

Lucrarea 7

REGIMUL DE REDRESOR ȘI INVERTOR

1. Introducere

Procesul prin care unda de tensiune alternativă a energiei electrice este transformată într-o undă de tensiune continuă sau într-o undă pulsatorie cu o componentă continuă poartă denumirea de *redresare*. Echipamentul electronic care realizează această conversie într-un proces static poartă denumirea de **redresor**.

Este foarte important să fie cunoscută natura sarcinii legate la ieșirea unui redresor. În funcție de aceasta, se va alege un anumit tip de redresor, cu o anumită structură și anumite dispozitive semiconductoare de putere. Din acest punct de vedere o informație esențială se referă necesitatea unui schimb energetic într-un singur sens sau în ambele sensuri între redresor și sarcină. Pornind de la acest criteriu se pot evidenția următoarele tipuri de sarcini:

- **Sarcini pasive** – caracterizate exclusiv de o putere electrică pozitivă având semnificația unei puteri consumate;
- **Sarcini active** – caracterizate, atât de o putere pozitivă, cât și de o putere negativă ce are semnificația unei puteri cedate. Fenomenul este posibil dacă sarcinile posedă surse proprii de energie.

Pentru a pune în evidență sensul de circulație al puterii electrice între redresor și sarcină trebuie operat cu sistemul de axe (*planul electric*) al variabilelor din partea de c.c. a redresorului, tensiunea U_d și curentul I_d – vezi Fig.7.1.

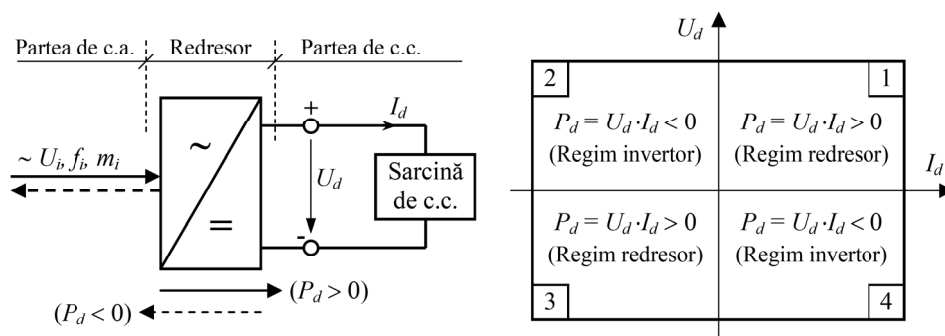


Fig. 7.1 Sistemul de axe $U_d - I_d$ (planul electric) din partea de c.c. a unui redresor și sensul de circulație a puterii P_d .

Deoarece tensiunea U_d și curentul I_d sunt variabile continue se poate vorbi de valori pozitive și negative ale acestora, deci se poate vorbi de cele 4 cadrane ale planului electric $U_d - I_d$ unde este pusă în evidență puterea electrică în c.c. de la ieșirea convertorului: $P_d = U_d \cdot I_d$.

Dacă sarcina conectată la ieșirea unui convertor electronic de putere consumă o putere electrică, convertorul are rolul unei surse. Conform convenției de semne, atunci când sursele își îndeplinesc rolul, furnizând energie, sunt caracterizate de o putere pozitivă. În Fig.7.1, pentru o putere pozitivă ($P_d > 0$) convertorul face o conversie alternativ-continuu și funcționează în **regim de redresor**. Acest regim poate fi obținut în cadranul 1 atunci când tensiunea U_d și curentul I_d sunt pozitive, respectiv în cadranul 3 atunci când ambele variabile sunt negative.

Dacă la redresor este conectată o sarcină activă aflată în situația de a ceda energie și redresorul are capacitatea de a o recupera transferând-o în sens invers spre partea de c.a., se poate scrie: $P_d < 0$. Redresorul face o conversie continuu – alternativ, funcționând în **regim de inverter**. Acest regim poate fi obținut în cadranul 2 atunci când este inversat sensul curentului I_d sau în cadranul 4 atunci când tensiunea U_d își schimbă polaritatea.

