

3. REDRESOARE

3.1. Probleme generale

Redresoarele sunt circuite care transforma energia unei surse de curent alternativ in energie de curent continuu. Pe scurt un redresor face transformarea alternativ – continuu.

3.1.1. Clasificarea redresoarelor

Redresoarele se clasifica dupa numeroase criterii , cele mai importante fiind numarul de faze, tipul schemei, posibilitatea reglarii tensiunii de iesire.

Dupa numarul de faze al sursei, care este de obicei reseaua electrica, redresoarele se clasifica in:

- redresoare monofazate
- redresoare trifazate

Dupa tipul de schema:

- redresoare monoventil (doar pentru reseaua monofazata)
- redresoare cu punct median
- redresoare in punte

Dupa posibilitatea reglarii tensiunii de iesire:

- redresoare necomandate
- redresoare comandate

Un redresor particular corespunde fiecarui criteriu de clasificare astfel ca denumirea sa completa are obisnuit mai multi termeni, cate unul din fiecare clasa de criterii. De exemplu: redresor trifazat, comandat, cu punct median.

3.1.2. Schema bloc a unui redresor

Un redresor este compus in cazul general din trei parti (figura 3.1) si anume:

1. Transformator (TR)
2. Bloc redresor (R)
3. Filtru (F)

Acestora li se adauga sursa de energie electrica alternativa si sarcina care trebuie alimentata cu energie electrica de curent continuu

Fluxul de energie parcurge redresorul de la intrare, unde este conectata sursa de tensiune alternativa si dupa redresare ajunge la sarcina (consumator) care poate fi pur rezistiva dar in multe situatii are si o componenta inductiva.

In cazuri particulare pot lipsi atat transformatorul cat si filtrul. In figura 3.1 sunt prezentate si formele tensiunilor in principalele puncte ale unui redresor.

Sursa este de obicei reseaua si are tensiunea u_s sinusoidala dar poate fi de asemenea un generator independent sau un inverter iar tensiunea poate fi de alta forma.

Transformatorul are un rol multiplu. In primul rand el modifica, atunci cand este necesar, valoarea tensiunii sursei. Aceasta este de obicei fixa, ca in cazul retelei de

monofazate, 220 volti. Transformatorul poate mari sau poate micsora tensiunea sursei, in cazul din figura 3.1 este micsorata. Forma tensiunii dupa redresor (u_{tr}) ramine aceeaasi. In al doilea rand transformatorul realizeaza o separare galvanica intre sursa si sarcina. Nu exista legatura directa de la sarcina la retea si eventualul utilizator este protejat de un contact direct cu retea. In fine, pentru unele variante de scheme transformatorul este obligatoriu si furnizeaza un anumit sistem de tensiuni.

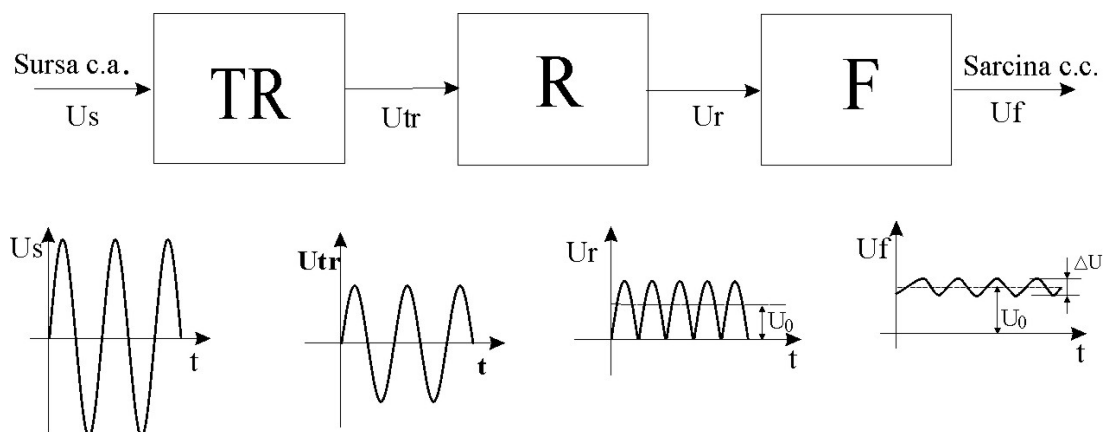


Fig. 3.1 Schema bloc a unui redresor

Blocul redresor este compus din elemente redresoare necomandate (diode), semicomandate (tiristoare) sau comandate (GTO, tranzistoare), are scheme diverse si realizeaza transformarea tensiunii alternative intr-o tensiune pulsatorie, u_r cu o componenta continua (U_{0r}) diferita de zero.

Filtrul face o netezire a formei pulsatorii a tensiunii redresate pe care o aduce la o forma apropiata de aceea a tensiunii continue, u_f . Intotdeauna insa tensiunea pe sarcina va avea o variatie varf la varf diferita de zero (Δu) care insa poate fi micsorata sub o anumita limita utilizand filtre mai bune (si desigur mai scumpe).

In continuare se vor prezenta principalele tipuri de redresoare. La inceput redresoarele monofazate si trifazate (necomandate si fara filtru) iar apoi cele comandate. La final sunt prezentate filtrele.

