

**VISOKA ŠKOLA ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA STRUKOVNIH
STUDIJA-VIŠER, BEOGRAD**

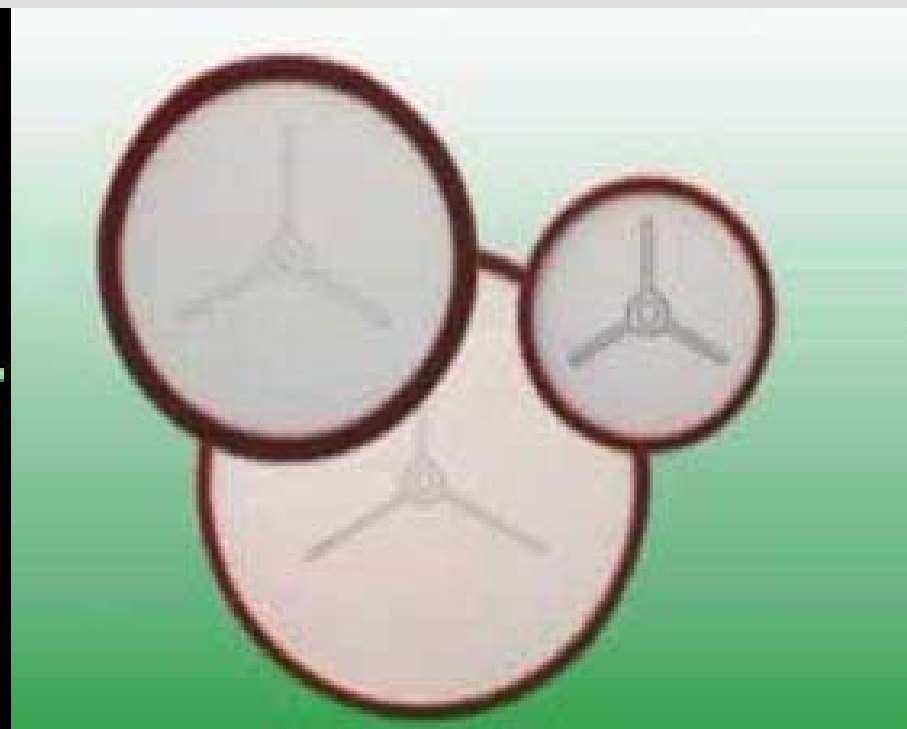
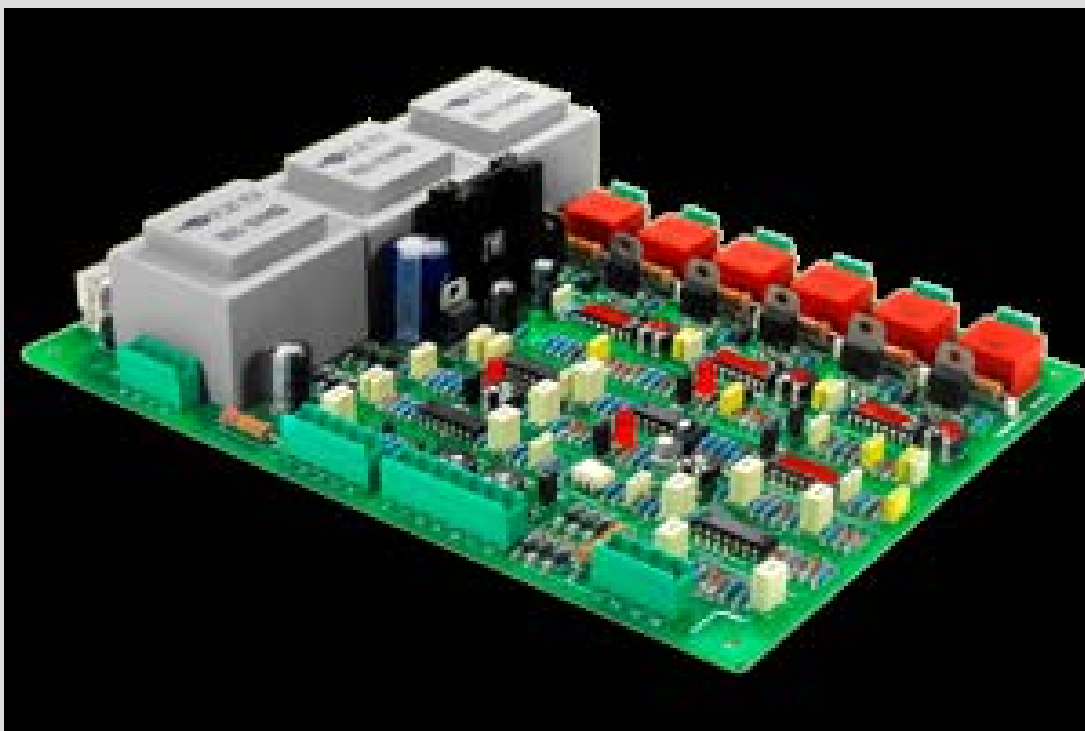
STUDIJSKI PROGRAM: Elektrotehničko inženjerstvo

MASTER STUDIJE 2017/2018

PREDMET: PROJEKTOVANJE ELEKTROENERGETSKIH PRETVARAČA



POBUDNA KOLA TIRISTORA

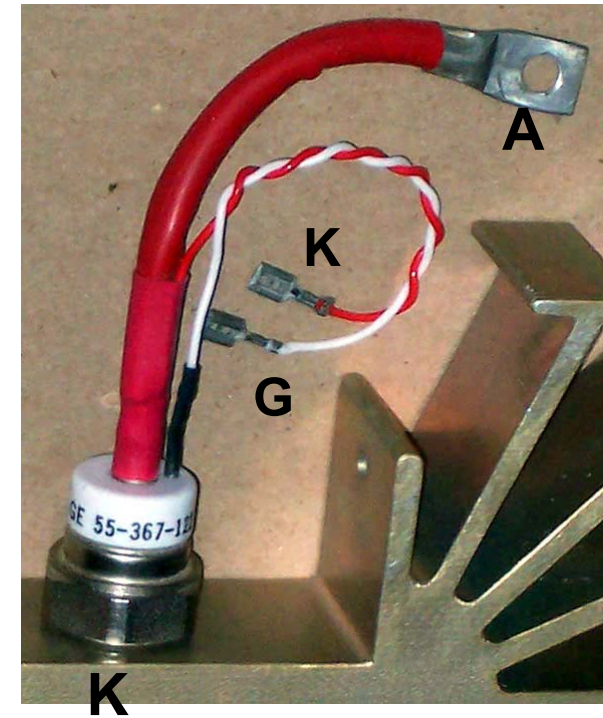
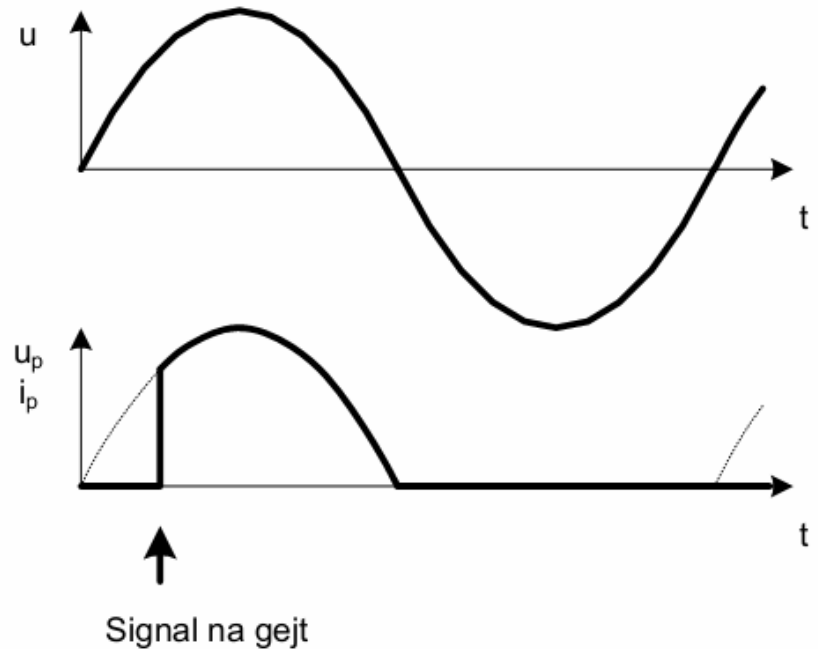
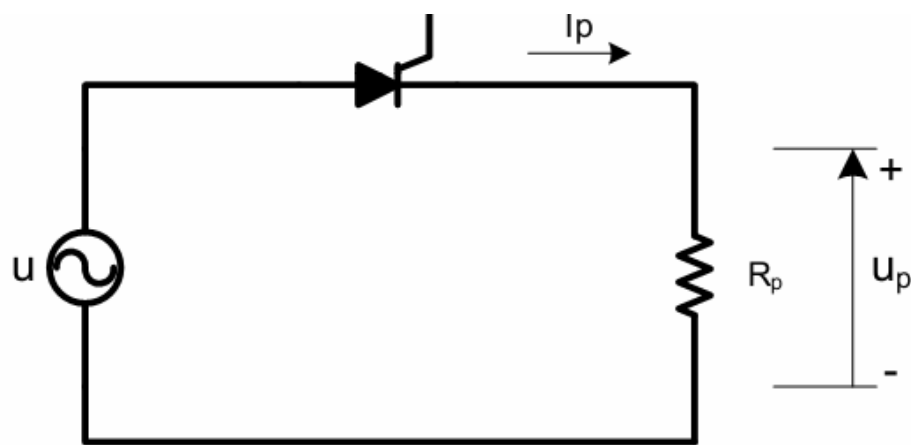
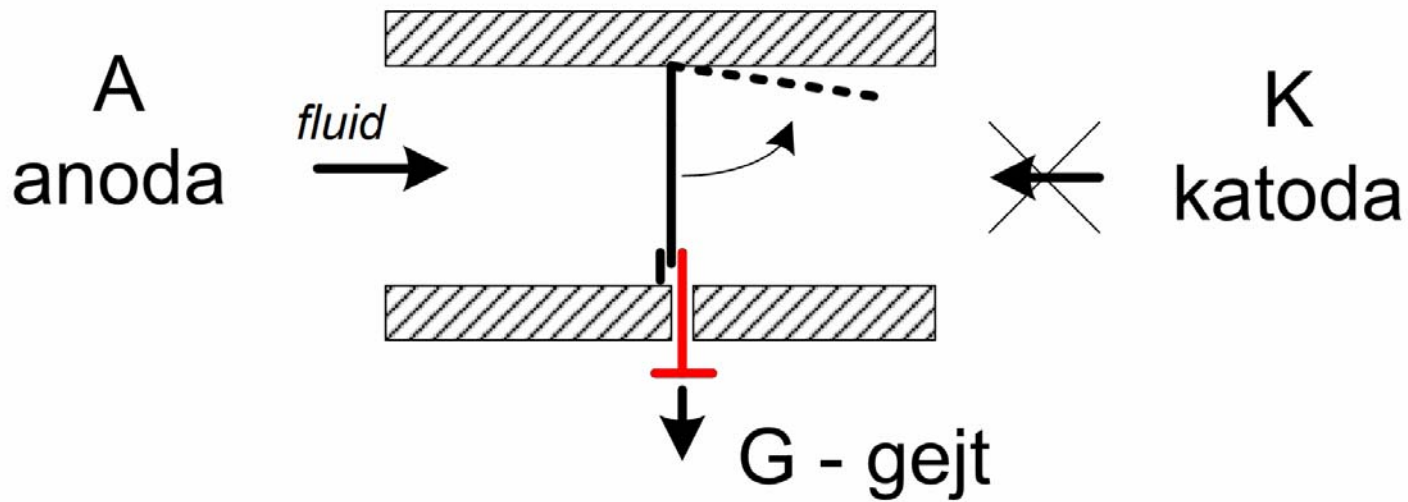
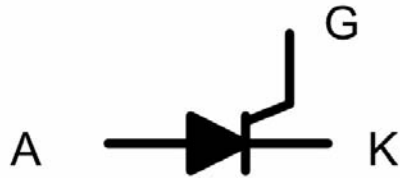


Predmetni profesor:
Dr Željko Despotović, dipl.el.inž

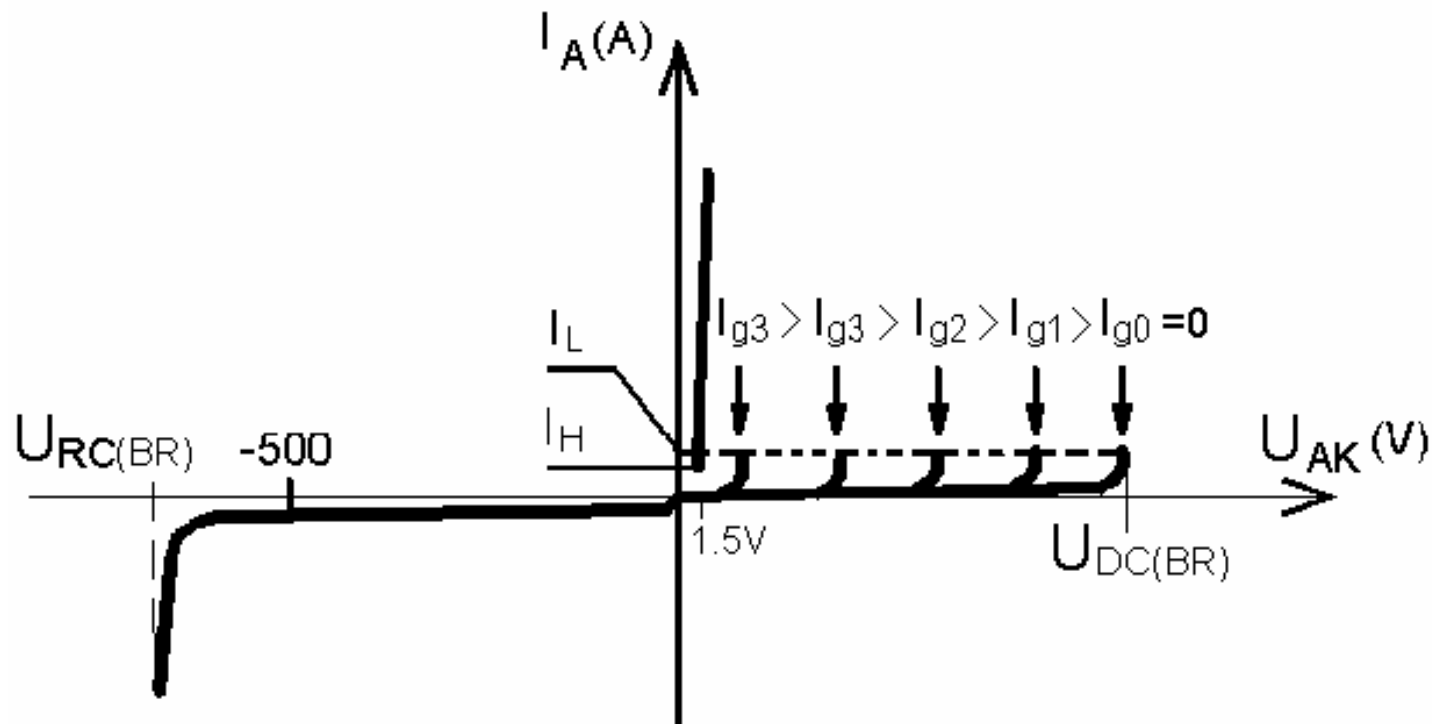
TIRISTOR

Engl. **SCR** (**S**ilicon **C**ontrolled **R**ectifier)

analogija



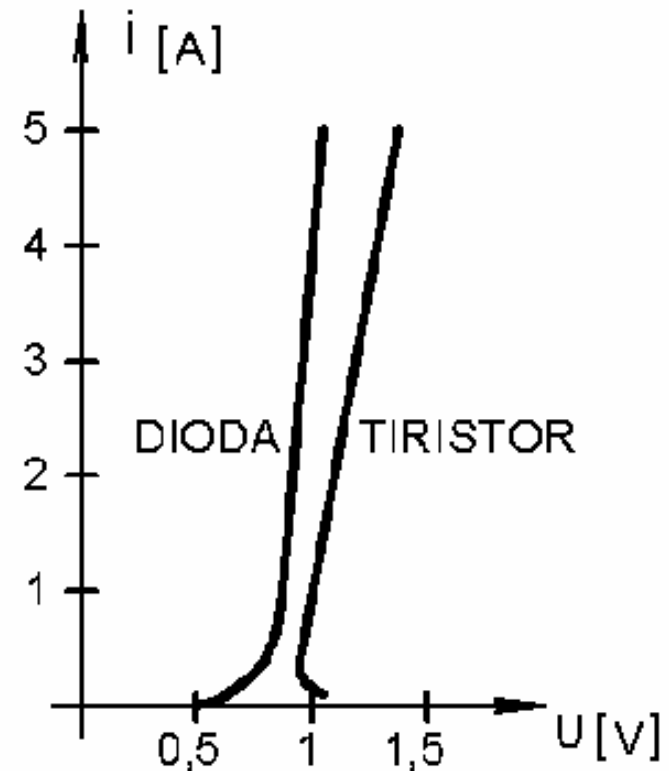
Volt-amperska karakteristika tiristora



- Jedna tipična statička karakteristika tiristora je data na slici.
- Inverzni deo karakteristike je sličan diodi.
- Kod direktne polarizacije struja tiristora zavisi od napona ali i od struje upravljačke elektrode (gejta).
- Kako raste struja ubrizgana u gejt, tako pada probojni napon u direktnom smeru.
- Ako je impuls struje dovoljno veliki, tiristor će da veoma brzo preći u provodno stanje (za vreme reda veličine nekoliko desetina mikro sekundi).

