și surse de tensiune/curent variabil, funcționează atât în regim de curent continuu cât și în regim variabil.

Mărimile electrice continue (constante în timp) se determină prin analiza circuitului respectiv în regim de curent continuu, iar mărimile electrice variabile în timp (parametrii acestora, cum ar fi amplitudine și fază) se determină prin analiza circuitului în regim variabil (de semnal mare, sau de semnal mic, după cum sunt valorile variațiilor mărimilor electrice).

Analiza unui circuit electronic într-un anumit regim de funcționare se realizează pe baza unor **circuite echivalente**, care modelează funcționarea circuitului inițial în regimul de funcționare considerat; aceste circuite se deduc din circuitul inițial, pe baza unor reguli, care sunt prezentate în continuare.

a. Analiza funcționării circuitului în regim de curent continuu permite determinarea valorilor mărimilor electrice continue ale circuitului considerat:

- tensiuni continue,
- curenți continui.

Analiza respectivă (calculul mărimilor electrice) se realizează pe baza unui circuit echivalent, valabil în regim de curent continuu, determinat prin aplicarea următoarelor reguli asupra circuitului inițial:

- fiecare sursă independentă **variabilă** se pasivizează: prin pasivizare, o sursă de tensiune este înlocuită între bornele sale cu un scurtcircuit (fir), iar o sursă de curent este înlocuită între bornele sale cu un gol (circuit întrerupt);
- fiecare diodă se înlocuiește cu circuitul echivalent valabil în regim de curent continuu; circuitul utilizat se decide în funcție de regiunea în care funcționează dioda respectivă și poate fi unul din cele două circuite de pe prima linie a circuitelor din Figura 2.a și Figura 2.b (în funcție de valorile mărimilor electrice din circuit circuitele respective se pot simplifica, așa cum s-a prezentat în Figurile 3÷5).
- fiecare condensator din circuit se înlocuiește între terminalele sale cu un gol (circuit întrerupt) deoarece, în curent continuu, condensatorul are reactanța X_C infinită și din acest motiv el se comportă ca un gol; după înlocuirea condensatorului cu un gol, prin elementele de circuit conectate în serie cu condensatorul, curentul electric se anulează și din acest motiv, în final, elementele de circuit respective se elimină din circuit.
- fiecare bobină din circuit se înlocuiește între terminalele sale cu un scurtcircuit (fir) deoarece, în curent continuu bobina are reactanța X_L zero ohmi, și din acest motiv se comportă în acest caz ca un scurtcircuit; în cazul în care bobina este conectată în paralel cu un element de circuit, prin scurtcircuitarea bobinei, elementul de circuit respectiv este la rândul său scurtcircuitat.

b. Analiza funcționării circuitului în regim variabil permite determinarea valorilor mărimilor electrice variabile ale circuitului considerat:

- tensiuni variabile,
- curenți variabili.

și implicit a parametrilor acestora, amplitudine, respectiv fază, precum și a unor frecvențe caracteristice circuitului.

Analiza respectivă (calculul mărimilor electrice) se realizează pe baza unui circuit echivalent, valabil în regim variabil, determinat prin aplicarea următoarelor reguli asupra circuitului inițial:

