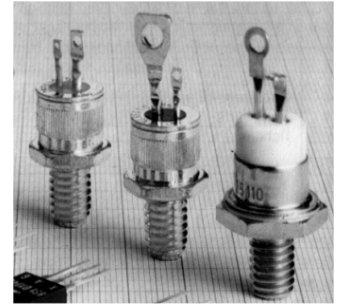


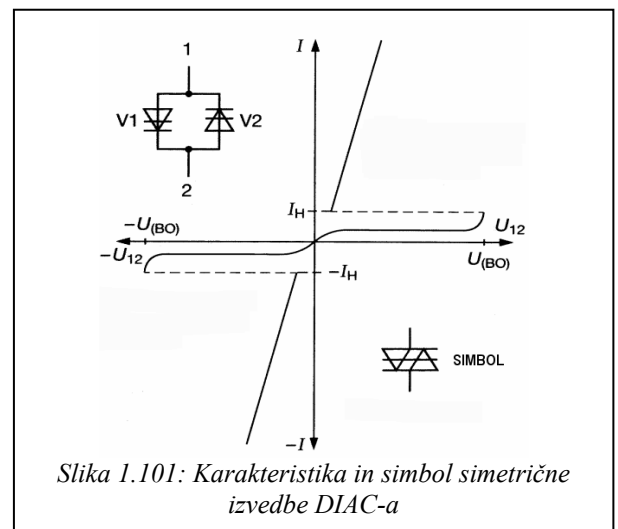
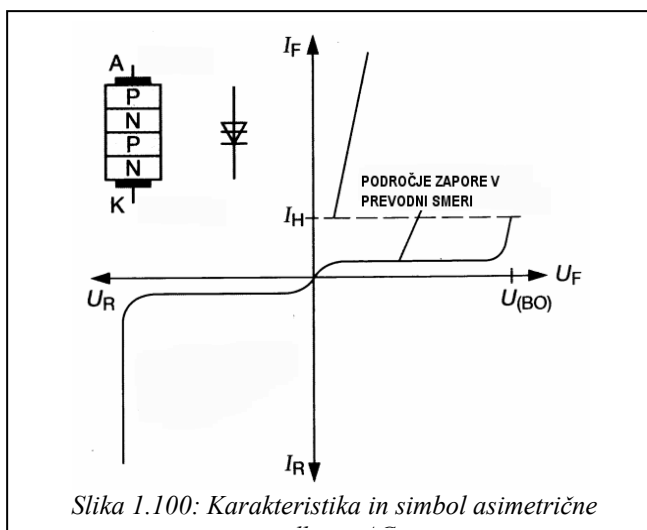
1.6 POLPREVODNIKI ZA KRMILJENJE MOČI

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.



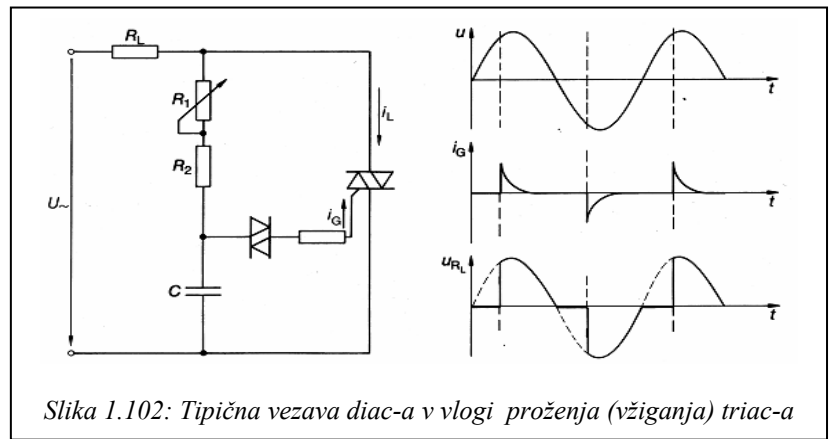
Pri naraščanju napetosti do lavinskega nivoja DIAC ne prevaja. Pri napetosti U_{BO} (vžigna napetost) pa preide v nenadno stanje prevajanja pri čemer se padec napetosti nenadno zniža za nekaj voltov. Ko DIAC vžge, prevaja tok padec napetosti pa je odvisen od velikosti toka in dokler teče skozi dovolj 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 diac v simetrični izvedbi in desno vezje za proženje tiristorja z asimetričnim diac-om.



