

UNIVERZITET U NOVOM SADU

PRIRODNO - MATEMATIČKI FAKULTET

BOŽIDAR T. VUJIČIĆ

MAGNETOHIDRODINAMIČKI GENERATORI

/Diplomski rad/

NOVI SAD, decembra 1973 godine

MENTOR DOCENT DR. MIROSLAV PAVLOV

PROJEKT
ZAKLJUČNI RAD

PROJEKT
ZAKLJUČNI RAD

- Razvijeni su detaljni i precizni
- Detaljni su rezultati

PROJEKT
ZAKLJUČNI RAD

PROJEKT
ZAKLJUČNI RAD

- Razvijeni su detaljni i precizni
- Detaljni su rezultati

PROJEKT
ZAKLJUČNI RAD

- Razvijeni su detaljni i precizni
- Detaljni su rezultati

PROJEKT
ZAKLJUČNI RAD

- Razvijeni su detaljni i precizni
- Detaljni su rezultati

PROJEKT
ZAKLJUČNI RAD

- Razvijeni su detaljni i precizni
- Detaljni su rezultati

PROJEKT
ZAKLJUČNI RAD

- Razvijeni su detaljni i precizni
- Detaljni su rezultati

PROJEKT
ZAKLJUČNI RAD

- Razvijeni su detaljni i precizni
- Detaljni su rezultati

PROJEKT
ZAKLJUČNI RAD

- Razvijeni su detaljni i precizni
- Detaljni su rezultati

Zahvaljujem se Dr. Miroslavu Pavlovu na svestranoj pomoći i dragocenim savetima koje mi je pružio u toku izrade ovog rada.



S A D R Ž A J

U V O D

OPŠTI PRINCIPI RADA MHD GENERATORA

I. 1 FIZIČKI PROCESI U KANALU

I. 2 TIPOVI MHD GENERATORA

- Generatori sa ionizovanim gasom
- Generatori sa tečnim metalom

I. 3 ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE MHD GENERATORA

II DEO

II. 1 KONSTRUKCIJA GENERATORA

II. 2 MERENJA I REZULTATI

- Određivanje elektrodnog faktora k
- U - I karakteristike generatora

II. 3 ZAKLJUČAK

PRILOG

LITERATURA

U V O D

Potrebe za elektroenergijom brzo rastu u svim zemljama. Poznato je, naprimjer, da se za svakih 10 godina potrošnja električne energije udvostručava i sasvim je izvesno da će ubuduće rasti još brže. Ova činjenica kao i niz problema koji se javlaju u procesu proizvodnje elektroenergije /nužnost ekonomisanja prirodnim gorivima, zagadjenje sredine itd/, usmerilo je napore naučnika, inženjera i energetičara ka stvaranju novih metoda generisanja električne energije.

Svi dosada poznati metodi, primenjivi u krupnoj energetici /sem hidroelektrana/ zasnivaju se na pretvaranju toplotne energije goriva /ugali, plin, naftini derivati, uran/ u električnu, posredstvom parnih turbina. Tokom razvoja energetike stalno se težilo ka povećavanju efikasnosti pretvaranja toplotne u električnu energiju, tj. povećanju koeficijenta korisnog dejstva /KKD/ parnih turbina. To je postizano postupnim usavršavanjem parnih turbina, poboljšanjem tehnologije i pojedinih rešenja i taj period se često naziva mimi progres energetike.

U toku poslednje dve decenije postalo je očigledno da se u procesu razvoja energetike mora napustiti stari put i preći u oblast istraživanja novih mogućnosti, pa je došlo do radikalnih promena koje su korenito izmenile mireni progres u energetici. Ovaj period, pre svega, karakteriše pojava nuklearnih reaktora kao izvora toplote, koji su ne samo konkurentni već imaju niz prednosti u odnosu na klasične izvore toplote. Međutim i u slučaju nuklearnih elektrana posrednik u pretvaranju toplotne u električnu energiju je parna turbina, čiji je koeficijent korisnog dejstva mali. Danas se smatra da je nemoguće daljim tehničkim usavršavanjima bitno povećati koeficijent korisnog dejstva parnih turbina. Za klasične termoelektrane sa parnim turbinama granična veličina KKD je 40 %. U slučaju korišćenja ~~atomskog~~ reaktora kao izvora toplote ta veličina se kreće od 40 % - 44 % zavisno od temperature koju reaktor daje. Pomoću drugih sistema transformacije energije npr. korišćenjem gasnih generatora KKD je moguće povećati za 2 - 3 % što opet daje ukupni KKD manji od 50 %.

Potrebno je podvući uticaj KKD ne samo na cenu ukupno proizvedene energije već i na količinu toplote /to znači količinu goriva/ utrošenu za proizvodnju jedinice snage, i na količinu izbačenih nusprodukata štetnih po okolini. S obzirom da je potrebno ekonomisati prirodnim gorivima čije se rezerve brzo smanjuju i što je moguće više smanjiti zagadjenje i poremećaj ravnoteže životne sredine /ovo postaje imperativ u svim oblastima ljudske delatnosti/, povećanje KKD je od neocenjivog značaja.



Što je KKD veći to je količina toplote /goriva/ potrebna za proizvodnju jedinice energije manja, pa se manje toplote resejava i manji je uticaj na okолнu sredinu. Isto važi za količinu štetnih nusprodukata, gasova pri upotrebi klasičnih goriva i radijacionih zagadjenja pri upotrebi nuklearnog goriva.

Pedesetih godina ovog veka, počinje u nizu zemalja, ozbiljno da se razradjuje nov metod u proizvodnji električne energije - magnetohidrodinamički /MHD/ koji prema dosadašnjim rezultatima ima veliku budućnost kako u krupnoj energetici tako i u specijalnim primenama /avioni, kosmički brodovi itd/. zahvaljujući velikim prednostima koje ima. Jedan od najvažnijih faktora koji određuju budućnost MHD metodu bez sumnje je KKD koji je znatno veći nego kod klasičnih parnih elektrana. Osim ovoga značajno je to što se MHD procesi u generatoru karakterišu zapreminskim ponderomotornim silama, za razliku od površinskih sila u parnim turbinama, usled čega su konstrukcionalni problemi znatno manji, posebno ako se uzme u obzir da kod MHD generatora nema pokretnih delova. Zbog znatnog povećanja KKD i malih dimenzija samog generatora moguće je postići velike vrednosti gustine energije što omogućava stvaranje energetskih blokova velike specifične snage koji već danas dobijaju značajne primene u kosmičkoj tehnici, avionskoj industriji, brodogradnji itd.

Treba primetiti da je MHD metod jedini metod DIREKTNOG pretvaranja toplotne u električnu energiju primenljiv u krupnoj energetici, što se navedenim prednostima objašnjava veliko interesovanje i ulaganje za njegovo usavršavanje.

Ovaj rad ima za cilj da sumira opšte principe MHD metoda generisanja električne energije. Provera nekih od ovih principa vršena je na modelu generatora sa elektrolitom kao radnim telom, koji je u tu svrhu bio sagradjen. S obzirom da nije postojala mogućnost korišćenja ionizovanog gasa ili tečnog metala termodinamičke karakteristike MHD generatora nisu mogle biti ispitane. Ubrzavanje elektrolita vršeno je mehaničkim pumpom, tako da je postojala mogućnost ispitivanja karakteristika i procesa samo u kanalu MHD generatora. Treba napomenuti da ovaj uređaj predstavlja samo model na kome su ispitane ili proverene odredjene zakonitosti, zbog čega odpada zahtev za velikim KKD.

U prvom delu rada obradjeni su opšti principi MHD metoda generisanja elektroenergije i tipovi postojećih generatora. Podaci i karakteristike procesa koji se mogu naći u literaturi su različiti što zavisi od snage uređaja i konstruktora pa su zbog toga u tekstu uzimane srednje vrednosti. Drugi deo rada daje opis sagradjenog modela generatora i rezultate merenja izvršenih na njemu.

OPŠTI PRINCIPI RADA MHD GENERATORA

I.1. FIZIČKI PROCESI U KANALU

Izучавanjem uzajamnog dejstva elektroprovodnih fluida sa magnetnim poljem bavi se posebna oblast fizike - magnetohidrodinamika /MHD/. Pitanja vezana sa ovim problemom prvi put je pokrenuo Faradej u svojim radovima još početkom XIX veka. U svom prvom radu o elektromagnetskoj indukciji u tečnostima Faradej je pokusao, da koristeći magnetno polje zemlje, izmeri brzinu protoka vode u Temzi. Njegova predpostavka da geomagnetno polje utiče na strujanje vode u okeanima danas je potvrđena. U poslednje vreme istraživanje problema MHD znatno je ubrzano zahvaljujući tome što su neka dostignuća ove nauke našla značajne praktične primene kao npr. u generisanju električne energije.

MHD metod generisanja električne energije zasniva se na korišćenju interakcije provodnog fluida sa magnetnim poljem, za neposredno pretvaranje dela kinetičke energije fluida u električnu.

