

PROBLEMI PRI PRIMENJIVANJU TIRISTORA ZA SREDNJU UČESTANOST

1. Fizički osnovi

Elementi energetske elektronike, ispravljačke diode i tiristori, imaju, kao što je poznato, kao zajedničko svojstvo strukturu poluprovodničkih slojeva, koju fizičar naziva PSN strukturuom. To znači da se između dve jako dotirane ivične zone P odnosno N tipa nalazi jedna oblast koja je sasvim slabo dotirana (sl. 1).

Pri naprezanju ispravljačke diode u inverznom smeru, odnosno pri naponskom naprezanju neupaljenog tiristora, prostorno naelektrisanje, koje je nastalo u toj oblasti usled inverznog napona, napušta oblast i time izaziva željene dobre osobine u nepropusnom smeru. Pri naprezanju diode u propusnom smeru, odnosno pri paljenju tiristora, uplivavaju nosioci naelektrisanja iz jako dotirane ivične zone, gde ih ima u izobilju, u slabo dotiranu zonu i izazivaju dobru provodnost.

Preduslov za tako opisano ponašanje je dug životni vek, a time i velika dužina difuzije nosilaca naelektrisanja. Ona omogućava da se grade elementi sa širokom S zonom, odnosno visokim inverznim naponom, koji jednovremeno imaju i male gubitke u propusnom smeru.

Istovremeno se, sa dugim životnim vekom nosilaca naelektrisanja, ipak javljaju i neželjena delovanja, koja su приметna naročito pri radu elemenata energetske elektronike sa učestanostima iznad stotinak Hz. U radu će se govoriti o ovim pojavama, njihovom merenju i uvažavanju pri primenjivanju elemenata.

2. Dinamičko ponašanje energetskih poluprovodničkih elemenata

Pojave inertnosti naelektrisanja, o kojima je bilo govora u prethodnom delu, su poznate pod nazivom "ponašanje pri uključivanju i isključivanju" ili

Prevod sa nemačkog jezika rada Dr Ing. Hans Peter Hempel,
Semikron GmbH, Nürnberg, BRD,

"dinamičko ponašanje". Razlikuje se ponašanje pri isključivanju i ponašanje pri uključivanju.

2.1. Ponašanje pri isključivanju

Pri komutiranju struje, od jednog elementa odnosno jedne grane sprege na drugu, moraju se najpre izbaciti nosioci naelektrisanja, koji su usled delovanja napona u propusnom smeru uplivali u slabo dotiranu srednju zonu, pa da dioda ili tiristor budu u stanju da podnesu inverzni napon. Ova pojava se naziva zakašnjavaње u zaprečavanju. Deo nosilaca naelektrisanja iščezava za vreme komutacije rekombinacijom, dok mnogo veći deo ipak odlazi napolje i prouzrokuje snažne špičeve struje u suprotnom smeru od smera struje u provodnom stanju. Naglo prekidanje ove "povratne struje" ima, kao što je poznato, za posledicu nastajanje neželjenih prenapona na induktivnostima, koje uvek postoje u kolu komutacije, i njihovo delovanje na element.

U istom momentu, u kome se prekida povratna struja, uspostavlja se na poluprovodničkom elementu inverzni napon koji je do tog trenutka bio na induktivnosti u kolu komutacije. Pošto istovremeno još protiču značajne struje, nastaje vrlo veliki gubitak snage za kratak interval vremena (sl. 2). Ovaj gubitak snage pri isključivanju nema doduše nikakvu važnost za mrežne učestanosti, ali pri višim može da postane stvarno značajan i ne treba ga više zanemarivati.

Ova pojava se ne javlja kod tiristora u autonomnim inverterima koji su izvedeni sa direktno vezanim antiparalelnim povratnim granama, pošto se ovde povratna struja kratko spaja preko povratne grane i ne nastaje značajniji inverzni napon u nepropusnom smeru.

Pri proizvodnji elemenata postoji mogućnost da se smanji broj nosilaca naelektrisanja koji uplivaју ili da se poveća deo koji nestaje rekombinacijom, prema onom koji mora da napusti slabo dotiranu zonu, da bi se smanjila nepoželjna delovanja koja su povezana sa odstranjivanjem nosilaca naelektrisanja iz te zone. Obe namere se jednovremeno ostvaruju smanjivanjem životnog veka nosilaca naelektrisanja.

