

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO - MATEMATICKI FAKULTET
- Katedra za fiziku -

Nada Andrić

GENERATOR IMPULSA SA TIRATRONOM
- diplomski rad -

NOVISAD

1974.

Zahvaljujem se profesoru
dr. Miroslavu Pavlovu
na korisnim savetima i
pomoći pri izradi rada

S A D R Ž A J

U V O D	I
1. PRAŽNjenje kroz gasove	1
1.1. Ionizacija u cevima punjenim gasom	1
1.2. Statička karakteristika gasne cevi	3
1.3. Niskonaponsko lučno pražnjenje	4
1.4. Pašenov zakon	5
2. TIRATRON	8
2.1. Vrste tiratrona	8
2.2. Struktura tiratrona 2D21 i uloga pojedinih elektroda	9
2.3. Vreme oporavka tiratrona	12
3. KARAKTERISTIKE TIRATRONA	13
3.1. Karakteristike paljenja	13
3.2. Statičke karakteristike	19
4. KOLO ZA FORMIRANJE I KAŠNJENJE IMPULSA	22
4.1. Opis rada i uloga pojedinih elemenata	22
4.2. Proračun vremenske konstante integratora	26
4.3. Merenja i obrada rezultata	29
Z A K L J U Č A K	36
L I T E R A T U R A	37
P R I L O G	38



U V O D

Ovaj rad ima za cilj da objasni fizičke procese pražnjenja u gasu vezane za mehanizam provodjenja tiratrona. Ova je analiza data u glavi 1. Posebno je opisana pojava oscilovanja napona u niskonaponskom luku provodnog tiratrona.

U glavi 2. opisana je konstrukcija tiratrona i uloga pojedinih elektroda.

Glava 3. odnosi se na merenja, snimanje i obradu karakteristika paljenja i statickih karakteristika tiratrona.

U glavi 4. obuhvaćen je projekt generatora impulsa sa posebnim proračunom vremenske konstante integratora, kola za kašnjenje impulsa. Vremenska konstanta integratora menja se stepenasto, sa tri položaja u odnosu $1 : 10 : 10^2$, a fina regulacija vremena kašnjenja impulsa ostvarena je pomoću potenciometra. Na kraju su dati rezultati merenja vremena kašnjenja impulsa u posebnim tablama, kao i snimci oblika impulsa na karakterističnim tačkama kola.



1. P R A Ž N J E N J E K R O Z G A S O V E

1.1. JONIZACIJA U CEVIMA PUNJENIM GASOM

Spoljašnje manifestacije i karakteristike pražnjenja kroz gasove veoma su raznovrsne, što se objašnjava širokim dijapazonom parametara i elementarnih procesa koji određuju uslove prolaska struje kroz gas. Pod parametrima se podrazumevaju sastav i pritisak gasa, geometrijska konfiguracija prostora u kome se odvija pražnjenje, jačina struje i drugo, a elementarni procesi su ionizacija i pobudjenje atoma i molekula gasa, rekombinacija, sudari, elastično rasejanje i razni oblici emisije elektrona.

Bitna osobina pražnjenja je snažan uticaj samog procesa prolaska struje na svojstva gasne sredine. Mnoge karakteristike ovog procesa nemaju analitički izraz i daju se empirijskim formulama ili mogu biti izračunate približno. Sve ovo čini praktično nemogućim postavljanje jedne kvantitativne teorije koja obuhvata sve oblike pražnjenja, te se proučavanje svodi na razmatranje posebnih oblika pražnjenja.

Kao i vakuumске cevi, i cevi punjene gasom prave se u obliku staklenog balona, iz kojeg se vazduh evakuše do pritiska 10^{-6} - 10^{-8} milimetara živinog stuba. Zatim se u cev stavi gas, na primer helijum, argon, vodonik ili živina para. Obično se pritisak gasa u cevi kreće od nekoliko hiljaditih delova milimetra, do jednog milimetra živinog stuba. Prolazak struje kroz ovakvu cev uslovljen je postojanjem jona. Joni u gasu mogu nastati na više načina: ionizacijom pri sudaru elektrona i jona sa neutralnim atomima i molekulima, pri sudaru druge vrste,



kada atom ili molekul primi energiju eksitacije drugog atoma ili molekula, pri ozračenju γ - i X-zracima, i konačno termičkom ionizacijom, kada, zahvaljujući velikim energijama usled visoke temperature, pri sudaru neutralnih molekula dolazi do njihovog razlaganja na jone.

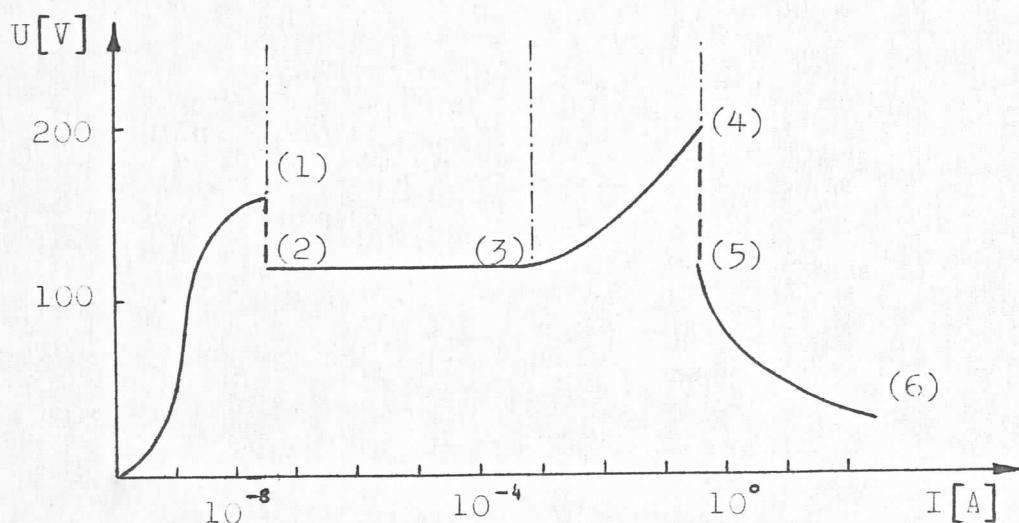
Najveći značaj za prolazak struje kroz gasove ima ionizacija pri sudaru. Sudar dveju čestica, na primer elektrona i molekula gasa, može biti elastičan i neelastičan. Elastični sudari ne igraju veliku ulogu u procesu ionizacije, dok su neelastični sudari veoma značajni, jer oni predstavljaju izvor energije koja je potrebna za ionizaciju.

Elektroni u nepobudjenim atomima nalaze se pre sudara na svojim najnižim energijskim nivoima. Sa energijom primljenom u procesu sudara oni raspolažu na dva načina: ili zauzmu neki od viših energijskih nivoa, ili potpuno napuštaju atom. Ovo drugo dogadja se kada je primljeni iznos energije dovoljan za odvajanje elektrona iz atoma, kada je on veći ili jednak ionizacionoj energiji.

Elektron, koji je tokom sudara zauzeo viši energijski nivo, vraća se spontano veoma brzo (u vremenu 10^{-8} s) na osnovni ili neki niži nivo, i pri tome ispušta foton. Međutim, elektron može da se zadrži na višem energijskom nivou i mnogo duže (10^{-4} s), ukoliko se nadje na metastabilnom nivou, odakle je verovatnoća za povratak na niži nivo nekoliko hiljada puta manja. Ovi metastabilni nivoi veoma su važni u procesu ionizacije, jer zahvaljujući njima ionizaciju mogu izvršiti i čestice koje imaju energiju manju od ionizacione energije. Naime, u toku prvog sudara sa česticom, elektron u atomu može dobiti energiju za odlazak na viši nivo, a u toku drugog sudara može dobiti još onu razliku energije koja mu je potrebna za potpuno napuštanje atoma. Ovo je postepena ili kumulativna ionizacija.

1.2. STATIČKA KARAKTERISTIKA GASNE CEVI

U sasvim prostoj cevi koja sadrži samo anodu i katodu koja nije grejana, pri maloj potencijalnoj razlici izmedju elektroda ne može doći do ionizacije. Međutim, u gasu i pod normalnim okolnostima ipak postoji jedan do tri para jona u svakom kubnom santimetru, tako da će kroz cev poteći sasvim mala struja, reda veličine mikroampera, koja će brzo preći u zasićenje, što se vidi na početku krive na sl. 1.



Sl. 1. - Statička karakteristika gasne cevi

Ako se potencijalna razlika dalje povećava, slobodni elektroni stiču dovoljno kinetičke energije da izazovu dalju ionizaciju, tako da struja pokazuje blag porast. Ova struja je tamna, tj. nije praćena emisijom svetlosti jer još nije došlo do značajnih promena energijskih nivoa kod većeg broja atoma gasa. Deo karakteristike do tačke (1), koji odgovara tamnoj struci, zove se Tausendovo pražnjenje. Tamna struja raste sve dok se napon ne približi onom pri kojem cev prelazi sa nesamostalnog pražnjenja na samostalno. Tada u stvari nastaje intenzivna ionizacija

uslovljena porastom kinetičke energije elektrona koji vrše ionizaciju sudarom. Cev se pali, pojavljuje se takozvano tinjajuće pražnjenje praćeno svetlosnim efektima slabijeg intenziteta, čija boja zavisi od vrste gasa koji se nalazi u cevi. Napon koji odgovara tački (1) karakteristike, pri kome dolazi do proboga, je napon paljenja.

Nakon paljenja cevi napon će opasti, jer je sada dovoljan i niži napon za održavanje već započete ionizacije. Sledeći deo karakteristike, od tačke (2) do tačke (3), predstavlja povećanje struje najpre pri stalanom naponu, u toku kojeg katoda počinje da svetli takozvanim normalnim svetлом, a zatim kada se ovo svetlo proširi na celu katodu, struja raste uz porast napona. To je deo karakteristike od tačke (3) do tačke (4), koji se naziva anomalnim svetлом. Ono prelazi u lučno pražnjenje predstavljeno izmedju tačaka (5) i (6) karakteristike, a pri tome napon može da opadne čak i ispod vrednosti potrebne za ionizaciju.

1.3. NISKONAPONSKO LUČNO PRAŽNJENJE

Niskonaponsko lučno pražnjenje može se sresti kod cevi sa grejanom katodom i sa malom razlikom potencijala izmedju elektroda. U običnim uslovima potencijal pri kome se pražnjenje može održavati, nije niži od ionizacionog potencijala gasa, dok se u ovom slučaju pražnjenje odvija pri potencijalu koji je mnogo niži od ionizacionog potencijala gasa. Ako je potencijal pražnjenja niži ne samo od ionizacionog potencijala gasa, već i od prvog eksitacionog potencijala, imamo slučaj anomalnog niskonaponskog lučnog pražnjenja, a ako potencijal pražnjenja leži izmedju prvog eksitacionog potencijala i potencijala ionizacije, radi se o normalnom niskonaponskom lučnom pražnjenju.

