



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI
FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



Iniciranje visokonaponskog pražnjenja kroz elektromagnetnu udarnu T-cev

- Master rad -

Mentor: dr Igor Savić

Kandidat: Šandor Hegediš

Novi Sad, 2014

Ovaj rad je rađen u Laboratoriji za fizičku elektroniku (LFE) na Departmanu za fiziku Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu, pod rukovodstvom dr Igora Savića. Posebno bih se zahvalio i prof. dr Stevici Đuroviću.

SADRŽAJ

SADRŽAJ	3
UVOD.....	4
1. EKSPERIMENTALNI UREĐAJ.....	5
1.1 Glavni sastavni delovi eksperimentalnog uređaja	5
1.2 Električni sistem	6
1.3 Kolo za iniciranje pažnjenja u T-cevi	7
2. PREKIDAČI	13
3. IGNITRON	15
3.1 Konstrukcija.....	15
3.2 Princip rada ignitrona.....	15
3.3 Ignitron u kolu kondenzatorskog pražnjenja	18
3.4 Karakteristike ignitrona.....	19
3.5 Zahevi ignitronskog kola	19
4. TIRATRON.....	22
4.1 Konstrukcija tiratrona	22
4.2 Princip rada	23
5. SPARK GAP	26
5.1 Napon pražnjenja	26
5.2 Vreme zatvaranja prekidača	27
5.3 Vreme komutacije i vreme opravka prekidača	27
5.4 Princip rada	27
5.5 Spark gap sa pomoćnom elektrodom	29
5.6 Erozija u spark gapu	30
5.7 Spark gap prekidač u eksperimentalnom uređaju	32
5.8 Karakteristike fizičkih osobina materijala	37
ZAKLJUČAK	38
LITERATURA.....	39
BIOGRAFIJA	40

UVOD

Za spektroskopsku analizu jonizovanih gasova koriste se različiti plazmeni izvori koji se baziraju na impulsnom i lučnom pražnjenju. Jedan od takvih izvora plazme, koji je ujedno i eksperimentalni uređaj opisan u ovom radu, jeste elektromagnetna udarna T-cev. Elektromagnetna udarna T-cev je impulsni izvor pražnjenja koji se odlikuje radijalnom homogenošću i dobrom reproducibilnošću, ali i mogućnošću proizvodnje plazme dovoljno visoke temperature i elektronske koncentracije koje su potrebne za ispitivanje spektralnih linija jonizovanih gasova. Pri izvođenju eksperimenata vezanih za spektroskopiju plazme treba obezbediti odgovarajuću stabilnost kod izvora pražnjenja, odnosno reproducibilnost u slučaju impulsnih pražnjenja. U tom cilju treba imati složen električni sistem koji to obezbeđuje kao i kontrolu tog sistema.

Postojeći uređaj za pražnjenje kroz T-cev sadrži električni sistem, velike kondenzatorske baterije kao izvor visokog napona, sistem za iniciranje pražnjenja, sistem za okidnje pražnjenja, T-cev i elektronsku kontrolnu jedinicu za kontrolu celog sklopa uređaja. Kontrolna jedinica vrši upravljanje podjedinicama, zatim kontrolu procesa i komunikaciju sa računarom. Detaljan opis podjedinica se nalazi u prvom poglavlju ovog rada.

Iznos energije koji se predaje gasu mora biti pouzdan i reproducibilan, a ostvaruje se pomoću kondenzatorske baterije eksperimentalnog uređaja. Pošto se u ovakvim izvorima prekidaju veoma velike struje, ovi zahtevi mogu se ostvariti samo upotrebom specijalnih prekidača, kao što su ignitron, tiratron ili spark gap koji mogu izdržati te struje, a pri tom su i dovoljno brzi.

Uopšteno o prekidačima će biti reč u drugom poglavlju.

U eksperimentalnom uređaju su bili korišćeni razni visokonaponski, jakostrujni prekidači. Cilj ovog rada da se opišu ovi prekidači, tj. principi rada, njihove karakteristike i nedostatci. Ignitron i tiratron su bili ranije korišćeni prekidači i njihovi opisi se nalaze u trećem i u četvrtom poglavlju.

Aktuelan visokonaponski i jakostrujni prekidač je spark gap. U eksperimentalnom uređaju je bilo nekoliko konfiguracija ovog prekidača u primeni, koji su detaljno opisani u petom poglavlju ovog rada.

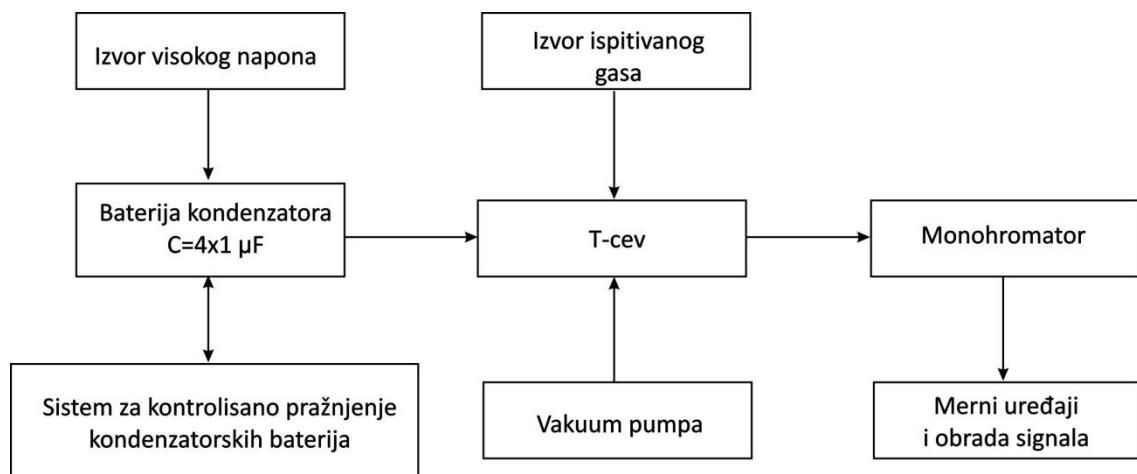
1. EKSPERIMENTALNI UREĐAJ

1.1 Glavni sastavni delovi eksperimentalnog uređaja

U ovom radu je korišćen eksperimentalni uređaj za dobijanje plazme u T-cevi elektromagnenim udarnim talasom. Ceo sistem je napravljen na Katedri za fizičku elektroniku na Prirodno-matematičkom fakultetu u Novom Sadu. Kompletan uređaj za dobijanje i ispitivanje plazme u T-cevi se sastoji od tri glavna dela, a to su:

- električni sistem
- gasni sistem
- merni uređaj

Šematski prikaz celog uređaja je prikazan na slici 1.1.



Električni sistem

Gasni sistem

Merni sistem

Slika 1.1
Blok šema eksperimentalnog uređaja

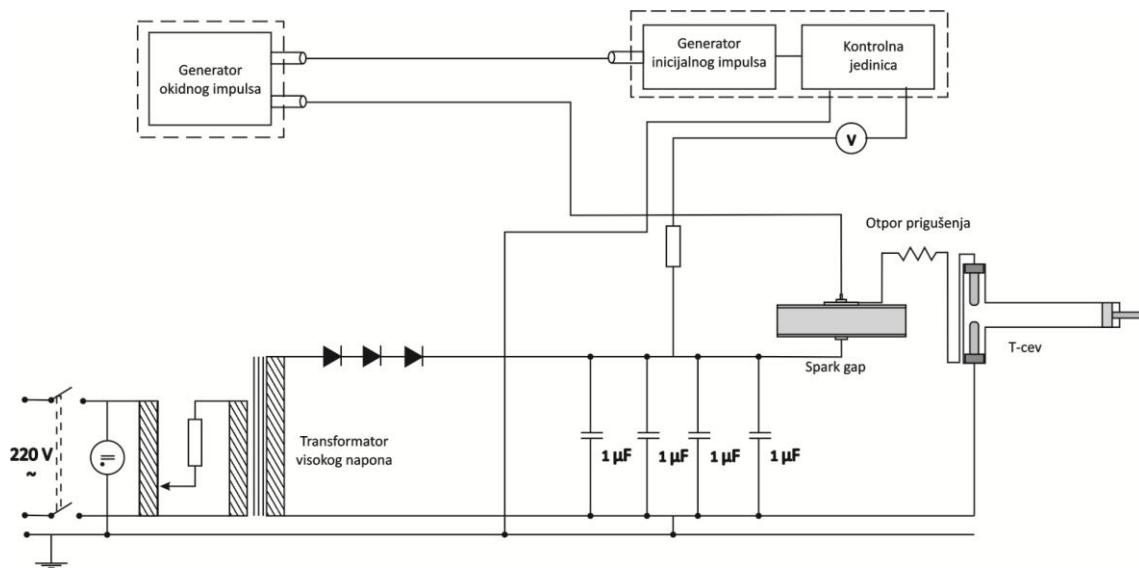
- Električni sistem – kolo koje se sastoji od napajanja uređaja visokim naponom, sistema kondenzatora i posebnog sistema preko kojeg se kontroliše pražnjenje.
- Gasni sistem – deo uređaja koji služi za dobijanje vakuma u T-cevi i kontrolisanje pritiska radnog gasa pri pražnjenu.
- Merni sistem – svetlost plazme koja je dobijena elektromagnenim udarnim talasom u T-cevi se analizira preko monohromatora, ICCD kamere i računara.

U radu će biti detaljnije razmotren električni sistem, sastavni delovi i princip rada celog sistema. Gasni i merni sistem je opisan u radu [1].

1.2 Električni sistem

Da bi došlo do bezbednog i kontrolisanog pražnjenja u cevi potreban je dosta složen električni sistem. Pod ovim se podrazumeva jedno kompleksno strujno kolo čija je šema prikazan na slici 1.2. Električni sistem se može podeliti na tri glavna sastojna dela [2,3], a to su:

- Kolo za napajanje sistema električnom energijom
- Četri kondenzatora, koji imaju ulogu akumulatora i jedan visokonaponski prekidač (može biti ignitron, tiratron ili spark gap)
- Kontrolna jedinica i jedinica za iniciranje pražnjenja



Slika 1.2
Eksperimentalni uređaj sa spak gap prekidačem

Kolo za napajanje električnom energijom čini visokonaponski izvor sa jedinicom za regulisanje napona. Visokonaponski izvor treba da osigura punjenje kondenzatora do napona na kojem će se vršiti pražnjenje. Kondenzatori se pune pomoću visokonaponskog transformatora (slika 1.2) pri čemu otpornik u primaru transformatora služi za ograničenje struje punjenja. Radi bržeg punjenja kondenzatora, vrednost ovog otpornika menja se pomoću kontrolne jedinice na unapred zadatom naponu. Sekundar transformatora vezan je za ispravljački deo strujnog kola koji se sastoji od tri visokonaponske diode. Regulisanje napona koji stiže do kondenzatora vrši se pomoću autotransformatora.

Bateriju akumulatora čine četiri velika kondenzatora svaki od po $1 \mu\text{F}$, gde su kondenzatori vezani paralelno i mogu da imaju masimalni radni napon od 75 kV. Ovako dobijena energetska jedinica može da akumulira energiju od 11200 J (pri 75 kV). Ovo je realizovano tako što je otpor izabran tako da RLC kolo bude kritično prigušeno

$(R = 2\sqrt{\frac{L}{C}})$ [4]. Time je osigurano da se energija kondenzatora isprazni u prvoj poluperiodi, jer se tako sprečavaju inverzne struje, odnosno pojava inverznih napona koji skraćuju vreme života kondenzatora. Za pražnjenje kondenzatora se koristi jakostrujni prekidač i otpornik od 0.33Ω . Otpornik služi za prigušenje amortizovanih oscilacija struje pražnjenja, tako da posle prigušenja ostaje praktično samo prva poluperioda. Kao jakostrujni prekidač se može koristiti ignitron, tiratron ili spark gap. Ovi prekidači će biti detaljnije opisani u ovom radu.

1.3 Kolo za iniciranje pažnjenja u T-cevi

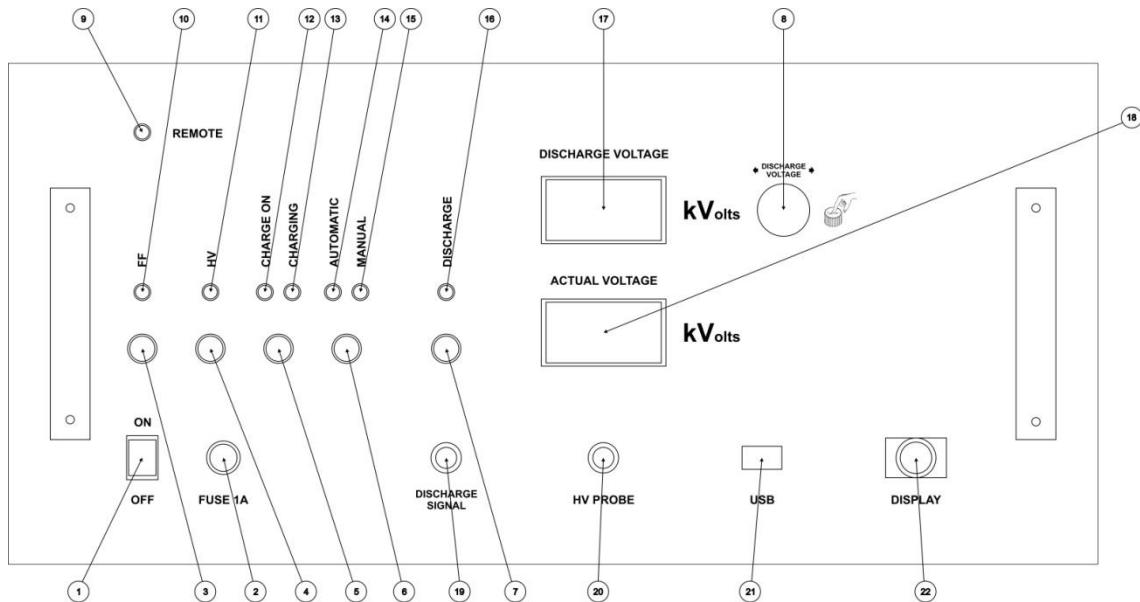
Šematski prikaz strujnog kola za iniciranje pražnjenja u T-cevi je prikazan na slici 1.2 zakruženo isprekidanim linijom. Glavni delovi ovog dela električnog sistema su kontrolna i merna jedinica visokog napona, generator inicijalnog impulsa od 400 V i generator okidnog impulsa koji je povezan sa izvorom visokog napona.