3.1.2 Redresoare monofazate

Redresoarele monofazate au ca sursa retea monofazata sau eventual un generator sau inverter monofazat. Exista trei tipuri de redresoare monofazate:

- redresor mono-ventil sau mono-alternanta;
- redresor dubla alternanta cu punct median;
- redresor in punte.

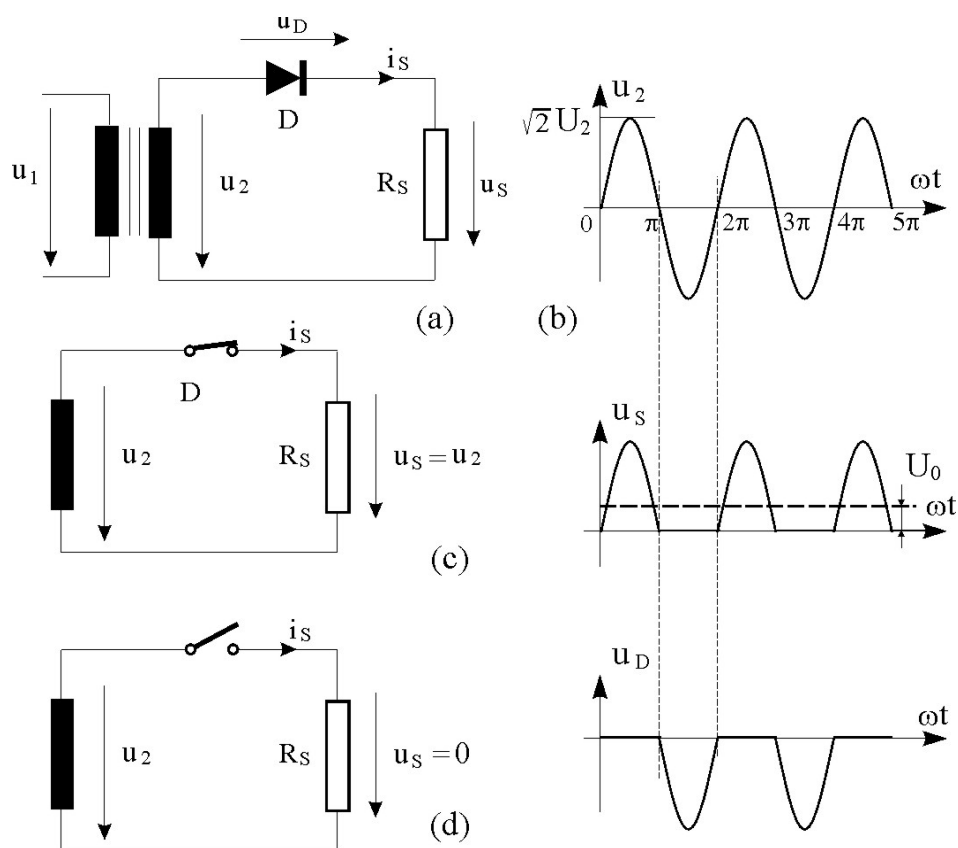


Fig.3.2 Redresor monofazat monoalternanta: schema (a); forma tensiunilor (b); schema echivalenta in semiperioada pozitiva a tensiunii de intrare (c); schema echivalenta in semiperioada negativa a tensiunii de intrare (d).

Redresor monoalternanta

Redresorul mono-alternanta este cel mai simplu redresor. Blocul redresor contine un singur element redresor, o dioda. Schema, forma tensiunilor si schemele echivalente in semiperioadele distincte de functionare sunt prezentate in figura 3.2. Desi este prezent si transformatorul, acesta poate lipsi.

In figura 3.2.a sunt marcate semnele tensiunii din secundarul transformatorului in cele doua semiperioade ale acesteia, o prima semiperioada, intre $0-\pi$, in care tensiunea este pozitiva si o a doua semiperioada, $\pi-2\pi$, in care tensiunea este negativa. Semnul tensiunii va decide starea diodei si, corespunzator, schema sa echivalenta. Vom lua in considerare cea mai simpla schema echivalenta pentru dioda, in care dioda este inlocuita cu un contact, facut pentru polarizare directa, desfacut pentru polarizare inversa.

In prima semiperioada dioda este polarizata direct (plusul tensiunii la anod) si schema echivalenta este aceea din figura 3.2.c. Tensiunea redresata este egala cu tensiunea din secundar. Tensiunea pe dioda este zero. In a doua semiperioada dioda este polarizata invers (minusul tensiunii la anod) si schema echivalenta este aceea din

figura 3.2.d. Tensiunea redresata este egala cu zero. Tensiunea pe dioda este tensiunea din secundar.

Tensiunea redresata corespunde doar alternantelor pozitive ale tensiunii sursei de unde numele de redresor monoalternanta. Valoarea medie U_0 a acesteia, care se calculeaza cu formula valorii medii a unei marimi periodice (xx) este pozitiva si are valoarea:

$$U_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_s d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} U_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{2} U_2}{\pi} \quad (3.1)$$

Analog rezulta si valoarea medie a curentului:

$$I_0 = \frac{\sqrt{2} U_2}{\pi R_s} \quad (3.2)$$

Un calcul simplu conduce la evaluarea randamentului redresorului si implicit a calitatii sale.