- fiecare sursă independentă **continuă** se pasivizează: prin pasivizare, o sursă de tensiune este înlocuită între bornele sale cu un scurtcircuit (fir), iar o sursă de curent este înlocuită între bornele sale cu un gol (circuit întrerupt);
- fiecare diodă se înlocuiește cu circuitul echivalent valabil în regim variabil:
 - dacă dioda funcționează în regim variabil de semnal mare, atunci dioda se modelează în funcție de regiunea în care aceasta funcționează prin circuitele prezentate în Figura 2.c și Figura 2.d, (în funcție de valorile componentelor circuitului, circuitele respective se pot simplifica, așa cum s-a prezentat în Figurile 3÷5);
 - dacă dioda funcționează în regim variabil de semnal mic, atunci aceasta se înlocuiește între terminale prin circuitul său echivalent, valabil în regim variabil de semnal mic; pentru utilizarea acestui circuit este necesară în prealabil determinarea valorii curentului continuu prin diodă; deoarece valoarea acestui curent se determină doar în cadrul analizei în regim de curent continuu, este necesar ca analiza în regim variabil de semnal mic să fie precedată de analiza în regim de curent continuu;
- fiecare condensator din circuit, de capacitate electrică mare ($C \rightarrow \infty$), se înlocuiește între terminalele sale cu un scurtcircuit (fir) deoarece în regim variabil, condensatorul de capacitate mare are reactanța X_C zero ohmi și din acest motiv, în acest caz, condensatorul se comportă ca un scurtcircuit; în cazul în care condensatorul este conectat în paralel cu un alt element de circuit, prin scurtcircuitarea condensatorului elementul de circuit respectiv este la rândul său scurtcircuitat.
- fiecare bobină din circuit, de inductanță magnetică mare ($L \rightarrow \infty$), se înlocuiește între terminalele sale cu un gol (circuit întrerupt) deoarece, în regim variabil, bobina de inductanță magnetică mare are reactanța X_L infinită și din acest motiv ea se comportă ca un gol; după înlocuirea bobinei cu un gol, prin elementele de circuit conectate în serie cu bobina respectivă curentul electric se anulează, și din acest motiv, în final elementele de circuit respective se elimină la rândul lor din circuit.

3. Utilizarea circuitelor echivalente ale diodei

a. Utilizarea circuitului echivalent al diodei în regim de curent continuu

Un circuit electronic funcționează în regim de curent continuu dacă în structura sa există surse de tensiune continuă și/sau surse de curent continuu. În cazul în care dioda face parte din structura unui astfel de circuit, atunci aceasta funcționează în regim de curent continuu, iar comportamentul acesteia este modelat pe baza circuitului prezentat în Figura 2.a sau Figura 2.b, în funcție de regiunea în care funcționează dioda respectivă.

Regiunea de funcționare a diodei se decide în funcție de terminalul acesteia, pe care se aplică potențialul electric superior. Astfel, dacă potențialul electric superior se aplică pe anodul diodei, aceasta funcționează în regiunea de conducție directă și în acest caz, comportamentul diodei este descris cu ajutorul circuitului echivalent din Figura 2.b.

Dacă potențialul electric superior se aplică pe catodul diodei, aceasta funcționează în regiunea de conducție inversă și în acest caz, comportamentul diodei este descris cu ajutorul circuitului echivalent din Figura 2.a.

În Figura 7 se reamintește circuitul elementar de polarizare al diodei semiconductoare.

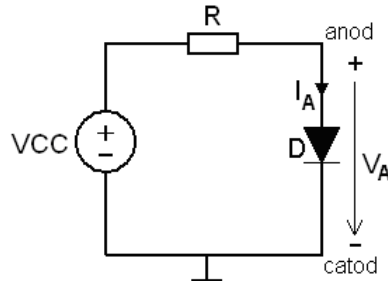


Figura 7. Circuitul de polarizare al diodei semiconductoare.

Determinarea PSFului diodei pe baza sistemului de ecuații compus din ecuația de funcționare a diodei și ecuația circuitului (TK2 pe bucla de circuit) este dificilă și necesită apelarea la metode numerice. Mult mai simplă este determinarea valorii PSFului diodei dacă aceasta este înlocuită cu circuitul echivalent al modelului liniar pe porțiuni.

În acest sens, se observă că borna negativă a sursei de alimentare **VCC** se aplică direct pe catodul diodei, iar borna pozitivă a sursei de alimentare **VCC** se aplică pe anodul diodei, prin intermediul rezistorului **R**. În aceste condiții, potențialul electric aplicat pe anod are o valoare mai mare decât cel aplicat pe catod și în consecință dioda funcționează în regiunea de conducție directă. Pe baza acestei constatări, dioda semiconductoare **D** se poate înlocui în circuitul de polarizare cu circuitul echivalent din Figura 2.b. În aceste condiții, circuitul de polarizare din Figura 7 devine cel prezentat în Figura 8.