Posmatrajmo elektroprovodni fluid koji protiče brzinom $\vec{V} = /V, O, O/$ kroz kanal pravougaonog poprečnog preseka površine $d \cdot b$ i dužine L /SI. 1/. Kanal se nalazi u magnetnom polju jačine $\vec{B} = /O, O, B/$ koje je usmereno normalno na zidove kanala. Strane na kojima je magnetno polje normalno su izolatori dok je drugi par strana provodan i predstavlja elektrode /šrafirano na SI. 1/. Na nosioce naselektrisanja q_i koji se kroz kanal kreću brzinom \vec{V} deluje Lorencova sila

$$\vec{F}_i = q_i \cdot \vec{V} \times \vec{B} \quad 1.1$$

u pravcu ose Y zbog čega negativni nosioци dobijaju brzinu u pozitivnom smeru Y ose a pozitivni nosioци u suprotnom smeru /SI. 1b/. Kao posledica ovoga donja elektroda postaje pozitivna tj. na višem je potencijalu u odnosu na gornju elektrodu. Usled ovakve polarizacije među elektrodama nastaje električno polje

$$\vec{E} = /O, E, O/ \quad 1.2$$

takvog smera da se suprotstavlja kretanju nosilaca u pravcu Y ose. Rezultujuća sila koja deluje na nosioce neposredno posle uključenja magnetnog polja iznosi

$$\vec{F}'_i = q_i \cdot \vec{V} \times \vec{B} + q_i \cdot \vec{E} \quad 1.3$$

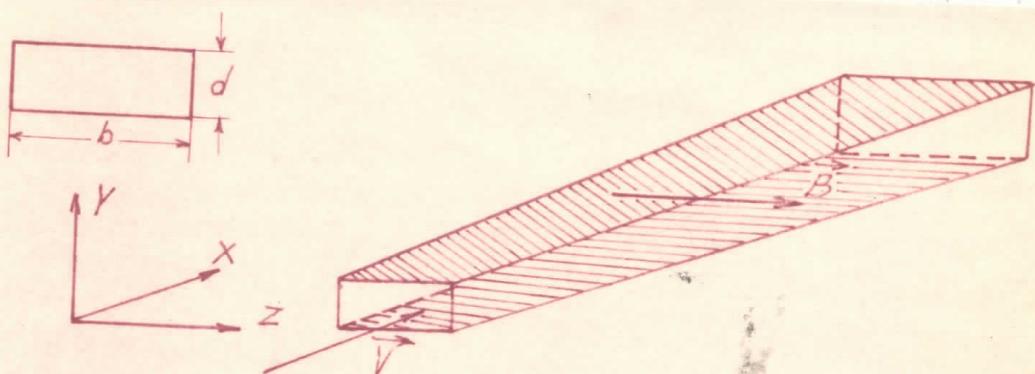
a električno polje indukovano u fluidu

$$\vec{F}' = \vec{E}^* = \vec{V} \times \vec{B} + \vec{E}$$

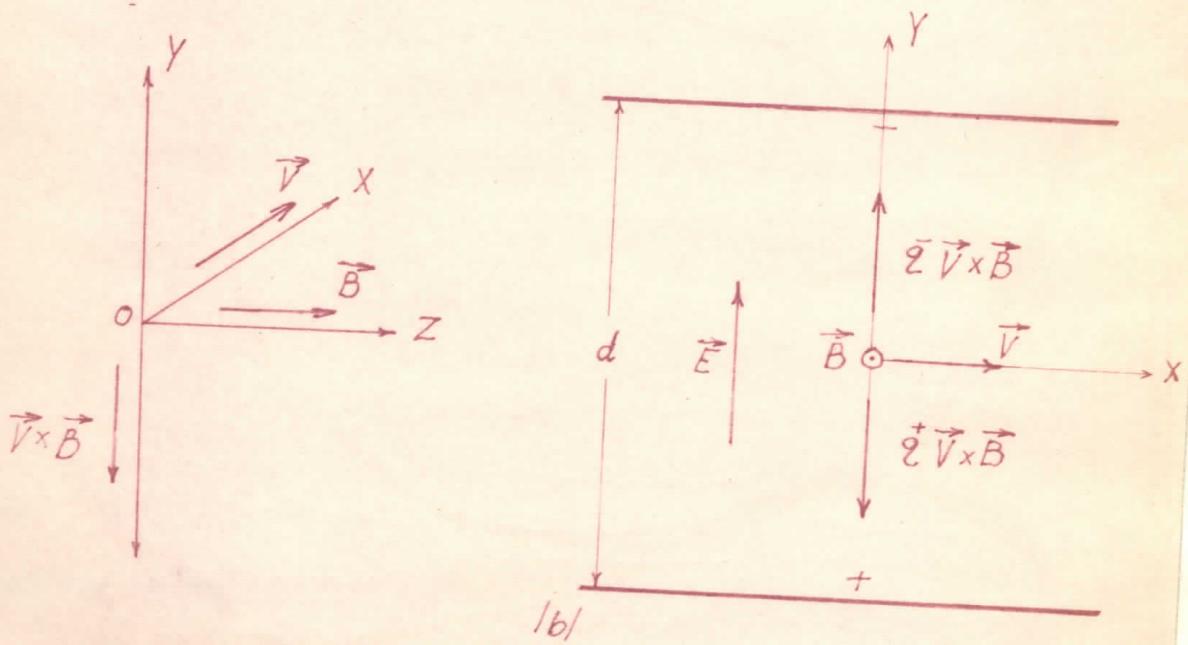
q_i

1.4

Kretanje nosilaca će se nastaviti sve dok sila \vec{F}' ne postane jednaka nuli tj. dok se Lorencova sila \vec{F} ne izjednači sa silom kojom polje \vec{E} deluje na nosioce.



/a/



Sp.1

Nosioci se kreću u pravcu Y ose nasuprot polju \vec{E} pod uticajem sile \vec{F} . Pomerajući nosioce na rastojanje d /razmak izmedju elektroda/ sila \vec{F} izvrši rad

$$W = \vec{F} \cdot \vec{d} = q_i \cdot V \cdot B \cdot d$$

1.5

Pošto rad po jedinici nanelektrisanja predstavlja elektromotornu silu /EMS/ zaključujemo da se u fluidu indukovala elektromotorna sila

$$e_o = \frac{W}{q_i} = VB d \quad 1.6$$

usled čega medju elektrodama u kanalu postoji potencijalna razlika U . Ukoliko na elektrode priključimo potrošač, kroz kolo obrazovano od generatora i potrošača, početi će struja.

Označimo li sa μ_i pokretljivost nosilaca u fluidu, brzina drifta biće

$$\vec{V}_{di} = \frac{\mu_i}{q_i} \vec{F} = \frac{\mu_i}{q_i} / q_i \cdot \vec{V} \times \vec{B} + q_i \cdot \vec{E} / \quad 1.7$$

i ima pravac Y ose. Napisana u skalarmom obliku jed. 1.7. glasi

$$V_{di} = \mu_i / V \cdot B - E / \quad 1.8$$

Gustina struje medju elektrodama u kanalu iznosi

$$j = \sum_i q_i \cdot n_i \cdot V_{di} \quad 1.9$$

gde je n_i koncentracija nosilaca i-tog tipa fluida. S obzirom da je uzdužni presek kanala $b \cdot L$ i koristeći 1.8. dobijamo sledeći izraz za jačinu struje I u ovom kolu

$$I = b \cdot L \cdot j = b \cdot L \sum_i q_i n_i V_{di} = b \cdot L \sum_i q_i n_i \mu_i / V \cdot B - E /$$

tj.

$$I = b \cdot L / V \cdot B - E / \sum_i q_i n_i \mu_i \quad 1.10$$

ili

$$I = b \cdot L \delta / V \cdot B - E / \quad 1.10$$

$$\text{gde je } \delta = \sum_i q_i n_i \mu_i \quad 1.11$$

provodljivost elektrolita.

Pošto polje E možemo izraziti preko potencijalne razlike U i rastojanja medju elektrodama d kao

$$E = \frac{U}{d} \quad 1.12$$

jednačinu 1.9. možemo napisati u obliku

$$I = b \cdot L \cdot \delta \cdot N \cdot B = \frac{U}{d} \quad 1.13$$

Razmotrimo jednačinu 1.13 za dva ekstremna režima rada generatora. U režimu praznog hoda /potrošač nije priključen/ struja $I = 0$ odakle sledi

$$U_{ph} = V \cdot B \cdot d = e_0 \quad 1.14$$

tj. napon na elektrodama jednak je EMS/jed. 1.6./. U režimu kratkog spoja napon na elektrodama $U = 0$ odakle sledi

$$I_{ks} = b \cdot L \cdot \delta \cdot V \cdot B \quad 1.15$$

Koristeći relacije 1.14. i 1.15 dobijamo

$$R_i = \frac{U_{ph}}{I_{ks}} = \frac{1}{\delta} \frac{d}{b \cdot L} \quad 1.16$$

odakle vidimo da unutrašnji otpor kanala generatora možemo izračunati iz geometrije kanala znaajući provodljivost fluida i obratno.