U niskonaponskom luku primećuje se nastanak oscilacija. Oko katode cevi sa ovom vrstom pražnjenja uvek postoji negativno prostorno nanelektrisanje, pošto je kod ovog luka ukupna struja termoelektronske emisije sa katode

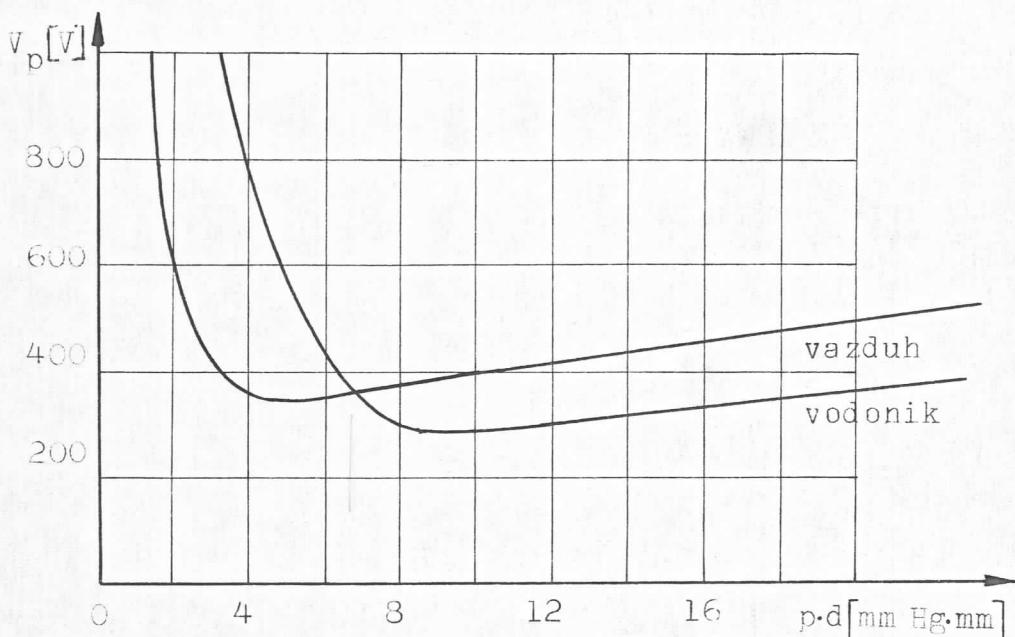
uvek veća od struje pražnjenja, i deo elektrona emitovanih sa katode vraća se na katodu. Pri potencijalu anode, dovoljnom za ionizaciju gasa, pozitivni joni rasturaju negativno prostorno nanelektrisanje oko katode i anodna struja raste. Ovaj porast struje povećava pad potencijala u spoljašnjem kolu. Rezultat ovoga je toliko smanjenje potencijalne razlike na krajevima cevi da prestaje proces ionizacije gasa. Tada ponovo raste negativno prostorno nanelektrisanje oko katode, anodna struja se smanjuje, potencijal anode raste, ionizacija se ponovo javlja i ceo proces se ponavlja. Učestanost ovih oscilacija ne podleže Tomsonovom obrascu, već se određuje u prvom redu režimom luka, a zavisi i od temperature katode i pritiska gasa.

Mogućnost postojanja normalnih niskonaponskih lukova može se objasniti kumulativnom ionizacijom a takođe i oscilacijama luka. Elementi spoljašnjeg kola koji daju razliku potencijala izmedju anode i katode, pokazuju u slučaju oscilatornog režima samo neku srednju vrednost potencijala anode u odnosu na katodu. U odvojenim fazama oscilovanja ovaj potencijal može biti veći od ionizacionog potencijala gase, što i dovodi svaki put do nastanka pražnjenja koje izgleda neprekidno zbog visoke učestanosti oscilacije. Slučaj anomalnog niskonaponskog luka svodi se na razmatrani slučaj oscilovanja kada potencijal anode ne dostiže ionizacioni potencijal, ali je u nekoj fazi oscilovanja viši od prvog eksitacionog potencijala.

1.4. PAŠENOV ZAKON

Kako je eksperimentalno utvrđeno, napon paljenja cevi je funkcija ne samo vrste gase već i pritiska gase i rastojanja izmedju elektroda. Od pritiska gase zavisi dužina srednje slobodne putanje elektrona koji vrši ionizaciju, jer ako je pritisak veći rastojanja molekula gase su manja, te je srednja slobodna putanja elektrona kraća. Da bi došlo do paljenja, napon izmedju elektroda mora biti dovoljan da ubrza elektrone toliko, da oni na

svojoj putanji izmedju dva sudara sakupe onoliko energije koliko je potrebno za ionizaciju. Zavisnost napona paljenja od proizvoda pritiska gasa i rastojanja izmedju elektroda, poznata kao Pašenov zakon, predstavljena je na sl. 2.



Sl. 2. - Pašenova kriva za vazduh i vodonik.

Tok Pašenove krive može se objasniti ako se najpre pretpostavi da je rastojanje elektroda (d) konstantno, a pritisak (p) se menja. Pri prelazu od većih ka manjim pritiscima raste dužina srednje putanje elektrona. Elektroni zbog toga prelaze veću potencijalnu razliku, čime raste iznos stečene energije, što znači veću verovatnoću ionizacije pri sudaru. Uslovi za ionizaciju su najpovoljniji na mestu gde kriva prolazi kroz minimum. Pri daljem smanjenju pritiska opada broj sudara zbog razredjivanja molekula, pa će za paljenje cevi biti potreban veći napon.

U drugom slučaju može se uzeti da je pritisak konstantan, a rastojanje elektroda se menja. Pri smanjivanju ovog rastojanja napon paljenja opada do minimalne tačke, jer raste jačina polja po obrascu $E = \frac{U}{d}$. Sa druge strane minimalne tačke napon paljenja opet ima porast, jer

se ovde smanjuje prostor koji je elektronima na raspolaganju, a kraća rastojanja znače manju verovatnoću ionizacije pri sudaru.

Cevi punjene gasom mogu se podeliti na cevi sa tinjajućim pražnjenjem i cevi sa lučnim pražnjenjem. Najbitnija razlika između njih je mehanizam emitovanja elektrona sa katode. Kod cevi sa tinjajućim pražnjenjem izlazak elektrona iz katode uslovljen je bombardovanjem hladne katode od strane pozitivnih jona, dok je kod cevi sa lučnim pražnjenjem emisija termoelektronska. Gasne cevi mogu imati samo dve elektrode i one se nazivaju gasne diode, a gasne cevi koje osim dveju osnovnih elektroda imaju jednu ili više rešetki, su tiratroni.

2. T I R A T R O N

2.1. VRSTE TIRATRONA

Tiratron može biti punjen živinom parom ili nekim razredjenim gasom, kao na primer argonom, neonom, vodonikom ili nekim drugim gasom. Prvi tiratron proizведен je još 1920. godine, a sadržao je živinu paru. Živina para kao punjenje tiratrona ima nedostataka. Najveća potencijalna razlika koja se može ostvariti u tiratronu sa živinom parom je oko 30 V. Ukoliko je potencijalna razlika veća, ona toliko ubrzava pozitivne jone da oni razaraju katodu pri dolasku na nju. Ukoliko se u tiratron stavi vodonik, maksimalna potencijalna razlika postaje nekoliko desetina puta veća, jer su vodonikovi joni mnogo manje mase. Vodonik je kao punjenje tiratrona prvi put iskorišćen nekoliko godina pre drugog svetskog rata, a u toku rata tiratron je intenzivno usavršavan jer je tada njegova glavna primena bila kod radara.

Vodonik ima prednosti nad živinom parom još i u pogledu dejonizacije. Naime, kad se cev isključi, potrebno je 100-1000 mikrosekundi da se cev oporavi, tj. da se joni žive rekombinuju. Ako se kao gase punjenje koristi vodonik, ovo vreme kod nekih cevi može da se smanji i do 0.01 mikrosekunde jer su vodonikovi atomi lakši, pa zato i pokretljiviji.

Nepovoljna osobina vodonika u odnosu na inertne gasove je njegova hemijska aktivnost. Iz tog razloga mora se strogo voditi računa da sav materijal koji se upotrebljava u proizvodnji tiratrona bude visokog stepena čistoće.

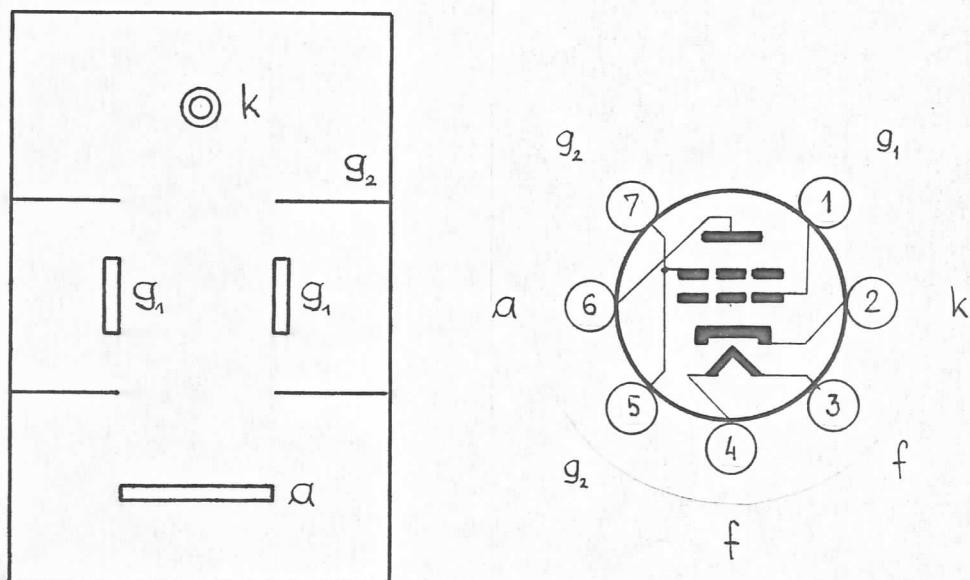
U toku rada tiratrona dolazi do apsorpcije vodonika od strane elektroda. Zato se u cilju produženja veka trajanja tiratrona u njega ugradjuje rezervoar vodonika.

Rezervoar se pravi u obliku kapsule sa titanijum hidridom, koja je priključena na grejanje zbog održavanja termičke ravnoteže. Ovo se obično praktikuje kod većih tiratrona, a manji kao što je tiratron tipa 2D21 korišćen u ovom radu, nemaju rezervoar.

2.2. STRUKTURA TIRATRONA 2D21 I ULOGA POJEDINIH ELEKTRODA

U ovom radu korišćen je tiratron tipa 2D21, pa se najviše podataka u ovoj glavi odnosi na isti.

U sastav tiratrona ulaze katoda, anoda, upravljačka rešetka i zaštitna rešetka. Raspored elektroda i izgled podnožja cevi prikazan je na sl. 3.



Sl. 3. - Raspored elektroda kod tiratrona

Katoda je indirektno grejana. Vlakno za grejanje obavijeno je katodnim cilindrom koji može imati još i zaštitni omotač, da bi se smanjilo toplotno zračenje katode. Zbog velike mase katoda se sporo zagreva. Nije preporučljivo priključiti anodni napon pre nego što se katoda zagreje, tj. pre nego što katoda dostigne svoju

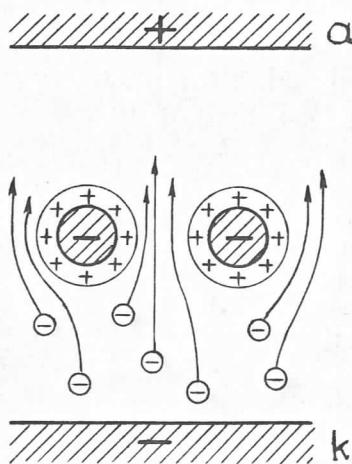
radnu temperaturu, jer bi se u tom slučaju povećala potencijalna razlika izmedju anode i katode, a ovo bi moglo izazvati razaranje katodnog materijala usled bombardovanja pozitivnim jonima. Ovo vreme zagrevanja kreće se od nekoliko sekundi do 30 minuta, zavisno od tipa cevi. Na spoljašnji cilindar katode nanesen je aktivan sloj okksida sa kojeg polaze elektroni.

Anoda je pločica od nikla ili grafita, a izmedju anode i katode nalazi se upravljačka rešetka. Sve tri elektrode obavijene su cilindrom sa dva zaklona, koji predstavlja zaštitnu rešetku. Zaštitna rešetka u ovom radu bila je vezana za katodu. Zakloni na zaštitnoj rešetki sprečavaju taloženje materijala na upravljačku rešetku.

Upravljačka rešetka može imati više otvora raznih oblika i veličina, ili jednostavno može biti u obliku jednog većeg prstena. Ona mora imati veću masu da bi izdržala bombardovanje i toplotu rekombinacije, bez opasnosti da će i sama početi da emituje termoelektrone. Na upravljačku rešetku doveden je negativan napon, čijom se vrednošću može uspostavljati pražnjenje kroz cev. Naime, kada se iznos negativnog napona upravljačke rešetke smanji na kritičnu vrednost, cev će se upaliti. Anodni napon pri kome se cev pali, predstavljen u funkciji napona rešetke, naziva se karakteristikom paljenja cevi. Ova karakteristika je važna ne samo zato što pokazuje koliki treba da je napon rešetke, već i koliki iznos pozitivnog napona treba dodati na prednapon, da bi se cev pri postojecem anodnom naponu upalila.