Pentru partea de c.c. a unui convertor, termenul care indică posibilitatea schimbării sensului de circulație a curentului este de **bidirecționalitate**, iar termenul care indică posibilitatea schimbării polarității tensiunii este de **reversibilitate**. Un asemenea convertor permite inversarea sensului de circulație al puterii prin el, fiind referit ca *bidirecțional sau reversibil, cu funcționare în 2 sau 4 cadrane*.

2. Regimul de redresor și inverter la redresoare cu comutație naturală

Figura 7.2 prezintă cea mai simplă structură de redresor comandat ce realizează conversia alternativ-continuu, redresorul monoalternanță. Topologia include un tiristor T_h ale cărui terminale de forță anod (A) – catod (K) sunt legate într-o buclă ce mai include sursa de tensiune alternativă u_s și sarcina de c.c. în două variante.

La prima variantă – Fig.7.2(a) sarcină este pur rezistivă, formată doar din rezistența R (caz prezentat în Lucrarea 3 pentru definirea punctului de comutație naturală, a unghiului de comandă și a comenzii în fază a tiristoarelor), iar la a doua variantă – Fig.7.2(b) - sarcina este rezistiv-inductivă $R-L$. Variantele vor fi prezentate comparativ pentru a evidenția regimurile de funcționare a acestui convertor simplu, în funcție de sensul de transfer al energiei.

a) Varianta 1 - sarcină pur rezistivă (R)

În Fig.7.2(c) sunt prezentate formele de undă corespunzătoare convertorului din Fig.7.2(a) atunci când acesta este comandat cu un unghi de comandă oarecare $\alpha < 90^\circ$ și alimentează sarcina pur rezistivă. Se observă că, pe intervalul în care

tiristorul T_h este blocat, curentul este zero prin acesta și tensiunea la ieșirea convertorului u_d (căderea de tensiune pe rezistența R) este, de asemenea, zero. În momentul în care tiristorul este comandat pentru deschidere, cu ajutorul impulsurilor de comandă, acesta intră în conducție și întreaga tensiune de alimentare o vom regăsi la ieșirea convertorului.

