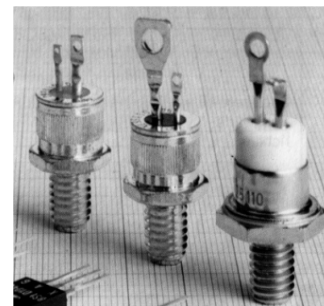


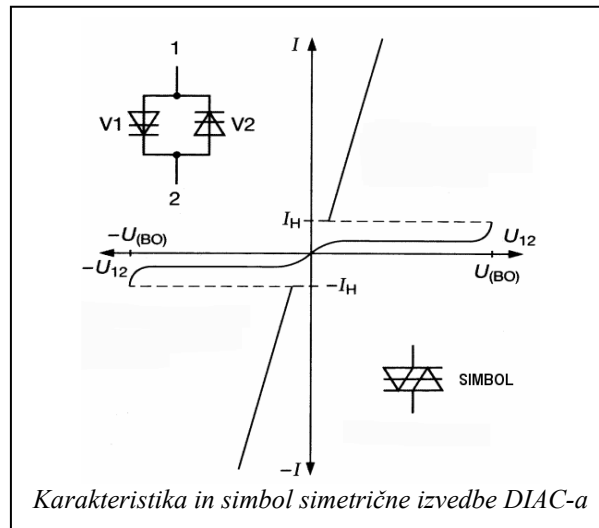
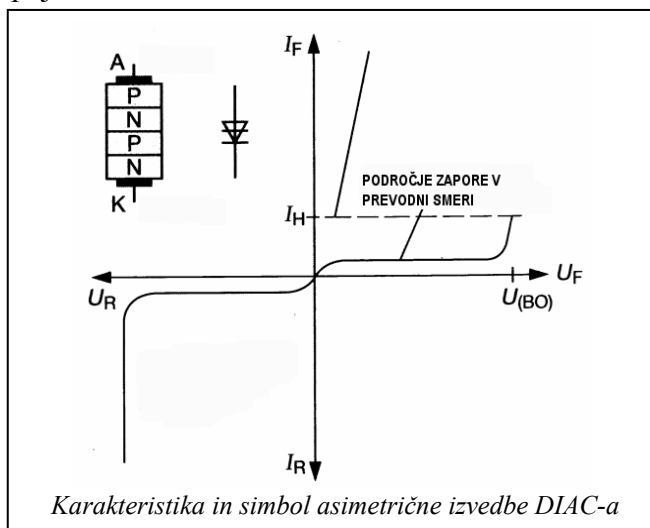
## 1.6 POLPREVODNIKI ZA KRMILJENJE MOČI

Med polprevodnike za krmiljenje moči spadajo vse močnostne polprevodniške komponente, vendar pa se v ta namen, posebno pri izmeničnih napajalnih napetostih, največkrat uporablja tiristor (*SCR*), triac, GTO, IGBT in MCT. Pogostokrat so te komponente v izvedbi močnostnih blokov prirejenih za mostično vezje. Krmiljenje moči s temi komponentami je izvedeno večinoma v stikalnem režimu delovanja (npr. periodično vključevanje grelcev pri regulaciji temperature peči, PWM), pri časovnih omejitvah toka v periodi (krmiljenje faznega zamika) ali pa v relaksacijskem delovanju (kot multivibratorji) pri močnostnih oscilatorjih, kot impulzni ojačevalniki, v zaščitne namene ipd.



### 1.6.1 DIAC

Prožilna dioda (*DIAC*) je dvoelektrodna, polprevodniška komponenta, ki deluje v **lavinskem** (*avalanche*) področju. DIAC lahko ima simetrično ali nesimetrično  $U/I$  karakteristiko. Asimetrična izvedba je dvoslojna, simetrična pa trislojna z enako koncentracijo nosilcev elektrine, v obeh *PN* spojih.



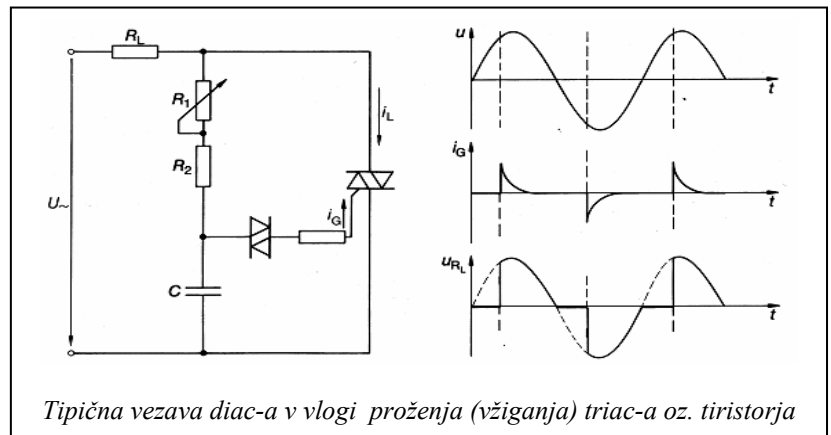
Pri naraščanju napetosti do lavinskega nivoja DIAC ne prevaja. Pri napetosti  $U_{B0}$  (vžigna napetost) pa preide v nenadno stanje prevajanja pri čemer se padec napetosti nenadno zniža za nekaj voltov. Ko DIAC vžge, prevaja tok padec napetosti pa je odvisen od velikosti toka in dokler teče skozi dovolj velik vzdrževalni tok se ta padec ohranja.