Puterea utila (de curent continuu) in sarcina este:

$$P_u = I_0 U_0 = \frac{2 U_2^2}{\pi R_s} \quad (3.3)$$

iar puterea totala absorbita de la sursa:

$$P_a = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_2 i_s d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \frac{2 U_2^2}{R_s} \int_0^{\pi} \sin^2(\omega t) d(\omega t) = \frac{U_2^2}{2 R_s} \quad (3.4)$$

Rezulta ca randamentul redresorului monoalternanta este:

$$\eta \cong 0,4 \quad (3.5)$$

Randamentul scazut este unul dintre dezavantajele acestui redresor. Un al doilea dezavantaj este incarcarea nesimetrica a retelei, puterea fiind absorbita doar in timpul unei singure semialternante. Redresorul monoalternanta este insa destul de folosit la puteri mici deoarece este cel mai simplu si cel mai ieftin.

Redresor dubla alternanta cu punct median

Redresorul dubla alternanta cu punct median are schema, forma tensiunilor si schemele echivalente in semiperioadele distincte de functionare prezentate in figura 3.4.

In cazul acestui tip de redresor transformatorul este necesar si trebuie sa aiba un secundar cu doua infasurari inseriate, care au acelasi numar de spire, cu un punct median intre ele, astfel ca sa furnizeze blocului redresor compus din doua diode doua tensiuni identice, u_2 . Ansamblul poate fi privit si ca doua redresoare monoalternanta legate la aceeasi sarcina, in cazul acesta rezistenta R_s .

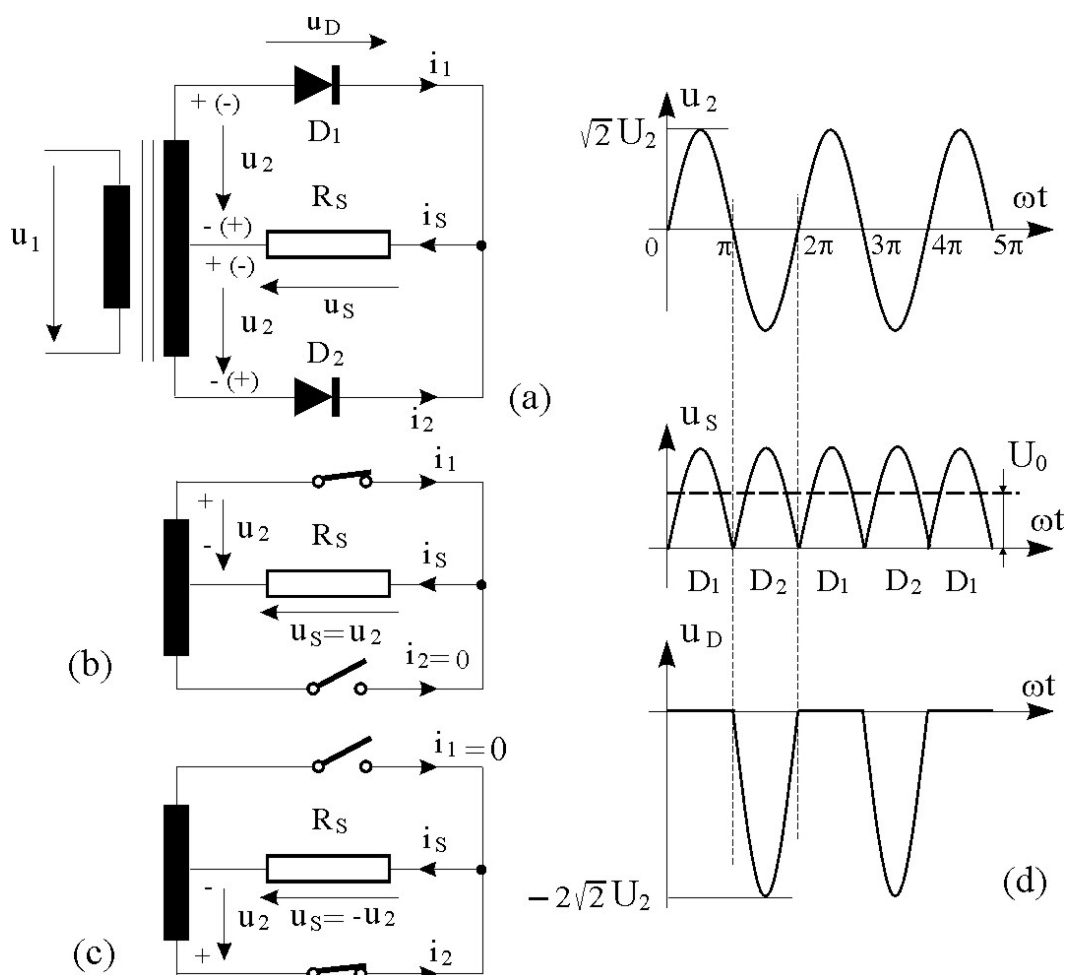


Fig. 3.4 Redresor dubla alternanta cu punct median: schema (a); forma tensiunilor (b); schema echivalenta in semiperioada pozitiva a tensiunii de intrare (c); schema echivalenta in semiperioada negativa a tensiunii de intrare (d).