Za razliku od vakuumskih trioda, upravljačka rešetka tiratrona posle uspostavljenja pražnjenja izmedju katode i anode, potpuno gubi kontrolu nad anodnom strujom koja je sada određena isključivo termoelektronском emisijom katode i uslovima spoljašnjeg kola. Bilo kakva promena negativnog napona rešetke ne će uticati na procese u cevi, jer se oko rešetke obrazuje sloj pozitivnih jona gasa, koji neutrališe njeno negativno opterećenje. Ovo je prikazano na sl. 4.

Upravljačka rešetka ponovo ostvaruje kontrolu nad procesom u cevi kada se anodni napon dovede na nulu. Znači da tiratron može da deluje kao jedan elektronski prekidač koji se zatvara povećanjem napona upravljačke rešetke, a otvara se obustavljanjem struje pomoću spoljašnjeg kola.



Sl. 4. - Negativan potencijal rešetke kompenzovan slojem pozitivnih jona

Kada je tiratron provodan, a napon rešetke negativan, struja rešetke sastoji se od pozitivnih jona. Ako se potencijal rešetke povisi i sa negativnih vrednosti predje na pozitivne, sloj pozitivnih jona oko rešetke neće više postojati, te će elektroni lako stizati na rešetku. Zbog ovog postoji mogućnost da se izmedju katode i rešetke obrazuje lučno pražnjenje koje može da uništi rešetku. Da bi se otklonila ova opasnost, u seriji sa rešetkom treba vezati odgovarajući otpornik koji će ograničiti struju rešetke, tj. pad potencijala kroz otpornik u kolu rešetke sprečiće neželjeni porast potencijala rešetke.

2.3. VREME OPORAVKA TIRATRONA

U trenutku kada se anodni napon dovede na nulu i cev se ugasi, u njoj postoji ogroman broj pozitivnih jona gasa i elektrona. Oni ne iščezavaju odmah, već im je potrebno izvesno vreme da bi se rekombinovali. Ovo vreme se zove vreme oporavka cevi i iznosi 75 mikrosekundi za tiratron tipa 2D21.

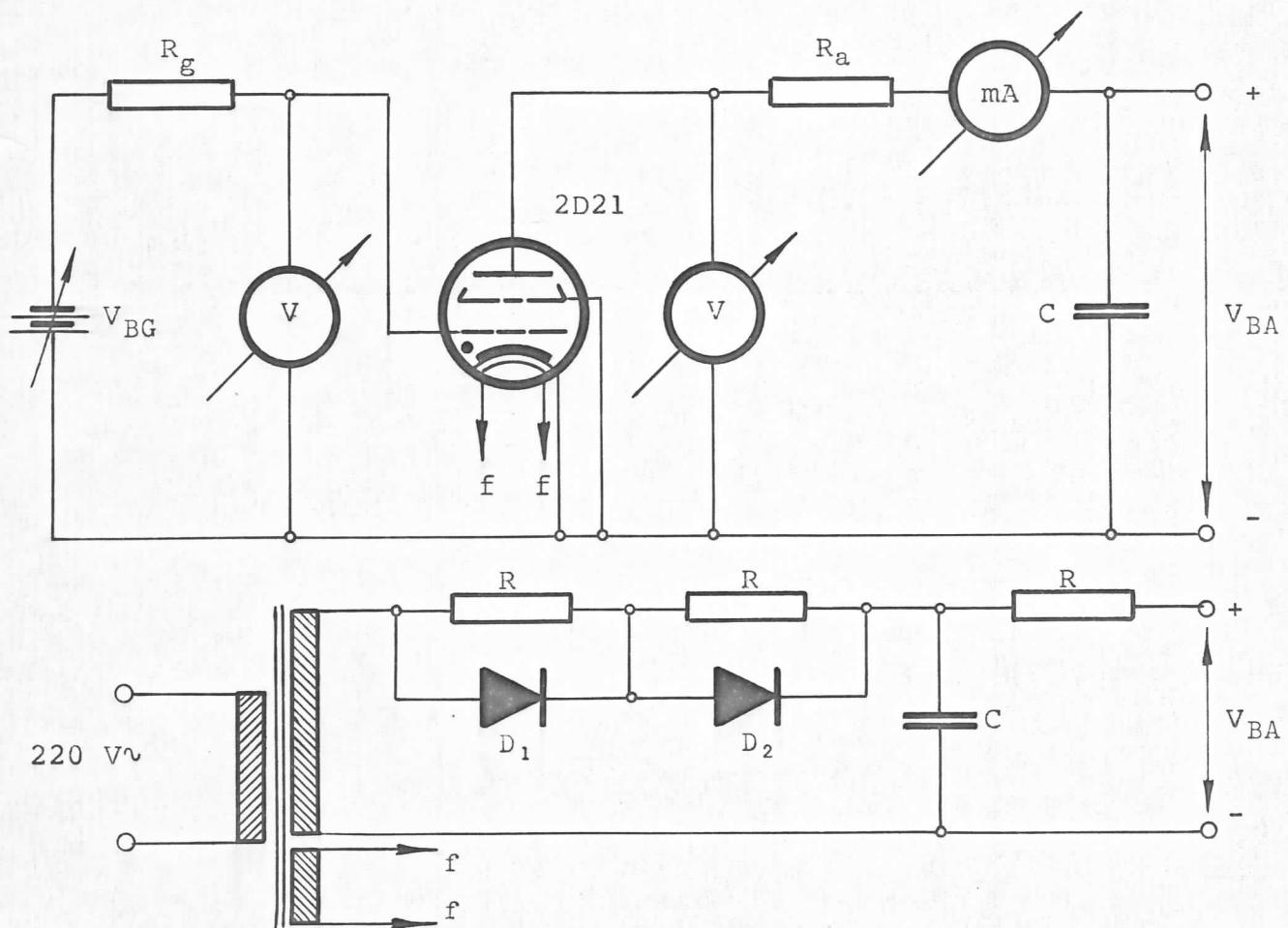
Ako se anodni napon primeni pre nego što se cev oporavila, provodno stanje može se uspostaviti ponovo, nezavisno od potencijala upravljačke rešetke, što predstavlja njen gubitak kontrole nad procesom u tiratronu. Zato je poželjno da se anoda drži na blagom negativnom potencijalu sve do potpunog oporavka.

Procesi rekombinacije uglavnom se dogadjaju na površini elektroda i na zidovima cevi. Oporavak je kompletan kada joni nestaju iz otvora rešetke, ali to ne znači da u cevi ne postoji još izvestan broj jona. Naime, cev se oporavi pre nego što se dejonizuje.

3. KARAKTERISTIKE TIRATRONA

3.1. KARAKTERISTIKA PALJENJA

Jedna od važnih karakteristika tiratrona je zavisnost anodnog napona pri kome dolazi do uspostavljanja pražnjenja, od napona na upravljačkoj rešetki. Dovodenje tiratrona iz neprovodnog u provodno stanje može se ostvariti pri konstantnom naponu rešetke, povećanjem anodnog napona, ili pri konstantnom anodnom naponu povećanjem napona rešetke. Karakteristika paljenja snimana je pomoću kola čija je šema data na sl. 5.



Sl. 5. - Kolo za snimanje karakteristike paljenja

Nezavisno promenljiva veličina bio je napon rešetke v_G , koji je imao vrednosti od -4 V do 0 V sa korakom 0.25 V. Zavisno promenljiva veličina, anodni napon v_A , za svaku vrednost napona rešetke biran je tako da nastupi probaj. Ovo se manifestuje naglim padom anodnog napona, što je uslovljeno padom potencijala na otporniku R_a .

Za merenje struje i napona korišćeni su multimetri UNIGOR 6, proizvodnje austrijske firme GOERZ.

Merene vrednosti napona rešetke i odgovarajućih anodnih napona, pri kojima je došlo do probaja, za četiri različita tiratrona tipa 2D21, date su u tabeli 1.

$-v_G$ [V]	v_A [V]	v_A [V]	v_A [V]	v_A [V]
0	16	14	14.5	14.5
0.25	21	16	17	16
0.50	23	18	22	19
0.75	27	22	26	23
1	36	26	35	32
1.25	50	39	48	38
1.50	70	48	70	52
1.75	116	70	110	80
2	170	115	175	130
2.25	245	160	245	180
2.50	290	220	270	235
2.75	370	290	275	285
3	440	370	280	350
3.25	520	420	280	380
3.50	585	510	310	450
3.75	660	600	340	520
4		630	370	570

Tabela 1. - Podaci za karakteristike paljenja

Iz podataka tabele 1. vidi se da se cevi pri istom naponu rešetke pale pri anodnim naponima koji se razlikuju i za 100 V, iako se radi o istom tipu cevi. Do ovoga dolazi zbog različitih emisionih moći i temperatura katoda, geometrija konstrukcije, različitih pritisaka gase u cevi, tehnoloških razlika u izradi i mogućih varijacija u hemijskom sastavu.

Karakteristike paljenja za prvi i drugi tiratron predstavljene su grafički na sl. 7.

Karakteristike paljenja pokazuju znatnu zavisnost od temperature. Ova se činjenica može proveriti menjanjem napona grejanja. Napon grejanja, koji za cev tipa 2D21 iznosi 6.3 V, menjan je od 5 V sa korakom od po 0.5 V do 7 V, i tako je dobijeno pet različitih karakteristika. Ovi rezultati dati su u tabeli 2, a grafički su prikazani na sl. 8.

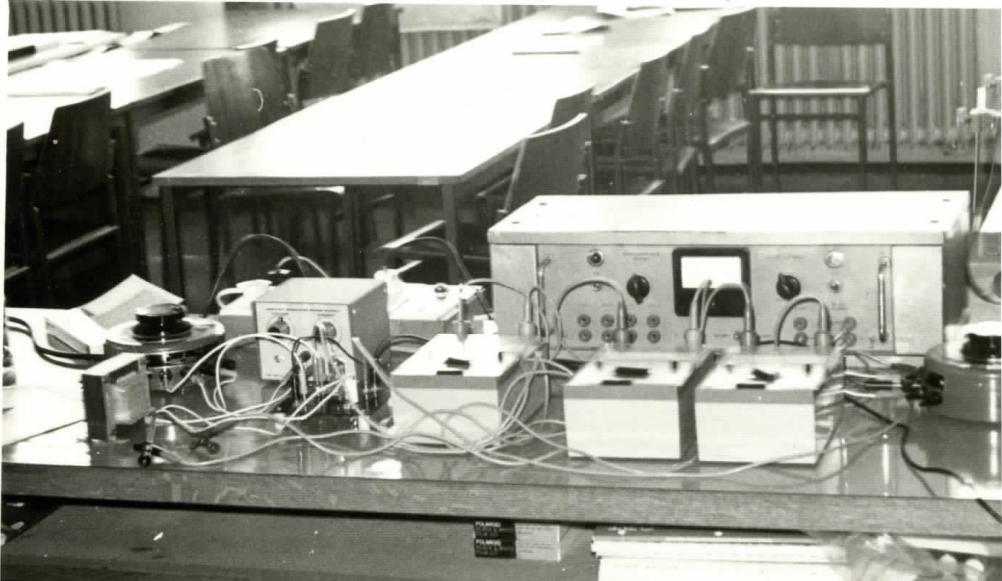
	$V_f = 5V$	$V_f = 5.5V$	$V_f = 6V$	$V_f = 6.5V$	$V_f = 7V$
$-v_G [V]$	$v_A [V]$	$v_A [V]$	$v_A [V]$	$v_A [V]$	$v_A [V]$
0	38	30	23	18	17
0.25	40	33	26	20	19
0.50	45	38	32	25	22
0.75	53	43	40	32	28
1	75	65	50	44	38
1.25	115	100	75	60	50
1.50	180	150	110	90	68
1.75	235	210	160	130	105
2	290	250	210	180	150
2.25	350	325	270	230	190
2.50	-	400	345	285	255
2.75	-	-	400	350	310
3	-	-	-	410	380

