

Lucrarea 1  
(referat introductiv)

## LOCUL ȘI IMPORTANȚA ELECTRONICII DE PUTERE

Aspectul energetic oferă o imagine elocventă asupra nivelului atins în dezvoltarea sa de o civilizație. Până în prezent progresul s-a identificat cu o creștere continuă a necesarului de energie. Datorită resurselor limitate și a problemelor ecologice (emanații de gaze toxice, efectul de seră, deșeuri etc.) viziunea strict cantitativă asupra energiei a lăsat loc unei viziuni calitative ce aduce în prim plan eficiența utilizării acesteia. Astfel, efortul creativ și tehnologic al societății actuale are în vedere cu prioritate găsirea unor soluții de reducere a consumurilor energetice specifice și de valorificare într-un procent cât mai ridicat a energiilor regenerabile. În acest demers important electronica de putere are un rol special, bine conturat.

Formele direct utilizabile de energie sunt: energia de mișcare, energia termică, energia luminoasă și energia chimică. La început oamenii și-au asigurat aceste energii direct din formele primare de energie: combustibili solizi sau lichizi, energia hidro, energia solară, energia eoliană și energia geotermală. În prezent, energia obținută din formele primare este în cea mai mare parte transformată în energie electrică, ca o formă intermediară între producător și consumator. Utilizarea energiei electrice a fost determinată de flexibilitatea și avantajele sale nete în comparație cu orice altă formă de energie: produsă în unități specializate (centrale electrice) cu eficiență ridicată, transportată la distanțe mari cu pierderi mici, distribuită ieftin și cu ușurință consumatorilor, convertită în orice formă de energie la receptor.

Receptorul sau consumatorul electric este ultimul element din lanțul de producere și distribuție a energiei electrice. O primă clasificare a acestuia se poate realiza în funcție de tipul de energie pe care îl furnizează la ieșire prin conversie din energie electrică. Astfel, întâlnim receptoare care fac o *conversie electro-mecanică* (motoarele electrice, electromagneți), o *conversie electro-termică* (cuptoare, plite și calorifere electrice, instalații de sudură prin arc sau de tratament termic etc.), o *conversie electro-chimică* (băi de electroliză sau de acoperiri galvanice, acumulatori etc.) și o *conversie a energiei electrice în flux luminos* (lămpi, becuri etc.). Într-o anumită clasă de conversie receptoarele pot fi de o diversitate foarte largă. De exemplu, motoarele electrice sunt de curent continuu, de curent alternativ, pas cu pas, cu reluctanță variabilă etc.

Fiecare din receptoarele electrice enumerate acceptă la intrare numai energie electrică de o anumită formă și cu anumiți parametri. Pe de altă parte, acestea realizează **proces**e mecanice, termice sau chimice care trebuie **controlate**. Pornind

de la cele două cerințe de mai sus a apărut necesitatea unor **interfețe (echipamente) între sursa de energie electrică și receptor** care să adapteze parametrii energiei la receptor și, totodată, să dozeze fluxul energetic în scopul reglării variabilelor din procese. Aceste echipamente poartă denumirea de **convertoare** și așa cum rezultă de mai sus, trebuie să realizeze o **conversie electric-electric** într-o manieră controlată.

Înainte de a apare electronica de putere ca un domeniu distinct, conversia electric-electric era evitată în aplicații. Cauza o constituia dificultatea de a fi obținută la momentul respectiv. Soluția tehnică la îndemână consta în utilizarea **convertoarelor rotative** formate din grupe de mașini electrice (grup generator-motor). Dezavantajele acestei soluții sunt evidente: preț ridicat, fiabilitate scăzută datorită elementelor aflate în mișcare de rotație, randament scăzut al conversiei, gabarit și masă mare, zgomot etc.