Broj nosilaca naelektrisanja koji uplivavaju u srednju zonu je, naime, približno jednak proizvodu iz struje i dužine životnog veka nosilaca naelektrisanja, a istovremeno, kao što je poznato, dužina veka i rekombinacija međusobno najtešnje zavise. S druge strane, smanjivanjem dužine veka nosilaca naelektrisanja, ili se znatno pogoršavaju osobine elementa u propusnom smeru, ili se mora slabo dotirana zona da suzi što vodi ka smanjivanju inverznog napona. Stoga se, na primer, samo na ivici slabo dotirane zone pravi tanka zona sa velikom sposobnošću rekombinacije, tako da nosioci naelektrisanja mogu skoro nesmetano da prodju kroz srednju zonu i tek na njenoj ivici veći deo njih nestaje rekombinacijom.

Delovanje takvih veštačkih zahvata u strukturu je ipak u svojoj prirodi ograničeno, tako da se ovde mora stalno da pravi kompromis između dužine veka nosilaca naelektrisanja, inverznog napona i gubitaka snage u propusnom smeru.

Do sada opisanom ponašanju pri isključivanju, koje je isto kod dioda kao i kod tiristora, pripada još i jedna posebnost kod tiristora. Pokazuje se naime, da kod ovih višeslojnih elemenata može u emitterskoj zoni da postoji dovoljan broj nosilaca naelektrisanja i onda kada je inverzna struja skoro potpuno prekinuta, tako da se izaziva neželjeno paljenje tiristora pri ponovnom uspostavljanju napona u propusnom smeru ne dovodeći impuls za paljenje.

Stoga se i kod tiristora ne sme odmah posle prekidanja povratne struje ponovo da dovede napon u direktnom smeru, nego mora da sačeka određeno vreme. Ako se želi da opiše osobina elementa, vreme po čijem je isteku tiristor i u propusnom smeru ponovo potpuno sposoban da ne propušta naziva se, kao što je poznato, vreme oporavka. Kao osobina sprege u kojoj tiristor radi, ono se naziva vreme čekanja. Vreme čekanja mora dakle da je uvek veće od vremena oporavka najspornijeg tiristora, pri čemu se preporučuje faktor sigurnosti od 1,3 do 1,5. Pošto je vreme oporavka prouzrokovano nosiocima naelektrisanja koji uplivavaju, može proizvođač tiristora da utiče na njegovu veličinu istim merama koje mesaju ponašanje pri isključivanju u nepropusnom smeru.

2.2. Ponašanje pri uključivanju

Ponašanje pri uključivanju, pored ponašanja pri isključivanju, ima, pre svega kod tiristora važnu ulogu ako se želi preći na više učestanosti. Pokazuje se,

naime, da je paljenje tiristora srazmerno inerten proces pri kome kratkotrajno nastaju znatni gubici snage, koji su osim toga još i koncentrisani na deo površine tiristora.

Dažle ponašanje pri uključivanju, pored vremena oporavka, sasvim odlučujuće određuje sposobnost nekog tiristora za rad pri srednjim učestanostima. Napori proizvođača tiristora su stoga danas u prvom redu usmereni ka poboljšavanju ponašanja njihovih elemenata pri uključivanju. Za to poboljšanje postoje u principu dva puta. Jedan je poboljšana geometrija koja omogućava brže prostiranje paljenja, a drugi su dodatne dotirajuće zone, koje stvaraju prostora naselektrisanja pri nastajanju procesa paljenja, čime se ubrzava paljenje preko delovanja njihovog polja. Za ovo su u poslednje vreme poznati različiti postupci sa prilično zvučnim nazivima kao "bravica za pojačanje", "bravica za regeneraciju", "poprečno polje emitera" itd, koji su odista doveli do znatnog poboljšavanja ponašanja pri uključivanju. Treba pretpostaviti da će se u sledećim godinama moći ostvariti dalji napredak u ovom pravcu (slika 4).

3. Merenje dinamičkih osobina

Dinamičko ponašanje poluprovodničkih elemenata se može ocenjivati samo zajedno sa spregom u kojoj element radi. Podaci u katalogima proizvođača mogu stoga da posluže samo kao vrlo opšti poslonac na osnovu kog može korisnik da oceni ili približno proračuna ponašanje elementa u njegovoj posebnoj šemi.

Sledeća važna činjenica je međusobno poredjenje osobina elemenata različitih proizvođača na čijem temelju se uvek može odabrati najpovoljniji proizvod.

Iz tog razloga vrlo veliki značaj ima nomiranje postupaka merenja kao i uslova pod kojima će proizvođač moći da meri odnosno ispituje osobine i da ih unosi u katalog. U ovoj oblasti su poslednjih godina Internacionalna Elektrotehnička Komisija kao i pojedini nacionalni komiteti za norme ostvarili važan i značajan rad.

