

D-372

UNIVERZITET U NOVOM SADU
Prirodno-matematički fakultet
Institut za fiziku

УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

ПРИМЉЕНО	21 VII 1998
ОРГАНИЗУЈЕД	Б. Р. О. Ј.
0603	9/200

Dunja Bulajić

**Merenje brzine fronta udarnog talasa
u modifikovanoj T- cevi**

diplomski rad

Novi Sad, 1998.

Ovaj rad je rađen u Laboratoriji za fizičku elektroniku Instituta za fiziku PMF u Novom Sadu pod rukovodstvom prof. dr Božidara Vujičića.

Rukovodiocu rada prof. Božidaru Vujičiću zahvaljujem na dragocenoj pomoći i stvorenoj atmosferi uvažavanja i kolegijalnosti koji su mi rad učinili lakim a vreme provedeno u LFE prijatnim.

SADRŽAJ

Uvod	1
1. Udarne talase	3
1.1. Rankin - Igouove jednačine	3
1.2. Dobijanje udarnih talasa	7
2. Eksperimentalni uređaj	10
2.1. Električni sistem	10
2.2. Kolo za iniciranje pražnjenja u T-cevi	12
2.2.1 Komparator	12
2.2.2. Generator inicijalnog impulsa	13
2.2.3. Generator okidnog impulsa	15
2.3 Modifikovana T-cev	17
3. Merenje brzine udarnog fronta	19
3.1. Metod merenja	19
3.2. Rezultati merenja i diskusija	21
Zaključak	23
Literatura	24

U V O D

Udarnim talasom se naziva diskontinuitet u parametrima elastične sredine koji se prostire brzinom većom od brzine zvuka u toj sredini.

Veliki broj pojava u Vasioni ili bliskom okruženju Zemlje, u tehnici i tehnologiji, a posebno u nauci vezan je za pojavu udarnih talasa. Neki problemi kosmogonije, evolucije zvezda, transporta energije u zvezdama, zagrevanja sunčeve hromosfere i drugi mogu se objasniti pojavom udarnih talasa [1-3]. Tehnika i tehnologija vezana za uslove kretanja nadzvučnih letelica (raketna tehnika, avio industrija), pojave jakih eksplozija i njihovi učinci (vojne primene, otpornost materijala) su oblasti u kojima su udarni talasi važan fenomen.

Poseban značaj, međutim, udarni talasi imaju u fizici, pogotovo u fizici jonizovanog gasa (plazme). Činjenica da se, prolaskom jakih udarnih talasa, gas iza fronta udarnog talasa intenzivno zagreva, koristi se za dobijanje visoko jonizovanog gasa ili dodatno zagrevanje visokotemperaturske plazme u mnogim laboratorijskim uređajima (plazma tehnologije, fuzionna istraživanja) [4,5].

Prva sistematska istraživanja karakteristika udarnih talasa i efekata koje izazivaju u sredini kroz koju se prostiru, započeta su krajem tridesetih godina. Interes za ove pojave naglo je porastao tokom četrdesetih godina, pre svega zbog vojnih potreba. U to vreme su se mehaničke udarne cevi počele koristiti kao izvori udarnih talasa. Uvođenje udarnih cevi dalo je mogućnost da se proizvedu reproducibilni udarni talasi sa zadatim parametrima što je dalo impuls istraživanju ove pojave [6].

Pojava elektromagnetne udarne cevi (T-cev) krajem pedesetih godina [7] dovodi do široke primene udarnih cevi kao izvora plazme proizvedene udarnim talasom. Razlog za ovo bio je jednostavna i jeftina konstrukcija ali i velika brzina ponavljanja i mogućnost dobijanja udarnih talasa mnogo veće jačine u odnosu na mehaničke udarne cevi.

Paralelno sa razvojem udarnih cevi razvijani su različiti metodi za eksperimentalno određivanje parametara udarnog talasa. To su po pravilu optički metodi zasnovani na detektovanju gradijenta gustine pri prolasku udarnog talasa (interferometrija, Širen fotografija), na detektovanju svetlećeg fronta jakog udarnog talasa vremenski razloženom fotografijom (strik fotografija) ili brzom fotografijom [8-10]. Razvojem spektroskopije plazme, posebno metoda vezanih za širenje spektralnih linija u plazmi, spektroskopske metode postaju nezamenljive u istraživanjima vezanim za udarne talase [11]. Kako, međutim, ove cevi daju veoma homogenu plazmu koja zadovoljava kriterijume lokalne termodinamičke ravnoteže, udarne cevi (posebno T-cev) predstavljaju značajne izvore za spektroskopska istraživanja plazme.

Brzina fronta udarnog talasa je veličina koja određuje sve parametre sredine iza fronta udarnog talasa (gustinu, pritisak, temperaturu itd.). Kako se ovi parametri, korišćenjem Rankin – Igonioovih jednačina, mogu eksplicitno izraziti preko brzine fronta udarnog talasa, to je poznavanje brzine fronta od posebne važnosti za razmatranje uslova prostiranja i efekata udarnih talasa.

Direktno merenje brzine fronta udarnog talasa do sada je omogućavala samo strik fotografija, što zahteva skupu i teško dostupnu opremu.

Cilj ovog rada je određivanje brzine fronta udarnog talasa u modifikovanoj T-cevi duž ose cevi u zavisnosti od pritiska gasa i napona na elektrodama.

U radu je korišćen direktan metod za određivanje brzine fronta udarnog talasa zasnovan na merenju vremena prostiranja svetlećeg fronta udarnog talasa. Navedeni metod predstavlja nešto izmenjeni i usavršeni metod opisan u [12,13]. Opisani metod je lako realizovati, pouzdan je i omogućava prostornu rezoluciju koja je ista ili bolja od rezolucije dobijene korišćenjem strik fotografije.

Udarni talasi su proizvođeni u elektromagnetnoj udarnoj T-cevi punjenoj vodonikom koja predstavlja standardni izvor plazme u Laboratoriji za fizičku elektroniku Instituta za fiziku PMF u Novom Sadu [14]. T-cev je izmenjena i modifikovana u cilju proučavanja slobodnog prostiranja udarnih talasa, a u ovom radu su data prva merenja u tako izmenjenoj tj. modifikovanoj T-cevi [15].

Kako je u postojećem uređaju sistem za kontrolisano pražnjenje kroz T-cev bio nedovoljno reproducibilan, konstruisan je i kalibrisan novi komparator čime je omogućeno veoma reproducibilno pražnjenje pri zadatom naponu.

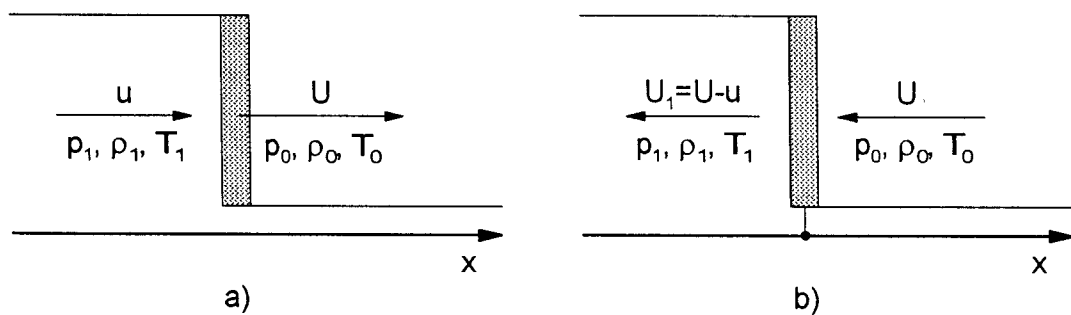
Kako je u poslednjih nekoliko godina na uređajima i sklopovima vezanim za T-cev izvršen veliki broj izmena i modifikacija, u radu su detaljno opisani svi sklopovi i uređaji na sadašnjoj postavci ovog eksperimenta.

1. UDARNI TALASI

1.1. RANKIN – HUGONIOVE JEDNAČINE

Udarnim talasom se naziva diskontinuitet u parametrima sredine (gustina ρ , pritisak p , temperatura T) koji se prostire kroz sredinu brzinom većom od brzine zvuka u toj sredini. U zavisnosti od načina izazivanja poremećaja tj. oslobađanja energije (u tački, duž neke ose ili duž neke beskonačne površine) udarni talasi mogu biti sferni, cilindrični ili ravni. Površina na kojoj parametri fluida trpe skok naziva se front udarnog talasa (udarni front) [3-6].

Neka se ravan udarni talas kreće kroz fluid koji miruje, brzinom U duž x ose (slika 1.1a) menjajući parametre sredine ρ_0, p_0, T_0 ispred udarnog fronta u ρ_1, p_1, T_1 iza fronta.



Slika 1.1

Transformacija energije uredenog kretanja čestica gasa u energiju haotičnog (toplotnog) kretanja proporcionalna je gradientima odgovarajućih parametara (gustina, temperatura, brzina) sredine. Kako su unutar fronta udarnog talasa ovi gradienti veoma veliki, jasno je da će pomenuta transformacija da se odigrava baš u frontu udarnog talasa. Jasno je takođe da udarni front realno ne predstavlja površinu "na kojoj parametri fluida trpe skok", već ima konačnu debljinu. Debljina udarnog fronta je određena disipativnim procesima u datom fluidu. U relativno gustim gasovima ili plazmi u kojima su viskoznost i toplotna provodljivost izraženi, dolazi do neposredne transformacije kinetičke energije u toplotu pa je debljina udarnog fronta reda veličine dužine slobodnog puta čestica. U razređenoj (beskolizionoj) plazmi, međutim, direktna transformacija nije moguća već prolazak udarnog talasa pobuđuje različite tipove oscilacija (magnetohidrodinamičke, plazmene itd.) posredstvom kojih se zatim odvija pomenuta transformacija i grejanje plazme. Debljina fronta udarnog talasa u ovom slučaju je reda veličine rastojanja na kome se pobuđuju pomenute oscilacije [4].

Ako se brzina strujanja fluida iza fronta obeleži sa u , a referentni sistem veže za front udarnog talasa (slika 1.1b), U je tada brzina kojom nepeturbovani fluid "utiče" u diskontinuitet, a $U_1 = U - u$ brzina kojom se fluid, sabijen i zagrejan prolaskom kroz udarni front, udaljava od fronta.

Ako je posmatrani talas stacionaran ($U = \text{const.}$) tada, u koordinatnom sistemu vezanom za front udarnog talasa, sve relevantne veličine zavise samo od x koordinate i jednačine dinamike fluida dobijaju jednostavan oblik.