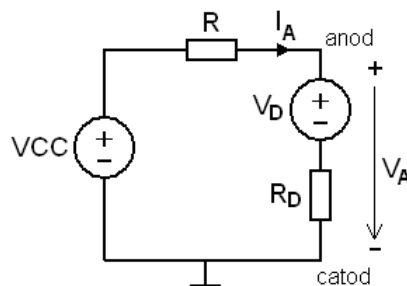


Figura 8. Circuitul de calcul al PSF-ului diodei D.

Circuitul din Figura 8 este un circuit liniar (este compus numai din elemente liniare de circuit) și din acest motiv este mult mai ușor de analizat. Cunoscând parametrii circuitului echivalent al diodei (**V_D** și **R_D**), curentul electric prin diodă în Punctul Static de Funcționare se poate determina foarte ușor, aplicând TK2 pe bucla formată de către circuit. În continuare, dacă în circuit, valoarea rezistenței electrice **R** este mult mai mare decât valoarea rezistenței **R_D**, circuitul din Figura 8 se poate simplifica prin utilizarea pentru diodă a circuitului echivalent prezentat în Figura 3, valabil pentru regimul de conducție directă.

b. Utilizarea circuitului echivalent în regim variabil de semnal mare

Un circuit electronic funcționează în regim variabil dacă în structura sa există surse de tensiune variabilă și/sau surse de curent variabil. Circuitul respectiv funcționează în regim variabil de semnal mare, dacă mărimile sale electrice sunt caracterizate de variații mari. În

cazul diodei semiconductoare, așa cum s-a precizat, aceasta funcționează în regim variabil de semnal mare dacă amplitudinea variației tensiunii pe diodă este mai mare decât **12,5[mV]**.

Modul în care este utilizat circuitul echivalent al modelului liniar pe porțiuni în acest regim de funcționare este prezentat pe un circuit care reprezintă una din principalele tipuri de aplicații ale diodei, denumit redresor monofazat de tensiune.

Redresoarele de tensiune sunt circuite utilizate în sursele de alimentare ale sistemelor electronice. Redresorul de tensiune realizează conversia energiei de curent alternativ în energie de curent continuu. Există 2 tipuri de redresoare monofazate și anume:

- redresoare monoalternanță
- redresoare bialternanță

Ca exemplu, în discuția care urmează se consideră cazul redresorului monofazat monoalternanță. Schema electronică a acestuia este prezentată în Figura 9, unde **D** reprezintă o diodă semiconductoare specială, denumită diodă redresoare, iar rezistorul **R_L** se numește sarcina redresorului. La intrarea redresorului de tensiune se aplică o tensiune sinusoidală **v_i(t)** de amplitudine mare (de ordinul zecilor de volți), a cărei componentă medie este nulă (variația tensiunii de intrare este axată pe zero volți).

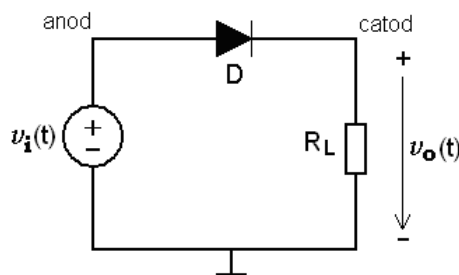


Figura 9. Schema redresorului monofazat monoalternanță.

Funcționarea redresorului de tensiune depinde de alternanța tensiunii sinusoidale de intrare **v_i(t)**. Determinarea tensiunii de ieșire **v_o(t)** se efectuează pe 2 circuite echivalente diferite, care depind de alternanța tensiunii de intrare **v_i(t)**.

În alternanța pozitivă, când **v_i(t) > 0[V]**, pe anodul diodei se aplică un potențial electric mai mare decât cel aplicat pe catodul diodei, iar aceasta funcționează în regiunea de conducție directă și poate fi înlocuită cu modelul prezentat în Figura 2.d.