In prima semiperioada cele doua diode sunt polarizate astfel: D_1 direct, plusul tensiunii transformatorului la anod, iar D_2 invers. Schema echivalenta este aceea din figura 3.4.b (D_1 scurtcircuit, D_2 intrerupta) si tensiunea pe sarcina este egala cu u_2 , adica o semialternanta pozitiva.

In a doua semiperioada cele doua diode sunt polarizate astfel: D_1 invers, minusul tensiunii transformatorului la anod, iar D_2 direct. Schema echivalenta este aceea din figura 3.4.c (D_1 intrerupta, D_2 scurtcircuit) si tensiunea pe sarcina este egala cu minus u_2 (negativa in acest semiinterval), adica din nou o semialternanta pozitiva. Se obtine in acest fel o redresare dubla alternanta. Valoarea medie U_0 a acesteia este pozitiva in acest caz si are valoarea:

$$U_0 = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \quad (3.6)$$

Acesta este avantajul schemei, valoarea medie dubla fata de redresarea monoalternanta si deci o eficacitate dubla a redresarii.

Dezavantajele sunt: utilizarea a doua diode, necesitatea unui transformator special ceea ce maresta mult pretul de cost dar si faptul ca o dioda suporta in polarizare inversa o tensiune maxima de doua ori mai mare decat valoarea maxima a u_2 .

Redresor dubla alternanta in punte

Redresorul dubla alternanta in punte are schema, forma tensiunilor si schemele echivalente in semiperioadele distincte de functionare prezentate in figura 3.5. In cazul acestui tip de redresor, asa cum este de altfel prezentat, transformatorul poate lipsi.

Blocul redresor este format din 4 diode legate in punte (formand un patrulater) intr-o anumita succesiune a terminalelor. La una din diagonalele puntii se conecteaza sursa de tensiune alternativa sau secundarul transformatorului daca acesta exista, iar la a doua diagonala se conecteaza sarcina R, in cazul acesta.

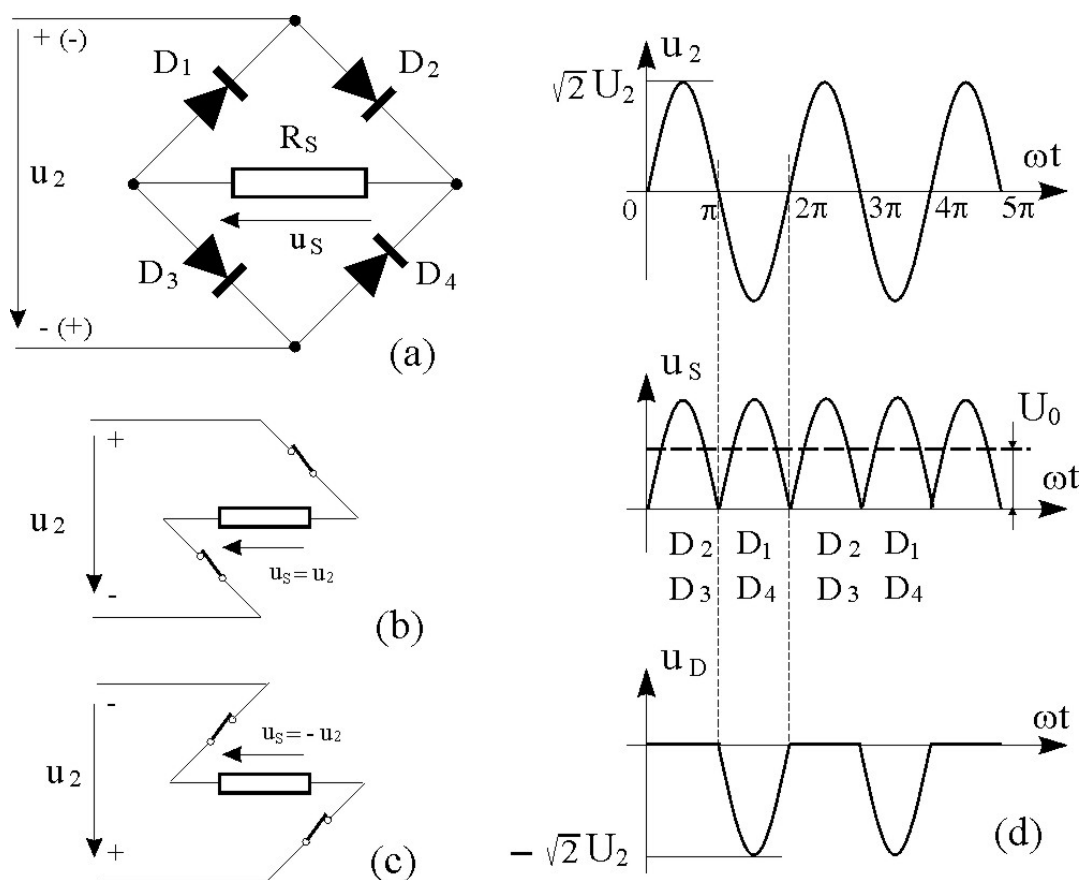


Fig. 3.5. Redresor dubla alternanta in punte: schema (a); schema echivalenta in semiperioada pozitiva a tensiunii de intrare (b); schema echivalenta in semiperioada negativa a tensiunii de intrare (c); forma tensiunilor (d).