Koristeći jednačinu kontinuiteta $\rho v = \text{const.}$, sledi:

$$\rho_0 U = \rho_1 U_1 = \rho_1 (U - u) \quad (1.1.)$$

a na osnovu jednačine kretanja $\rho(dv / dt) = - \text{grad } p$ sledi:

$$\rho v \frac{dv}{dx} = - \frac{dp}{dx}$$

pa je, vodeći računa o $\rho v = \text{const.}$ u ovom slučaju:

$$p_0 + \rho_0 U^2 = p_1 + \rho_1 U_1^2 \quad (1.2.)$$

Ako se na udarnom frontu energija ne rasipa zračenjem, zakon održanja energije ima oblik:

$$\frac{1}{2} \rho v^2 + P + \rho \varepsilon = \text{const.}$$

gdje je ε unutrašnja energija jedinice mase fluida. Za slučaj prikazan na slici 1.1b ovaj zakon ima oblik

$$\varepsilon_0 + \frac{p_0}{\rho_0} + \frac{U^2}{2} = \varepsilon_1 + \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{U_1^2}{2} \quad (1.3.)$$

Jednačine (1.1.-1.3.) predstavljaju Rankin – Hugoniotove jednačine i zajedno sa jednačinom stanja (ako je u pitanju idealni gas)

$$\frac{p_i}{\rho_i T_i} = \text{const.} \quad (i = 0, 1) \quad (1.4.)$$

i kaloričkom jednačinom

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\gamma - 1} \cdot \frac{p_i}{\rho_i}; \quad \gamma = \frac{c_p}{c_v}; \quad i = 0, 1 \quad (1.5.)$$

čine sistem jednačina iz koga se mogu odrediti veličine iza fronta udarnog talasa (indeksi 1) ako su poznati parametri neperturbovanog gasa (indeksi 0).

Pri analizi navedenog sistema jednačina (1.1–1.5) korisno je uvesti bezdimenzione parametre [3,6]

$$M = \frac{U}{v_z} = U \left(\gamma \frac{\rho_0}{p_0} \right)^{-1/2}; \quad X = \frac{\rho_1}{\rho_0}; \quad Y = \frac{p_1}{p_0} \quad (1.6.)$$

gde je M Mahov broj koji predstavlja odnos brzine fronta udarnog talasa i brzine zvuka v_z u fluidu, a X i Y parametar kompresije i jačina udarnog talasa.

Korišćenjem bezdimenzionih parametara (1.6) i jednačina (1.1 – 1.5) lako se dobijaju odnosi parametara ispred i iza fronta udarnog talasa u obliku [3]

$$X = \frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{(\gamma + 1)M^2}{(\gamma - 1)M^2 + 2} \quad (1.7)$$

$$Y = \frac{p_1}{p_0} = \frac{2\gamma M^2 - (\gamma - 1)}{\gamma + 1} \quad (1.8)$$

$$\frac{Y}{X} = \frac{T_1}{T_0} = \frac{[2\gamma M^2 - (\gamma - 1)][(\gamma - 1)M^2 + 2]}{(\gamma + 1)^2 M^2} \quad (1.9)$$

U slučaju jakih udarnih talasa kada je $U \gg v_z$ odnosno $M \gg 1$ dobija se:

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{(\gamma + 1)}{(\gamma - 1)} \quad (1.10)$$

$$\frac{p_1}{p_0} = \frac{2\gamma M^2}{\gamma + 1} \quad (1.11)$$

$$\frac{T_1}{T_0} = \frac{2\gamma(\gamma - 1)M^2}{(\gamma + 1)^2} \quad (1.12)$$

Ako je u pitanju idealan jednoatomski gas ($\gamma = c_p/c_v = 5/3$) prethodne jednačine daju:

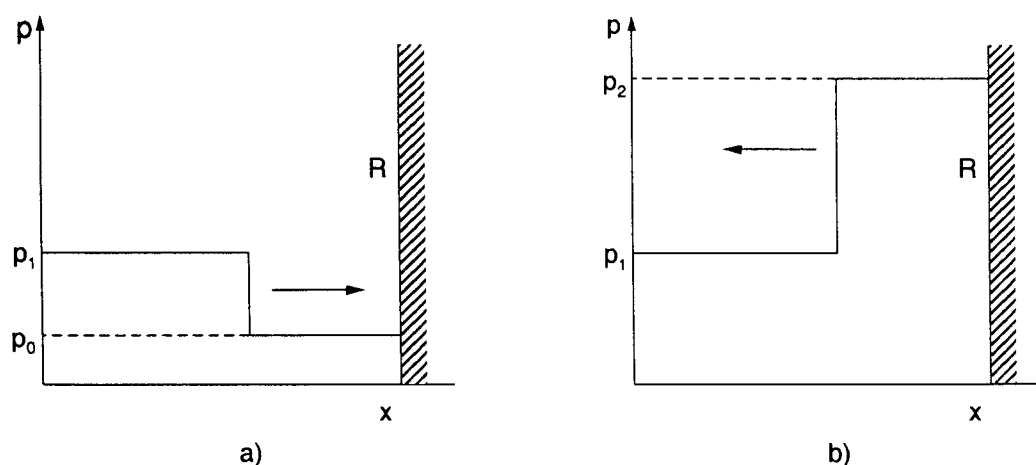
$$\rho_1 = 4\rho_0; \quad p_1 = \frac{3}{4}\rho_1 U^2; \quad T_1 = T_0 \frac{3\mu_1 U^2}{16R_*} \quad (1.13)$$

gde je μ bezdimenziona srednja molekulska masa gasa, a $R_* = R / m_H N_A$ [3].

Očigledno je da je sažimanje gasa ograničeno na četvorostruku vrednost gustine neperturbovanog fluida, dok pritisak i temperatura rastu sa kvadratom Mahovog broja tj. sa kvadratom brzine udarnog fronta.

Značajno povećanje jačine udarnog talasa može se ostvariti refleksijom od nepokretnog zida – reflektora.

Neka se udarni talas jačine $Y = p_1/p_0$ kreće kao na slici 1.2a. Talas se reflektuje od reflektora R (slika 1.2b) kao udarni talas sa jačinom p_2/p_1 , gde je p_2 ukupni pritisak u reflektovanom talasu.



Slika 1.2

Korišćenjem Rankin – Igonioovih jednačina i vodeći računa da su pri refleksiji od krutog reflektora brzine strujanja gasa iza fronta incidentnog talasa u i reflektovanog talasa u_r , lako je pokazati da je jačina reflektovanog talasa, izražena preko odnosa nadpritisaka, data kao:

$$Y_r = \frac{p_2 - p_0}{p_1 - p_0} = \frac{(2K + 1)Y + 1}{KY + 1} \quad (1.14)$$

gde je $K = (\gamma - 1)/(\gamma + 1)$

Y_r raste sa jačinom incidentnog talasa dostižući vrednost $2 + 1/K$ za jake udarne talase tj. za $Y \gg 1$. Pri ovom, temperatura iza fronta reflektovanog talasa raste za faktor $3 - 1/K$ što je lako pokazati korišćenjem jednačina (1.8) i (1.9) koje daju vezu $T_1 / T_0 = f(Y)$.

Iz navedenog je jasno da dobijanje visokotemperaturnog gasa korišćenjem jakih udarnih talasa podrazumeva refleksiju incidentnog talasa na kraju udarne cevi nezavisno od načina proizvodnje incidentnog udarnog talasa.

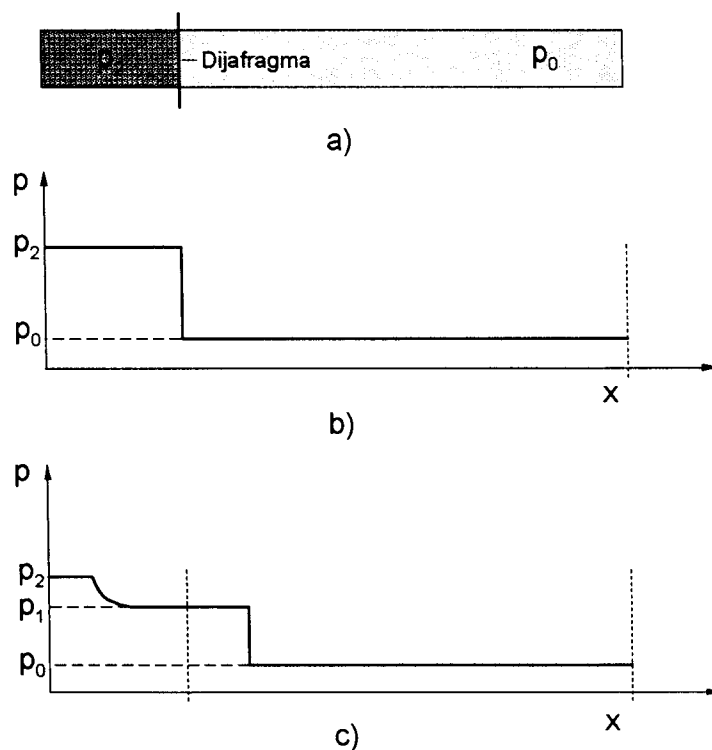
Kada se udarni talas prostire kroz provodni fluid (jonizovani gas npr.) u magnetnom polju, Rankin - Igonioove jednačine se moraju modifikovati. Konkretni oblik ovih jednačina zavisi od geometrije magnetnog polja i prostornog odnosa između magnetnih linija sile i ravni udarnog fronta. Ako se udarni front kreće u pravcu linija sile, jasno je da magnetno polje nema nikakvog uticaja na kretanje fluida i karakteristike udarnog talasa. Ako su međutim, magnetne linije sile paralelne udarnom frontu tj. ako se udarni talas kreće normalno na linije sile magnetnog polja, polje će bitno uticati na kretanje udarnog talasa i karakteristike fluida.

Za slučaj homogenog magnetnog polja, Rankin - Igonioove jednačine date su u [4]. Može se pokazati da su jačina udarnog talasa, parametar kompresije i zagrevanje gasa iza fronta udarnog talasa značajno manji u prisustvu magnetnog polja u odnosu na vrednosti van magnetnog polja. O navedenim posledicama kao i činjenici da udarni talas menja karakteristike samog magnetnog polja se mora voditi računa pogotovu za relativno velike vrednosti magnetne indukcije [11,13].

1.2 DOBIJANJE UDARNIH TALASA

Udarni talas u datoj sredini može biti izazvan na različite načine. Nagla promena parametara sredine može biti posledica eksplozije (brza promena pritiska izazvana klasičnim ili nuklearnim eksplozivom, eksplodirajućim provodnikom, optičkim probojem u gasu itd.), brzog povećanja magnetskog pritiska (slučaj udarne kompresije u jonizovanom gasu) ili u posebnim uređajima koji se nazivaju udarne ili šok cevi.