Tabela 2. - Zavisnost karakteristike paljenja od temperature

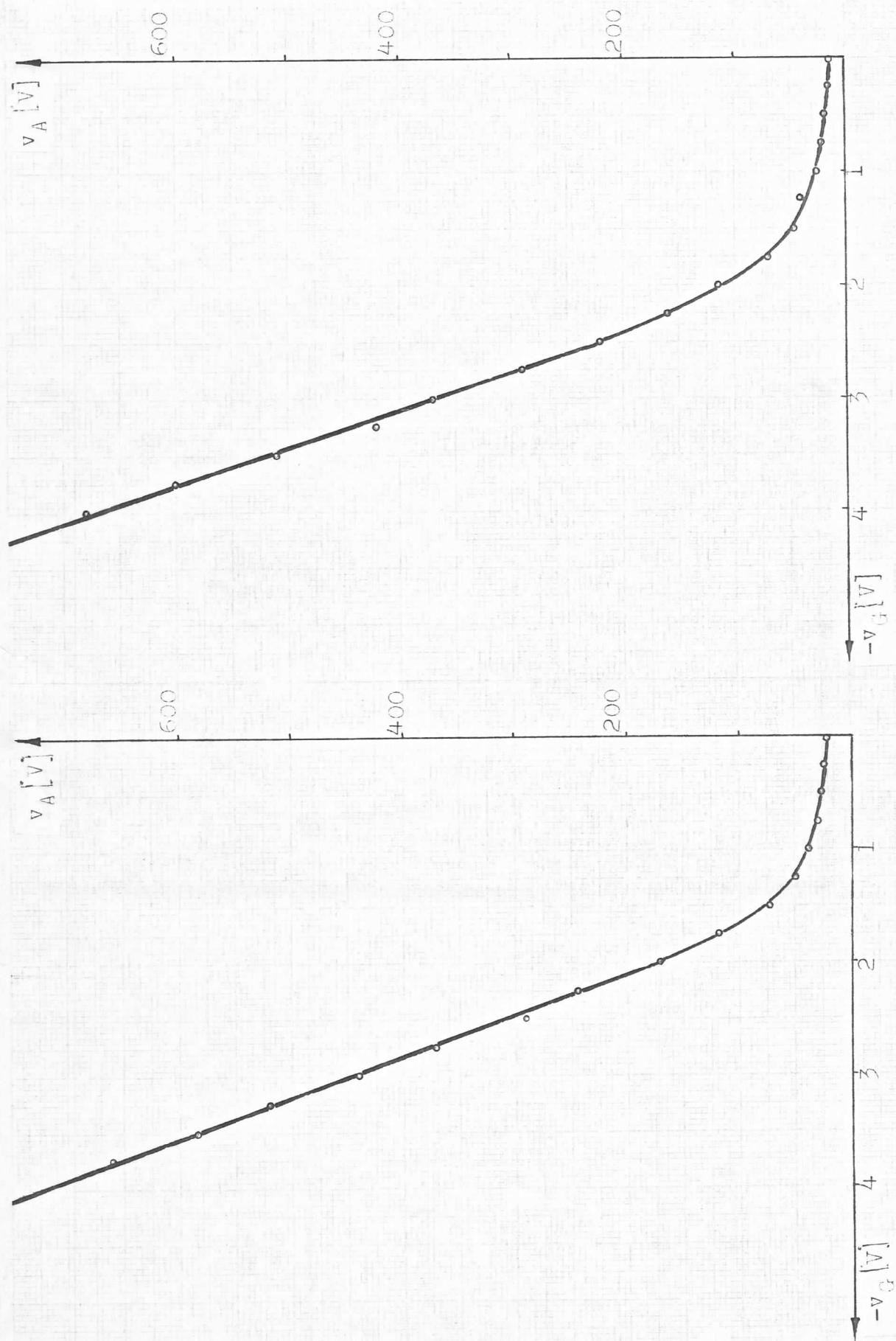


Ako je temperatura katode viša, biće dovoljan i niži napon rešetke, da bi se cev upalila. Zato su karakteristike paljenja za više temperature pomerene u levo, ka negativnijim naponima rešetke, kao što se može videti na sl. 8.

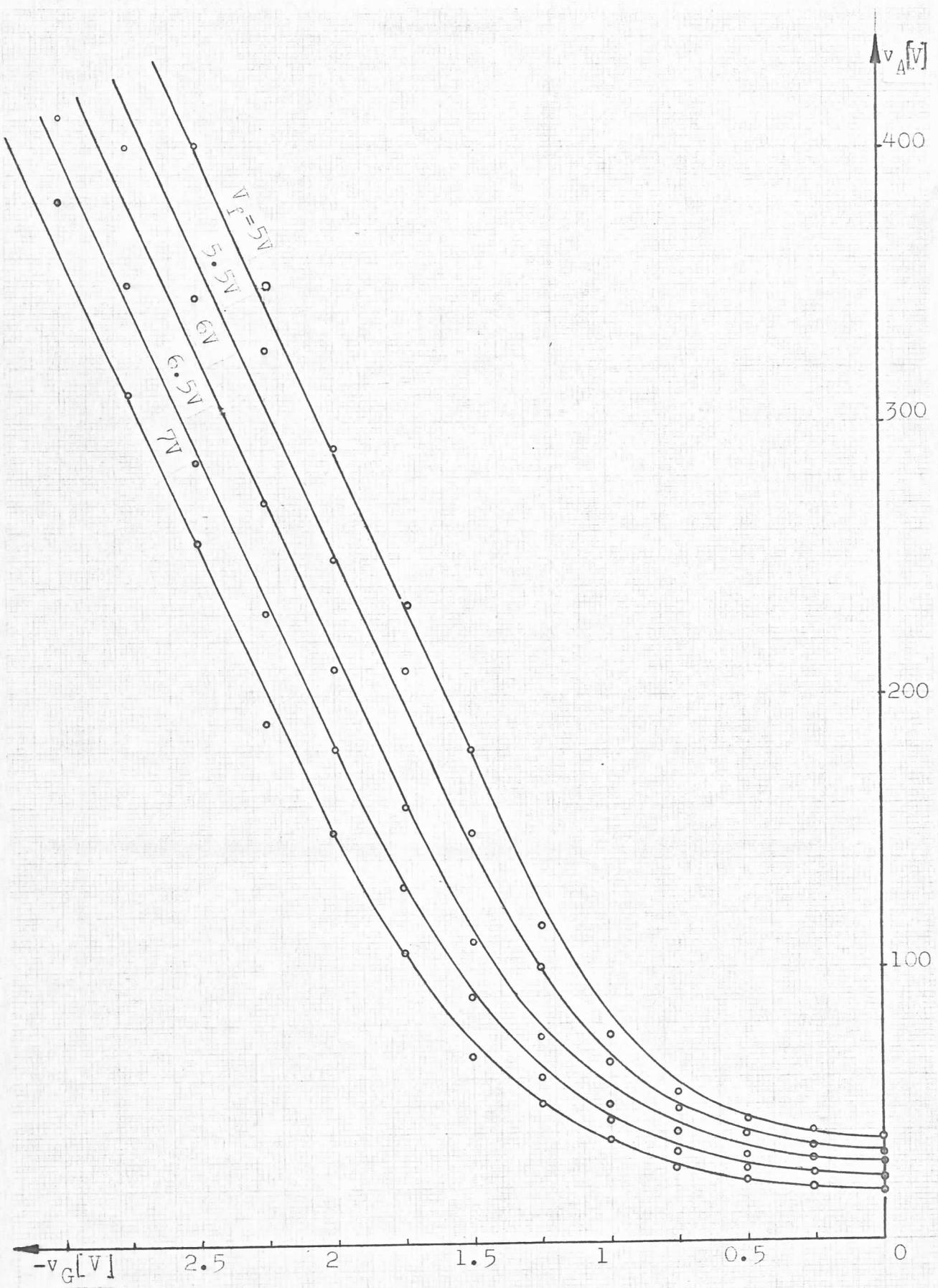
Uredjaj pomoću kojeg je u ovom radu snimana karakteristika paljenja prikazan je na sl. 6.



Sl. 6. - Uredjaj za snimanje karakteristike paljenja



Sl. 7. - Karakteristike paljenja za prvi i drugi tiratron prema tabeli 1.



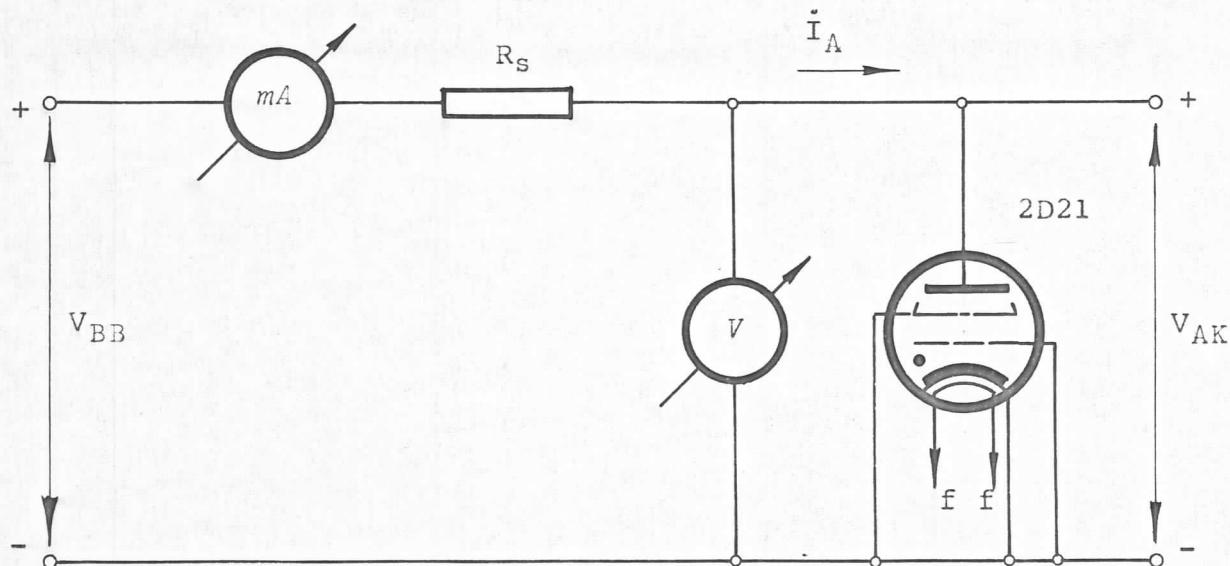
Sl. 8. - Zavisnost karakteristike paljenja od temperature prema tabeli 2.

3.2. STATIČKA KARAKTERISTIKA

Osnovna karakteristika električne struje, zavisnost jačine struje od napona, $I = f(V)$, kod samostalnog pražnjenja u gasu veoma se razlikuje od te karakteristike u čvrstim ili tečnim provodnicima. Kod čvrstih i tečnih provodnika postoji jednoznačna rastuća zavisnost struje od napona, tako da je $\frac{dV}{dI} > 0$.

Kod nesamostalnog pražnjenja u gasu zavisnost je $\frac{dV}{dI} \geq 0$, dok kod samostalnog pražnjenja postoji takozvana opadajuća karakteristika $\frac{dV}{dI} < 0$, te je unutrašnji otpor negativan. U ovoj oblasti pri smanjenju struje rapidno se smanjuje broj ionizacije u jedinici vremena, što dovodi do smanjenja provodljivosti luka, tj. porasta otpora. Zbog toga napon luka raste.

Statičke karakteristike snimane su pomoću kola prikazanog šemom na sl. 9.