O dată cu dezvoltarea tehnologiei semiconductoarelor sunt fabricate primele diode de putere, iar în 1956 este conceput tiristorul, primul **dispozitiv semiconductor de putere** cu electrod de comandă. Pe baza acestor dispozitive electronica de putere se dezvoltă prin realizarea **convertoarelor statice** numite și **convertoare electronice de putere** (*Power Electronic Converters*). Avantajele acestora sunt complementare celor rotative. În primul rând, prin **conversia statică** a energiei electrice este eliminată mișcarea din procesul de conversie și implicit uzura mecanică. Acest aspect va conduce la evitarea întreținerii periodice și la creșterea duratei de viață a convertorului. În plus, convertoarele statice au un gabarit mai redus, sunt mai ușoare, mai ieftine, mai puțin zgomotoase etc. Ca dezavantaj putem menționa o robustețe mai scăzută la suprasarcină decât a convertoarelor rotative.

În intervalul de timp scurs de la primele aplicații ale electronicii de putere și până în prezent dezvoltările în acest domeniu au fost impresionante. Pot fi evidențiate mai mulți factori care au condus la acest fapt și care au acționat împreună printr-o susținere reciprocă. Un prim factor a fost piața. Astfel, așa cum s-a precizat mai sus, atât din punct de vedere tehnic, cât și din punct vedere al eficienței energetice, aplicațiile din multe domenii au cerut convertoare electronice de putere din ce în ce mai performante. Perspectiva unei piețe cu mari vânzări și implicit profituri a determinat firme puternice (Siemens, International Rectifier, Semikron, Eupec, IXYS, ABB, Danfos, Fuji Electric etc.) și universități de tradiție să investească fonduri masive dedicate cercetării în acest domeniu. Primul obiectiv vizat de cercetători a constat în creșterea performanțelor dispozitivelor semiconductoare de putere ca elemente de bază din structura de forță a convertoarelor statice. Conceperea unor dispozitive 100% controlabile și cu frecvență de lucru ridicată crea perspectiva unor noi generații de convertoare cu **structură (topologie)** simplă și gabarit redus. Au fost transferate tehnologii și au fost valorificate rezultatele cercetării din aria semiconductoarelor de mică putere (microelectronică) în aria semiconductoarelor de mare putere cu efecte spectaculoase. În cursa contra cronometru de a câștiga cât mai mult în vânzări, firmele de prestigiu au început să lanseze rapid pe piața tranzistoare cunoscute în microelectronică (tranzistoare bipolare și tranzistoare de tip MOSFET)

---

cu puteri din ce în ce mai mari, precum și noi dispozitive cum ar fi: tiristorul cu blocare pe poartă (GTO), tranzistorul bipolar cu grilă izolată (IGBT), tiristorul controlat MOS (MCT) etc. Totodată, au fost concepute și fabricate circuite sau module complexe dedicate comenzii dispozitivelor semiconductoare de putere. Toate aceste noi componente au permis realizarea unor echipamente de putere compacte, ieftine și performante. În consecință, vânzările de componente și convertoare au crescut în mod constant, fapt care în electronică provoacă un dublu efect, aparent contradictoriu: creșterea performanțelor produselor și ieftinirea acestora. Această reacție pozitivă a extins aria de aplicații a electronicii de putere în toate domeniile activității umane. Specialiștii apreciază că în prezent peste 50% din energia electrică consumată într-o țară dezvoltată este vehiculată prin echipamente electronice de putere și procentul este într-o continuă creștere. Aceste sisteme au cuprins tot lanțul de producere, transport, distribuție și de consum al energiei electrice. Asistăm la o “electronizare” a tuturor echipamentelor electrice prin care acestea capătă caracteristici și funcții noi.

Pentru a avea o imagine mai clară asupra acestui fenomen global, în continuare vor fi prezentate câteva zone sau domenii ale activității umane în care echipamentele electrice încorporează **sisteme electronice de putere**:

- **Aplicații casnice:** aspiratoare cu viteză reglabilă, mașini de spălat automate, plite electrice cu temperatură controlată, cuptoare cu microunde, roboți de bucătărie, lămpi cu lumină reglabilă, instalații de încălzire sau de aer condiționat, calculatoare și aparatură audio-video care încorporează surse de putere în comutație etc.
- **Transport de bunuri și persoane:** locomotive sau trenuri electrice, metrouri, tramvaie, trolee, automobile hibride sau în totalitate electrice, ascensoare, macarale cu acționare electrică etc.
- **Domeniul comercial și de afaceri:** scări rulante, ascensoare, instalații de încălzire, de ventilare, aer condiționat sau de răcire, iluminat ornamental, instalații de incendiu, televiziune cu circuit închis, case de marcat, cititoare de coduri, aparatură de birou, calculatoare, surse de putere neîntreruptibile (UPS – *Uninterruptible Power Supply*) etc.
- **Domeniul industrial:** toate acționările reglabile (cu motoare electrice) a instalațiilor, utilajelor, mașinilor unelte și roboților industriali, cuptoare electrice de inducție, instalațiile de tratament termic, instalațiile de sudură prin arc, instalații de electroliză și de acoperiri galvanice etc.
- **Energetică:** instalații din centralele clasice de producere a energiei electrice (termocentrale, hidrocentrale, centrale nucleare), echipamente pentru centrale (parcuri) eoliene, solare, geotermale etc. care valorifică sursele de energie regenerabilă (RER – *Renewable Energy Resources*), echipamente pentru micro-rețele (*μ-grids, smart-grids*) ce implementează principiul modern de **generare distribuită a energiei**

*electrice* (DG – *Distributed Generation*) din una sau mai multe tipuri de surse regenerabile, echipamente dedicate transportului energiei electrice la înaltă tensiune în curent continuu (HVDC – *High Voltage DC Power Transmission*), sisteme de stocare a energiei electrice (*Energy Storage Systems*) etc.

- **Telecomunicații:** surse de putere în curent continuu, instalații de încărcare a acumulatorilor, surse neîntreruptibile, antene radio telecomandate etc.
- **Medicină:** roboți de laborator și pentru sălile de operații, echipamente de investigație radiologică, computer-tomograf și rezonanță magnetică nucleară (RMN), instalații de aer condiționat, ascensoare, aparatură medicală etc.
- **Domeniul aeronautic și aerospațial:** avioane de toate tipurile, sateliți, instalații de urmărire și comunicații, baze de lansare etc.
- **Domeniul militar:** instalații de urmărire radar, rachete, rampe de lansare telecomandate, vehicule militare, baterii antiaeriene telecomandate, instalații de ghidare etc.

Trebuie remarcat că, în multitudinea aplicațiilor ce încorporează echipamente electronice de putere, o pondere foarte mare o dețin acelea în care se produce un lucru mecanic, o deplasare sau o mișcare cu ajutorul motoarelor electrice. Aceste *sisteme de acționare electrică* sunt consumatorul principal (în jur de 70%) din energia electrică produsă. Astfel, pentru electronica de putere aplicațiile de referință sunt cantonate în domeniul acționărilor electrice. Din acest motiv studiul electronicii de putere interferează adesea cu alte discipline cum ar fi mașinile electrice, acționările electrice, precum și cu discipline care țin de comanda și controlul sistemelor electronice de putere cum ar fi: microelectronică, sisteme numerice cu microprocesor (calculatoare, microcontrolere, DSP – *Digital Signal Processor*), automată, măsurări electrice și electronice etc.

Nu se poate încheia o apreciere generală asupra electronicii de putere fără a lua în discuție efectele pe care le provoacă asupra rețelelor de distribuție a energiei electrice unele convertoare statice. Astfel, un convertor clasic conectat la rețea determină poluarea acesteia prin armonici de curent, prin absorbția unei puteri reactive și prin apariția unor efecte de interferență electromagnetică. Până în anii '80 din secolul trecut aplicațiile electronicii de putere erau puține, întâlnite cu precădere în industrie. Din acest motiv efectul acestora asupra liniilor de distribuție era, în general, neglijat. În prezent, numărul aplicațiilor a crescut foarte mult și efectul de poluare a acestora se cumulează. Apar, în acest fel, pierderi importante în rețea și sunt afectați ceilalți consumatori prin deformarea undei de tensiune.