Mehanička udarna cev (slika 1.3a) predstavlja dugačak cilindar podeljen na dva dela membranom sa osobinom da puca pri zadatom pritisku. Deo cevi levo od membrane naziva se kompresiona komora i sadrži gas na visokom pritisku p_2 u odnosu na pritisak p_0 u ekspanzionoj komori (slika 1.3b). U momentu pucanja membrane, nastaje udarni talas čiji se front kreće kroz ekspanzionu komoru u smeru x ose (slika 1.3c). Udarni talas se reflektuje od čeonog zida povećavajući svoju jačinu kako je opisano jednačinom (1.14).



Slika 1.3

Gas u kompresionoj komori (pogonski gas) ne mora biti isti kao radni gas u ekspanzionoj komori. U zavisnosti od vrste gasa, načina na koji se inicira pucanje membrane i geometrijskog oblika cevi postoji veliki broj tipova mehaničkih udarnih cevi. Svima njima je zajedničko, međutim, da mogu proizvesti udarne talase čija brzina udarnog fronta ne prelazi $M = 20$ pri pritisku radnog gasa reda 100 Pa pri čemu je brzina ponavljanja veoma mala sa obzirom da se sa jednom dijafragmom i jednim punjenjem gasa može proizvesti samo jedan udarni talas [6].

Elektromagnetna udarna cev ili T-cev kako se zbog svog oblika obično naziva, prevazilazi navedena ograničenja i može proizvesti udarne talase sa brzinama do oko $M = 200$ i velikom brzinom ponavljanja što zavisi od parametara spoljašnjeg električnog kola [6,7].

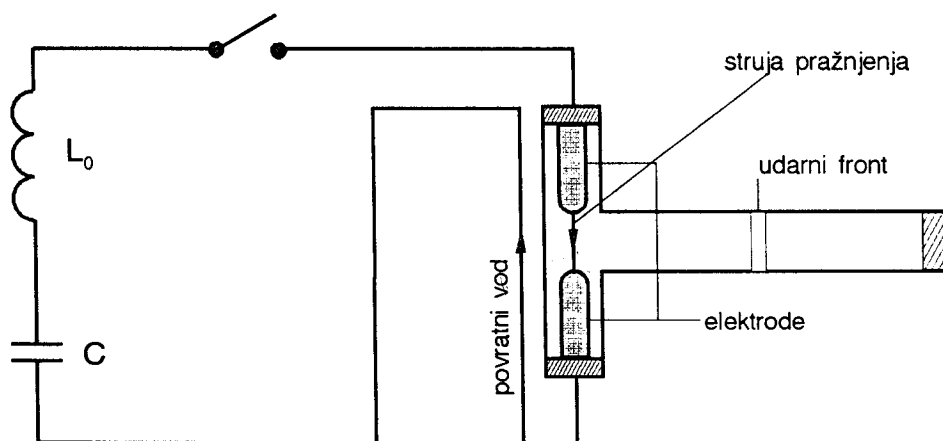
Neka se visokonaponska niskoinduktivna baterija kondenzatora C isprazni između elektroda u cevi T oblika (slika 1.4), koja je napunjena gasom do željenog pritiska. Interakcija između struje pražnjenja u cevi i struje kroz povratni vod (ili na drugi način stvorenog spoljašnjeg magnetnog polja) daje silu tj. generiše udarni talas čiji se front kreće kroz duži deo T-cevi. Na kraju cevi, po pravilu se postavlja reflektor koji, kako je opisano, značajno povećava jačinu udarnog talasa.

Ako se pretpostavi da su elektrode dve ravne planparalelne ploče na rastojanju d i da je električno kolo sa slike 1.4 niskoinduktivno, može se uzeti da je struja pražnjenja konstantna u toku vremena potrebnog da elektromagnetna sila odgurne plazmoid nastao pražnjenjem između elektroda, dovoljno daleko od međuelektrodnog prostora. Uz ovu (dosta grubu) pretpostavku lako se dobija zavisnost brzine udarnog fronta od napona pražnjenja V i gustine (ili pritiska) gasa u cevi ρ_0 , u obliku [6]

$$U^4 = k \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{V}{d} \right)^2 \quad (1.15)$$

gde je k konstanta koja zavisi od geometrije (dimenzija elektroda i oblika povratnog voda).

Vodeći računa da je gornja jednačina dobijena polazeći od pretpostavke o konstantnosti struje pražnjenja može se očekivati da zavisnost (1.15) daje samo kvalitativnu vezu između brzine fronta, napona napajanja i gustine gasa.



Slika 1.4

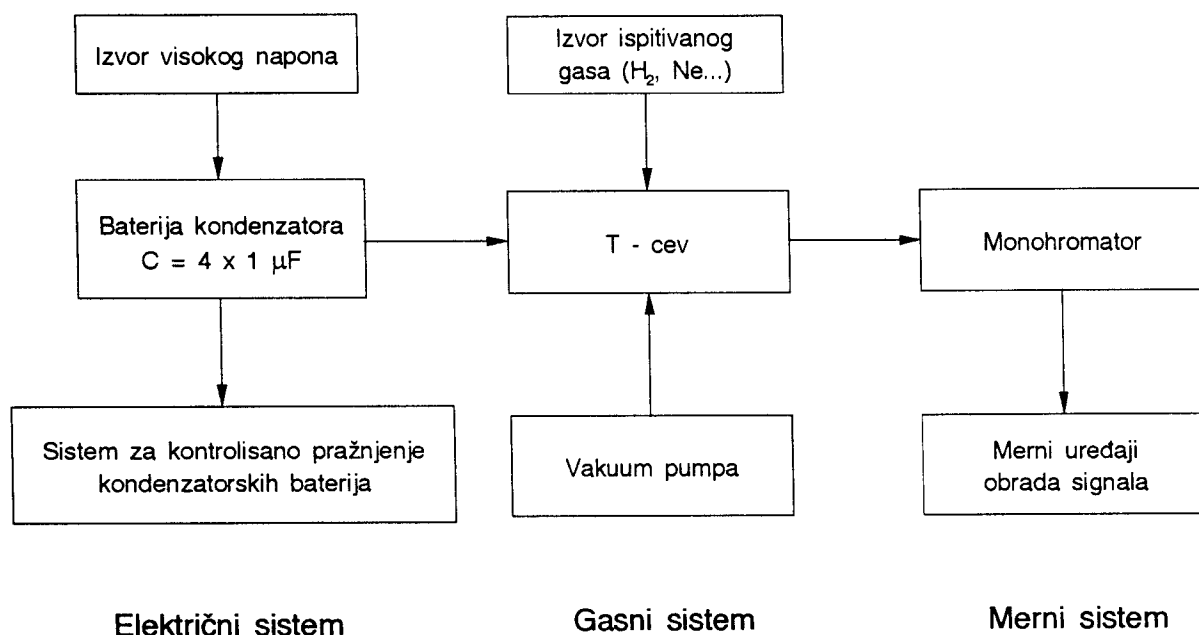
Važenje rezultata koje daju rešenja Rankin - Igonioovih jednačina proveravano je u nizu eksperimenata sa udarnim cevima. Generalno govoreći, ta rešenja ne daju zadovoljavajuće rezultate. Neslaganja između izmerenih i teorijskih vrednosti su posledica pretpostavki koje su uvedene pri izvođenju jednačina, pre svega zanemarivanja disipacije energije na udarnom frontu radijativnim putem, ali i zbog prisustva drugih efekata koji su zanemareni pri izvođenju Rankin - Igonioovih jednačina. U elektromagnetnoj T-cevi naprimer, za vodonik i helijum, pri pritiscima oko 130 Pa i na udaljenosti oko dva prečnika cevi od mesta pražnjenja, izmerena je temperatura za oko dva puta viša u odnosu na vrednost koju daje jednačina (1.13), a značajna neslaganja su utvrđena i za ostale parametre [12 i literatura citirana u 12]. Naizgled kontradiktoran rezultat vezan za temperaturu može se objasniti postojanjem radijativnog prenosa energije od inicijalnog pražnjenja u gas ispred udarnog fronta kao i zagrevanjem okolnog gasa usled električnog pražnjenja.

Pri pritiscima reda 10^2 Pa i električnim parametrima spoljašnjeg kola koji su uobičajeni za male T-cevi, $C = (1-10) \mu\text{F}$ i $V = (10-20) \text{ kV}$, tipične brzine udarnog fronta su reda $10 \times 10^3 \text{ m/s}$, temperature iza fronta udarnog talasa $(10-30) \text{ kK}$, a koncentracija naelektrisanih čestica reda 10^{23} m^{-3} [10-12].

2. EKSPERIMENTALNI UREĐAJ

Ekperimentalni uređaj korišćen u ovom radu za dobijanje udarnih talasa predstavlja neznatno modifikovani uređaj koji se u laboratoriji za fizičku elektroniku već dugo koristi kao izvor plazme [11,12].

Kompletan uređaj za dobijanje i ispitivanje plazme proizvedene u T-cevi sastoji se iz tri osnovna sklopa (slika 2.1): električnog, gasnog i mernog.



Slika 2.1

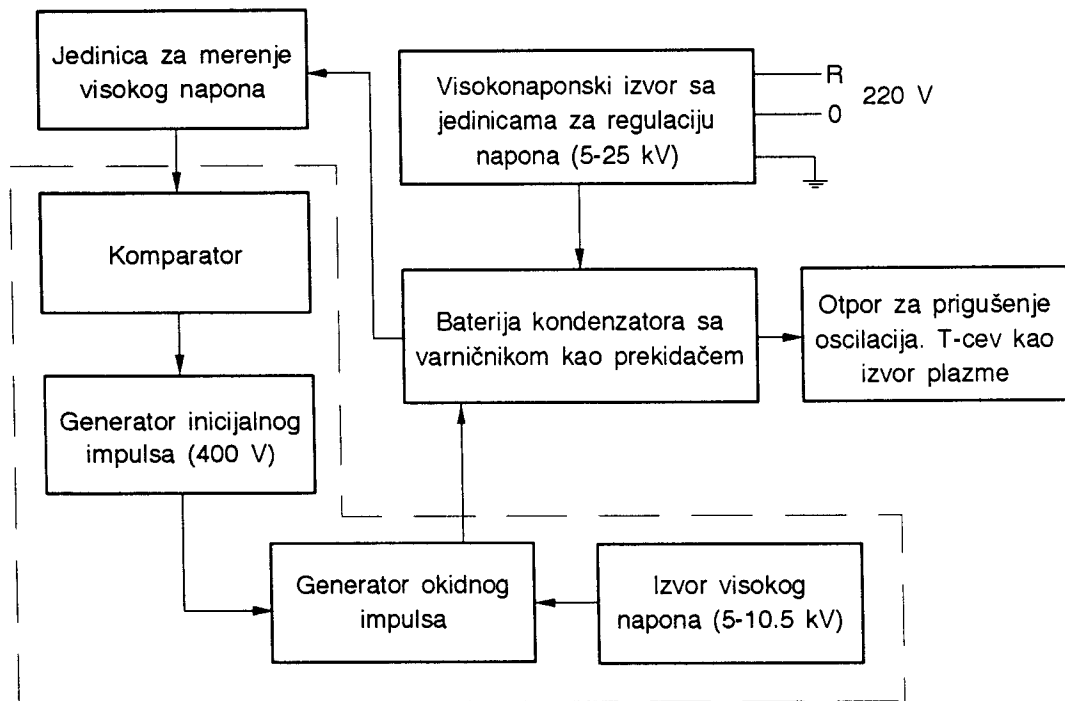
Električni sistem sastoji se od kola za napajanje visokim naponom, baterije niskoinduktivnih kondenzatora i elektronike za kontrolisano pražnjenje baterije kondenzatora.