Nosioci koji driftuju u pravcu Y ose interaguju sa magnetnim poljem, usled čega dočazi do pojave Lorencove sile

$$\vec{F}_H = q_i \vec{V}_{D,i} \times \vec{B} \quad 1.17$$

tj. električnog polja

$$\vec{E}_H = \frac{\vec{F}_H}{q_i} = \frac{1}{q_i \cdot n_i} \vec{i} \times \vec{B} \quad 1.18$$

Ovo polje koje se naziva osno ili Holovsko, izaziva kretanje nosilaca u pravcu X ose tzv. osnu struju ako za nju postoji zatvoreno kolo. Gustina osne struje s obzirom na Ohmov zakon i jed. 1.18. srazmerna je pokretljivosti μ_i , pa pri korišćenju jonoizovanih gasova ili rastopljenih metala, zbog prisustva slobodnih elektrona čija je pokretljivost velika, osna struja dostiže velike vrednosti što bi predstavljalo gubitak pošto se pretvara u Džulovu toplotu. Zbog toga se ova struja pogodnim metodima eliminiše.

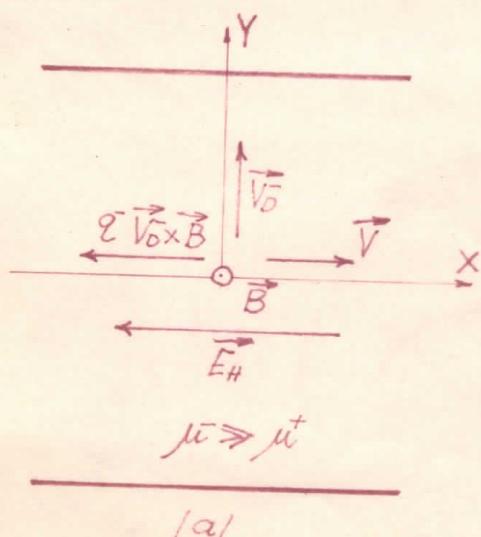
Intenzitet i smer polja 1.18 zavisi od razlike pokretljivosti pozitivnih μ^+ i negativnih μ^- nosilaca. Ukoliko je provodljivost pretežno elektronska /jonoizovani gas i tečni metali/ Holovo polje izazvano driftovanjem pozitivnih jona možemo zanemariti u odnosu na Holovo polje izazvano driftovanjem elektrona, zbog mnogo veće pokretljivosti elektrona. U tom slučaju je polje \vec{E}_H usmereno u pravcu - X ose /Sl. 2a/. Ukoliko je provodljivost jonska /elektroliti/, u slučaju da je $\mu^- > \mu^+$, rezultujuće polje \vec{E}_H biće u smeru - X ose a za $\mu^- < \mu^+$ u suprotnom /sl. 2b/. Zbog male pokretljivosti jona ovo polje u elektrolitima se zanemaruje u odnosu na polje \vec{E}^* pod uslovom da je brzina elektrolita V velika $V \gg V_{D_i}$.

Razmotrimo sada odnos Holovog polja l. 18 i polja 1.4 indukovanih u elektrolitu. Iz 1.4 i 1.18 sledi da su ova dva polja međusobno normalna, međutim pošto je brzina nosilaca V' u sistemu vezanom za elektrode /sl. 3/

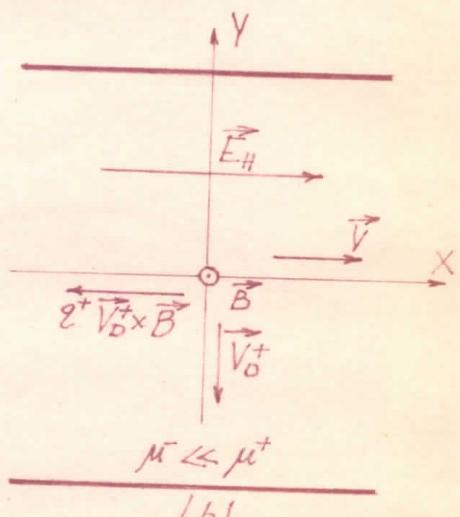
$$\vec{V}' = \vec{V} + \vec{V}_{D_i}$$

1.19

polje \vec{E}^* indukovano u fluidu ima pravac kao na Sl. 3 usled čega će ekvipotencijalne površine $\varphi^* = \text{const.}$ imati pravac kao na slici tj. neće biti paralelne površini elektroda kao što sledi iz jed. 1.4, u kojoj brzina drifta \vec{V}_{D_i} nije uračunata. /Celinski Z. 1964/.



Sl. 2



Vektor gustine struje \vec{i} u sistemu veznom za elektrode ima pravac kao na Sl. 3 što znači da je rezultujuće električno polje $\vec{E}_H = \frac{1}{\mu} \vec{i} \times \vec{B}$ u sistemu vezanom za elektrode tog pravca. Sa Sl. 3 je

$$\vec{N} \times \vec{B} + \vec{E}_H = \frac{\vec{i}}{\mu} + \frac{\mu}{\mu} \vec{i} \times \vec{B} \quad 1.20$$

ili

$$\vec{i} = \mu \vec{N} \times \vec{B} + \vec{E}_H - \mu \vec{i} \times \vec{B} \quad 1.21$$

što predstavlja poznati generalisani Omov zakon za slučaj provodnika u magnetnom polju.

Iz 1.21 sledi da vektori električnog polja i strujne gustine leže u XOY ravni i da su njihove komponente vezane relacijama

$$i_x = \mu E_x - \mu i_y \cdot B \quad 1.22$$

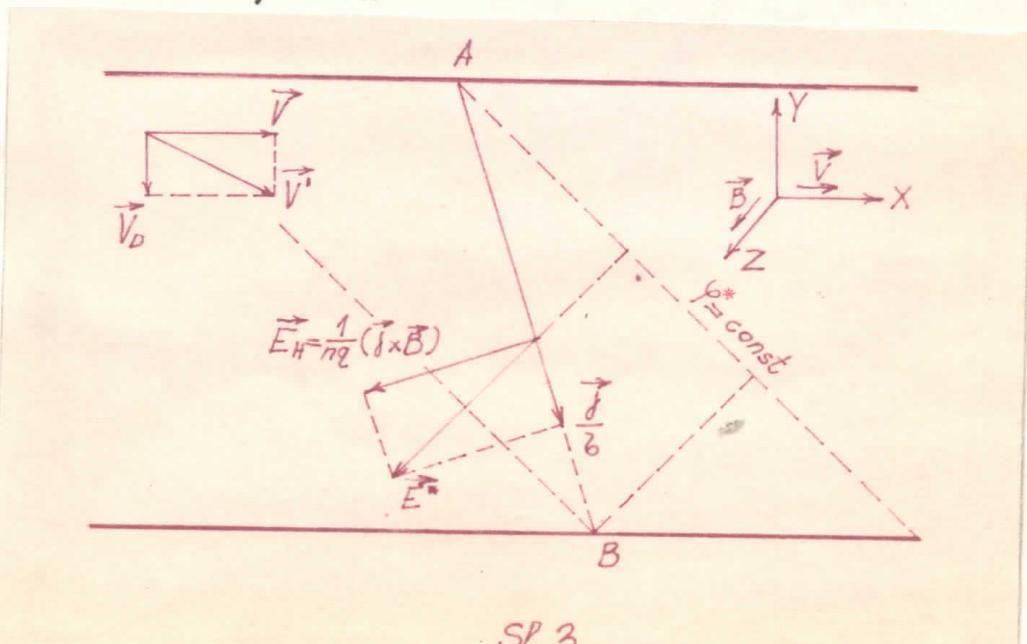
$$i_y = \mu / E_y - VB + \mu i_x \cdot B \quad 1.23$$

Komponente polja E iznose

$$E_x = \frac{1}{\mu} \cdot i_x + \frac{1}{\mu} \cdot \mu B \cdot i_y \quad 1.24$$

$$/E_y - VB/ = \frac{1}{\mu} \cdot i_y - \frac{1}{\mu} \cdot \mu B \cdot i_x \quad 1.25$$

odakle zaključujemo da se u pravcu X ose pojavljuje zavisnost E_x od i_y a u pravcu Y ose zavisnost E_y od i_x .