Funkcija ovog dela električnog sistema je da obezbedi reproducibilno pražnjenje kondenzatora pri unapred zadatim vrednostima napona. Obezbeđivanje željenih uslova pri svakom merenju ga čini jako važnim delom celog uređaja. Napon na kondenzatorskoj bateriji se meri pomoću visokonaponske sonde koja je povezana sa voltmetrom i kontrolnom jedinicom.

1.3.1 Kontrolna jedinica

Kontrolna jedinica služi za praćenje i kontrolisanje pražnjenja, kao i da se merenja odvijaju preciznije i na bezbedan način. Ova jedinica kontroliše rad jedinice za generisanje inicijalnog impulsa (400 V), visokonaponski generator za okidanje pražnjenja i visokonaponski transformator koji vrši punjenje kondenzatora. Pored kontrole podjedinica ova kontrolna jedinica služi još i za praćenje napona na kondenzatorima, za prekidanje punjenja kondenzatora pri unapred zadatom naponu, pražnjenje kondenzatora, kao i za komunikaciju sa računaram radi daljinske kontrole procesa. To zači da je moguće i manuelno upravljanje ovim sistemom i putem računara. Ceo sistem ove kontrolne jedinice je detaljno opisano u radu [2]. Kontrolna jedinica ima dva displeja. Jedan displej pokazuje trenutnu vrednost napona na kondenzatorima, a drugi displej pokazuje vrednost napona na kojem će doći do pražnjenja.

Šematski prikaz kontrolne table sa indikatorima i kontrolama je prikazan na slici 1.3.



Slika 1.3
Kontrolna jedinica

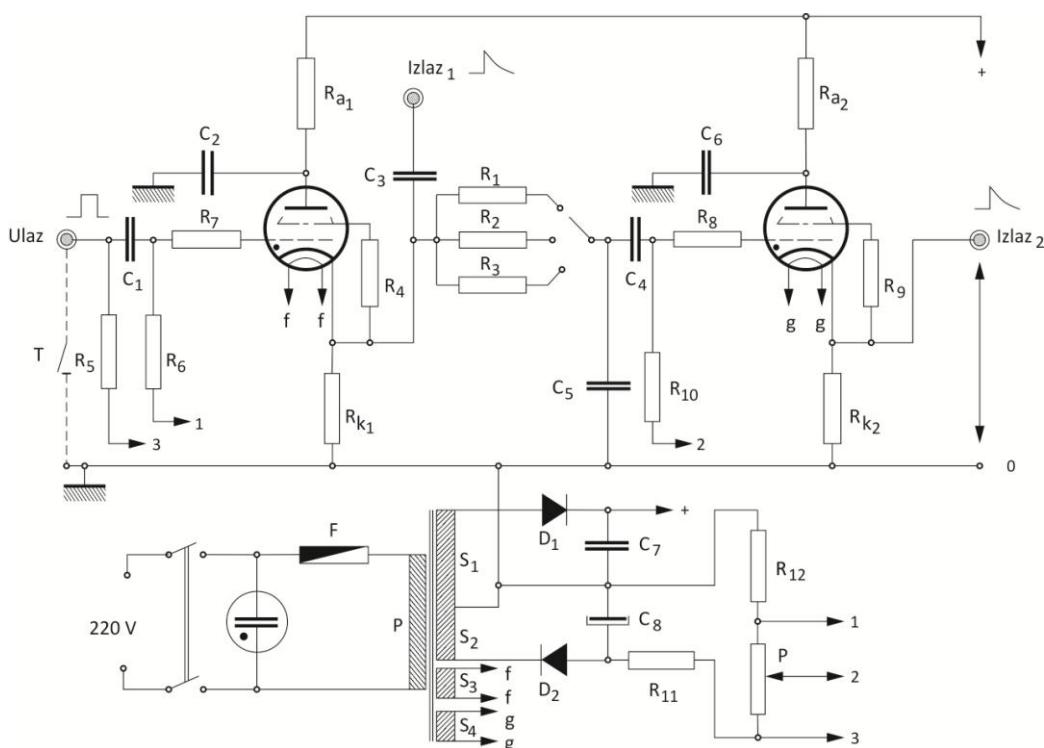
1. Prekidač za uključivanje/isključivanje uređaja.
2. Osigurač 1 A.
3. Taster za uključivanje/isključivanje grejanja velikog tiratrona (ZELENO).
4. Taster za uključivanje/isključivanje visokog napona za okidanje velikog tiratrona (ZELENO).
5. Taster za uključivanje/isključivanje visokog napona za punjenje kondenzatora, taster za isključivanje alarme greške kao i za resetovanje istog (CRVENO).
6. Taster za biranje manuelnog ili automatskog režima (ZELENO).
7. Taster za pražnjenje kondenzatora (ŽUTO).
8. Dugme za podešavanje napona okidanja.
9. Indikator stanja povezanosti sa računarom (PLAVO).
10. Indikator stanja grejanja velikog tiratrona (ZELENO).
11. Indikator stanja visokog napona na velikom tiratronu (ZELENO).
12. Indikator stanja tastera za punjenje kondenzatora (ZELENO).
13. Indikator stanja punjenja banke (CRVENO).
14. Indikator automatskog režima (ZELENO).
15. Indikator manuelnog režima (ZELENO).
16. Indikator pražnjenja (ŽUTO).
17. Displej za prikazivanje napona okidanja.
18. Displej za prikazivanje trenutnog napona na kondenzatorima.
19. BNC priključak signala za okidanje malog tiratrona.
20. BNC priključak sonde visokog napona.
21. PC priključak.
22. Priključak spoljašnjeg displeja za prikazivanje trenutnog napona na baci.

1.3.2 Generator inicijalnog impulsa

Signal sa kontrolne jedinice vodi se na generator inicijalnog impulsa čija je uloga, da u momentu dostizanja unapred odabranog napona baterije, generiše električni impuls izvršne vrednosti od 400 V sa veoma kratkim vremenom porasta (reda 10 ns). Ovo kolo funkcioniše na sledeći način [5].

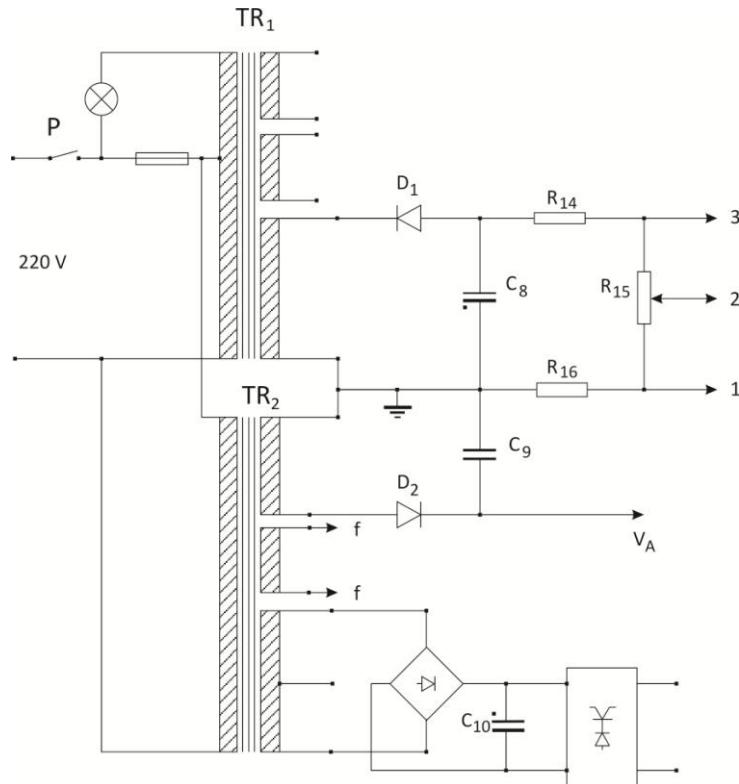
Na ovom generatoru impulsa postoji relj i taster, u zavisnosti da li se koristi preko kontrolne jedinice ili ručno iniciranje pražnjenja, koji kada je otvoren, čini prvi tiratron neprovodnim (slika 1.4). Fiksni negativni potencijal formiran na razdelniku napona dovodi se na upravljačku rešetku prvog tiratrona. Ona je zbog toga na negativnom potencijalu što odgovara neprovodnom režimu tiratrona. Zatvaranjem tastera ili prebacivanjem releja, potencijal opada na nulu. Ovo je ekvivalentno dovodenju pozitivnog impulsa istog napona na upravljačku rešetku. Ovaj impuls, koji se prenosi, dovodi prvi tiratron u provodno stanje. To znači da se na upravljačkoj rešetki javlja pozitivan impuls. Kako je tiratron gasna cev sa veoma kratkim vremenom porasta potencijala, dobijeni pozitivni impuls se vodi ka izlazu tiratrona. Vreme ovog porasta je reda veličine nekoliko nano sekundi (do 10 ns), što potpuno ispunjava zahteve ovog uređaja.

Zbog ove karakteristike tiratrona, oni se često koriste za trigerovanje elektronskih sklopova ili nekih mernih uređaja. Postoji i mogućnost kontrolisanog kašnjenja inicijalnog impulsa. Da bi se ostvarilo kašnjenje, impuls treba da se vodi na integrator, a to je sklop otpornika i kondenzatora. Kašnjenje zavisi od vremenske konstante integratora. Ovaj signal se vodi na drugi tiratron, a signal sa drugog tiratrona vodi dalje na generator okidnog impulsa. Ceo opisani sistem čini generator inicijalnog impulsa. Šema ovog sistema je prikazana na slici 1.4. [3]



Slika 1.4
Električni sistem generatora inicijalnog impulsa

Napajanje generatora inicijalnog impulsa vrši se pomoću dva transformatora (TR_1 i TR_2 na slici 1.5). Sa transformatora TR_1 se uzima naizmeničan napon koja se pretvara u negativan jednosmeran napon pomoću diode i kondenzatora. U kolu generatora inicijalnog impulsa otpornici obezbeđuju negativne vrednosti potencijala upravljačke rešetke tiratrona. Sa transformatora TR_2 se pretvara napon na jednosmerni, takođe pomoću jedne diode i kondenzatora, koji predstavlja napon na anodi tiratrona. Napon na katodi tiratrona se dobija sa drugog sekundara istog transformatora, koji će da greje katodu.

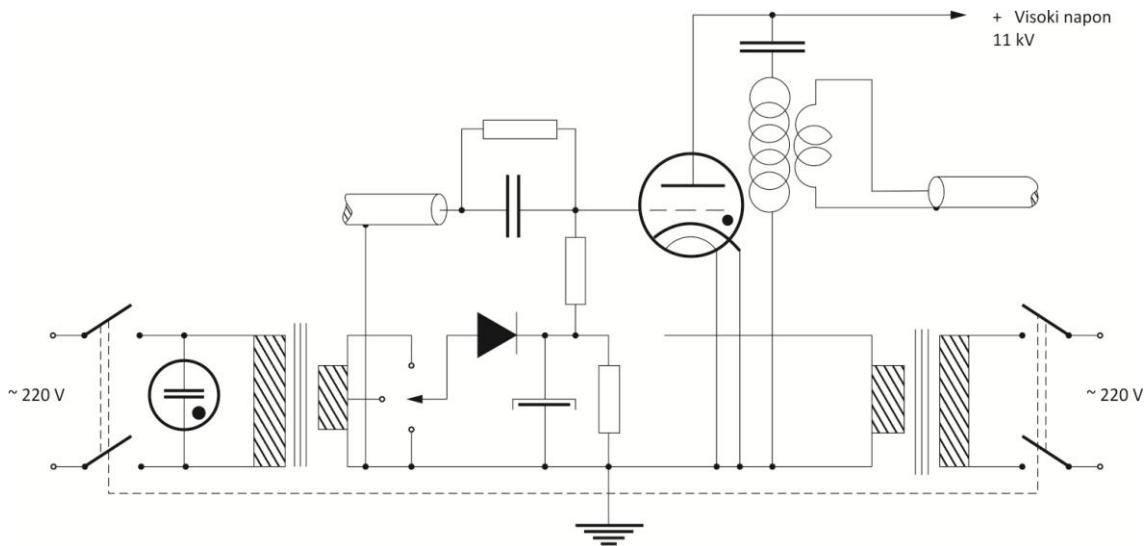


Slika 1.5
Napajanje generatora inicijalnog impulsa

1.3.3 Generator okidnog impulsa

Signal koji se dobije na izlazu generatora inicijalnog impulsa vodi se na generator okidnog impulsa. Generator okidnog impulsa je takođe jedan sklop elektronskih elemenata čija će funkcija biti ovde opisana.