U daljem tekstu biće ukratko predstavljene najvažniji postupci merenja. Pri tome se prvenstveno obraća pažnja na merenja osobina tiristora. Postupci merenja koji su od važnosti i za diode iz njih se mogu lako razviti.

3.1. Zakašnjanje u zaprečavanju

Zakašnjanje u zaprečavanju se karakteriše preko veličina vrha povratne struje, vremena i količine elektriciteta pri zakašnjanju u zaprečavanju (sl. 5).

Za merenje svih ovih veličina može se upotrebiti šema prema sl. 6. Ona radi na sledeći način:

Upali se uzorak koji se ispituje; protiče struja I_T u propusnom smeru. Posle paljenja pomoćnog tiristora T_1 ova struja komutuje sa strminom

$$-\frac{di_T}{dt} = \frac{U_2}{L_2}$$

Oblik struje se posmatra na osciloskopu (slika 5). Paralelno vezani R_2 i C_2 sprečavaju oštećenje uzorka od prenapona. Istovremeno može da se ispituje delovanje različitih vrednosti parametara elemenata za zaštitu.

Na zakašnjanje u zaprečavanju utiče osim temperature još i struja I_T , a pre svega stmina ove struje pri komutaciji. Stoga se daje količina elektriciteta pri zakašnjanju u zaprečavanju kao funkcija strmine struje (sl. 7).

3.2 Vreme oporavka

Za merenje vremena oporavka proširuje se šema prema slici 6 dodatnom konturom koja stvara ponovni napon. Ova se kontura sastoji iz jednog izvora stalne struje, novog pomoćnog tiristora T_2 i kondenzatora C_3 koji se posle paljenja T_2 puni stalnom strujom pa stoga daje napon koji linearno raste (slika 8). Slika 9 pokazuje tok napona i struje pri merenju.

Za odredjivanje vremena oporavka smanjuje se vremenski interval t_2 između paljenja pomoćnih tiristora T_1 i T_2 toliko dugo dok se uzorak, pri ponovnom uspostavljanju napona u propusnom smeru, sam ne upali bez dovodjenja impulsa za paljenje (slika 9, isprekidano nacrtani tok napona).

Interval vremena označen sa t_2 između prolaza struje kroz nulu i prolaza ponovnog uspostavljenog napona kroz nulu, pri onom t_2 pri kome se uzorak još nije zapravo upalio, je vreme oporavka t_2^* .

Ono zavisi od temperature kao i, pre svega, od stmine ponovo uspostavljenog napona. Pri nižim naponima u nepropusnom smeru (≤ 50 V) pojavljuje se još i zavisnost od zaprečnog napona u nepropusnom smeru (slika 10).

3.3 Snaga gubitaka pri uključivanju

Koeficijent po pravilu ne interesuje samo snaga gubitaka pri uključivanju, nego zbir snage gubitaka pri uključivanju i snage gubitaka u propusnom smeru pri stacionarnom radu elementa.

Ovaj se zbir može relativno prosto meriti naprežanjem uzorka periodičnim impulsima različitog oblika, trajanja i učestanosti i određivanjem toplotne energije gubitaka koji se pojavljuju. Ako je potrebno, može se iz toga dobiti samo snaga gubitaka pri uključivanju oduzimanjem snage gubitaka u propusnom smeru pri stacionarnom radu koji se sračunavaju iz karakteristike u propusnom smeru.

Zbir snage gubitaka i gubitaka u propusnom smeru zavisi prirodno pre svega od amplitude i trajanja strujnog impulsa (slika 11). Preko snage gubitaka pri uključivanju daju se strmina porasta struje kao i amplituda napona impulsa za paljenje uzorka. Najzad, strmina i amplituda upaljačkog impulsa odlučujuće utiču na snagu gubitaka pri uključivanju. Nažalost, danas još ne postoje normirani postupak za merenje snage gubitaka pri uključivanju i normirani uslovi za unošenje ovih podataka u katalog.

3.4. Kritična strmina struje

Kako je već napomenuto u odeljku 2.2, proces paljenja tiristora je inertan proces. Ako dovedena struja raste sa vrlo velikom strminom onda može da se ošteti tiristor, koji još nije potpuno upaljen, što se može utvrditi ispitivanjem osobina zaprečavanja.

Određivanje kritične strmine struje je razarajuće ispitivanje. Proizvođač elemenata napreže veliki broj uzoraka strujnim impulsima rastuće strmine uspostavljanja dok ih ne ošteti. Strmina pri kojoj bi se tiristor još mogao naprezati bez oštećenja bi bila njegova kritična strmina. Za odgovarajući tip unosi se onda u katalog neka dovoljno sigurna vrednost.