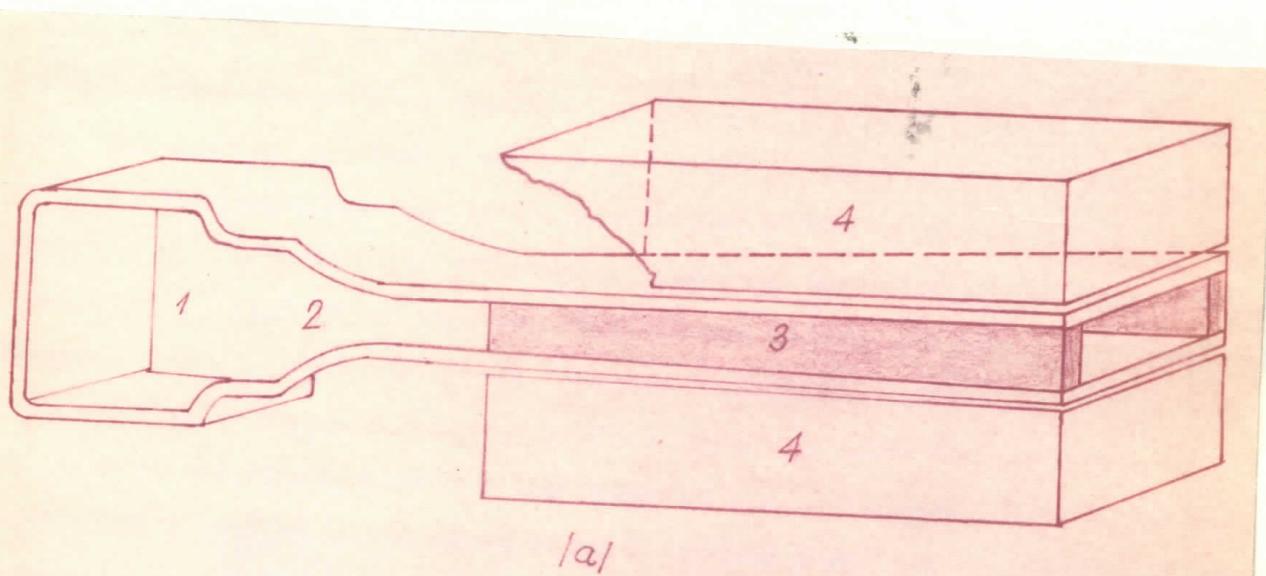
To znači da je elektroprovodljivost fluida u magnetnom polju Tenzorskog karaktera što zнатно komplikuje sliku procesa i proučavanje električnih karakteristika MHD generatora.

U slučaju korišćenja elektrolita, zbog male pokretljivosti jona, poslednje članove u jednačinama 1.24 i 1.25 možemo zanemariti, usled čega se tensorski karakter provodljivosti gubi. Zbog svega ovoga i izraz 1.16 za unutrašnji otpor generatora važi samo za elektrolite i to u slučaju

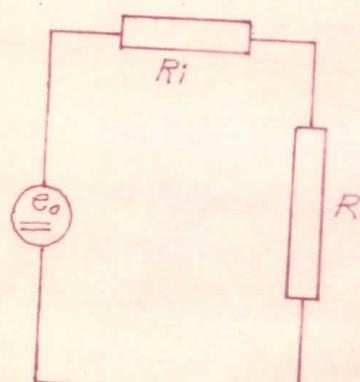
$$V \gg V_{D1}$$

1.26

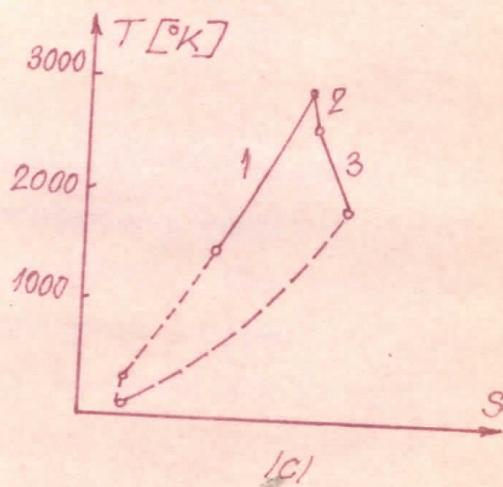
jer tada osno polje možemo zanemariti.



(a)



(b)



(c)

sl. 4

Na Sl. 4a prikazan je najprostiji tzv. linearni MHD generator. Sastoji se od kanala /3/ pravougaonog poprečnog preseka čiji je jedan par strana izolator a drugi predstavlja elektrode koje su u kontaktu sa fluidom /radnim telom/. Na ulazu u kanal nalazi se komora za sagorevanje /1/ kojoj se fluid zagreva na račun toplotne energije goriva pri čemu se širi i ubrzava u mlazniku /2/. Kanal se nalazi izmedju polova jakog elektromagneta /4/ tako da su vektori magnetnog polja \vec{B} i brzine fluida \vec{V} medjusobno normalni. Ako je rastojanje medju elektrodama d u kanalu se, kako je opisano, indukuje EMS $e_o = VBd$. Prikљučenjem potrošača R kroz kolo obrazovano od generatora i potrošača teći će struja i odredjena vrednostima otpora R, elektromotornom silom e_o , i unutrašnjim otporom generatora R_g /Sl. 4b/.

Proces pretvaranja toplotne energije goriva u kinetičku energiju fluida kao i te kinetičke energije u električnu prikazan je na T - S dijagramu Sl. 4c. Gas npr. vazduh predhodno zagrejan do oko 1200°C ubacuje se u gorionik gde sagoreva gorivo tako da produkti sagorevanja dostižu temperaturu od oko 3000°C /deo 1 krive na T - S dijagramu/. Tako zagrejan gas ulazi u mlaznik gde se širi pri čemu se deo toplotne energije pretvara u kinetičku zbog čega se temperatura gasa smanjuje /deo 2 krive na T - S dijagramu/. Ubrzan u mlazniku, gas ulazi u kanal MHD generatora gde se zbog ponderomotorne sile F_H /jed. 1.17/ usporava vršeći pri tom koristan rad /deo 3 krive na T - S dijagramu/ koji se, kako je opisano, pretvara u električnu energiju. Da bi generator radio ekonomično i zadovoljavao sve navedene zahteve u sklop MHD elektrane uključen je čitav niz pomoćnih uređaja koji zatvaraju ciklus MHD generatora. Deo ciklusa označen crtkano na Sl. 4c odnosi se na te uređaje i biće kasnije, zajedno sa njima protumačen.

I.2. TIPOVI MHD GENERATORA

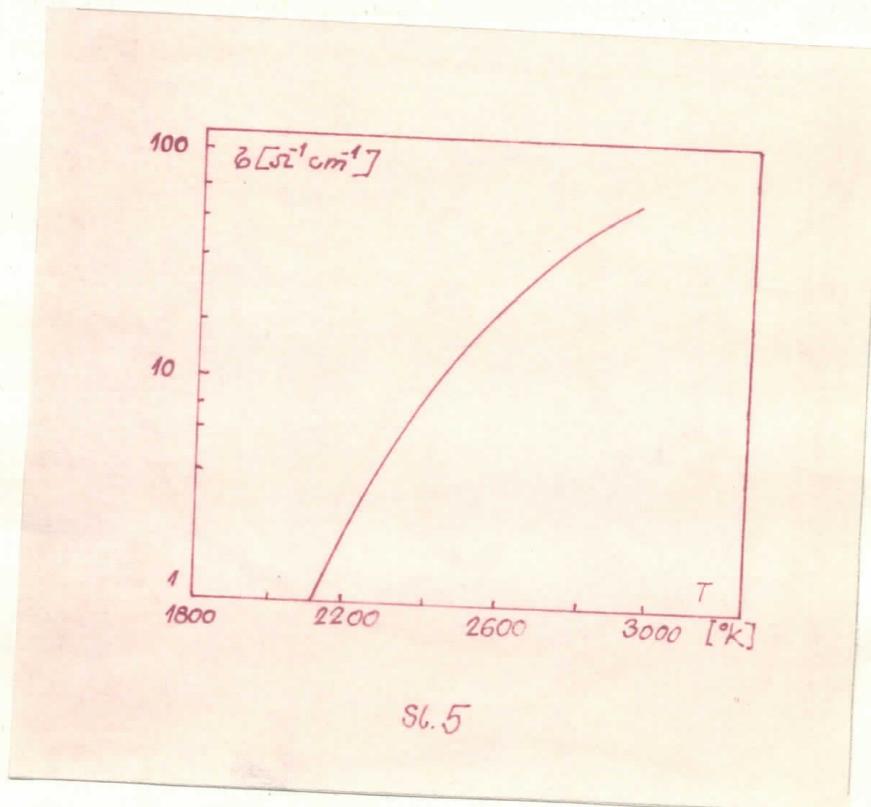
Kao radno telo /elektroprovodni fluid/ mogu se koristiti ionizovani gasovi i tečni /rastopljeni/ metali. Princip transformisanja energije tj. fizički procesi u kanalu MHD generatora u oba ova slučaja su isti ali se zbog velikih razlika u provedljivosti, mehaničkim osobinama i načinu predavanja toplotne energije radnom telu, ciklusi kod gasnih generatora i generatora sa rastopljenim metalom veoma razlikuju.