Gasni sistem koji služi za vakumiranje celog sistema i dovođenje pritiska radnog gasa na željenu vrednost detaljno je opisan u [12].

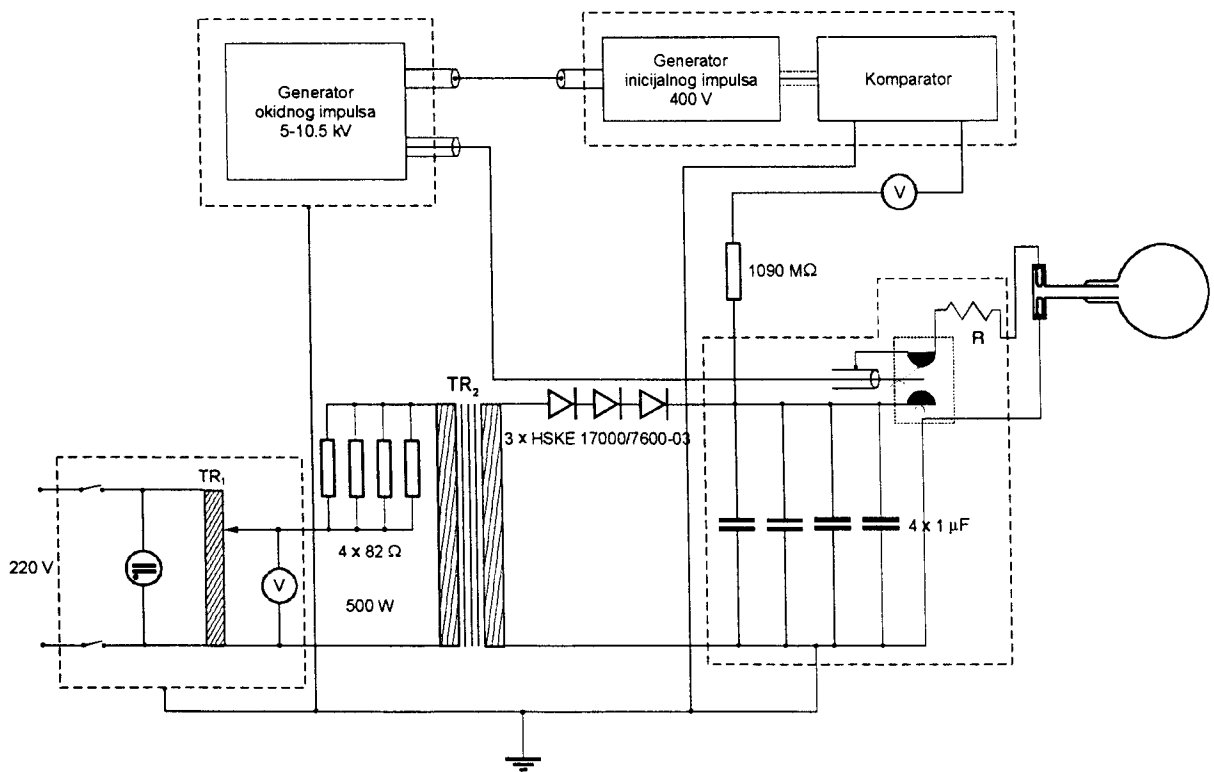
Merni sistem zavisi od namene uređaja i sastoji se od monohromatora, fotomultiplikatora ili drugih detektora i mernih uređaja za prikupljanje i obradu podataka.

2.1. ELEKTRIČNI SISTEM

Blok šema električnog sistema prikazana je na slici 2.2 i nešto detaljnije na slici 2.3. Baterija kondenzatora se napaja iz visokonaponskog izvora koristeći jedinicu za regulaciju napona (slika 2.3) pri čemu otpornik u primaru visokonaponskog transformatora TR₂ služi za ograničenje struje punjenja kondenzatora. Napon punjenja direktno se meri voltmetrom V korišćenjem visokonaponske sonde. Izmereni napon vodi se na komparator čija je uloga da pri zadatom naponu baterije inicira generator inicijalnog impulsa koji na svom izlazu daje



Slika 2.2



Slika 2.3

naponski impuls od oko 400 V sa veoma kratkim vremenom porasta. Ovim impulsom se inicira visokonaponski impuls u generatoru okidnog impulsa kojim se vrši okidanje varničnika i pražnjenje baterije kako je na slici 2.3 prikazano.

Snažni neinduktivni otpornik R odabran je tako da RLC kolo koje se sastoji od baterije kondenzatora, varničnika, T-cevi i niskoinduktivnih vodova bude kritično prigušeno. Ovo obezbeđuje da se energija kondenzatora isprazni u prvoj poluperiodi i eliminiše pojavu inverznih napona koji skraćuju vreme života kondenzatora.

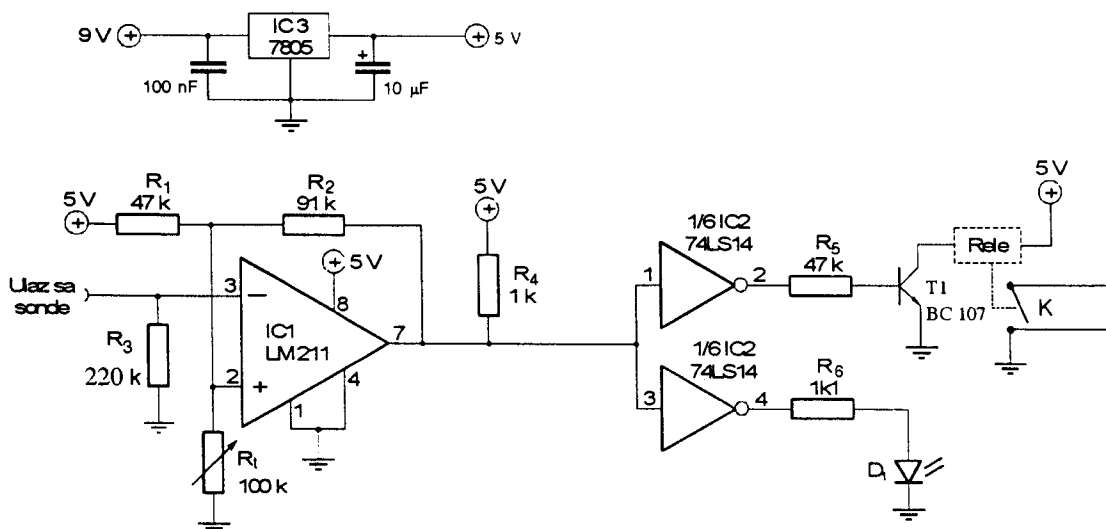
2.2. KOLO ZA INICIRANJE PRAŽNJENJA U T- CEVI

Kolo za iniciranje pražnjenja u T-cevi, kako je na blok šemi (slika 2.2) prikazano, sastoji se od jedinice za merenje visokog napona, komparatora, generatora inicijalnog impulsa 400 V i generatora okidnog impulsa sa pripadajućim izvorom visokog napona.

Zadatak ovih elektronskih sklopova je da pri izabranom naponu izvrši pouzdano i reproducibilno pražnjenje kondenzatorske baterije. Napon na bateriji se meri voltmetrom V (Iskra Unimer-1) unutrašnjeg otpora $10\text{ M}\Omega$ pomoću visokonaponske sonde na opsegu 300 V, tako da jednom kilovoltu na bateriji odgovara 10 V na skali instrumenta.

2.2.1. KOMPARATOR

Napon sa visokonaponske sonde vodi se na ulaz preciznog komparatora (slika 2.4) koji upoređuje izmereni napon sa visokostabilnim podesivim referentnim naponom.



Slika 2.4

Otpornik R_1 i potencijometar R_f sačinjavaju razdelnik napona kojim je određen prag okidanja komparatora, a preko otpornika R_2 ostvaruju se pozitivna povratna sprega, kojom se obezbeđuje histerezis pri prebacivanju izlaza komparatora sa visokog na niski naponski nivo i obrnuto i na taj način se sprečava oscilovanje kontakata relea. Otpornik R_3 zajedno sa visokonaponskom sondom i voltmetrom (vidi sliku 2.3) sačinjava razdelnik napona kojim se napon sa ulaza sonde slabi za oko 2×10^3 puta, dok otpornik R_4 obezbeđuje da izlaz komparatora bude kompatibilan sa ulazima TTL kola.

Dokle god je na invertujućem ulazu napon niži od referentnog, izlaz komparatora će biti na visokom naponskom nivou. Porast napona na invertujućem ulazu iznad vrednosti podešene sa R_t na neinvertujućem ulazu (prag okidanja), prebacuje izlaz komparatora na niski naponski nivo. Zbog toga se koriste invertori IC2 koji obezbeđuju da tranzistor T bude provodan kada je na invertujućem ulazu komparatora napon jednak ili viši od referentnog. LED D_1 služi kao indikator da je tranzistor T_1 u provodnom stanju, odnosno da je rele uključen. Ručica potenciometra R_t izvedena je na prednju ploču uređaja, a obrtna skala proizvodno podijeljena na 36 podeljaka.

Sa elementima kola prikazanim na slici 2.4 merenjem je određen prag okidanja komparatora. Izmerene vrednosti date su u tabeli 1.