Kritična strmina struje zavisi osim od temperature pre svega i od napona koji postoji na tiristoru neposredno pre paljenja (slika 12). Na ovo treba posebno obratiti pažnju. Zatim, kao i kod snage gubitaka pri uključivanju, važnu ulogu igra i strmina impulsa za paljenje.

Najzad treba voditi računa da RC član, koji je u pravilu priključen paralelno

sa svakim tiristorom kao zaštita od prenapona, doprinosi strmini porasta struje posle paljenja tiristora. Stoga se dimenzionisanje ovih članova može vršiti samo u uzanim granicama.

4. Pravila za primenu

Iako se proizvođač elemenata trudi da stavi korisniku na raspoloženje sve bolje diode i tiristore ipak, ovom preostaje važan zadatak da ih optimalno iskoristi. Pri tome je važno znati kakvim se merama mogu ostvariti pojedini efekti. Za ovo se može sasvim uopšteno reći da se stalno pokazuje da treba smanjiti opisana štetna delovanja inertnosti poluprovodničkih elemenata pomoću pogodnih mera.

4.1. Mere za smanjivanje strmine struje i snage gubitaka pri uključivanju

Mada moderni tiristori za srednju učestanost dozvoljavaju znatne strmine struje još uvek je u principu povoljno, ako ne i neophodno, smanjiti strminu porasta struje u propusnom smeru pomoću redno vezanih prigušnica, što povoljno deluje i na snagu gubitaka pri uključivanju i isključivanju. Za ove svrhe primenjuju se takozvane stepnjevite prigušnice, odnosno prigušnice sa približno pravougaonom karakteristikom magnetčenja, koje u prvom trenu porasta struje imaju veliku induktivnu otpornost, a tek po dostizanju zasićenja dozvoljavaju strm porast struje.

I strmina struje pri gašenju, koja je od značaja za snagu gubitaka pri isključivanju, smanjuje se pomoću stepnjevitih prigušnica.

4.2. Mere za smanjivanje vremena oporavka

Kako je već objašnjeno u odeljku 3.2, vreme oporavka raste sa temperaturom srednjeg zaprečnog sloja kao i sa strminom ponovno uspostavljenog napona. Da bi se postiglo što je moguće kraće vreme oporavka povoljno je izabrati niže strujno opterećenje tiristora, a time i njegovu temperaturu, i u okvirima mogućnosti raditi sa malom strminom ponovno uspostavljenog napona.

4.3. Pravila za izvodjenje upravljačkog dela

Da bi se mogla iskoristiti dozvoljena strmina struje i snaga gubitaka pri uključivanju zadržati na što je moguće manjoj vrednosti, moraju se strmina, visina i trajanje impulsa za paljenje dovoljno visoko odmeriti; prirodno unutar dozvoljenih granica. Orijentacione vrednosti su:

- napon praznog hoda oko 10 V,
- visina impulsa za paljenje je jednaka najmanje petostrukoј vrednosti gornje struje paljenja (najmanje vrednosti struje pri kojoj će se sigurno upaliti ma koji tiristor odredjenog tipa),
- strmina porasta oko 1 A/ μ s,
- trajanje impulsa 2 μ s.

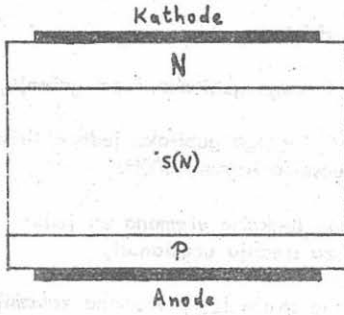
4.4. Zашtita od prenapona

Pri korišćenju RC članova za zaštitu tiristora od prenapona treba voditi računa da kondenzatori prouzrokuju neželjenu dodatnu snagu gubitaka pri uključivanju i povećanu strminu struje pošto se oni pri paljenju tiristora preko njega prazne. Zato bi trebalo veće RC članove vezivati preko pomoćnih mostova ili dioda za razdvajanje.

Kombinacija malih RC članova i selenskih ograničivača prenapona se pokazala kao posebno povoljna. Pri tome treba primeniti ili nepolarisane selenske ograničivače prenapona ili, ako je neophodna zaštita samo u jednom smeru napona, rednu vezu polarisanih ograničivača i dioda za razdvajanje.