U slučaju korišćenja ionizovanih gasova osnovni problem sastoji se u tome što je, pri temperaturama koje dostižu produkti sagorevanja čvrstih, tečnih ili gasovitih goriva ili pak zagrevanjem gasova u nuklearnim reaktorima, električna provodljivost veoma mala tako da se ne može postići velika snaga i dobar KKD. Pošto elektroprovodljivost slabo ionizovanog gasa pri termo-dinamičkoj ravnoteži zavisi od temperature kao

$$\text{Exp} / \frac{e V_i}{2 kT}$$

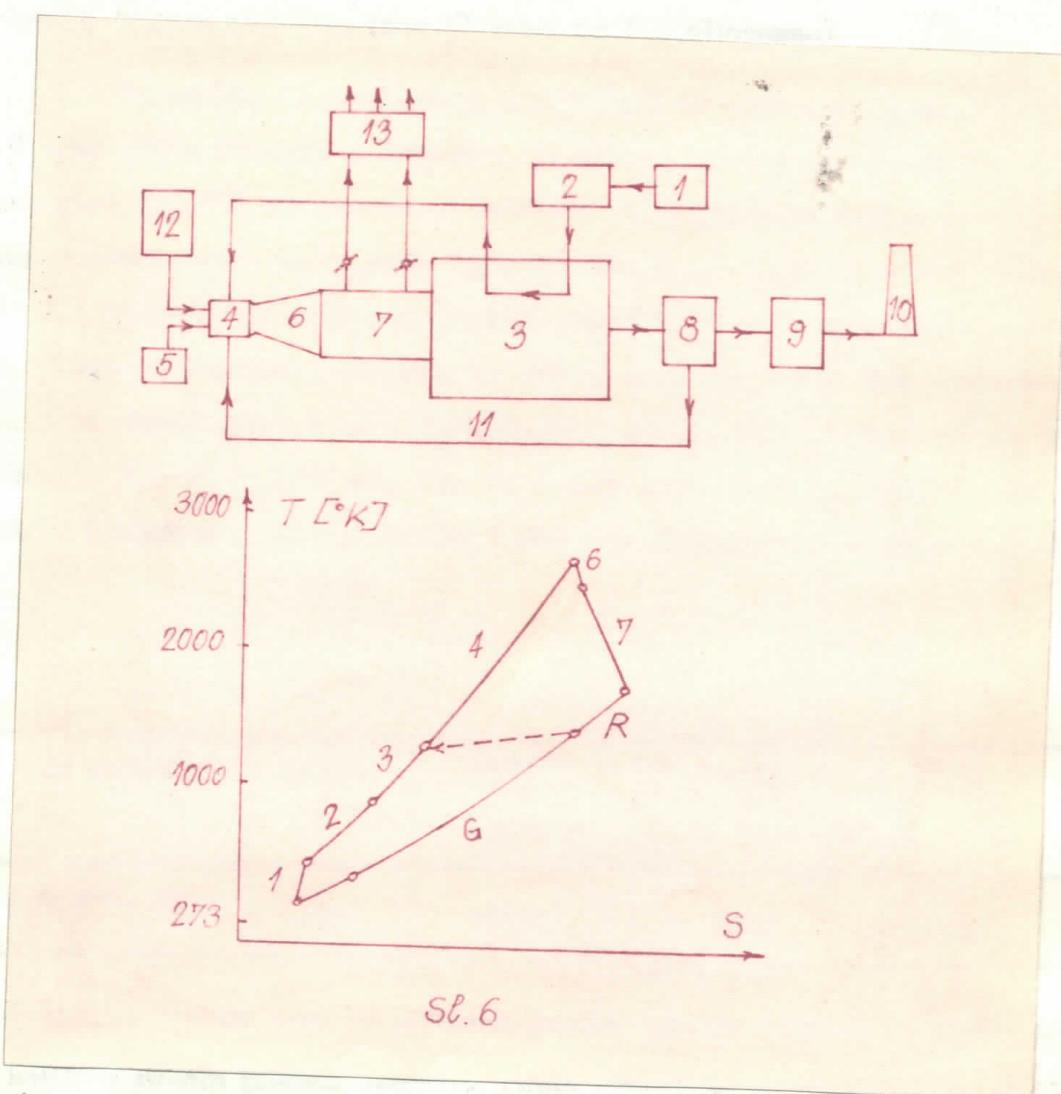
/2. 1/

gde je V_i potencijal ionizacije, radi postizanja dovoljno velike provodljivosti u gas se uvode lako ionizujuće supstance takozvane primeše. Najpogodniji za to su cezijum sa potencijalom ionizacije $V_i = 3,89 \text{ eV}$ i kalijum $\gamma V_i = 4,34 \text{ eV}$. Na sl. 5 data je eksperimentalno izmerena kriva zavisnosti elektro-provodljivosti produkata sagorevanja uglja u vazduhu



sa primesama kalijuma, od temperature. Uočimo da je već za provodljivost reda $1 \frac{\text{mho}}{\text{cm}}$ potrebna temperatura oko 2000°C . Ovako visoke temperature izazivaju konstrukcione teškoće a posebno probleme vezane za izbor materijala, provodnika i izolatora, koji su sposobni da bez oštećenja izdrže ovako visoke temperature. Da bi se zadovoljili zahtevi maksimalnog iskorišćenja toplote kao i zahtev da produkti sago-

revanja koji se izbacuju u okolinu ne sadrže štetne sastojke, pored komore za sagorevanje, mlaznika i MHD kanala u sastav komercijalne elektrane ulazi još čitav niz uređaja. Kompletan ciklus MHD elektrane sa ionizovanim gasom kao radnim telom i klasičnim gorivom prikazan je na šemsi Sl. 6. Vazduh se kompresorom /1/ ubacuje u predgrejač I /2/ i tako zagrejan do oko 800 prolazeći kroz predgrejač II /3/ ulazi u komoru za sagorevanje /4/ u kojoj sagoreva gorivo iz rezervoara /12/ i u koju se istovremeno ubacuje ionizujuća primesa /5/. Tako zagrejan do oko 2500°C zavisno od vrste goriva, /TAB. 1/ ulazi u mlaznik /6/ gde se ubrzava i prolazi kroz kanal generatora /7/. Električna struja generisana u kanalu na račun kinetičke energije gasa odlazi na potrošač ili invertor /13/ koji je transformiše u naizmeničnu i koja se dalje razvodi. Iz kanala gas već ohladijen do oko 1200°C odlazi u predgrejač II /3/ gde deo



svoje toplote u sistemu toploizmenjivača predaje atmosferskom vazduhu već zagrejanom u prvom predgrejaču. Na taj način atmosferski vazduh biva zagrejan do oko 1200°C pre ulaska u komoru za sagorevanje a gas koji je predhodno prošao kroz kanal generatora vršeći koristan rad još više smanjuje svoju temperaturu.

Iz predgrejača II gas odlazi u komoru za ekstrakciju primeće /8/ koja se vraća /11/ u ciklus, a zatim u sistem za hladjenje i prečišćivanje /9/ odakle se izbacuje u atmosferu /10/.

Elektrane ovoga tipa pripadaju tzv. prvoj generaciji i danas se koriste u avijaciji /radno telo su produkti sagorevanja reaktivnih motora/. Njihov KKD je za 5 - 10 % veći nego kod klasičnih parnih elektrana. T-S dijagram ovog ciklusa prikazan je na Sl. 6b. To je tipični Brajtonov ciklus sa regenerativnim pređrevanjem. Indeksi kojim su obeleženi pojedini delovi na T-S dijagramu odgovaraju indeksima kojima su obeleženi odgovarajući uređaji šeme elektrane Sl. 6,b. Uočimo da se samo deo toplote koju gas sadrži posle izlaska iz kanala MHD generatora vraća u ciklus /deo R krive na T-S dijagranu/, dok se preostali deo predaje hladnjaku ili zajedno sa dimnim gasovima izbacuje u atmosferu što predstavlja čist gubitak u toplotnom bilansu elektrane (deo G krive na T-S dijagramu).