#### Tipični podatki DIAC-a so:

- Največji dovoljeni temenski tok prevajanja je 2A pri preklopnem času  $t_p=30\mu\text{sec}$ .
- Temenska dopustna moč:  $P_t=0.5\text{ W}$ .
- Prožilna napetost v obeh smereh (pri simetrični izvedbi):  $U_{B0}=29\text{ do }35\text{ V}$ ,
- Največje zmanjšanje napetosti v prevodnem stanju: npr.:  $\Delta U=10\text{ V}$  (v obeh smereh).
- Največji zaporni tok:  $i_{B0}=50\mu\text{A}$ .

### DIAC-način uporabe

DIAC največkrat uporabljamo za proženje tiristorjev in triak-ov, kot je prikazano na sliki. Levo je vezje za proženje triaka, kjer je uporabljen diak v simetrični izvedbi in desno vezje za proženje tiristorja z asimetričnim diak-om.



### Način delovanja vezja

Na sponke vezja je priključena izmenična napetost  $U_{\sim}$ , ki napaja breme  $R_L$  s krmiljeno napajalno napetostjo preko tiristorja oz. triaka. Ob pozitivni polperiodi, se kondenzator  $C$  polni preko uporov  $R_2$  in  $R_1$  (potencimetra), kar povzroči naraščanje napetosti na kondenzatorju do nivoja **prožilne napetosti**  $U_{B0}$ . V tej točki diak nenadoma preide v prevodno stanje in ker mu skokovito upade padelec napetosti (npr.: od 32 na 25V) se kondenzator hitro delno izprazni, kar povzroči močan tokovni (vžigni) impulz za TRIAK, ki posledično od tega trenutka naprej popolnoma prevaja. Podobno se ponavlja tudi v negativni polperiodi. Tako dobljeni tokovni impulzi imajo zaradi negativne karakteristike DIAK-a v prevodni smeri strme boke naraščanja toka, kar je za zanesljivo proženje triaka oz. tiristorja pomembno.

## 1.6.2 TIRISTOR (SCR-Silicon Controlled Rectifier)

Tiristor (*thyristor*) ima poleg anode **A** in katode **K** še priključek za krmiljenje – vrata **G** (*Gate*). V prevodni smeri, ko je potencial na anodi proti katodi pozitiven, je tiristor zaprt, ker je srednji PN spoj polariziran v zaporni smeri. Če se v P področje vrat injicirajo vrzeli tako, da preplavijo vso plast, pride do prevajanja srednje zaporne plasti, kar je iz fizike trdnih snovi poznano kot **Shockleyev pojav** pri tranzistorjih.

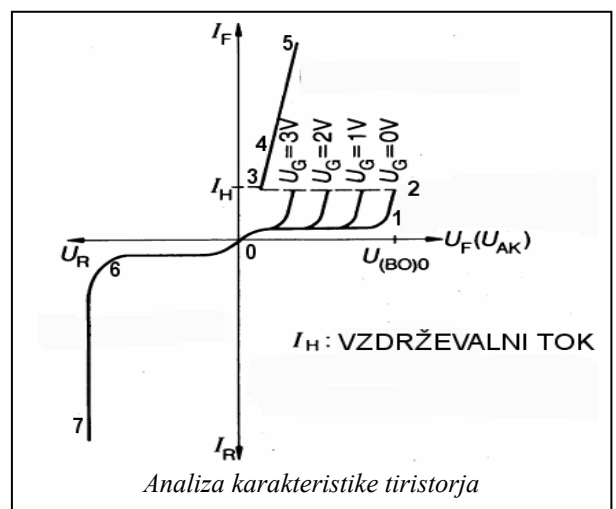
### Karakteristika tiristorja

Delovno področje tiristorja je v prvem kvadrantu. Krivulja od 0 do 1 predstavlja **zaporo v prevodni smeri**. Od 2 do 4 je **področje proženja** - lavinski preboj. Minimalni držalni tok  $I_H$  je označen s točko 3 in je odvisen od velikosti tiristorja. Od 3 do 5 je **področje prevajanja**. Zapiranje je prikazano v tretjem kvadrantu s krivuljo od 0 do 7. Točka 6 predstavlja **maksimalno zaporno napetost** (npr. nekaj 100V).