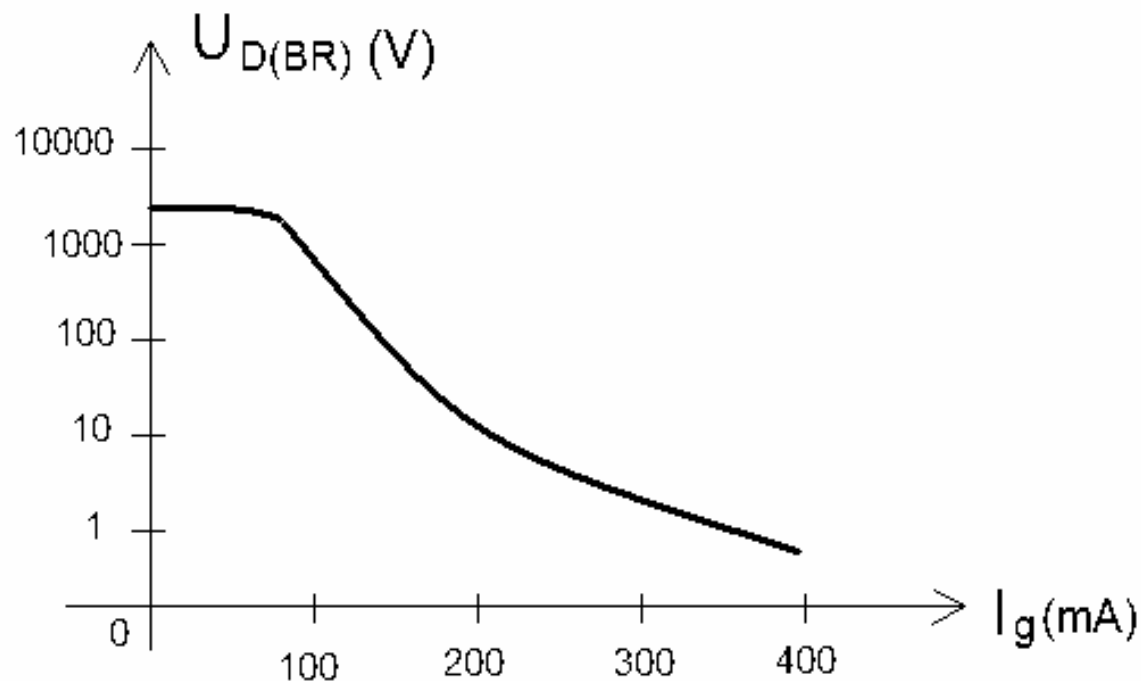
Volt-amperska karakteristika tiristora u stanju vođenja

- Kada tiristor pređe u stanje vođenja, struja tiristora praktično zavisi od spoljnog kola (opterećenja)
- U tom slučaju njegova volt-amperska karakteristika se može približno predstaviti pravom linijom (slično kao kod energetske diode)
- Ustvari tada se tiristor ponaša slično diodi

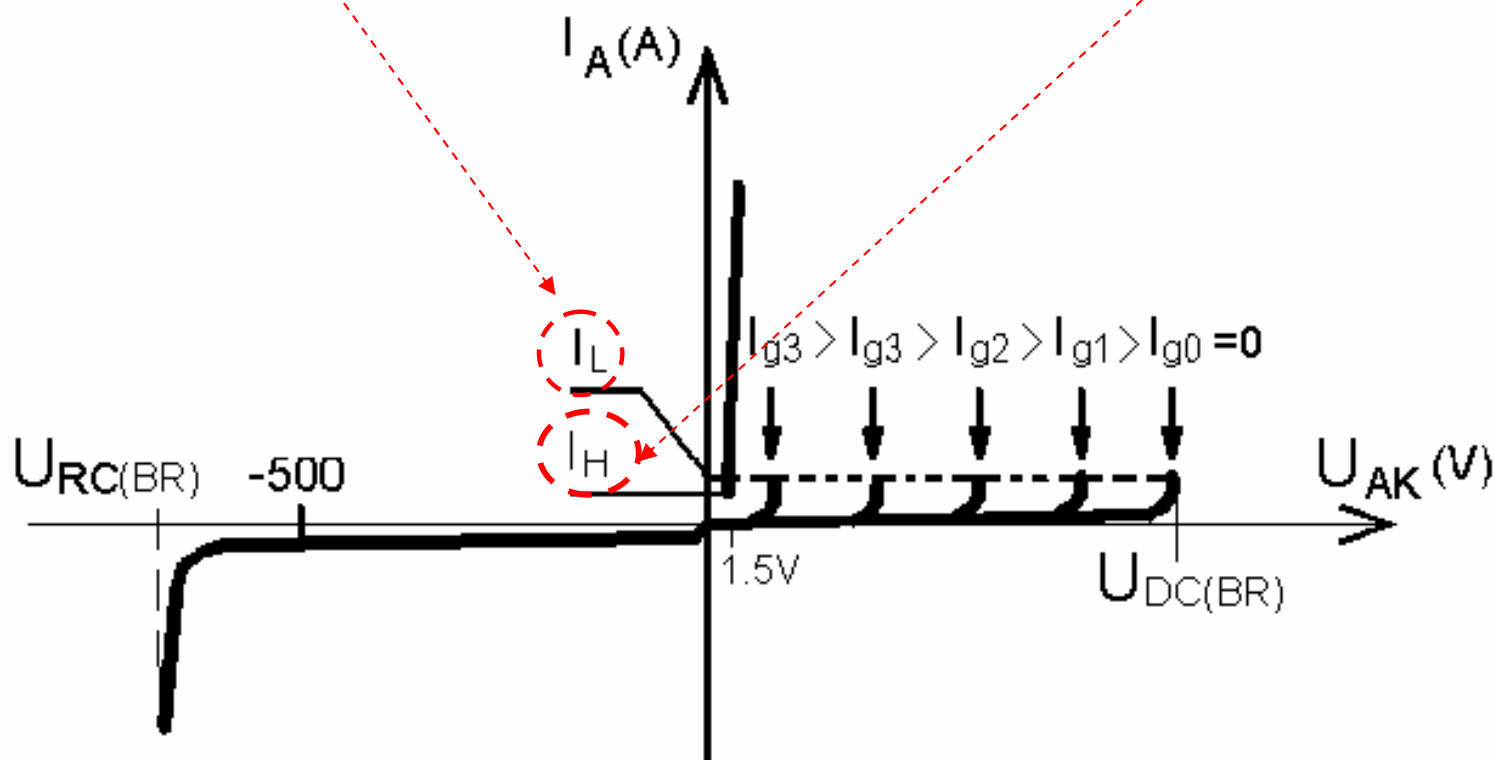


- U inverznom smeru struja gejta samo neznatno utiče na porast inverzne struje zasićenja.
- Za razliku od diode tiristor ne vodi odmah sa uspostavljanjem direktnog napona između anode i katode, već tek po dovođenju upravljačkog impulsa na upravljačku elektrodu-gejt.
- Vođenje traje sve dok se na njemu ne pojavi inverzni napon, pri čemu se pojavi kratkotrajna inverzna struja i tiristor prestaje da vodi (tiristor se tada gasi).
- Kako raste struja ubrizgana u gejt, tako pada probojni napon u direktnom smeru.

Zavisnost probojnog napona tiristora od upravljačke struje

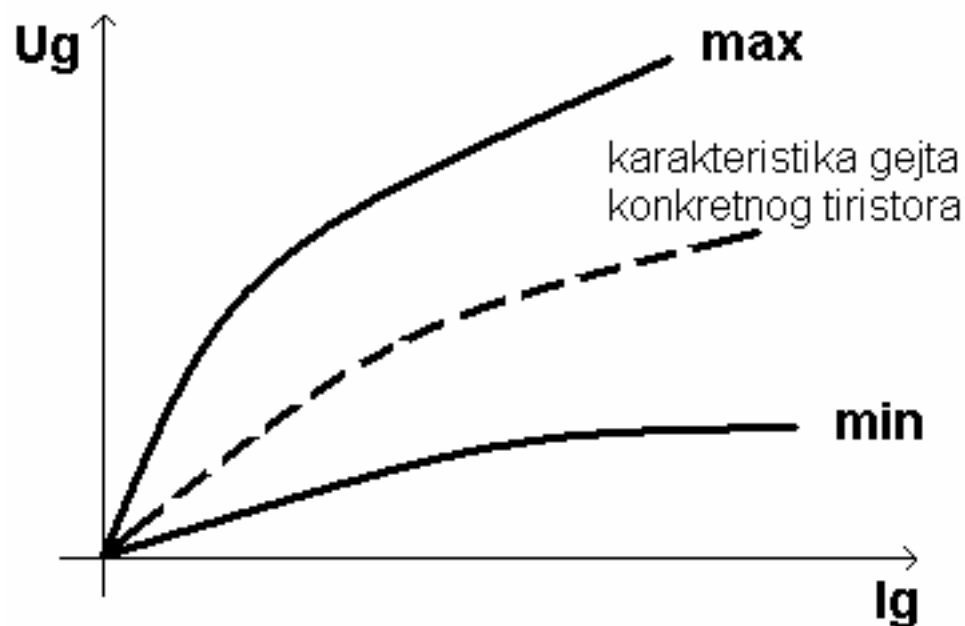


Da bi se tiristor uključio potrebno je da struja bude veća od takozvane *struje prihvatanja* (*latching current*) - I_L . Veličina struje prihvatanja kreće se od oko 150 mA (za tiristore reda 10A) do oko 1.5 A (za tiristore reda 1000 A). Pri smanjenju struje, u jednom trenutku tiristor ponovo postaje neprovođan. Ova minimalna struja naziva se i *struja držanja* (*holding current*) - I_H . Ispod ove struje tiristor se blokira (isključuje). Veličina struje držanja kreće se od oko 80 mA (za tiristore reda 10 A) do oko 0.5 A (za tiristore reda 1000 A). Struja I_H je manja od struje prihvatanja. Odnos struja prihvatanja i držanja je oko 2 do 3, tako da između struja uključivanja i isključenja postoji izvestan histerezis.



Volt-amperska karakteristika gejta

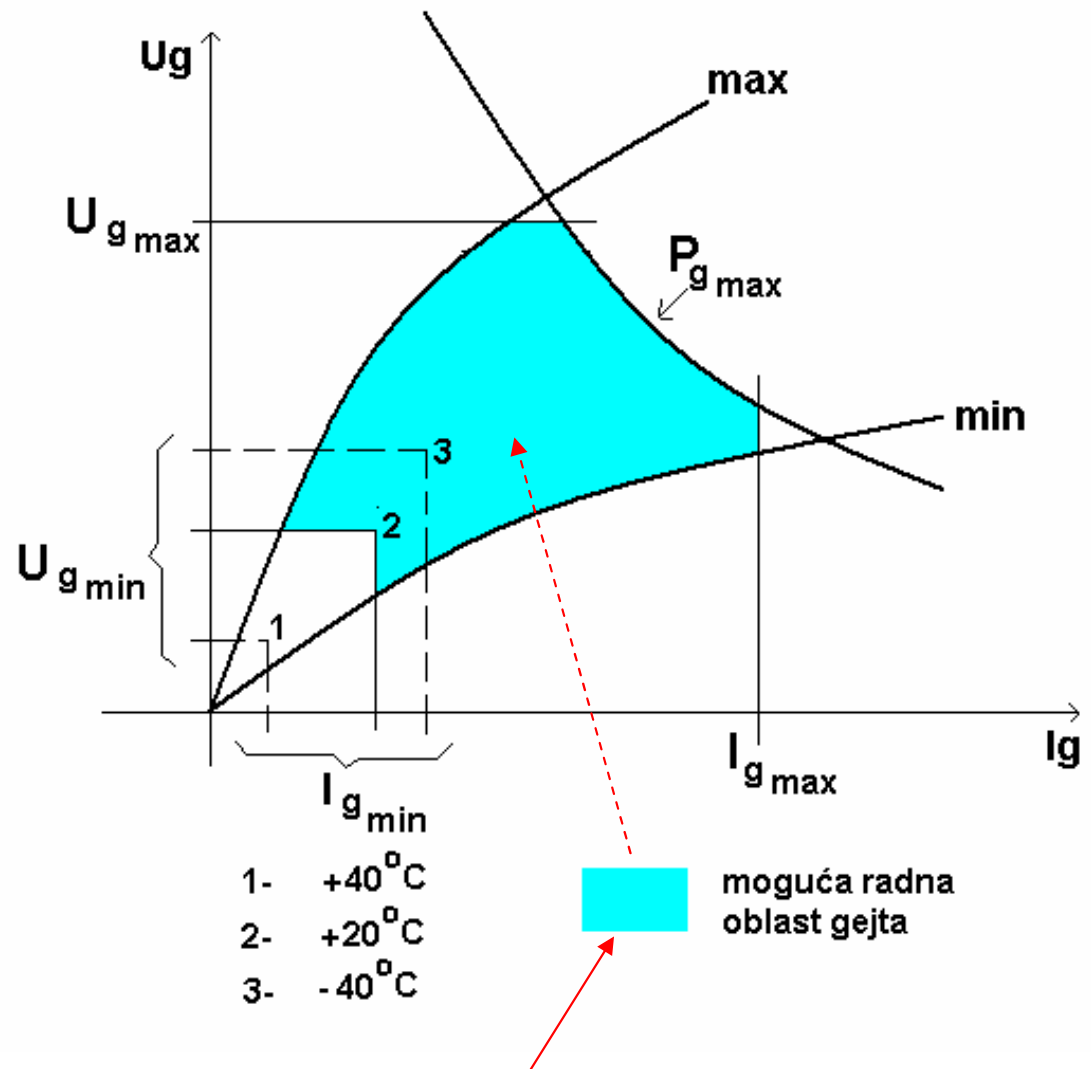
- Okidni impuls na gejtju mora imati dovoljan napon i struju da bi se tiristor uključio pri svim radnim uslovima.
- Volt-amperska karakteristika gejta vrlo podseća na karakteristiku direktno polarisane diode.
- Karakteristike komande tiristora određenog tipa se međusobno razlikuju (rasipaju) a zavise i od temperature.
- Za isti tip tiristora su moguća znatna odstupanja, pa se u karakteristikama proizvođača daju *granične krive*.
- Između graničnih krivih se sigurno nalazi volt- amperska karakteristika gejta.
- Na slici su prikazane granične karakteristike *min* i *max* unutar kojih se praktično svi tiristori određenog tipa uključuju.



Koje granične krive još postoje pored graničnih karakteristika *min*, *max*?