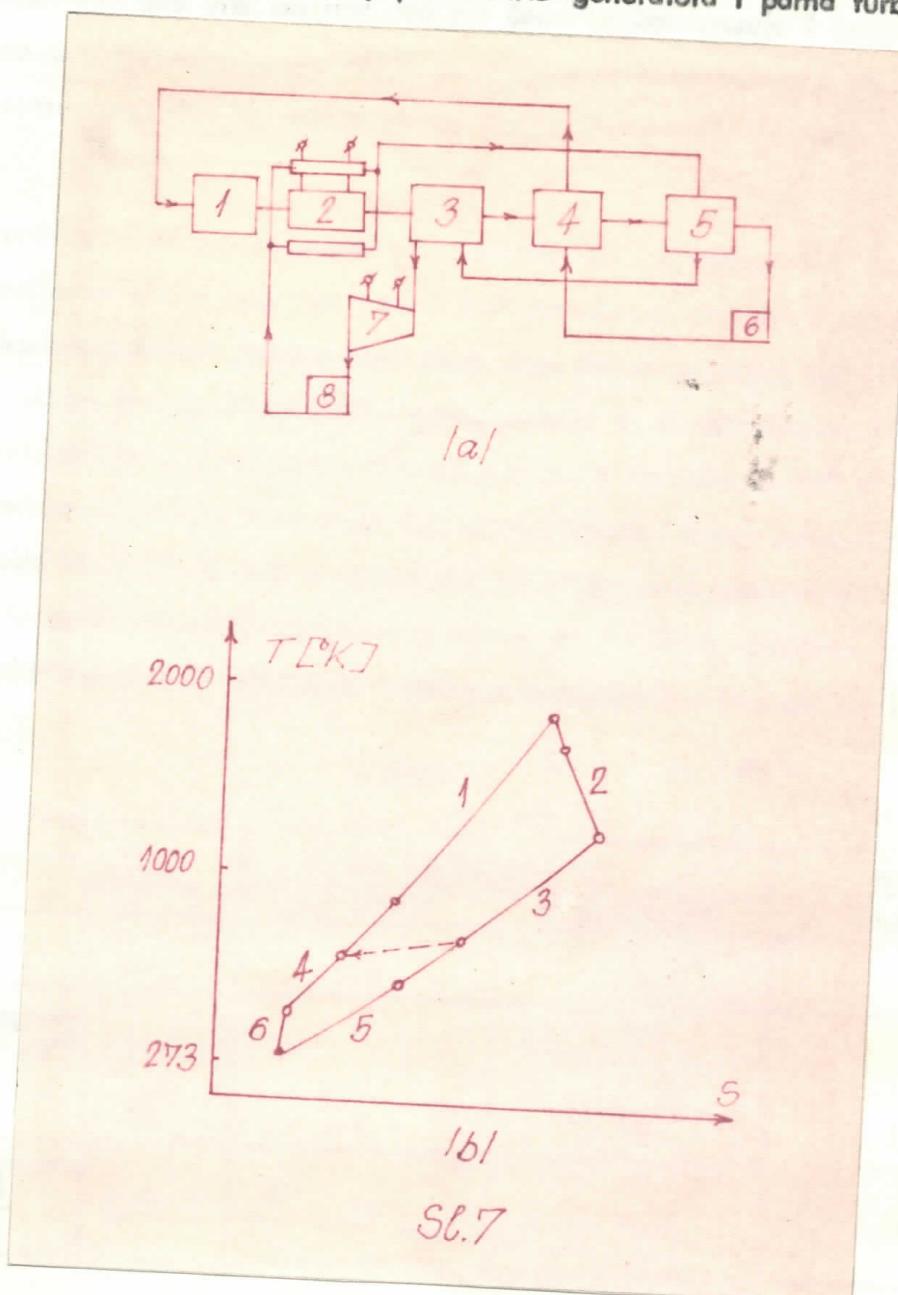
Za razliku od predhodnog ciklusa koji se naziva otvoreni gde se gas, prošavši kroz ciklus izbacuje u atmosferu, u sistemu zatvorenog ciklusa Sl. 7 radni gas neprestalno cirkuliše po zatvorenoj kontruri. Pošto gubitaka radnog gasa u ovom ciklusu praktično nema on se može izabrati tako da poseduje optimalne vrednosti električne i toplotne provodljivosti. Inerti gasovi koji imaju mali afinitet prema elektronu i koji su hemijski neaktivni, su najpogodniji kao radno telo u zatvorenom ciklusu. Kao primeša obično se koristi cezijum umesto kalijuma zbog manjeg potencijala ionizacije /Cs: $V_i = 3,89 \text{ eV}$, K: $V_i = 4,34 \text{ eV}$ /. Toplotni izvor u ovom ciklusu je skoro isključivo nuklearni reaktor i ako postoji mogućnost korišćenja klasičnih goriva.

TAB. I

Vrsta goriva	Metan	Kerozin 86% C 14% H	Mazut 85 % C 11 % H 4% S	Ugalj 80 % C 11 % O 2 % H_2O
Temp. produk. sago-rev. /°K/	2490	2530	2510	2505

Hermetizaciji konture mora se posvetiti posebna pažnja pošto čak i sasvim nezna-tna količina stranih primeša veoma smanjuje električnu provodljivost a i zbog zahteva da gubici radnog tela moraju biti isključeni. Izbor radnih gasova je obično ograničen na helijum, argon i neon ali u slučaju korišćenja nuklearnog reaktora kao

izvora toplote mora se voditi računa o činjenici da se organ karakteriše velikim presekom za zahvat neutrana zbog čega je manje pogodan od ostalih. Danas se smatra da zatvoreni MHD ciklusi imaju veću budućnost kako u energetici tako i u kosmičkoj tehnici zbog toga što su problemi oko eliminisanja produkata koji zagadjuju sredinu manji što se kao izvor toplote koriste nuklearni reaktori /što je značajno u kosmičkim primenama/. Principijelna šema zatvorenog MHD ciklusa dala je na Sl. 7. Karakteriše je pre svega što se u njenom sastavu nalazi, pored MHD generatora i parne turbine koja koristi



deo toplotne energije već prošle kroz MHD generator i na taj način značajno povećava efikasnost pretvaranja toplotne u električnu energiju tj. KKD celog ciklusa.

Gas se zajedno sa primesom /0,5 - 1 % Cs/ zagreva u reaktoru do oko 1800°C odakle odlazi u MHD kanal /2/ predhodno ubrzan u mlazniku.

Delom ohladjen /do oko 1000°C / gas iz kanala, u kojem se deo kinetičke energije pretvorio u električnu, ulazi u generator pare /3/ odakle odlazi u toploizmenjivač /4/ gde deo svoje toplote predaje gasu koji odlazi u reaktor. Iz toploizmenjivača gas ohladjen do oko 200°C ulazi u ekonomizer /5/ gde zagreva vodu za generator pare i ohladjen do oko 100°C kompresorom /6/ kroz toploizmenjivač /4/ ubacuje u reaktor zagrejan do oko 700°C u toploizmenjivaču. Para iz generatora pare odlazi u parni generator /7/ gde vrši koristan rad pri čemu se kondenzuje i pumpom /8/ ubacuje u sistem za hlađenje kanala MHD generatora iz koga odlazi u ekonomizer i ponovo u generator pare. Na taj način vidimo da je ciklus vode isto kao i ciklus gasa zatvoren.

Na Sl. 7.b prikazani su procesi u opisanom ciklusu na T-S dijagramu. Ovaj ciklus je isti kao i Brajtonov ciklus koji smo naveli kod generatora otvorenog ciklusa ali je ovde koeficijent korisnog dejstva znatno veći zbog toga što se u parnoj turbini koja je uključena u ovaj ciklus koristi deo toplotne energije koja se u elektranama prve generacije izbacivala neiskorišćena u atmosferu, što je prikazano na delu G T-S dijagrama /Sl. 6b/. Ove kombinovane MHD elektrane nazivaju se elektranama druge generacije i njihov KKD je za oko 10 - 15 % veći u odnosu na elektrane prve generacije. Kao ilustraciju prednosti MHD elektrana u odnosu na klasične navodimo tabelu /Hals F. 1968/, sa podacima koji se odnose na elektrane sagradjene u periodu od 1966 - 1968.

TABELA II

	TE Klasične	MHD ELEKTRANE		TE Nuklearne
		I generacija	II generacija	
KKD (%)	40	50	60	32
Koefficijent kapita- lnog ulaganja 10^{-3} dol kw	120	120	90	160
Cena proizv. el. ene- rgije 10^{-3} dol kw	4,52	4,26	3,34	5,23

- Generatori sa tečnim metalom

U MHD generatorima može se kao radno telo koristiti i nestišljivi fluid tipa tečnih/rastopljenih/ metala čija je prednost nad ionizovanim gasovima visoka ele-

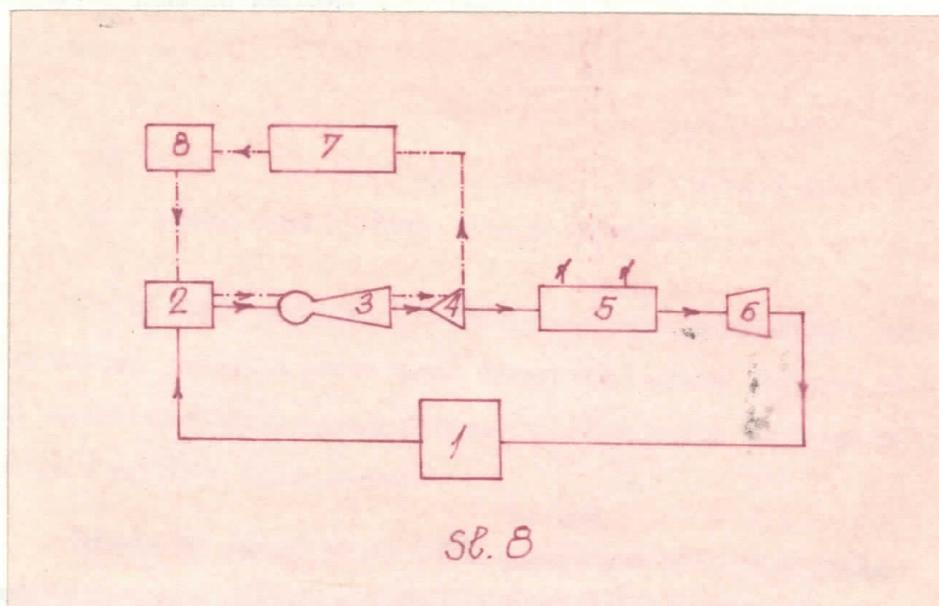
ktrična provodljivost u celoj oblasti temperatura /približno 10^6 puta veća/. MHD generatori ovog tipa obično rade sa nuklearnim reaktorom kao izvorom toplote. U toku razvoja ovog tipa generatora osnovni problem je bio naći način da se toplotna energija predata rastopljenom metalu što efikasnije pretvori u kinetičku energiju, što je veliki problem s obzirom da je u pitanju nestišljivi fluid. Danas postoji nekoliko metoda od kojih se koriste uglavnom dva koja će ovde biti opisani.