Zadatak ovog sklopa je da obezbedi visoko naponski signal na izlazu, sa istom brzinom porasta signala kao u prethodno opisanom sklopu. Napon na izlazu treba da iznosi od 5 kV do oko 11 kV, a pri tome da signal za okidanje bude pouzdan kako bi došlo do pražnjenja kondenzatorske baterije. Može se reći da je ovaj deo uređaja svojevrsno kolo za pojačavanje i oblikovanje inicijalnog impulsa koji generiše generator inicijalnog impulsa. Šema ovog dela kola je prikazana na slici 1.6. [3]



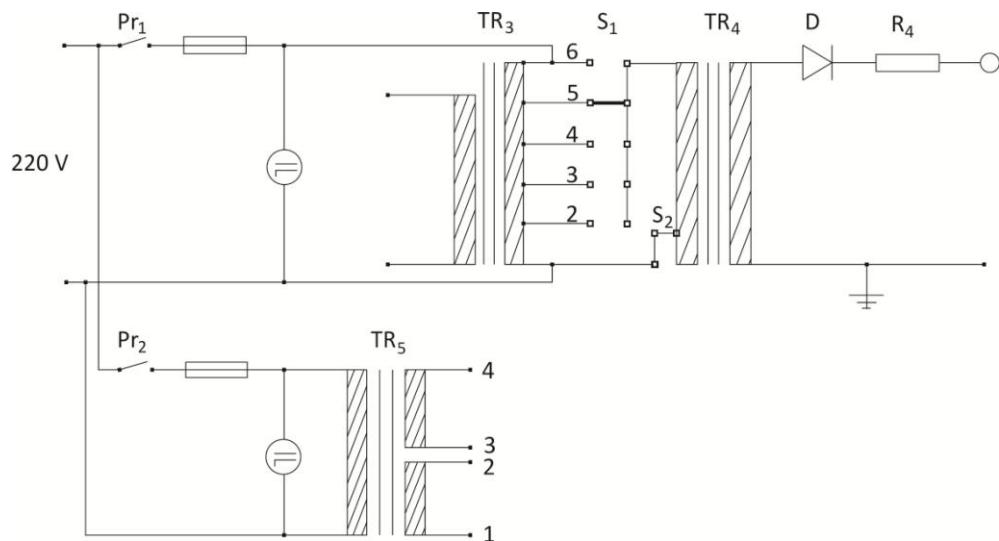
Slika 1.6
Električni sistem genetarora okidnog impulsa

Negativan prednapon koji se dobija iz jednog ispravljača, dovodi se na rešetku jednog snažnog tiratrona, koji je neprovodan u slučaju kada na ulazu nema nikakav signal. Tiratron postaje provodan kada na rešetku sa jednog kondenzatora trenutno dovodi pozitivan impuls sa kratkim vremenskim porastom. U kolu tiratrona je vezano i jedano LC kolo čija je uloga povećavanje širine signala. U zavisnosti parametra ovog kola trajanje izlaznog signala u odnosu na ulazni produžava se za određen faktor, pošto talas napona u kolu prostire konačnom brzinom. Ovo produženje trajanja signala onemogućava eventualni promašaj visokonaponskog i jakostrujnog prekidača. Kako je već rečeno, pri dovođenju pozitivnog napona na rešetku tiratron postaje provodan i kondenzatori LC kola počinju da se prazne kroz primar impulsnog transformatora. Ovi kondenzatori se u potpunosti isprazne za neko vreme koje u stvari predstavlja širinu izlaznog impulsa. Ovako dobijen impuls u primaru indukuje odgovarajući impuls u sekundaru transformatora koji se dalje vodi na visokonaponski prekidač. Ovo je urađeno kako bi kraj kondenzatorske baterije, koji se nalazi na veoma visokom naponu, bio galvanski odvojen od preostalog dela kola i time čini ceo uređaj bezbednijim.

Impulsni transformator je napravljen od torusnog jezgra sa čvrsto spregnutim i dobro izolovanim namotajima. Primar i sekundar su načinjeni od visoko naponskog koaksijalnog kabla sa koga je skinut oklop. Sekundar je dodatno izolovan teflonom. Na jezgro transformatora je namotan primar od 11 namotaja, a preko njega sekundar u odnosu 1:1. Zbog velikih struja koje se indukuju u transformatoru, prednja i zadnja strana transformatora su izolovane i učvršćene pločama od plastike. Linija za kašnjenje je sa tiratrom smeštena u aluminiski oklop, unutar koga je na ploču od mesinga učvršćeno 10 kondenzatora. Iznad njih je na cev od plastike namotano 5 kalemova od bakarne žice navedene induktivnosti.

Pomoću dva transformatora TR_3 i TR_4 se dobija anodni napon tiratrona. Napon iz mreže se dovodi na autotransformator TR_3 sa koga se napaja primar visokonaponskog transformatora TR_4 . Šematski prikaz ovog dela kola se vidi na slici 1.7. Jedna visokonaponska dioda obezbeđuje ispravljanje naizmeničnog napona koji se posle vodi na anodu tiratrona. Na visokonaponskom transformatoru TR_4 napon može

da se menja jednim kratkospojnikom od 100 V do 220 V. Zahvaljujući ovom na izlazu ispravljača dobijaju se jednosmerni naponi od 5 kV do 10,5 kV prema tabeli 1.1.



Slika 1.7
Napajanje okidnog impulsa

Položaj kratkospojnika	Napon na primaru [V]	Visoki napon na izlazu [kV]
2	100	5
3	118	5.5
4	140	6.5
5	205	9.5
6	224	10.5

Tabela 1.1

Ovi dobijeni naponi omogućavaju upotrebu ovog sklopa za napajanje jedinice za okidanje varničnika ili ignitrona. Treći transformator TR₅ u ovom sklopu obezbeđuje napon od 10 V za prednapon rešetke tiratrona i služi za grejanje tiratrona.

Ceo sklop za iniciranje pražnjenja je stavljen u odgovarajuće kućište i zaštićen je od smetnji koje nastaju jakostrujnim pražnjenjem u tiratronu, varničniku i T-cevi. Ovo mora da se uradi da ne bi došlo do smetnje rada pojedinih elemenata u sklopu, do oštećenja istog ili do pogrešnih rezultata pri merenju. [5]

2. PREKIDAČI

U ovom radu su razmotreni jakostrujni i visokonaponski prekidači kao što su ignitron, tiratron i spark gap. Pošto prekidači imaju jako važnu ulogu u ovim strujnim kolima, na ovom mestu će biti napisano nekoliko rečenica o prekidačima.

Prekidači predstavljaju uređaje koje određuju kontrolisan tok struje kroz određeno kolo, tj. da li će da teče struja kroz kolo jačinom određenom ostalim delovima kola ili ne. Prekidači su elementarni deo strujnog kola ili nekog uređaja i koriste se u elektronici i elektrotehnici uopšte. U idealnom slučaju po definiciji prekidači uspostavljaju ili prekidaju tok struje. Međutim u realnim slučajevima uspostavljanje i prekidanje zavisi od karakteristike prekidača i imaju određenu brzinu kojom će prelaziti u provodno ili neprovodno stanje. Takođe svaki prekidač ima maksimalnu struju i maksimalan napon pod kojim može da radi bez oštećenja [6].

Standardni prekidači koje se koriste u svakodnevnom životu su daleko od idealnih prekidača i imaju veliko vreme odziva, tj. vreme dok postaju provodni, reda veličine milisekunde. Druga velika mana im je mala maksimalna struja i napon koji mogu bezbedno da prekidaju. Iste nedostatke imaju i elektromagneti releji. Kod električnih kola sa velikim potrošačem koji koriste velike struje su jako važne ove karakteristike prekidača. Pojavom poluprovodničkih elemenata kao što su tranzistori i tiristori delimično je rešena tromost prekidača. Poluprovodnički elementi se međutim mogu koristiti samo pri relativno niskim naponima i strujama, reda nekoliko kilovolti i kiloampera.

Eksperimentalni uređaj koji je opisan u ovom radu koristi napon do 25 kV i struju do 100 kA. U slučaju kada se koriste visoki naponi i jake struje moraju se koristiti posebni uređaji kao što su ignitroni, tiratroni i spark gap prekudači. Ovi uređaji za uspostavljanje struje koriste varnice ili luk koji nastaje kao pražnjenje kroz gas između elektroda, tj. između katode i anode. Za uspostavljanje takve veze potrebni su nosioci nanelektrisanja. Tu funkciju obavljaju pozitivni joni koji idu ka katodi i elektroni koji idu ka anodi. Ceo proces od neprvodnog do provodnog stanja je detaljnije opisan kod svakog prekidača posebno.

Za dobijanje primarnih elektrona kod ovih prekidača neki koriste tanke grejne niti koje se nalaze na katodi i zovu se prekidači sa topлом katodom. Ovi elektroni nastaju termoelektronskom emisijom. Drugi način dobijanja elektrona je korišćenje gradjenta napona čija je posledica izbacivanje elektrona sa površine katode. Takvi prekidači se zovu cevi sa hladnim katodom.

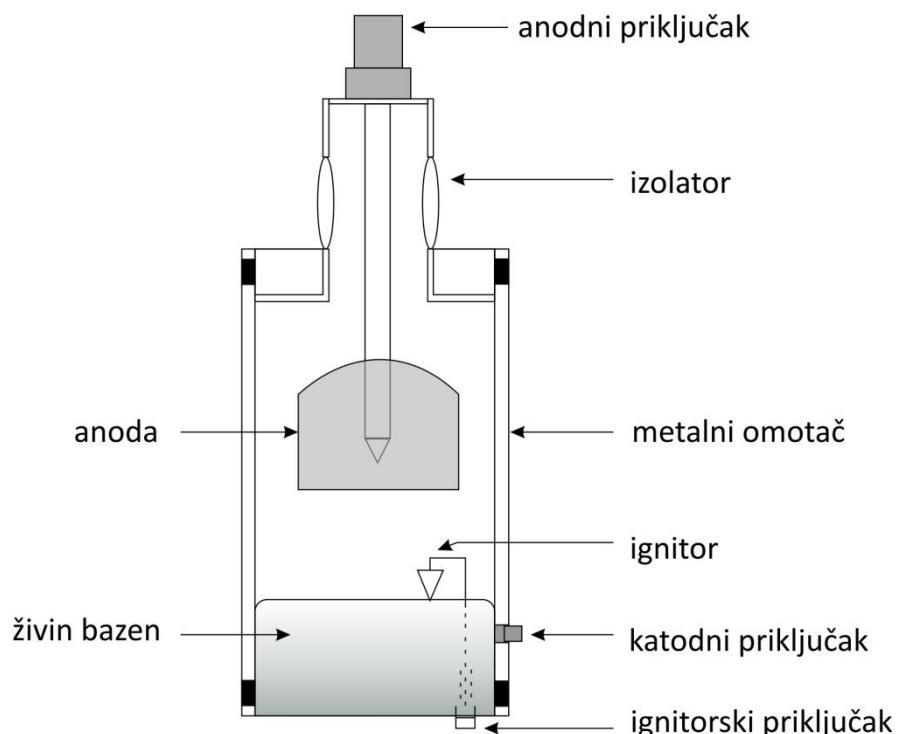
Proces uspostavljanja toka struje kod ovih prekidača se odigrava u cevi. Cev može biti vakuumска ili popunjena nekom gasom, koji se zove radni gas cevi. Vakumske cevi su vakuumirane ili sadrže gas na veoma niskom pritisku. Gasne cevi su za razliku od vakuumskih punjene određenim gasom, čiji je pritisak malo iznad ili ispod atmosferskog. Karakteristika radnog gasa koji se koriste, takođe igra značajnu ulogu u funkcionisanju cevi. Radni gas spark gap cevi može biti i vazduh na atmosferskom pritisku.

U eksperimentalnom uređaju za uspostavljanje strujnog toka pražnjenja T-cevi su bili korišćeni visokonaponski i jakostrujni prekidači kao što su ignitron, tiratron i spark gap. Opis savakog prekidača posebno će biti obrazložen u daljem radu. Aktuelan uređaj za bezbedno pražnjenje kondenzatorskih baterija u eksperimentalnom uređaju služi modifikovan spark gap. U ovom radu će biti opisano još nekolika konfiguracija spark gapa koji su bili korišćeni u toku godina, savaki sa svojim prednostima i nedostacima.

3. IGNITRON

3.1 Konstrukcija

Ignitron je postavljen u metalno kućište od nerđajućeg čelika, a ima staklenu izolaciju koja odvaja elektrode između kojih vlada razlika potencijala [7]. Katodu čini bazen napunjen živom, dok je anoda od grafita ili molibdena. Elektroda pomoću koje se inicira provođenje se naziva ignitor. Ignitor je napravljen od ugljenika. Materijal i oblik ignitora je izabran tako da se ne kvasi kada se uroni u živinu kadu, ali da ostavi trag i formira meniskus na površini žive, koji ima mali otpor. Poprečni presek ignitrona je prikazan na slici 3.1



Slika 3.1
Šematski prikaz ignitrona

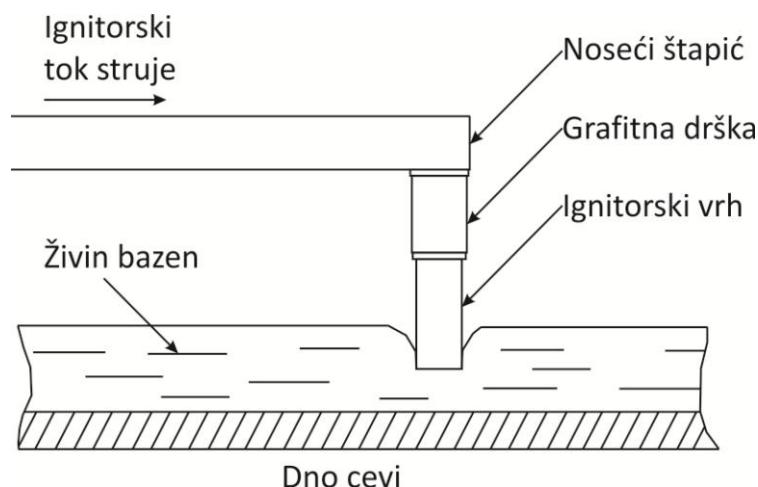
Ovakav ignitron je služio kao jakostrujni prekidač u eksperimentalnom uređaju za iniciranje pražnjenja u T-cevi. Kasnije je bilo zamenjen sa tiratronom, posle sa spak gap-om.

3.2 Princip rada ignitrona

- Elementarni ignitron – ignitron po funkciji predstavlja jedan prekidač sa jako dobrom karakteristikama kada je reč o jakostrujnim prekidačima. Po tom

pitanju prevazilazi kontaktne prekidače. U slučaju da nema napona na ignitoru, ignitron je otvoren prekidač i sposoban da podnese veliku razliku potencijala bez provođenja. Pri pozitivnom naponu između ignitora i žive (katode), otpor između njih postaje jako mali, opada na samo nekoliko oma, stvarajući takozvanu vruću tačku na površini žive. Između ignitora i vruće tačke nastaje tinjavo pražnjenje, što prouzrokuje isparavanje žive. Ovako se stvara uslov da pri naponu od 15 V ili više između anode i katode dođe do provođenje struje. Do ovoga dolazi zato što jonizovana živina para ispunjava prostor u ignitronu. Mali unutrašnji otpor ignitrona čini ga jako dobim prekidačem. U toku provođenja, živin bazen obezbeđuje gotovo neograničen broj elektrona, idealno za prekidanje velikih struja i napona.