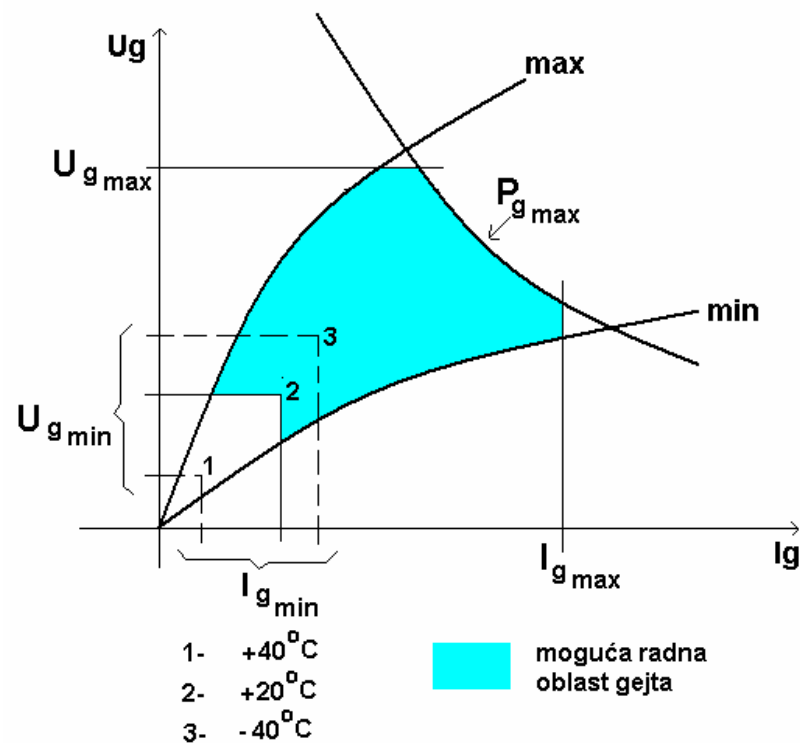
Granične krive kola gejta tiristora

- Za isti tip tiristora su moguća znatna odstupanja, pa se u karakteristikama proizvođača daju *granične krive*.
- Između graničnih krivih se sigurno nalazi volt- amperska karakteristika gejta.
- Na slici su prikazane granične karakteristike *min* i *max* unutar kojih se praktično svi tiristori određenog tipa uključuju.
- Propusne karakteristike se nalaze između graničnih krivih.
- Pored ovih ograničenja postoje i ograničenja po temperaturi i hiperboli graničnih gubitaka.
- Stvarni okidni impuls mora biti unutar opsega određenog ovim ograničenjima.
- Ograničenje snage disipacije geita (hiperbola snage) ustvari znači, da se ne sme uzeti ni previše jak impuls koji bi mogao da razori spoj gejta.
- Moguća radna oblast gejta je prikazana na slici



Stvarni okidni impuls mora biti u ovoj oblasti!!!!

KARAKTERISTIČNE VELIČINE KOLA GEJTA



Na karakteristici gejta se uočavaju karakteristične veličine:

$U_{g_{max}}$ -maksimalni dozvoljeni napon gejta

$I_{g_{max}}$ - maksimalno dozvoljen struja gejta

$U_{g_{min}}$ - minimalni napon gejta pri kome se tiristor sigurno prevodi u provodno stanje

$I_{g_{min}}$ - minimalna struja gejta pri kojoj se tiristor prevodi u provodno stanje

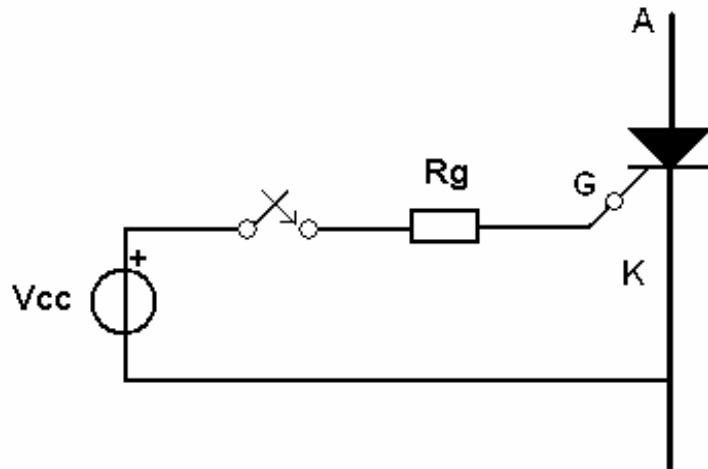
$P_{g_{MAX}}$ -maksimalna dozvoljena disipacija gejta

Vrednosti $U_{g_{min}}$ i $I_{g_{min}}$ su jako temperaturno zavisne- što je tiristor hladniji, to je potreban jači impuls struje u gejt da ga prevede u stanje vođenja i obrnuto.

JEDNOSTAVNA POBUDA GEJTA

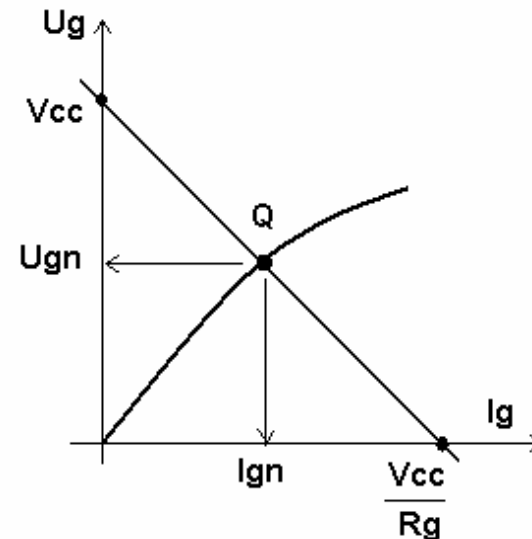
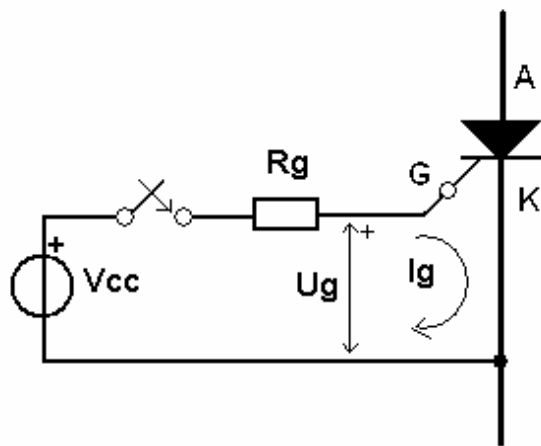
Jedno JEDNOSTAVNO kolo za generisanje struje gejta je dato na slici.

Zatvaranjem prekidača se generiše impuls struje gejta. U kolu gejta se nalazi električni otpor R_g koji se podešava radna struja gejta. Ovo električno kolo je nelinearno i za njegovo rešavanje se koristi koncept radne prave.



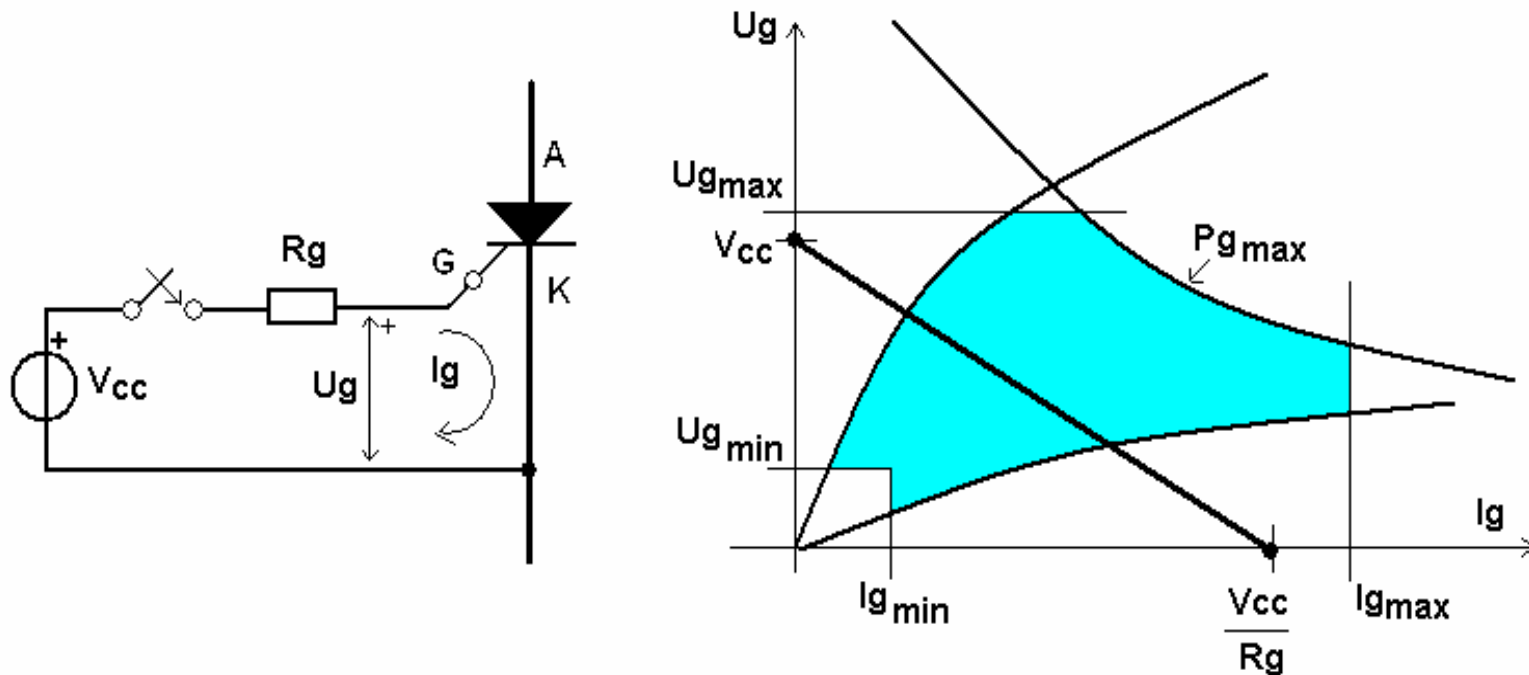
*Prekidačko kolo
pobude gejta*

$$I_g = \frac{V_{CC} - V_g}{R_g}$$



POLOŽAJ RADNE PRAVE U KOLU GEJTA

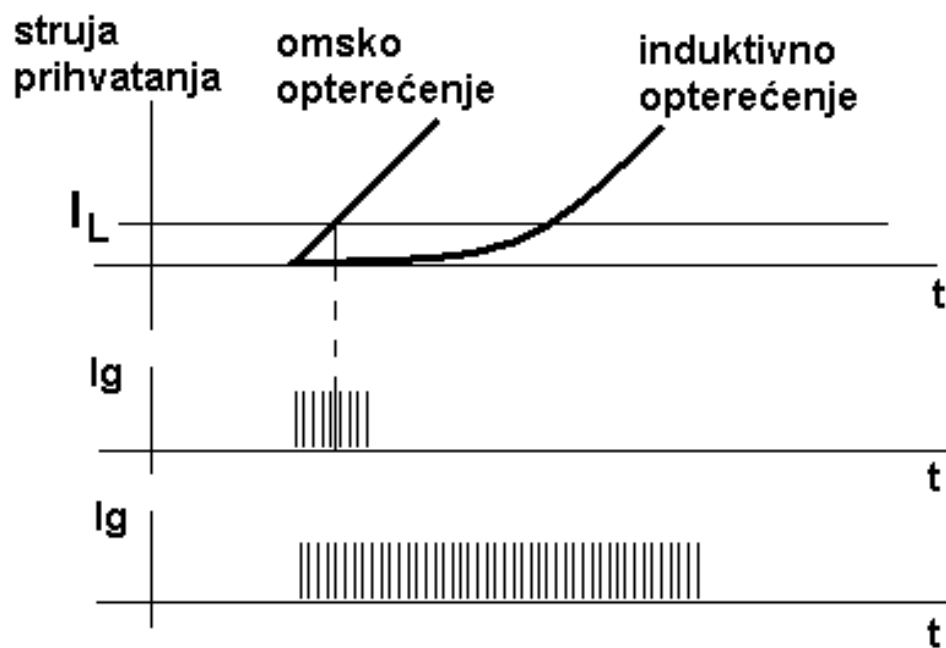
Napon napajanja V_{CC} i R_g biramo tako da radna prava prolazi kroz dozvoljenu radnu oblast karakteristike gejta. Tipično napon V_{CC} je u opsegu 15V...24V. Položaj radne prave u odnosu na moguću radnu oblast gejta je dat na slici



Radna prava u mogućoj radnoj oblasti gejta

Potrebno vreme trajanja upravljačkog impulsa kod različitih strmina struje opterećenja

- Struja gejta, obično je reda 50 mA za male tiristore, dok je za velike tiristore 300-400mA.
- Trajanje impulsa treba da bude nekoliko desetima mikrosekundi. Kod uključenja omskog opterećenja trajanje impulsa na gejtju je znatno kraće nego u slučaju induktivnog opterećenja.
- U slučaju induktivnog tereta (struja se sporo uspostavlja), impuls treba da traje sve dok struja opterećenja ne premaši vrednost struje prihvatanja

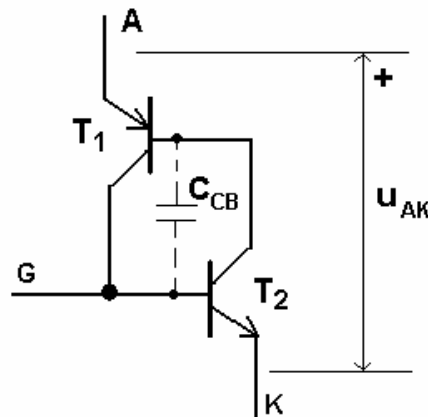


Dinamičke karakteristike tiristora

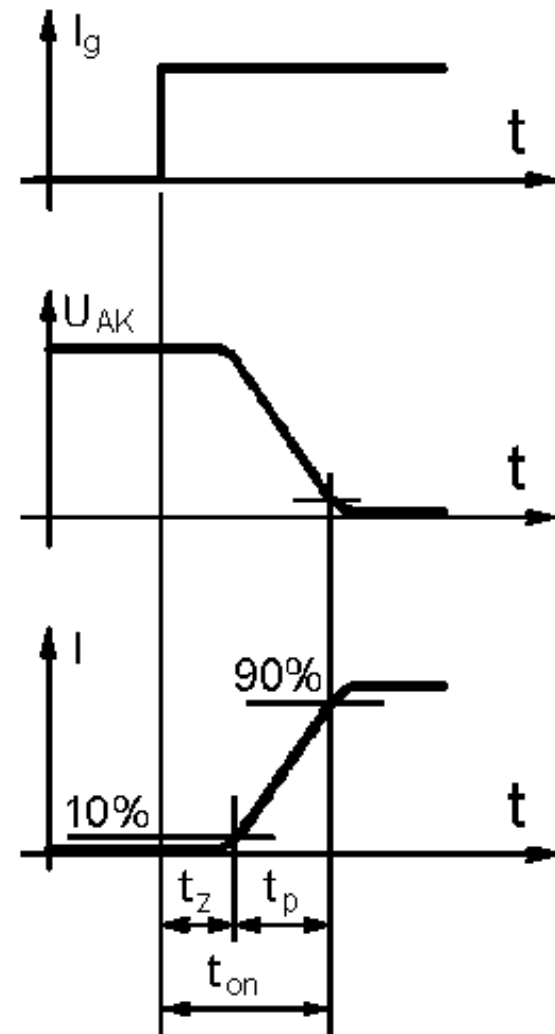
- Dinamičke karakteristike predstavljaju vremena karakteristična za uključenje (*turn-on time*) i isključenje (*turn-off time*)
- Karakteristična vremena su:
 - vreme kašnjenja uključanja (reda 1ms) t_z
 - vreme porasta struje (nekoliko ms) t_p
 - vreme uključanja t_{on}