Velikost prožilnega enosmernega toka na krmilni elektrodi vpliva na polje karakteristik. Z večanjem prožilnega toka se večja **število nosilcev elektrine**.

Čim večji je  $I_G$ , tem nižja je potrebna napetost, da tiristor »vžge«.

Prisotnost krmilnega toka  $I_G$  pri reverznaem napajanju povzroča večanje reverznega toka, kar poslabšuje zaporno karakteristiko tiristorja. Zaradi tega tiristor večinoma vžigamo s tokovnim impulzom in se proženja z enosmernim tokom izogibamo. Prožilni impulz mora trajati tako dolgole toliko, da tiristor zanesljivo »vžge«. Pri tiristorjih velikih moči mora biti prožilni tok dovolj velik, da

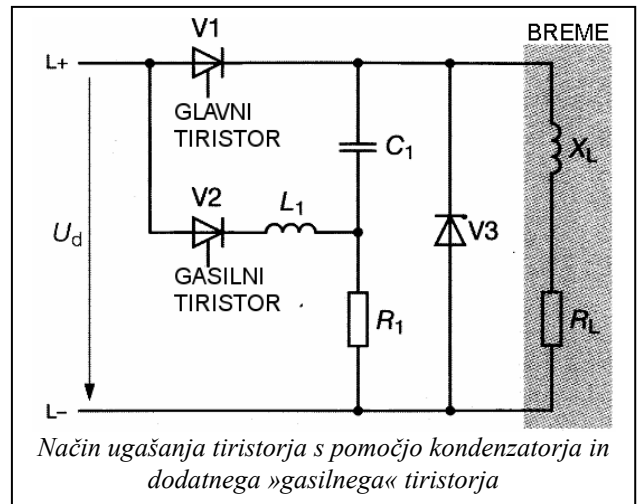


zagotovi tudi takojšnje prevajanje celotne površine tiristorske »tablete« in s tem enakomerno porazdelitev gostote toka. V nasprotnem primeru je prevajanje toka le delno, kar privede do lokalnega pregrevanja polvodniške strukture in posledično uničenje.

Tako kot pri vseh polprevodniških komponentah so tudi električni parametri tiristorjev temperaturno občutljivi. Zaporna tokova tiristorja tako v prevodni kot zaporni smeri, s temperaturo naraščata. Tudi napetost samostojnega proženja pri zapiranju v prevodni smeri je temperaturno odvisna, saj do približno  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$  rahlo narašča, nato pa strmo pade kot da bi tiristor prebil. Seveda je za natančno poznavanje temperaturnih odvisnosti parametrov, potrebno natančno preučiti podatke o konkretnem tipu tiristorja, ki jih najdemo v katalogu proizvajalca.

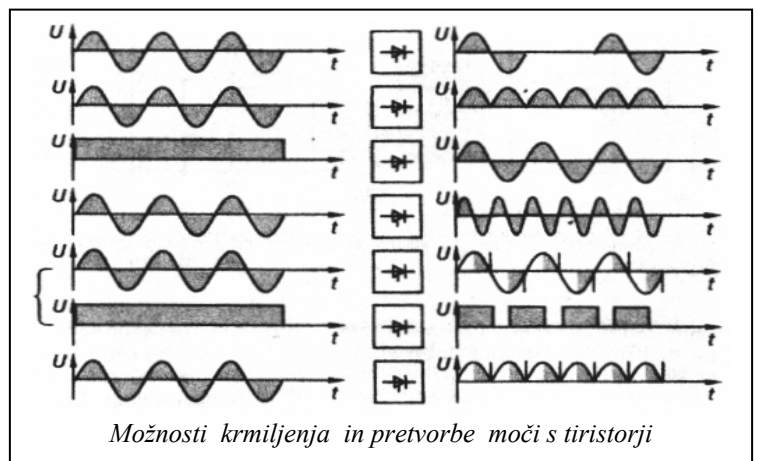
### Prisilno ugašanje tiristorja

Preko vrat G prožimo preklon tiristorja iz zapore v prevajanje v prevodni smeri. Ko tiristor vžge, elektroda G izgubi krmilne lastnosti, tiristor pa lahko preide ponovno v zaporo le, če se glavni tokokrog prekine oziroma, če se delovni tok  $I_{AK}$  vsaj za trenutek zniža pod držalno vrednost  $I_H$  (hold current, haltestrom) katera je odvisna od moči tiristorja. Ta pojav se v praksi pogosto izkorišča za kontrolirano ugašanje t. i. »gašenje« tiristorja. Pri tem postopku s pomočjo t. i. »gasilnega« tiristorja in »gasilnega« kondenzatorja za nekaj mikrosekund znižamo anodno napetost na okoli 0V, kar povzroči, da se tiristor zapre. Ta čas zavisi od velikosti tiristorja, kapacitivnost kondenzatorja pa od velikosti bremenskega toka zato mora biti za zanesljivo delovanje kapacitivnost dovolj velika.