Kod generatora sa ionizovanim gasom, gas je bio MHD radno telo i ujedno termodinamičko radno telo. Zadovoljavajući KKD mogao se postići sa temperaturama ne manjim od oko 2000°C (što je određeno neophodnom vrednošću električne provodljivosti). Pri tim temperaturama je problem izbora konstrukcionih materijala /elektroda i izolatora/ veoma veliki. Kod generatora sa tečnim metalom karakteristično je to da termodinamičke i MHD funkcije vrše ili različite supstance ili različita agregatna stanja jedne supstance. Pri ovome, činjenica da se kao MHD radno telo javlja istopljeni metal čija provodljivost za više redova veličine previšava provodljivost gasova pri istoj temperaturi, omogućava da maksimalna temperatura termodinamičkog ciklusa bude u opsegu od $900 - 1200^{\circ}\text{C}$ što rešava problem materijala i omogućava velike gustine snage. Lako je KKD ovih generatora manji nego kod generatora sa ionizovanim gasom predviđa im se dobra budućnost u kosmičkoj tehniči pa i krupnoj energetici sobzirom na sigurnost i pouzdanost u radu.

Tip generatora sa rastopljenim metalom određuje se prema tipu ubrzavajućeg uređaja u kome termodinamičko radno telo /para Li, Ka ili Cs, N_2 / predaje MHD radnom telu /tečni Li ili Ka/ određenu kinetičku energiju.

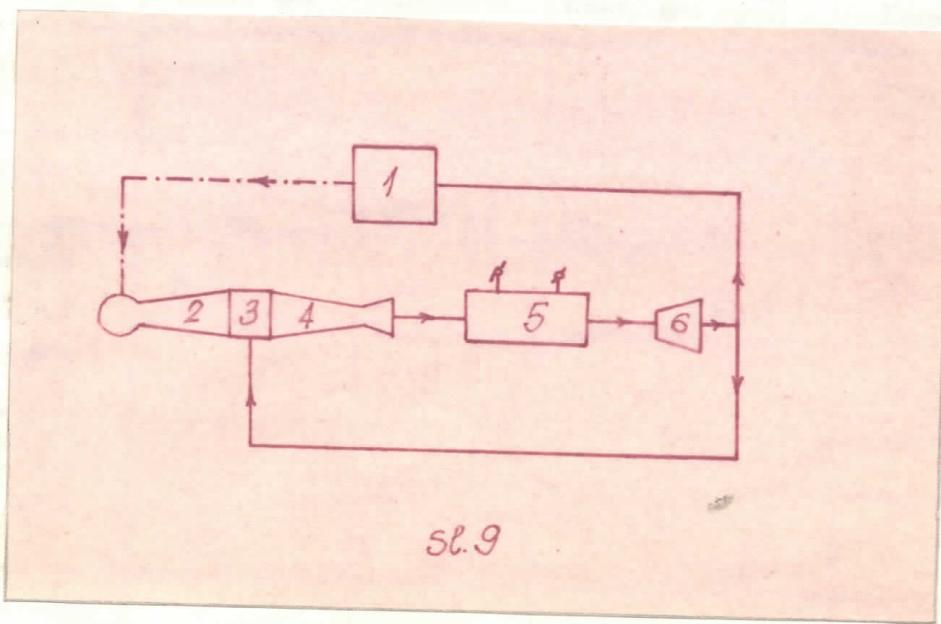
U separacionom ubrzavajućem uređaju para /ili gas/ koja ubrzava rastop odvaja se pred ulazom u MHD kanal putem mehaničke separacije. Principijelna šema elektrane sa separacionim ubrzavajućim uređajem prikazana je na Sl. 8. Rastop se zagreva u reaktoru /1/ odakle odlazi u mešač /2/ gde isparava kondenzat termodinamičkog radnog tela /Ka, Cs/ ubačen u mešač pumpom /8/. Iz mešača rastop zajedno sa parom ulazi u mlaznik /3/ gde se vrši razmena količine kretanja između naglo raširene pare i rastopa. Pri tom se para hlađi i izdvaja u separatoru /4/ a rastop, veoma ubrzan pošto je primio deo kinetičke energije od pare, ulazi u MHD kanal /5/ gde vršeći koristan rad biva usporen. Iz kanala rastop ulazi u difuzor /6/

gde se još više usporava i odlazi ohlađen ponovo u reaktor čime je ciklus MHD radnog tela zatvoren. Supstanca koja cirkuliše u ciklusu pare posle izlaska iz separatora hlađi se u hlađnjaku /7/ odakle se u vidu kondenzata prepumpava pumpom /8/ u mešač gde ponovo isparava na račun toplote rastopa koji dolazi iz reaktora. Para se, da-kle zajedno sa rastopom širi i ubrzava u mlazniku i zatim u separatoru odvaja od tečne faze.



Sl. 8

Drugi tip ubrzavajućeg uređaja je tzv. injektorni. Ciklus sa ovim uređajem prikazan je na Sl. 9. Ovde se u ulozi termodinamičkog i MHD radnog tela, za razliku od predhodnog, pojavljuje ista supstanca u dva agregatna stanja.



Sl. 9



Rastop se u reaktoru /1/ zagreva i isparava tako da je para na visokoj temperaturi. Para se uvodi u dvostruki mlaznik /2,3,4/ gde se širi pri čemu se deo toplotne energije u delu /2/ mlaznika pretvara u kinetičku. U paru koja se širi i ubrzava uvodi se /injektuje/ rastopljeni metal iz ciklusa rastopa. U procesu razmene količine kretanja metal se ubrzava u delu /4/ mlaznika pri čemu temperatura pare opada pa se ona kondenzuje. Na taj način ubrzan, rastop ulazi u MHD kanal /5/ gde se izdvaja koristan rad. Usporen u kanalu, zbog pretvaranja velikog dela kinetičke energije u električnu, rastop odlazi u difuzor /6/ gde se dalje usporava i hlađi. Tako ohladjen deo rastopa se vodi u reaktor gde ponovo isparava i odlazi u mlaznik a drugi deo injektuje u komoru /3/ između mlaznika /2/ i /4/. Na ovaj način su i ciklus pare i ciklus rastopa zatvoreni.

Da bi dobili pojmove o veličinama raznih parametara, navodimo tehničke karakteristike nekoliko generatora. Navedeni podaci izabrani su tako da se za svaki od napred navedenih tipova generatora mogu uočiti karakteristične veličine, za razne snage i različite vrste goriva.

Tabela III odnosi se na MHD generatore otvorenog ciklusa, Tab. IV na generatore zatvorenog ciklusa a Tab. V na generatore sa tečnim metalom.

TABELA III

Naziv i proizvodjač	U - 25 SSSR	LORHO SAD	Inst. za ugalj Esen DDR	SVERK Poljska
Gorivo	zemni gas	Toluol	Koks, gas ugalj	Kerozin
Oksidator	vazduh na 1200°C+O ₂	O ₂	Vazduh + O ₂	Vazduh na 780°C + O ₂
Presek kanala (cm ²)	38 x 76 -38 x 188	37 x 64	14x14-20x20	9 x 3
Dužina kanala (cm)	500	400	200	50
Brzina protoka (m/sec)	850	1700-2100	1000	800
Temperatura (°K)	2870	3120	2700	2600
Magnetno polje (T)	2	1,9	5-7,5	2,5
Izlazna el. snaga (kW)	25000	18000	1000	0,2