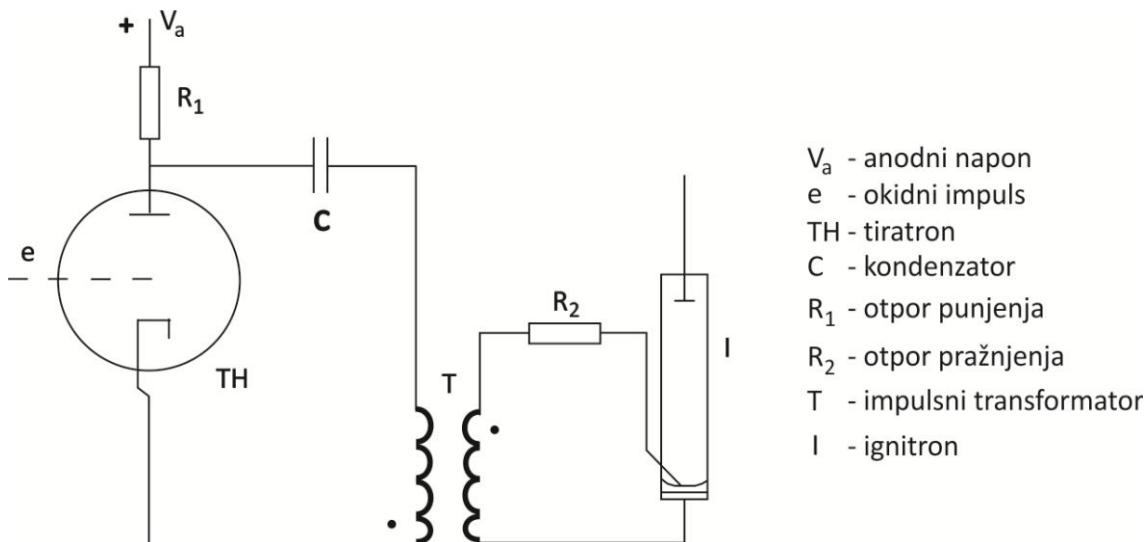
- Ignitron sa rešetkom – primena ignitrona sa rešetkom je potrebna kada se koriste veći naponi od onih koje elementarni ignitron može da podnese. U ovom slučaju jedna ili više rešetki su smeštene između anode i katode. Rešetka koja je najbliža katodi štiti je od anodnog polja. Kada se dovede napon na ignitor, kao što je kod elementarnog ignitrona, dolazi do formiranja vruće tačke, a provođenje počinje dovođenjem pozitivnog napona na prvu rešetku iznad katode. Elektroni se ubrzavaju sa ovim pozitivnim naponom ka rešetcima, a zbog gradijenta napona između ostalih rešetki, elektoni dobiju dodatno ubrzanje stvarajući ionizovanu živinu paru u celom ignitronu. U ovom stanju ignitron ima mali pad napona i predstavlja zatvoren prekidač koji može da provodi struje velike jačine.
- Ignitor – šematski prikaz ignitora je prikazan na slici 3.2. Vrh ignitora je upisan u živin bazu i tako formira meniskus naniže, a pri tome se ne kiasi vrh ignitora. Otpor između ignitora i žive na sobnoj temperaturi može biti od $20-100 \Omega$. Otpor opada sa povećanjem temperature. Pri većem naponu između ignitora i žive dolazi do električnog probora, time se i temperatura povećava, dolazi do pokvašenja ignitora, a otpor znatno opada. Vrednost otpora može da opada ispod jednog oma. Električni probor (luk), kojim provođenje počinje, formira se između ignitora i vruće tačke koja nastaje propuštanjem kratkog i snažnog pozitivnog strujnog impulsu kroz kolo ignitor-katoda.



Slika 3.2

Sastavni delovi ignitora

Iniciranje ignitrona iz neprovodnog u provodno stanje se dešava pobudnim impulsom koji se dovede na kolo ignitor-katoda. Kod elemnetarnog ignitorona ovo kolo može da sadrži jedan kondenzator (slika 3.3) koji se puni do nekoliko hiljada volti, a startovan pomoću poluprovodnika ili tiratrona prazni se preko ignitora i katode. Za igniton sa rešetkom, pobuđivački napon se dovodi na kontrolnu i zaštitnu rešetku kao i na ignitor.



Slika 3.3
Kolo za iniciranje ignitrona

Kondenzator C se puni pomoću izvora jednosmernog napona V_a . Do pražnjenja dolazi kada na rešetku tiratrona dovede okidni impuls. Dalje imamo jedan impulsni transformator na čijem sekudaru se indukuje strujni impuls koji se vodi na ignitor. Pri ovom strujnom impulsu se formira vruća tačka na vrhu ignitora. Otpornici R_1 i R_2 ograničavaju struju punjenja i struju kroz ignitorsku elektrodu.

Inicirana struja u ignitonu veoma brzo poraste od nule do maksimalne vrednosti. Pošto igniton čini jedna cilindričan cev, struja koja proteče kroz nju teče kroz cilindrični stub živine pare koji se nalazi između katode i anode.

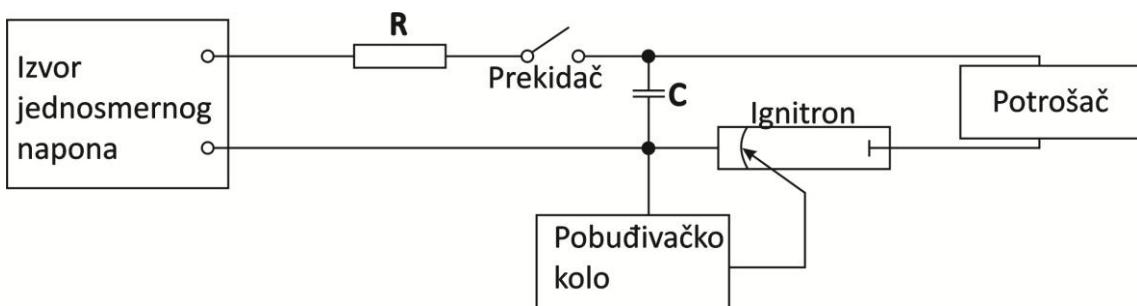
Pobuđivanje ignitora se vrši pomoću tiratrona ili pomoću nekog drugog generatora impulsa, koji obezbeđuje odgovarajuće trenutno paljenje ignitrona i sprečava nastajanje inverznih struja kroz igniton. Najjednostavnije pobudno kolo ignitrona se sastoji od kondenzatora napunjenog naponom između 1500 V i 4000 V koji se prazni u kolu ignitor-katoda preko jednog otpornika za ograničenje struje. Ovo pražnjenje između ignitora i živinog bazena se vrši brzim prekidačem kakav je na primer tiratron. U slučaju iniciranja pražnjenja kroz T-cev u napisanom uređaju je bilo korišćeno tirantron kao brzi prekidač.

Da bi igniton vršio svoju prekidačku funkciju, u kolu za iniciranje pražnjenja se moraju stvoriti određeni uslovi. Strujni impuls koji dovodi igniton u provodno stanje, tj. koji stvara luk između ignitora i katode, mora da ima sledeće osobine: da je pozitivan i da ima vreme trajanja minimalno 0.5 μ s. Kako se proces isparavanja i ionizacije živine pare u ignitonu ne odvija trenutno, neophodno je obezbediti minimalni interval trajanja pozitivnog impulsa da bi se proces mogao odigrati.

Navedeni zahtevi ignitronskog kola, za strujom i vremenom trajanja, ostvareni su generetorom impulsa čiji se izlazni napon može menjati od jedan do nekoliko kilovolti koji je sa ignitronom spregnut preko impulsnog transformatora.

3.3 Ignitron u kolu kondenzatorskog pražnjenja

Ignitroni su pokazali veoma dobre karakteristike u kolima kondenzatorskog pražnjenja jer izdržavaju velike napone i struje, zbog toga se smatraju dobri i pouzdanim jakostrujnim prekidačima. Uprošćeno kolo kondenzatorskog pražnjenja sa ignitronom je prikazano na slici 3.4.



Slika 3.4
Ignitron u kolu kondenzatorskog pražnjenja

Iz izvora jednosmernog napona kondenzator se napuni kada je prekidač zatvoren. Ignitron predstavlja otvoren prekidač u kolu za pražnjenje sve dok se na njega ne dovede inicijalni impuls. Tada ignitoron postaje zatvoren prekidač tj. provodan, preko koga se kondenzatorska baterija prazni.

Svako realno složeno strujno kolo poseduje parazitne kapacitete, induktivnosti i otpor. Razlikuju se tri različita režima rada pomenutog kola:

- Oscilatorni režim - kada je $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, gde je R ukupan otpor u kolu pražnjenja, L induktivitet a C kapacitet u kolu pražnjenja. Može se smatrati da se u ovom režimu struja pražnjenja i napon kondenzatora menjaju po sinusoidi opadajuće amplitude. Pražnjenje traje nekoliko ciklusa.
- Kritično prigušeni režim – kada je $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$. Pri ovom režimu struja pražnjenja ne menja smer kao u oscilatornom režimu. Maksimalna vrednost struje dostigne ranije i nakon tog brzo opada na karakteristikama kola određenu vrednost. Ovakav režim se koristi da bi se izbegla inverzna struja, a da se kondenzatorska baterija potpuno isprazni. U najvećem broju slučajeva se koristi ovakav režim rada.
- Nadkritično prigušen režim - kada je $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$. Maksimalna vrednost stuje je postignuta još ranije u odnosu da druga dva slučaja, ali je amplituda struje manja. Opadanje struje na nivo određen karakteristikama kola traje duže u odnosu na prethodni slučaj.

3.4 Karakteristike ignitrona

Postoji više vrsta ignitrona sa raznim karakteristikama. Igniton se bira po zahtevu za strujno kolo u kome će biti korišćen. Za određen tip ignitrona karakteristike su date proizvođačkim uputstvima. Sledeće karakteristike su najvažnije:

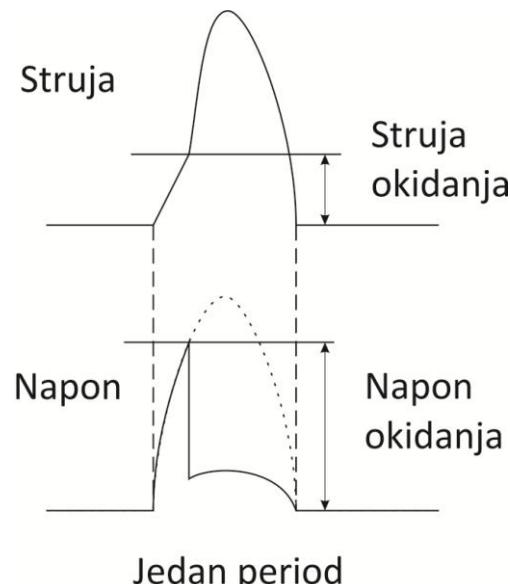
- Direktni anodni napon – maksimalni pozitivni napon koji se može primeniti između anode i katode a da ne dođe do prevremenog provođenja.
- Inverzni anodni napon - maksimalni negativni napon koji se može primeniti između anode i katode bez oštećenja cevi.
- Kritični anodni početni napon - minimalni pozitivan napon na anodi potrebno da bi došlo do provođenja struje kroz cev.
- Vršna anodna struja – maksimalna struja koju cev može da provede bez oštećenja.
- Vreme oporavka – preporučeno vreme čekanja između dva uzastopna provođenja. Ovaj interval obezbeđuje dejonizaciju živine pare unutar cevi, istovremeno se i unutrašnja temperatura smanjuje i više se izjednači sa temperaturom okoline. Kada igniton radi u režimu blizu maksimalne struje onda je vreme oporavka od nekoliko sekundi do 10 s.
- Vreme jonizacije – vreme od primjenjenog anodnog napona do uspostavljanja strujnog toka kroz cev. Pri normalnim uslovima vruća tačka se formira za vreme $0.5 \mu\text{s}$ nakon dovođenja impulsa na ignitor, a provođenje struje kroz cev se uspostavlja za $0.1 \mu\text{s}$ kasnije.
- Otpor cevi - otpor ignitrona je pri radu obično jako mali, reda veličine $0.1 \text{ m}\Omega$. U praksi je to zanemarljivo u odnosu na otpor stujnog kola.
- Induktivitet ignitrona – induktivitet elementarnog ignitrona iznosi približno $0.04 \mu\text{H}$. Kao i kod otpora ignitrona, induktivitet može da se zanemari u odnosu na ostale elemente kola.
- Temperatura ignitrona – idealni uslovi katode, tj. živinog bazena su temperature ispod 40°C . Pri višim temperaturama živa se isparava i menja karakteristike ignitrona. Hlađenje ignitrona može se obezbediti strujanjem vazduha ili protokom vode.

3.5 Zahevi ignitronskog kola

Iz razloga što se ignitor lako ošteti inverznim tokom struje, struja za iniciranje pražnjenja između ignitora i vruće tačke u živinom bazenu mora biti kratka, intezivna i jednosmerna. Napon i struja ignitora u toku iniciranja ignitrona su prikazana na slici 3.5.

Kao što se vidi na slici 3.5 ignitorska struja raste kao posledica smanjenja otpora između ignitora i vruće tačke. Pošto je otpor između ignitora i katode pre formiranja vruće tačke ($20-100 \Omega$) mnogo veći od otpora posle nastanka istog ($< 1 \Omega$), do pada otpora treba izvesno vreme T , koje se malo menja od jednog do drugog ciklusa. Nakon formiranja vruće tačke dolazi do jonizacije što omogućava protok struje sa ignitora ka

živinom bazenu, a posledica ovog je nagli pad napona između ignitora i žive i dolazi do formiranja luka.