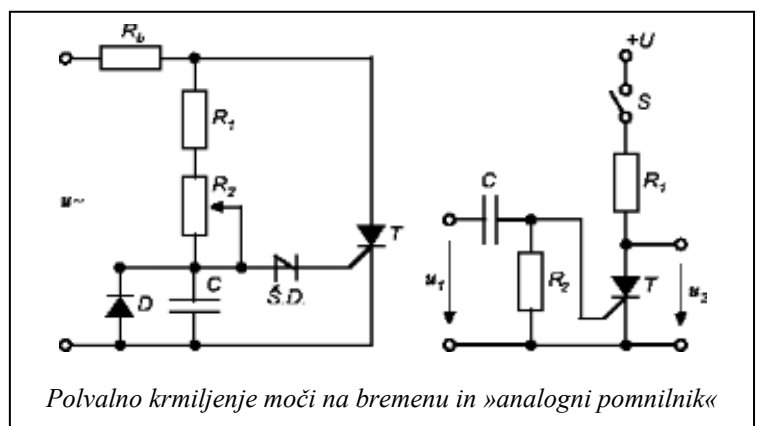
### Tiristor - način uporabe

Tiristor je najpomembnejša elektronska komponenta močnostne elektronike. Zaradi krmilnih lastnosti omogoča gradnjo **razsmerniških, presmerniških in pretvorniških sistemov** za največje moči. Energijska elektronika je posebna smer elektronike, ki obsega specifična obsežna znanja. Nas bodo zanimala le osnovna vezja elektronike s tiristorji. Diagrami na sliki nakazujejo možnosti uporabe tiristorjev.



### Polvalno krmiljenje moči

Najenostavnejši primer za krmiljenje moči (npr. posredno regulacijo vrtljajev izmeničnega elektromotorja, regulacija in krmiljenje svetil,...) je vezje za **polvalno krmiljenje moči** na bremenu. ( prikazano na levi sliki).



### 1.6.2.1 Omejilni parametri tiristorjev

Nizkofrekvenčni (NF) tiristorji so primerni za pretvarjanje električne moči z napravami, ki so priključene in sinhronizirane z električnim omrežjem. V usmerniških napravah so uporabljeni podobno kot polprevodniške diode. Oznake tipskih vrst določajo razred vrednosti zapornih napetosti. V večini primerov je hlajenje izvedeno preko hladilnih teles, pogosto pa tudi z dodatnim prisiljenim zračnim ali vodnim hlajenjem. Najvišje zaporne napetosti so reda  $kV$  z nazivnim tokom do  $500 A$ . Področje uporabe N tiristorjev je v industrijski elektroniki, visokonapetostnih energetskih elektromotorskih pogonih, enosmernih energetskih prenosnih sistemih in omrežnih sklopkah omrežij z različnimi obratovalnimi frekvencami.

Visokofrekvenčni F(fast) tiristorji so namenjeni visokofrekvenčnim asinhronim pretvornikom. Področje zapornih napetosti je nižje (nekaj  $100V$ ), z nazivnim tokom do  $100 A$ . Pri F tiristorjih je vedno podan tudi izklopni čas  $t_{off}$ , ki je med  $90$  in  $100\mu sec$ ,  $di_F/dt$ , ki je reda  $25$  do  $150A/\mu sec$ , oz. do  $1000 A/\mu s$  v naključnih prehodnih pojavih. Dovoljena strmina naraščanja napetosti pri zapiranju v prevodni smeri je od  $90$  do  $1000V/\mu sec$ , odvisno od izklopnega časa.

Pri zaporedni vezavi tiristorjev je pomembna **enakomerna porazdelitev zaporne napetosti** tako v zaporne kot prevodnem režimu. Zaradi neenakomernih karakteristik tiristorjev oziroma "prevodnih" lastnosti ob zapiranju, je enakomerna porazdelitev napetosti brez dodatnih ukrepov nemogoča. Z  $RC$  členi, ki jih vezemo vzporedno k posamičnemu tiristorju, to slabost odpravimo. Pri projektiranju je treba upoštevati tudi tok polnjenja in praznjenja kondenzatorja še posebno zato, da ob proženju ne presežemo dovoljene strmine toka. Seveda je bistvenega pomena, da vsi zaporedno vezani tiristorji hkrati prožijo. To rešujemo z veliko strmino prvega boka vžignega impulza iz prožilnega vezja.

