
Lucrarea 3

COMANDA TIRISTOARELOR ȘI A TRIACELOR

1. Introducere

Tiristorul este un dispozitiv semiconductor de putere cu terminal de comandă numit *grilă* sau *poartă*. Denumirea de tiristor își are originea în similitudinea funcționării cu a unei triode cu gaz: *tiratron transistor*. Deoarece tiristoarele sunt utilizate cu precădere în redresoarele comandate, literatura de limbă engleză le mai denumeste și dispozitive *SCR (Semiconductor Controlled Rectifiers)*.

După realizarea sa practică în anul 1956 și până în anii '80 ai secolului XX tiristorul a fost liderul incontestabil al dispozitivelor semiconductoare de putere cu electrod de comandă. Cu toate că prin intermediul grilei poate fi declanșată doar intrarea în conducție, dispozitivul rămâne preferat într-o arie largă de aplicații deoarece este robust, ușor de comandat și poate vehicula puteri mari la valori ridicate ale tensiunilor și curenților cu un minimum de pierderi în conducție.

Trebuie avut în vedere faptul că funcționarea tiristorului implică existența unui *circuit de comandă pe grilă* care să furnizeze semnalele de amorsare. Deoarece în condițiile menținerii unei polarizări directe tiristorul rămâne „agățat” în starea de conducție chiar dacă semnalul de comandă dispăre este indicată o comandă în *impulsuri* cu anumite amplitudini și durate.

2. Simbolul și structura semiconductoare ale tiristorului

Simbolul tiristorului este asemănător cu simbolul diodelor la care, pe lângă terminalele de forță anod (A) și catod (K), apare terminalul grilei notat cu „G” - Fig.3.1(a). Curentul prin tiristorul T_h , notat cu i_{T_h} , circulă doar într-un singur sens de la anod spre catod dacă tiristorul este polarizat direct. Căderea de tensiune pe tiristor, tensiunea anod-catod, a fost notată cu u_{T_h} .

Structura semiconductoare a tiristoarelor este de tip *p-n-p-n* și este prezentată în Fig.3.1(b). Pentru a fi obținută, mai întâi sunt generate prin difuzie cele două straturi *p* la capetele unui cilindru plat realizat din siliciu slab dopat cu atomi pentavalenți (tip *n*). Prin metalizarea zonei anodului cu atomi de aluminiu se obține stratul puternic dopat p^+ în scopul micșorării rezistenței de contact dintre monocristalul semiconductor și discul din metal prezentat în figură. Catodul aplicat pe celălalt capăt al cilindrului semiconductor este realizat sub forma unui inel metalic care înconjoară electrodul de grilă. Inelul catodului este aplicat peste o zonă circulară de tip n^+ obținută prin aliere cu metale donoare de electroni.

Raportul între diametrul pastilei semiconductoare și înălțimea acesteia este foarte mare. Grosimea straturilor și în special al stratului n^- este în funcție de tensiunile de lucru pentru care este fabricat tiristorul. Oricât de mare ar fi această tensiune înălțimea totală a ansamblului din Fig.2.4(b) este de ordinul milimetrilor. Spre deosebire de înălțime, diametrul pastilei de siliciu este în funcție de curentul maxim pe care trebuie să-l preia tiristorul. În cazul tiristoarelor de mii de amperi diametrul poate ajunge la valori de ordinul (8÷10)cm. La aceste dispozitive forma grilei este specială (stelară) în scopul accelerării proceselor de amorsare.

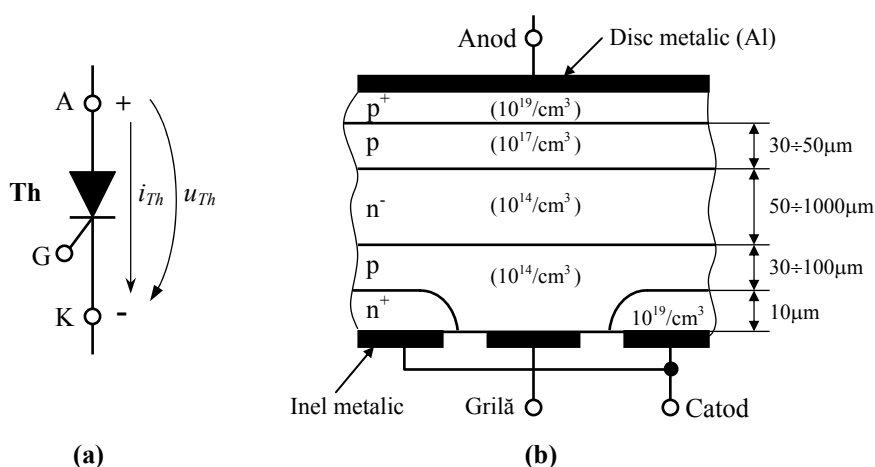


Fig. 3.1 Simbolul (a) și structura semiconductoare ale unui tiristor (b).

Structura semiconductoare din Fig.3.1(b) este închisă etanș într-o capsulă. Partea de prindere a capsulei pe radiator poate fi legată la oricare din cele două terminale de forță. Astfel, sunt fabricate tiristoare cu anodul la radiator și tiristoare având catodul la radiator.

3. Schema echivalentă și caracteristicile statice ale tiristorului

Pentru a înțelege modul de funcționare al tiristoarelor este foarte utilă găsirea unei scheme echivalente care să aproximeze comportamentul acestora într-un circuit, atât în regim static, cât și în regim dinamic. În Fig.3.2 sunt prezentate succesiv etapele logice care permit deducerea schemei echivalente pornind de la structura semiconductoare a tiristorului. Se observă în figură că cele patru straturi semiconductoare ale tiristoarelor $p_1-n_1-p_2-n_2$ sunt prezentate într-o formă simplificată despărțite de cele trei jonțiuni J_1 , J_2 și J_3 . Dacă straturile mediane n_1 și p_2 sunt secționate imaginær așa cum se prezintă în Fig.3.2(b), fără a se rupe legătura electrică dintre ele, se obțin două structuri distincte, o structură $p_1-n_1-p_2$ și ce corespunde unui

tranzistor bipolar T_1 de tip *pnp*, respectiv structura $n_1-p_2-n_2$ ce corespunde unui tranzistor bipolar T_2 de tip *nnp*. Înlocuind cele două structuri cu simbolurile tranzistoarelor amintite mai sus și realizând legăturile electrice corespunzătoare se obține schema echivalentă prezentată în Fig.3.2(c). Pe baza acestei scheme pot fi deduse caracteristicile statice de blocare și conducție, precum și modalitatea de inițializare a conducției prin intermediul electrodului de grilă.

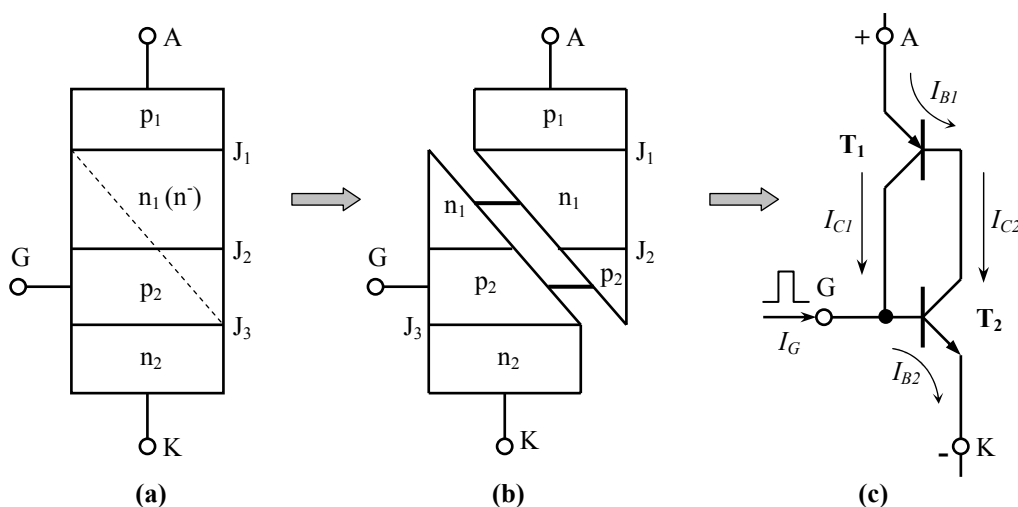


Fig. 3.2 Deducerea schemei echivalente a tiristorului.