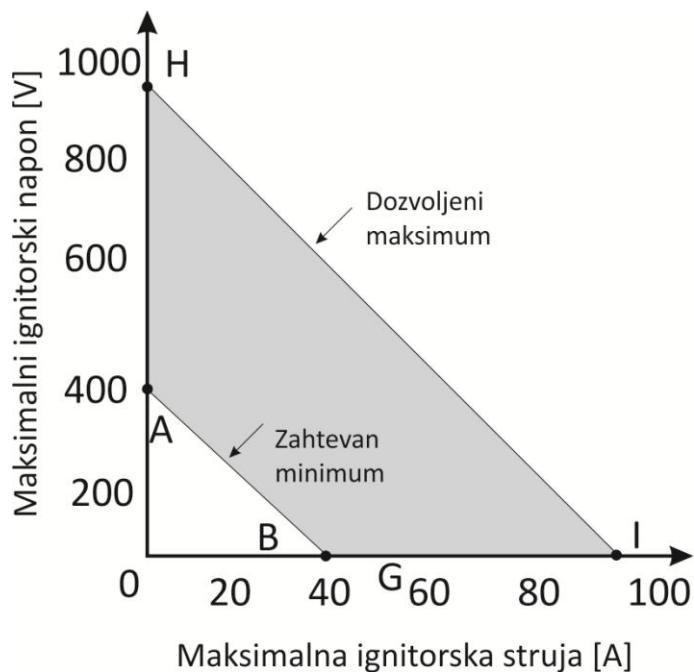
Slika 3.5
Napon i struja u toku iniciranja ignitrona

Ignitroskim promašajem zovemo kada ne dolazi do stvaranja katodne tačke od strane ignitora. Ovo se manifestuje u vidu naponskog impulsa i prikazano je na slici 3.5 isprekidanim linijom. Ovo znači da ne dolazi do pada ignitorskog napona i ne dolazi do formiranja luka. Do promašaja dolazi kada otpor ignitora poraste ili opadne ispod normalnih vrednosti, tj. dolazi do kratkog spoja ignitora i žive. Kratak spoj se dešava kada je ignitor vlažan, tj. kada živa kvasi ignitor.

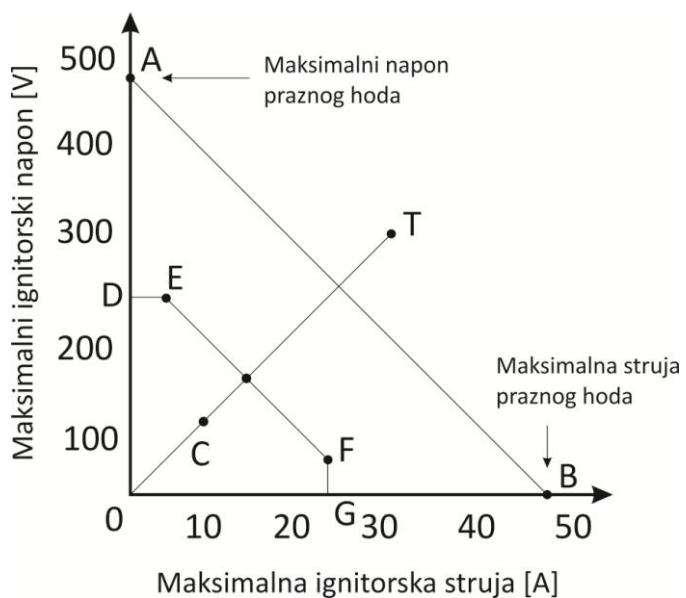
Karakteristku i režim rada ignitrona moguće je proučavati na strujno-naponskom grafiku koji je prikazana na slici 3.6. Ignitron je provodan pod šrafiranim delom grafika, tj. predstavlja radnu oblast za sve vrednosti napona i struje ispod date površine. Minimum napona i struje potreban ignitoru da se dovede u radno stanje prikazan je pravom AB, pri manjim vrednostima napona ili struje je ignitron neprovodan. Prava HI predstavlja dozvoljeni maksimum struje i napona ignitrona.

Uvećana oblast ispod prave AB je prikazana na slici 3.7. Površina ispod tačaka ODEFG predstavlja oblast neaktivnog ignitrona. Unutar ove površine nije kombinacija vrednosti struje i napona ignitora ne dovodi do provođenja ignitrona. OCT prava je radna prava ignitora i predstavlja njegov otpor. Kada se radna tačka nalazi ispod površine DEFG, ignitor je neaktivivan (tačka C). Ako se na ignitor dovede strujni ili naponski impuls kojim se radna tačka premešta u aktivnu oblast (tačka T), u kojoj će ignitron biti u provodnom stanju.

Površina između neaktivnog i aktivnog dela (oblast DEFG i AB) na slici 3.7 se smatra područjem nesigurnog rada ignitora. U izradi ignitrona je uzeta u obzir veličina ove oblasti tako da uvek odvaja provodnu i neprovodnu oblast, čak i u slučaju temperaturne promene ignitrona, fluktuacije nivoa žive u bazenu, itd.



Slika 3.6
Strujno-naponska karakteristika ignitrona



Slika 3.7
Oblast neaktivnog ignitrona i uslovi aktiviranja ignitrona

4. TIRATRON

Ovde opisani tiratron se razlikuje od prethodno spomenutih tiratrona, jer je ovaj tiratron služi kao prekidač visokih napona i velikih jačina stuja.

Tiratron koji služi kao jakostrujni prekidač se sastoji od gasne cevi koja je punjena nekim inertnim gasom ili parom nekog metala, a u sebi sadrži katodu, jednu ili više kontrolnih rešetki i anodu [8]. Tiratron može se koristi kao visokonaponski i jakostrujni prekidač. U tiratronima kao radni gas se obično koriste živina para, neon, ksenon ili vodonik. Vodonik se koristi kada je u pitanju prekidač za visoke napone i sa kratkim vremenom odziva. Tiratroni sa vodonikom su se razvili u drugom svetskom ratu. Bili su korišćeni u radarima kao prekidači sa visokom frekvencijom i sa dobrom pouzdanošću. Pokazali su bolje karakteristike u odnosu na one sa živinom parom. Zbog velike mase atoma žive, na naponima višim od 30 kV, joni žive su dostizali visoke energije što je dovodilo do brzog trošenja takvih tiratrona. Zahvaljujući maloj masi vodonikovih jona, tiratroni sa ovim radnim gasom su postizali mnogo veći maksimalni napon. Iz istih razloga je i vreme oporavka kraće za cevi punjene vodonikom nego cevi sa živinom parom. Tiratroni sa živinom parom su najsporiji, ekološki neprihvativi zbog kondenzacije žive i zbog toga se retko koriste. Tiratroni sa vodonikom su mnogo brži prekidači od tiristora, neki imaju odziv manji od 20 μ s. Nedostatak tiratrona sa vodonikom jeste da u izgradnji katode, rešetke i anode, materijali moraju biti izuzetno čisti zbog lake reaktivnosti vodonikovog atoma sa drugim materijalom. Kao radni gas može da dolazi u obzir i deuterijum, pošto ima slične osobine kao vodonik. Prednost deuterijuma je što može da izdrži veće razlike potencijala na istom pritisku. A nedostatak je duže vreme oporavka, zbog manje pokretljivosti jona u odnosu na vodonik.

Tiratroni se danas koriste uglavnom kod radarskih uređaja, u medicinskim aparatima koji koriste visoke napone, kod gasnih lasera visokih energija, kod akceleratora čestica, itd. Za rad tiratrona pod ekstremnim uslovima specijalno su izdraženi tiratroni sa metalnim ili keramičkim kućištem.

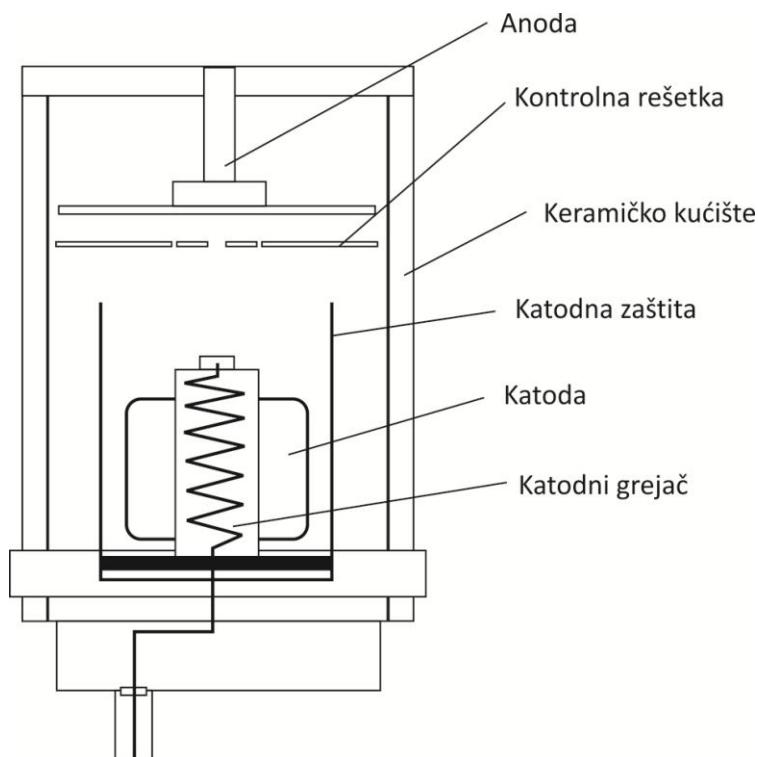
4.1 Konstrukcija tiratrona

Konstrukcija običnog tiratrona napunjeno vodonikom je prikazana na slici 4.1. Kako je već rečeno, sastavni delovi tiratrona su katoda, rešetka, anoda, cev koja je napunjena gasom (vodonik) i kućište. Kod savremenih tiratrona katoda se greje grejnim vlaknom koje je se nalazi u zaštitnom oblogu. Zaštitni deo u isto vreme služi kao toplotna izolacija i kao zaštita od čestica koje se izbacuju sa površine katode. Katoda se greje radi lakše ionizacije gase. Kontrolna rešetka se nalazi između katode i anode. Funkcija ove rešetke je kontrolisanje početka pražnjenja između katode i anode, a nakon nastanka protoka struje ne modifikuje, ne ograničava i ne menja luk nastao između elektroda. Anoda obično ima oblik ravne ploče [9].

Veličina katode određuje maksimalnu jačinu struje koja može proći preko nekog tiratrona, jer katoda obezbeđuje elektrone za pražnjenje termoelektronskom

emisijom, jonskom rekombinacijom i sekundarnom emisijom. Joni vodonika i deuterijuma nemaju dovoljnu energiju koja bi dovela do uništavanja površine katode. Iz tog razloga se kao radni gas tiratrona koriste ovi elementi. Pri jačinama struje iznad dozvoljene vrednosti dolazi do pregrevanja i do razaranja katode usled isparavanja.

Gustina struje na rešetci može biti za red veličine veća nego na katodi, zato je konstrukcija rešetke jako važna. Pri veoma velikim jačinama struje i „dugotrajnim“ impulsima može da se javlja luk između katode i rešetke, a to ima za posledicu da struja teče kroz rešetku a ne kroz za tu svrhu napravljenu rupu u sredini rešetke. Ovo dovodi do oštećivanja površine rešetke koja dalje ugrožava prekidačke osobine tiratrona.



Slika 4.1
Šematski prikaz i sastojni delovi tiratrona

4.2 Princip rada

Princip rada tiratrona se zasniva na proboru u gasnim cevima. Nastanak probora kroz gas će biti detaljnije opisano u ovom radu.

Da bi došlo do pražnjenja potrebni su nosioci nanelektrisanja, a to su joni i elektroni. Iz tog razloga prvo se stvaraju uslovi dobijanja jona i elektrona [10]. Dovođenjem napona na rešetku gas se prvo jonizuje u oblasti između katode i rešetke. Napon koji se doveđe zove se još i okidni signal. Posle ionizacije gasa između katode i rešetke, proces stizanja jona u prostor između rešetke i anode preko otvora na rešetki naziva se komutacija. Joni difunduju kroz otvore na rešetki pomoću anodnog polja. Tokom ovog procesa se oslobađa dovoljna količina slobodnih elektrona usled čega se povećava i broj jona, koji omgućavaju nastanak probora. Na ovom mestu probor

možemo smatrati kao električnu vezu između katode i anode pomoću nosilaca nanelektrisanja, tj. jona i elektrona što čini protok stuje. Pre nastanka proboga trenutnu struju možemo napisati u sledećem obliku: $I = I_0 e^{\alpha t}$. Struja eksponencijalno raste sa nastankom jona u gasu. To istovremeno znači da se joni formiraju eksponencijalno tokom vremena. I_0 predstavlja inicijalnu struju koja nastaje ionizacijom gasa okidnim signalom između rešetke i katode. Brzinu porasta struje moguće je poboljšati stvaranjem što više jona još pre dovođenja okidnog signala. Jako važnu ulogu igra konstanta „ α “ koja zavisi od gustine gase u oblasti između rešetke i anode, čineći tako pritisak radnog gase najvažnijim faktorom za skraćivanje vremena komutacije. Kako je pritisak gase srazmeran broju molekula u gasu što utiče na frekvenciju sudara elektrona sa molekulima tj. na brzinu rasta struje. Ovi procesi se odigravaju u prostoru između katode i anode gde se nalazi i kontrolna rešetka, zbog toga i na komutacione osobine tiratrona utiče i geometrijski oblik same rešetke. Kod savremenih tiratrona je izabran optimalni oblik kontrolne rešetke radi manjeg uticaja na nastanak proboga i zbog efikasnosti rada.

Takođe postoje i elektroni koji se na svom putu do anode ne sudaraju sa molekulima gase i ne doprinose ionizaciji, nego svu energiju troše na udar u anodu. Ova energija se u najvećem delu troši na toplotu ili se manji deo ove energije se pretvara u rendgenske zrake, što čini gubitke u procesu komutacije. Deo ovog nedostataka se otklanja odgovarajućem hlađenjem anode i izborom optimalnog pritiska gase u tiratronu.