Slika 1.102: Tipična vezava diac-a v vlogi proženja (vžiganja) triac-a

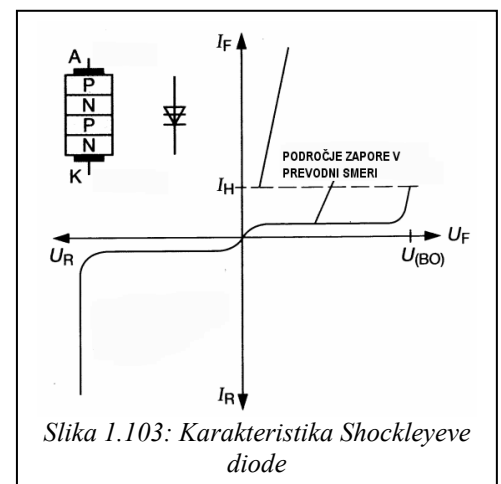
Način delovanja vezja

Predstavljajmo si, da predstavlja proga A-K po proženju na tiristorju oz. triaku kratek stik in razložimo delovanje vezja. Na sponke vezja je priključena izmenična napetost U_{\sim} , ki krmiljeno napaja breme R_L s pomočjo tiristorja oz. triaka. Ob pozitivni polperiodi, se kondenzator C polni preko uporov R_2 in R_1 (potenciometra), kar povzroči naraščanje napetosti na kondenzatorju do nivoja **prožilne napetosti** U_{B0} . V tej točki diac nenadoma preide v prevodno stanje in zaradi skokovitega upada napetosti na diac-u (npr.: od 32 na 25V) se kondenzator hitro delno izprazni, kar povzroči močan tokovni (vžigni) impulz. Isto se ponavlja tudi v negativni polperiodi. Tako dobljeni tokovni impulzi imajo zaradi negativne karakteristike v prevodni smeri strme boke naraščanja toka, kar je za zanesljivo proženje triaka oz. tiristorja pomembno.

1.6.2 ŠTIRIPLASTNA DIODA (Shockleyeva dioda)

Shockleyeva dioda je sestavljena iz štirih polprevodniških plasti. Električni simbol štiriplastne diode je enak simbolu za diac. Tudi delovanje je podobno, razlika je le v **boljšem preklonu**, kot lahko razberemo iz karakteristike. Pri negativnih napetostih je podobno kot navadna polprevodniška dioda, v stanju zapore.

Pri pozitivni napetosti U_{AK} , je do prožilne napetosti karakteristika enaka zaporni. Pri prožilni napetosti $U_{AK} = U_p$ je dogajanje podobno kot pri diac-u le, da je padeč napetosti reda 1V in se v odvisnosti od velikosti toka le malo spreminja. Dioda v prevodni smeri ponovno preklopi v zaporno stanje le, če se tok zniža pod držalno vrednost $I_H = (15-45mA)$.



Slika 1.103: Karakteristika Shockleyeve diode

Tipične zaporne napetosti, so približno enake prožilnim, katere znašajo od 20 do 200 V, zaporni tokovi so reda μA in držalni tokovi reda mA.

Preklopni časi iz zapiranja v prevajanje in obratno so reda μs . Temenske vrednosti kratkotrajnih tokov so lahko tudi desetkrat večje (nekaj 10A) od nazivne vrednosti, brez škode za diodo.

Pri zelo hitrem naraščanju napetosti na diodi du_{AK}/dt lahko pride do proženja in prevajanja že pri napetostih, ki so nižje od prožilne. Zato je v praksi pogosto vzporedno k diodi vezan še kondenzator. Vendar je pri tem potrebna previdnost, saj se ob proženju sprazni naboj kondenzatorja preko diode, kar lahko privede do uničenja Shockley-eve diode.

1.6.3 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.

Električni tok, ki steče čez zaporno področje, injicira v sosednjo N plast vrzeli in obratno v P plast elektrone. Posledično tiristor prevaja električni tok nemoteno. Padec napetosti na tiristorju je sorazmeren toku skozi in znaša približno 1.2V pri nazivni vrednosti toka.

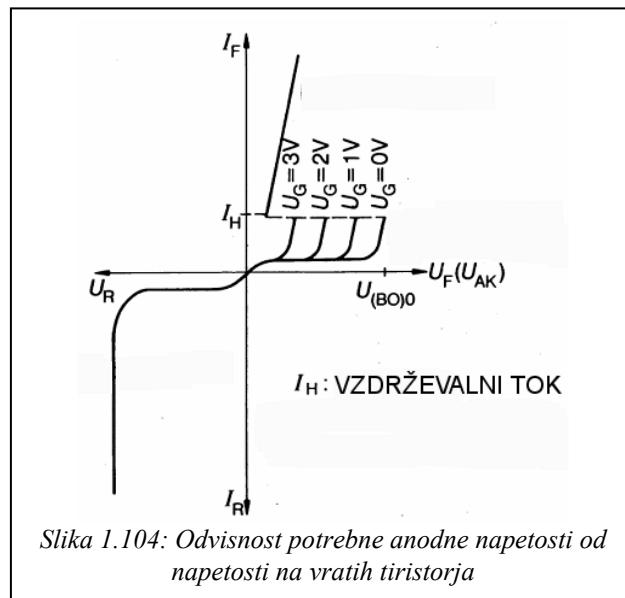
V zaporni smeri, ko je anoda na negativnem potencialu, sta zunanja PN spoja polarizirana v zaporni smeri, zato je tiristor v zapori in ga ni mogoče prožiti.

Kadar krmilna elektroda-G ni uporabljena, je U/I karakteristika tiristorja popolnoma enaka karakteristiki štiriplastne diode. Ker je neodvisno od polaritete pritisnjene napetosti med anodo in katodo vedno vsaj en PN spoj polariziran v zaporni smeri, tiristor normalno ne prevaja v nobeni smeri.