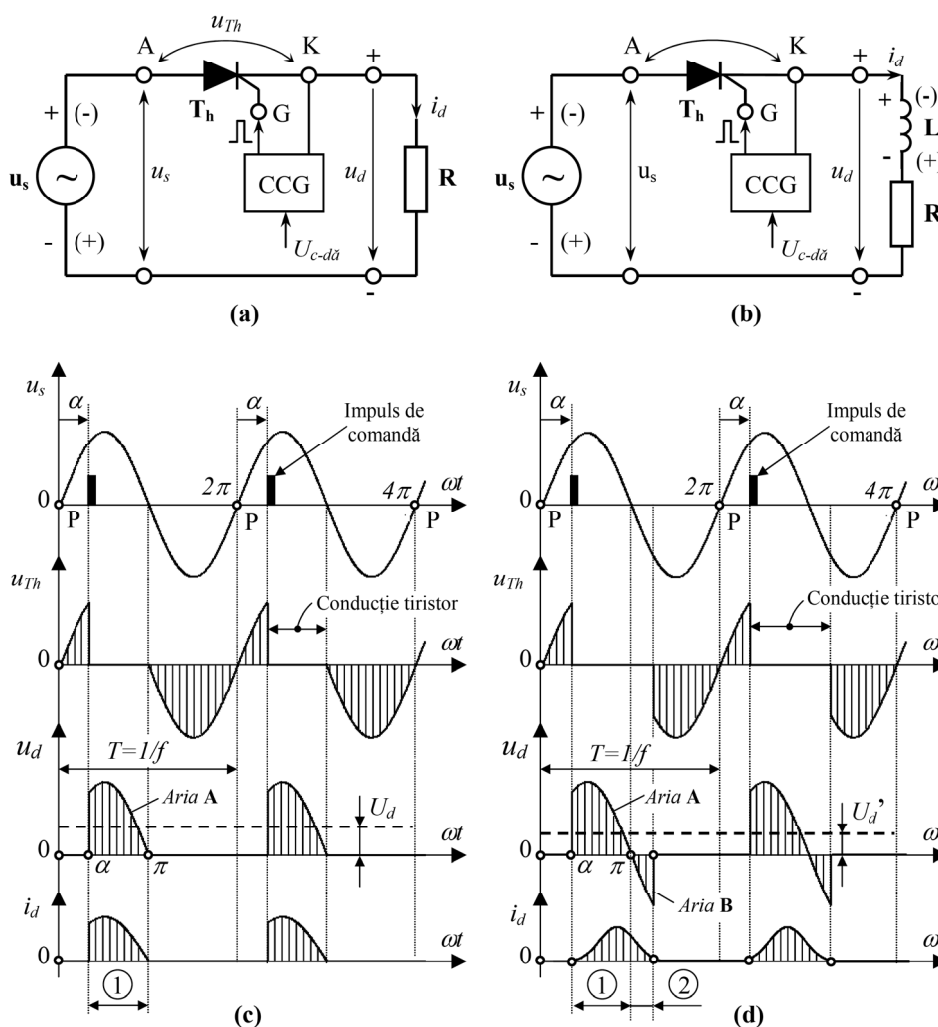


Fig. 7.2 Evidențierea regimului instantaneu de redresor (intervalul 1) și a regimului instantaneu de invertor (intervalul 2) la un redresor comandat monoalternanță

Deoarece sarcina de la ieșirea convertorului este rezistivă, forma de undă a curentului i_d , furnizat de convertor, este aceeași cu forma de undă a tensiunii u_d . În momentul în care tensiunea de alimentare u_s trece prin zero spre semialternața negativă, curentul prin tiristor i_d devine, la rândul lui, zero. După acest moment sunt întrunite condițiile de blocare a tiristorului, respectiv polarizarea inversă un interval minim de timp (timp de blocare t_q – parametru de catalog) și anularea curentului prin dispozitiv. Odată blocat tiristorul, acesta va prelua întreaga semialternață negativă și o parte din semialternața pozitivă până în momentul apariției impulsului de comandă din următoarea perioadă T a tensiunii alternative.

Se observă că, pe rezistența de sarcină de la ieșirea structurii, vom regăsi doar porțiuni din alternața pozitivă, mai mari sau mai mici, în funcție de valoarea unghiului de comandă (vezi Fig.7.2.c). Astfel, tensiunea de ieșire u_d apare sub forma unor pulsuri, un semnal periodic având perioadă T_p , egală chiar cu perioada tensiunii alternative $T_p=T=1/f$. Deoarece pulsurile nu sunt alternative în jurul abscisei ωt tensiunea u_d va conține o componentă continuă notată $U_{d\alpha}$ a cărei valoare se va calcula cu formula valorii medii aplicată unui semnal periodic (vezi Lucrarea 3):

$$U_{d\alpha} = \frac{1}{T} \int_0^T u_d(t) \cdot dt = \frac{Aria A}{T} \frac{\sqrt{2}U_s}{2\pi} \cdot (1 - \cos \alpha) \geq 0 \quad \text{pentru } 0 \leq \alpha \leq \pi \quad (7.1)$$

Se poate observa în Fig.7.2(c) că, pe intervalul în care tiristorul conduce $[\alpha, \pi]$, atât tensiunea $u_d(t)$, cât și curentul $i_d(t) = u_d(t)/R$ au valori pozitive. În consecință, puterea instantanee din partea de curent continuu, dată de relația:

$$p_d(t) = u_d(t) \cdot i_d(t) > 0 \quad (7.2)$$

este pozitivă pe tot intervalul. Valoarea pozitivă are semnificația unei puteri consumate de receptorul de c.c. în orice moment din intervalul: $\alpha \leq \omega t \leq \pi$. Se afirmă că redresorul comandat funcționează în **regim instantaneu de redresor** deoarece puterea electrică instantanee circulă din partea de c.a. spre partea de c.c.