Posle procesa komutacije, kada je tiratron ispunjen jonizovanom gasom, dolazi do proboga i tiratron postaje provodan. U trenutku proboga dolazi do naglog pada napona između katode i anode. Pad napona obezbeđuje elektronima da se kreću bez prostornih i električnih ograničenja u prostoru između elektroda. Električno polje između katode i anode određuje jačinu struje kroz tiratron, tj. struja zavisi od napona na anodi. Zbog velike pokretljivosti elektrona pozitivni joni ekraniraju rešetku i tako onemogućavaju prodor potencijala rešetke kroz jonizovan gas. To znači da dovođenjem negativnog signala na rešetku nije moguće prekidanje struje kroz tiratron. Tiratron se u neprovodno stanje može vratiti jedino isključivanjem anodnog napona. Na osnovu ovoga, tiratron prestavlja prekidač koji se zatvara pozitivnom signalom na kontrolnu rešetku, a otvara se prekidom napona na anodu.

Nakon prekida napona na anodi u tiratronu se još uvek nalaze pozitivni joni koji će da se rekombinuju zbog nestanka električnog polja. Za rekombinaciju pozitivnih jona i elektrona treba određeno vreme koje se zove vreme oporavka tiratrona. U prostoru oko anode i rešetke brže dolazi rekombinacije zbog manje prostora između njih i time imaju veću verovatnoću da se rekombinuju. Suprotan je slučaj u prostoru između rešetke i katode gde je razmak veći. Potpuna deionizacija tiratrona i nije neophodna, pošto se stanje oporavka završava tog trenutka, kada se ionizovani gas povuče dovoljno daleko od rešetke, da ona može svoj potencijal razviti celom njenom dužinom i električno razdvojiti oblast anode od oblasti katode. Za vreme oporavaka tiratrona se anoda drži na nultom ili na malom negativnom potencijalu da bi došlo do deionizacije gase između anode i rešetke. Dovođenje bilo kojeg pozitivnog napona na anodu za vreme oporavka može da izazove dalju ionizaciju gase što opet dovodi do provođenja struje kroz tiratron. Dovođenjem malog negativnog napona na anodu se skraćuje vreme oporavka tiratrona.

Vreme oporavka zavisi od pritiska gase unutar tiratronske cevi. Većem pritisku odgovara duže vreme oporavka i obrnuto. Snižavanjem pritiska u tiratronu skraćuje se oporavak, ali se time ujedno i povećava disipacija na anodi koja može smanjiti vek trajanja samog tiratrona.

Vreme oporavka za određen tiratron je karakteristika data od strane proizvođača.

5. SPARK GAP

Spark gap-ovi su veoma značajni u istoriji visokonaponskih i jakostrujnih prekidača. Bili su među prvim prekidačima kod pražnjenja velikih kondenzatora na visokim naponima [11]. U naprostijem obliku spark gap prekidač se sastoji od dve metalne elektrode koje se nalaze na određenom rastojanju jedna od druge ali se nalaze na istoj osi. Rastojanje između elektrode može biti ispunjeno vazduhom ili nekim drugim gasom. Prekidačke osobine ovog uređaja zavise od oblika i rastojanja između elektroda, kao i od pritiska gasa između njih. Kada razlika potencijala postigne vrednost karakterističnu za dati gas, pritisak i uspostavljeni razmak između elektroda, nastaje probaj između elektroda. Otpor pražnjenja je jako mali, reda veličine milioma i iz tog razloga probaj predstavlja veoma efektivni prekidač.

Tokom godina razvijeno je niz drugih visokonaponskih i jakostrujnih prekidača, ali spark gap prekidači su uvek ostali jako važne komponente nekih strujnih kola.

Kod pravljenja spark gap prekidača treba da obratiti pažnju na sledeće stvari:

- Prekidač treba da ima malu induktivnost, tako da induktivitet celog sistema ostane mali da bi mogla što veća struja da prođe kroz prekidač.
- Prekidač mora da bude otporan na elektromagnetne sile koje se stvaraju tokom jakostrujnog pražnjenja.
- Kako erozija ograničava bezbednost i funkcionalnost prekidača, važan je izbor materijala od kojeg se naprave elektrode.
- Oblik elektroda takođe utiče na pražnjenje.
- Postoje još neke sporedne stvari na koje takođe treba obratiti pažnju, kao što je buka tokom probaja, vlaga vazduha, prašina i održavanje prekidača [12].

5.1 Napon pražnjenja

U slučaju kada se spark gap koristi kao prekidač, onda tačno mora da se odredi napon na kojem dolazi do pražnjenja, tj. na kojem prekidač posaje provodan. Kod najobičnijih spark gapova se iz praktičnih razloga kao radni gas koristi vazduh na atmosferskom pritisku. Moguće je dobiti zavisnost napona probaja koroz gas od rastojanja između elektroda. Međutim, na proces pražnjenja utiču i drugi faktori, pa se javlja greška u vremenu zatvaranju prekidača, reda veličine 4-5 %. Kod savremenih spark gapova se koristi pomoćna elektroda ili druge metode za iniciranje pražnjenja, tako da do probaja dolazi na određenoj vrednosti napona. Metode iniciranja probaja spark gap prekidača su opisane u daljem tekstu ovog rada.

5.2 Vreme zatvaranja prekidača

Merenjem induktiviteta kalema serijski vezanog sa spark gapom, moguće je meriti vreme zatvaranja prekidača, tako što je napon na kalemu proporcionalan promeni:

$$V_L = -L \frac{dI}{dt}$$

gde je V_L napon krajevima kalema, L induktivitet kalema i I jačina stuje. Za određivanje vremena zatvaranja prekidača se uzima kalem sa malim induktivitetom, reda $0.1 \mu\text{H}$. Napon na kalemu može da se meri osciloskopom. Na osnovu vremena povećavanja naponskog signala može da se odredi vreme zatvaranja prekidača, tj. vreme za koje prekidač prelazi iz neprovodnog u provodno stanje. Ovo vreme je i kod najobičnijeg spak gapa ispod 10 ns. [12]

5.3 Vreme komutacije i vreme opravka prekidača

Treba razlikovati vreme zatvaranja prekidača i vreme komutacije. Vreme komutacije predstavlja vremenski interval od iniciranja impulsa do zatvaranja prekidača. Ovo je jedan od najvažnijih osobina svakog prekidača i može da se odredi merenjem signala osciloskopom ili je dat sa strane proizvođača.

Oscilacije u vremenu zatvaranja prekidača nazivaju se jitter.

5.4 Princip rada

Kao što je rečeno sprak gap je jedan varnični prekidač, koji se zasniva na električnom pražnjenju kroz gas. Poznato je da do pražnjenja kroz gas dolazi ako se nastali slobodni nosioci nanelektrisanja (joni i elektroni) slobodno kreću u međuprostoru između dve elektrode, a to pod dejstvom električnog polja. Ako je rastojanje između elektroda d a između njih vlada potencijal U onda nastaje uniformno električno polje u tom prostoru. Slobodni elektron u ovom polju se kreću od katode do anode. Svaki elektron na svom putu izazove lavinu elektrona tako što svojom energijom, dobijenom od električnog polja, jonizuje atome gasa. Broj ovih elektrona raste po Townsend-ovom zakonu [13]:

$$n' = e^{\alpha d}$$

gde je α Townsend-ov ionizacioni koeficijent. Čim lavina elektrona dođe do površine anode oni se apsorbuju i ostaju stvoreni joni u razmaku između elektrode. Joni će da se kreću ka pravcu katode u električnom polju. Svaki od ovih jona će da izbije elektron sa površine katode sa verovatnoćom γ . Ovo se zove sekundarna emisija elektrona. Nastali elektroni se opet kreću ka anodni i tako nastali proces može da postane samoodržavajući ako je električno polje između katode i anode dovoljno veliko i to se zove probaj kroz gas. Tada dolazi do protoka struje između katode i anode. Broj sekundarnih elektrona može da se napiše kao:

$$n = \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)}$$

Da bi proces bilo samoodržavajući, mora biti ispunjen uslov da imenilac u ovom izrazu bude jednak nuli, tj. da broj sekundarnih elektrona bude beskonačno velik:

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$$

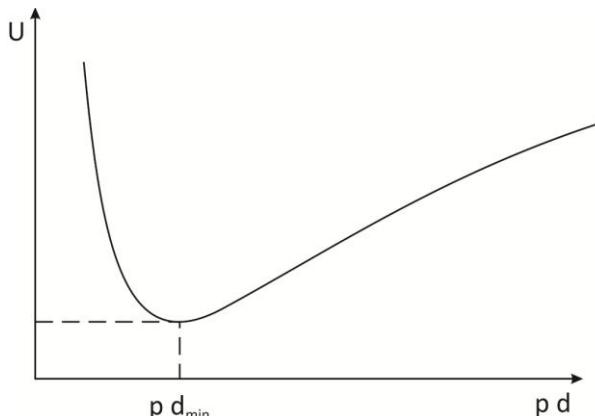
Prelaz u samoodržajući protok stuje između elektrode se zove varnično pražnjenje.

Proboj u gasu zavisi još od napona U koji vlada između eletrode i od proizvoda pritska gasa p i razmaka između elektroda d . Funkcija koji povezuje ove veličine je da Pašenovim zakonom i glasi [14]:

$$U = f(p \cdot d)$$

Napon probaja postiže minimum za određene vrednosti p i d , kao što se vidi na slici 5.1. Na slici je dat grafički prikaz Pašenovog zakona. Može se primetiti da za jednu vrednost napona probaja postoje dve tačke proizvoda pd . Radna tačka spark gapa se nalazi na području gde je proizvod pd veliki, tj. na visokim pritiscima i relativno velikim rastojanjima između elektroda. Dok drugi prekidači, kao što je tiratron, rade na niskim vrednostima pd koje se nalaze na levoj strani grafika na slici 5.1. Sa opadanjem vrednosti proizvoda pd probjni napon se povećava iz razloga što na levoj strani minimuma između elektroda ima samo mala količina molekula i zbog toga je slobodni put elektrona mnogo veći od razmaka elektroda. Zbog toga je verovatnoća da neki elektron proizvede dovoljnu količinu jona za probaj veoma mala. A sa druge strane minimuma vrednosti pd , slobodni put je mnogo kraći od razmaka elektroda d , a to znači da elektroni gube energiju tokom mnoštva sudara. Da bi se u ovom slučaju izazvao probaj, visokim naponom se obezbeđuje dovoljna energija elektrona da bi izazvali ionizaciju. Ionizacija elektronima se naglo povećava, joni se ubrzavaju ka katodi i dolazi do pobača kroz gas, kako je već ranije napisano.

Kombinacijom vrednosti pritiska p i rastojanja d moguće je odabrati napon na kojom spark gap nije provodan. Tako je moguće izgraditi spak gap da izdrži visoke napone na anodi.



Slika 5.1

Zavisnost napona probaja u gasu od proizvoda pritiska gase i rastojanja elektroda

Tokom razvoja spak gapa razvijeno je i nekoliko načina dovođenja prekidača u provodno stanje. Najčešće korišćeni metodi su sledeći:

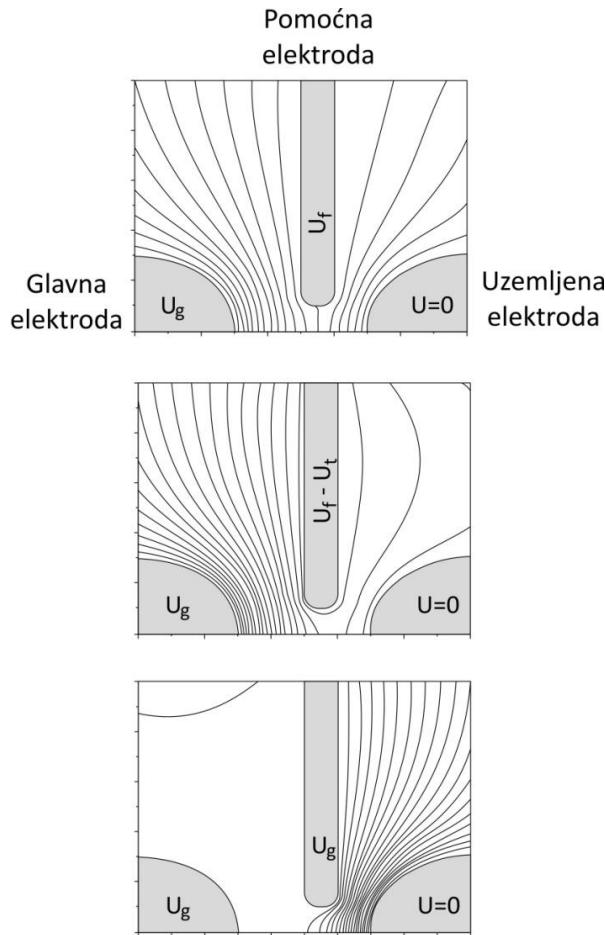
- Dovođenjem dovoljno visokog napona na jednu elektrodu da bi došlo do pražnjenja između njih. Obično je ovo nezgodno, pošto na napon pražnjenja utiče više faktora, pa ne dolazi do pražnjenja uvek na istom potencijalu.
- Smanjenjem pritiska gasa između elektrode doveđe do pražnjenja. Ova metoda zahteva koršćenje sistema za kontrolisanje pritiska (boca sa radnim gasom, vakuum pumpa, manometar).
- Promenom gustina gasa muguće je inicirati pražnjenje. Mana ove metode je takođe potreba za gasnim sistemom i korišćenje više vrsta gasova.
- Napon proboga može da se menja i menjanjem rastojanja između elektroda.
- Lokalna ionizacija gasa između elektroda je zgodan način dovenjenje spark gapa u provodno stanje. Jedan način ionizacije gasa je stvaranje pomoćne varnice piezoelektričnim generatorom. Ovaj generator može da se nalazi blizu katode ili da se nalazi u samoj katodi.
- Drugi način lokalne ionizacije gasa je postavljanjem provodne žice blizu katode. Ovo se zove pomoćna elektroda. Dovođenjem naponskog signala na pomoćnu elektrodu, dovoljnog da nastane varnica između katode i pomoćne elektrode inicira se probog između dve glavne elektrode gde proteče stuja. Kao kod prethodne metode i ovde pomoćna elektroda može da se nalazi blizu katode ili unutar katode.
- Jedan od naj novijih načina zatvaranja spark gap prekidača je pomoću lasera. Usmeravanjem i fokusiranjem laserskog zraka u prostoru između elektrode se stvaraju joni i elektroni. Stvaranjem ovih nosioca nanelektrisanja dolazi do opisanog procesa i nastajnja pražnjenje između katode i anode.