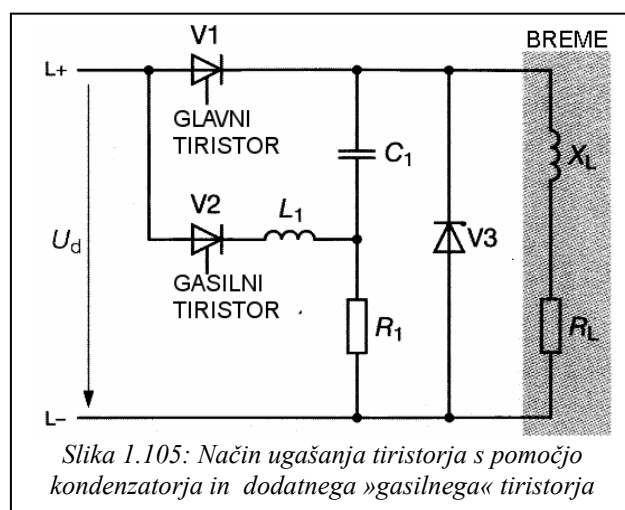
Lahko pa pride do vžiga tudi pri neaktivni napetosti na vratih- G (**samostojno proženje**), če pri zapiranju narašča napetost prehitro- npr. pri izklopu induktivnega bremena (velika strmina $-d_u/d_t$).

Tako proženje tiristorja je nedopustno in lahko povzroči napačno delovanje ali uničenje tiristorja. Pri zaprtem tiristorju (v prevodni smeri) in v zaporni smeri teče med anodo in katodo zaporni tok velikosti nekaj μA , odvisno od velikosti in kakovosti 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.



Slika 1.104: Odvisnost potrebne anodne napetosti od napetosti na vratih tiristorja



Slika 1.105: Način ugašanja tiristorja s pomočjo kondenzatorja in dodatnega »gasilnega« tiristorja

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«.

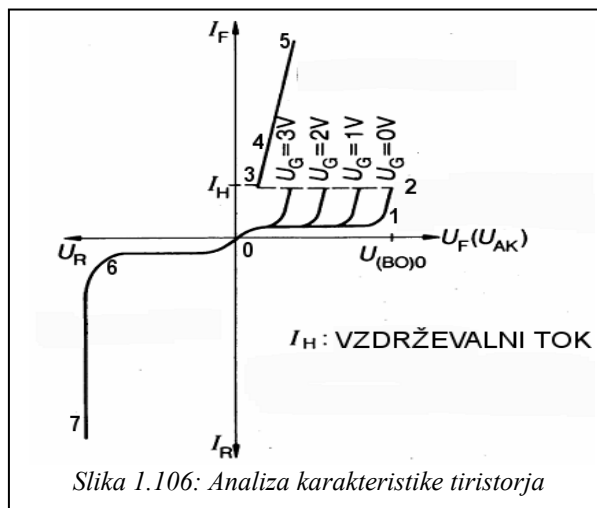
Prisotnost krmilnega toka I_G pri reverznaem napajanju povzroča večanje reverznega toka, kar poslabšuje zaporno karakteristiko tiristorja. Zaradi tega tiristor večinoma vžigamo s tokovnim impulzom in se proženja z enosmernim tokom izogibamo. Prožilni impulz mora trajati tako dolgole toliko, da tiristor 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 °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.

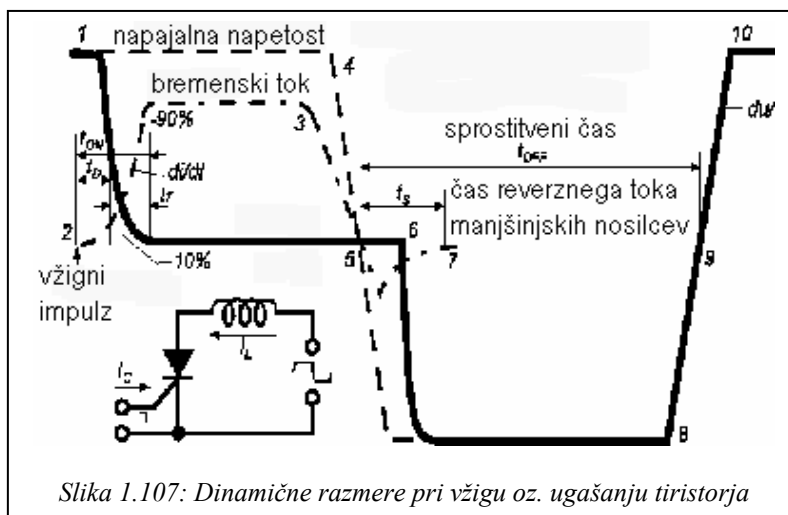
Dinamične razmere pri tiristorju

Dinamične razmere vklopa in izklopa tiristorja lahko preučimo na podlagi testnega vezja z induktivnim bremenom in upornostjo, ter pripadajočega časovnega diagrama. Napajalna napetost naj ima trapezno obliko (1). Ko nastopi vžigni impulz I_G (2), preteče še določen **zakasnilni čas** t_d , preden začne bremenski tok naraščati. Upoštevati moramo še dodaten prožilni čas, da tok naraste do 90 % nazivne vrednosti, ko lahko smatramo, da tiristor popolnoma prevaja.

S pojemanjem napajalne napetosti (4) pojema tudi bremenski tok (3). Kljub temu, da je postala anoda negativna (5), tok še nekaj časa teče (7), čeprav je dioda že polarizirana v zaporni smeri (6). To je čas rekombinacije nosilcev elektrine, ki so nakopičeni v vseh štirih prevodnih plasteh. V primeru, da bi se v tem času pojavil na anodi ponovno pozitiven potencial, bi tiristor nemoteno prevajal dalje, ne glede na to, da je tok rekombinacije manjši od držalnega I_H .