Atunci când tensiunea aplicată tiristorului este negativă ($u_{Th} < 0$) tranzistoarele echivalente T_1 și T_2 sunt polarizate invers și, conform celor prezentate în Fig.3.3(a), curentul poate fi considerat nul prin dispozitiv. În realitate apare un curent de scăpări foarte mic de ordinul microamperilor. Dacă tensiunea inversă depășește valoarea U_{BR} (Reverse Breakdown Voltage) tiristorul este străpuns și curentul prin acesta va crește abrupt spre o valoare limitată doar de circuitul exterior. Pentru a evita asemenea situații tiristoarele se aleg în funcție de tensiunea inversă maximă repetitivă U_{RRM} (parametru de catalog), mai mică decât tensiunea de străpungere.

În cazul unei polarizări directe ($u_{Th} > 0$) și în lipsa unei comenzi adecvate tiristorul își păstrează starea de blocare deoarece nici unul din cele două tranzistoare ale schemei echivalente nu poate prelua conducția. Dispozitivul blochează tensiuni directe ale căror valori sunt mai mici decât tensiunea de străpungere directă U_{BO} (Breakover Voltage). De obicei, din fabricație rezultă tensiunea de străpungere directă aproximativ egală cu tensiunea de străpungere inversă ($U_{BR} \approx U_{BO}$).

Deschiderea tiristorului poate fi indusă dacă unul din cele două tranzistoare este adus în conducție. Existența fiecăruia din cei doi curenți de comandă (curenții de bază I_{B1} și I_{B2}) depinde de starea de conducție a tranzistorului complementar. Este suficientă aplicarea unui impuls scurt de curent în grila dispozitivului care să aducă în conducție tranzistorul T_2 și tiristorul intră într-un proces de amorsare sau *deschidere în*

avalanșă. Astfel, prin deschiderea lui T_2 apare curentul de colector I_{C2} care se constituie în curent de bază pentru T_1 ($I_{B1} = I_{C2}$). În consecință, se deschide și tranzistorul T_1 al cărui curent de colector I_{C1} mărește și mai mult curentul de bază al tranzistorului T_2 . Creșterea curentului I_{B2} va conduce la mărirea curentului de colector I_{C2} și așa mai departe. Apare o reacție pozitivă ilustrată în Fig.3.3(a) de translațiile punctului de funcționare de pe caracteristica de blocare directă pe caracteristica de conducție. Atunci când valoarea curentului anodic atinge valoarea de automenținere $i_{Ty} = I_H$ (*holding current* – parametru de catalog) impulsul de comandă sau curentul de grilă (I_G) poate să dispară.

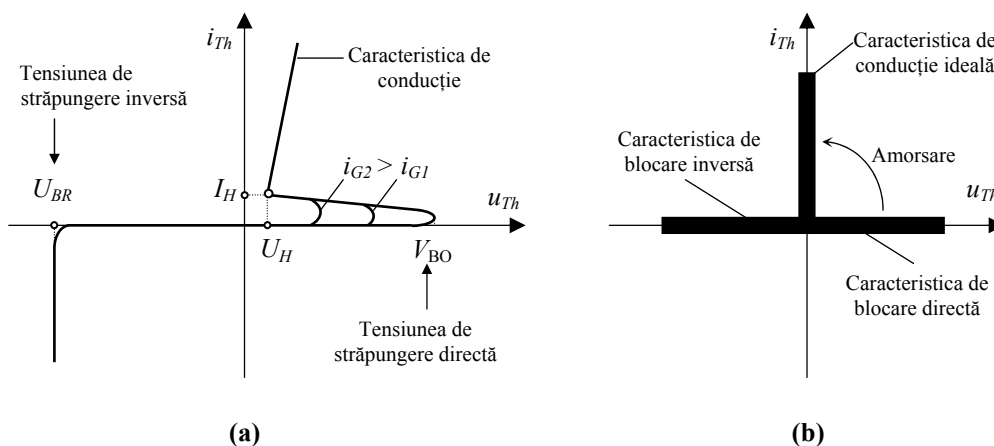


Fig. 3.3 (a) Caracteristicile u - i reale; (b) Caracteristicile u - i idealizate.

În starea de blocare directă, ca și în cazul blocării inverse, curentul prin tiristor poate fi aproximat ca fiind nul. Se obțin, astfel, cele două caracteristici specifice unui întrerupător ideal, respectiv caracteristica de blocare directă și caracteristica de blocare inversă din Fig.3.3(b). De asemenea, caracteristica de conducție poate fi aproximată cu una ideală, deoarece căderea de tensiune în conducție la un tiristor este redusă, cuprinsă în gama $(1\div 3)V$. Valorile ridicate sunt specifice tiristoarelor de mare putere.

4. Comanda în fază a tiristoarelor și a triacelor

În Fig.3.4 este prezentată cea mai simplă structură de *redresor comandat* ce realizează conversia alternativ-continuu (redresor 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 curent continuu. Pentru simplitate s-a ales o sarcină pur rezistivă formată doar din rezistența R .

Pentru înțelegerea funcționării convertorului, 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 blocul 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.

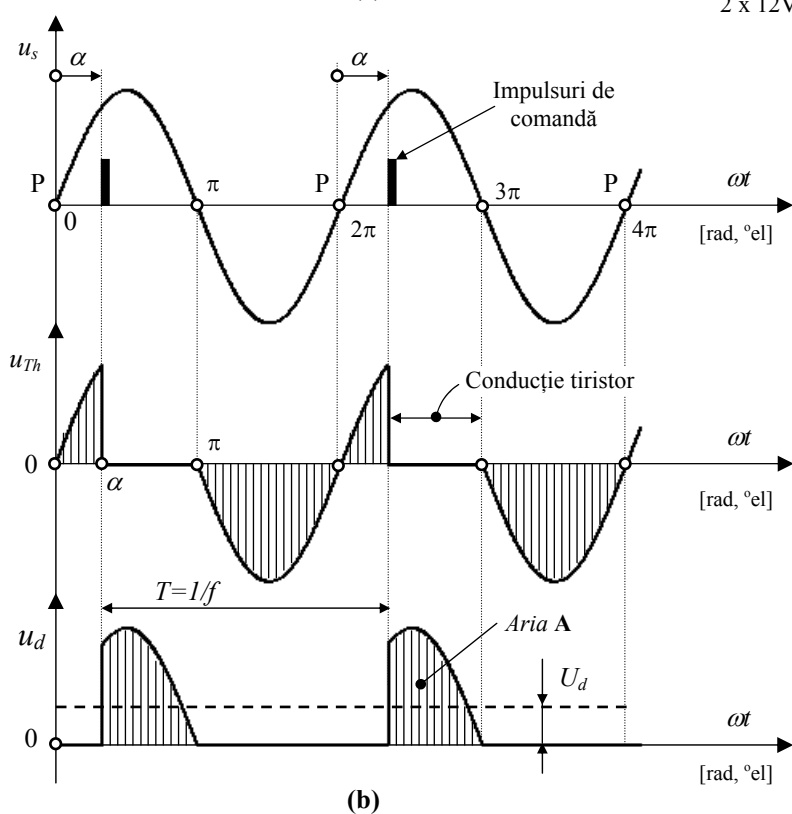
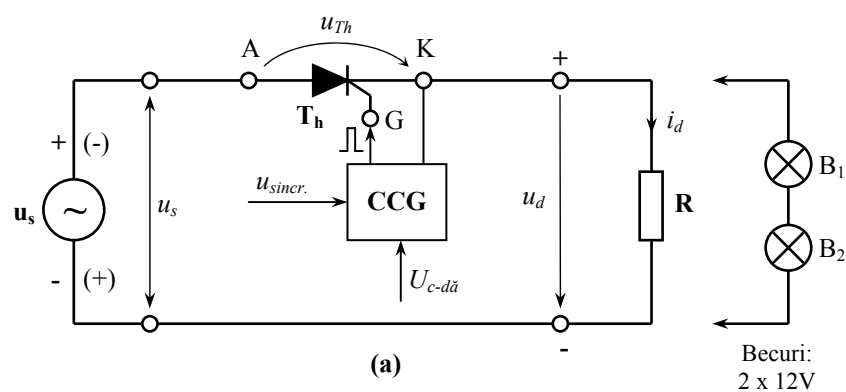


Fig. 3.4 Principiul comenzii în fază a unui tiristor.