- Slika 1 PSN struktura ispravljačke diode i tiristora,
- Slika 2 Vremenski tok struje i_T , napona u i snage gubitaka P pri gašenju,
- Slika 3 Vremenski tok struje I_{Tr} , napona V_T i snage gubitaka jednog tiristora pri naprežanju sa sinusnom poluoscilacijom 4000Hz,
- Slika 4 Snaga gubitaka pri uključivanju kao funkcija vremena za jedan invertorski tiristor i jedan tiristor za srednju učestanost,
- Slika 5 Uz definiciju pojmova vrha povratne struje I_{RM} , vremena zakašnjenja u zaprečavnju t_{br} i količine elektriciteta pri zakašnjenju u zaprečavnju Q_{IT} ,
- Slika 6 Šema za merenje zakašnjenja u zaprečavanju (Prüfling = uzorak koji se ispituje),
- Slika 7 Količina elektriciteta pri zakašnjenju u zaprečavnju Q_{IT} kao funkcija strmine struje komutacije $-\frac{di_T}{dt}$,
- Slika 8 Šema za merenje vremena oporavka,
- Slika 9 Tok napona i struje pri merenju vremena oporavka u šemi prema slici 8,
- Slika 10 Vreme oporavka kao funkcija inverznog napona U_{Rv} ,
- Slika 11 Zbir energije gubitaka pri uključivanju i gubitaka u propusnom smeru pri stacionarnom radu W_T kao funkcija temene vrednosti I_{TM} utisnute struje pri jednoj jedinoj sinusnoj poluoscilaciji,
Parametar: trajanje poluoscilacije,
- Slika 12 Kritična strmina struje S_i krit kao funkcija zaprežnog napona pre paljenja U_{Dv} ,