Sl. 9. - Kolo za snimanje statičke karakteristike

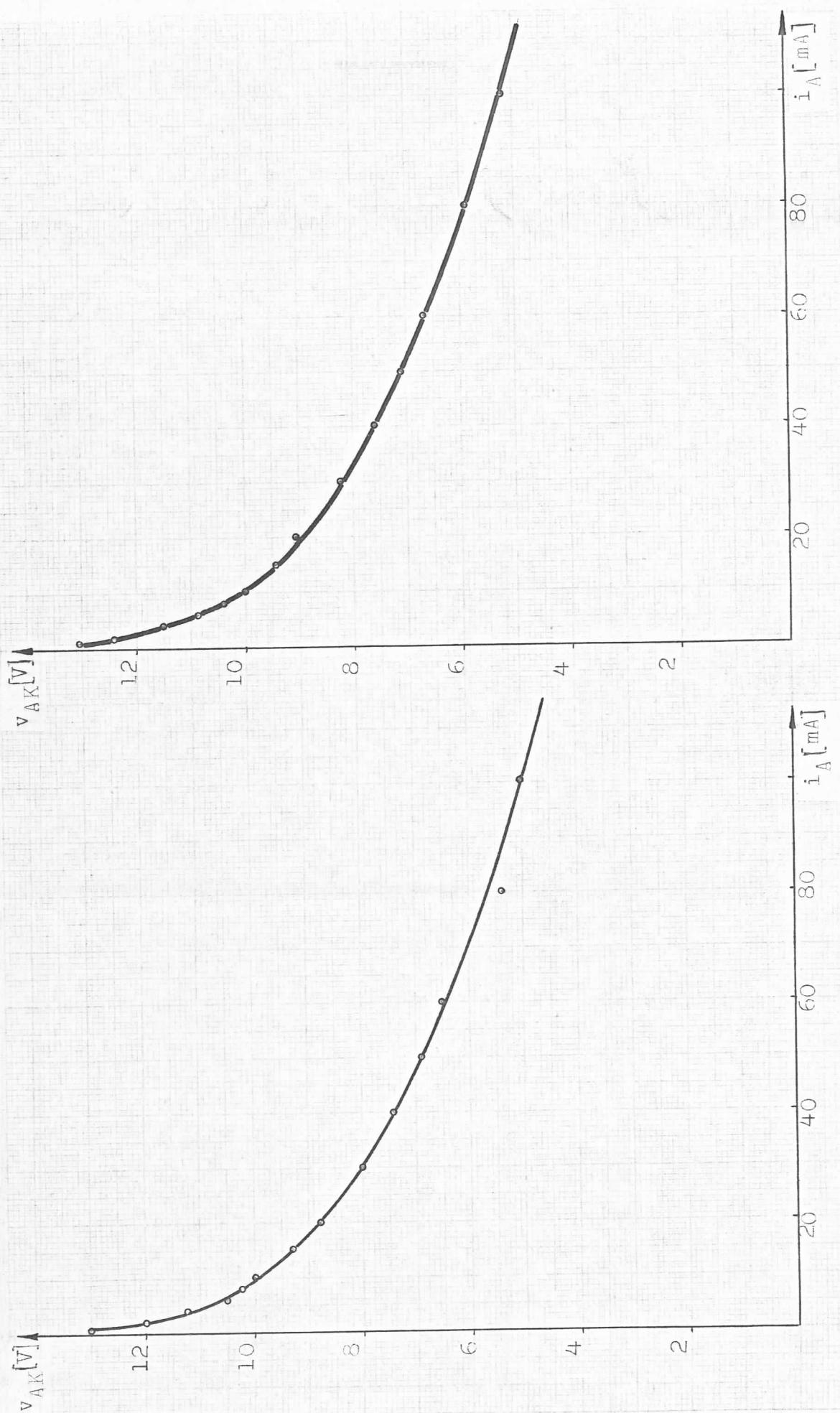
Upravljačka i zaštitna rešetka tiratrona bile su spojene sa katodom. Otpornik u kolu struje predstavlja zaštitu tiratrona od preopterećenja.

Za merenje struje i napona ponovo su korišćeni multimetri UNIGOR 6.

Rezultati merenja za četiri različita tiratrona tipa 2D21 dati su u tabeli 3, a statičke karakteristike za prvi i drugi tiratron grafički su prikazane na sl. 10.

i_A [mA]	v_{AK} [V]	v_{AK} [V]	v_{AK} [V]	v_{AK} [V]
100	5.00	5.19	5.50	5.40
80	5.35	5.90	6.10	5.60
60	6.50	6.65	6.69	6.25
50	6.90	7.09	7.12	6.59
40	7.40	7.60	7.60	7.05
30	8.00	8.22	8.25	7.49
20	8.80	9.05	9.05	8.90
15	9.30	9.45	9.55	9.50
10	10.00	10.00	10.22	10.00
8	10.25	10.40	10.60	10.40
6	10.50	10.90	11.20	10.75
4	11.25	11.50	11.60	11.40
2	12.00	12.40	12.60	12.40
1	13.00	12.90	13.20	12.90

Tabela 3. - Podaci za statičke karakteristike



Sl. 10. - Statičke karakteristike za prvi i drugi tiratron prema tabeli 3.

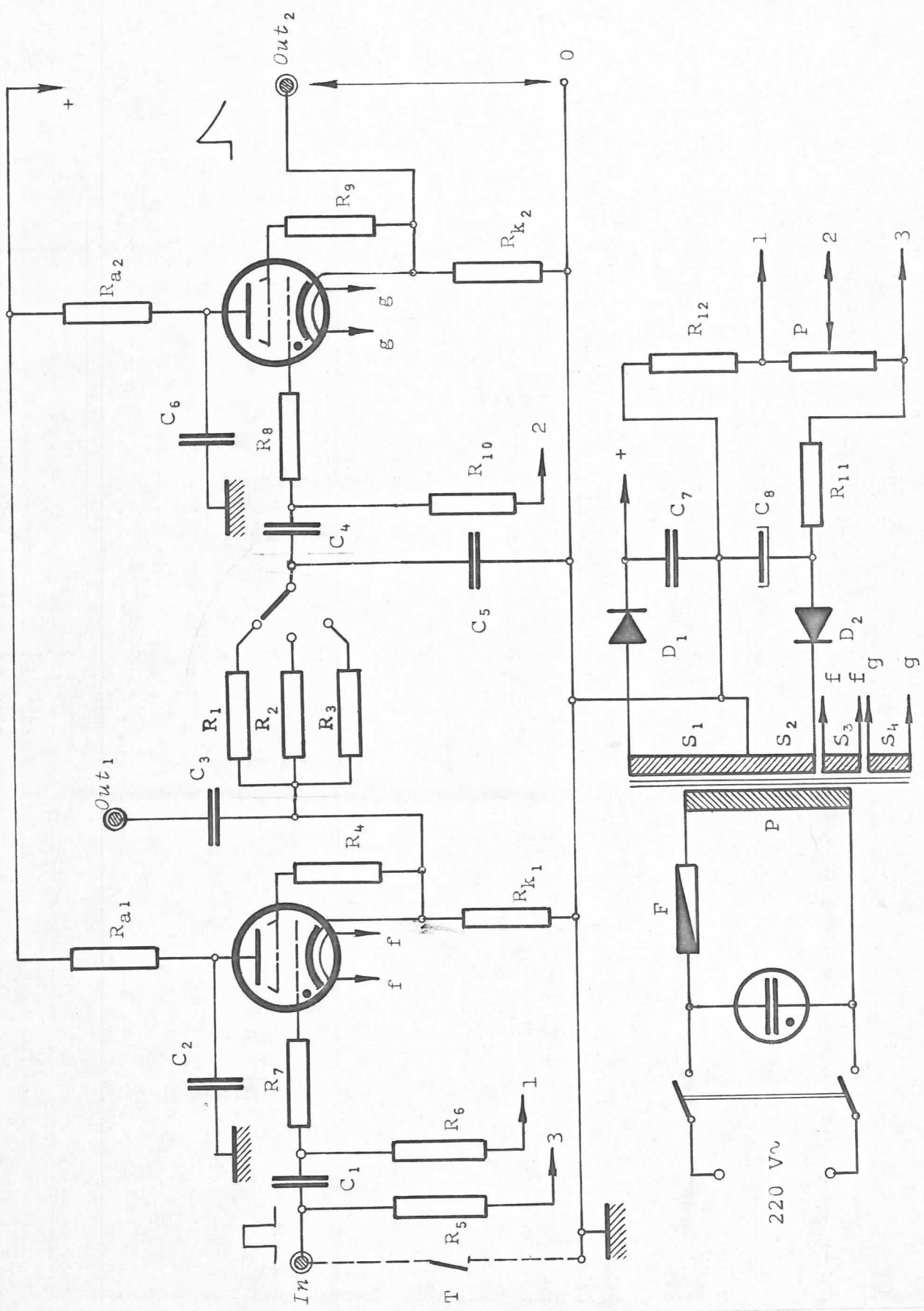
4. K O L O Z A F O R M I R A N J E I K A Š N J E N J E I M P U L S A

4.1. OPIS RADA I ULOGA POJEDINIH ELEMENATA

Jednu od mogućih primena tiratrona predstavlja kolo za formiranje impulsa visokog napona, sa veoma kratkim vremenom porasta, koje iznosi $0.03 \mu s$ (vidi sl. 16). Takvo kolo za formiranje dva impulsa, od kojih je jedan vremenski pomeren u odnosu na drugi, prikazano je na sl. 11. Princip funkcionisanja može se opisati na sledeći način.

Kada je taster T otvoren, prvi tiratron je neprovodan. Potencijalna razlika na kondenzatoru C_2 ($0.3 \mu F$) iznosi v_A (445 V). Preko otpora R_6 (1 M), kao i R_7 (1 K), koji prenose fiksni negativni potencijal formiran na razdelniku R_{11} (15 K), P (50 K), R_{12} (3.6 K) upravljačka rešetka prvog tiratrona nalazi se na potencijalu v_{G1} (-4.4 V) što odgovara neprovodnom režimu. Istovremeno je na kondenzatoru C_1 (10 nF) formirana razlika potencijala v_{31} (-57.6 V) $[-62 - (-4.4) = -57.6 V]$, jer je tačka 3 sa istog razdelnika na potencijalu v_3 (-62 V). Budući da je prvi tiratron neprovodan, potencijal katode jednak je nuli, tj. kroz isti struja ne teče ($i_k=0$), potencijalna razlika na krajevima otpornika R_{k1} (820Ω) jednaka je nuli, a takodje preko otpornika R_4 (1 K) i potencijal druge rešetke jednak je nuli.

Zatvaranjem testera menja se potencijal tačke T_n od v_3 (-62 V) na 0 V, što je ekvivalentno dovodenju pozitivnog pravougaonog impulsa (+62 V) na upravljačku rešetku prvog tiratrona. Ovaj impuls koji se prenosi preko kondenzatora C_1 i otpornika R_7 , dovodi prvi tiratron u provodno stanje. Kroz prvi tiratron poteče struja i na otporniku R_{k1} javlja se pozitivan impuls amplitude v_A umanjen za



Sl. 11. - Kolo za formiranje i kašnjenje impulsa

iznos od nekoliko volti usled razlike potencijala na tiratronu. Ovaj se impuls vodi na izlaz Out 1. Da bi se dobio zakasneli impuls isti se vodi na integrator [serijska veza jednog od otpora R_1 (470Ω), R_2 (4.7 K) i R_3 (47 K) i kondenzatora C_5 (1.8 nF)]. Integrisani signal se uzima sa kondenzatora C_5 odakle se preko kondenzatora C_4 (2 nF) i R_8 (1 K) vodi na upravljačku rešetku drugog tiratrona. On bi trebalo da postane provodan u trenutku kada v_{G1} dostigne vrednost napona paljenja v_p .