Tiristor u provodno stanje može da prevede i brzi porast napona između anode i katode u direktnom smeru. Ustvari kapacitet inverzno polarisanog sentralnog P-N spoja može da propusti struju čija je jačina:

$$C_{CB} \frac{dU_{AK}}{dt}$$



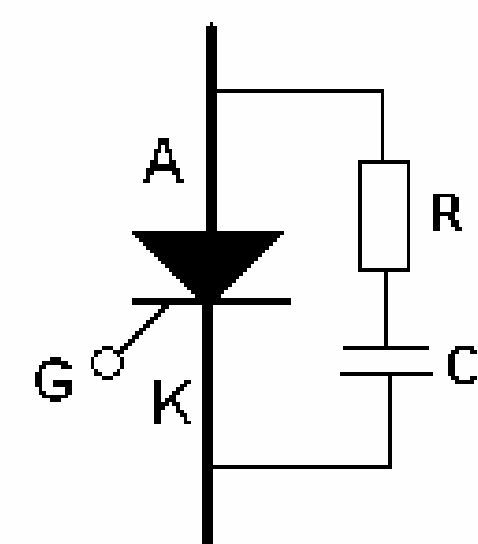
Parazitna kapacitivna struja koja može uključiti tiristor



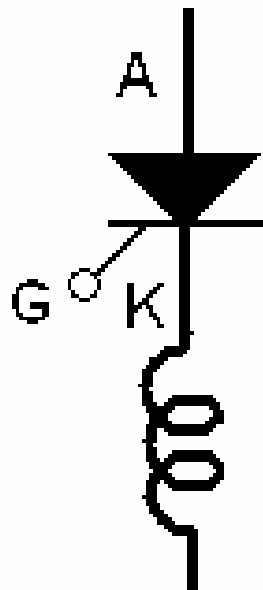
Karakteristični vremenski dijagrami kod uključanja tiristora

BRZINA PORASTA NAPONA NA TIRISTORU

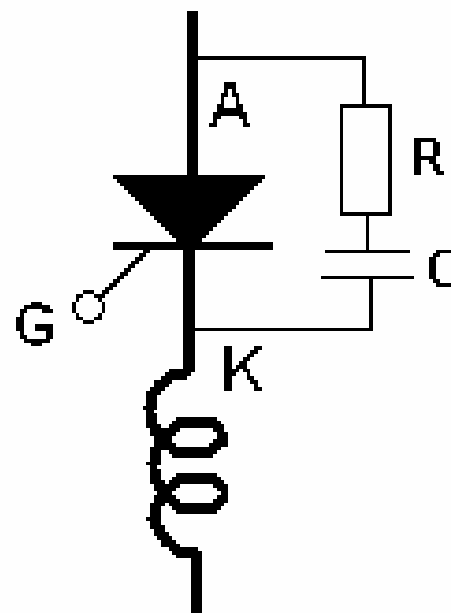
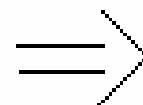
Zbog toga se tiristori dele i prema brzini porasta ovog napona. Tipične vrednosti su u opsegu od 200 ... 1000 V/ μ s. Ovakvo uključenje je neželjeno i porast napona dU_{AK}/dt donekle može da se ublaži dodavanjem R-C člana paralelno tiristoru, kao što je prikazano na slici



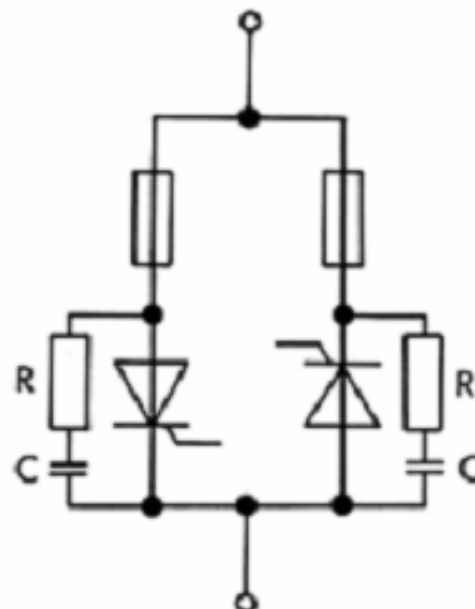
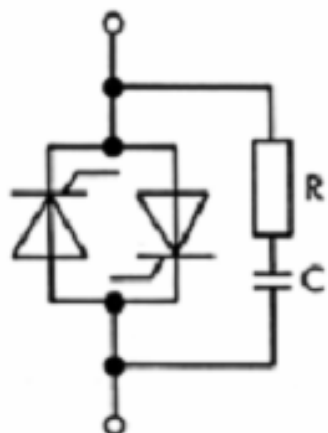
zastita od
prevelikog dU/dt



zastita od
prevelikog dI/dt



Dimenzionisanje snaber kola za pretvarače W1C (AC-AC podešavače napona)



$$C \approx 700 \cdot \frac{I_V}{V_V^2}$$

$$R \approx \frac{9000}{C \cdot V_V}$$

$$P_R \approx 3 \cdot 10^{-6} \cdot C \cdot V_V^2 \cdot f$$

BRZINA PORASTA STRUJE TIRISTORA

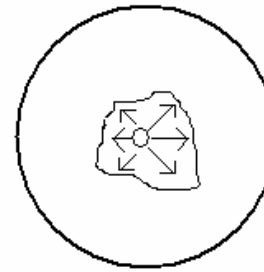
- Sledeća važna karakteristika kod uključanja je i brzina porasta struje (di/dt). Impuls na gejt aktivira određenu zonu na kristalu tiristora. Ova zona se vremenom širi na celu površinu.

- Potrebno je određeno vreme da se provodna zona proširi od kontakta gejta po celoj površini tiristora.

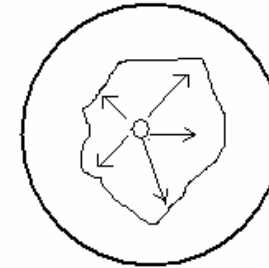
- Ako je opterećenje čisto omsko ili kapacitivno, struja pri uključanju veoma brzo raste i njena gustina na aktiviranom delu površine može biti previsoka tako da može doći do razaranja tog dela kristala i trajnog oštećenja tiristora, zbog lokalnog pregrevanja.

- Tipične vrednosti brzine porasta struje su oko $100 \text{ A}/\mu\text{s}$

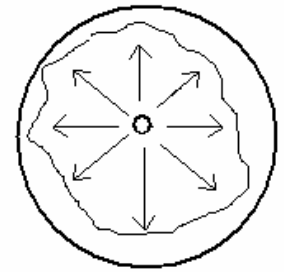
- Na mestima gde je to kritično, na red sa tiristorom dodaju se male induktivnosti koje su najčešće načinjene od feritnih jezgara



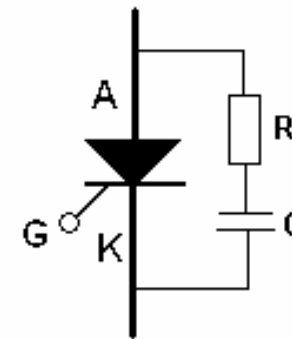
t1



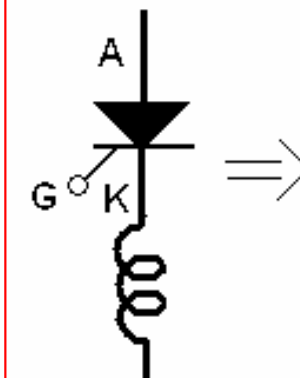
t2



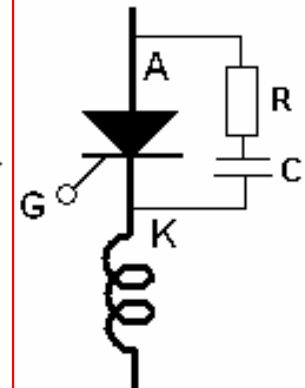
t3



zastita od
prevelikog dU/dt

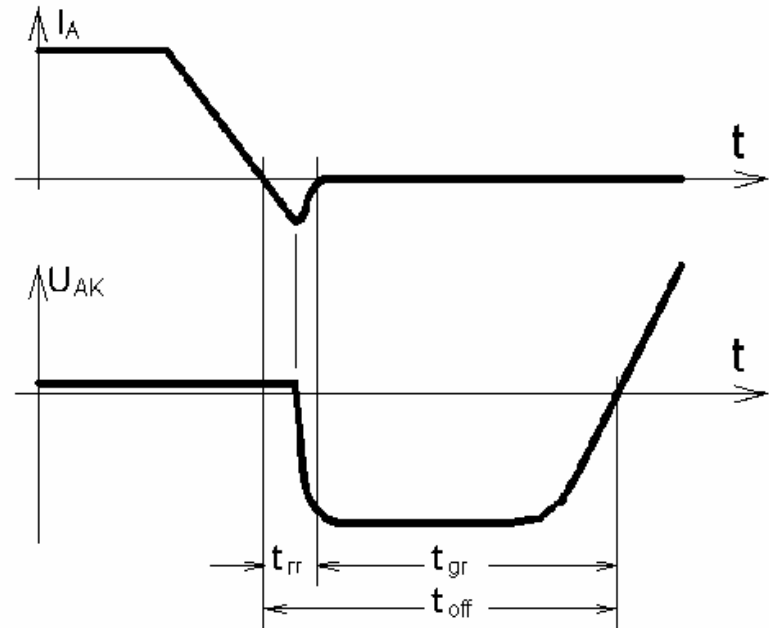


zastita od
prevelikog di/dt



Isključenje tiristora

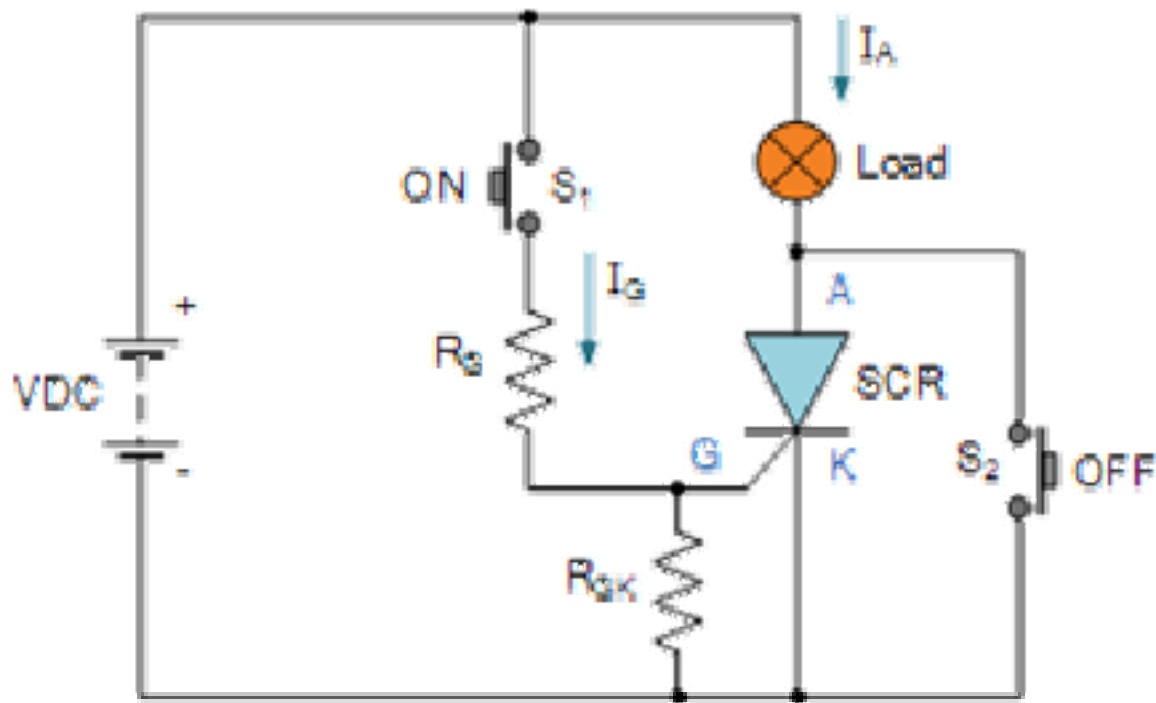
- Najčešći način isključivanja tiristora je promena polariteta anodnog napona. Pri tome treba sačekati određeno vreme koj se u stručnoj praksi naziva "vreme odmaranja", a obeležava se sa t_q
- Ustvari to je vreme koje je potrebno da se rekombinuju naelektrisanja u okolini centralnog P-N spoja tiristora, koji je bio u stanju vođenja. Ovo vreme se računa od trenutka prolaska struje tiristora kroz nulu, do trenutka kada može ponovo da primi direktan napon, koji je porastao dozvoljenom brzinom porasta dU_{AK} / dt
- Kod brzih tiristora koji se koriste u invertorima i čoperima deklariše se *gornja granična vrednost* za t_q i ona iznosi od 20μs....60μs.
- Kod sporih tiristora koji se koriste u ispravljačima, za se daje tipična vrednost i obično iznosi 100μs....300μs.



- Kao i kod diode, i ovde se pojavljuje inverzna struja i vreme oporavljanja t_{rr} . Međutim tiristor nije spreman odmah da prihvati i puni inverzni napon. Da bi mogao da ga prihvati potrebno je da prođe vreme čija je minimalna vrednost označena t_{gr} (*gate recovery time*).
- Zbir ova dva vremena predstavlja vreme isključenja. Prema veličini ovog vremena tiristori se dele na spore i brze. Vreme isključenja kod sporih tiristora ide i do 200μs. Ovi tiristori se mogu primenjivati samo na mrežnim frekvencijama.
- Kod brzih tiristora ovo vreme je reda 10μs tako da se mogu primenjivati do frekvencija reda kHz.

UPRAVLJAČKA KOLA ZA TIRISTORE

- Upravljačka kola (pobudna kola) koja se popularno nazivaju i DRAJVERI (od engl. reči “driver”)
- Ponekada se nazivaju i UPALJAČI
- FIRING (paljenje)
- FIRING CIRCUIT
- Test kola (za testiranje ispravnosti tiristora)
- Pobudna kola bez galvanske izolacije
- Pobudna kola sa galvanskom izolacijom
- Pobudna kola sa optičkom izolacijom (za ekstremno visoke napone)
- Galvanska izolacija?