Analizând polaritățile sursei u_s din Fig.3.4 (a) 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).

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.3.4 (b)) 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 unui 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 α , 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 α , 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 α 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 fază* a tiristoarelor sau a triacelor.

5. Principiul redresării comandate

În Fig.3.4(b) sunt prezentate formele de undă corespunzătoare convertorului din Fig.3.4(a) atunci când acesta este comandat cu un unghi oarecare $\alpha < 180^\circ$ și 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). Sunt de preferat lămpile deoarece prin reglarea unghiului de comandă efectul este mai spectaculos, sesizat vizual prin modificarea intensității luminoase a acestora.

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), **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. În acest fel, 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.3.4.b):

$$u_d(t) = \begin{cases} 0 & \text{pentru } 0 \leq \omega t < \alpha \\ \sqrt{2} \cdot U_s \sin \omega t & \text{pentru } \alpha \leq \omega t \leq \pi \\ 0 & \text{pentru } \pi < \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (3.1)$$

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 ωt 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:

$$U_{d\alpha}^{\text{not}} = \text{val. medie } u_d(t) = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} u_d(t) \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^T u_d(t) \cdot dt \quad (3.2)$$

Dacă în relația (3.2) se efectuează următoarea schimbare de variabilă $\omega t = x$ limitele integralei iau valorile: $\begin{cases} \text{pentru } t_1 = 0 \Rightarrow x_1 = \omega \cdot t_1 = 0, \\ \text{pentru } t_2 = T \Rightarrow x_2 = \omega \cdot t_2 = (2\pi / T) \cdot T = 2\pi \end{cases}$

Astfel, relația (3.2) devine:

$$\begin{aligned} U_{d\alpha} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_d(t) \cdot dt = \frac{1}{2\pi} \left(\int_0^{\alpha} 0 \cdot dt + \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_s \sin x \cdot dt + \int_{\pi}^{2\pi} 0 \cdot dt \right) = \\ &= \frac{1}{2\pi} \left(\int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} U_s \sin x \cdot dt \right) = \frac{1}{2\pi} \cdot \text{Aria } \mathbf{A} = \frac{\sqrt{2} U_s}{2\pi} \cdot (-\cos x) \Big|_{\alpha}^{\pi} = \\ &= \frac{\sqrt{2} U_s}{2\pi} \cdot (1 - \cos \alpha) \geq 0 \quad \text{pentru } 0 \leq \alpha \leq \pi \end{aligned} \quad (3.3)$$

Rezultatul din (3.3) evidențiază următoarele aspecte:

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

6. Circuite de comandă pentru tiristoare și triace

Fiind un dispozitiv din categoria celor cu amorsare controlată, tiristorul nu poate funcționa fără un circuit de comandă. Rolul acestuia este de a furniza impulsurile de curent în grilă pentru a-l bascula în starea de conducție la momentele dorite. În cazul unei structuri complexe cu mai multe tiristoare se preferă un circuit comun de comandă care să asigure semnalele de amorsare pentru toate tiristoarele. Acest bloc distinct în structura sistemului electronic de putere este denumit, de obicei, ca *circuit de comandă pe grilă* (CCG) sau *dispozitiv de comandă pe grilă* (DCG). În literatura de limbă engleză este referit cu titulatura de *thyristor gate drive circuit* sau *gate trigger circuit*.

Deoarece triacul este echivalat cu doua tiristoare conectate în antiparalel principiile de comandă pentru tiristoare și circuitele care implementează aceste principii pot fi utilizate cu succes și pentru triace.

Circuitele de comandă pe grilă pentru tiristoare pot fi realizate exclusiv cu ajutorul unor componente electronice discrete de mică putere sau cu ajutorul integratelor specializate de comandă (ex. β AA145). Realizarea unor circuite de comandă fără a se apela la integrate dedicate se mai justifică în prezent doar pentru structurile de forță simple care includ, de exemplu, tiristoare sau triace de putere mică. Varianta unui circuit de comandă cu componente discrete devine în acest caz simplă și economică. Foarte des sunt utilizate pentru variatoarele monofazate de tensiune alternativă circuite de comandă care includ tranzistoare unijonctiune (TUI).

În echipamentele electronice pretențioase, unde blocul de comandă trebuie să implementeze funcții multiple, circuitele de comandă moderne utilizează integrate dedicate. Acestea sunt capabile să realizeze *comanda în fază* a tiristoarelor, așa cum este descrisă în secțiunea anterioară pe ambele alternanțe a tensiunii alternative. Sunt oferite numeroase de asemenea integrate (UAA145). Principiul lor de funcționare este, în mare, asemănător și poate fi descris aproximativ printr-o aceeași schemă bloc. Trebuie precizat că aceste integrate nu pot funcționa singure. Ele au nevoie în primul rând de o alimentare, de obicei o tensiune dublă și de o schemă de montaj prin care sunt setați anumiți parametri de funcționare (ex. durata impulsului de comandă).

Este recomandat ca circuitele de comandă ale tiristoarelor să realizeze următoarele funcții:

- funcția de sincronizare
- funcția de separare galvanică
- funcția de conversie semnal de comandă – unghi de comandă (conversie tensiune-timp)
- funcția de formare a impulsului de comandă
- funcții de protecție

Pentru a implementa aceste funcții circuitul de comandă poate fi structurat într-o schemă bloc funcțională așa cum se prezintă în Fig.3.5. Aceasta este capabilă să realizeze comanda în fază a unei structuri de forță cu tiristoare sau triace alimentată cu o singură tensiune alternativă. S-a considerat cazul mai complex de comandă al unei punți monofazate cu patru tiristoare $T_{h1} \div T_{h4}$. Pentru un convertor trifazat circuitul de comandă va cuprinde trei asemenea scheme.

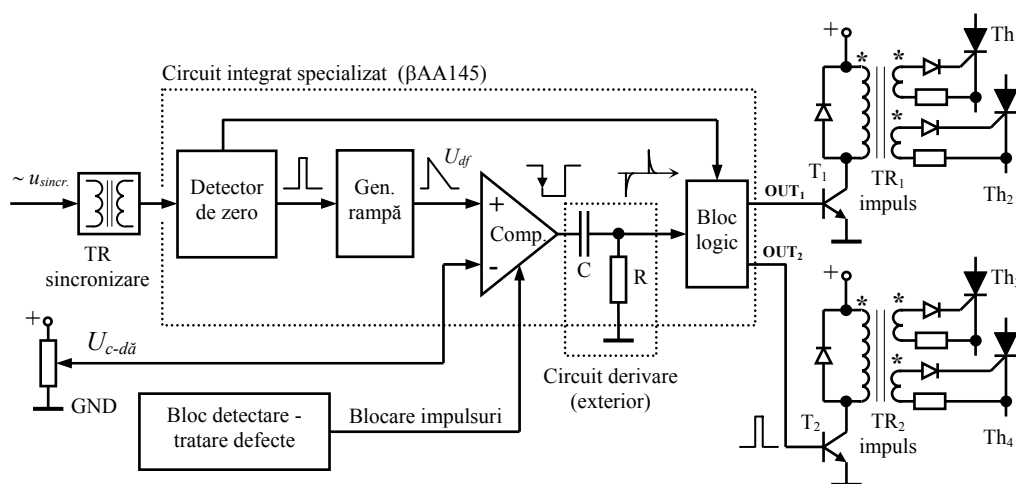


Fig. 3.5 Schema bloc a unui circuit de comandă pentru o punte monofazată cu tiristoare.

a) Funcția de sincronizare este realizată de primul bloc numit *detector de zero*. Așa cum îi sugerează și numele acesta sesizează trecerile prin zero ale tensiunii de sincronizare $u_{sincr.}$. La ieșirea detectorului de zero se obțin *impulsuri de zero* care marchează în timp punctele de comutație naturală, P pentru semialternațele pozitive și N pentru semialternațele negative (vezi Fig.3.6). Tensiunea de sincronizare este în fază cu tensiunea ce alimentează structura de forță fiind obținută din aceasta prin intermediul unui *transformator de sincronizare* care asigură separarea galvanică și, totodată, adaptarea amplitudinii tensiunii la cerințele schemei de comandă.

b) **Funcția de conversie tensiune–timp** permite fixarea unui anumit unghi electric de comandă α prin intermediul unei tensiuni de comandă $\rightarrow U_{c-d\grave{a}}$. Principiul care stă la baza conversiei unei mărimi electrice într-un interval de timp constă în compararea unei rampe de tensiune cu valoarea $U_{c-d\grave{a}}$. În acest scop pe intervalele în care se dorește trimiterea impulsurilor de comandă, decalate cu unghiul α față de punctul de comutație naturală, *generatorul de rampă* formează o rampă de tensiune crescătoare sau descrescătoare.