Pornind de la aceste constatări, s-a simțit nevoia unor reglementări care să limiteze perturbațiile introduse în rețele de către convertoarele electronice de putere și

---

de către alte sarcini neliniare. Astfel, au fost elaborate standarde la nivel internațional (IEC, ANSI/IEEE), la nivel european (CENELEC) și la nivel național care au câpătat putere de lege pentru țările care le-au adoptat. Uniunea Europeană (UE) a avut ca dată limită anul 1994 pentru adoptarea acestei legislații și data limită de 06.01.1998 după care, obligatoriu, aceste normative au început să fie aplicate pe tot cuprinsul Uniunii. Odată cu integrarea României în UE această legislație devine obligatorie pentru țara noastră și utilizatorii de convertoare legate la rețeaua de distribuție a energiei electrice trebuie să ia măsuri pentru încadrarea în limitele de poluare impuse de lege. Acestea constau în utilizarea unor convertoare cu absorbție de curenți sinusoidali (**convertoare ecologice**) în locul convertoarelor poluante sau în utilizarea, pe lângă convertoarele poluante, a unor filtre pasive sau a unor *filtre active* eficiente.

**Filtrele active de putere** sunt realizate tot cu mijloacele electronicii de putere și fac obiect de studiu în cadrul acestui domeniu. Structura și funcționarea filtrelor active nu diferă mult de cea a convertoarelor statice cunoscute și ar putea fi, prin extensie, incluse în categoria acestora. Totuși, având în vedere rolul lor, filtrele active ocupă un loc relativ distinct în cadrul disciplinei fiind tratate separat de convertoare.

Sunt și alte echipamente electronice, cu nume diferite de a convertoarelor statice obișnuite sau a filtrelor active, care ajută la gestionarea energiei electrice (*Energy Management*) sau a calității energiei electrice (*Power Quality*), cum ar fi:

- **Compensatoare statice pentru factorul de putere** (PFC – *Power Factor Correction*, STATCOM – *Static Compensator*, UPFC – *Unified Power Flow Controller*) – structuri electronice de forță care permit o corectare a factorului de putere, o stabilizare a tensiunilor și un control al circulației puterilor electrice în rețelele de distribuție a energiei electrice;
- **Corectoare dinamice pentru tensiunile de rețea** (DVR – *Dynamic Voltage Restorer*) – permit corectarea în timp real a pauzelor și a deformărilor din forma de undă a tensiunilor rețelei;
- **Comutatoare statice de linii** (*Transfer Switches*) – permit o comutare a consumatorilor pe diferite linii de alimentare;
- **Contactoare statice** (*Static Breakers*) – permit conectarea sau deconectarea sarcinilor, precum și izolarea în timpi scurți a zonelor cu defecte din rețele.

Având în vedere diversitatea echipamentelor electronice de putere și posibilitatea ca mai multe din acestea să fie grupate într-o aplicație dată se utilizează noțiunea de *sistem electronic de putere*.

**Definiție:** Un **sistem electronic de putere** este un ansamblu, având un rol funcțional bine definit, care poate include unul sau mai multe convertoare statice, filtre active de putere, contactoare statice sau alte structuri ce conțin dispozitive semiconductoare de putere împreună cu circuitele lor de comandă și control.

Practic, orice structură de forță cu dispozitive semiconductoare de putere și alte elemente de circuit (inductanțe, capacități, rezistențe etc.) la care se asociază circuite de comandă și control formează un sistem electronic de putere. Ținând cont de această observație se poate aprecia că *electronica de putere se ocupă cu studiul sistemelor electronice de putere.*

Un studiu complet al electronicii de putere presupune o abordare complexă, etapizată:

- a) Definierea și clasificarea convertoarelor electronice de putere. Studiul principiilor care stau la baza conversiei statice a energiei electrice;
- b) Studiul dispozitivelor semiconductoare de putere utilizate în structura de forță a convertoarelor precum și a modalităților de comandă și de protecție a acestora. Circuite de comandă dedicate și module inteligente;
- c) Studiul topologiilor uzuale de convertoare statice. Tehnici utilizate pentru comanda convertoarelor;
- d) Studiul altor structuri electronice de putere: filtre active, contactoare statice etc. Tehnici utilizate pentru comanda acestora;
- e) Aplicații de referință ale sistemelor electronice de putere;
- f) Proiectarea și realizarea practică a sistemelor electronice de putere.