In prima semiperioada sunt polarizate direct diodele D_2 si D_3 si sunt polarizate invers diodele D_1 si D_4 . Schema echivalenta este aceea din figura 3.5.b (D_2, D_3 scurtcircuit, D_1, D_4 intrerupte) si tensiunea pe sarcina este egala cu u_2 , adica o semialternanta pozitiva.

În a doua semiperioadă sunt polarizate invers diodele D_2 și D_3 și sunt polarizate direct diodele D_1 și D_4 . Schema echivalentă este aceea din figura 3.5.c (D_2 , D_3 întrerupte, D_1 , D_4 scurtcircuit) și tensiunea pe sarcină este egală cu minus u_2 (negativă în acest semiinterval), adică din nou o semialternanță pozitivă. Se obține în acest fel o redresare dublă alternantă la fel ca în cazul anterior.

Avantajul schemei, valoarea medie dublă față de redresarea monoalternantă și deci o eficiență dublă a redresării dar și faptul că este nevoie de o singură sursă de tensiune. În plus, diodele suportă în polarizare inversă o tensiune maximă egală cu valoarea maximă a u_2 .

Dezavantajele sunt: utilizarea a patru diode, adică un pret mai mare și pierderi duble de energie pe diode față de cazul anterior.

3.1.3 Redresoare monofazate reale

Până acum s-au prezentat redresoarele pentru cazul ideal și s-au presupus ideale atât transformatorul cât și diodele. Asta înseamnă că transformatorul a fost considerat o sursă de tensiune cu rezistență internă zero iar diodele ca niște comutatoare, cu rezistență zero în conducție (polarizare directă) și infinită când este blocată (polarizare inversă).

Se va analiza aici situația redresorului monofazat monoalternant în care sunt eliminate, pe rând, presupunerile simplificatoare. Se vor lua în considerare tensiunea de deschidere a diodelor, rezistența echivalentă a transformatorului (sursei) și în final și rezistența dinamică a diodelor.

Efectul tensiunii de deschidere a diodei

Se va considera doar tensiunea de deschidere, U_D ($\sim 0,7$ V). Dioda conduce doar după ce tensiunea sursei depășește U_D , iar pe dioda va exista o cădere de tensiune egală cu U_D pe tot intervalul de conducție:

$$u_0 = u_{sec} - U_D \quad (3.7)$$

În acest caz există o întârziere la deschiderea diodei față de punctul în care tensiunea sursei devine pozitivă ($t=0$ în figura 3.6). Tensiunea pe sarcină este mai mică decât aceea a sursei, iar unghiul semialternantei este mai mic decât π . S-a notat α unghiul de întârziere.

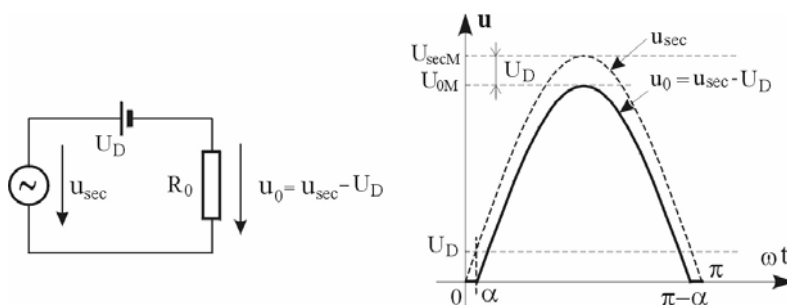


Fig. 3.6. Schema echivalentă a redresorului și forma tensiunilor când se ia în considerare tensiunea de deschidere a diodei.

Observatie: În cazul redresorului în punte, fiind două diode pe calea de curent, (figura 3.5) U_D va avea o valoare dubla ($\sim 1,4$ V)

Efectul rezistenței interne a sursei

Pe lângă tensiunea de deschidere a diodei se va considera transformatorul real, echivalat, în secundar, cu o sursă ideală, U_{sec} , plus o rezistență echivalentă în secundar, R_{tr} , dată de relația:

$$R_{tr} = R_{sec} + \left(\frac{n_{sec}}{n_{pr}} \right)^2 R_{pr} \quad (3.8)$$

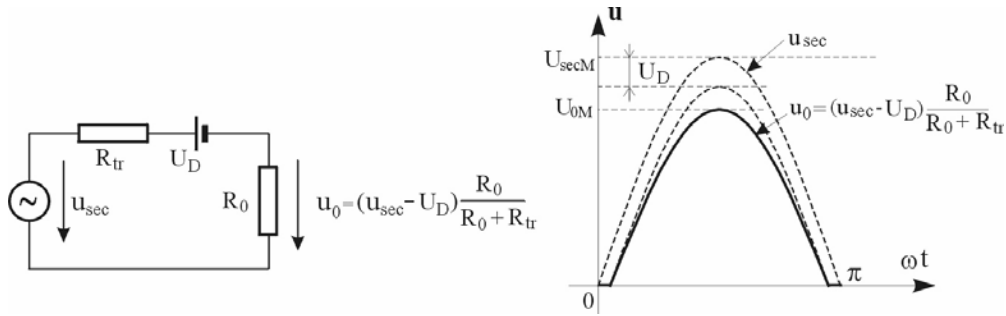


Fig. 3.7. Schema echivalentă a redresorului și forma tensiunilor dacă și transformatorul este real.

unde n_{pr} , n_{sec} sunt numărul de spire al primarului și secundarului iar R_{pr} , R_{sec} sunt rezistențele înfășurărilor primară și secundară. Dioda este considerată în continuare ideală.