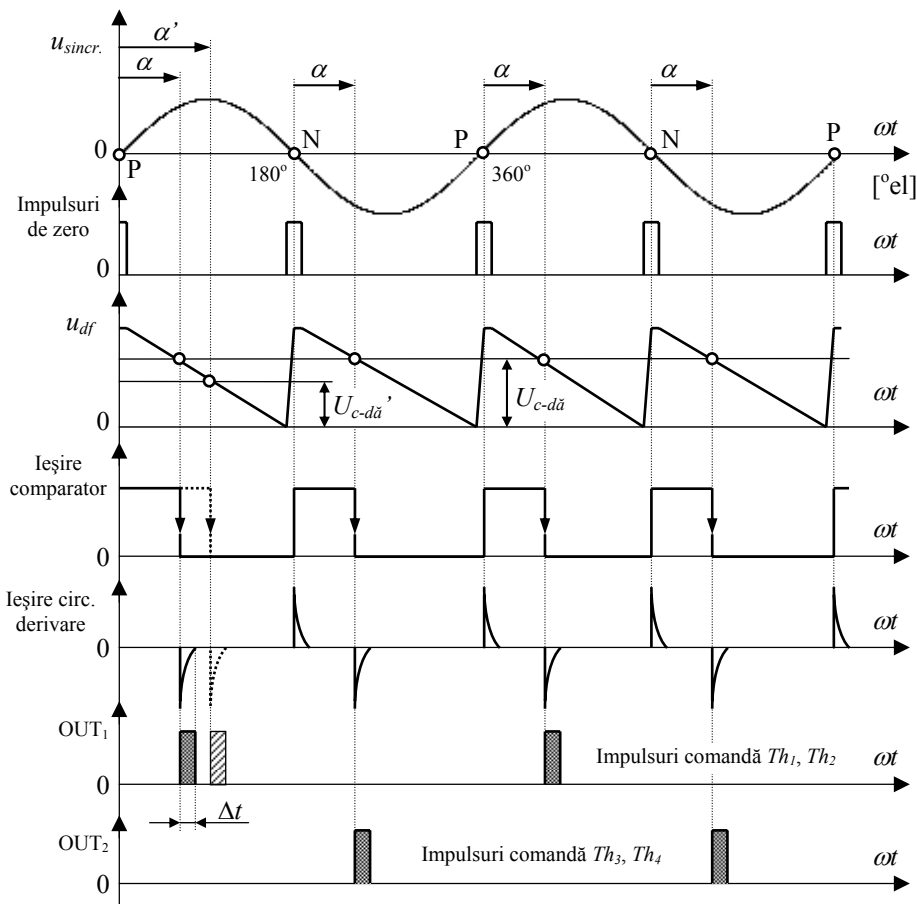


Fig. 3.6 Formele de undă corespunzătoare circuitului de comandă pe grilă prezentat în Fig.3.5

Pentru structurile complexe cu mai multe tiristoare se dorește o comandă selectivă a acestora, pe ambele semialternanțe ale tensiunii de alimentare. Astfel, generatorul de rampă trebuie să fie capabil să furnizeze câte o rampă pe fiecare semialternanță, așa cum se prezintă în Fig.3.6. Rezultă la ieșirea generatorului de rampă un semnal periodic care poartă denumirea de *semnal dinte de fierăstrău* – U_{df} .

Acesta se obține, de obicei, la bornele unei capacități care va fi încărcată sau descărcată lent în timp. Dacă se dorește obținerea unei rampe liniare încărcarea sau descărcarea condensatorului se va face la curent constant prin intermediul unui *generator de curent constant* realizat cu ajutorul unui tranzistor:

$$\left. \begin{array}{l} u_C = \frac{1}{C} \cdot \int i_C \cdot dt \\ i_C = I_C = \text{const.} \end{array} \right\} \Rightarrow u_C = \frac{1}{C} \cdot \int I_C \cdot dt = \frac{I_C}{C} \cdot \int dt = K \cdot t \quad (K = \text{const.}) \quad (3.1)$$

Relațiile (3.1) demonstrează că prin menținerea curentului de încărcare sau de descărcare a capacității C la o valoare constantă ($i_C = I_C = \text{const.}$) se forțează o evoluție liniară a tensiunii la bornele acestuia ($u_C = K \cdot t$ - ecuația unei drepte). *Liniaritatea rampei de tensiune a semnalului dinte de fierăstrău asigură liniaritatea funcției globale de transfer $\alpha = f(U_{c-da})$ a circuitului de comandă pe grilă.*

Pentru varianta semnalului dinte de fierăstrău cu rampă descrescătoare, așa cum se arată în Fig.3.6, de fiecare dată pe durata impulsului de zero este încărcată brusc capacitatea pe care se culege semnalul. Deoarece încărcarea sau descărcarea capacității nu poate fi realizată instantaneu, impulsurile de zero trebuie să persiste un interval de timp minim pentru a permite tensiunii condensatorului să atingă amplitudinea dorită a dintelui. Dacă durata impulsului de zero este mai mare decât valoarea minimă optimă apare un interval în care semnalul dinte de fierăstrău este retezat (se păstrează amplitudinea maximă a dintelui). În acest interval nu se poate trimite impuls de comandă pe grilă. Din acest motiv lățimea impulsurilor de zero trebuie ajustată cu grijă, facilitate aflată la dispoziția utilizatorului prin intermediul unor componente exterioare integratului de comandă. În concluzie, din Fig.3.6 rezultă că durata impulsului de zero limitează gama de reglaj a unghiului de comandă, atât la minim cât și la maxim:

$$0 < \alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max} < 180^\circ \quad (3.2)$$

Dacă pretențiile referitoare la precizia de comandă sunt mici se poate recurge la varianta mai simplă și mai ieftină de a înlocui generatorul de curent constant cu o rezistență de descărcare. În acest caz rampa dintelui de fierăstrău este neliniară ceea ce determină neliniaritatea funcției de transfer a circuitului de comandă. Pentru diminuarea acestei neliniarități se recurge la o descărcare spre o tensiune negativă. Astfel, rampa se va constitui din prima parte a unei exponențiale care poate fi considerată, cu o anumită aproximație, cvasiliniară.

Pentru varianta semnalului dinte de fierăstrău cu o rampă de tensiune crescătoare la sfârșitul fiecărei semialternanțe se va recurge la o descărcare rapidă a capacității de pe care se culege semnalul. Astfel pe durata impulsului de zero este pregătită capacitatea pentru o nouă rampă de tensiune crescătoare în semialternanța ce urmează. Și în acest caz durata impulsului de zero va limita gama de variație a unghiului de comandă.

Semnalul dinte de fierăstrău u_{df} este aplicat la intrarea unui comparator (*Comp.*) împreună cu tensiunea de comandă $U_{c-dă}$. În momentul în care rampa dintelui egalează $U_{c-dă}$, comparatorul basculează și în forma de undă a semnalului logic de la ieșirea acestuia apare un front descrescător ce va marca momentul de la care trebuie aplicat pe grila tiristoarelor impulsul de comandă. În Fig.3.6 se prezintă felul în care se modifică unghiul de comandă de la valoarea α la valoarea α' dacă tensiunea de comandă se modifică de la $U_{c-dă}$ la $U_{c-dă}'$. Este o ilustrare sugestivă a principiului de conversie tensiune-timp.

c) **Funcția de formare a impulsului** permite generarea unui impuls de o anumită lățime Δt după apariția frontului activ din forma de undă a semnalului după comparator. Această funcție, pe care în domeniul circuitelor logice o poate realiza monostabilul, este obținută, de obicei în cazul integratelor de comandă pe grilă, cu ajutorul unui circuit derivator R - C , exterior integratului. Astfel, fronturile semnalului de la ieșirea blocului comparator sunt transformate în impulsuri a căror formă este prezentată în Fig.3.6. Lățimea acestora, care impune și lățimea impulsurilor de comandă pe grilă poate fi ajustată prin valoarea constantei de timp a circuitului derivator $\tau = R \cdot C$.