Tabela 1

Podeok	U [kV]	Podeok	U [kV]	Podeok	U [kV]
7	8.5	15	13.0	23	15.5
8	9.2	16	13.5	24	15.7
9	9.8	17	13.7	25	16.0
10	10.5	18	14.0	26	16.2
11	11.2	19	14.4	27	16.5
12	11.7	20	14.7	28	16.7
13	12.2	21	15.0	29	17.0
14	12.7	22	15.2	30	17.2

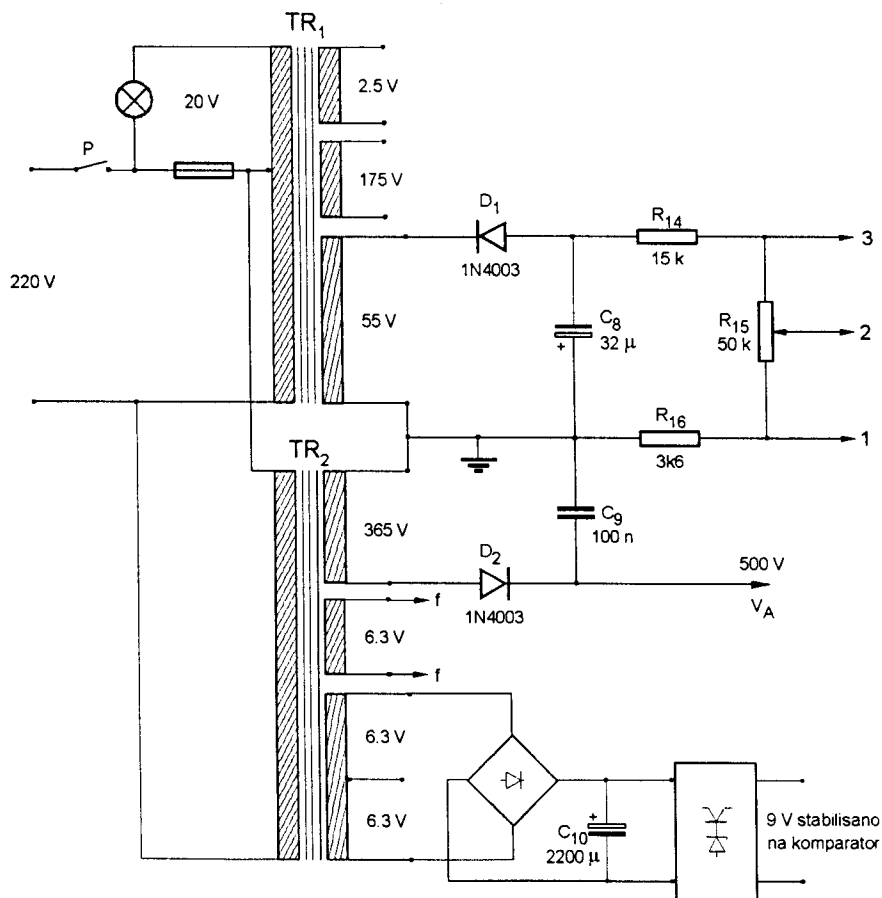
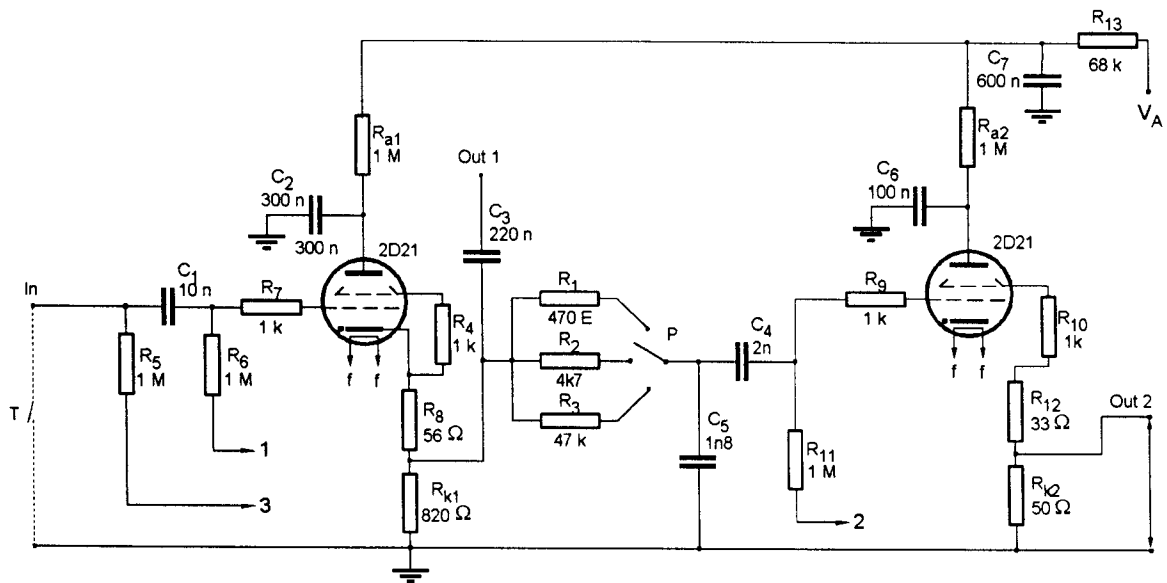
2.2.2. GENERATOR INICIJALNOG IMPULSA

Izlaz sa komparatora vodi se na generator inicijalnog impulsa čija je uloga, kako je napomenuto, da u momentu dostizanja unapred odabranog napona baterije generiše električni impuls vršne vrednosti oko 400 V sa veoma kratkim vremenom porasta (reda 10 ns). Njegova električna šema prikazana na slici 2.5. Ovo kolo funkcioniše na sledeći način [16].

Kada je kontakt relea K na izlazu komparatora ili taster T (za ručno iniciranje pražnjenja) otvoren, prvi tiratron je neprovodan. Preko otpora R_6 i R_7 fiksni negativni potencijal formiran na razdelniku napona R_{14} , R_{15} , R_{16} dovodi se na upravljačku rešetku prvog tiratrona. Ona je zbog toga na potencijalu $V_{G1} = -4.1$ V što odgovara neprovodnom režimu tiratrona. Na sličan način se, sa tačaka 3 i 1 istog razdelnika napona, na kondenzatoru C_1 formira razlika potencijala V_{31} koje je približno jednaka -58 V.

Zatvaranjem tastera T, potencijal tačke In opada od potencijala tačke 3 koji je negativan i iznosi -62 V, na nulu. Ovo je ekvivalentno dovodenju pozitivnog impulsa istog napona na upravljačku rešetku. Ovaj impuls, koji se prenosi preko kondenzatora C_1 i otpornika R_7 , dovodi prvi tiratron u provodno stanje. Kroz njega proteče struja i na otporniku R_{K1} se javlja pozitivan impuls amplitude V_A umanjen za pad napona na otporniku R_8 . Kako je tiratron gasna cev sa veoma kratkim vremenom porasta, ovaj pozitivni impuls, koji se vodi na Out 1, ima vreme porasta 10 ns čime u potpunosti ispunjava postavljene zahteve.

Zbog velike brzine porasta ovakvi impulsi se često koriste za trigerovanje pratećih elektronskih sklopova i mernih uređaja. Korisno je zbog toga, u eksperimentalnim uređajima ovog tipa, realizovati sklop pomoću koga se može ostvariti kontrolisano kašnjenje ovog impulsa. Da bi ostvarili kašnjenje, impuls se vodi na integrator – serijska veza jednog od otpora R_1 , R_2 , R_3 i kondenzatora C_5 . Integrisani signal se uzima sa C_5 i preko C_4 i R_9



Slika 2.5

odvodi na upravljačku rešetku drugog tiratrona koji postaje provodan kada V_{G2} dostigne napon paljenja V_p .

Trenutak formiranja impulsa na otporniku R_{k2} zavisi od vremenske konstante integratora i položaja klizača potencijometra R_{15} na razdelniku napona, jer je potrebno da se napon na kondenzatoru C_5 promeni od 0 do neke pozitivne vrednosti V_i . Zbog toga se sa

desne strane kondenzatora C_4 napon menja od V_2 do $V_i + V_2$ i dostiže vrednost napona paljenja drugog tiratrona. On postaje provodan i na otporniku R_{k2} se javlja zakasneli impuls koji se odvodi sa Out 2. Kada će drugi tiratron biti provodan zavisi od dovedenog negativnog napona tj. položaja klizača potenciometra. Na taj se način, vreme kašnjenja može menjati skokovito u zavisnosti od položaja preklopnika P (u ovom slučaju 0.1, 1 i 10 μ s) ili kontinuirano u okviru izabranog opsega potenciometrom R_{15} .

Napajanje generatora inicijalnog impulsa i komparatora vrši se pomoću transformatora TR_1 i TR_2 . Sa TR_1 se uzima naizmeničan napon od 55 V. Pomoću diode D_1 i kondenzatora C_1 se dobija negativni jednosmerni napon od - 66 V. Otpornicima R_{14} , R_{15} , R_{16} obezbeđuju se kako je napomenuto, negativne vrednosti potencijala na tačkama 1, 2, 3 koji služe kao prednaponi upravljačkih rešetki tiratrona u kolu generatora inicijalnog impulsa. Sa TR_2 se dobija naizmeničan napon od 365 V. Diodom D_2 i kondenzatorom C_2 se dobija jednosmerni pozitivan napon od oko 500 V koji predstavlja anodni napon tiratrona. Napon za grejanje katoda tiratrona (6.3 V) dobija se sa drugog sekundara ovog transformatora. Isti transformator daje napon od 12.6 V koji se ispravlja i stabilizuje rednim stabilizatorom i služi za napajanje komparatora.

2.2.3. GENERATOR OKIDNOG IMPULSA

Naponski impuls od oko 400 V sa izlaza Out 1 generatora inicijalnog impulsa vodi se na generator okidnog impulsa čija je šema prikazana na slici 2.6.

Ovaj sklop ima zadatak da, uz očuvanu visoku brzinu porasta signala kojim se inicira, na izlazu generiše signal vršnog napona od 5-10.5 kV dovoljne širine da obezbedi pouzdano okidanje varničnika i kondenzatorske baterije. U tom smislu ovaj uređaj predstavlja svojevrsno kolo za pojačavanje i oblikovanje impulsa od 400 V koji generiše prethodno opisan sklop. Na rešetku snažnog tiratrona dovodi se negativan prednapon koji se dobija iz ispravljača sa diodom D_1 i kondenzatorom C_7 čime je tiratron, kada na ulazu nema signala, doveden u neprovodno stanje.