Slika 1.106: Analiza karakteristike tiristorja



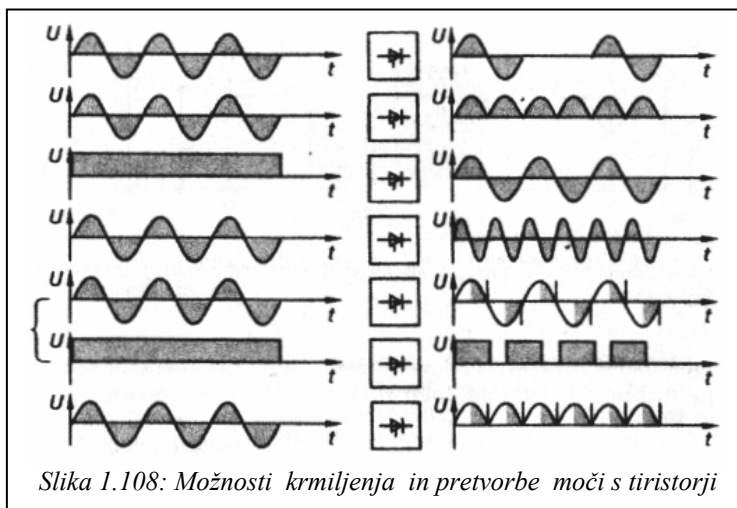
Slika 1.107: Dinamične razmere pri vžigu oz. ugašanju tiristorja

Po času t_s zapira tiristor v zaporni smeri. Po času t_{off} (9) pa se tiristor zanesljivo zapre tudi v prevodni smeri. Ta čas je odvisen od strmine ponovnega naraščanja napetosti v prevodni smeri du/dt in je tem daljši, čim večja je strmina. Strmina naraščanja napetosti v prevodni smeri du/dt ne sme prekoračiti dopustne vrednosti, ker lahko **privede do samostojnega vžiga** brez prožilnega impulza. Razlog takega proženja je v medelektrodnih kapacitivnostih. Strmina naraščanja toka v prevodni smeri ob proženju di_F/dt je pomembna za porazdelitev izgub. Prekoračenje dopustne vrednosti lahko privede do **uničenja** zaradi lokalnega pregrevanja. **Dinamični držalni tok** mora biti 2 - do 3 - krat večji od statičnega. Razlog tiči v reaktanci tokokroga. Ker zahteva držalni tok delovno moč, je potrebna **sočasnost toka in napetosti** na krmilni elektrodi, kar pri reaktančnih bremenih ni vselej izpolnjeno. Če poznamo reaktanco vezja, lahko ugotovimo potrebno trajanje prožilnega impulza.

Dinamične razmere narekuje čas sprostitve nosilcev elektrine, katerega posledica je izklopni čas t_{off} , torej čas, ko je tiristor zanesljivo v zaporu. Z ozirom na trajanje izklopnega časa razlikujemo visokofrekvenčne (hitre) tiristorje s kratkim izklopnim časom in nizkofrekvenčne z daljšimi izklopnimi časi, ki so namenjeni za obratovanje v energetskem omrežju. Izklopni čas najhitrejših - visokofrekvenčnih tiristorjev - je reda $1\mu s$, nizkofrekvenčnih pa nekaj $10\mu s$.

Tiristor - način uporabe

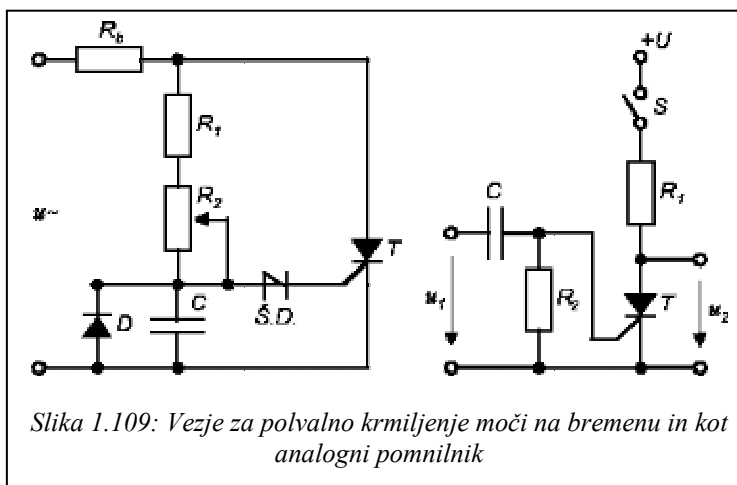
Tiristor je najpomembnejša elektronska komponenta močnostne elektronike. Zaradi krmilnih lastnosti omogoča gradnjo **razsmerniških, presmerniških in pretvorniških sistemov** za največje moči. Energijska elektronika je posebna smer elektronike, ki obsega specifična obsežna znanja. Nas bodo zanimala le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



Slika 1.108: Možnosti krmiljenja in pretvorbe moči s tiristorji

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).



Slika 1.109: Vezje za polvalno krmiljenje moči na bremenu in kot analogni pomnilnik

1.6.3.1 Prenapetostna in pretokovna zaščita tiristorjev

Pod prenapetosti razumemo kratkotrajne napetostne konice, katerih vrednost preseže dovoljeno maksimalno vrednost zaporne napetosti ali prožilno napetost v prevodni orientaciji. Prenapetosti nastanejo iz različnih vzrokov in imajo dva smiselna izvora.