Doar impulsurile utile (negative) obținute la ieșirea circuitului derivator sunt preluate de *blocul logic* care urmează circuitului derivativ. Acesta are rolul de a distribui alternativ impulsurile la cele două ieșiri OUT_1 și OUT_2 , în funcție de semialternanța pe care apar. În acest fel, tiristoarele vor primi impulsurile de comandă pe intervalele în care sunt polarizate direct.

d) **Funcția de separare galvanică** dintre blocul de comandă și partea de forță a sistemelor electronice de putere este foarte importantă deoarece asigură, atât protecția personalului care execută intervenții (reglaje, depanări etc.) în timpul funcționării, cât și protecția schemei de comandă contra perturbațiilor induse de schema de forță. În aplicațiile nepretențioase de putere mică funcția de separare galvanică este neglijată.

Pentru a respecta funcția de separare galvanică a circuitului de comandă pe grilă impulsurile sunt trimise spre grila tiristoarelor prin intermediul unor *transformatoare de impuls*. Aceste elemente de circuit cu puteri relativ mici (10÷20)VA prezintă următoarele avantaje față de varianta optocuploarelor:

- nu necesită surse suplimentare de energie;
- utilizând secundare multiple același impuls de comandă poate fi aplicat mai multor tiristoare simultan.

În Fig.3.5 se prezintă etajul final al unui circuit de comandă pe grilă pentru un redresor monofazat în punte cu tiristoare. Topologia acestuia cuprinde patru tiristoare notate în schemă cu Th_1 , Th_2 , Th_3 și Th_4 . Tiristoarele Th_1 și Th_2 vor lucra pe semialternanța pozitivă, iar tiristoarele Th_3 și Th_4 vor lucra pe semialternanța negativă. Pentru fiecare pereche s-a utilizat un singur transformator de impuls având câte două secundare aferente celor două tiristoare comandate pe semialternanța respectivă.

Primarul fiecărui transformator va fi alimentat pe intervalul în care trebuie trimis impulsul de comandă pe grilă de către cele două tranzistoare bipolare T_1 și T_2 pilotate de ieșirile OUT_1 și OUT_2 ale blocului logic. Trebuie avut grijă ca transformatoarele de impuls să fie bine calculate, astfel încât, pentru cel mai lat impuls de comandă, transformatoarele să nu se satureze la un moment dat, situație echivalentă cu un scurt circuit prin cele două tranzistoare T_1 și T_2 . Fiecare transformator de impuls trebuie însoțit de câte o diodă în antiparalel cu primarul pentru a permite descărcarea energiei în câmpul acestora după blocarea tranzistoarelor bipolare. Deoarece pe durata descărcării curentul prin primarul transformatorului este descrescător, derivata fluxului își schimbă semnul ($d\Phi/dt < 0$) și în secundare vor apărea pulsuri de tensiune negativă. Pentru a proteja joncțiunea grilă-catod (J_3) împotriva unei tensiuni inverse a cărei amplitudine este necontrolată se utilizează diode de sens în fiecare secundar al transformatorului de impuls, așa cum se prezintă în Fig.3.5. Rezistența din circuitele secundare au rol de a limita curentul de grilă pe durata impulsurilor pozitive.

e) Funcția de protecție este implementată cu ajutorul unui *bloc de detectare-tratare defecte*. Acesta trebuie să fie capabil să monitorizeze anumite variabile din sistemul electronic de putere cum ar fi: curenții prin tiristoare, curentul de sarcină, tensiunile de alimentare etc. Cel mai simplu asemenea bloc trebuie să includă obligatoriu o protecție la curenți de scurt circuit sau suprasarcină. În momentul în care este sesizată apariția unei situații de avarie este decisă stoparea impulsurilor de comandă. Se intervine, de obicei, asupra comparatorului a cărui funcționare va fi blocată.

Trebuie precizat că, în cazul structurilor cu tiristoare protecția acționează cu o anumită întârziere deoarece dispozitivele surprinse în conducție la apariția defectului trebuie să suporte supracurenții până sunt întrunite condițiile de blocare prin polarizare inversă. Practic, circuitul de protecție este util doar pentru tiristoarele care urmează să preia conducția. Din acest motiv sistemul de protecție a schemelor de forță trebuie completat și cu alte mijloace de protecție, cum ar fi de exemplu utilizarea siguranțelor ultrarapide.

7. Schema de montaj a circuitului integrat de comandă în fază a tiristoarelor și triacelor $\beta AA 145$ (UAA 145)

Circuitul specializat pentru comanda în fază a tiristoarelor și a triacelor este realizat sub forma unui integrat monolitic închis într-o capsula de tip TABS-A a cărei formă și configurație a terminalelor este data în Fig.3.7. Acesta este produs în România cu denumirea de $\beta AA 145$, iar în cataloagele firmelor străine figurează cu denumirea de UAA145. Cu toate că tehnologia de fabricație a evoluat și pot apărea mici diferențe la nivelul schemele interne de principiu ale celor două integrate echivalente, schema bloc funcțională este identică și este asemănătoare cu schema din Fig.3.5 pe structura căreia au fost introduse și descrise funcțiile specifice unui circuit de comandă pentru tiristoare comandate în fază.

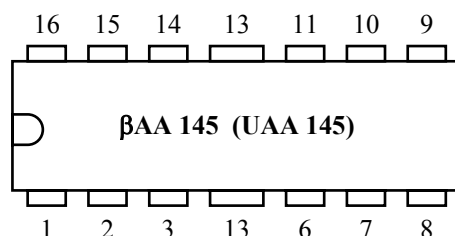


Fig. 3.7 Capsula circuitului integrat β AA 145 (UAA 145)

Și configurația și semnificația pinilor este aceeași la cele două integrate echivalente β AA 145 și UAA 145 după cum urmează:

- | | |
|--|---------------------------------------|
| 1 – Alimentare tens. pozitivă (+Vcc) | 10 – Imp. c-dă pe alternanța negativă |
| 2 – Ieșire monostabil (comparator) | 11 – Fixare durată impulsuri comandă |
| 3 – Masă (GND) | 13 – Alimentare curent negativ (I) |
| 6 – Blocare impulsuri | 14 – Imp. c-dă pe alternanța pozitivă |
| 7 – Semnal dinte fierăstrău (U_{df}) | 15 – Referința tensiune -8V |
| 8 – Tens. comandă fază (unghi α) | 16 – Impulsuri de zero |
| 9 – Intrare sincronizare | |

Legăturile interne ale pinilor prezentați mai sus cu blocurile funcționale corespunzătoare integratului de comandă sunt prezentate în Fig.3.8. Această figură mai prezintă în mod sintetic și intuitiv toate elementele de circuit care trebuie să însoțească integratul pentru a putea funcționa. Prin intermediul acestora utilizatorul poate să ajusteze toți parametrii de funcționare într-o aplicație concretă. Se obține astfel **schema de montaj** a circuitului integrat de comandă în fază a tiristoarelor și triacelor β AA 145 (UAA 145). În continuare vor fi enumerate elementele de circuit din schema de montaj și la fiecare va fi prezentat pe scurt rolul său funcțional, precum și influența valorii acestuia asupra semnalelor din circuit:

- **Divizorul rezistiv R_1 - R_2** , conectat la pinul 9, prin intermediul căruia se ajustează lățimea impulsurilor de zero obținute la ieșirea detectorului de nul. În funcție de valoarea celor două rezistențe (a raportului de divizare) se aplică o anumită fracțiune din tensiunea de sincronizare $u_{sincr.}$ la intrarea detectorului de nul care va genera impuls de trecere prin zero doar pe durata în care această tensiune trece prin zero și se află cuprinsă în intervalul $(-0,7) \div (+0,7)V$. Evident că prin modificarea amplitudinii sinusoidei $u_{sincr.}$ de către divizorul R_1 - R_2 se modifică durata în care tensiunea aplicată pinului 9 se află în acest interval modificându-se implicit și lățimea impulsurilor de zero. Pe durata impulsurilor de zero este încărcat condensatorul C_2 exterior integratului la valoarea cerută de vârful semnalului dinte de fierăstrău (+8V). Dacă impulsul de zero este prea îngust condensatorul nu reușește să se încarce până la amplitudinea de 8V, iar dacă

impulsul de zero este prea lat vârful semnalului dinte de fierăstrău apare cu un palier plat care va reduce gama de reglaj a unghiului de comandă α a tiristorului.