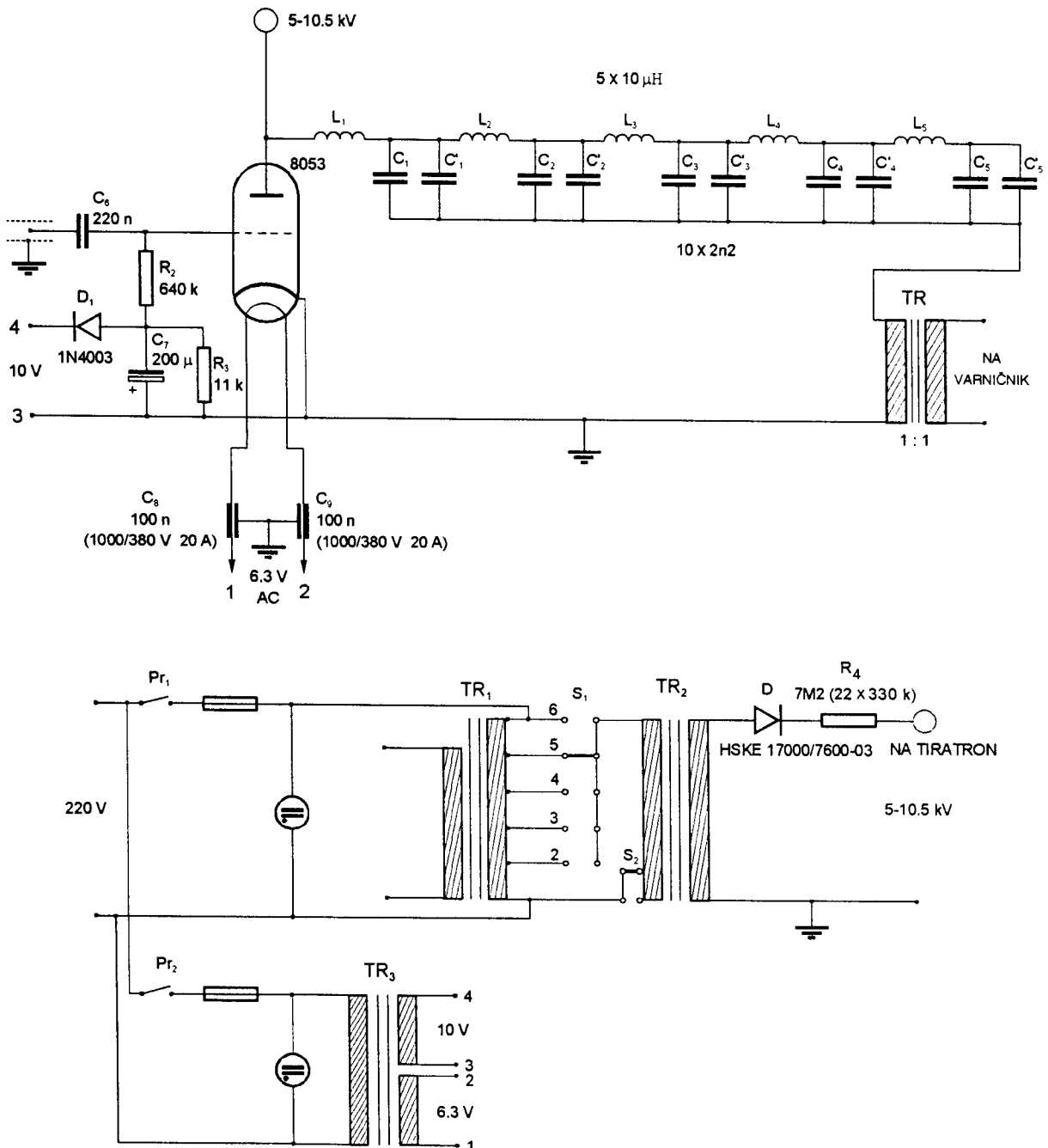
Kada se pozitivan impuls sa kratkim vremenom porasta dovede na ulaz ovog kola, kondenzator trenutno prenosi impuls na rešetku tiratrona i on postaje provodan. U anodnom kolu tiratrona vezano je 5 L - ćelija koje se sastoje od induktivnosti L i kondenzatora C koji čine kolo za kašnjenje kojim se širina impulsa povećava. Talas napona se u kolu prostire konačnom brzinom što produžava trajanje izlaznog signala u odnosu na ulazni za faktor određen parametrima kola. Produženje trajanja signala na izlazu onemogućava eventualni promašaj varničnika. Pri dolasku pozitivnog impulsa na rešetku, tiratron postaje provodan i ćelije kola napunjene preko otpornika R_4 visokim pozitivnim naponom počinju da se prazne kroz primar impulsnog transformatora TR. Prvo se prazne C_1 i C_1^* zatim C_2 i C_2^* itd. do poslednjeg para kondenzatora u kolu. Vod se u potpunosti isprazni za vreme

$$t = n\sqrt{L C_e}$$

gde t predstavlja širinu izlaznog impulsa, n je broj ćelija a C_e je ukupan kapacitet ćelije.

Strujni impuls kroz primar transformatora indukuje u sekundaru odgovarajući impuls koji se vodi na varničnik. Na ovaj način je vrući kraj (visoki potencijal) baterije kondenzatora galvanski odvojen od preostalog dela kola.

Provodni kondenzatori C_8 i C_9 vezani u kolo grejanja tiratrona eliminišu smetnje koje mogu dovesti do nekontrolisanog okidanja sistema.



Slika 2.6

Impulsni transformator je napravljen od torusnog C jezgra sa čvrsto spregnutim i dobro izolovanim namotajima. Primar i sekundar su načinjeni od visokonaponskog koaksijalnog kabela 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 tiratronom smeštena u aluminijski 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.

Anodni napon tiratrona dobija se iz 2 transformatora TR₁ i TR₂. Prekidacem Pr₁ se napon mreže dovodi na autotransformator TR₁ sa koga se napaja primar visokonaponskog

transformatora TR_2 . Visokonaponskom diodom D ispravlja se naizmjenični napon koji se preko serijski vezanih otpornika (R_4 na slici 2.6) vodi na anodu tiratrona. Napon na primaru visokonaponskog transformatora TR_2 može se kratkospojnikom S_1 menjati u intervalu od 100 do 220 V zahvaljujući čemu se na izlazu iz ispravljača dobijaju jednosmerni naponi od 5 do 10,5 kV prema tabeli 2. Kratkospojnikom S_2 se odnos transformacije u visokonaponskom transformatoru TR_2 može dodatno promeniti za oko 10 % pa tako i dobijeni visoki napon čije su vrednosti date u tabeli 2.

Tabela 2

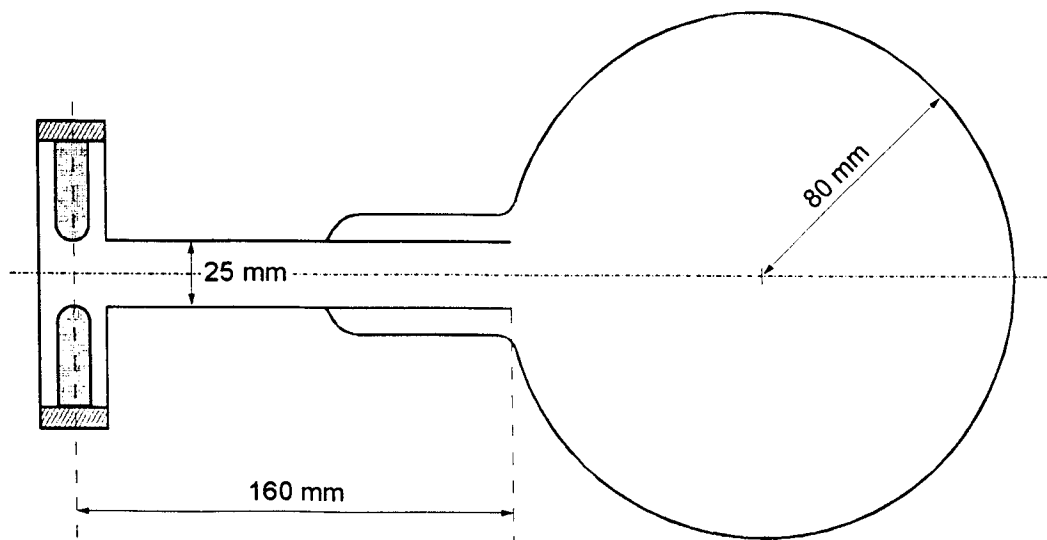
Položaj kratkospojnika	Napon na primaru [V]	Visoki napon [kV]
2	100	5
3	118	5.5
4	140	6.5
5	205	9.5
6	224	10.5

Ovakav izbor napona za napajanje jedinice za okidanje omogućava upotrebu ovog sklopa za iniciranje proboja u različitim tipovima varničnika ili ignitrona. Treći transformator koji se uključuje prekidačem Pr_2 obezbeđuje 10 V za prednapon rešetke tiratrona koji se vodi na tačke 3 i 4 i napon za grejanje tiratrona.

Svi sklopovi kola za iniciranje pražnjenja smešteni su u standardna kućišta i pažljivo oklopljeni kako bi, smetnje koje nastaju jakostrujnim pražnjenjem u tiratronu, varničniku i T-cevi u što manjoj meri uticali na rad sklopova i rezultate odgovarajućih merenja.

2.3. MODIFIKOVANA T- CEV

Da bi se realizovala konfiguracija u kojoj se proizvedeni ravan udarni talas prostire u slobodan prostor, u postojećoj T-cevi je uklonjen reflektor, a na njenom kraju je učvršćen stakleni balon zapremine mnogo veće od zapremine same cevi, kako je na slici 2.7 prikazano.



Slika 2.7

Udarni talas, čija brzina fronta se može menjati promenom napona ili promenom pritiska gasa, ulazi u balon i prostire se normalno na osu koja se poklapa sa prečnikom balona. Prostirući se duž ose balona, udarni talas troši svoju energiju na zagrevanje gasa, smanjujući brzinu fronta. Kako parametri gasa iza fronta udarnog talasa zavise od brzine fronta (jednačine 1.10 – 1.12) merenje brzine fronta duž ose može dati informaciju o gustini, pritisku ili temperaturi gasa na datom mestu u balonu.