Un aspect important și modern ce are legătură cu problematica de proiectare dar și cu procesul didactic de învățare îl constituie utilizarea tehnicilor de modelare și simulare numerică pentru analiza funcționării sistemelor electronice de putere. În acest sens, s-au elaborat mai multe programe capabile a fi utilizate pe calculatoare standard pentru modelare și simulare în electronică. Unele dintre cele mai utilizate programe sunt PSPICE și ORCAD.

#### **Obiectivele părții teoretice:**

1. Prin studiul părții teoretice a referatului se va urmări familiarizarea cu noțiuni din electronica de putere cum ar fi: conversia statică a energiei electrice, dispozitiv semiconductor de putere, convertor static, sistem electronic de putere etc.;
  2. Se va analiza importanța și rolul electronicii de putere în epoca modernă pentru reducerea consumurilor energetice și reducerea poluării, valorificarea surselor alternative de energie, controlul proceselor, creșterea gradului de confort al vieții oamenilor etc.;
  3. Se va constata aria largă de utilizare a echipamentelor electronice de putere în toate sferile activității umane;
  4. Se va reține denumirea celor mai reprezentative echipamentelor din electronica de putere și rolul acestora;
  5. Se va analiza ce presupune studiul electronicii de putere și etapele care trebuie urmate pentru a deveni specialist în domeniu.
-

### **Partea experimentală:**

#### **- Principiul redresării comandate -**

În Fig.1.1 este prezentată una dintre cele mai simple structuri din electronica de putere, redresorul comandat monoalternanță. Topologia include un tiristor  $T_h$  ale cărui terminale de forță anod (A) – catod (K) sunt legate într-o buclă ce mai include o sursă de tensiune alternativă  $u_s$  și o sarcina de curent continuu. Pentru simplitate s-a ales un circuit de sarcină pur rezistiv, formată doar din rezistența  $R$ .

Pentru înțelegerea funcționării acestui convertor static, tiristorul poate fi privit ca un întrerupător unidirecțional la care momentul intrării în conducție (amorsării) este dat de aplicarea unui impuls scurt de comandă pe grila G de către un bloc specializat numit ***circuit de comandă pe grilă*** (CCG). Odată intrat în conducție, tiristorul își menține starea atât timp cât este păstrată polarizarea directă a acestuia (+ pe anod și - pe catod). Blocarea tiristorului (întreruperea circulației curentului prin dispozitiv) nu poate fi indusă prin terminalul de comandă. Analizând polaritățile sursei  $u_s$  din Fig.1.1, este evident faptul că amorsarea conducției tiristorului poate fi realizată doar pe intervalele în care acesta este polarizat direct sau, mai exact, pe durata semialternanțelor pozitive (polaritatea din afara parantezelor). În Fig.1.2 sunt prezentate formele de undă rezultate din funcționarea schemei de forță din Fig.1.1.

Dacă în locul tiristorului ar fi utilizată o diodă, intrarea în conducție a acesteia s-ar produce natural la începutul fiecărui interval de timp în care dispozitivul va fi polarizat direct. Din acest motiv limita din stânga a acestor intervale (punctele P din Fig.1.2) poartă denumirea de *puncte de comutație naturală*.

***Definiție:*** ***Punctele de comutație naturală*** marchează momentele după care dispozitivele din structura convertoarelor alimentate cu tensiuni alternative sunt polarizate direct, fiind întrunite condițiile de a intra în conducție.