5.5 Spark gap sa pomoćnom elektrodom

Pražnjenje kroz spark gap sa pomoćnom elektrodom je samo proširena verzija osnovnog procesa pražnjenja. Standardni spark gap sa tri elektrode je obično tako konstruisan da se katoda nalazi na nultom potencijalu, anoda se nalazi na visokom potencijalu a između njih je smeštena pomoćna elektroda. Na pomoćnu elektrodu (okidač) se doveđe negativan naponski signal koji će da inicira pražnjenje između dve glavne elektrode. Proces koji se odigrava između pomoćne elektrode i anode je isti proces pražnjenja kao između dve glavne elektrode, ali je razmek između anode i elektrode okidača mnogo manji, pa je dovoljan mnogo manji naponski signal da bi izazvao varnicu između njih. Stvaranjem ove varnice, istovremeno se stvaraju elektroni i joni koji će da omogućavaju probog kroz gas između anode i katode [15].

Distribucija potencijala u prostoru između elektroda je prikazana na slici 5.2. Na prvoj slici se vidi da je potencijal ravnomerno raspoređen u prostoru. Električno polje je dovoljno jako da pomera elektrone ili grupu elektrona prema anodi, ali nije dovoljno jako da izazove multipikacioni proces i lavinu elektrona, što bi dovelo do pražnjenja. Na drugoj slici je prikazan negativni naponski signal na pomoćnoj elektrodi. Zbog negativnog naponskog signala je efektivni potencijal dva puta veći između anode i

pomoćne elektrode. Ovo će da povećava električno polje iznad kritične vrednosti za stavljanje elektronske lavine i probaja. Time je spark gap kao prekidač zatvoren [16].



Slika 5.2
Distribucija potencijala u prostoru između elektroda

5.6 Erozija u spark gapu

Erozija elektrode i izolatora oko njih je jedan od najvećih faktora koji utiče na životni vek visokonaponskih i jakostrujnih spark gap prekidača. Razne tehnike modelovanja ovog procesa su se pojavile tokom proučavanja. Da bi se razumelo kako erozija utiče na prekidačke karakteristike tokom korišćenja, po gotovo na vreme komutacije, potrebna su osnovna znanja o ovom mehanizmu [17].

Predpostavljajući da uniformno električno polje vlada između dve metalne elektrode, kao u prethodno opisanom primeru, i ako potencijal između njih raste do dovoljno visoke vrednosti, doći će do probaja. Otpor pražnjenja je zanemarljiv. Protok struje je ograničen samo sa strane električnog kola i može da postigne reda kA, čak i MA veličine. Ovako nastaje prenos energije sa jedne na drugu elektrodu putem provodljivosti, radijacijom i konvekcijom luka nasalog između njih. Ova energija zagreva elektrode do mere da dolazi do erozije pa čak i do topljenja materijala i ovo se nastavlja dok se elektroda ne istroši sporim isparavanjem materijala. Mehanizam

erozije može biti objašnjen rešavanjem jednačine za provođenje toplote blizu površine elektrode [18]:

$$\rho c \frac{\delta T(x, t)}{\delta t} = k \frac{\delta^2 T(x, t)}{\delta x^2} + \frac{I_e^2(x, t)}{\sigma_e}$$

gde je ρ gustina materijala, k je toplotna provodljivost, c je specifična toplota materijala, σ_e je električna provodljivost elektrode, T je temperatura, I_e je gustina struje elektrode, x je pravac normalan na površinu materijala, a t je vreme.

Iz rešenja ove jednačine se dobija normirana količina erodiranog materijala:

$$m_m^* = \frac{m_m}{Q_h/cT_{eff}}$$

i isparenog materijala

$$m_v^* = \frac{m_v}{Q_h/cT_{eff}}$$

gde je

$$Q_h = \int_0^{t_p} q(t) A_e(t) dt$$

i

$$T_{eff} = T_{mp} - T_0$$

je efektivni porast temperaturе. T_{mp} je tačka topanja materijala, T_0 je početna temperatura, a t_p je trajanje protoka struje.

Erozija materijala prouzrokuje kratere i izbočine na površini elektrode. Nako prestanka toka struje materijal elektrode se polako ohladi i isti proces se odvija prilikom sledećeg probaja. Ovo ciklično ponavljanje porasta i pada temperature lako prouzrokuje pukotine u materijalu koji se nakon svakog probaja sve više povećavaju. Šteta od erozije utiče na dalji rad prekidača. Pre svega na veličinu napona na kojem je neprovodan i taj napon više varira kako je erozija veća, zbog toga utiče i na vreme komutacije prekidača. Do ovoga dolazi iz razloga što se erodirane čestice sa elektrode zalepe na zidove izolatora oko elektrode, elektročno polje više nije jednako raspoređeno u prostoru između elektrode i na većim vrednostima napona kroz njih se provodi stuja. Ovaj nepoželjan protok stuje se zove „curenje“ stuje.

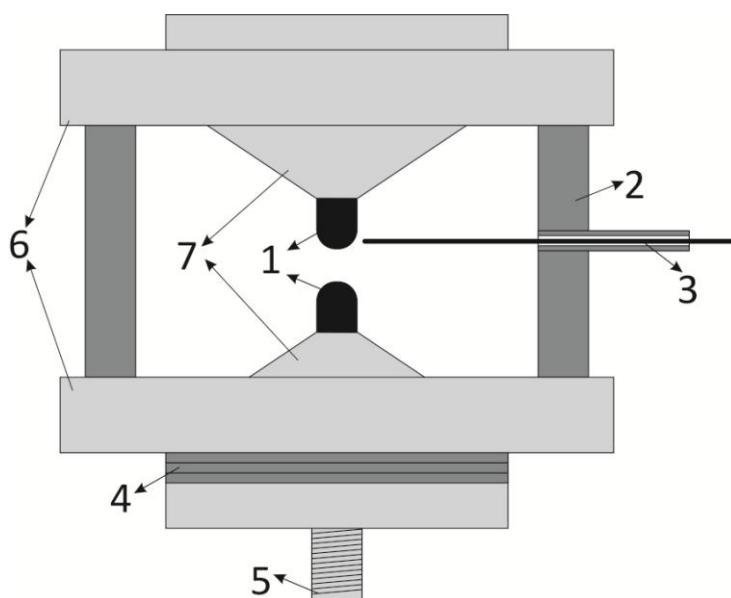
Kao i kod elektrode, do istog procesa erozije može doći i na površini izolatora koji se nalazi oko elektroda. Interakcija između čestice izolatora i luka prekidača dovedi do dekompozicije izolatorskih čestica i nastaje provodni sloj, što opet utiče na prekidače osobine spak gapa. Ovo je možda čak i od većeg značaja nego erozija elektrode, i iz tog razloga treba ga uzeti u obzir kod konstrukcije visokonaponskog prekidača. Jedan od načina da se izbegne erozija izolatorskog materijala je udaljavanje

isolatorskog kućišta dovoljno daleko od nastalog luka, tako da je prenos toplote bude najmanje moguć ili da se stavlja neka vrsta zaštite između varnice i površine izolatora.

5.7 Spark gap prekidač u eksperimentalnom uređaju

U eksperimentalnom uređaju za iniciranje visokonaponskog pražnjenja kroz udarnu T-cev je korišćen spark gap prekidač. Prekidač je izrađivan u nekoliko varijanti. U ovom radu će biti opisana tri prekidača, svaki sa svojom najznačnijom inovacijom.

Prvi spark gap prekidač koji je bio standardni spak gap sa pomoćnom elektrodom. Šematski prikaz ovog prekidača se vidi na slici 5.3.



Slika 5.3
Šema spark gap prekidača u prvoj konfiguraciji

1. Elektrode od volframa
2. Kućiste od keramije (izolator)
3. Ulaz za pomoćnu elektrodu
4. Prstenovi (odstojnice)
5. Priključak na visoki napon
6. Nosači elektroda od gvožđa
7. Držač elektroda od gvožđa

Prekidač se sastoji od keramičkog kućišta za koje su pričvršćeni nosači elektroda oblika diska i napravljeni su od gvožđa. Držači elektroda su ušrafljeni u nosače. Elektrode su napravljene od volframa i hartletovane su za držače. Ispod donje elektrode se mogu postaviti prstenovi koji služe kao odstojnici za elektrode, tj. broj prstenova određuje rastojanje između glavnih elektroda. Debljina ovih odstojnika može biti od 1 mm do nekoliko milimetara i moguće je staviti kombinaciju njihovih

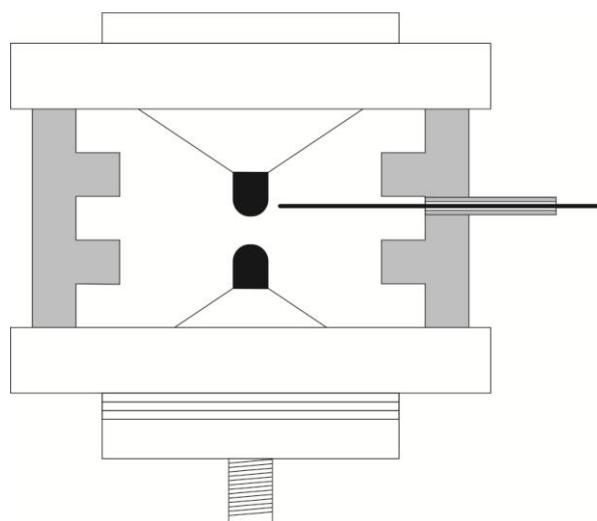
debljina po potrebi. Povećanje razmaka između elektroda znači da će napon proboga biti veći. Ovo je važna osobina prekidača i zato treba pažljivo da se izaberu odgovarajući odstojnici. Obično se elektrode postavljaju tako da razmak između njih bude oko 20 % veći od rastojanja na kojem bi došlo do proboga na zadatom naponu. Tako je obezbeđeno da ne dođe do proboga pre dovođenja naponskog signala na pomoćnu elektrodu koja je postaljena blizu gornje elektrode. Na ovaj način dolazi do već ranije opisanog procesa i prekidač postaje provodan. Ulaz pomoćne elektrode se nalazi na bočnoj strani prekidača, to se vidi na slici 5.3 pod brojem 3. Kao pomoćna elektroda može da se koristi volframska žica.

Jedan od nedostataka ove konfiguracije prekidača je erozija materijala od kojeg su napravljene elektrode kao i raspršivanje oksida koji se javlja na površini držača elektroda. Nakon višestrukog okidanja prekidača zbog velike stuje erodirane čestice se zapele na unutrašnju stranu izolatorskog kućišta. Zbog toga površina zida postane provodna i spark gap više ne radi kao prekidač. Spark gap se tada otvoriti, unutrašnji zid se očisti alkoholom i spark gap može ponovo da se koristi. To se može raditi izvestan broj puta, ali se na kraju dovoljan broj metalnih čestica ugraditi u keramiku i čišćenje više ne pomaže. Mora se promeniti keramičko kućište.

Kod druge konstrukcije spark gap prekidača modifikovano je keramičko kućište. Vertikalni presek ovog spark gapa je prikazan na slici 5.4.

Nosači i držači elektroda su u ovom slučaju izrađeni od mesinga. Ovaj materijal je bio izabran jer ima veću gustinu i toplotnu provodljivosti od gvožđa. Osim toga na površini mesinga se ne stvaraju oksidi kao kod gvožđa. Radi smanjenja uticaja erozije sa elektroda izmenjen je oblik izolatorskog kućišta. Sa unutrašnje strane su napravljeni kanali. Na ovaj način se produži put "curenja" struje preko erodiranih čestica koje se zapele za zidove. Time se samo produžava životni vek spark gapa, ali je on i dalje ograničen tako da će i ova keramika nakon izvesnog vremena morati da se zameni.

Priključenje ovog prekidača za eksperimentalni uređaj je isto kao kod prethodno opisanog spark gapa, kao i princip dovođenja prekidača u provodno stanje.