În alternanța negativă, când **v_i(t) < 0[V]**, deoarece **v_i** își schimbă în această alternanță polaritatea, pe anodul diodei se aplică un potențial electric mai mic decât cel aplicat pe catodul diodei, iar aceasta funcționează în regiunea de conducție inversă și poate fi înlocuită cu modelul prezentat în Figura 2.c. Ținând cont de acestea, comportamentul redresorului de tensiune din Figura 9 poate fi modelat, în cele 2 alternanțe ale tensiunii de intrare **v_i**, prin intermediul celor 2 circuite echivalente din Figura 10.

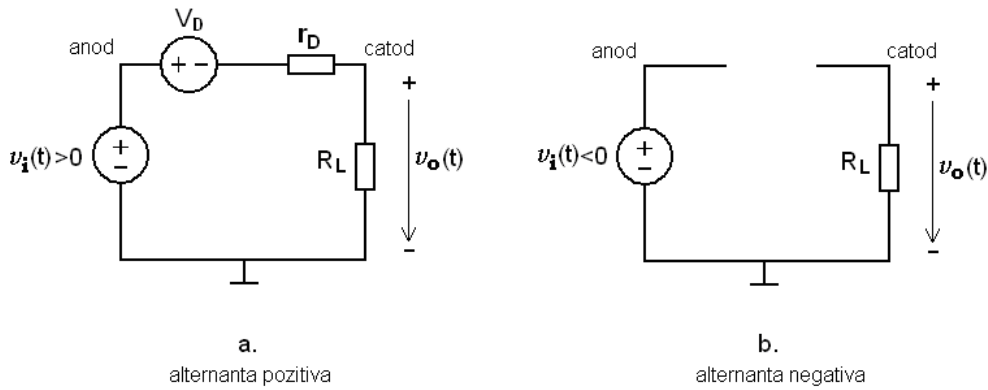


Figura 10. Modelarea comportamentului redresorului de tensiune pe baza circuitelor echivalente:
a. modelarea în alternanța pozitivă a lui v_i ; b. modelarea în alternanța negativă a lui v_i .

În continuare, deoarece amplitudinea tensiunii de intrare este mult mai mare decât valoarea tensiunii de prag a diodei ($V_D \cong 0,6[V]$), sursa de tensiune V_D se poate neglija din circuitul echivalent. Totodată, deoarece, în general, valoarea rezistenței R_L este mult mai mare decât valoarea rezistenței echivalente a diodei r_D , și aceasta din urmă se poate neglija în circuitul echivalent. Cu aceste simplificări, comportamentul redresorului de tensiune din Figura 9 poate fi modelat în cele 2 alternanțe ale tensiunii de intrare v_i prin intermediul celor 2 circuite echivalente din Figura 11, în care s-a utilizat pentru diodă modelul ideal.

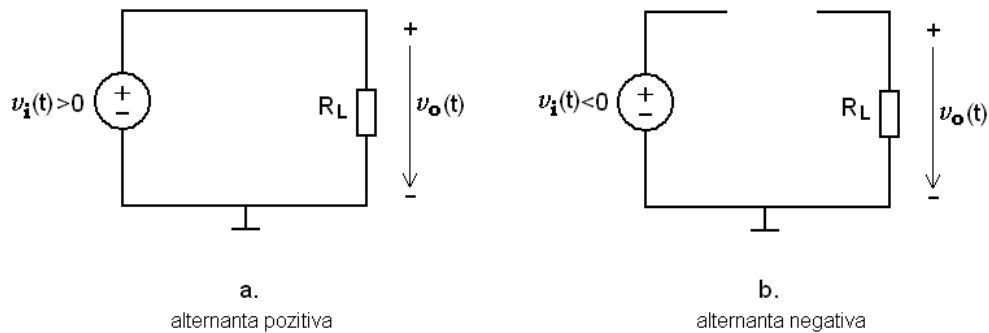


Figura 11. Circuitele echivalente care modelează comportamentul redresorului în funcție de alternanța tensiunii de intrare $v_i(t)$.