Ob efektu nosilcev elektrine, ki nastane ob komutiranju tiristorja iz prevajanja v zaporo, se zaradi nakopičenih nosilcev elektrine v vseh štirih polprevodniških plasteh pojavi tokovna konica v zaporni smeri, podobno kot pri polprevodniški diodi. Ker nosilci elektrine po kratkotrajnem reverznem toku v trenutku preminejo, pride do hitrega pojemanja toka, kateri povzroči **induktivne napetostne konice**. Te se prištevajo k zaporni napetosti tako, da vsota napetosti lahko preseže dovoljeno zaporno vrednost. Za omejitev teh napetostnih konic na dovoljene vrednosti pogosto vežemo vzporedno s tiristorjem RC člen, ki s svojo časovno konstanto ne dovoli hitrih tokovnih sprememb. S tem znižujemo inducirane napetosti na induktivnostih tokokroga. Vrednosti uporov in kondenzatorjev podajajo že proizvajalci za posamične tiristorje in primere uporabe v katalogih skupaj s podatki o tiristorju, le poiskati jih je potrebno.

Omrežne prenapetosti nastanejo zaradi različnih preklpov porabnikov, kondenzatorjev, induktivnih bremen, kontaktorjev idr. na omrežje, prekinitve tokokrogov zaradi odziva varovalk in obloka, ki ob tem nastane, električnih in atmosferskih razelektritev,... Že naštevanje teh vzrokov napetostnih konic v omrežju kaže na to, da ne bo mogoče podati enoumne rešitve za univerzalno prenapetostno zaščito tiristorjev. Prenapetostno zaščito zato načrtujemo od primera do primera uporabe in zahtevnosti, za kar obstaja vrsta ukrepov, od katerih bomo na tem mestu omenili le nekatere. Predvsem upoštevamo napetostni varnostni faktor v v odvisnosti od napetostnega razreda tiristorjev in pričakovanih napetostnih konic v napravi. Pri tem že iz gospodarskih razlogov ne izbiramo večjega napetostnega varnostnega faktorja od 2 do 2,5.

RC člen, za zaščito pred prenapetostmi, ki jih povzroča efekt nosilcev elektrine, ščiti tiristor tudi pred energijsko revnimi napetostnimi konicami iz omrežja. Energijsko močne napetostne konice pa omejujemo z RC členi na transformatorjih z napetostno odvisnimi upori - varistorji, selenskimi odvodniki in hitrimi katodnimi odvodniki. S kombinacijo različnih zaščitnih ukrepov optimiramo prenapetostno zaščito tiristorjev za vsak primer uporabe posebej.

V napravah energetske elektronike je nujno zaščititi tiristorje tudi pred **tokovnimi preobremenitvami**. **Vzrok uničenja je vedno prekomeren porast temperature!** Zaradi majhne toplotne kapacitete polprevodniške tablete tiristorja morajo biti varovalni elementi izredno hitri ali pa moramo izvesti varovanje v primeru motenj z drugimi stikalnimi elementi tako, da omejimo tok na dopustno vrednost.

Pretokovna zaščita naj varuje tiristor pred **kratkostičnimi tokovnimi udarci** (krajši od polperiode omrežnega toka, torej krajši od 10 ms) in pred **dolgotrajno preobremenitvijo** (daljši čas obratovanja).

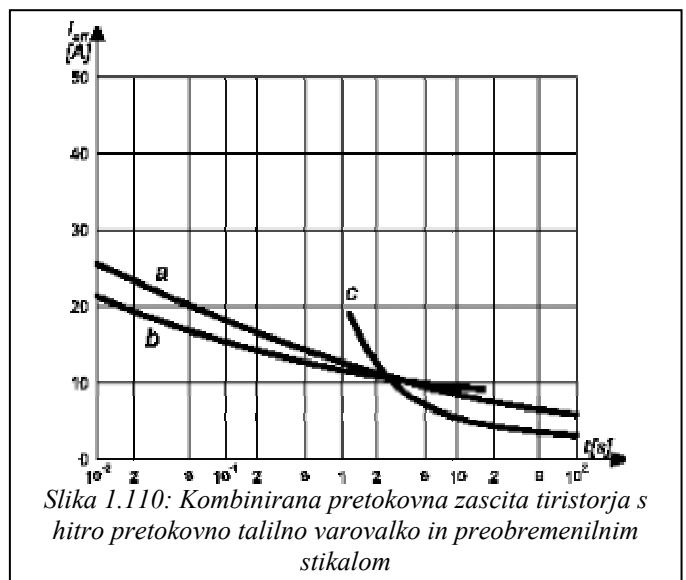
Tiristorje lahko varujemo pred kratkostičnimi preobremenitvami z **ultra hitrimi talilnimi varovalkami**, katerih **mejni obremenilni integral** i_v^2 v času $t < 10$ ms mora biti manjši od mejnega obremenilnega integrala $i_F^2 t$ tiristorja, kot je podano z neenačbo:

$$\int i_v^2 dt \leq \int i_F^2 dt$$

Tiristorje lahko varujemo v času polperiode tudi s **hitrimi odklopnimi stikali**, ki imajo odklopni čas med 0,3 in 0,6 ms in jih lahko popolnoma prilagodimo uporabljenemu tiristorju. V primerih velikih kratkostičnih tokov lahko ta stikala prožimo z elektronskimi napravami, ki delujejo na zaznavanju strmine naraščanja toka. Ti detektorji di/dt so elektronski zaščitni elementi, ki jih lahko nastavimo na **izklop ob nastopu kratkega stika**.

Pogosto uporabljamo za zaščito tiristorjev **elektronske zaščitne naprave**, ki ob preobremenitvah in kratkih stikih preprečijo proženje tiristorja.