Slika 5.4
Šema spark gap prekidača u drugoj konfiguraciji

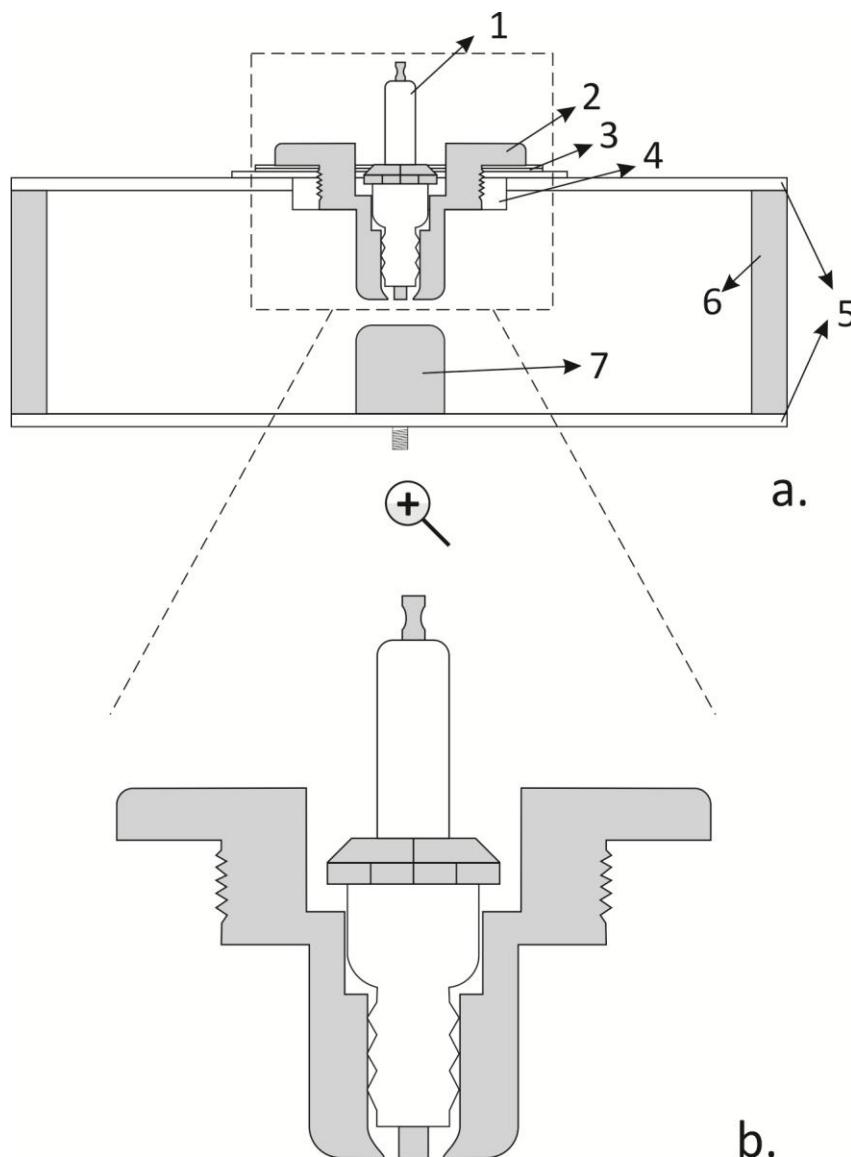
Kako erozija elektroda ne može da se izbegne, u trećoj konstrukciji povećan prečnik keramičkog kućišta da bi se bi se produžio rad spark gapa pre nego što dođe do struje "curenja". Vertikalni presek ovog spark gapa kao i uprošćena 3D slika sa sastojnjim delima su prikazana na slici 5.5 a i slici 5.6.

Zbog dimenzija spark gapa nije zgodno koristiti pomoćnu elektrodu kao kod prve dve konfiguracije tj. u obliku volframske žice. Iz tog razloga je ugrađena automobilska svećica unutar same elektrode. Gornja elektroda je šupljia i tu je postavljena svećica, koja služi kao pomoćna elektroda. Dovedenjem visoko naponskog signala na svećicu nastaje varnica između nje i glavne elektrode. Vertikalni presek glavne i pomoćne elektrode je prikazan na slici 5.5 b. Elektrode ovog prekidača su napravljene od nerđajućeg čelika i postavljene su aksijalno simetrično kao što se vidi na slici 5.5 a.

Opisan spark gap je povezan u eksperimentalni uređaj kao što je prikazana na slici 1.2. Donja elektroda prekidača je direktno povezana sa kondenzatorima i nalazi se na naponu kondenzatora. Napon okidanja tj. napon do kojeg se pune kondenzatori se zadaje pomoću kontrolne jedinice (slika 1.3), gde se vidi i trenutna vrednost napona. Kada napon dostigne zadani vrednost okidanja tada kontrolna jedinica šalje negativan signal od 12 V na generator inicijalnog impulsa. U gore napisanom električnom sistemu iz generatora inicijalnog impulsa se dobija signal od 400 V. Ovaj signal se dalje vodi na generator okidnog impulsa. Na izlazu ovog dela sistema se dobija visokonaponski signal od 11 kV. Generator okidnog impulsa je direktno povezan sa svećicom (pomoćnom elektrodom) spark gapa. Visokonaponski signal je dovoljno velik da stvori varnicu između svećice i gornje elektrode. Zahvaljujući ovom nastaje probor između elektroda, a time se i zatvara prekidač, tj. postaje provodan. Struja se dalje vodi na elektrodu elektromagnetne udarne T-cevi, gde takođe dolazi do probora kroz ispitivani gas, što ujedno predstavlja i cilj eksperimentalnog uređaja.

Sastavni delovi spark gapa:

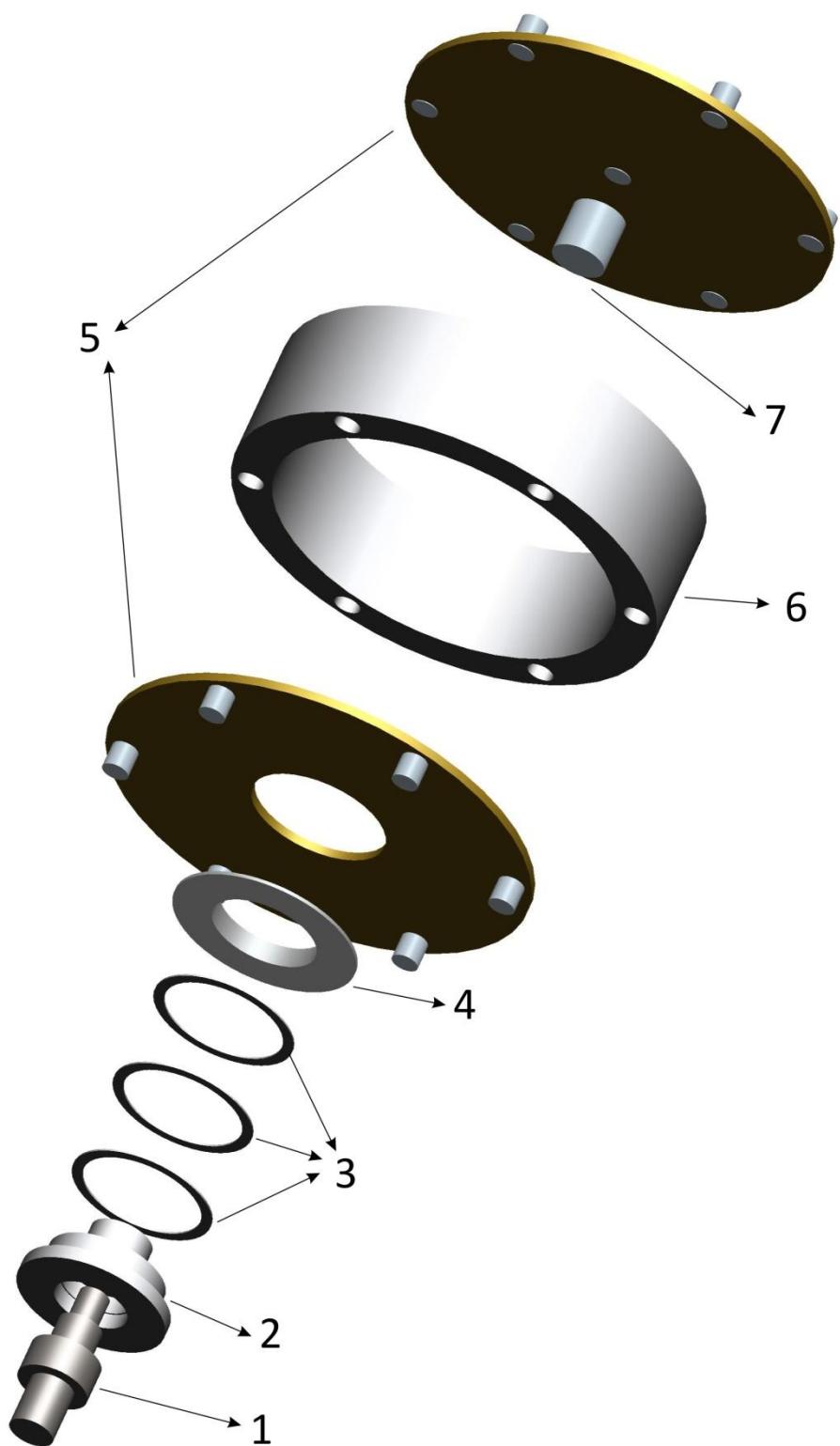
1. Svećica (pomoćna elektroda)
2. Prva elektroda
3. Prstenovi (podmetači)
4. Nosač elektrode
5. Poklopci izolacionog kućišta
6. Izolaciono kućište od keramike
7. Druga elektroda



Slika 5.5 a. i b.

- a. Poprečni presek aktuelnog spark gapa
- b. Glavna elektroda sa svećicom (pomoćna elektroda)

Elektromagnetna udarna T-cev služi kao izvor plazme. Karakteristike dobijene plazme zavise od jačine struje kroz gas. Cev je ispunjena gasom koji se ispituje i proboj nastaje u prostoru između elektroda u cevi. Tako dolazi do naglog porasta koncentracije jona i elektrona a istovremeno i do visoke temperature gasa. Koncentracija nanelektrisanja i teperatura zavise od jačine struje pražnjenja, zbog toga ova veličina treba da je što veća i porast jačine što brži. Brzina porasta jačine struje postiže se smanjenjem induktivnosti električnog kola na minimum.



Slika 5.6
3D slika aktuelnog spark gapa u eksperimentalnom uređaju

5.8 Karakteristike fizičkih osobina materijala

Upoređivanje fizičkih osobina materijala od kojeg su napravljene elektrode su prikazane u tabeli 5.1. U tabeli su date najvažnije veličine koje utiču na eroziju materijala pri provođenju velikih stuja. [19]

	gvožđe	volfram	messing	nerđajući čelik
Gustina [kg/m³]	7850	19292	8470	7900
Toplotna provodljivost [W/mK]	80	174	120	17
Specifična toplota[J/kgK]	502	167	402	520
Tačka topljenja [°C]	1176	3410	940	1426

Tabela 5.1

Kao što se iz ranije napisane formule vidi, jedan od najjačih faktora odgovoran za eroziju je temperatura tačke topljenja. Iz tabele se vidi da je vrednost tačke topljenja za volfram i nerđajući čelik najveća, što ih čini najotpornijem na toplotu, u odnosu na gvožnje i mesing. Drugi utični faktor iz te formule je vreme trajanja protoka struje kroz prekidač. Važna karakteristika prekidača i celog električnog sistema je pouzdana reproducibilnost istih uslova, pa samim time je i vreme protoka struje približno ista pri svakom okidanju, tj. ovaj faktor se ne menja.

ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je bio opisivanje i analizu rada sistema za kontrolisano pražnjenja kroz elektromagnetnu udarnu T-cev. Najvažniji sastavni delovi eksperimentalnog uređaja pomoću kojeg dolazi do pražnjenja su:

- Kolo za napajanje sistema električnom energijom
- Četiri kondenzatora, koji imaju ulogu akumulatora
- Kontrolna jedinica
- Jedinica za iniciranje pražnjenja (generator inicijalnog i okidnog impulsa)
- Visokonaponski prekidač (ignitron, tiratron ili spark gap)

Detaljno je opisano princip rada, karakteristike, kao i nedostatci ovih uređaja. Spark gap predstavlja aktuelan tip prekidača u eksperimentalnom uređaju i na ovaj tip prekidača je obraćena posebna pažnja. Analizirane su tri konstrukcije spark gap prekidača. Može se zaključiti da ovaj tip prekidača obezbeđuje pouzdan rad sistema za pražnjenje. Nedostatak ovakvog prekidača je relativno kratak vek rada usled problemom sa erozijom elektroda. Opisane su mogućnosti kako da se produži radni spark gapa.

LITERATURA

- [1] S. Đurović, Odnos specifičnih toplota vodonične plazme u lokalnoj termodinamičkoj ravnoteži, Magistarski rad, Beograd (1982).
- [2] Z. Nađ, Automatska kontrola sistema za impulsno gasno pražnjenje, Master rad, Novi Sad (2013)
- [3] Elaborat o izvoru plazme, Laboratorija za fizičku elektroniku, Novi Sad, 1980
- [4] Z. Mijatović, Diplomski rad, Prirodno-matematički fakultet Univerziteta u Novom Sadu (1983)
- [5] N. Andrić, Generator impulsa sa tiratronom, diplomski rad, Novi Sad (1974)
- [6] John Pasley, Pulse Power Switching Devices - An Overview (1996)
- [7] Ignitrons in capacitor discharge and crowbar service, General Electric, PT-50, 12-60
- [8] Hydrogen Thyratrons English Electric Valve Company LTD, FX1/5. June 1964
- [9] Kunshan GuoLi Vacuum Electric Co. Ltd, Introduction of Hydrogen Thyratrons, 2013
- [10] <http://www.e2v.com/download.cfm?type=document&document=613>
- [11] Electromechanically triggered spark gap switch, EP 0300599 A1
- [12] W. D. Bunting Jr., Reliable spark gap for capacitor bank switching, Ohio 1963
- [13] Essam Nasser. Fundamental of Gaseous Ionization and Plasma Electronics. Wiley-Interscience, 1971.
- [14] Ionization and breakdown in gases, F. Llewellyn Jones, University of Wales, 1966
- [15] C. James, Evaluation of a high Pressure, coaxial spark gap for pulse ring down applications, Master thesis, Texas 2007
- [16] Hansjoachim Bluhm. Pulsed Power Systems: Principles and Applications, Springer, 2006.
- [17] Anthony L. Donaldson. Electrode Erosion in High Current, High Energy Transient, Arcs. PhD thesis, Texas Tech University, 1990.
- [18] G. S. Belkin. Dependence of electrode erosion on heat flux and duration of current flow. Sov. Phys. Tech., 1971.
- [19] http://www.engineersedge.com/properties_of_metals.htm

BIOGRAFIJA



Šandor Hegediš, rođen je 06.05.1982. godine u Senti. Osnovnu školu je završio u Bačkom Petrovom Selu. Nakon toga se upisao u gimnaziju u Bečeju koju je završio 2001. godne. Posle je upisao osnovne studije na smeru „diplomirani fizičar“, Departmana za fiziku, Prirodno - matematičkog fakulteta u Novom Sadu. Zvanje diplomirani fizičar je stekao 2009. godine. Iste godine upisao je master studije, takođe na Prirodno – matematičkom fakultetu.