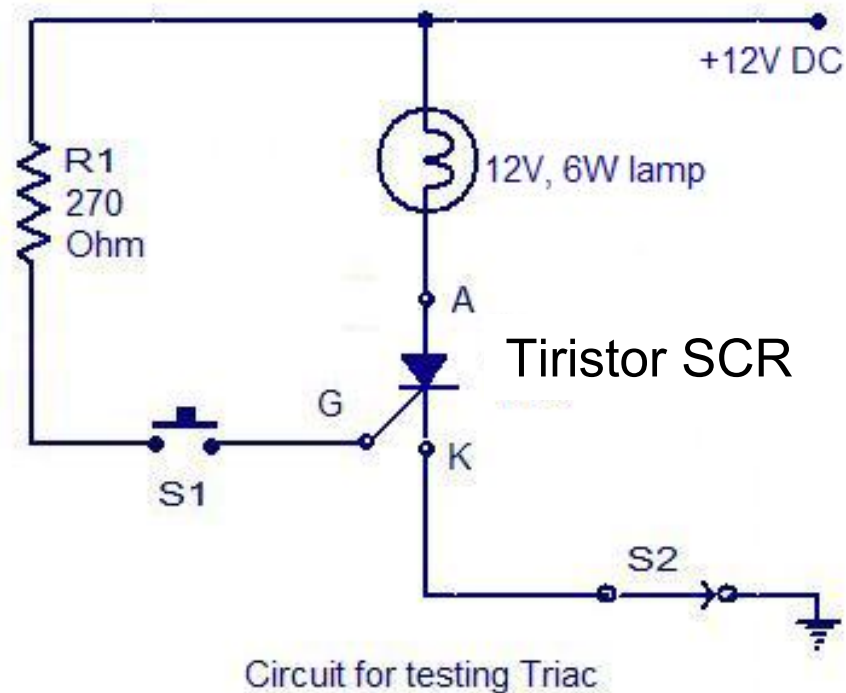
TEST KOLA

S1 i S2 su tasteri

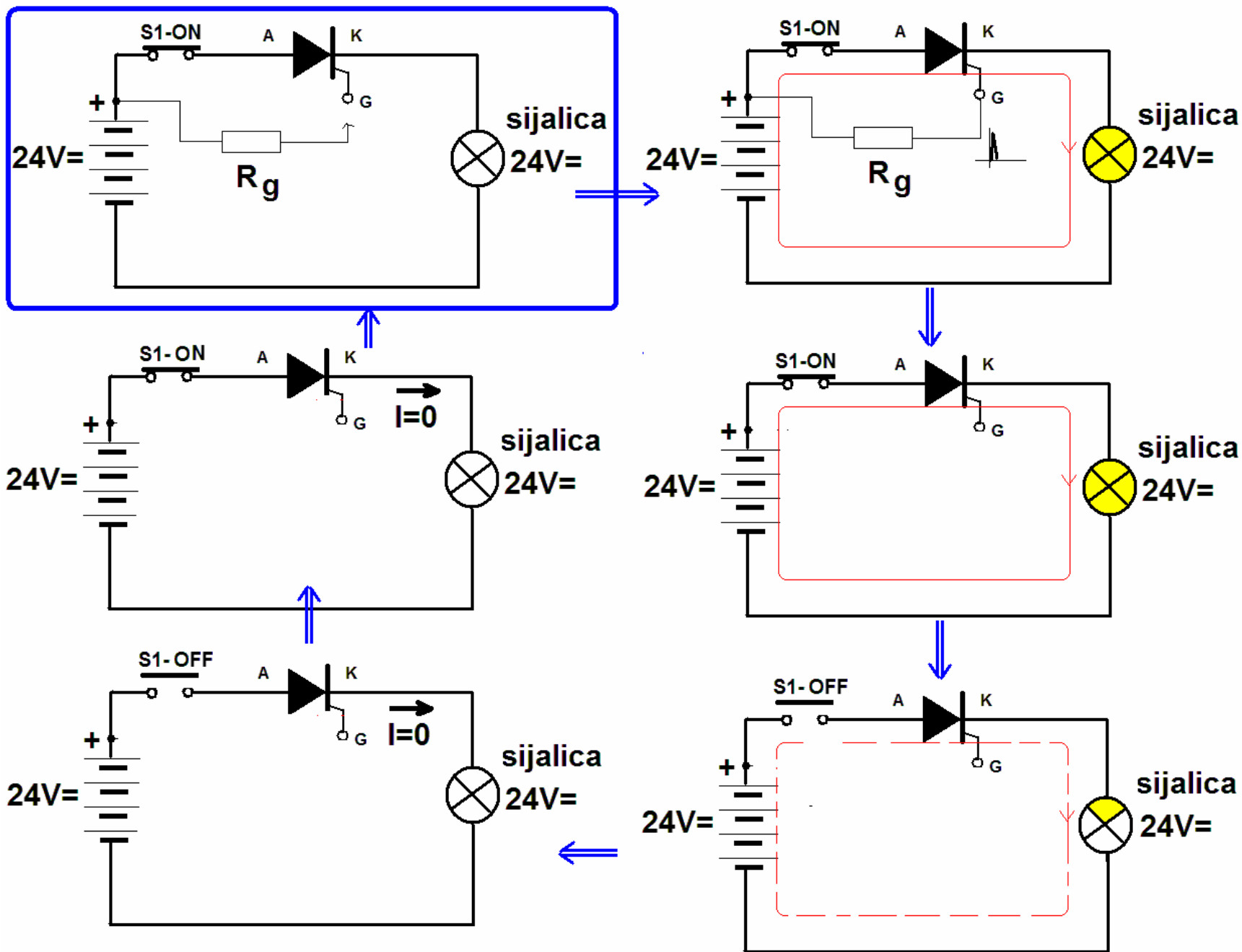
Pritiskom na S1 kratkotrajno
i otpuštanjem dovodimo
SCR u stanje vođenja
SIJALICA SVETLI!!!

**KOLIKO DUGO?
ŠTA SE DEŠAVA
KRATKOTRAJNIM PRITISKOM
NA S2?**

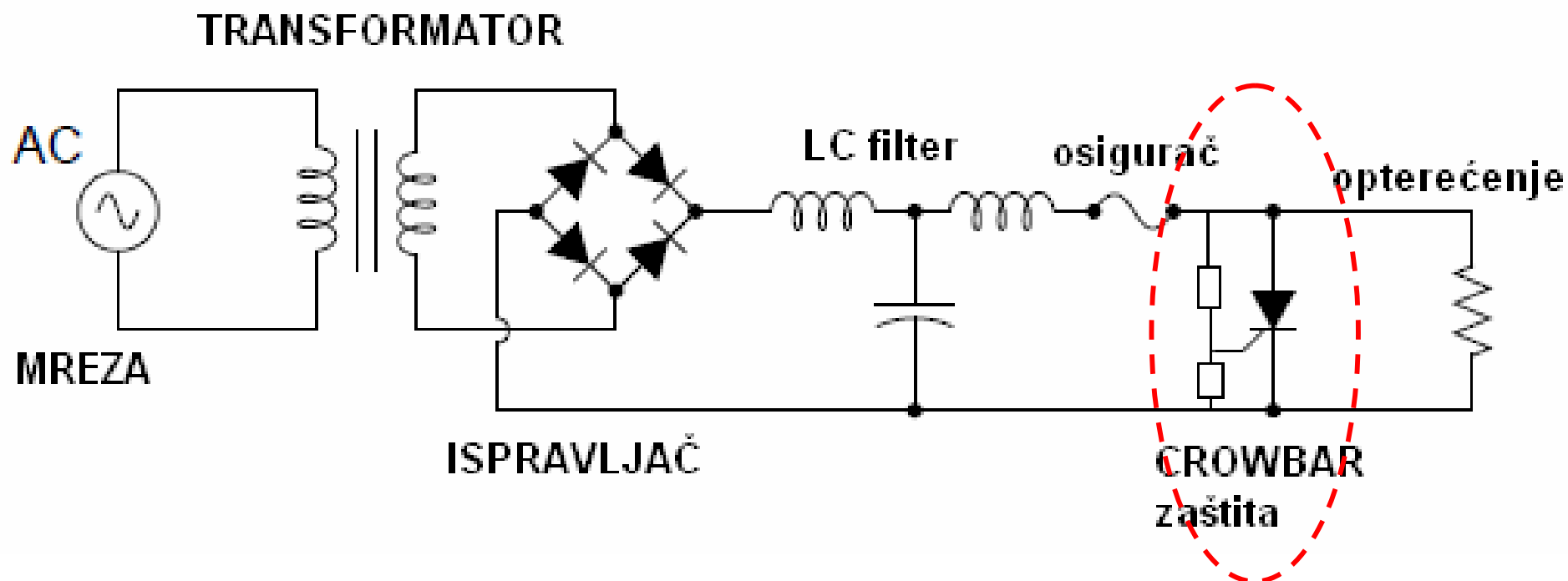
U ovom slučaju se T1 uključuje
kratkotrajnim pritiskom na S1.
Tada će sijalica da svetli!!!
I to dovoljno dugo ako se ništa ne
promeni u kolu. Tiristor se neće
nikada isključiti, osim ako ne
ostvarimo isključenje S2, kada
sijalica prestaje da svetli!!!



TEST TIRISTORA NA JEDNOSMERNOM NAPONU

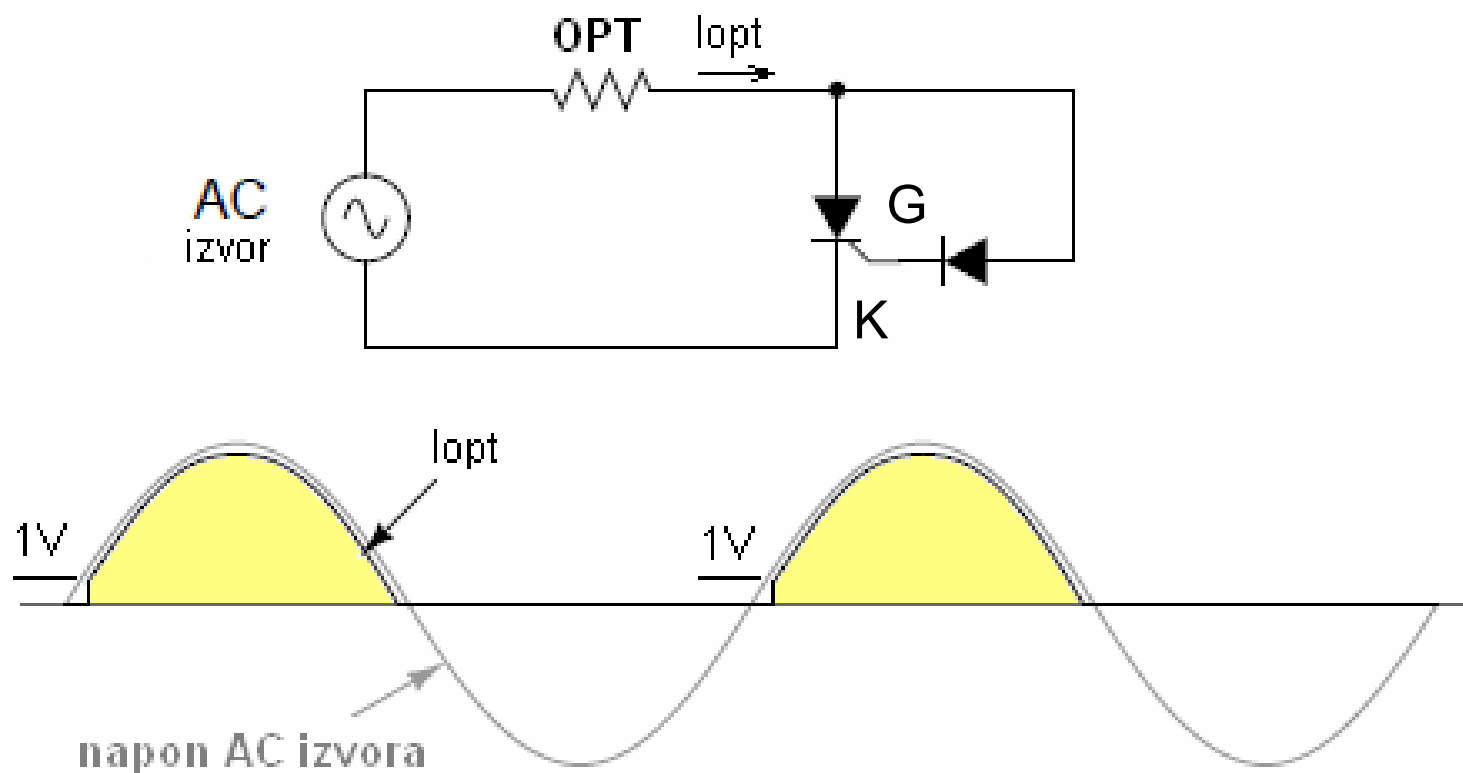


CROWBAR TIRISTORSKA PRENAPONSKA ZAŠTITA



Jedna od praktičnih primena tiristora u DC kolima je tzv. *crowbar* element za prenaponsku zaštitu. "**CROWBAR**" kolo se sastoji od tiristora paralelno postavljenog izlaznim krajevima DC izvora napajanja. Tiristor kratko spaja izlaz napajanja kada dođe do prenapona na opterećenju, tako da na taj način dovodi do pregorevanja osigurača koji je izložen tom kratkom spoju. Na ovaj način je sprečeno uništenje i tiristora i izvora.

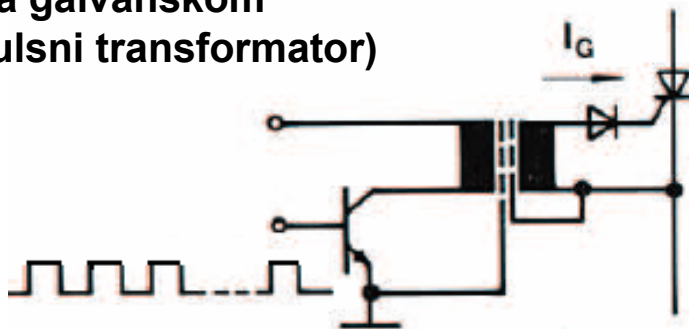
JEDNOSTAVNO POBUDNO KOLO BEZ GALVANSKE IZOLACIJE I SA JEDNOM DIODOM U KOLU GEJTA



Kada prag napona u tački A postane veći od 1-1.5V tada provde dioda i preko nje se uključi tiristor.

Zašto 1-1.5V?

Pobudna kola sa galvanskom izolacijom (impulsni transformator)