Schema echivalentă a redresorului, unde R_0 , U_0 sunt rezistența de sarcină și tensiunea de ieșire a redresorului, cât și forma tensiunilor sunt prezentate în figura 3.7.

Rezistența sursei (în cazul de aici a transformatorului) conduce la micsorarea tensiunii pe sarcina conform formulei divizorului de tensiune:

$$U_0 = \frac{R_0}{R_0 + R_{tr}} (U_{sec} - U_D) \quad (3.9)$$

Efectul rezistenței dinamice a diodei

Dacă pentru dioda se consideră și rezistența dinamică, R_d , atunci se adaugă la schema echivalentă din figura 3.7 această rezistență, în serie cu aceea a transformatorului și rezultă o micșorare suplimentară a tensiunii de ieșire (figura 3.8):

$$U_0 = \frac{R_0}{R_0 + R_{tr} + R_d} (U_{sec} - U_D) \quad (3.10)$$

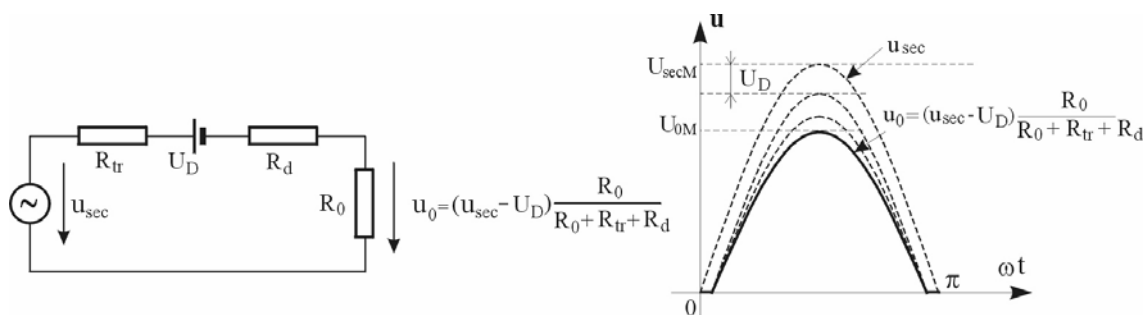


Fig. 3.8. Schema echivalentă a redresorului și forma tensiunilor dacă dioda are și rezistența dinamică.

3.1.4 Filtre

După cum s-a observat în cazul sarcinii rezistive, tensiunea sau curentul de ieșire al redresoarelor are variații mai mari sau mai mici, în funcție de tipul redresorului, între o valoare maximă și o valoare minimă, ΔU (Fig. 3.1).

Redresoarele reale sunt urmate, în majoritatea cazurilor, de un circuit sau un element numit filtru, care micșorează variațiile tensiunii sau ale curentului de ieșire. Efectul filtrului se poate urmări pe figura 3.9, unde tensiunea filtrată, desenată cu linie continuă, are o variație mai mică, ΔU_F

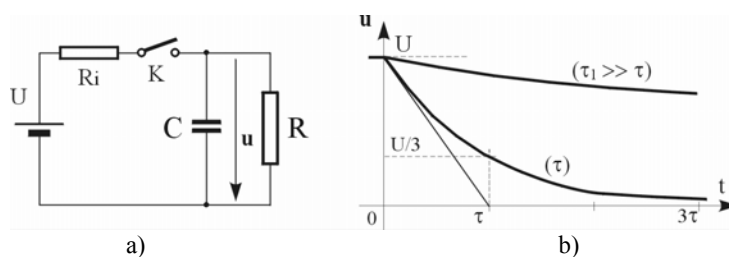


Fig. 3.10. Regim tranzitoriu de descărcare a circuitului paralel RC

Cele mai simple filtre sunt realizate dintr-un singur element, condensator în paralel cu rezistența de sarcină, filtru C, sau bobină în serie cu rezistența de sarcină, filtru L. În cazul sarcinilor RC sau RL, chiar componenta reactivă a sarcinii realizează funcția de filtrare și funcționarea redresoarelor cu sarcină RC și RL este similară cu funcționarea redresoarelor cu filtru C sau L.

Filtru C

Este cel mai simplu tip de filtru și cel mai utilizat în circuitele de curenți mici deoarece efectul de filtrare este mai accentuat la rezistențe de sarcină mari. Pentru înțelegerea funcționării se reamintește:

Regimul tranzitoriu al descărcării unui condensator pe o rezistență.