Vzporedna vezava tiristorjev je dovoljena, vendar lahko zaradi neenakih parametrov vzporedno vezanih tiristorjev nastopijo težave. Hitrejši tiristor, prevzame ves bremenski tok nase in hkrati onemogoči proženje ostalih vzporedno vezanih tiristorjev, kar je lahko usodno. Z ultra-hitrimi varovalkami, s katerimi varujemo vsak tiristor posebej, lahko poškodbe preprečimo. Ker so take varovalke izredno drage je bolje, da tiristorji vklaplajo preko **komutacijske dušilke**, ki s svojo časovno ( $L/R$ ) konstanto preprečuje hitro naraščanje toka. Prav tako kot pri zaporedno vezanih morajo tudi pri vzporedno vezanih tiristorjih imeti vžigni impulzi čim večjo strmino naraščanja toka.

### Značilnejši parametri

Proizvajalci uporabljajo različne simbole za označevanje električnih parametrov tiristorjev. Del poenotenega označevanja in definicij parametrov različnih veličin predpisujejo norme po DIN 41785. Nekateri od teh parametrov so označeni in pojasnjeni na sledeči način:

- $I_F$  - je tok v prevodni smeri
- $I_H$  - držalni tok - je najmanjši enosmerni tok v prevodni smeri, pri katerem tiristor ne ugasne
- $I_G$  - je tok na krmilni elektrodi
- $(di_F/dt)$  - je največja dovoljena strmina naraščanja toka ob proženju
- $U_D$  - je napetost med anodo in katodo pred proženjem
- $U_{RSL}=U_R$  - je največja reverzna kolenska napetost
- $U_G$  - je napetost med G in K
- $t_q=t_{off}$  - je sprostitveni čas, ki je potreben pri komutaciji, da se tiristor zapre
- $t_{on}$  - je vklopni čas
- $t_s$  - je čas rekombinacije nosilcev elektrine ob komutaciji (*storage time*)
- $(du/dt)_{krit}$  - je največja dovoljena hitrost naraščanja napetosti pri zapiranju v prevodni smeri
- $I_F^2 t$  - je vrednost za dimenzioniranje talilne varovalke

Podatke pomembnih parametrov tiristorja lahko razberemo tudi iz diagramov **polja karakteristik**, ki jih podaja proizvajalec. Pogosto opisujejo taki diagrami več povezanih parametrov kot so napetost, tok, moč, temperatura, idr.

Najpomembnejša omejitvena veličina, ki določa elektriške energijske razmere, je  $\theta_j$ - temperatura čipa, katere temenske dopustne vrednosti v vseh pogojih obratovanja **ne smemo prekoračiti**. Za statične in delno dinamične obremenitve podaja proizvajalec dovoljeno temperaturo ohišja pri danem načinu merjenja in danih merilnih pogojih.

Temperatura ohišja je posredna veličina, iz katere lahko preko časovno daljše stacionarne obremenitve tiristorja sklepamo na temperaturo kristala. **Dinamične izgube** je posebej zaradi zakasnilnih časov  $t_r$  in  $t_s$  težko izračunavati. Največkrat so podane razmere o dovoljenih obremenitvah za omrežno frekvenco 50 Hz (20msec). Za uporabo pri višjih frekvencah je nujno dobiti podatke od proizvajalca ali pa pristopiti k računskemu ugotavljanju dovoljene dinamične obremenitve. Kritične vrednosti strmine naraščanja toka ob proženju  $di_F/dt$  ne smemo nikoli prekoračiti, tudi ob naključnih prehodnih pojavih ne. Površno dimenzioniranje tiristorske naprave, se lahko po uspelem zagonu in krajšem času obratovanja maščuje. V periodičnem omrežnem obratovanju podana vrednost  $di_F/dt$  ne velja za naključne prehodne pojave, ki to vrednost lahko tudi 10-krat presežejo.

Kadar so v zaščitni namen uporabljeni RC členi, vezani vzporedno s tiristorji, je potrebno celotno kombinacijo C-R-tiristor preizkusiti na dejanske obratovalne pogoje z upoštevanjem naključnih prehodnih pojavov in upoštevanjem **faktorja varnosti**. Obremenitev tiristorja z največjim še dovoljenim tokovnim sunkom v času 10 ms, močno poslabša zaporne lastnosti v prevodni smeri. Pogosto je podano še dovoljeno število tokovnih sunkov. Poslabšanje tiristorjevih zapornih lastnosti je lahko tudi posledica premajhne strmine levega boka prožilnih impulzov, če ti ne dosežejo potrebne vrednosti (npr. 10A/μsec.).