Dacă $I_d > 0$ este curentul mediu absorbit de circuitul de sarcină, valoarea medie a puterii consumate în partea de c.c. este dată de relația:

$$P_d = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p_d(t) \cdot dt = U_{d\alpha} \cdot I_d > 0 \quad (7.3)$$

este, de asemenea, pozitivă. Se poate afirma că, în mod global, convertorul transferă putere electrică de la partea de c.a. la partea de c.c. Astfel, redresorul comandat funcționează în **regim global de redresor**.

b) Varianta 2 - sarcină rezistiv-inductivă (R-L)

Prin adăugarea unui element conservativ, cum ar fi o inductanță, la sarcina de c.c. – Fig.7.2(b) - aspectele de funcționare ale convertorului devin mai complexe. Inductanța va introduce un efect de filtrare a curentului i_d și forma de undă a acestuia

nu va mai urmări unda tensiunii (Fig.7.2(d)). Expresia matematică care descrie forma de undă prezentată se determină rezolvând ecuația diferențială de regim tranzitoriu scrisă după momentul $\omega t = \alpha$:

$$R \cdot i_d + L \cdot \frac{di_d}{dt} = u_s = \sqrt{2} \cdot U_s \cdot \sin \omega t \quad (7.4)$$

Soluția acestei ecuații, în care s-a neglijat căderea de tensiune pe tiristorul T_h aflat în conducție ($u_{Th} \approx 0$) este:

$$i_d(t) = i_{dl} + i_{df} = K \cdot e^{-t/\tau} + \frac{\sqrt{2} \cdot U_s}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega t - \varphi) \quad (7.5)$$

unde:

- i_{dl} este soluția de regim liber obținută din ecuația omogenă;
- i_{df} este soluția în regim forțat atunci când circuitul funcționează în regim permanent sinusoidal;
- K este constanta de integrare care poate fi aflată din condițiile inițiale:
 $\omega t = \alpha \Rightarrow i_d(t) = 0$;
- $\tau = L/R$ este constanta de timp a circuitului $R-L$;
- $\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$ este defazajul introdus de inductanța L .

Așa cum reiese din Fig.7.2(d), circulația curentului i_d se va prelungi un interval de timp și după momentul în care tensiunea u_s trece prin zero spre valori negative. Se poate afirma că tiristorul conduce un interval și pe semialternanța negativă. În consecință, apare un puls de tensiune negativă pe sarcina de c.c. sau în forma de undă a tensiunii u_d . Astfel, intervalul de conducție al tiristorului poate fi împărțit în două intervale:

$$(1) \left. \begin{array}{l} u_d(t) > 0 \\ i_d(t) > 0 \end{array} \right\} \Rightarrow p_d(t) = u_d(t) \cdot i_d(t) > 0 - \text{interval în care puterea instantanee}$$

din partea de curent continuu este pozitivă și convertorul funcționează în **regim instantaneu de redresor** vehiculând putere electrică de la sursa de c.a. spre partea de c.c. Energia este consumată de rezistența R (transformată în căldură prin efect Joule-Lentz) și de inductanța L care o acumulează în câmpul său electromagnetic;

$$(2) \left. \begin{array}{l} u_d(t) < 0 \\ i_d(t) > 0 \end{array} \right\} \Rightarrow p_d(t) = u_d(t) \cdot i_d(t) < 0 - \text{interval în care puterea instantanee}$$

din partea de curent continuu este negativă și redresorul comandat funcționează în **regim instantaneu de invertor** vehiculând energie electrică de la partea de c.c. spre sursa de c.a.