Se dă schema din figura 3.10 a, format dintr-o sursă de tensiune continuă cu rezistența ei internă, un grup paralel RC și un comutator care permite încărcarea condensatorului. Presupunem comutatorul închis pentru un interval de timp suficient de lung pentru a avea condensatorul încărcat la o tensiune egală cu tensiunea sursei, U .

La momentul zero se deschide comutatorul și circuitul paralel RC evoluează liber, condensatorul descărcându-se pe rezistență. Tensiunea u este dată de relația:

$$u(t) = U e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3.11)$$

unde:

$$\tau = RC \quad (3.12)$$

și se numește constanta de timp a circuitului RC .

Graficul variației în timp a tensiunii $u(t)$, o cădere exponențială, este prezentat în figura 3.10.b pentru două valori ale constantei de timp, τ și τ_1 , unde $\tau_1 \gg \tau$. Constanta de timp τ are o semnificație fizică fiind timpul corespunzător intersecției tangentei la curba tensiunii în momentul inițial cu axa timpului și momentul în care tensiunea pe condensator este aproximativ o treime din tensiunea inițială. După trei constante de timp se consideră condensatorul practic descărcat (aproximativ 5% din valoarea inițială)

Funcționarea filtrului C

Revenind la filtrul C, ca exemplu s-a ales redresorul monofazat monoalternanță cu filtru C. În figura 3.11. este prezentată schema și formele de undă corespunzătoare regimului permanent de funcționare (la pornire acestea fiind puțin diferite). Se vor considera transformatorul și dioda ideale.

Până la momentul t_1 tensiunea de intrare, u_{sec} , este mai mică decât tensiunea de ieșire u , aceeași cu tensiunea pe condensator și dioda este polarizată invers, blocată. Condensatorul se descarcă pe sarcina R , i_C fiind egal și de semn contrar cu i_R .

În momentul t_1 tensiunea de intrare u_{sec} devine mai mare decât tensiunea pe condensator, u (tensiunea de ieșire), dioda se polarizează direct și se deschide, iar tensiunea u va urmări variația tensiunii de intrare. Condensatorul se încarcă (panta tensiunii pe condensator se modifică brusc, de la valori negative la valori pozitive și conform relației principale între curentul și tensiunea pe un condensator:

$$i_C = C \frac{du}{dt}$$

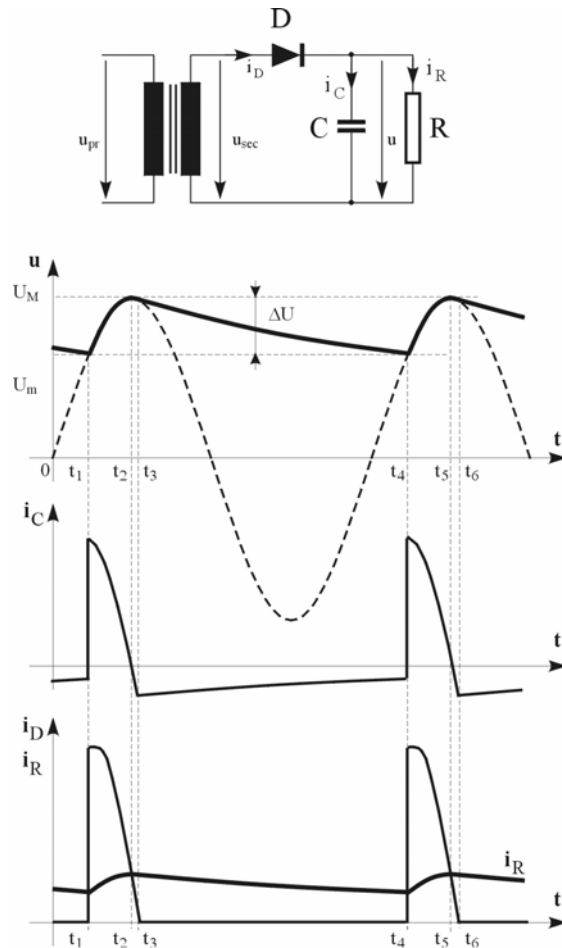


Fig. 3.11. Filtrul C și formele de undă

curentul, proporțional cu derivata tensiunii funcție de timp, adică panta funcției $u(t)$, se modifica prin salt, de la valori negative la valori pozitive). În continuare curentul prin condensator rămâne pozitiv dar se micșorează ca și panta tensiunii până în momentul t_2 de maxim al tensiunii de intrare când panta devine zero și curentul trece prin zero. În același subinterval de timp avem deasemenea un curent i_R prin R , proporțional cu u . Suma celor doi este curentul prin diodă, i_D .

Încărcarea condensatorului încetază în momentul t_2 , când tensiunea de intrare atinge maximul. Curentul prin condensator își schimbă semnul. După un interval foarte scurt de timp, în momentul t_3 , curentul prin dioda D devine zero și dioda se blochează.

Din acest moment suntem într-un caz identic cu cel prezentat mai înainte. Condensatorul se va descărca liber pe rezistența de sarcină și în intervalul t_3-t_4 tensiunea de ieșire variază conform ecuației (3.11) :

$$u = U_M e^{-t/RC},$$

unde $RC = \tau$ – constanta de timp a circuitului și $U_M \cong \sqrt{2}U$

Constanta de timp RC se alege în cazul filtrelor C mult mai mare decât perioada de repetiție a tensiunii pulsatorii (aici $T = 20$ ms, perioada rețelei). În acest caz tensiunea scade relativ lent iar valoarea minimă, U_m se obține în momentul t_4 . Acum dioda se redeschide și ciclul început în momentul t_1 reîncepe.