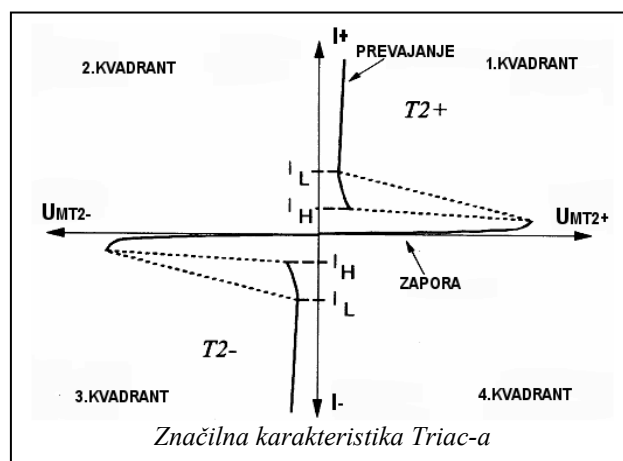
Seveda povzročajo periodično vžiganje tiristorjev v omrežnem toku spekter višjih harmonskih frekvenc, ki pri slabem projektiranju kot elektromagnetno valovanje potujejo po slabem omrežju in povzročajo motnje v lastnih in okoliških elektronskih napravah. Dobro projektiranje tiristorske naprave, izbira in vgradnja primernih filtrov učinkovito zmanjšujejo tovrstno onesnaževanje omrežja.

### 1.6.3 TRIAK (dvosmerni tiristor)

Za triak je značilno, da ga lahko prožimo tako pri pozitivni kot negativni anodni napetosti. Ima podobne električne prevajalne lastnosti kot antiparalelno vezana tiristorja. Tako kot tiristor ima tudi triak tri priključke, vendar ima dve anodi  $A_1$ , anodo  $A_2$ , in prožilno elektrodo  $G$ -vrata.

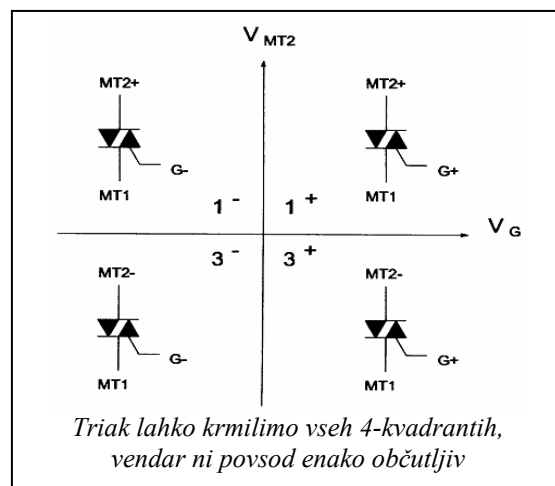
Triak lahko prevaja med anodama v obeh smereh. Prožilni impulz, med katodo in vrati, je lahko **pozitiven ali negativen** za proženje v eni ali drugi smeri prevajanja - **4 kvadrantno delovanje**. Prevajalna karakteristika je popolnoma simetrična vendar je največja občutljivost za vžig v prvem in tretjem kvadrantu.

Proženje, prevajanje in zapiranje je možno pri  $+u$  in pri  $-u$ , zato je triak pred proženjem vedno v zaprtem stanju. Razen omenjenega ima triak popolnoma enake lastnosti kot tiristor in tudi električne parametre triak-a obravnavamo enako kot parametre tiristorja. Triaki so grajeni za manjše tokove kot tiristorji, le do približno 100 A temenskega toka. Triak je tipično močnostno dvosmerno stikalo za vkapljanje in krmiljenje električnih porabnikov v izmeničnih tokokrogih.



Prožimo ga vedno s prožilnimi impulzi. V prožilnem vezju je največkrat simetrični diak, kateri je pri posebnih izvedbah triakov lahko že integriran v samo ohišje triak-a. To omogoča zmanjšanje števila zunanjih komponent.

Tiristorje in triake lahko delimo na tiste z normalno občutljivostjo vrat (*normal sensitivity*) pri katerih znaša tok vrat od 10 do 100mA za srednje moči in tiste z visoko občutljivostjo (*high sensitivity*), ki se zadovoljijo že z nekaj 100µA vžignega toka.



### 1.6.3.1 Krmiljenje moči na bremenu

Na sliki je prikazano vezje s trojnim načinom delovanja.