De fapt, energia electrică vehiculată invers prin convertor în regimul instantaneu de invertor este cedată de inductanța din partea de c.c., singura capabilă să acumuleze și să cedeze energie. Această energie începe să fie cedată o dată cu inversarea polarității tensiunii de la bornele inductanței $u_L(t) = L \cdot \frac{di_d(t)}{dt}$ (în

Fig.7.2(b) polaritatea din paranteze) atunci când panta curentului devine negativă ($\frac{di_d(t)}{dt} < 0$). Inductanța devine ea însăși o sursă care încearcă prin polaritatea tensiunii autoinduse să se opună scăderii curentului i_d . Valoarea tensiunii autoinduse este dictată întotdeauna de valoarea tensiunii de alimentare u_s și de valoarea curentului i_d prin căderea de tensiune pe rezistența R , astfel încât să fie respectată în orice moment legea lui *Kirchhoff*, scrisă pentru bucla convertorului prezentat în Fig.7.2(b):

$$u_s(t) = u_R(t) + u_L(t) = R \cdot i_d(t) + u_L(t) \Rightarrow u_L(t) = u_s(t) - R \cdot i_d(t) \quad (7.6)$$

Până în momentul $\omega t = \pi$ energia cedată de inductanță este preluată doar de rezistența de sarcină. După acest moment, când tensiunea sursei de c.a. devine negativă ($u_s < 0$), puterea sursei $p_s(t) = u_s(t) \cdot i_d(t) < 0$ devine și ea negativă, ceea ce are semnificația unei energii primite de sursă de la inductanță.

Trebuie precizat că pulsurile de tensiune negativă din forma de undă a tensiunii u_d sunt generate efectiv de inductanță și numai induse de tensiunea sursei u_s . Tiristorul nu poate propaga de la anod către catod un potențial negativ. Pe durata pulsurilor negative acesta vehiculează în continuare curentul pozitiv i_d fiind polarizat direct de tensiunea autoindusă u_L care va crea, pe buclă, o sumă algebrică ușor pozitivă necesară menținerii conducției tiristorului până la cedarea întregii energii de către inductanță: $u_{Th} = u_s(t) + u_R(t) + u_L(t) > 0$. În momentul în care energia din câmpul inductanței s-a epuizat, curentul prin aceasta și, implicit, prin tiristor se anulează. Tensiunea autoindusă u_L dispare la rândul ei, determinând imediat o polarizare inversă a tiristorului de către tensiunea sursei de alimentare. Sunt îndeplinite în acest fel condițiile de **blocaje naturală** a tiristorului cu un aport energetic (**energie reactivă de comutație**) de la sursa de alimentare în c.a.

Tensiunea medie la ieșirea redresorului comandat în cazul în care sarcina de c.c. este rezistiv-inductivă $U'_{d\alpha}$ este mai mică decât în cazul sarcinii rezistive deoarece integrala valorii medii din relația (7.1) este echivalentă cu suma algebrică a două arii, **Aria A** + **Aria B** în care **Aria B** este negativă:

$$U'_{d\alpha} = \frac{1}{T} \int_0^T u_d(t) \cdot dt = \frac{1}{T} (\text{Aria A} + \text{Aria B}) < U_{d\alpha} = \frac{1}{T} \cdot \text{Aria A} \quad (7.7)$$

Durata conducției tiristorului pe semialternanța negativă depinde de cantitatea de energie acumulată în câmpul inductanței. La rândul ei aceasta depinde de valoarea medie a curentului de sarcină I_d . Se poate spune că modulul **Ariei B** depinde de

mărimea sarcinii și, în consecință, tensiunea medie de la ieșire este dependentă, atât de unghiul α de comandă, cât și de curentul sarcină:

$$U'_{d\alpha} = f(\alpha, I_d) \quad (7.8)$$

Considerăm convertorul ca fiind *necontrolabil* atunci când valoarea tensiunii de ieșire nu poate fi impusă exclusiv prin parametrul de comandă, depinzând și de o variabilă aleatorie cum este sarcina. Este, în general, cazul tuturor convertoarelor la care curentul de ieșire (de sarcină) se întrerupe pe anumite intervale - funcționează în *regim de curent întrerupt (curent discontinuu sau intermitent)*.