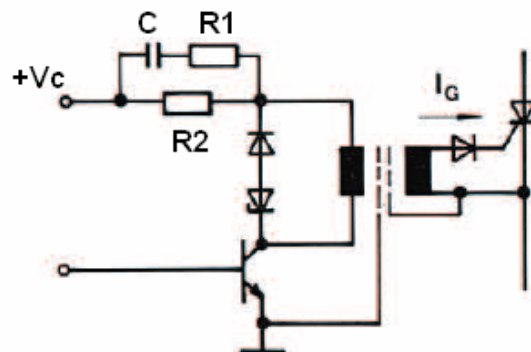


TALASNI OBLIK STRUJE GEJTA



Kratkotrajni impulsi
sekvenca- "cesalj" impulsa

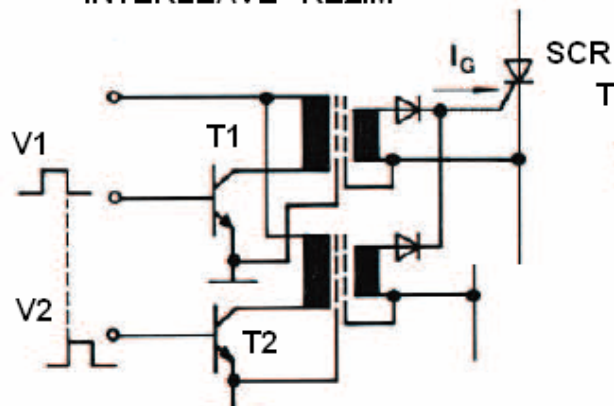
DUGOTRAJNI IMPULSI SA VEOMA VISOKOM POČETNOM STRUJOM GEJTA



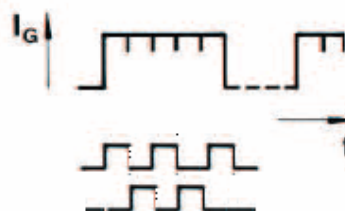
TALASNI OBLIK STRUJE GEJTA



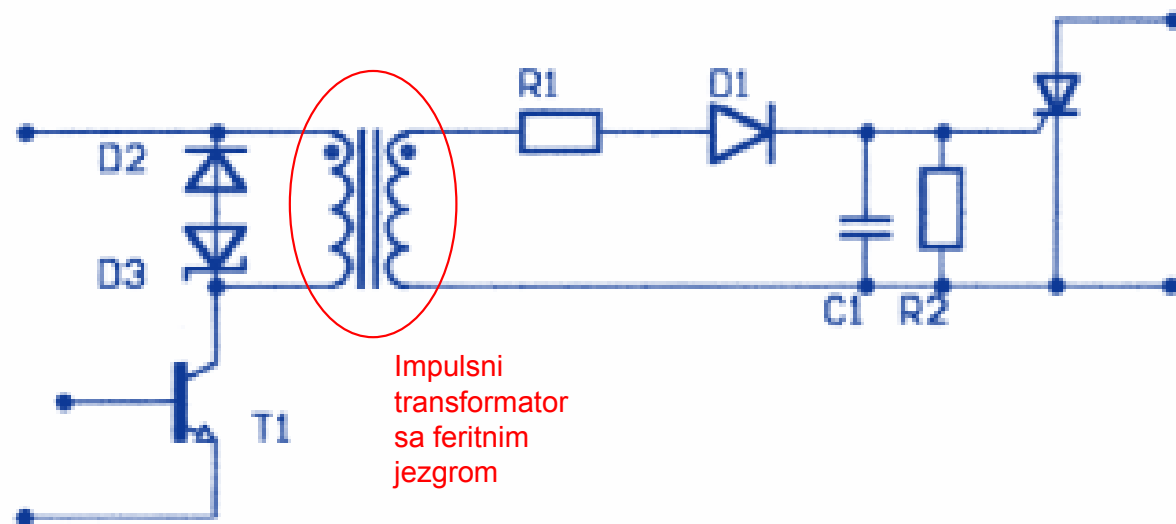
DUGOTRAJNI IMPULSI "INTERLEAVE" REŽIM



TALASNI OBLIK STRUJE GEJTA

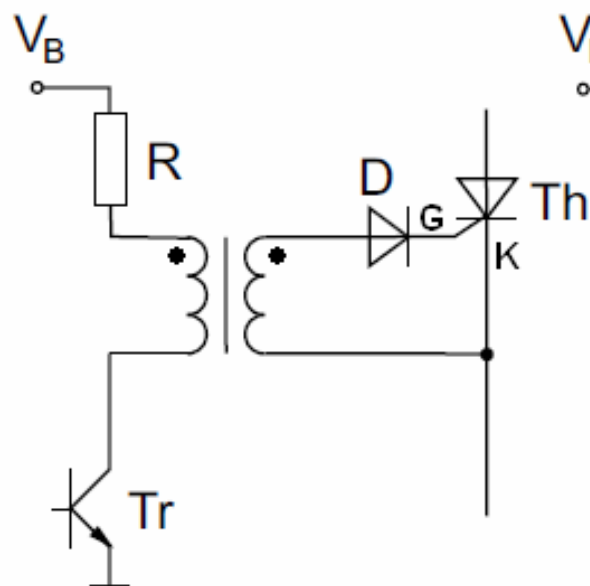


Pobudno kolo za tiristor (SCR) sa galvanskom izolacijom

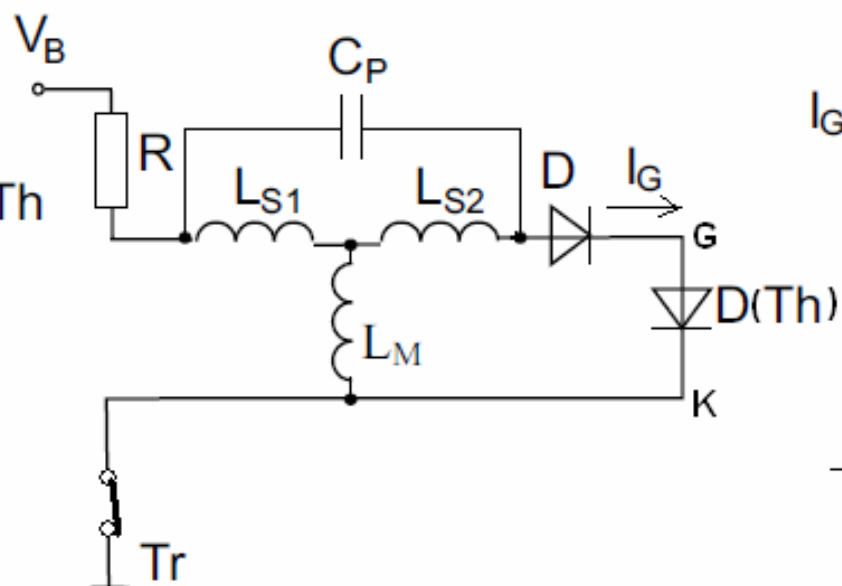


- Tranzistor T1 ima prekidačku ulogu
- Diode D2 i D3 (Zener dioda) obezbeđuju brzi oporavak (demagnetizaciju) transformatorskog feritnog jezgra
- R2 i C1 poboljšavaju otpornost pobudnog kola gejta na šum i sprečavaju neželjeno okidanje tiristora
- Otpornost R1 ograničava struju gejta
- Dioda D1 onemogućava struju u gejt, tokom demagnetizacije

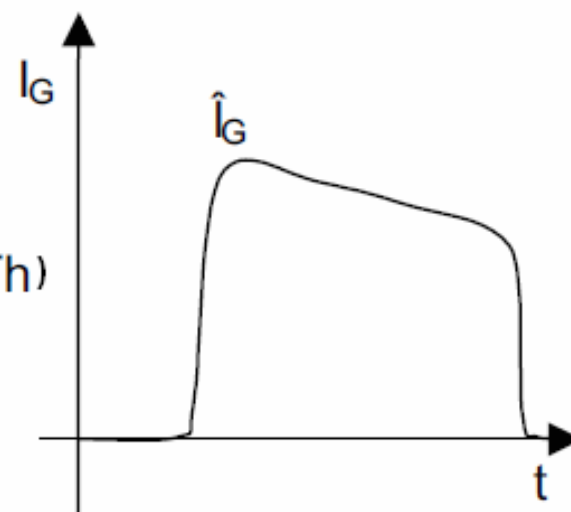
POBUDNO KOLO SA GALVANSKOM IZOLACIJOM SA IMPULSNIM TRANSFORMATOROM



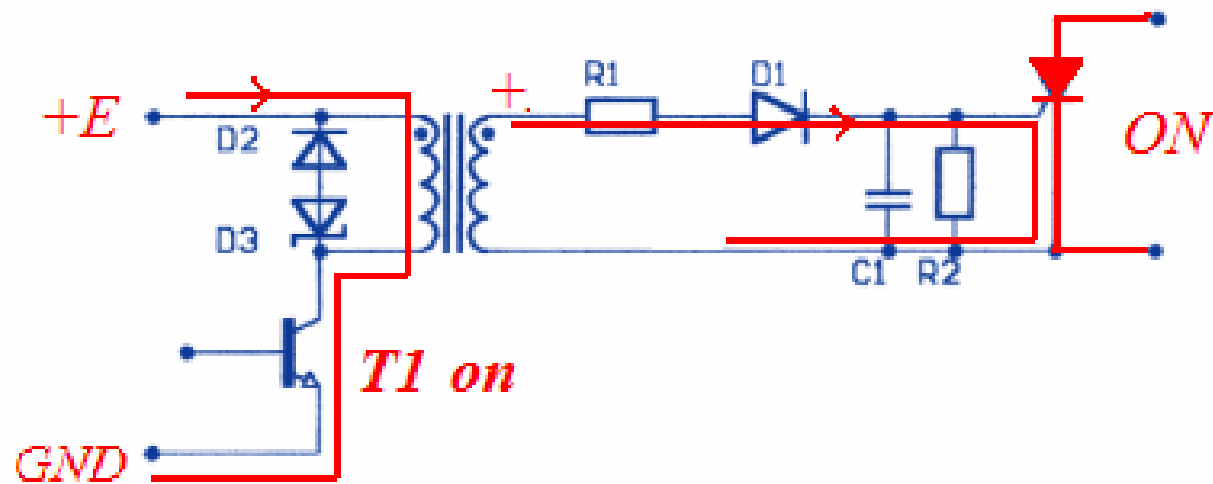
pobudno kolo



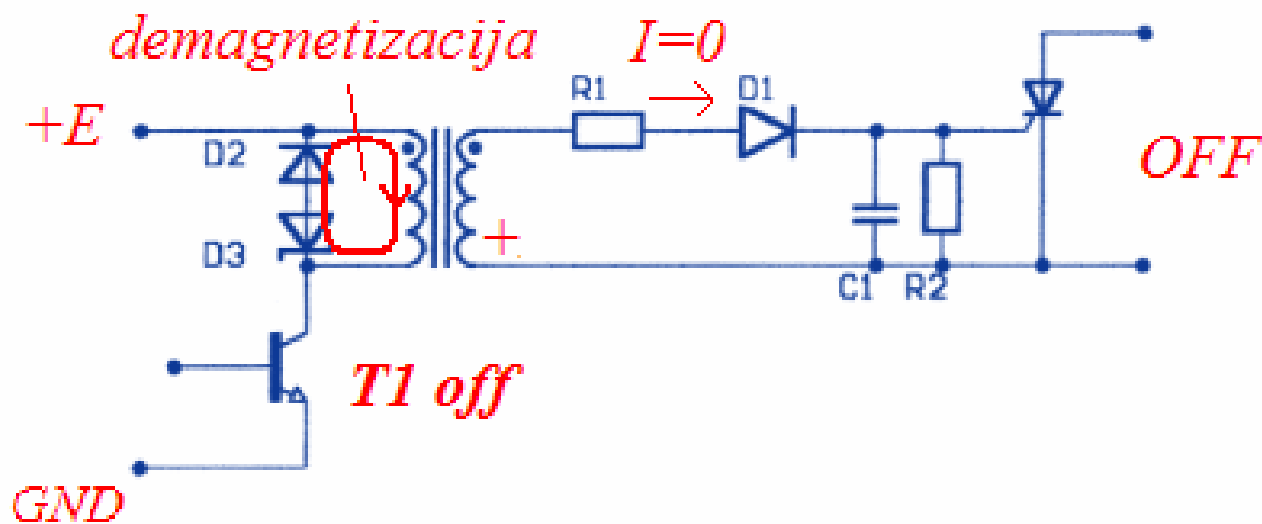
ekvivalentna šema



karakteristični
pobudni signal

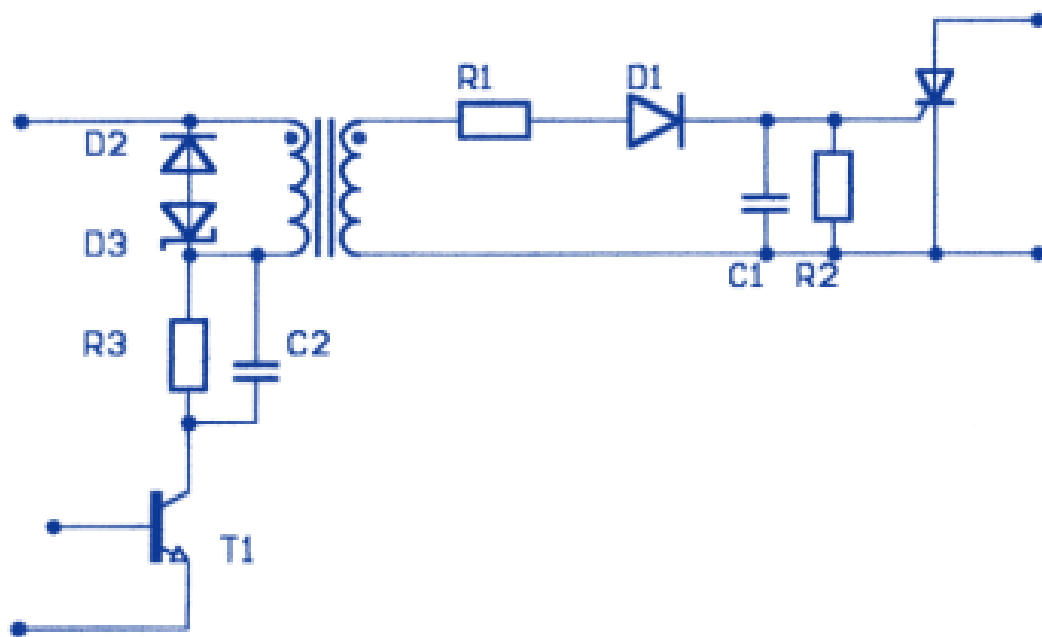


pobuda tiristora
tiristor uključen



pobuda tiristora
tiristor isključen

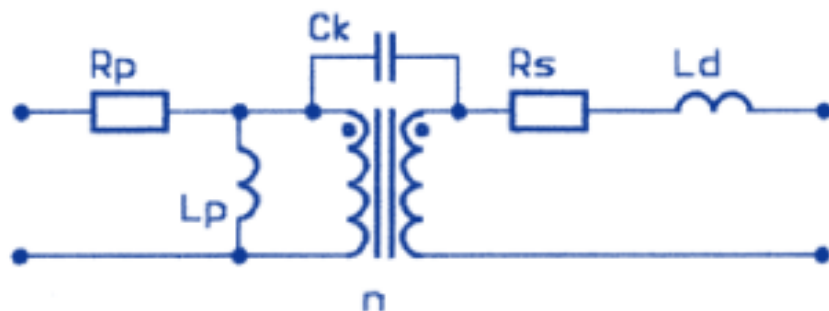
KAKO DOBITI OŠTRIJE POBUDNE IMPULSE STRUJE !!!!



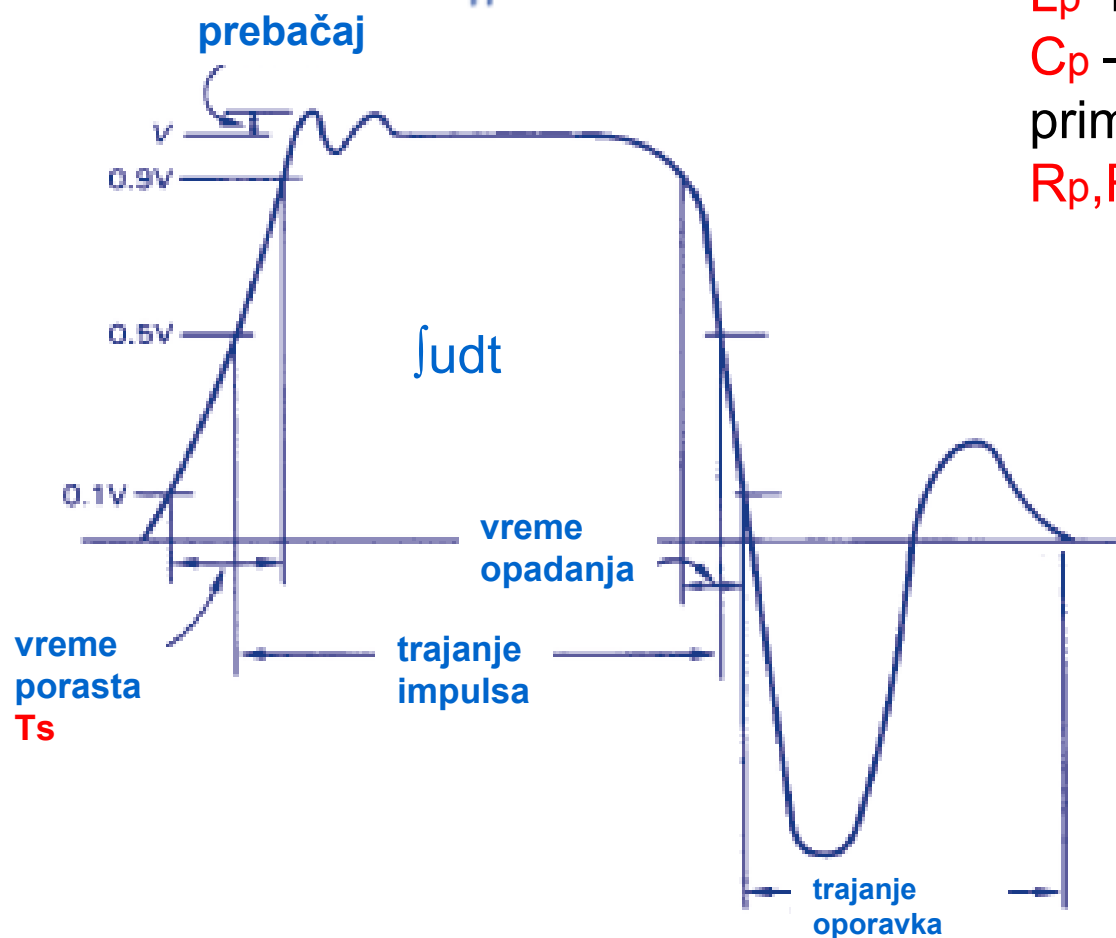
Preko R3 - C2 kola se dobija snažni pobudni impuls: visoki okidni pik koji obezbeđuje optimalno uključenje tiristora.

Ovaj pik je dobijen opadanjem pobudne struje i ovim je obezbeđene niska disipacija snage u pobudnom kolu.