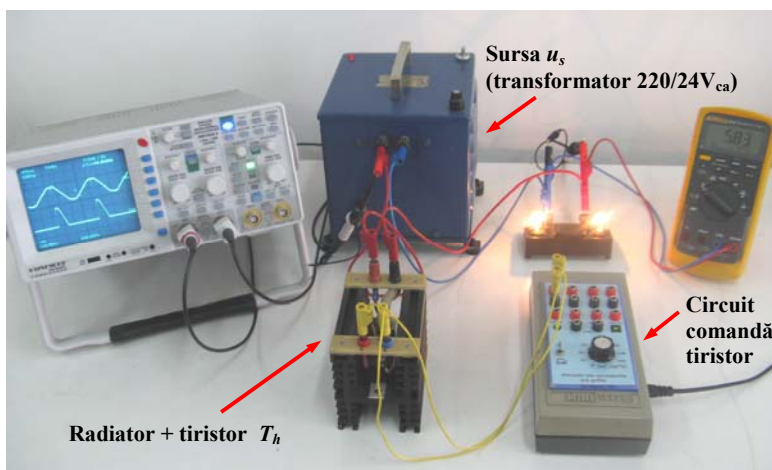
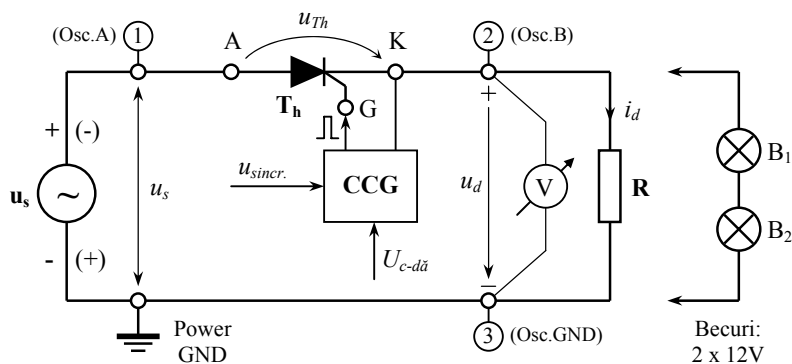
Tiristoarele pot fi comandate pentru a intra în conducție chiar în punctele de comutație naturală (caz în care convertorul descris ar avea comportamentul unuia identic ca topologie, realizat cu diode) sau pot fi comandate cu o anumită întârziere față de punctele de comutație naturală.

***Definiție:*** ***Unghiul de comandă***, notat de obicei cu  $\alpha$ , reprezintă întârzierile exprimate în grade electrice față de punctele de comutație naturală, după care tiristoarele sau triacele sunt comandate pentru a fi aduse în conducție.

Pentru ca circuitul de comandă pe grilă să fie capabil de a comanda convertorul cu un anumit unghi  $\alpha$ , acesta trebuie să-și fixeze reperele temporale numite puncte de comutație naturală. Din acest motiv circuitul include, pe lângă alte funcții și așa numita *funcție de sincronizare*. Aceasta este implementată cu ajutorul

unui semnal  $u_{sincr.}$  sincronizat cu tensiunea  $u_s$  prin intermediul unui *transformator de sincronizare*. Valoarea unghiului  $\alpha$  este impusă de către *tensiunea de comandă* ( $U_{c-dă}$ ).

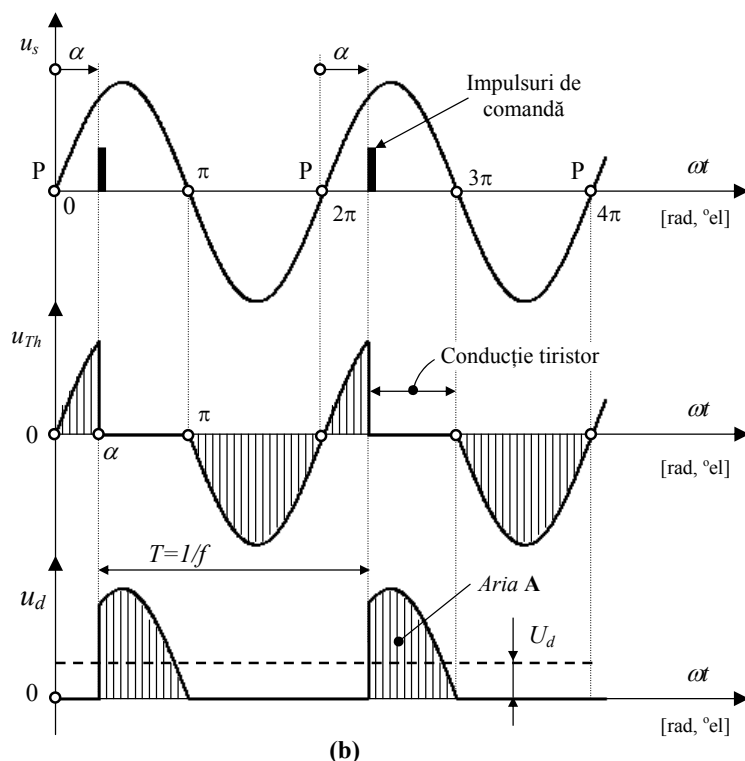
**Definiție:** Această modalitate de comandă sincronizată, cu un anumit unghi de comandă reglabil, obținută cu ajutorul circuitelor de comandă pe grilă, poartă denumirea de **comandă în fuză** a tiristoarelor sau a triacelor.