Zaščito pred **dolgotrajnimi tokovnimi preobremenitvami** lahko pri tiristorjih izvedemo s talilnimi varovalkami ali z elektromehanskimi odklopniki, ki imajo izklopne čase med 20 in 150 ms. Pri tem moramo upoštevati, da s takim varovanjem ne varujemo tiristorjev pred kratkotrajnimi preobremenitvami znotraj časa ene polperiode. V napravah, v katerih naj bodo tiristorji tokovno čim bolj izkoriščeni, uporabljamo **kombinacije različnih zaščitnih sistemov**. Na sliki je prikazan diagram pretokovne zaščite tiristorja v kombinaciji ultra hitre talilne varovalke in toplotnega preobremenilnega stikala.



Na ordinati diagrama je efektivna vrednost toka preko tiristorja in na abscisi čas trajanja preobremenitve. Krivulja **a** podaja dovoljeno tokovno obremenitev tiristorja, **b** izklopno karakteristiko talilne varovalke in **c** izklopno karakteristiko toplotnega preobremenilnega stikala.

1.6.3.2 Omejitveni 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 vežemo 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.

1.6.3.3 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

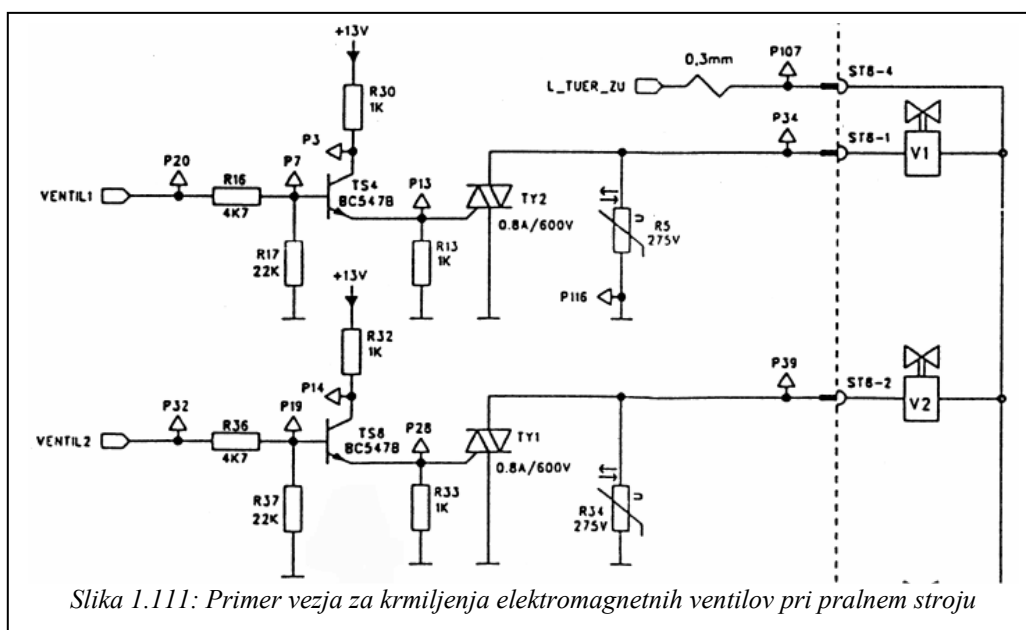
Podatke pomembnih parametrov tiristorja lahko razberemo tudi iz diagramov **polja karakteristik**, ki jih podaja proizvajalec. Pogosto opisujejo taki diagrami več povezanih parametrov kot so napetost, tok, moč, temperatura, idr.

Najpomembnejša omejitvena veličina, ki določa elektriške energijske razmere, je θ_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/ μ sec.).

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.



1.6.4 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 lahko že integriran v ohišje triac-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 100 μ A vžignega toka.

1.6.4.1 Krmiljenje moči na bremenu

Na sliki je prikazano vezje s trojnim načinom delovanja.

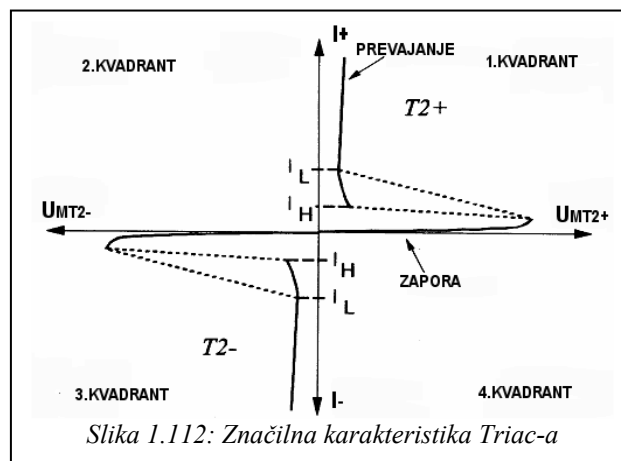
Na bremenu R_b lahko krmilimo moč v treh značilnih režimih.

V položaju 1 stikala S triak ne vžiga, zato je breme izklopljeno.