Diode



Thyristor

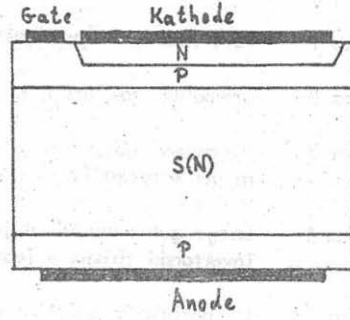


Bild 1

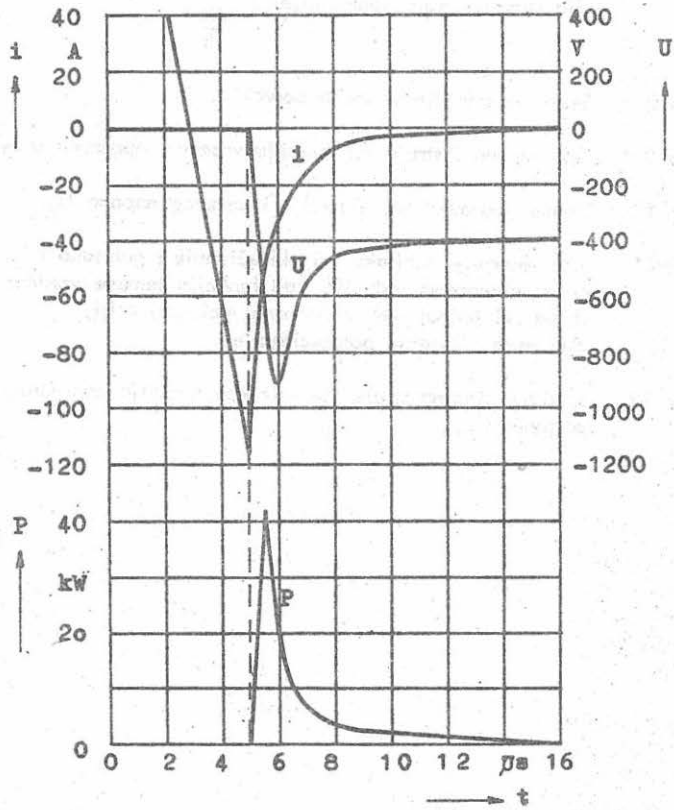


Bild 2

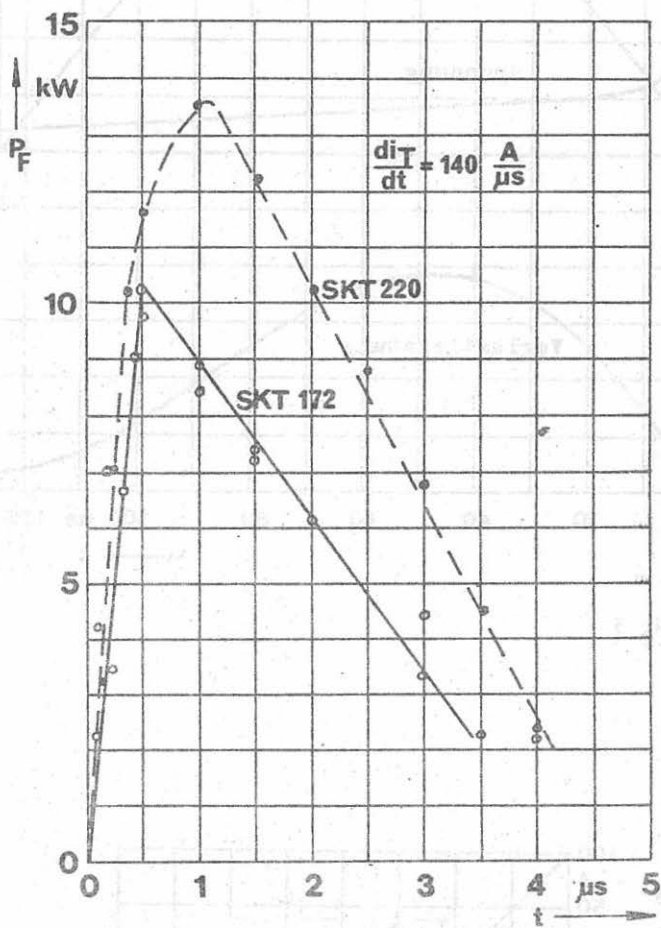


Bild 4

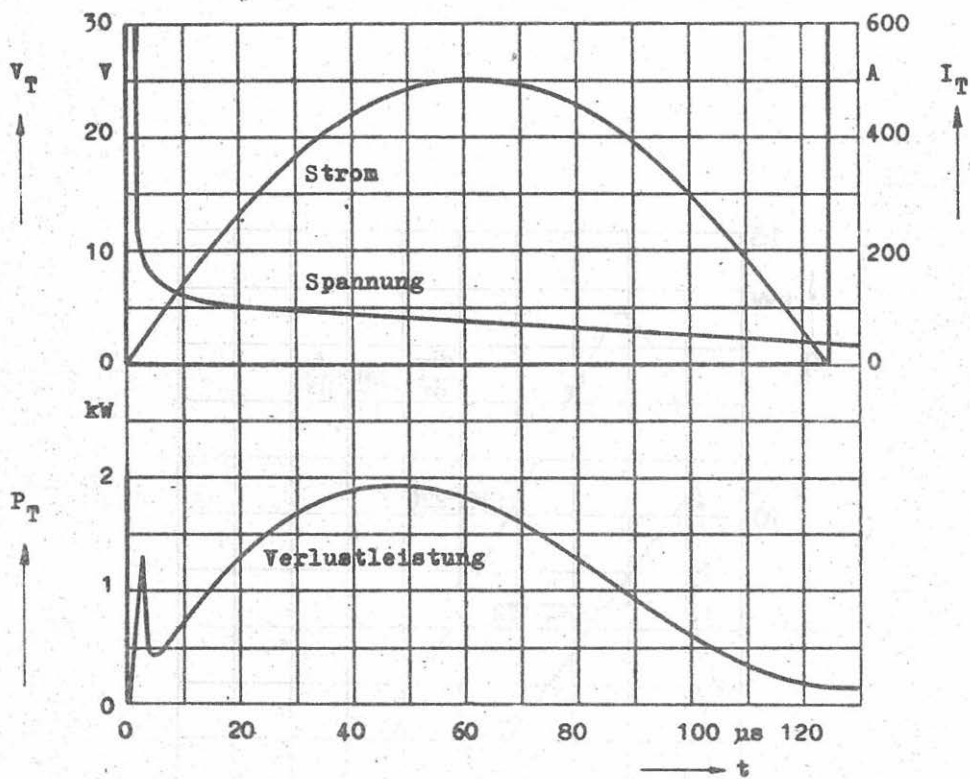