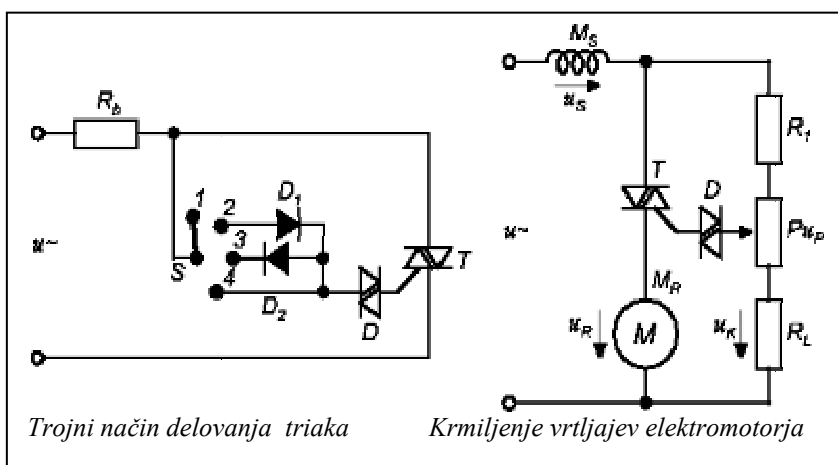
Na bremenu  $R_b$  lahko krmilimo moč v treh značilnih režimih.

Kadar je stikalo  $S$  v položaju 1 triak ne vžiga, zato je breme izklopljeno.

V položaju 2 je triak prožen le vsako pozitivno polperiodo in je posledično breme napajano s pozitivno enosmerno pulzirajočo napetostjo oz. tokom.

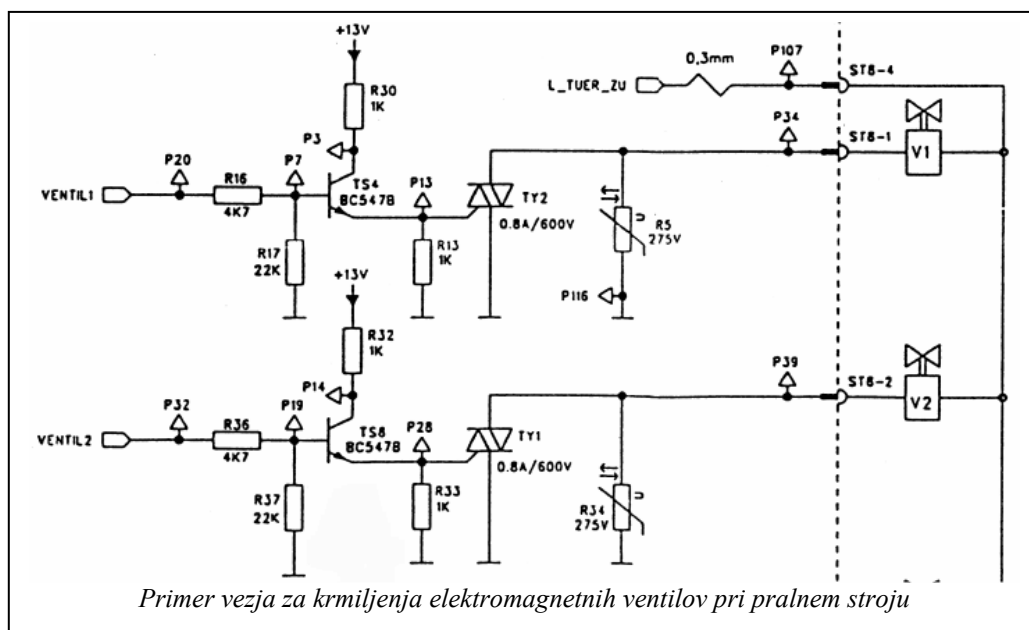
V položaju 3 je proženje podobno, vendar v negativnih polperiodah zato ima breme negativno napetost (npr. nasprotna smer enosmernega elektromotorja).

V položaju 4 je triak prožen v obeh polperiodah in je breme zato napajano z izmenično napetostjo. Breme je tako možno napajati s krmiljeno pozitivno ali negativno pulzirajočo enosmerno napetostjo (npr. krmiljenje enosmerne motorja v levo oz. desno) ali pa s krmiljeno izmenično napetostjo.