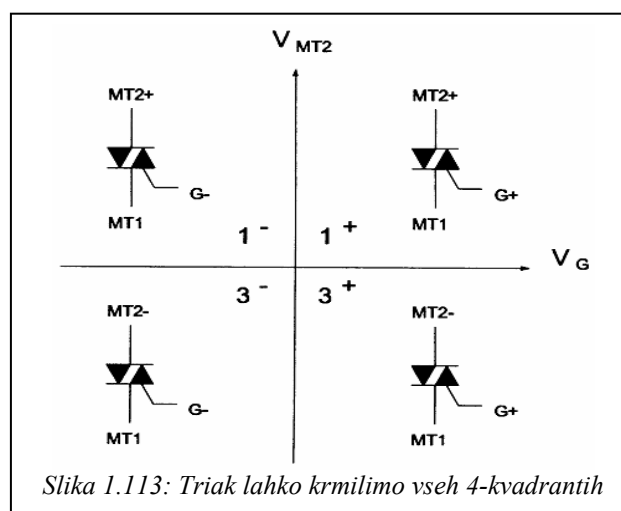
V položaju 2 je triak prožen vsako pozitivno polperiodo in je posledično breme napajano s pozitivno enosmerno pulzirajočo napetostjo in tokom.

V položaju 3 je proženje v negativnih polperiodah zato ima breme negativno napetost.

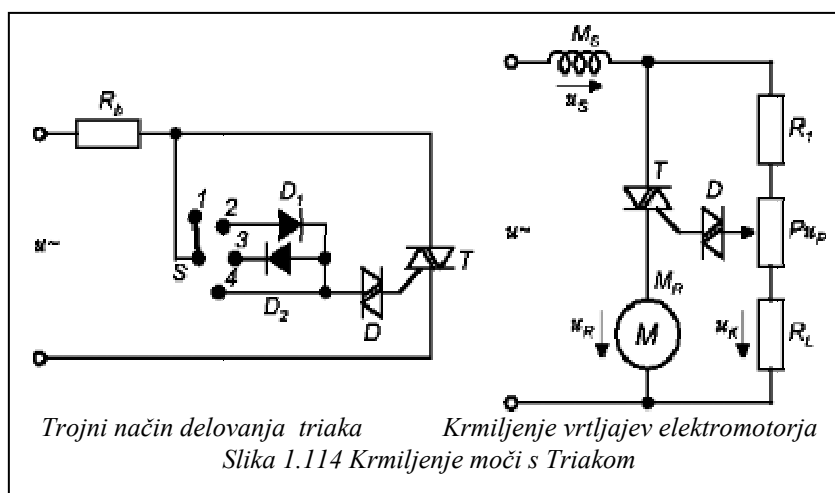
V položaju 4 je triak prožen tako v obeh polperiodah in breme je napajano z izmenično napetostjo. Breme je tako možno napajati s pozitivno ali negativno pulzirajočo enosmerno napetostjo (npr. krmiljenje enosmernega motorja v levo oz. desno) ali pa z izmenično napetostjo.



Slika 1.112: Značilna karakteristika Triac-a



Slika 1.113: Triak lahko krmilimo vseh 4-kvadrantih



Trojni način delovanja triaka

Krmiljenje vrtljajev elektromotorja

Slika 1.114 Krmiljenje moči s Triakom

1.6.4.2 Krmiljenje hitrosti enosmernega (univerzalnega) motorja

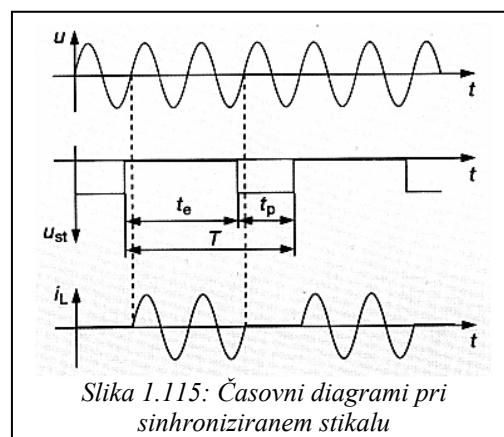
Na prejšnji sliki desno je predstavljena shema vezja za reguliranje hitrosti vrtljajev glavnostičnega enosmernega elektromotorja. M_S je navitje statorja in M_R navitje rotorja. Pri glavnostičnem elektromotorju brez regulacije sta navitji spojeni zaporedno in priključeni na enosmerno ali izmenično napajalno napetost. Vrtilna hitrost motorja je močno odvisna od obremenitve glavnostičnega elektromotorja. S spreminjanjem napajalne napetosti lahko le malo vplivamo na spremembo vrtljajev motorja in močno na vrtilni moment, ki z zniževanjem napetosti drastično pada. Brez regulacije povzroča krmiljenje hitrosti glavnostičnega motorja, s spreminjanjem napajalne napetosti, nestabilno delovanje. Inducirana napetost na navitju rotorja je dokaj linearno odvisna od vrtilne hitrosti. Prav to značilnost izkoriščamo za regulacijo hitrosti motorja s predstavljenim vezjem. Po enačbi pride preko statorskega navitja na potenciometrični delilnik le del napajalne napetosti:

Napetost z napetostnega delilnika u_K se primerja z napetostjo na rotorskem navitju. Kadar je napetost na rotorju nižja od napetosti na delilniku, se triak vžiga, drugače pa ne.