Bild 3

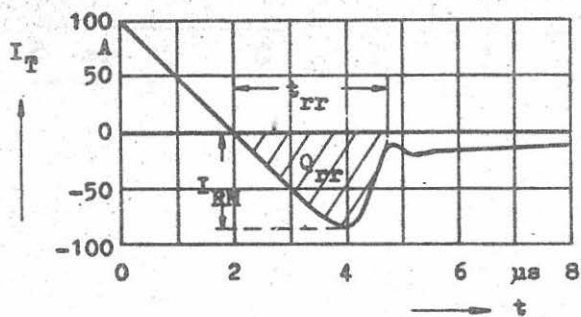


Bild 5

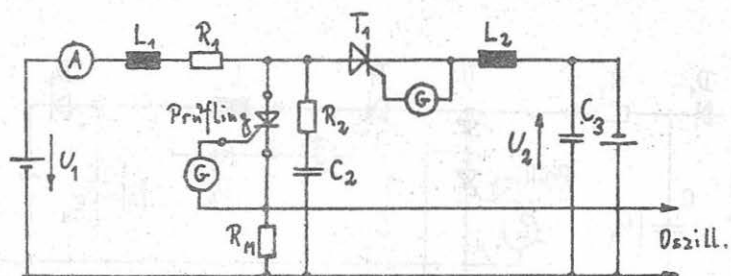


Bild 6

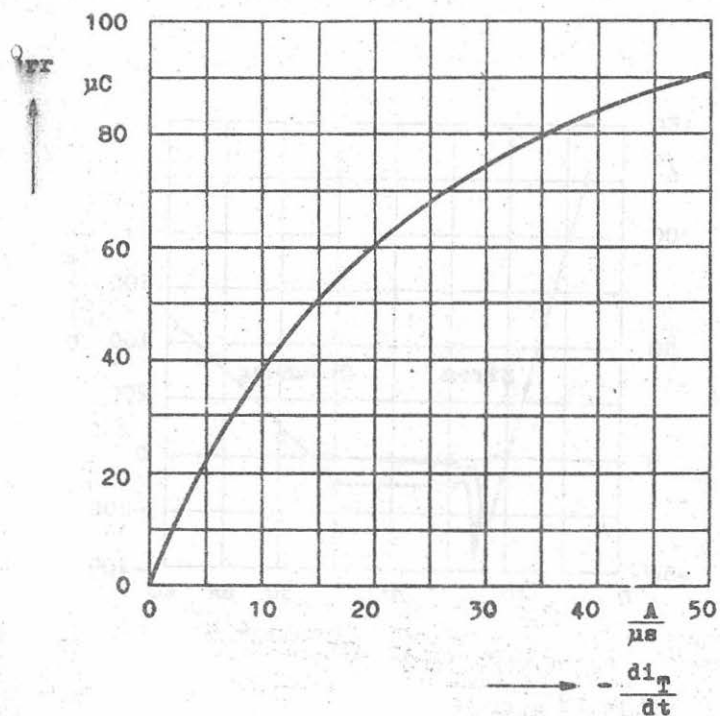


Bild 7

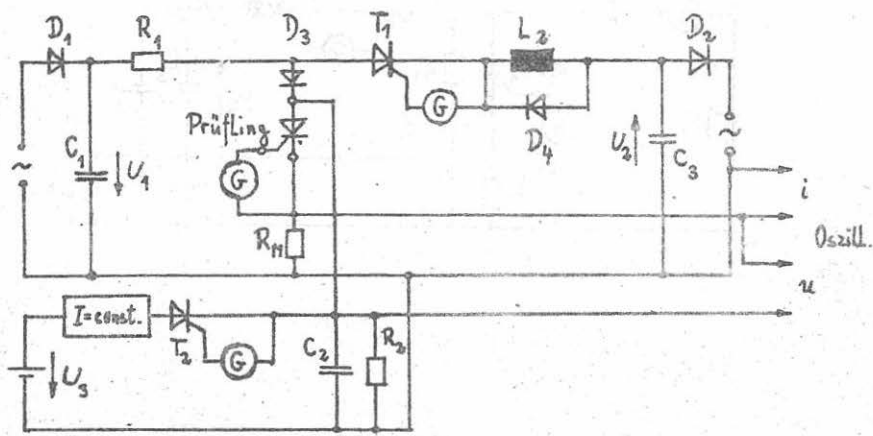