Trojni način delovanja triaka

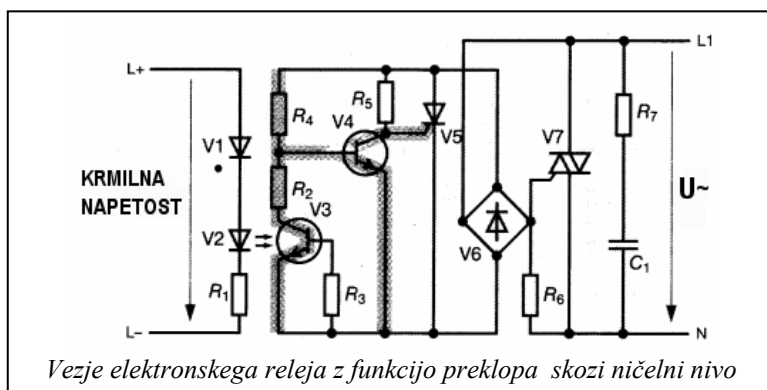
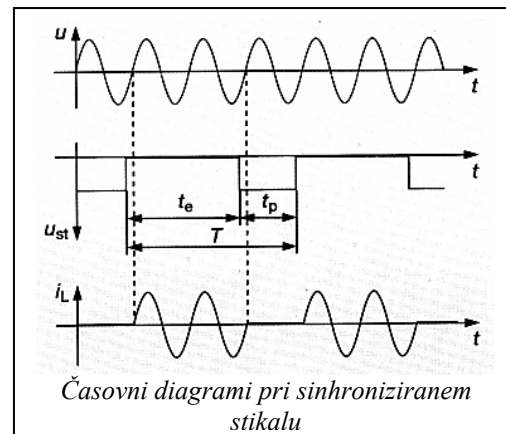
Krmiljenje vrtljajev elektromotorja



Primer vezja za krmiljenja elektromagnetnih ventilov pri pralnem stroju

### 1.6.3.2 Sinhronizirano elektronsko stikalo (elektronski rele)

Vklapljanje bremen večjih moči na omrežje je zaradi tokovnih udarcev v omrežju se posebej ob nenadzorovanem vklopu problematično. Če pride do vključitve bremena ob temenski vrednosti omrežne napetosti, bo tokovna konica mnogo večja kot v primeru, če izvršimo vklop ob napetostnem prehodu skozi nični potencial. V takšnih primerih pogosto uporabljamo elektronska sinhronizirana stikala (*zero crossing switch*), katera vžigajo triak v trenutku prehoda omrežne napetosti skozi nič. Vezje na spodnji sliki omogoča polnovalni vklop bremena  $R_b$  s triakom - v obeh polperiodah na omrežje.



Pri tej izvedbi triak ne dobi vžignega toka, če je trenutna vrednost omrežne napetosti višja od 30V. Pri tej napetosti namreč že prevaja tranzistor V4 in kratko veže vrata tiristorja V5 na katodo. Tok, ki teče skozi krmilno vezje je v tem primeru premajhen, da bi zadosten padec napetosti na R6 in s tem posredno vžig triaka. Pri napetostih blizu 0V pa pride do vžiga tiristorja V5, kar povzroči večji tok skozi R6 in tudi vžig triaka, kateri prevaja glavni tok bremena.

### 1.6.3.3 Slabosti krmiljenja s tiristorji in triaki

Sistemi energijske elektronike vklaplajo, izklaplajo, krmilijo, regulirajo in pretvarjajo velike električne moči. Vklopi in izklopi so lahko občasni ali pa nastopajo vsako polperiodo sorazmerno glede na kot »vžiga«. Takšni vklopi ali izklopi povzročajo nelinearne, skočne spremembe omrežnega toka, ki zato vsebuje množico višjih harmonskih komponent. Višje harmonske komponente omrežnega toka potujejo po omrežju kot motnje, ki omrežje onesnažujejo in lahko povzročajo nezanesljivo obratovanje drugih elektronskih naprav v bližini omrežja. S ciljem odpravljanja motenj, uporabljamo v energijski elektroniki v sklopu s triaki ali tiristorji različne komponente. RC členi vezani vzporedno z vsako preklopno komponento in kompleksni močnostni električni filtri grajeni iz dušilk, kondenzatorjev in uporov, preprečujejo »uhajanje« višjih harmonskih frekvenc v omrežje. Taki električni filtri so tehnološko zahtevni in dragi.

Druga slabost naprav, ki so grajene s krmiljenimi ventili, je posledično generiranje jalove moči, ki nastane zaradi premaknitve - zakasnitve, osnovne harmonske komponente omrežnega toka za omrežno napetostjo. Pri krmiljenju je zakasnitev proženja krmilnega elementa, kar pa pomeni zakasnitev toka za napetostjo, posledica tega pa je jalova moč. Krmiljeni sistemi so zato tudi porabniki jalove moči, ki je nezaželena in jo distributerji električne energije posebej drago zaračunavajo. Za zmanjšanje jalove moči kot posledice krmiljenja, poznamo vrsto posebnih vezav in načinov krmiljenja tiristorjev, triak-ov in tudi stikalnih tranzistorjev kar pa presega okvir teh vsebin.