Pe baza circuitelor echivalente din Figura 11, se poate determina ecuația care descrie comportamentul redresorului de tensiune monoalternanță. Astfel, valoarea tensiunii de ieșire v_o a redresorului monoalternanță este descrisă de relația:

$$v_o(t) = \begin{cases} v_i(t) & \text{daca } v_i(t) > 0 \\ 0 & \text{daca } v_i(t) \leq 0 \end{cases}$$

Pe baza acestei ecuații, forma de undă a tensiunii de ieșire a redresorului rezultă conform celei prezentate în Figura 12.

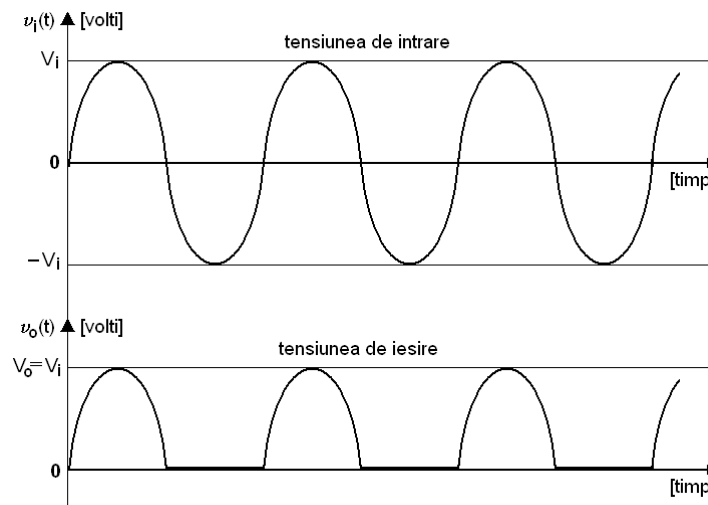


Figura 12. Formele de undă ale tensiunilor redresorului.

c. Utilizarea circuitului echivalent al diodei în regim variabil de semnal mic

Un circuit electronic funcționează în regim variabil dacă în structura sa există surse de tensiune variabilă și/sau surse de curent variabil. Circuitul respectiv funcționează în regim variabil de semnal mic, dacă mărimile sale electrice sunt caracterizate de variații foarte mici. În cazul diodei semiconductoare, așa cum s-a precizat, aceasta funcționează în regim variabil de semnal mic dacă amplitudinea variației tensiunii pe diodă este mai mică sau egală cu **12,5[mV]**.

În aceste condiții, modelarea comportamentului diodei semiconductoare în regim variabil de semnal mic se realizează pe baza circuitelor echivalente prezentate în Figura 6. Deoarece, în circuitul echivalent, se utilizează rezistența de semnal mic r_a a diodei a cărei valoare depinde, conform formulei de calcul, de valoarea curentului prin diodă I_A , determinat în Punctul Static de Funcționare al acesteia, pentru utilizarea circuitelor echivalente din Figura 6 este necesar ca, înainte de utilizarea acestora, să se determine valoarea curentului I_A .

Determinarea curentului prin diodă I_A , calculat în Punctul Static de Funcționare al acesteia, se realizează efectuând analiza circuitului în curent continuu (deoarece I_A este un curent continuu). Analiza circuitului în regim de curent continuu se realizează pe baza unui circuit echivalent, denumit **circuitul echivalent în curent continuu**, care modelează comportamentul acestuia doar în regim de curent continuu. Circuitul echivalent în curent continuu se obține ținând cont de regulile prezentate în paragraful anterior. Abia după calculul valorii curentului continuu prin diodă I_A se poate trece la calculul rezistenței diodei de semnal mic, r_a și ulterior, la analiza comportamentului circuitului în regim variabil de semnal mic.

Analiza circuitului în regim variabil de semnal mic se realizează pe un nou circuit echivalent, denumit **circuitul echivalent de semnal mic**, care modelează comportamentul acestuia doar în regim variabil de semnal mic, obținut pe baza regulilor enunțate anterior.