Dacă durata conducției pe semialternanțele negative devine mai mare decât durata conducției pe semialternanțele pozitive ($|Aria \mathbf{B}| > Aria \mathbf{A}$) tensiunea medie la ieșirea convertorului devine negativă: $U'_{d\alpha} < 0$. În această situație puterea medie la ieșirea redresorului devine la rândul ei negativă ($P_d = U'_{d\alpha} \cdot I_d < 0$) ceea ce este echivalent cu un transfer global de putere de la partea de c.c. la partea de c.a. Astfel, redresorul comandat funcționează în *regim global de inverter*.

Regimul global de inverter, numit în practică mai simplu "*regim de inverter*", poate fi obținut la redresoarele comandate cu comutație naturală cu două sau mai multe pulsuri (M2, B2, M3, B6 etc.). Redresorul monoalternanță, descris anterior, nu funcționează pe baza procesului comutației naturale a curentului de pe o ramură de circuit pe o altă ramură de circuit deoarece nu conține mai multe ramuri în paralel cu mai multe dispozitive redresoare. Pentru ca structurile de redresoare menționate mai sus să funcționeze în regim global de inverter trebuie îndeplinite anumite condiții dintre care enumerăm:

- Comanda convertorului cu un unghi $\alpha_{inv} \in (90^\circ \div \alpha_{inv(max)} < 180^\circ]$.
- Sarcina de c.c. să conțină o sursă proprie de energie (sarcină activă) cu o tensiune continuă proprie astfel conectată încât polaritatea ei să ajute la circulația curentului I_d în sens pozitiv (singurul sens posibil condiționat de prezența tiristoarelor) mai mult pe alternanța negativă a tensiunii sau a tensiunilor alternative de alimentare

3. Montajul de laborator

Pentru studiul experimental al aspectelor descrise în secțiunea anterioară se realizează în laborator montajul din Fig.7.3. Acesta va include:

- un transformator (TR) de alimentare a circuitului cu tensiune joasă ($24V_{ca}$);
- un tiristor prins pe un radiator pe care sunt montate, prin intermediul unor plăci izolatoare și bornele de legătură cu terminalele de forță (anod, catod), precum și bornele de legătură cu terminalele de comandă (grilă, catod);

- circuitul de comandă pe grilă (CCG) al tiristorului realizat cu ajutorul integratului specializat β AA145 (circuit descris în Lucrarea 3 de laborator);
- un autotransformator (ATR), conectat între borna 0 și cursor, în poziția inductanței variabile L ;
- un reostat conectat între un capăt și cursor în poziția rezistenței de sarcină variabile;

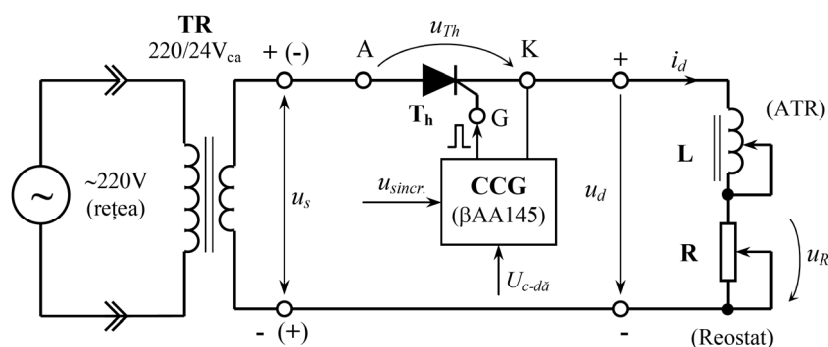


Fig. 7.3 Montajul de laborator pentru studiul regimului de redresor și invertor.

În Fig.7.4 este prezentată imaginea montajului experimental a cărui schemă este dată mai sus în Fig.7.3.