MODEL IMPULSNOG TRANSFORMATORA



- n - prenosni odnos transformatora
- $\int u dt$ - fluks u jezgri tj. dozvoljeni $V\mu s$
- T_s - vreme porasta
- I_p - vršna vrednost pobudne struje
- L_p -induktivnost primara
- C_p -sprežna kapacitivnost između primara i sekundara
- R_p, R_s - otpornosti primara i sekundara

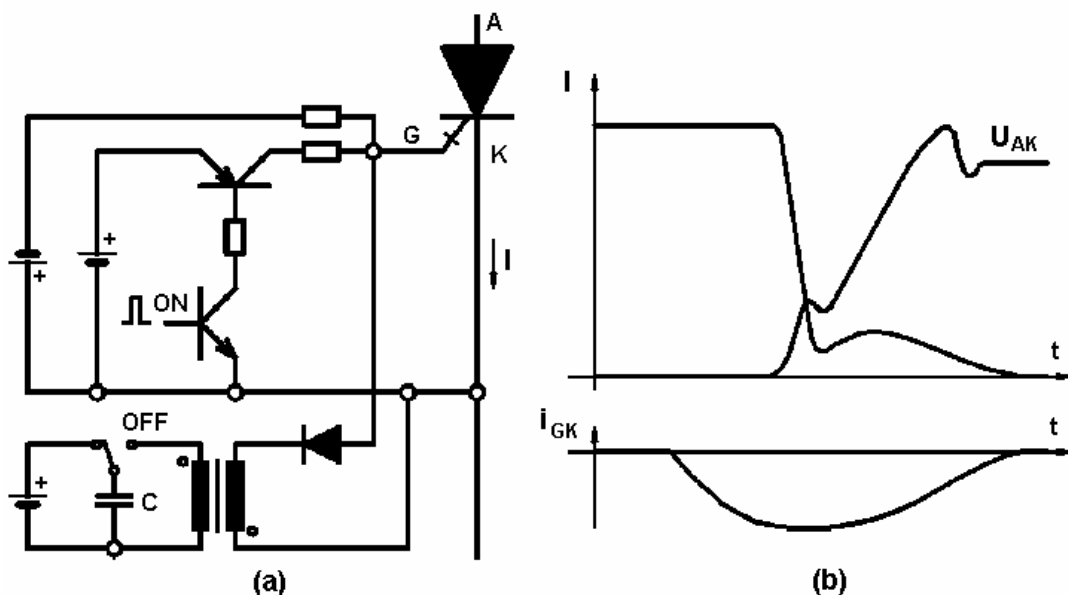


GTO- tiristori

Engl. **G**ate **T**urn-**O**ff→ tiristor koji se isključuje preko gejta

- Veliki nedostatak tiristora je što ne može da se isključi u bilo kom trenutku. Da bi se isključio, potrebno je da se na njegove krajeve (A i K) dovede inverzni napon u vremenu dužem od t_{off}
- U protivnom on nastavlja da provodi sve dok je direktno polarisan. Ovaj nedostatak je inicirao razvoj nove klase tiristora koji se mogu isključiti inverznim strujnim impulsom na gejt, takozvani GTO (*Gate Turn Off*) tiristor.
- Razvoj ovih tiristora još nije dostigao željene efekte i danas se postiglo da je jačina inverzne struje na gejt reda oko 20 ... 30% od izlazne struje, što je još uvek jako velika vrednost. Međutim zbog niskog napona na gejt, snaga ovog impulsa je relativno mala.
- Sa mogućnošću uključenja i isključenja preko upravljačke elektrode (gejta), GTO spada u grupu potpuno upravljivih prekidačkih elemenata.
- U tom pogledu, GTO je najsnažniji prekidački upravljivi element.
- Prema maksimalnom naponu i struji, GTO malo zaostaje za tiristorom, ali napredak tehnologije stalno povećava njegove mogućnosti.
- U ovom trenutku se stiglo do oko 4000 V i 3000 A, dok su granične vrednosti kod tiristora veće za oko 30 %. U provodnom stanju GTO ima pad napona 2.5 ... 3.5V, a samim tim i veće gubitke od klasičnog tiristora, pri istoj struji.
- U pogledu brzine uključenja, GTO je sporiji od klasičnog tiristora i njegovo vreme uključenja je reda 10 ms a struja uključenja skoro deset puta veća (oko 1 A za GTO nominalne struje 300 A).

UPRAVLJAČKO KOLO za GTO

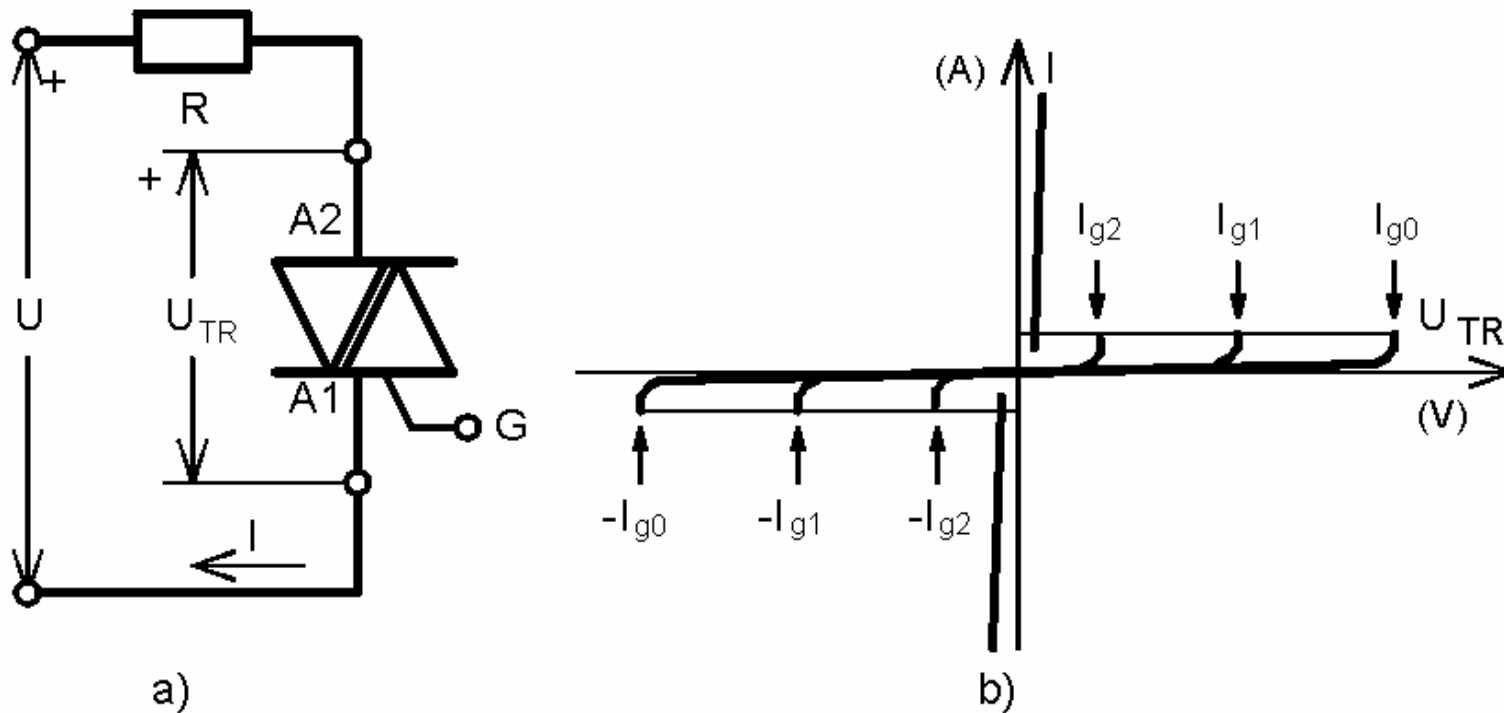


*GTO prekidač; (a)-upravljačko kolo,
(b)-karakteristični talsani oblici pri isključenju*

Na slici (a) je prikazano je upravljačko kolo za GTO. Preporučuje se da na gejt u isključenom stanju postoji stalni negativni napon. Time se povećava imunitet prema nekontrolisanom uključenju zbog naglih promena napona, smetnji iz mreže i slično. U uključenom stanju ovaj napon nema dovoljnu snagu da isključi tiristor. Isključenje se postiže pražnjenjem kondenzatora preko primara transformatora. Prenosnim odnosom transformatora obezbeđuje se dovoljna jačina struje gejta za gašenje tiristora.

Na slici (b) su prikazani su tipični oblici napona , anodne struje i struje gejta , pri isključenju. Kao potpuno upravljiv prekidački element, GTO nalazi primenu kod čopera velikih snaga, invertora, itd. Sa daljim razvojem tehnologije i poboljšanjem karakteristika GTO će nalaziti sve širu primenu kod pretarača najvećih snaga.

STRUJNO-NAPONSKA KARAKTERISTIKA TRIJAKA



Trijak; (a)-strujno kolo, (b)-strujno naponska karakteristika

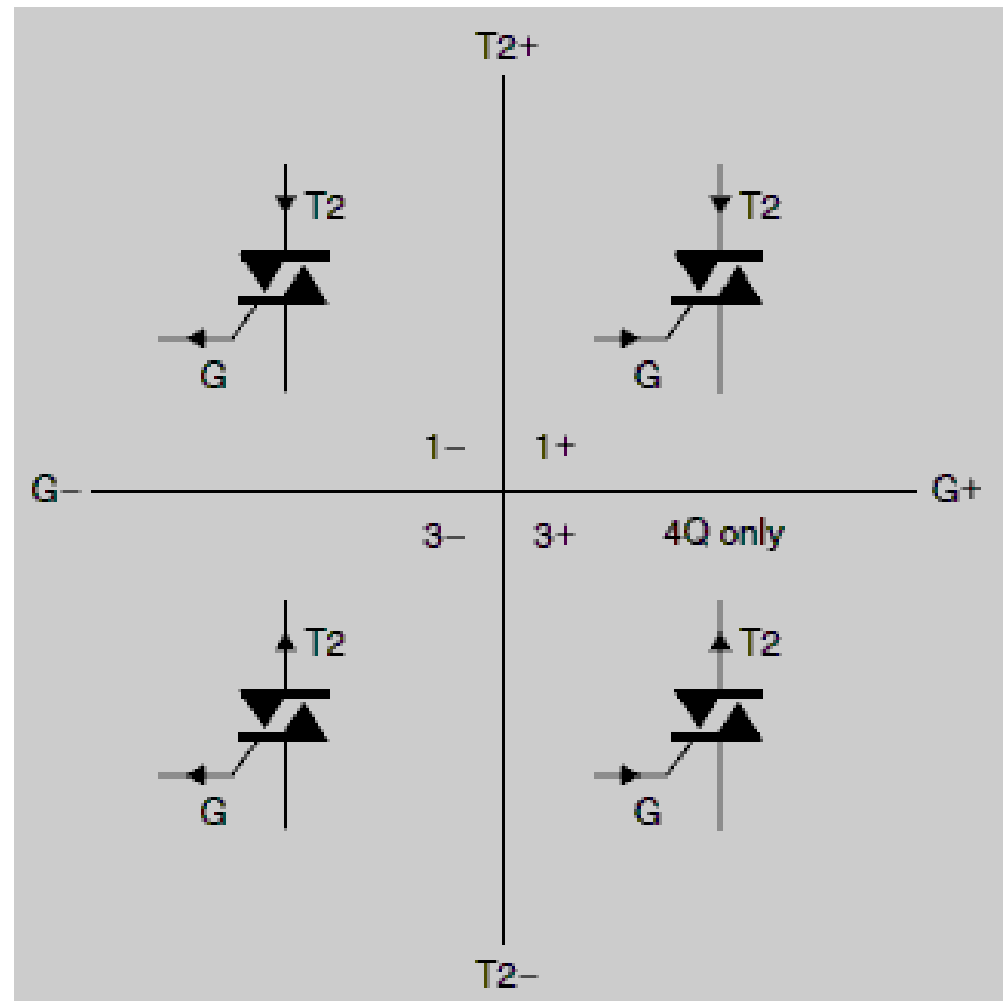
Trijak je petoslojna poluprovodnička komponenta sa izvedene tri elektrode ($A1$, $A2$ i G). Naponsko strujna karakteristika mu je donekle slična onoj kod tiristora. Za razliku od njega trijak ima simetričnu karakteristiku za oba polariteta napona. Po svojoj funkciji trijak je ekvivalentan antiparalelnoj sprezi dva tiristora, tako da svakim od njih može da se upravlja u svojoj poluperiodi.

PRIMENA TRIJAKA

- Trijak se primenjuje za regulaciju naizmeničnog napona.
- Tipične primene su mu regulacija snage grejača, regulacija jačine svetla kod sijalica sa užarenim vlaknom, regulacija brzine obrtanja univerzalnog motora itd.
- Pri radu u kolu sa naizmeničnim naponom, pri prolasku struje kroz nulu, trijak se gasi ali napon odmah menja polaritet, tako da su uslovi za oporavak znatno nepovoljniji nego kod tiristora. Ovo je naročiti izraženo kod induktivnih opterećenja.
- Zato se trijak ne može primeniti na višim frekvencijama. Obično se primenjuje samo na mrežnoj frekvenciji.
- Najčešće se sreće za struje do nekoliko desetina ampera, ali postoje i jedinice od više stotina ampera.

UKLJUČENJE TRIJAKA

- Uključenje trijaka u obe poluperiode može se vršiti strujnim impulsima istog ili različitog polariteta.
- Proizvođači daju vrednosti minimalne struje gejta za sve četiri moguće kombinacije polariteta napona na priključcima (A1 i A2) i smeru struje gejta .
- Moguće kombinacije uključenja trijaka su dati na slici

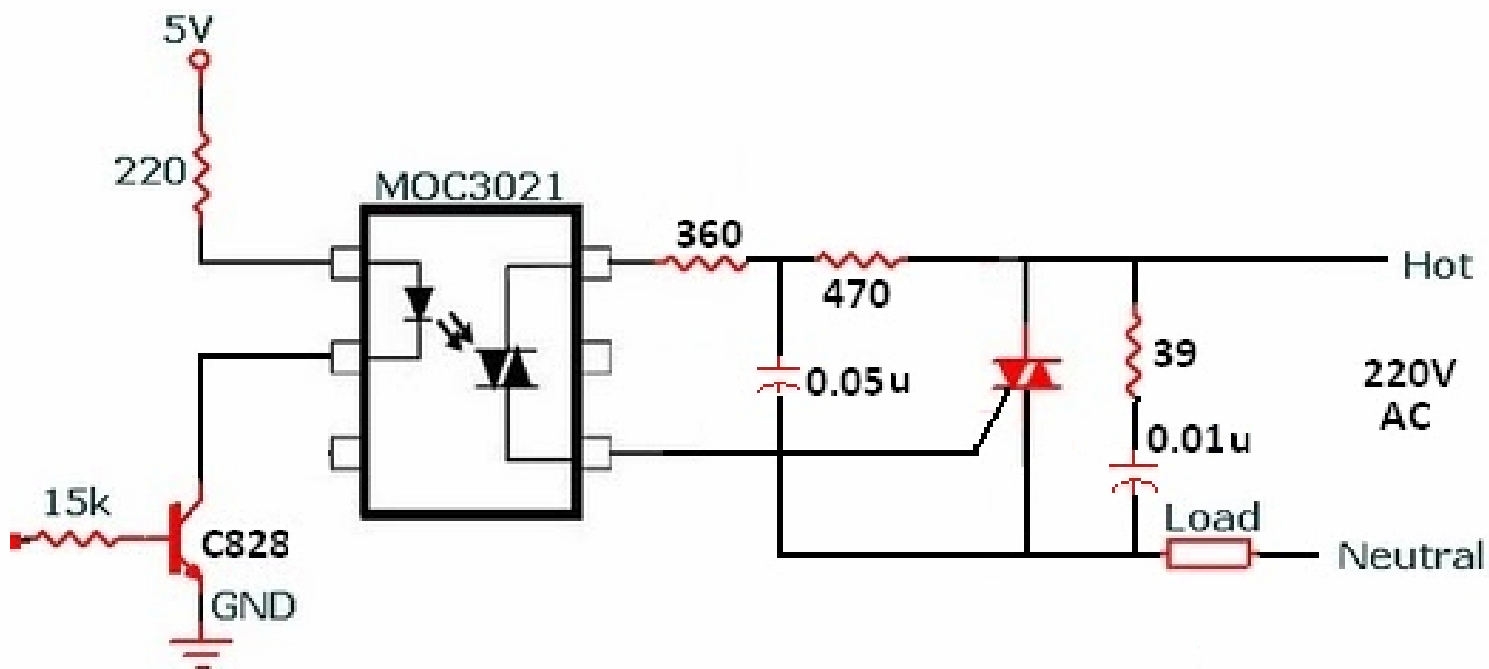


UKLJUČENJE TRIJAKA (kolo sa optičkom galvanskom izolacijom)