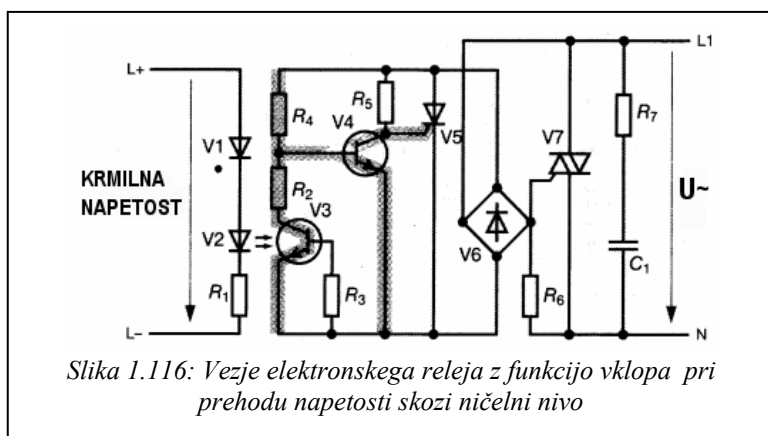
Ob proženju triaka se moment motorja poveča in s tem tudi vrtljaji. Vedno kadar, zaradi obremenitve motorja pade vrtilna hitrost, pride do proženja in vrtljaji se povečujejo. Vrtljaji motorja se tako z obremenitvijo, le malo spremenijo. Z nastavljanjem napetosti na potenciometričnem delilniku u_P lahko nastavljamo želene vrtljaje glavnostičnega motorja. Tako nastavljena hitrost je regulirana in zato stabilna. V praksi se ta način pogosto uporablja pri električnem ročnem orodju in malih gospodinjskih aparatih, kjer je krmilnik običajno v integrirani obliki.

1.6.4.3 Sinhronizirano elektronsko stikalo

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.



Slika 1.115: Časovni diagrami pri sinhroniziranem stikalu

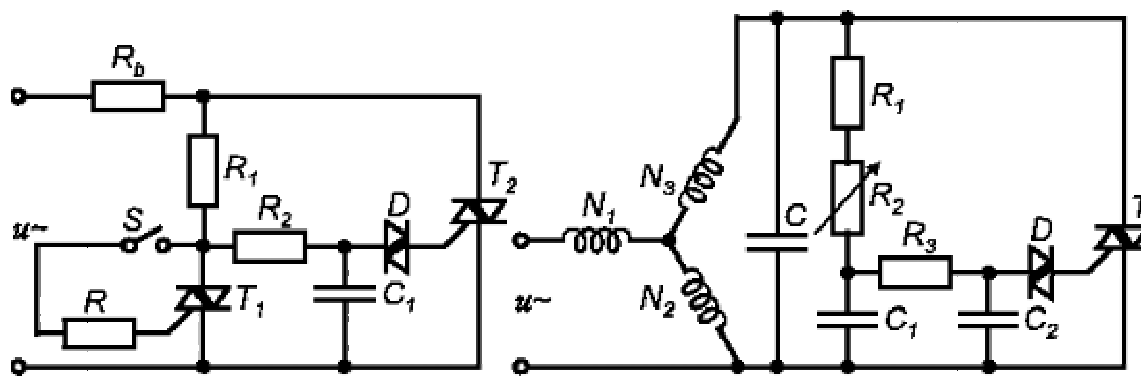


Slika 1.116: Vezje elektronskega releja z funkcijo vklopa pri prehodu napetosti skozi ničelno nivo



Slika 1.117: Elektronski rele

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.

Sinhronizirano stikalo – 2.izvedba

Slika 1.118: Sinhronizirano elektronsko stikalo

Slika 1.119: Regulacija hitrosti »enofaznega« elektromotorja

Kadar je stikalo razklenjeno, je proženje triaka T_2 izvedeno prek uporov R_1 , R_2 in diaka D . Ob sklenjenem stikalu proži triak T_1 , ki kratko veže del prožilne verige, zato triak T_2 ne vžge in breme je izklopljeno. Pri ustrezno izbranih uporih R_1 in R_2 ter kondenzatorju C in pri odprtem stikalu S , vžiga triak T_2 takoj po prehodu omrežne napetosti skozi nični potencial in izvrši **mehak vklop bremena na omrežje**. V praksi je pogosto dodano še vezje za galvanско ločitev vhoda S , ki je večinoma napetostni vhod od 3 do $15V_{DC}$. Na ta način delujejo elektronski releji (kontaktorji) oz. naprave za mehak zagon elektromotorjev.

Krmiljenje vrtljajev enofaznega asinhronskega motorja

Desno vezje na prejšnji sliki kaže primer krmiljenja vrtljajev enofaznega asinhronskega elektromotorja. Za ustvarjanje vrtilnega magnetnega polja enofaznega asinhronskega motorja je na pomožno fazno navitje priključen kondenzator C , ki opravlja potrebni fazni premik. Za krmiljenje vrtljajev je vzporedno k kondenzatorju priključeno vezje uporov R_1 , R_2 , R_3 , kondenzatorjev C_1 in C_2 in diaka D . Triak T je priključen na inducirano napetost faznih navitjih N_2 in N_3 in vžiga odvisno od vrednosti upornosti spremenljivega upora R_2 in inducirane napetosti na fazah. Po proženju je med fazama N_2 in N_3 kratki stik, zato tudi ni potrebne fazne premaknitve, zaradi česar se vrtilni moment in vrtljaji motorja zmanjšajo. Čim višja je upornost upora R_2 , tem večja je vrtilna hitrost motorja.

1.6.4.4 Slabosti krmiljenja s tiristorji in triaki

Sistemi energijske elektronike vklapljajo, 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 in triak-ov, kar pa presega okvire te vsebine.

1.6.5 DESET PRAVIL ZA KONSTRUIRANJE VEZIJ S TIRISTORJI (*Ten golden rules*)