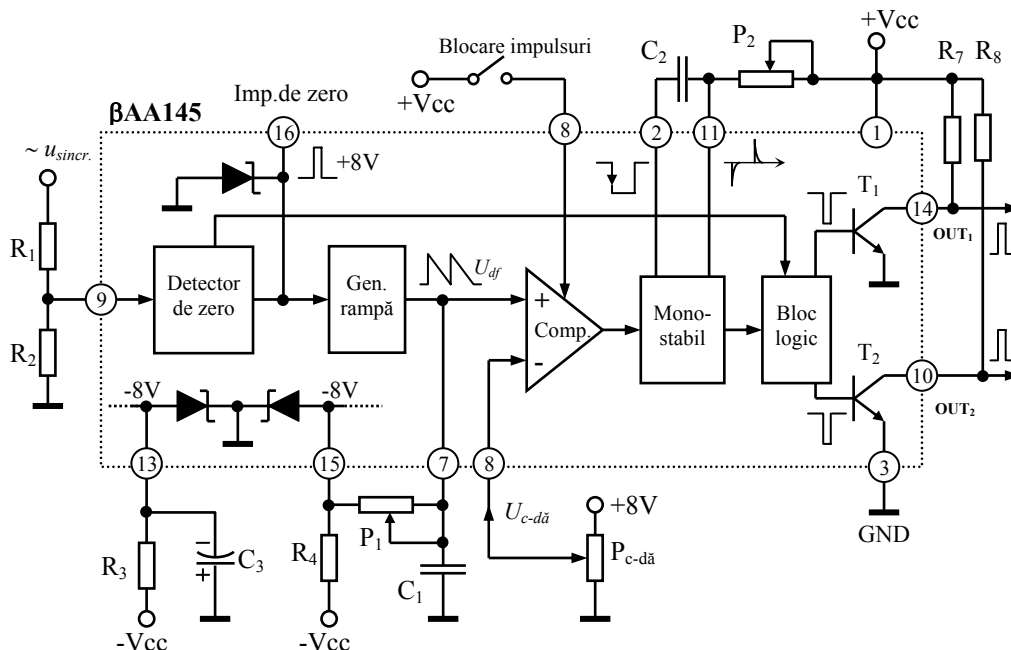


Fig. 3.8 Schema bloc și de montaj a circuitului integrat βAA 145 (UAA 145)

- **Grupul R_3 – C_3** permite obținerea tensiunii stabilizate de -8V necesare circuitului integrat. Aceasta se obține din tensiunea de alimentare negativă (-15Vcc) aplicată pinului 13 prin rezistența R_3 . Stabilizarea este realizată cu ajutorul unei diode Zener sintetizate în structura internă a integratului. Condensatorul C_3 joacă rol de rezervor tampon de energie și de filtru al tensiunii negative.
- **Grupul P_1 – C_1** permite obținerea semnalului dinte de fierăstrău U_{df} . La fiecare trecere prin zero a tensiunii de sincronizare condensatorul C_1 este încărcat rapid la o tensiune de +8V după care urmează o descărcare lentă prin potențiometru P_1 pentru a se obține panta descrescătoare a semnalului U_{df} . În scopul obținerii unei pante cât mai liniară s-a recurs la artifiiciul descărcării condensatorului C_1 spre un potențial de -8V obținut la pinul 15 în același fel ca la pinul 13. Din exponențiala de descărcare spre -8V se folosește doar prima parte, respectiv până la potențialul de 0V pentru ca rampa semnalului U_{df} să fie cât mai liniară (vezi funcția de conversie tensiune-timp). Dacă în aplicații pretențioase se dorește a rampă strict liniară în locul potențiometrului P_1 se poate utiliza un generator de curent constant. Prin intermediul potențiometrului P_1 sau a valorii curentului generatorului de curent constant se modifică panta rampei semnalului U_{df} .

- **Grupul $P_2 - C_2$** împreună cu monostabilul intern circuitului fixează lățimea impulsurilor de comandă de la ieșirea integratului. Joacă același rol cu a circuitului derivator descris în secțiunea anterioară. Astfel, dacă la pinul 2 se obține un semnal dreptunghiular la pinul 11 se obține un semnal derivat (vezi Fig.3.6). Utile sunt doar impulsurile negative date de frontul descrescător a semnalului dreptunghiular. Acestea vor fi preluate de blocul logic, sunt formate și distribuite alternativ la cele două ieșiri 14 respectiv 10 în corespondență cu semialternanța tensiunii de sincronizare. Prin intermediul potențiometrului P_2 poate fi ajustată lățimea impulsurilor de comandă.
- **Rezistențele R_7 și R_8** fără de care nu pot fi obținute impulsurile de comandă deoarece integratul are ieșiri tip *tranzistor cu colector în gol*. Aceasta este o facilitate care îi conferă flexibilitate în diferite aplicații deoarece se poate face adaptarea cu orice tip de etaj prevăzut după circuitul integrat de comandă (vezi schema de laborator).

În afară de elementele enumerate mai sus, schema de montaj a integratului de comandă $\beta AA 145$ (UAA 145) poate să mai cuprindă un potențiometrul de comandă ($P_{c-dă}$) care furnizează tensiunea $U_{c-dă}$ aplicată la pinul 8 și un buton de blocare a impulsurilor. Aceste elemente pot fi înlocuite de o schemă de comandă automată sau de reglare, respectiv de o schemă care implementează funcții de protecție, așa cum a fost descris în paragraful 6.

8. Schema de studiu în laborator a integratului de comandă $\beta AA 145$

Pentru studiul funcționării integratului specializat $\beta AA 145$ (UAA 145), pentru oscilografiera formelor de undă pe diferiți pini ai acestuia și pentru trasarea funcției intrare-ieșire ($\alpha = f(U_{c-dă})$) în laboratorul de Electronică de Putere sunt disponibile mai multe circuite de comandă, cu acest tip de integrat. Schema unui asemenea circuit cu valorile uzuale ale componentelor aferente este prezentă în Fig.3.9, iar fotografia în Fig.3.10. Aceasta este structurată pe trei etaje: sursa de alimentare, schema de montaj a circuitului $\beta AA 145$, etajul final.

a) Sursa de alimentare

Este o sursă dublă stabilizată de $\pm 15V_{dc}$, realizată într-o configurație simplă. Sursa cuprinde un transformator cu două secundare care alimentează puntea redresoare și furnizează, în același timp, tensiunea de sincronizare $u_{sincr.}$ integratului $\beta AA 145$. Cele două tensiuni continue nestabilizate obținute la ieșirea punții redresoare față de punctul median al transformatorului, declarat masă (GND), sunt filtrate cu ajutorul condensatoarelor electrolitice C_1 și C_2 ($2200\mu F/50V$). Stabilizarea acestor tensiuni este obținută cu ajutorul stabilizatoarelor monolitice LM7815 pentru $+15V_{dc}$ și LM7915 pentru $-15V_{dc}$.