Vremenska konstanta integratora proračunata je za sledeće opsege vrednosti vremena kašnjenja impulsa:

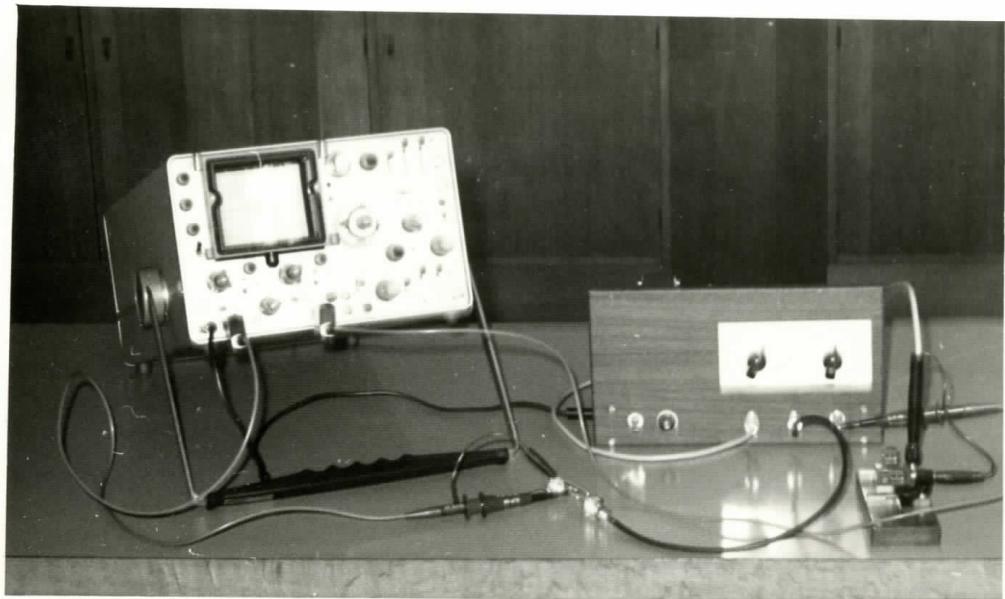
$\tau_1 = 0.01 - 0.1 \mu s$; $\tau_2 = 0.1 - 1 \mu s$; $\tau_3 = 1 - 10 \mu s$. Trenutak formiranja impulsa na otporniku R_{k2} (50Ω) zavisi od vremenske konstante integratora, kao i od položaja klizača potenciometra, jer je potrebno da napon na kondenzatoru C_5 promeni vrednost od nule do neke pozitivne vrednosti v_i^+ , što ima za posledicu da se sa desne strane kondenzatora C_4 napon menja od vrednosti v_3 koja je negativna, do $v_i^+ + v_3$. U jednom trenutku vrednost napona na desnoj strani kondenzatora C_4 dostiže vrednost napona paljenja drugog tiratrona. Ovaj postaje provodan, te se na otporniku R_{k2} javlja zakasneli impuls v_o koji se vodi na izlaz Out 2. U kojem će trenutku drugi tiratron postati provodan zavisi od dovedenog negativnog prednapona, odnosno položaja tačke 2 klizača potenciometra P. Ovo ukazuje da kašnjenje impulsa v_o zavisi ne samo od vremenske konstante integratora $R_i C_5$, ($i=1,2,3$), već i od položaja klizača potenciometra.

Uredjaj se napaja pomoću ispravljača (sl. 11), čiji su delovi: transformator Tr sa odgovarajućim namotajima (primar P_1 predviđen je za naizmenični napon 220 V) i poluprovodničke diode D_1 i D_2 , koje obezbeđuju potrebne jednosmerne napone.

Preko otpornika R_{a1} (1 M), odnosno R_{a2} (1 M) anode tiratrona dovedene su na potencijal v_A , što obezbeđuje odgovarajući radni režim. Serijska veza otpornika R_{12} i logaritamskog potenciometra P obezbeđuje na

tačkama 1, 2 i 3 odgovarajuće negativne jednosmerne potencijale potrebne za formiranje i zakašnjavanje impulsa, kao i za prednapone upravljačkih rešetki oba tiratrona. Ovaj razdelnik napona priključen je na filterski član $C_8 R_{11}$ i sa diodom D_2 predstavlja ispravljačku jedinicu koja obezbeđuje potrebne navedene jednosmerne napone. Kondenzatori C_2 ($0.3 \mu F$) i C_6 ($0.3 \mu F$) održavaju potencijale anoda na visokoj pozitivnoj vrednosti u momentu kada tiratroni počinju da provode.

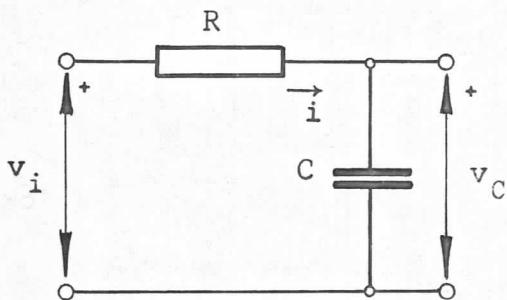
Osigurač F štiti primarnog transformatora od prekomernog opterećenja, a tinjalica G indicira prisustvo napona mreže. Na transformatoru su predviđeni posebni namotaji S_3 i S_4 , koji daju napon grejanja od $6.3 V$, posebno za svaki tiratron. Ovi su namotaji galvanski razdvojeni zato da kratkotrajni visokonaponski jednosmerni impulsi ne bi izazvali eventualni probaj između, na primer, katode prvog tiratrona i grejanja drugog tiratrona, i obrnuto. Optornici R_4 (1 K) i R_9 (1 K) drže zaštitne rešetke tiratrona na potencijalima odgovarajućih katoda, a služe, prema preporuci proizvodjača, za ograničenje moguće struje zaštitne rešetke u momentu uspostavljanja pražnjenja u tiratronu.



Sl. 12. - Izgled uređaja za dobijanje i posmatranje impulsa

4.2. PRORAČUN VREMENSKE KONSTANTE INTEGRATORA

Kolo integratora prikazano je na sledećoj šemi:



Sl. 13.

Na osnovu datih elemenata u šemi (sl.13) može se, primenom Kirhofovih pravila, napisati sledeća jednačina za trenutne vrednosti napona i struja u kolu

$$v_i - R \cdot i - v_C = 0 .$$

Ako se uzme u obzir da je

$$dq = C \cdot dv_C ,$$

odakle je

$$dv_C = \frac{1}{C} \cdot dq = \frac{1}{C} \cdot idt ,$$

odnosno

$$C \cdot dv_C = i \cdot dt ,$$

a kako je iz prve jednačine

$$i = \frac{1}{R} (v_i - v_C) ,$$

dobija se sledeća relacija

$$RC \frac{dv_C}{dt} = v_i - v_C .$$

Ova relacija predstavlja diferencijalnu jednačinu koja se rešava metodom razdvajanja promenljivih. Opšti integral ove jednačine ima oblik

$$v_C = D \cdot e^{-\frac{t}{RC}} + v_i .$$

Veličina D je integraciona konstanta koja se određuje iz početnog uslova. Ovaj uslov je definisan za neprovodno stanje prvog tiratrona, kada je kondenzator C_5 ispraznjen pre-

ko serijske veze otpornika R_{k_i} i otpora integratora R_i ($i = 1, 2, 3$) (v. sl. 11 i sl. 13). Prema tome, je za

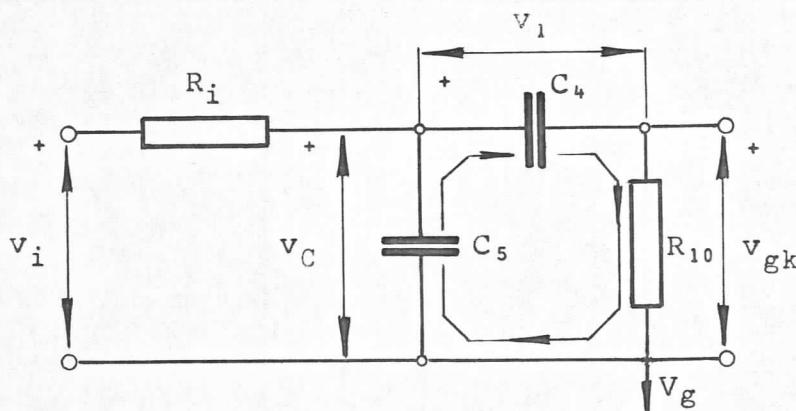
$t = 0$, $v_C = 0$, pa integraciona konstanta ima vrednost

$$D = -V_i .$$

Partikularni integral diferencijalne jednačine ima oblik

$$v_C = V_i \left(1 - e^{-\frac{1}{RC} t} \right) .$$

Uslov za određivanje vremenske konstante integratora, odnosno vremena kašnjenja impulsa, izvodi se iz analize dela koja prikazanog na sl. 14.



Sl. 14.

Na osnovu Kirhofovih pravila za izabranu konturu važi sledeća jednačina ravnoteže

$$v_C - v_1 - v_{gk} = 0 .$$

Iz graničnih uslova se dobija

za $t = 0$ je $v_C = 0$, a $v_{gk} = V_g$, pa je $v_1 = -V_g$,

odnosno

$$v_C + V_g - v_{gk} = 0 .$$

Ovaj granični uslov podrazumeva neprovodno stanje drugog tiratrona. Uslov za provodno stanje definisan je relacijom

$$v_{gk} = V_p .$$

Kako provodno stanje (drugog tiratrona) nastupa po isteku vremena τ (vremena kašnjenja impulsa), drugi granični uslov

ima oblik

$$\text{za } t = \tau \text{ je } v_{gk} = V_p, \text{ pa je } v_C = V_p - V_g.$$

Primenom graničnih uslova na partikularni integral date diferencijalne jednačine dobija se izraz

$$V_p - V_g = V_i \left(1 - e^{-\frac{\tau}{RC}} \right),$$

čije rešenje po konstanti τ_i ima oblik

$$\tau_i = R_i C \ln \frac{V_i}{V_i - V_p + V_g} \quad (i = 1, 2, 3).$$

Numerički podaci za izračunavanje vremenske konstante integratora dati su sledećim vrednostima

$$V_i = 445 \text{ V} ; \quad R_3 = 47 \text{ k}\Omega = 47 \times 10^3 \Omega$$

$$V_p = -3 \text{ V} ; \quad C = 1800 \text{ pF} = 1800 \times 10^{-12} \text{ F}.$$

$$V_g = -62 \text{ V} ;$$

Na osnovu datih podataka, kao i izvedenog obrasca, može se izračunati numerička vrednost vremenske konstante integratora, a zatim ista uporediti sa izmerenim vrednostima putem snimaka sa osciloskopa. Račun je sproveden za najduže vreme kašnjenja impulsa ($i = 3$), kako sledi

$$\begin{aligned} \tau_3 &= R_3 C \ln \frac{V_i}{V_i - V_p + V_g} = 47 \times 10^3 \times 1800 \times 10^{-12} \times \ln \frac{445}{445 + 3 - 62} = \\ &= 47 \times 18 \times 10^{-7} \times 2.302585 \times 0.06177 = 12.03271 \times 10^{-6} \text{ s} \approx 12 \mu\text{s}. \end{aligned}$$

$R_3 = 47 \text{ k}\Omega$ je usvojena standardna vrednost otpornika integratora, koja uz ostale elemente omogućuje izvesno preklapanje opsega vremena kašnjenja impulsa. Kako je, prema zahtevu konstrukcije uredjaja, u važnosti sledeća relacija između maksimalnih vremena kašnjenja impulsa za pojedine položaje preklopnika:

$$\tau_3 = 10 \cdot \tau_2 = 10^2 \cdot \tau_1,$$

u važnosti je i relacija izmedju odgovarajućih vrednosti otpornika integratora, tj.

$$R_3 = 10 \cdot R_2 = 10^2 \cdot R_1,$$

odakle slede vrednosti:

$$R_2 = 4.7 \text{ k}\Omega \quad \text{i} \quad R_1 = 470 \Omega.$$

4.3. MERENJA I OBRADA REZULTATA

Impulsi su posmatrani na osciloskopu TETRONIX 454 A. Impuls sa katode prvog tiratrona doveden je preko tačke Out 1 na osciloskop, kanal 1, a impuls sa katode drugog tiratrona preko tačke Out 2 na kanal 2. Poredjenjem početaka oba impulsa za razne položaje selektora RC grupe, kao i kontinualno promenljivog položaja klizača potencijometra P, obeleženog kružnom logaritamskom podelom, meri se razlika izmedju oba impulsa. Vremensko pomeranje impulsa na kanalu 2, u odnosu na impuls na kanalu 1, dato je za sva tri položaja preklopnika i u zavisnosti od položaja klizača potenciometra u tabeli 4. Ovim je izvršena kalibracija skale logaritamskog potenciometra.