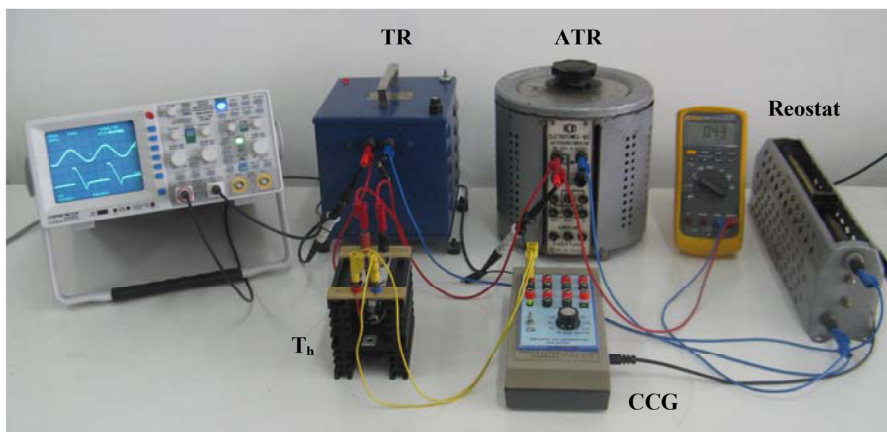


Fig. 7.4 Imaginea montajului din laborator al lucrării.

Pentru teste se va folosi un osciloscop cu două spoturi pentru a oscilografia semnalele u_{Th} , u_d și i_d (u_R) prezentate în Fig.7.2(c) și Fig.7.2(d). Pentru a vedea comportamentul circuitului în cazul variantei cu sarcină pur rezistive se va aduce cursorul autotransformatorului în poziția zero.

4. Modul de lucru

1. Se vor studia aspectele teoretice cu privire la vehicularea energiei între redresor și sarcină, a corespondenței dintre sensurile de circulație ale energiei și cadranele planului electric $u_d - i_d$ asociat părții de c.c. a convertorului;
2. Se vor analiza sensurile exacte ale următorilor termeni legați de funcționarea redresoarelor: *regim de redresor și invertor, reversibilitate, bidirecționalitate*;
3. Se va stabili diferența dintre *regimul instantaneu de redresor și regimul global de redresor*, respectiv diferența dintre *regimul instantaneu de invertor și regimul global de invertor*.
4. Se va analiza în ce condiții poate fi obținut regimul global de invertor la un redresor comandat cu comutație naturală;
5. Se va realiza schema din Fig.7.3 și se va verifica funcționarea prin vizualizarea simultană a tensiunilor u_{Th} și u_d în condițiile modificării unghiului de comandă și a unei sarcini pur rezistive. Pentru aceasta se va conecta masa osciloscopului la catodul tiristorului, sonda canalului 1 la bara de jos a montajului și sonda canalului 2 pe anodul tiristorului (se va defaza cu 180° el. semnalul canalului 1);
6. Se va fixa unghiul de comandă la o valoare apropiată celei din Fig.7.2 și se va pune în evidență apariția regimului instantaneu de invertor prin introducerea treptată a inductanței L ;
7. Se va demonstra experimental că prelungirea conducerii tiristorului pe semialternanța negativă (durata intervalului de timp 2) este în funcție, atât de valoarea inductanței L , cât și de valoarea rezistenței R (a curentului de sarcină i_d), ceea ce sugerează că energia acumulată de inductanță ($W_l = L \cdot i_d^2 / 2$) este responsabilă de apariția regimului instantaneu de invertor;
8. Se va oscilografia unda tensiunii u_d simultan cu unda curentului i_d conectând masa osciloscopului la bara de jos a montajului, sonda canalului 1 la borna superioară a inductanței L și sonda canalului 2 la borna superioară a rezistenței R . În acest fel, poate fi realizată corespondența între cele trei semnale u_{Th} , u_d și i_d cum este prezentată în Fig.7.2;
9. Se va observa efectul de filtrare (nivelare) a curentului odată cu mărirea inductanței L și prelungirea acestuia pe durata semialternanței negative;
10. Se va observa că panta de creștere a curentului (di_d/dt) după deschiderea tiristorului este în funcție de valoarea inductanței sarcinii. Astfel, se obține o legătură între natura sarcinii și durata impulsului de comandă pe grilă, impuls care trebuie să persiste până când valoarea curentului prin tiristor atinge pragul de automenținere (I_H – parametru de catalog);