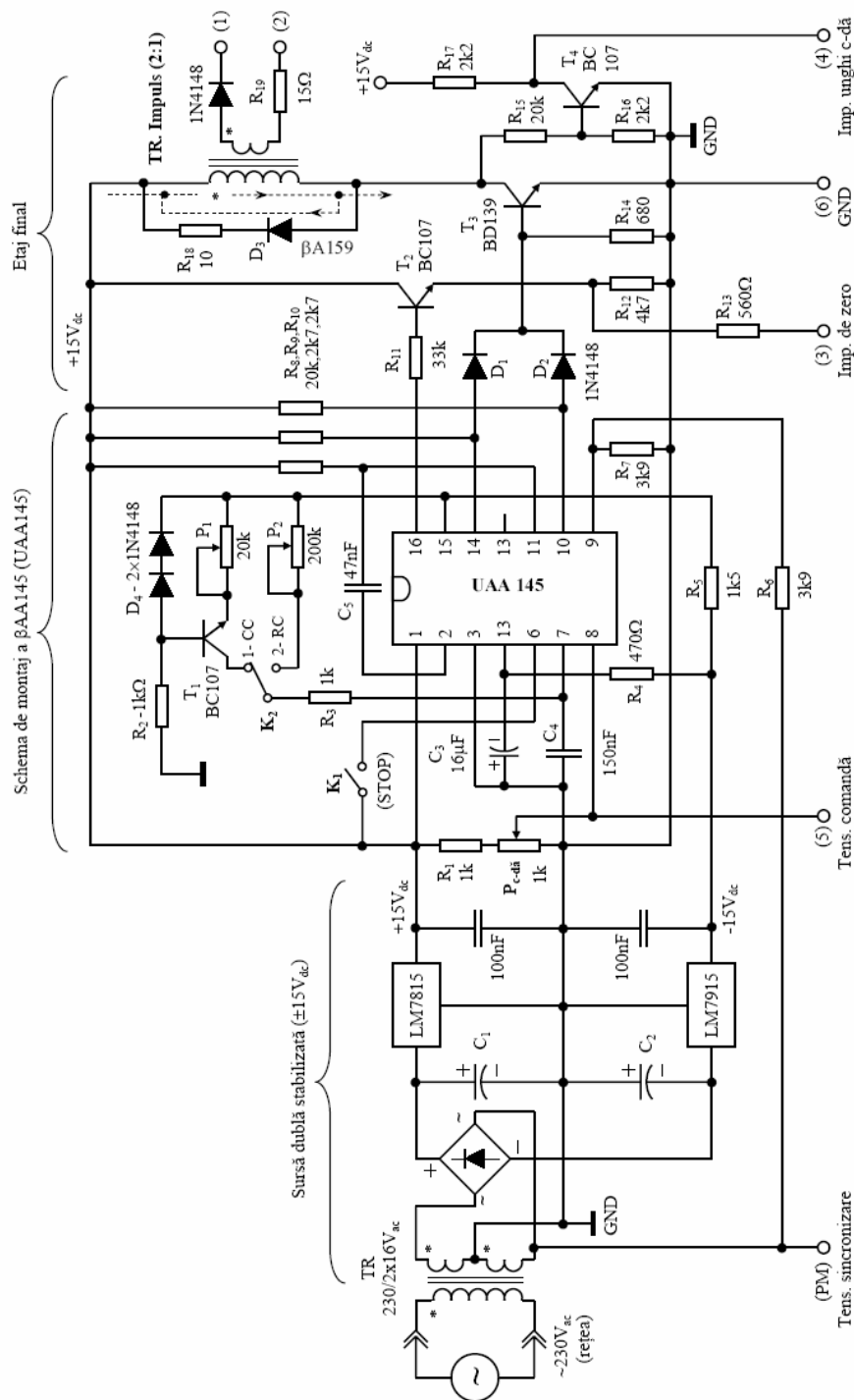


Fig. 3.9 Schema montajului de laborator pentru studiul circuitului integrat de comandă $\beta A A 145$ (UAA145)

b) Schema de montaj a circuitului β AA 145.

În partea mediană a plăcii recunoaștem schema de montaj a integratului β AA145 cu toate elementele de circuit exterioare descrise în paragraful (7). Trebuie precizat că pentru generarea dintelui de fierăstrău s-a prevăzut un comutator (K_2) care poate selecta descărcarea condensatorului C_4 spre pinul 15 printr-o ramură formată dintr-un generator de curent constant (CC - poziția 1) sau printr-o ramură exclusiv rezistivă formată din semireglabilul P_2 (RC - poziția 2). Un curent constant permite descărcarea liniară a condensatorului și implicit o rampă liniară a semnalului dinte de fierăstrău. Astfel, se obține o directă proporționalitate (funcție de transfer liniară) dintre tensiunea și unghiul de comandă. În varianta descărcării condensatorului prin P_2 , rampa descrescătoare a dintelui de fierăstrău este o porțiune de exponențială care determină o funcție de transfer neliniară între tensiunea de comandă și unghiul α .

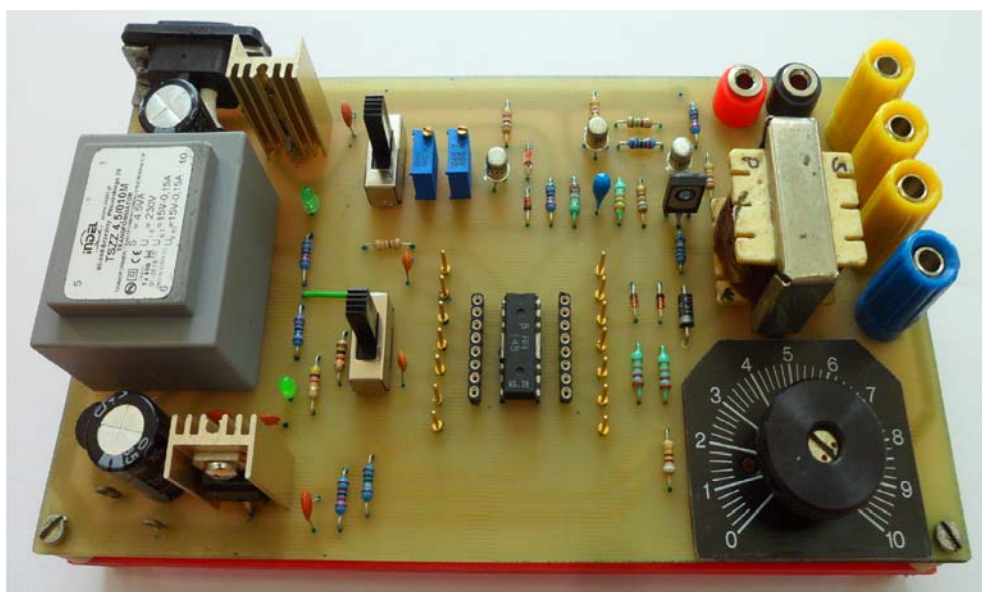


Fig. 3.10 Imaginea montajului de laborator pentru studiul integratului de comandă specializat β AA145 (UAA145).

Generatorul de curent constant este obținut cu ajutorul unui tranzistor (T_1), a unui semireglabil (P_1) și a două diode (D_4) polarizate direct prin intermediul unei rezistențe (R_2). De pe cele două diode înseriate se preia o cădere de tensiune constantă care impune, de asemenea, o tensiune constantă pe semireglabilul P_1 , deci un curent constant prin acesta care este de fapt curentul de descărcare a condensatorului C_4 .



Fig. 3.11 Circuit de comandă cu $\beta AA145$ pentru diferite structuri de redresoare monofazate (cu maxim 4 tiristoare – vezi Fig.3.5) ; (a) imagine din interiorul carcasei; (b) panoul frontal al circuitului.

c) Etajul final

Etajul final al montajului de laborator pentru studiul circuitului integrat $\beta AA145$ este conceput pentru a prelua semnalele utile de la acesta, a le prelucra și amplifica în scop de a comanda efectiv un tiristor, de a fi oscilografiate sau de a fi utilizate pentru măsurarea unghiului de comandă. Astfel impulsurile de comandă generate de integrat la pinii 10 și 14 sunt sumate cu ajutorul unui circuit logic de tip SAU ($D_1 + D_2$) și aplicate pe baza tranzistorului T_3 . Acesta le va transmite *transformatorului de impuls*. La apariția fiecărui impuls de comandă, tranzistorul T_3 este deschis și primarul transformatorului este alimentat între bara de $+15V_{cc}$ și masă (GND). Cât timp transformatorul nu intră în saturație se instalează un regim tranzitoriu de creștere a curentului prin înfășurarea primară care va conduce la o variație crescătoare a fluxului magnetic și implicit la apariția impulsurilor de comandă în secundar. După blocarea tranzistorului T_3 curentul din primar trebuie să circule în continuare până la descărcarea energiei din câmpul magnetic al transformatorului motiv pentru care s-a prevăzut dioda de descărcare D_3 . Pe durata descărcării energiei din câmp fluxul magnetic este descrescător și în secundar va apare un puls negativ de tensiune. Deoarece pe grila tiristoarelor se aplică doar impulsuri pozitive de comandă se introduce în secundarul transformatorului și implicit în circuitul de grilă al tiristorului, o diodă și o rezistență de limitare a curentului de comandă.