Posebno, sniženjem i povišenjem napona mreže, snimljene su vremenske razlike ova dva impulsa u istom režimu kao pri normalnom naponu mreže, a rezultati merenja dati su u tabelama 5 i 6.

Pozicija	τ [μ s]		
	0.01-0.1	0.1-1	1-10
1	0.18	0.70	2.40
2	0.20	0.80	2.80
3	0.22	0.85	3.40
4	0.24	0.95	4.00
5	0.26	1.20	7.20
6	0.30	1.40	9.60
7	0.32	1.70	12.00
8	0.34	1.95	14.00
9	0.36	2.05	14.60
10	0.36	2.10	14.80

Tabela 4. - Vreme kašnjenja impulsa pri naponu 220 V

Pozicija	τ [μ s]		
	0.01-0.1	0.1-1	1-10
1	0.20	0.80	2.80
2	0.22	0.85	3.40
3	0.24	0.95	3.80
4	0.26	1.05	4.80
5	0.28	1.25	7.40
6	0.32	1.55	9.80
7	0.36	1.80	10.40
8	0.38	2.00	14.40
9	0.33	2.10	14.30
10	0.40	2.20	15.20

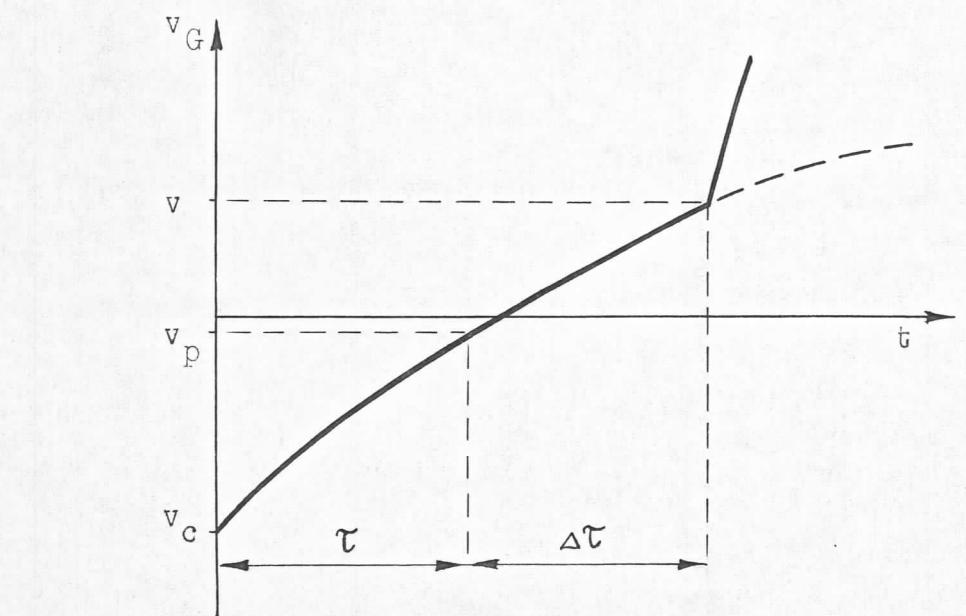
Tabela 5. - Vreme kašnjenja impulsa pri naponu 200 V

Pozicija	τ [μ s]		
	0.01-0.1	0.1-1	1-10
1	0.16	0.60	2.00
2	0.18	0.80	2.60
3	0.20	0.85	3.00
4	0.22	0.90	3.60
5	0.24	1.10	4.40
6	0.26	1.35	7.20
7	0.28	1.70	10.40
8	0.30	1.90	12.60
9	0.30	2.00	14.40
10	0.32	2.05	14.60

Tabela 6. - Vreme kašnjenja impulsa pri naponu 240 V

Iz tabele 4, 5 i 6 vidi se da se vremena kašnjenja impulsa, koja su dobijena pomoću uređaja, ne počlapaju sa njihovim proračunatim vrednostima. Najveća odstupanja pokazuju kratka vremena čija maksimalna vrednost po proračunu treba da bude $0.12 \mu s$, a iznosi $0.36 \mu s$, što znači da je dobijeno vreme tri puta duže od predviđenog. Kod srednjih vremena, gde je dobijeno vreme oko 1.7 puta duže od predviđenog, zapaža se da je odstupanje manje, a sa proračunom se najbolje slažu duga vremena koja su duža od predviđenih za oko 1.2 puta.

Postoje dva uzroka koji objašnjavaju razliku između proračunatog u dobijenog vremena kašnjenja impulsa, tj. objašnjavaju pojavu nepredviđenog dodatnog vremena kašnjenja $\Delta\tau$, a to su: za kratka vremena kašnjenja dodatno kašnjenje uvećava proračunato kašnjenje zato što se proces provodjenja u tiratronu ne uspostavlja trenutno, već je potrebno izvesno vreme da bi se gas jonizovao. Iz tog razloga stvarno provodno stanje počinje na nekom pozitivnom potencijalu rešetke v ($20 - 30 V$), a ne tačno na potencijalu paljenja v_p ($-3 V$). Ovo je prikazano na sl. 15.



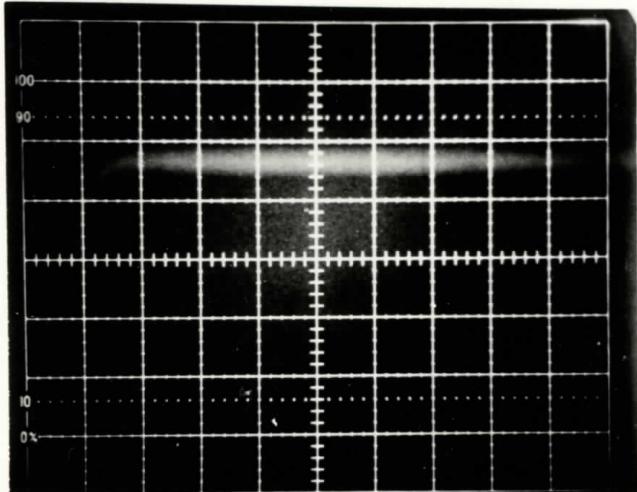
Sl. 15. - Oblik impulsa napona na rešetki

Od trenutka kada napon rešetke počne da raste od v_c (-62 V) pa do trenutka kada on dostigne napon paljenja v_p (-3 V) proteći će proračunato vreme kašnjenja τ . Tada su u tiratronu ostvareni uslovi za paljenje, (vidi karakteristiku paljenja na str. 17), međutim dok se stvarno ne uspostavi provodni režim proteći će još neko dodatno vreme $\Delta\tau$.

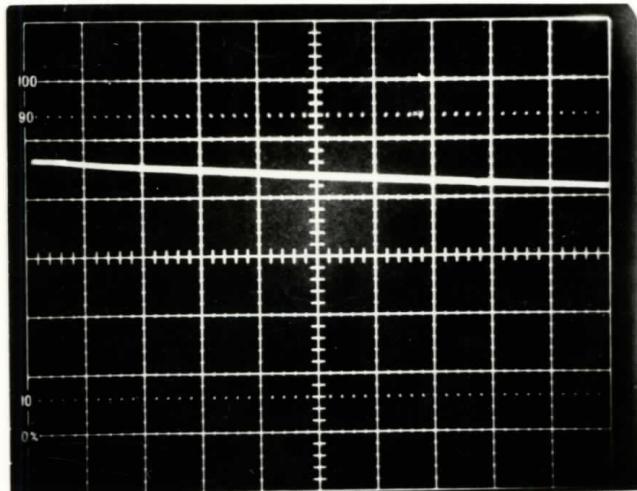
Za duga vremena kašnjenja pored ove pojave dolazi do izražaja i činjenica da vrednost pobudnog signala sa prvog tiratrona nije konstantna, kao što je u proračunu smatrano, već je sporo opadajuća funkcija vremena. Prema tome vrednost impulsa se vremenom smanjuje, što uzrokuje pojavu dodatnog vremena kašnjenja. Ovakvo ponašanje impulsa ilustrovano je na sl. 17.

Na snimcima koji slede vide se oblici impulsa sa katode prvog tiratrona, dovedeni preko izlaza Out 1 na kanal 1 osciloskopa, (sl. 16. i 17.) Snimljeni za dve različite vremenske baze osciloskopa. Sa sl. 16. može se pročitati da je vreme porasta impulsa 0.03 μ s. To je ustvari vreme za koje impuls dostigne 90% svoje amplitude.

Zatim slede po dva snimka, impuls napona rešetke i odgovarajući impuls sa izlaza Out 2, za kratka vremena (sl. 18. i 19.), za srednja vremena (sl. 20. i 21.) i za duga vremena (sl. 22. i 23.). Poslednja dva snimka (sl. 24. i 25.) predstavljaju impulse napona rešetke za isti opseg, ali za različite položaje potenciometra.

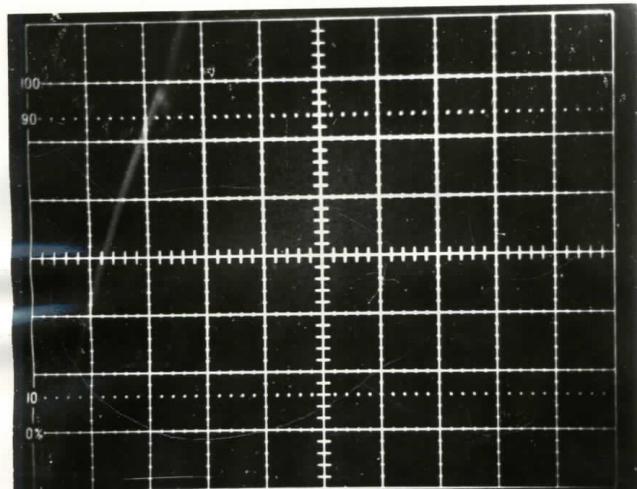


Sl. 16.
Out 1, 4 impulsa
vrem. baza 0.1 μ s/cm
osetljivost 20 V/cm
nula napona na -3 cm



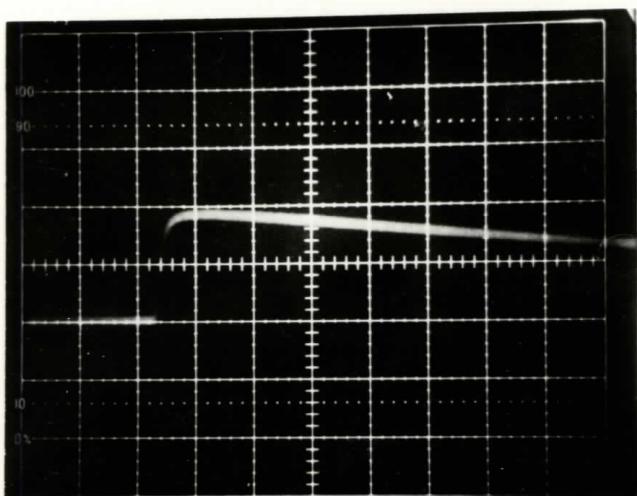
Sl. 17.