**Fig.1.1** Schema și imaginea montajului de laborator cu redresorul monoalternanță comandat, alimentând o sarcină rezistivă (becuri).

Formele de undă din Fig.1.2 sunt date pentru un unghi oarecare  $\alpha < 180^\circ$  atunci când redresorul monoalternanță alimentează o sarcină pur rezistivă. Sarcina poate fi implementată în laborator prin utilizarea unui reostat ( $R$ ) sau a unui grup de lămpi cu incandescență (becurile  $B_1, B_2$ ). În cazul becurilor efectul este mai spectaculos deoarece, prin reglarea unghiului de comandă, se poate sesiza vizual modificarea intensității luminoase a acestora.





**Fig. 1.2** Formele de undă corespunzătoare funcționării redresorului monoalternanță comandat. Principiul redresării comandate.

Pe intervalul în care tiristorul  $T_h$  este blocat impedanța lui este considerată infinită și curentul este, practic, zero prin circuit. În consecință, căderea de tensiune pe sarcina rezistivă (tensiunea  $u_d$  de la ieșirea convertorului) este zero. Tiristorul preia întreaga tensiune de alimentare  $u_s$ . În momentul în care tiristorul este comandat pentru deschidere cu ajutorul impusurilor de comandă acesta intră în conducție și întreaga tensiune de alimentare o vom regăsi la ieșirea convertorului. Pentru simplitatea analizei vom considera tiristorul un dispozitiv ideal care comută instantaneu, prezentând o cădere de tensiune zero în starea de conducție.

Deoarece sarcina de la ieșirea convertorului este rezistivă, forma de undă a curentului  $i_d$  este aceeași cu forma de undă a tensiunii  $u_d$ . În momentul în care tensiunea de alimentare  $u_s$  trece prin zero spre semialternanța negativă curentul prin tiristor  $i_d$  se anulează. După acest moment sunt întrunite **condițiile de blocare ale tiristorului: polarizare inversă pentru un interval mai mare decât timpul de blocare** (parametru de catalog) și **anularea curentului prin dispozitiv**. Odată blocat tiristorul, acesta va prelua întreaga semialternanță negativă și o parte din semialternanța pozitivă

până în momentul apariției impulsului de comandă din următoarea perioadă  $T$  a tensiunii alternative. Astfel, pe rezistența de sarcină de la ieșirea structurii, vom regăsi doar o porțiune din alternanța pozitivă, mai mare sau mai mică, în funcție de valoarea unghiului de comandă (vezi Fig.1.2):

$$u_d(t) = \begin{cases} 0 & \text{pentru } 0 \leq \omega t < \alpha \\ \sqrt{2} \cdot U_s \sin \omega t & \text{pentru } \alpha \leq \omega t \leq \pi \\ 0 & \text{pentru } \pi < \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (1.1)$$

Aceste pulsuri de tensiune se repetă cu o perioadă  $T_p$ , egală chiar cu perioada tensiunii alternative ( $T_p = T = 1/f$ ). Deoarece pulsurile **nu sunt alternative** în jurul abscisei, notată cu  $\omega t$ , este evident că semnalul periodic  $u_d$  va conține o componentă continuă notată  $U_{d\alpha}$  a cărei valoare se va calcula cu **formula valorii medii** aplicată unui semnal periodic:

$$U_{d\alpha} = \text{val. medie } u_d(t) = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} u_d(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T u_d(t) \cdot dt \quad (1.2)$$

Dacă în relația (1.2) se efectuează următoarea schimbare de variabilă  $\omega t = x$  limitele integralei iau valorile:  $\begin{cases} \text{pentru } t_1 = 0 \Rightarrow x_1 = \omega \cdot t_1 = 0, \\ \text{pentru } t_2 = T \Rightarrow x_2 = \omega \cdot t_2 = (2\pi / T) \cdot T = 2\pi \end{cases}$