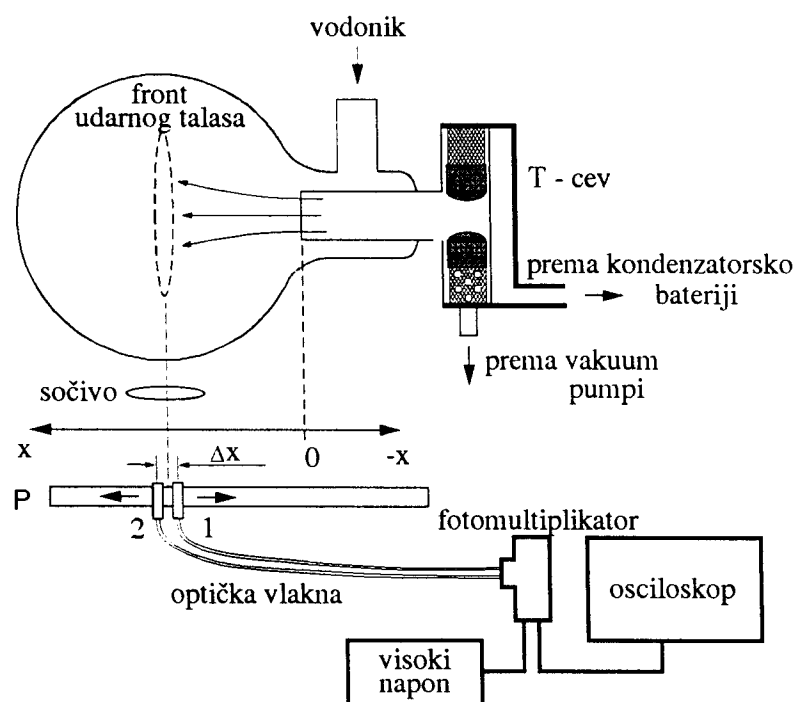
3. MERENJE BRZINE UDARNOG FRONTA

3.1. METOD MERENJA

Određivanje brzine udarnog fronta merenjem vremena nailaska svetlećeg (jonizacionog) fronta u tačkama na rastojanju Δx duž pravca prostiranja može se, u standardnoj T-cevi, vršiti tehnikom kako je opisano u [11,12]. Zbog relativno malih dimenzija (prečnika) T-cevi i homogene strukture svetlećeg fronta, merenje vremena prolaska svetlećeg fronta između dva svetlovoda ima u ovom slučaju zadovoljavajuću prostornu rezoluciju a sam metod dovoljnu tačnost.

U slučaju modifikovane T-cevi, međutim, postavljanjem svetlovoda na obod balona, na različitim mestima duž ose balona, menja se rezolucija i tačnost očitavanja signala. Ova promena nastaje zbog promene udaljenosti svetlovoda od ose balona ali i zbog neujednačene strukture svetlećeg fronta duž linije viđenja svetlovoda (pravac normalan na ulazni otvor svetlovoda), zbog čega maksimumi signala postaju nedovoljno oštri.

Eksperimentalni uređaj sa modifikovanom T-cevi koji je u ovom radu korišćen za direktno merenje brzine udarnog fronta prikazan je na slici 3.1.



Slika 3.1

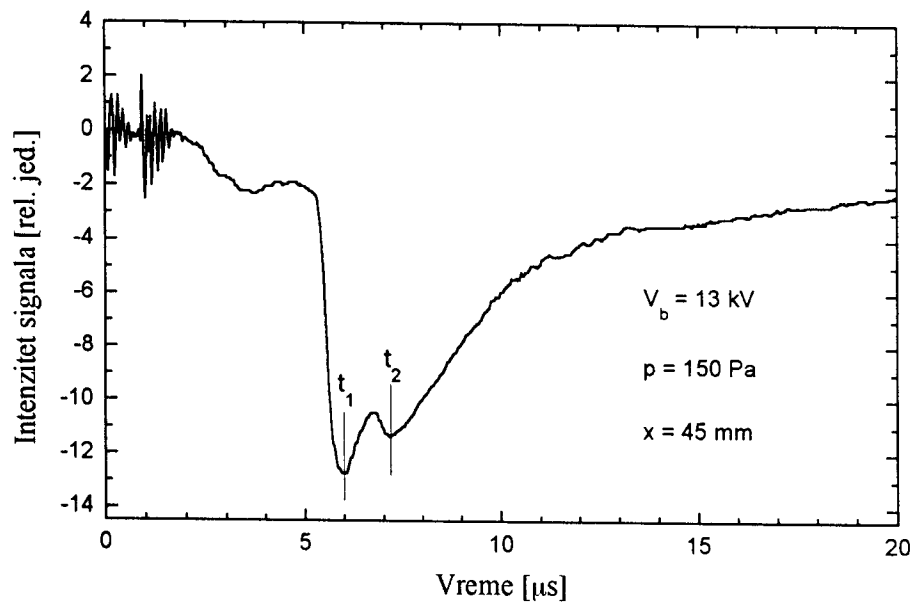
Da bi se poboljšala definisanost maksimuma signala, normalno na osu modifikovane T-cevi postavljeno je sočivo koje, u fokalnoj ravni P, osu cevi projektuje u odnosu 1:1. U fokalnoj ravni postavljen je precizni pozicioner na koji su učvršćena dva optička vlakna na rastojanju $\Delta x = 10$ mm. Optička vlakna su spregnuta sa fotomultiplikatorom koji je napajan iz izvora stabilnog visokog napona. Izlaz iz fotomultiplikatora vođen je na digitalni osciloskop sa rezolucijom 400 Msamp/s.

Krajevi optičkih vlakana čija je debljina $d = 0,8$ mm, okrenuti ka T-cevi, učvršćeni su u cevčice unutrašnjeg prečnika oko 0.8 mm i dužine $l = 40$ mm, čime je dobijena apertura sa veoma malim uglom viđenja. Na ovaj način je postignuta prostorna rezolucija (rastojanje

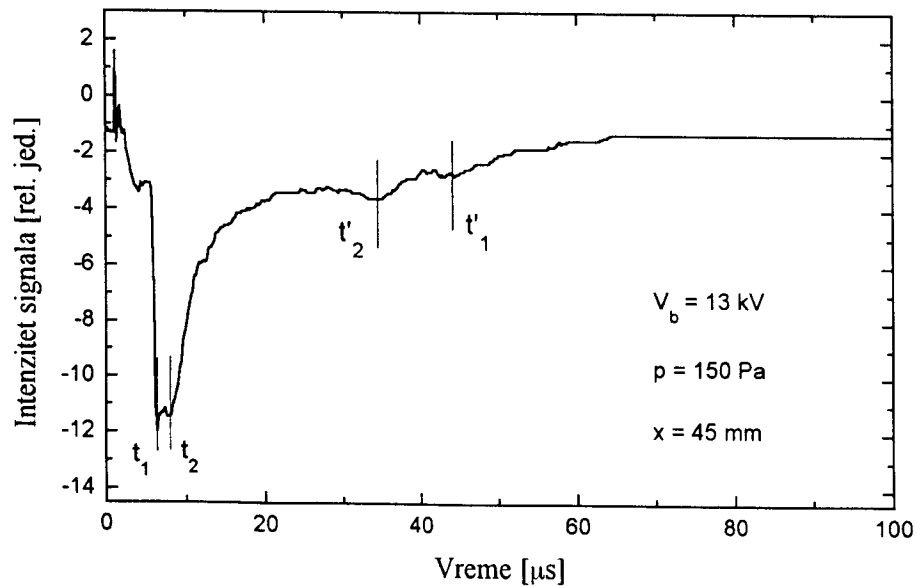
duž ose cevi koje "vidi" optičko vlakno) od oko 1 mm što je mnogo manje od rastojanja između optičkih vlakana.

Opisana konfiguracija omogućava fokusiranje bilo koje pozicije duž linije koja je paralelna osi modifikovane T-cevi.

Za dati položaj optičkih vlakana tipičan signal dobijen na izlazu fotomultiplikatora prikazan je na slici 3.2. Prvi maksimum označen sa t_1 odgovara prolasku svetlećeg fronta udarnog talasa ispred optičkog vlakna 1 na slici 3.1, dok drugi maksimum označen sa t_2 odgovara optičkom vlaknu 2. Mereći vreme $\Delta t = t_2 - t_1$ i znajući rastojanje Δx za dati položaj duž ose cevi, brzina fronta udarnog talasa se može izračunati po definiciji tj. kao $v = \Delta x / \Delta t$.



Slika 3.2



Slika 3.3

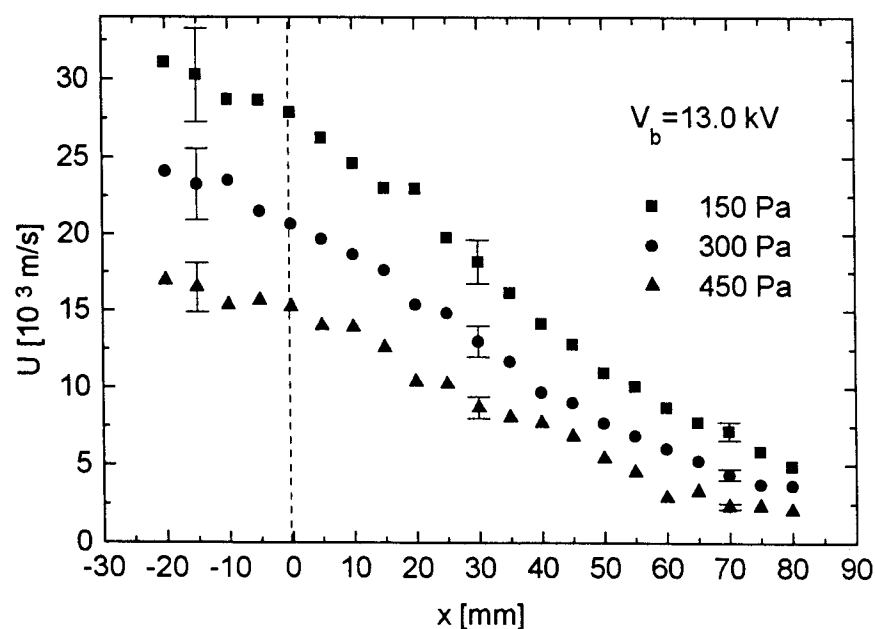
Menjajući položaj optičkih vlakana duž pozicionera, paralelno osi cevi, moguće je odrediti brzinu svetlećeg fronta udarnog talasa duž ose modifikovane T-cevi.

3.2. REZULTATI MERENJA I DISKUSIJA

Analizom signala dobijenih na opisani način može se zaključiti da plazma proizvedena u modifikovanoj T-cevi prolaskom udarnog talasa živi oko $60 \mu\text{s}$. Na tipičnom oscilogramu prikazanom na slici 3.3 uočljiva su i dva naknadna maksimuma t'_2 i t'_1 koji potiču od udarnog fronta reflektovanog od čeonog dela modifikovane T-cevi. Kako je $\Delta t' = t'_1 - t'_2$ za oko red veličine veće od $\Delta t = t_2 - t_1$ jasno je da udarni talas doseže čeonu deo T-cevi ali da mu jačina pa tako i brzina udarnog fronta drastično opadaju u blizini čeonog dela T-cevi. Ovo smanjenje je posledica disipativnih procesa posredstvom kojih udarni front gubi svoju energiju pri kretanju kroz gas.

Na slici 3.4 prikazana je tipična raspodela brzine fronta udarnog talasa duž ose modifikovane T-cevi za tri različita pritiska u T-cevi i napon pražnjenja od 13 kV, dobijena korišćenjem podataka sa oscilograma čiji je tipičan oblik prikazan na slici 3.2, napred opisanom metodom.