Calculul simplificat al variației tensiunii filtrate

Cel mai important pentru a evalua eficacitatea filtrării este să se determine variația tensiunii pe sarcină după filtrare.

În cazurile practice perioada $T \approx t_4 - t_3$ și atunci:

$$U_m = U_M e^{-\frac{T}{RC}} \quad (3.13)$$

$$\text{iar:} \quad \Delta U = U_M \left(1 - e^{-\frac{T}{RC}} \right) \quad (3.14)$$

$$\text{Dacă dezvoltăm:} \quad e^{-\frac{T}{RC}} \approx 1 + \frac{\left(-\frac{T}{RC}\right)}{1!} + \frac{\left(-\frac{T}{RC}\right)^2}{2!} + \dots \quad (3.15)$$

Ținem cont că pentru o filtrare bună trebuie îndeplinită condiția $\tau \gg T$, și atunci termenii de ordin superior pot fi neglijati. Rămâne o formulă simplă și ușor de utilizat pentru calculul condensatorului C :

$$\Delta U = U_M \frac{T}{RC} \quad (3.16)$$

În cazul redresoarelor dublă alternanță funcționarea este similară deosebirea fiind că perioada de variație a tensiunii de ieșire este de două ori mai mică, $T/2$.

Evaluarea simplificată a curentului de vârf prin diodă

Calculul unui redresor monofazat cu filtru C implică alegerea schemei redresorului, alegerea diodelor și calculul condensatorului. Alegerea schemei depinde de aplicație și de avantajele și dezavantajele tipurilor de scheme. La curenti mici, sub câteva sute de miliamperi, este avantajos redresorul monoalternanță, fiind cel mai simplu și mai ieftin. La curenti mai mari trebuie ales un redresor dublă alternanță. Soluția mai simplă este redresorul în punte dar la tensiuni mici pierderile pe diode reprezintă un dezavantaj.

Pentru alegerea diodelor trebuie să fie evaluate în primul rând:

- curentul mediu prin diodă;
- tensiunea inversă maximă;
- curentul de vârf prin diodă.

Curentul mediu prin diodă poate fi considerat aproximativ curentul mediu prin sarcină.

În ce privește tensiunea inversă maximă, față de cazul redresorului fără filtru mai trebuie adăugată tensiunea continuă de ieșire maximă, care apare la funcționarea în gol (R infinită) și care este egală cu valoarea de vârf a tensiunii din secundar.

Curentul de vârf prin diodă este de valoare mult mai mare decât curentul prin sarcină, dar circulă pe un interval de timp mic:

$$\Delta t_D = t_3 - t_1, \quad (3.17)$$

timp în care condensatorul se încarcă de la sursă. Urmează subintervalul de descărcare a condensatorului, mult mai mare, motiv pentru care poate fi aproximat cu întreaga perioadă T :

$$\Delta t = t_4 - t_3 \approx T$$

Regimul fiind permanent sarcina cu care se încarcă condensatorul este egală cu aceea care se descarcă din condensator și se poate scrie:

$$\Delta t_D I_{Dmax} = I_{Rmed} (T - \Delta t_D) \quad (3.18)$$

Unde am considerat că pe întreaga perioadă Δt_D curentul prin diodă este egal cu curentul maxim (de vârf)

Dar intervalul Δt_D îl putem deduce dacă presupunem că variația de tensiune la ieșire, ΔU este (figura 3.12, unde s-a neglijat intervalul $t_2 - t_3$)

iar $U_m = U_M \sin(\omega t_1) = U_M \cos(\pi/2 - \omega(t_3 - t_1))$:

$$\Delta U = U_M - U_m \cos(\omega \Delta t_D) \quad (3.19)$$

Unghiul fiind mic se poate aproxima cosinusul cu primii doi termeni din seria:

$$\cos x = 1 - x^2/2! + x^4/4! - \dots \quad (3.20)$$

$$\text{și atunci: } \Delta U = U_M \omega^2 (\Delta t_D)^2 / 2 \quad (3.21)$$

$$\text{Rezultă: } \Delta t_D = \omega^{-1} (2 \Delta U / U_M)^{-1/2} \quad (3.22)$$

Din (3.18), neglijând Δt_D față de T :

$$I_{Dmax} = \pi I_{Rmed} (2 \Delta U / U_M)^{-1/2} \quad (3.23)$$

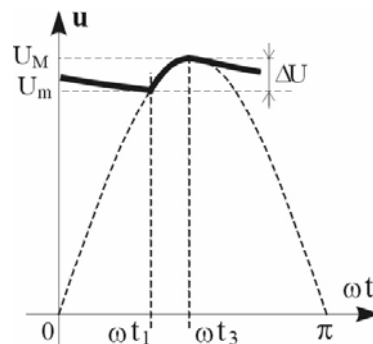


Fig. 3.12. Explicativă la calculul curentului de vârf.