Prin urmare, relația (1.2) devine:

$$\begin{aligned} U_{d\alpha} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_d(t) \cdot dt = \frac{1}{2\pi} \left( \int_0^{\alpha} 0 \cdot dt + \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_s \sin x \cdot dt + \int_{\pi}^{2\pi} 0 \cdot dt \right) = \\ &= \frac{1}{2\pi} \left( \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_s \sin x \cdot dt \right) = \frac{1}{2\pi} \cdot \text{Aria } \mathbf{A} = \frac{\sqrt{2} U_s}{2\pi} \cdot (-\cos x) \Big|_{\alpha}^{\pi} = \\ &= \frac{\sqrt{2} U_s}{2\pi} \cdot (\mathbf{1} + \cos \alpha) \geq \mathbf{0} \quad \text{pentru } 0 \leq \alpha \leq \pi \end{aligned} \quad (1.3)$$

Expresia (1.3) evidențiază următoarele aspecte:

- Obținerea unei valori medii diferite de zero ( $U_{d\alpha} \neq 0$ ) pentru tensiunea de la ieșirea sistemului prezentat sugerează faptul că acesta **realizează o conversie alternativ-continuu**, deci este un convertor static al energiei electrice. Din acest motiv variabilele: tensiune, curent, putere etc. din partea de c.c. vor fi scrise cu indicele “d” (*dc current*).
- Valoarea medie (tensiunea continuă)  $U_{d\alpha}$  **la ieșirea convertorului poate fi modificată prin intermediul unghiului  $\alpha$  de comandă** (convertor comandat);

**Modul de lucru al părții experimentale:**

1. Se va analiza în ce constă comanda în fază a tiristoarelor pe baza schemei din Fig.1.1 și a diagramelor din Fig.1.2. Se vor reține definițiile *punctului de comutație naturală* și a *unghiului de comandă*;
2. Se va observa faptul că *tensiunea de la ieșirea redresoarelor apare sub forma unor pulsuri periodice cu o componentă continuă* calculată cu ajutorul *formulei valorii medii*;
3. Se va analiza formula de calcul a tensiunii continue (a valorii medii) de la ieșirea redresorului monoalternanță comandat, se va constata dependența valorii acesteia de unghiul de comandă și se va trasa *caracteristica de reglaj* teoretică:  $U_{da} = f(\alpha)$ ;
4. Se va realiza montajul de laborator a redresorului monoalternanță din Fig.1.1 utilizând ca sarcină rezistivă un grup de lămpi cu incandescență sau un reostat;
5. Se vor oscilografia simultan tensiunile  $u_s$ ,  $u_d$  și se va măsura componenta continuă a tensiunii de ieșire cu ajutorul unui voltmetru conectat în paralel cu sarcina rezistivă;
6. Se va pune în evidență cu ajutorul osciloscopului cum se obține redresarea comandată prin modificarea ariei pulsurilor tensiunii  $u_d$  odată cu modificarea unghiului de comandă al tiristorului;
7. Se va trasa caracteristica de reglaj reală a tensiunii de ieșire  $U_{da} = f(\alpha)$  prin măsurarea simultană a tensiunii medii și a unghiului de comandă după care se va compara cu rezultatele teoretice obținute cu ajutorul relației (1.3). Se vor face măsurători pentru:  $\alpha = \text{aprox. } 0^\circ, 30^\circ, 90^\circ, 150^\circ, 180^\circ$  [grade el.].
8. Se va preciza care este forma de undă a curentului în circuitul de sarcină rezistiv;
9. Se vor oscilografia simultan formele de undă  $u_{Th}$  și  $u_d$  repoziționând sondele canalelor A și B a osciloscopului, inclusiv a masei acestuia (Osc.GND), în punctele de măsură (1), (2) și (3). La unul din canale se va inversa imaginea formei de undă printr-o comandă din meniul osciloscopului aferent canalului respectiv.
10. Se vor suprapune cele două forme de undă  $u_{Th}$  și  $u_d$  și se va preciza ce rezultă.