Za pritiske gasa u intervalu od 150 – 450 Pa, na rastojanju jednakom poluprečniku balona brzina fronta udarnog talasa prema slici 3.4 menja se za red veličine. Rezultati sa slike 3.4 sugerišu da se za red veličine ili više u navedenom intervalu pritiska, pored brzina fronta udarnog talasa, menjaju i parametri gasa (plazme) u modifikovanoj T-cevi.



Slika 3.4

Ovo daje mogućnost da se modifikovana T-cev koristi kao izvor za spektralnu analizu plazme u širokom intervalu temperatura i koncentracija, što zahteva da se prethodno ispitaju uslovi važenja lokalne termodinamičke ravnoteže u plazmi na mestima sa relativno velikim vrednostima koordinate x (vidi slike 3.1 i 3.4).

Opisanim metodom izmerena je i zavisnost brzine udarnog fronta od napona pražnjenja za dati pritisak i položaj duž ose cevi. Tipičan rezultat za $P = 150 \text{ Pa}$ i $x = 45 \text{ mm}$ prikazan je na slici 3.5 pri čemu greška merenja ne prelazi $\pm 8\%$.

Kako je rastojanje između elektroda T-cevi fiksno ($d = 16 \text{ mm}$), za izabrani pritisak gasa, zavisnost (1.15) dobija oblik

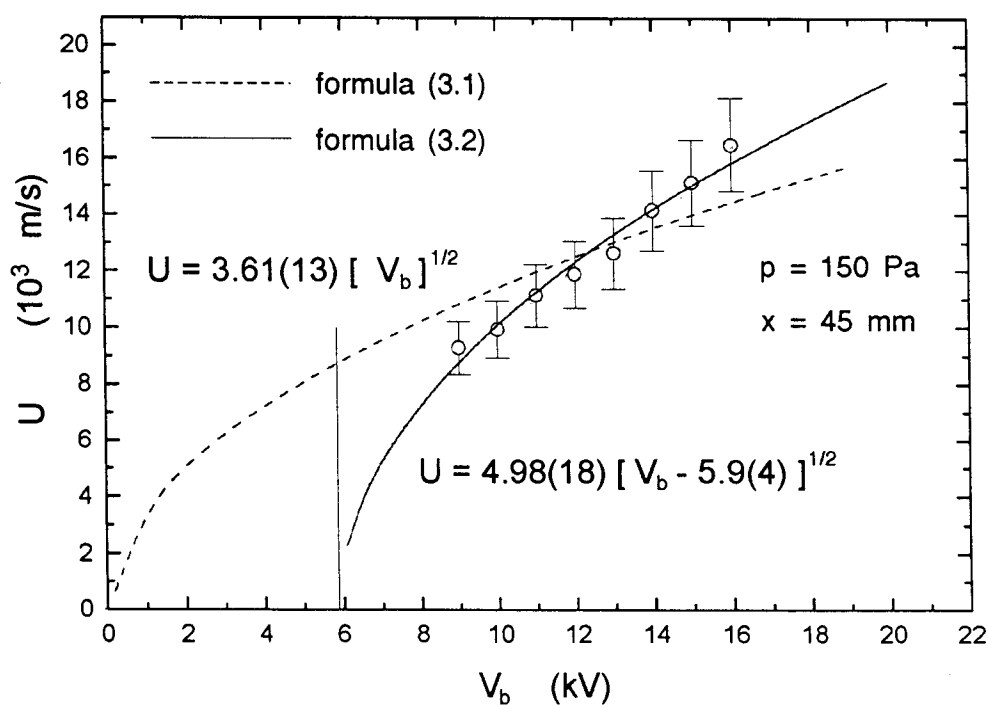
$$U = k_1 \sqrt{V_b} \quad (3.1)$$

Ova zavisnost generalno govoreći, može važiti samo za $V_b \geq V_{pr}$ gde je V_{pr} napon proboja za date uslove u T-cevi. Iz tog razloga je logično definisati semiempirijsku zavisnost tipa (3.1) koja uključuje napon proboja kao parametar, u obliku

$$U = k_2 \sqrt{V_b - V_{pr}} \quad (3.2)$$

Fitovanje izmerenih vrednosti na zavisnost (3.2) daje izuzetno slaganje (Slika 3.5) što opravdava uvođenje navedene semiempirijske formule.

Povećanje napona za faktor 2 (od 8 – 16 kV) pri uslovima kao na slici 3.5 dovodi do povećanja brzine udarnog fronta za oko 3 puta. Zbog toga je jasno da je najpogodniji metod izbora brzine fronta pomeranje duž ose modifikovane T-cevi, čime se, kako je napomenuto, brzina fronta menja za približno red veličine pri datom pritisku.



Slika 3.5

Da bi se modifikovana T-cev mogla koristiti kao izvor plazme za spektroskopska istraživanja neophodno je za sve položaje duž ose cevi ispitati uslove stacionarnosti. Za očekivati je da su ovi uslovi ispunjeni u položajima koji odgovaraju malim vrednostima x , dok je za položaje bliske centralnom delu balona, gde elektronska koncentracija i temperatura imaju znatno manje vrednosti, neophodno ove uslove egzaktno proveriti.

ZAKLJUČAK

U radu je opisana modifikovana T-cev nastala izmenama standardne elektromagnetne T-cevi sa ciljem da se stvore uslovi za proučavanje slobodnog prostiranja udarnih talasa.

Izmerena je brzina fronta udarnog talasa u zavisnosti od položaja duž ose cevi za pritiske vodonika od 150, 300 i 450 Pa. U navedenom intervalu pritisaka, brzina fronta opada za oko red veličine na rastojanju jednakom poluprečniku balona.

Određena je i zavisnost brzine udarnog fronta od napona baterije kondenzatora za izabrani pritisak i položaj na osi T-cevi. Kako rezultat uprošćene teorije (3.1) značajno odstupa od eksperimentalno utvrđene zavisnosti, uvedena je semiempirijska formula (3.2) koja veoma dobro opisuje zavisnost brzine udarnog fronta od napona za navedene uslove u modifikovanoj T-cevi.

Ovako modifikovana T-cev mogla bi da predstavlja interesantan izvor plazme za spektroskopska istraživanja sa značajno proširenim intervalom elektronskih koncentracija i temperatura. U tu svrhu je neophodno ispitati stacionarnost i važenje lokalne termodinamičke ravnoteže za položaje duž ose cevi.

LITERATURA

1. S. B. Pikeljner, Proishozhdenie i evolucija galaktik i zvezd, Nauka, Moskva (1976)
2. V. V. Sobolev, Kurs teoretičeskoj astrofiziki, Nauka, Moskva (1985)
3. B. Vujičić, S. Đurović, Astrofizika sa astronomijom, PMF Novi Sad (1994)
4. B. Milić, Osnovi fizike gasne plazme, Građevinska knjiga, Beograd (1989)
5. Ya. B. Zeldovich, Ju. P. Raizer, Physics of Shock Waves and High-temperature Hydrodynamic Phenomena, Vol. 1, Academic Press, New York and London (1970)
6. J. K. Wright, Shock tubes, Methuen & co, London (1966)
7. A. C. Kolb, Phys. Rev. 107 (1957) 345
8. Lj. M. Ćirković, B. T. Vujičić, S. M. Glišić, J. Phys, D, 15 (1982) 229
9. B. Vujičić, D. Nikolić, P. Vukadin, 2nd International Conference of Plasma Physics and Plasma Technology, Vol. 1, Minsk, Belarus (1997) 181
10. S. Đurović, M. Pavlov, Zbornik radova PMF, Novi Sad (1980)
11. Z. Mijatović, Spektroskopsko ispitivanje plazme proizvedene u T-cevi u prisustvu magnetnog polja, Magistarski rad, Beograd (1990)
12. S. Đurović, Odnos specifičnih toplota vodonične plazme u lokalnoj termodinamičkoj ravnoteži, Magistarski rad, Beograd (1982)
13. S. Đurović, Z. Mijatović, M. Pavlov, R. Kobilarov, B. Vujičić, Žurnal prikladnoj spektroskopii, 64 (1997) 566
14. B. Malešević, Sistem za iniciranje jakostrujnog visokonaponskog pražnjenja pomoću ignitrona, Diplomski rad, PMF Novi Sad (1996)
15. B. Vujičić, S. Đurović, Đ. Kaloci, I. Savić, The 2nd Yugoslav-Belorussian Symposium on Physics and Diagnostics of Laboratory and Astrophysical Plasmas, Zlatibor, Yugoslavia (1998), Contributed Papers (u štampi)
16. N. Andrić, Generator impulsa sa tiratronom, diplomski rad, Univerzitet u Novom Sadu, PMF (1974)

UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO - MATEMATIČKI FAKULTET
KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

- Redni broj:
RBR
- Identifikacioni broj:
IBR
- Tip dokumentacije: *Monografska dokumentacija.*
TD
- Tip zapisa: *Tekstualni štampani materijal.*
TZ
- Vrsta rada: *Diplomski rad.*
VR
- Autor: *Dunja Bulajić br. dos. 313/93*
AU
- Mentor: *Dr Božidar Vujičić, redovni profesor PMF u Novom Sadu.*
MN
- Naslov rada: *"Merenje brzine fronta udarnog talasa u modifikovanoj T-cevi".*
NR
- Jezik publikacije: *Srpski (latinica).*
JP
- Jezik izvoda: *Srpski*
JI
- Zemlja publikovanja: *SR Jugoslavija*
ZP
- Uže geografsko područje: *Vojvodina*
UGP
- Godina: *1998.*
GO
- Izdavač: *Autorski reprint*
IZ
- Mesto i adresa: *Prirodno-matematički fakultet, Institut za fiziku, Trg Dositeja Obradovića 4, 21000 Novi Sad.*
MA
- Fizički opis rada: *(3/24/14/2/2/0/0)*
FO
- Naučna oblast: *Fizika.*
NO
- Naučna disciplina: *Fizika jonizovanog gasa.*
ND
- Predmetna odrednica/ključne reči: *Udarni talasi, T-cev, merenje brzine udarnog talasa.*
PO
- Čuva se: *Biblioteka Instituta za fiziku, PMF Novi Sad.*
ČU
- Važne napomene: *Nema.*
VN
- Izvod: *U radu je određena brzina prostiranja udarnog talasa u modifikovanoj T-cevi u zavisnosti od napona pražnjenja i pritiska u T-cevi.*
IZ
- Datum prihvatanja teme od strane Veća: *jun, 1998.*
DP
- Datum odbrane: *27.08. 1998.*
DO
- Članovi komisije:
Predsednik:
Dr Stevica Đurović, van.prof. Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu;
Članovi:
Dr Miodrag Krmar, docent Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu;

Dr Božidar Vujičić, red.prof. Prirodno-matematičkog fakulteta u Novom Sadu;
- KO