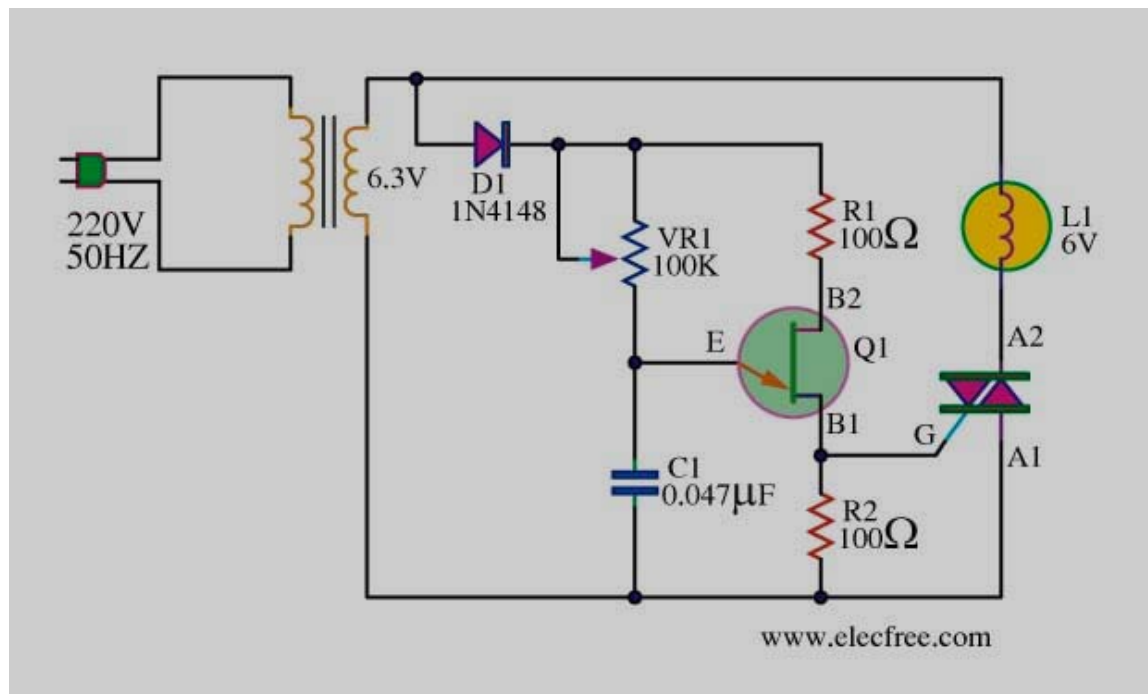
TRIAC kao sklopka

-aplikacije u PLC kontroli

-uP kontrola

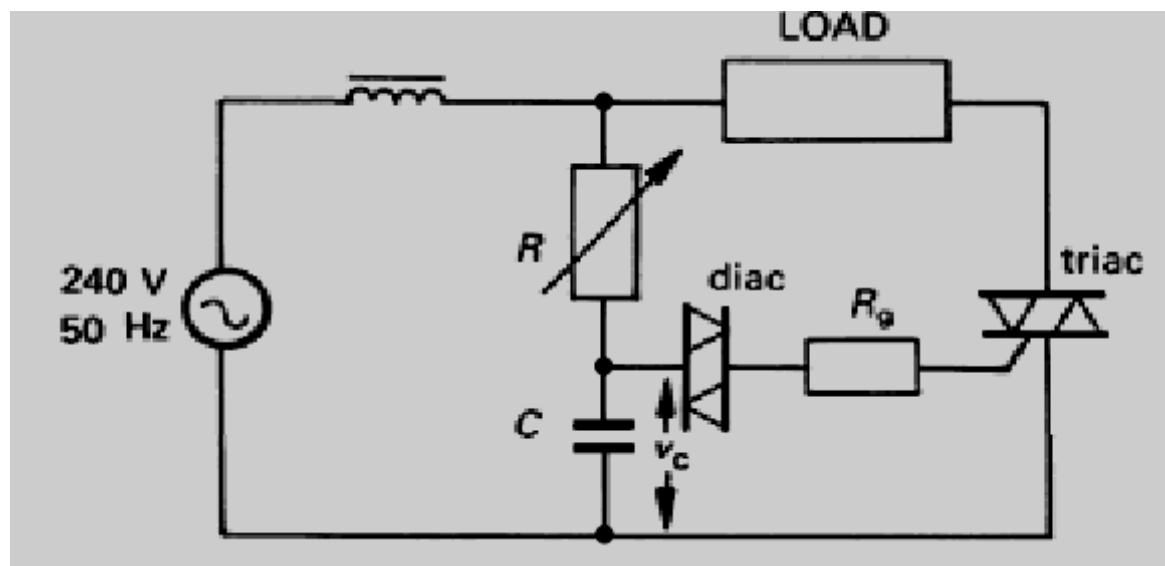


DIMER ZA OSVETLJENJE, REGULATOR JEDNOFAZNOG UNIVERZALNOG MOTORA,.....



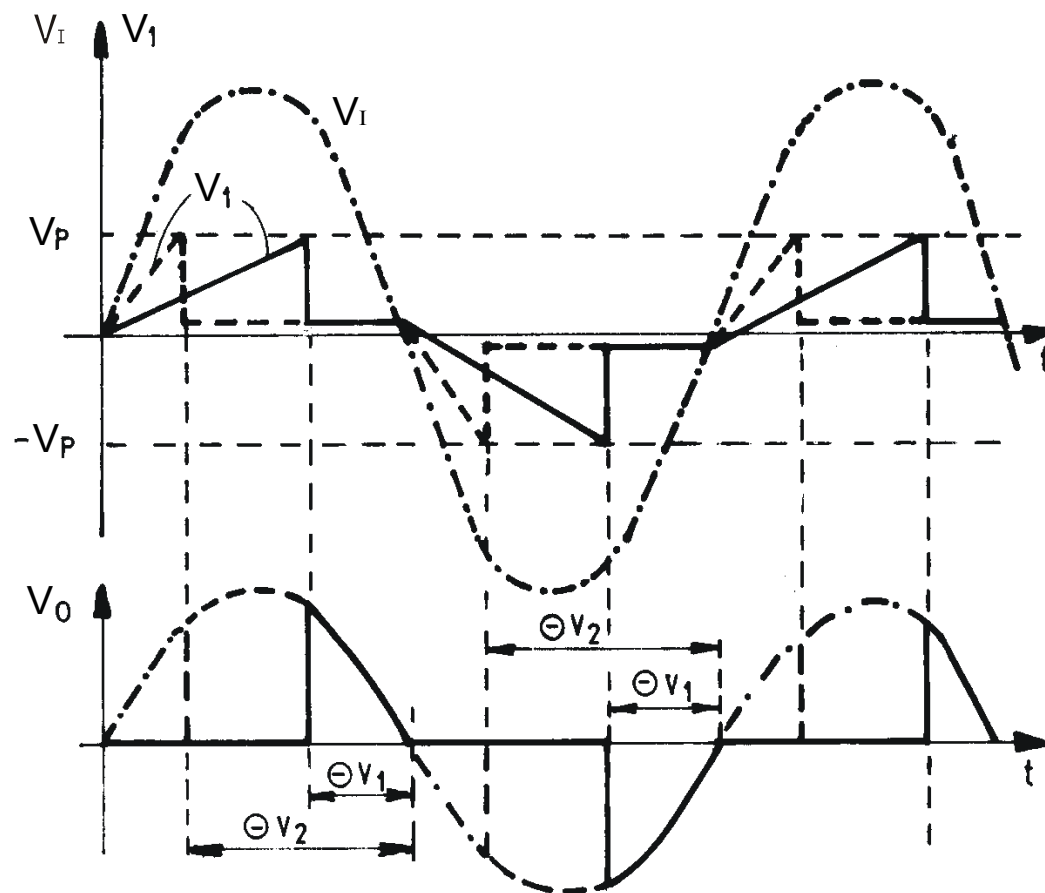
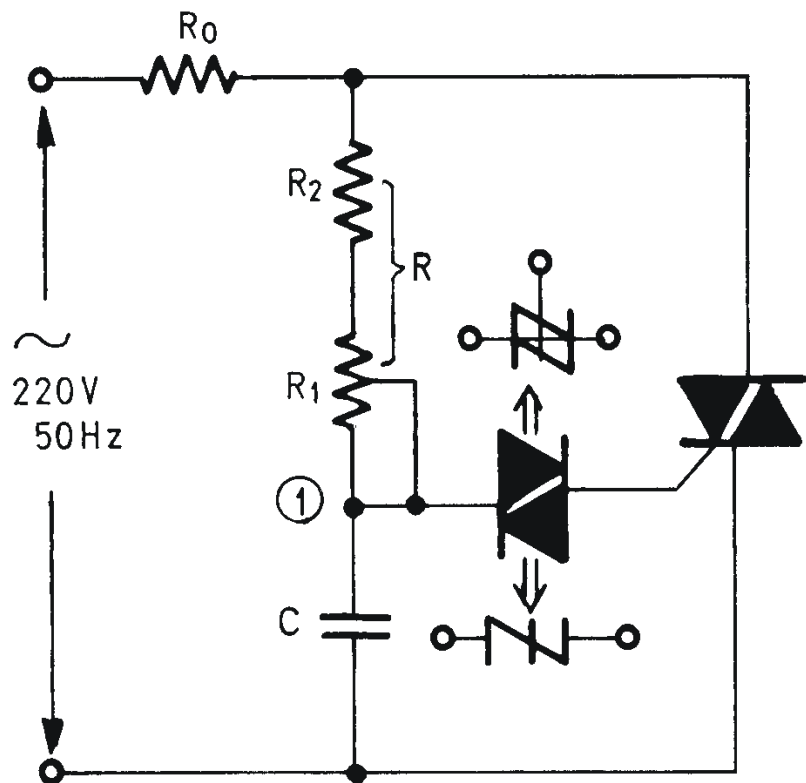
DIMER za sijalicu nižeg napona 6V, AC

- mora se koristiti mrežni trafo
- pobuda se ostvaruje relaksacionim oscilatorom sa UJT
- galvanska izolacija celog sklopa od mreže 220V, 50Hz
- promena faznog ugla se ostvaruje sa R1



- Za mrežnu apikaciju, bez galavnske izolacije se koristi kolo sa DIAC-om i RC članom
- Podešavanje faznog ugla ($u + i -$ poluperiodi se ostvaruje promenljivim otpornikom (potencijetrom) R

FAZNO UPRAVLJANJE SA TRIJAKOM: Okidno kolo s dvosmernim regenerativnim prekidačem



Talasni oblici napona na ulazu V_p , opterećenju V_o i kondenzatoru V_1 .

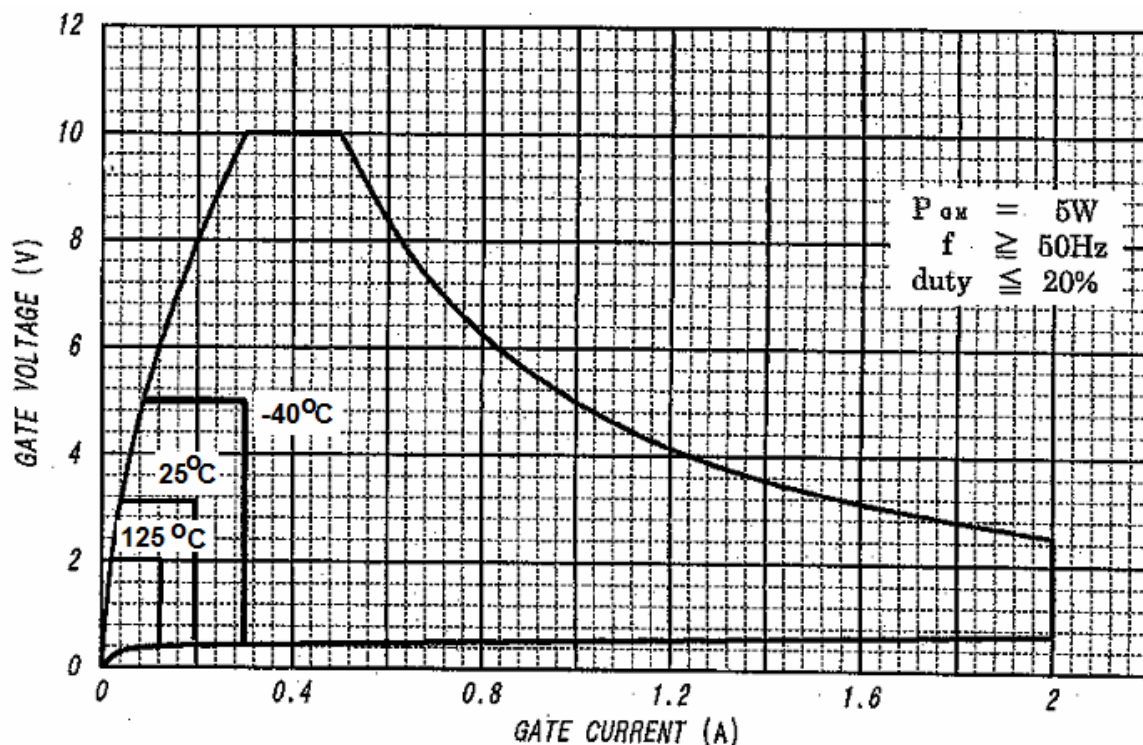
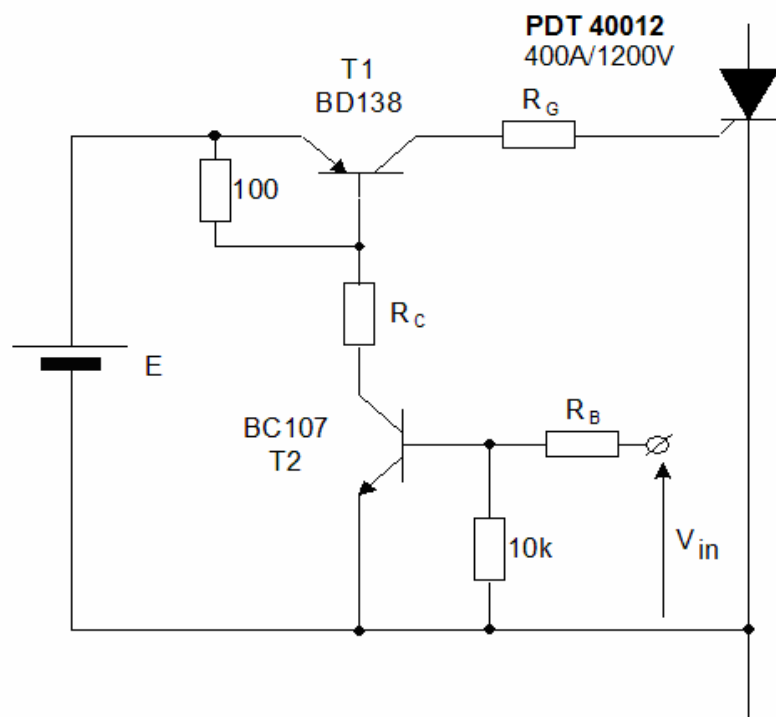
Faznim upravljanjem uključuje se napon na opterećenju pri određenim faznim uglovima. Tok snage se može podesiti između 0-100%. Potrošači iznad izvesnih graničnih snaga smeju biti u pogonu samo uz posebnu dozvolu, jer fazno upravljanje proizvodi povratna dejstva na mrežu –reaktivna snaga

Ograničenja u pogledu maksimalnih napona i struja:

<u>Polupr. komponenta</u>	<u>Napon (V)</u>	<u>Struja (A)</u>
Tiristor (SCR)	6000	3500 (5000)
GTO / IGCT	4500	3000 (4500)
Triak	800	40
Bipolarni tranzistor	1200	800
MOSFET	500 (1200)	140
IGBT	600 (3500)	50 (1200)
SIT	800	60
SITH	1200 (4000)	800 (2200)
MCT	600 (3000)	60

PRIMER:

Dimenzionisati komponente R_B , R_G i R_C impulsnog pojačavača za energetski tiristor PDT 40012 400A/1200V. Pojačanja tranzistora su: BD138 - $h_{fe}=120$ i BC107- $h_{fe}=460$. Za oba tranzistora su dati parametri: $V_{BE}=0.7V$ i $V_{CES}=0.2V$. Napon napajanja pojačavača je $E=12V$. Ulazni signal je pravougaoni impuls amplitude 5V.



HVALA NA PAŽNJI!!!^v

PITANJA???

Novembar 2017