Out 1, 4 impulsa
vrem. baza $2 \mu\text{s}/\text{cm}$
osetljivost 20 V/cm
nula napona na -3 cm



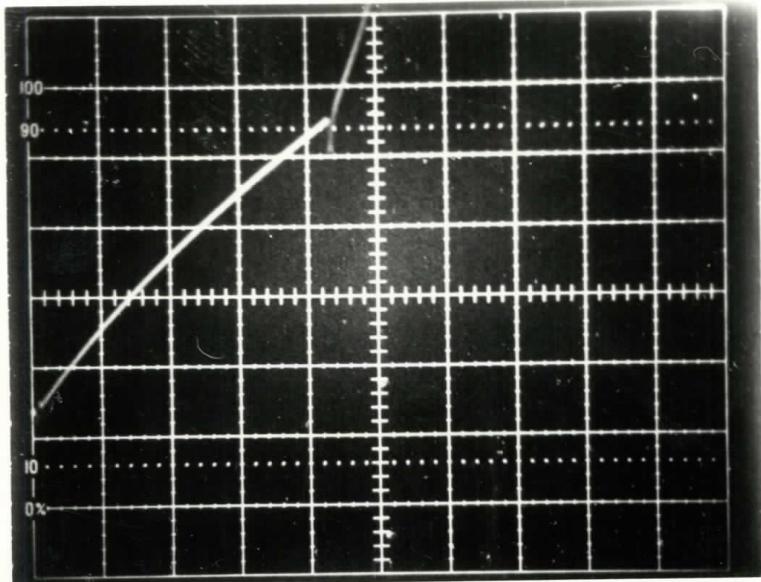
Sl. 18.

v_G , 3 impulsa
vrem. baza $0.2 \mu\text{s}/\text{cm}$
osetljivost 20 V/cm
nula napona na -1 cm
opseg 0.01-0.1 μs
pozicija 10



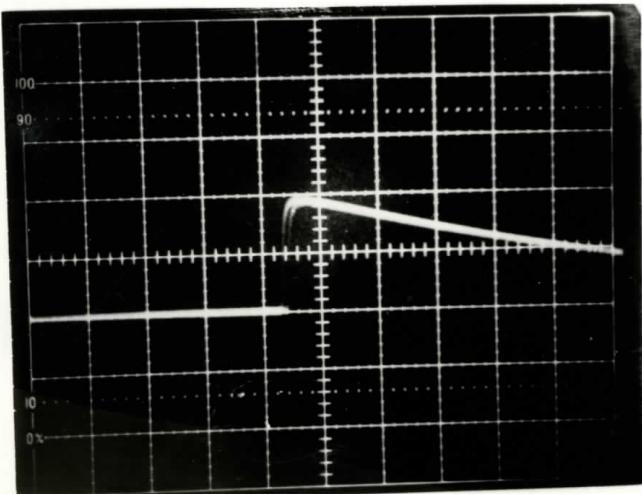
Sl. 19.

Out 2, 3 impulsa
vrem. baza $0.2 \mu\text{s}/\text{cm}$
osetljivost 20 V/cm
nula napona na -1 cm
opseg 0.01-0.1 μs
pozicija 10



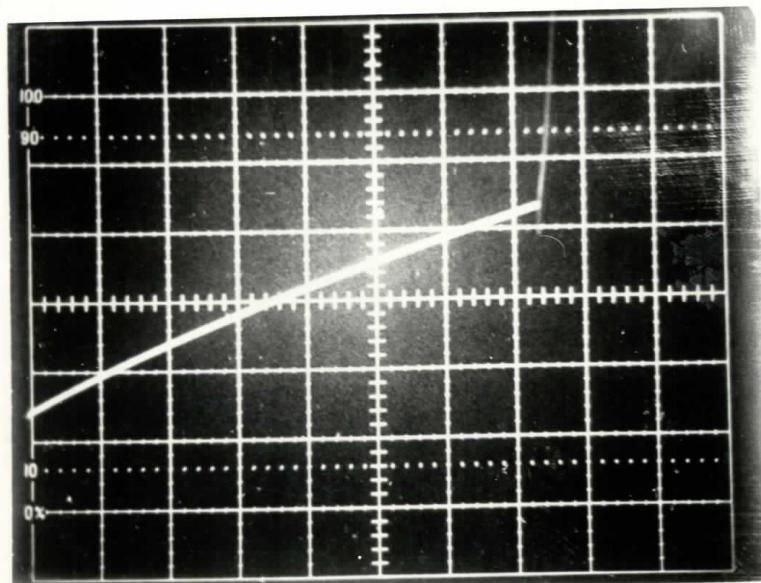
Sl. 20.

v_G , 3 impulsa
vrem. baza $0.5 \mu\text{s}/\text{cm}$
osetljivost $20 \text{ V}/\text{cm}$
nula napona na $+1 \text{ cm}$
opseg $0.1-1 \mu\text{s}$
pozicija 10



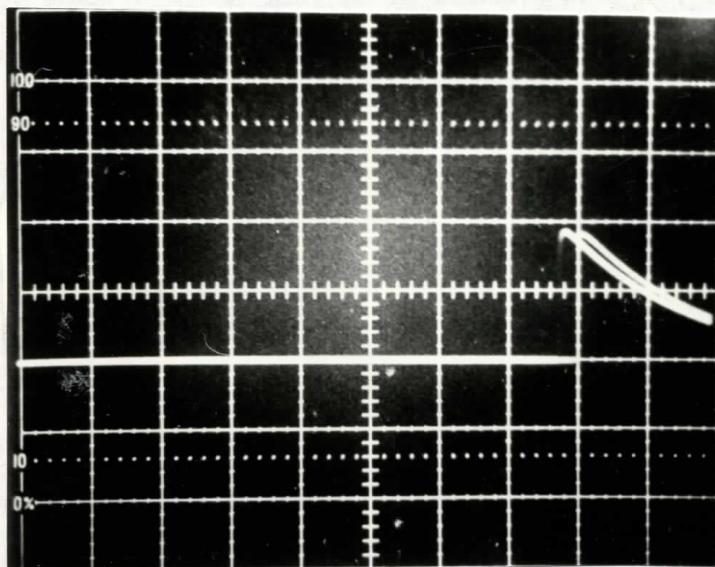
Sl. 21.

Out 2, 3 impulsa
vrem. baza $0.5 \mu\text{s}/\text{cm}$
osetljivost $20 \text{ V}/\text{cm}$
nula napona na -1 cm
opseg $0.1-1 \mu\text{s}$
pozicija 10



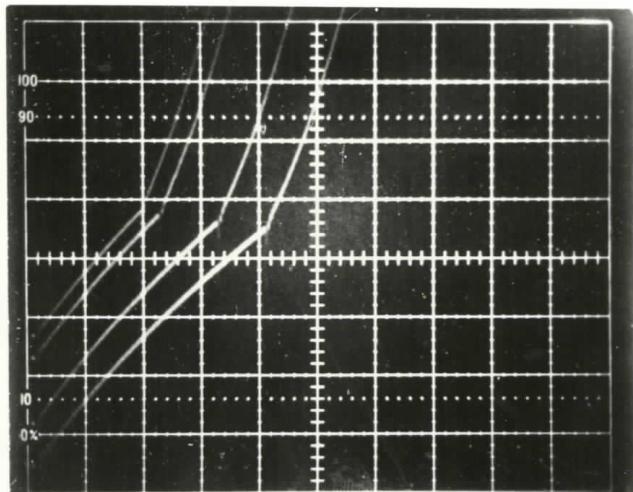
Sl. 22.

v_G , 3 impulsa
vrem. baza $2 \mu\text{s}/\text{cm}$
osetljivost $20 \text{ V}/\text{cm}$
nula napona na $+1\text{cm}$
opseg $1-10 \mu\text{s}$
pozicija 10



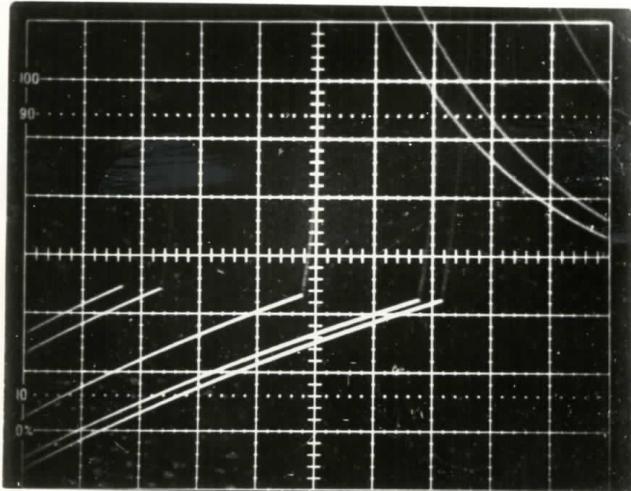
Sl. 23.

Out 2, 3 impulsa
vrem. baza $2 \mu\text{s}/\text{cm}$
osetljivost $20 \text{ V}/\text{cm}$
nula napona na -1 cm
opseg $1-10 \mu\text{s}$
pozicija 10



Sl. 24.

v_G , 4 impulsa
vrem. baza $0.5 \mu\text{s}/\text{cm}$
osetljivost $20 \text{ V}/\text{cm}$
nula napona na -1 cm
opseg $0.1-1 \mu\text{s}$
pozicija 2,4,6,8



Sl. 25.

v_G , 5 impulsa
vrem. baza $2 \mu\text{s}/\text{cm}$
osetljivost $20 \text{ V}/\text{cm}$
nula napona na -1 cm
opseg $1-10 \mu\text{s}$
pozicija 2,4,6,8,10

Z A K L J U Č A K

Uredjaj realizovan u ovom radu pokazao je dobro slaganje izmedju računatih i izmerenih vrednosti za vreme kašnjenja impulsa, ako se u interpretaciji rezultata uzmu u obzir svi faktori koji utiču na takozvano dodatno vreme kašnjenja impulsa.

Ovaj će uredjaj biti korišćen sa baterijom brzih kondenzatora za generisanje odgovarajućih impulsa potrebnih pri ispitivanju nekih pojava u plazmi u laboratoriji za fiziku i spektroskopiju plazme.



L I T E R A T U R A

1. Cobine J. D., Gaseous Conductors, Dover Publications, Inc., New York, 1958.
2. English Electric Valve Company Limited, Hydrogen Thyratrons, Chelmsford, Essex, England, 1964.
3. Физический энциклопедический словарь, том пятый, Издательство "Советская энциклопедия", Москва, 1966.
4. Капцов Х. А., Электрические явления в газах и вакууме, Государственное издательство технико-теоретической литературы, Москва, 1950.
5. Олфрей Г. Ф., Физическая электроника, перевод с английского, Издательство "Мир", Москва, 1966.
6. Philips Data Handbook, Electron Tubes, Part 7., July 1969.
7. Raković B. D., Elektronika I, Naučna knjiga, Beograd 1963.
8. Romanowitz H.A., R.E Pucket, Introduction to Electronics, John Wiley & Sons, New York 1968.
9. Seymour J., Physical Electronics, Pitman Publishing, London, 1972.



P R I L O G

Popis elemenata ugradjenih u kolo generatora
impulsa sa tiratronom

a. Cevi

1. Tiratron 2D21
2. Tiratron 2D21

b. Poluprovodnički elementi

1. Dioda 1N4002 (100 V/1 A)
2. Dioda 1N4006 (800 V/1 A)

c. Otpornici

1. R_1 - 470 Ω 1/4 W
2. R_2 - 4.7 k Ω 1/4 W
3. R_3 - 47 k Ω 1/4 W
4. R_4 - 1 k Ω 1/4 W
5. R_5 - 1 M Ω 1/2 W
6. R_6 - 1 M Ω 1/2 W
7. R_7 - 1 k Ω 1/4 W
8. R_8 - 1 k Ω 1/4 W
9. R_9 - 1 k Ω 1/4 W
10. R_{10} - 1 M Ω 1/2 W
11. R_{11} - 15 k Ω 1/2 W
12. R_{12} - 3.6 k Ω 1/2 W
13. R_{a1} - 1 M Ω 2 W
14. R_{a2} - 1 M Ω 2 W
15. R_{k1} - 820 Ω 2 W
16. R_{k2} - 50 Ω 1/2 W
17. P - 50 k Ω 1/2 W

d. Kondenzatori

1. C_1 - 10 nF 500 V
2. C_2 - 0.3 μ F 630 V
3. C_3 - 0.22 μ F 250 V
4. C_4 - 2 nF 500 V
5. C_5 - 1.8 nF 500 V
6. C_6 - 0.1 μ F 1000 V
7. C_7 - 0.1 μ F 630 V
8. C_8 - 8 μ F 350 V

e. Ostali elementi

1. Transformator
2. Prekidač
3. Tinjalica
4. Osigurač
5. Priključnice (BNC) 3 kom.
6. Mrežni kabel sa utikačem
7. Ostali metalni delovi