Bild 8

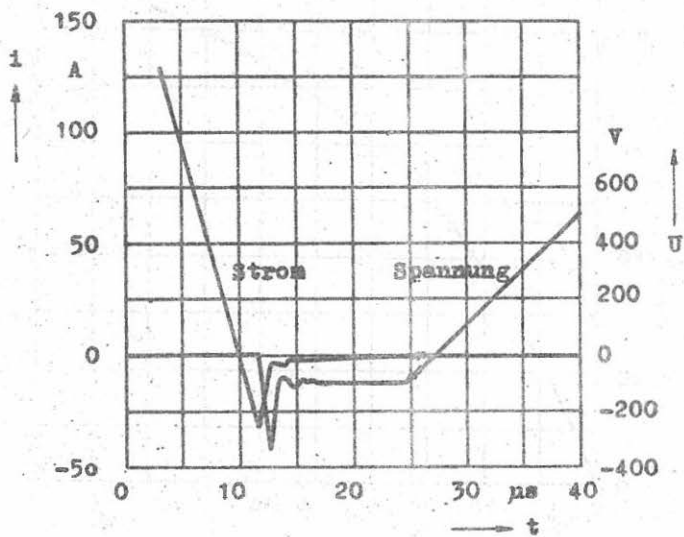


Bild 9

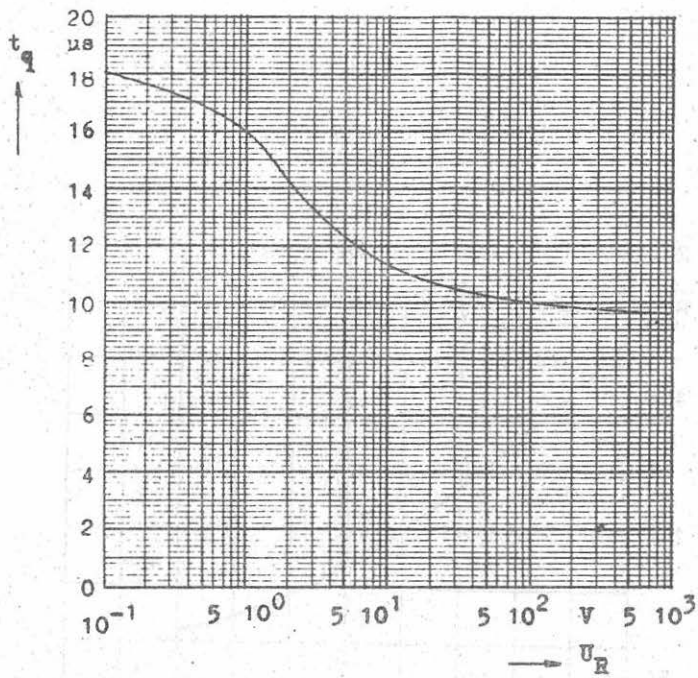


Bild 10

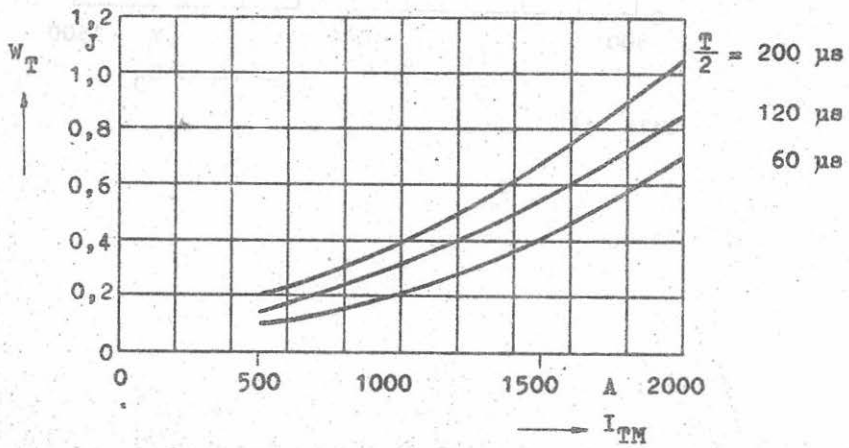


Bild 11

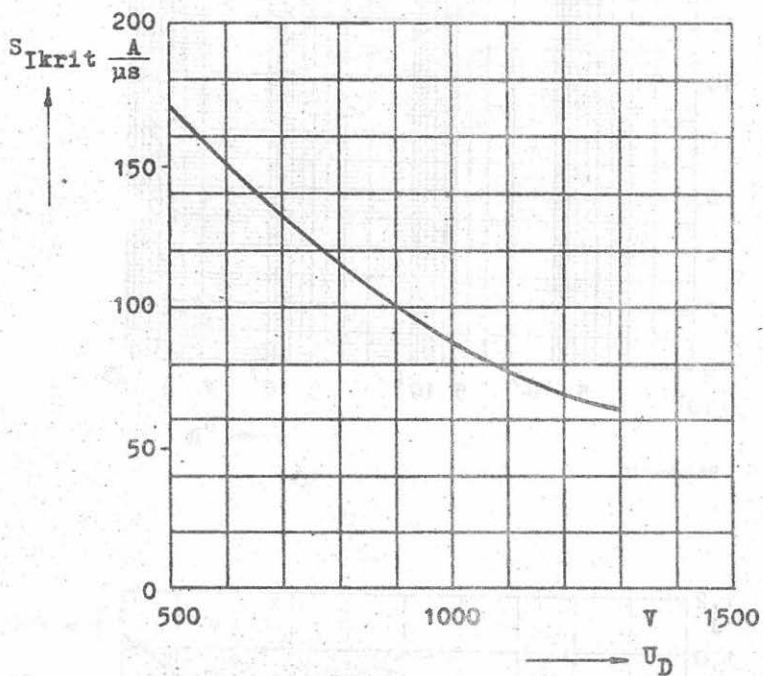


Bild 12