Pe durata existenței impulsurilor de comanda T_3 este saturat și T_4 este blocat. Astfel, de pe colectorul acestuia din urmă se pot culege impulsuri sincrone cu impulsurile de comandă generate de integrat. Acestea vor fi utilizate de un fazmetru numeric pentru marcarea sfârșitului unghiului de comanda. Pentru marcarea momentului de început a unghiului electric de comandă sunt folosite impulsurile de zero obținute, după cum s-a precizat, pe terminalul 16 al integratului. Deoarece catalogul recomandă o sarcină foarte mică la pinul 16, aceste impulsuri sunt preluate prin intermediul unui repetor pe emitor ($T_2 + R_{11} + R_{12}$) și aplicate unei borne de măsură. Toate semnalele care interesează la exteriorul plăcii sunt aduse la borne de măsură numerotate (vezi Fig.3.9).

Circuitul de comandă cu imaginea din Fig.3.11 utilizează două transformatoare de impuls pilotate separat de către cele două ieșiri ale integratului β AA145, așa cum se prezintă schema din Fig.3.5. Fiecare transformator de impuls, la rândul lui, are câte două secundare separate galvanic. Astfel, se pot comanda până la patru tiristoare simultan (două pe semilaternanța pozitivă și două pe semialternața negativă) integrate în diferite redresoare monofazate: cu punct median, în punte comandată sau semicomandată etc.

9. Modul de lucru

1. Se vor studia aspectele teoretice referitoare la tiristor din prima parte a referatului: simbol, structură semiconductoare, caracteristici statice;
2. Se va analiza schema echivalentă a tiristorului și posibilitatea deschiderii acestuia cu ajutorul unor impulsuri de comandă;
3. Se va analiza în ce constă comanda în fază a tiristoarelor;
4. Se vor studia aspectele generale cu privire la circuitele de comandă pentru tiristoare și triace: schemă bloc funcțională, funcțiile specifice, forme de undă;
5. Se va analiza cu atenție schema bloc a circuitului integrat de comandă β AA145 (UAA145) și schema de montaj cu rolul fiecărui element de circuit din componența acesteea;
6. Se va analiza schema montajului de laborator pentru studiul circuitului integrat de comandă β AA145 și se vor identifica elementele de circuit care o compun și bornele de măsură pe placa experimentală;
7. Se vor vizualiza cu ajutorul osciloscopului cu două spoturi formele de undă de pe fiecare terminal al integratului în corespondență cu tensiunea de sincronizare și vor compara cu formele de undă teoretice prezentate în referat. Semnalul dinte de fierăstrău U_{df} se va oscilografia în doua situații, corespunzătoare celor două poziții ale comutatorului K_2 ;
8. Se va evidenția decalajul variabil dintre impulsurile de faza zero și impulsurile de comandă dacă se modifică tensiunea $U_{c-dă}$ folosind un osciloscop cu 2 spoturi;
9. Se va trasa pe același grafic caracteristicile intrare-ieșire: $\alpha = f(U_{c-dă})$ pentru cele două poziții a comutatorului K_2 și se va analiza rezultatul obținut. Tensiunea $U_{c-dă}$ se va măsura cu ajutorul unui voltmetru conectat între bornele (5) și (6). Unghiul de comandă α se va măsura cu ajutorul unui fazmetru numeric conectat astfel:

<u>Fazmetru</u>	<u>Placă de studiu</u>
Canal 1	----- borna (4)
Canal 2	----- borna (5)
Masa	----- borna (3)

Datele se vor trece
într-un tabel de forma:

$U_{c-dă}$ [V]	
α [°el]	



Fig. 3.12 Imaginea montajului de laborator pentru oscilografiera semnalelor și trasarea caracteristicii $\alpha = f(U_{c-dă})$ a circuitului $\beta AA145$ (UAA145).

10. Se va realiza schema pentru studiul comenzii în fază a tiristorului din Fig.3.4(a) utilizând ca sarcină rezistivă un grup de lămpi cu incandescență (vezi Fig.3.13);
11. 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; 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;
12. Va fi pusă în evidență reglarea tensiunii medii de ieșire U_{da} cu ajutorul unghiului de comandă α și prin intermediul voltmetrului și a intensității luminoase a lămpilor cu incandescență;
13. Se va trasa carteristica 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 caracteristica teoretică obținută cu ajutorul relației (3.3).

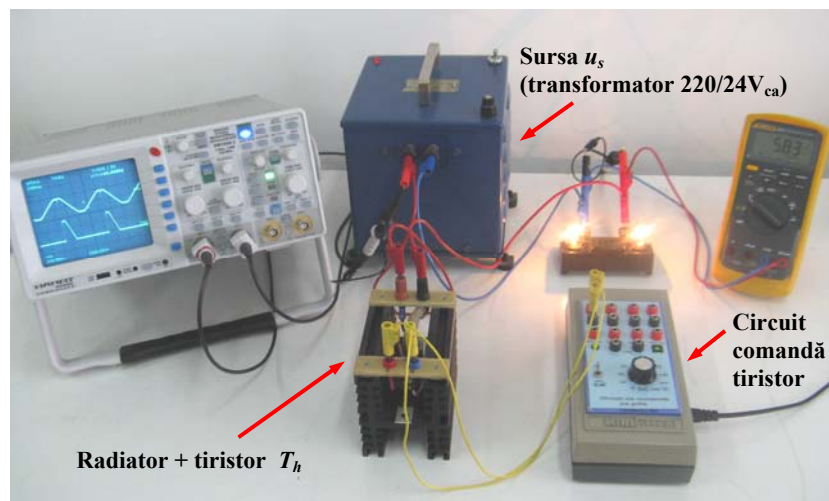


Fig. 3.13 Imaginea montajului experimental - schema din Fig.3.4(a) cu varianta sarcinii rezistive formate din două lămpi cu incandescență.

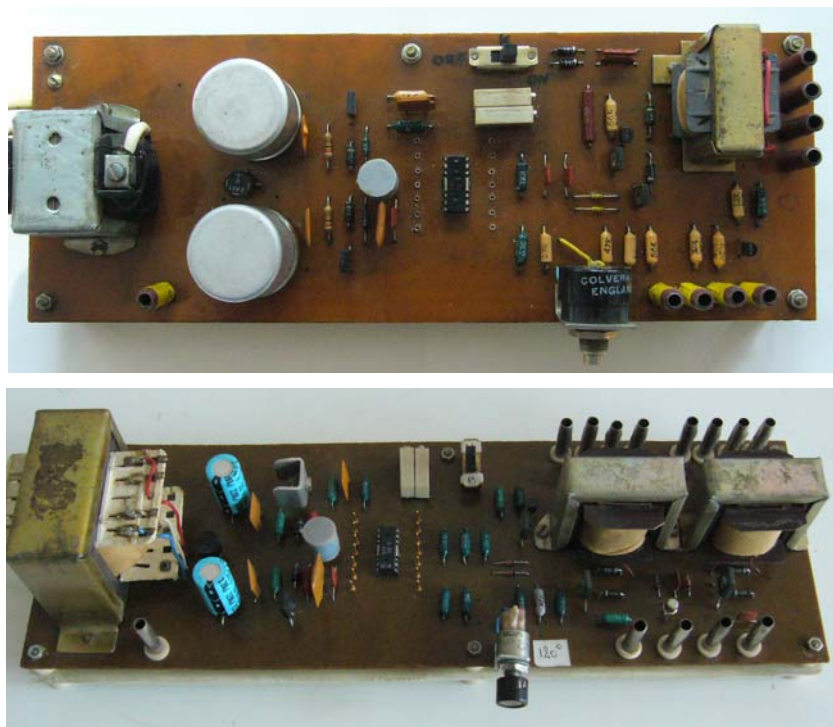


Fig. 3.10 Alte circuite pentru studiul integratului de comandă specializat β AA145 existente în laborator.