TABELA IV

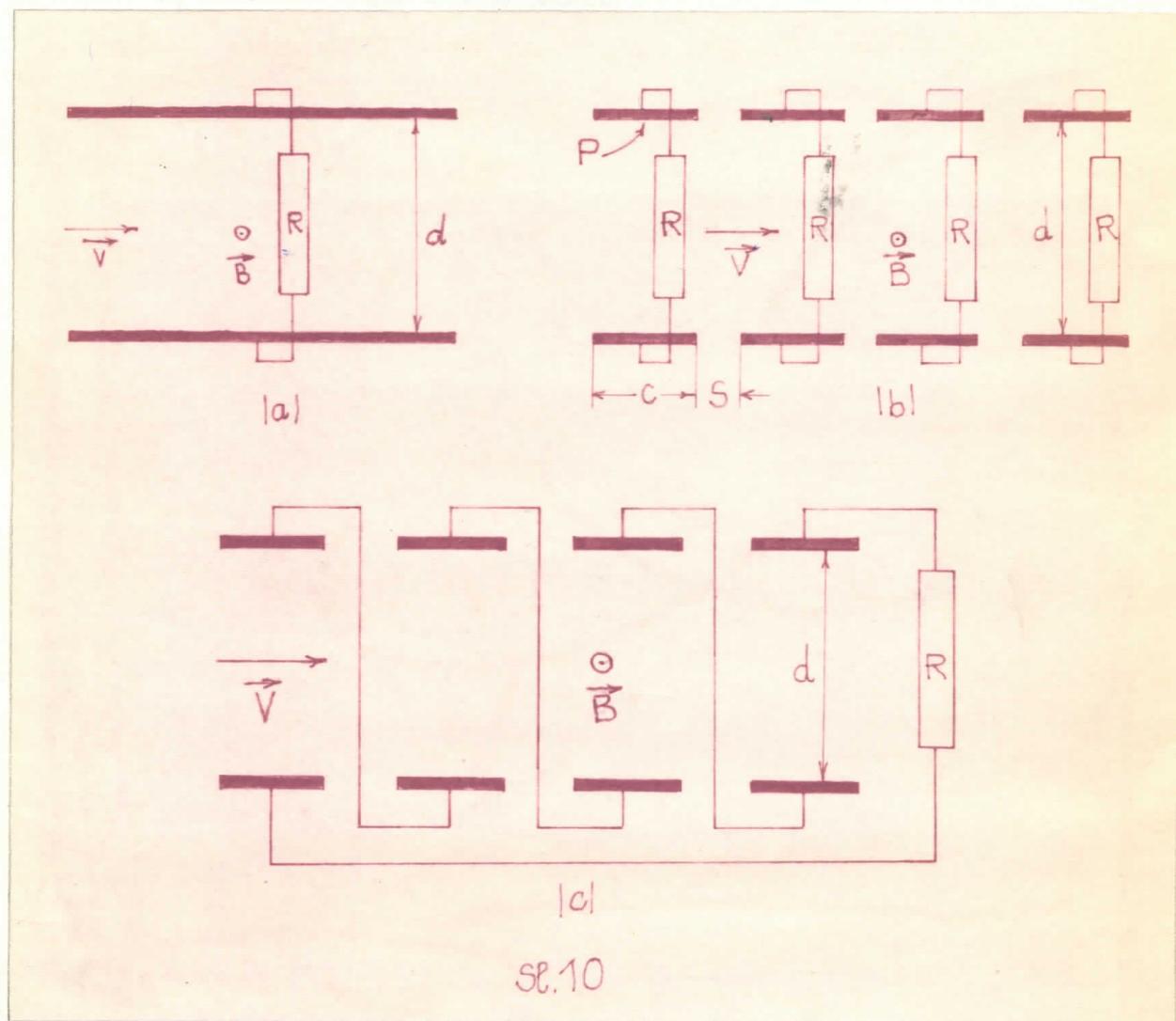
Naziv i proizvođač	Politeh. Ins. Holandija	V. E. L. Lenjin SSSR	Dzeneral Ele. SAD	Stenford univer. SAD
Gas	Ar	Ar	Ar, He, Ne	Ar
Primesa	Cs	-	Xe	K
Presek kana- la (cm ²)	7 x 7 - 10 x12 L=40cm	-	161-484 L=93 cm	2 x 3 L = 20 cm
T Gas /°K/	2000	1600	200	1800-2500
Rashod goriva /gr/sek/	5 - 11	28	1000-20000	225
Brzina /m/sec/	200 - 500	700	1000-2000	-
Koncentrac. pri- mesa (%)	0,1	0,6	0,1 - 1	0,5
Magnetno polje /T/	0,1	0,9	1,7	2,8
Provodljivost /S ⁻¹ cm ⁻¹ /	500	7	100	2 - 10
El. snaga /kw/	-	-	750	-

TABELA V

PROIZVODJAČ	A. E. G. Berlin	L. R. M. Pasadena /SAD/	I. T. T. A. N. Ukrajine
Sistem za ubrzavanje	Injektorni	Separacioni	Separacioni
T. D. Radno telo	Para K	N	Vazduh
MHD radno telo	Tečni Na	Rastop NaK	Hg
T Rastopa /°K/	900	1100	850
El. snaga /KW/	3	5	-
Primena	Eksp.	Avioni	Eksp.

I.3. ELEKTRIČNE KARAKTERISTIKE MHD GENERATORA

Prema načinu međusobnog vezivanja elektroda i elektroda sa potrošaćem, razlikujemo nekoliko tipova generatora. Najprostiji je linearni sa ravnim elektrodama Sl. 10a koji se zbog niza nedostataka ne primenjuje u komercijalnim generatorima ali se zbog svoje jednostavnosti koristi u modelima za eksperimentalno ispitivanje karakteristika radnog fluida. Osnovni nedostatak mu je to što elektrode koje su postavljene duž strana kanala omogućavaju da struja stvorena osnim poljem ima zatvoreno kolo. Ova struja, posebno u generatorima sa ionizovanim gasom čija je provodljivost mala, stvara velike gubitke i teškoće pošto se pretvara u Džulovu toplotu tako da je iako upotrebljiv u slučaju malih vrednosti osnog polja, neekonomičan.



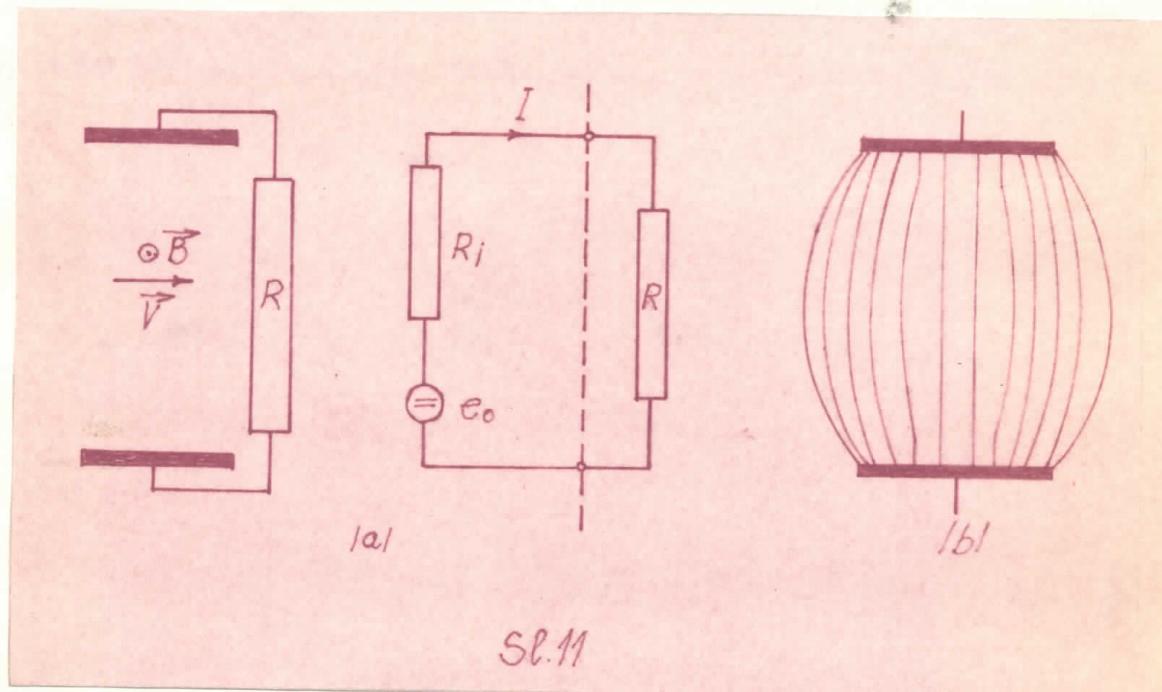
Da bi se eliminisala osna struja elektrode se sekcionisu tj. duž kanala se ugradjuje niz parova elektroda jedna naspram druge tako da na elektrodnim stranama kanala ne postoji zatvoreno kolo za osnu struju, i gubici, osnovna mana predhodnog tipa

bivaju eliminisani. Ovaj tip generatora naziva se faradejevski sa sekcioniranim elektrodama i prikazan je na Sl. 10 b. Za svaki par elektroda /kad komercijalnih uredjaja njihov broj se kreće do nekoliko stotina /vezuje se poseban potrošač što je nepraktično, posebno ako uzmemo u obzir da se naponi na pojedinim elektrodama razlikuju^u zavisnosti od raspodele brzine duž kanala i od homogenosti magnetnog polja. Zbog toga se ovakva veza retko primenjuje praktično ali je veoma važna pri ispitivanjima jer omogućava nezavisna merenja duž čitavog kanala.

Ako je d rastojanje izmedju elektroda, s udaljenje susednih elektroda, b širina kanala a p površina elektrode svaki par elektroda u ovom tipu generatora možemo predstaviti ekvivalentnom šemom. Sl. 11a gde je $e_o = VBd$ elektromotorna sila a R_i unutrašnji otpor koji je jednak

$$R_i = \frac{1}{6} \frac{d}{s \cdot b}$$

3.1

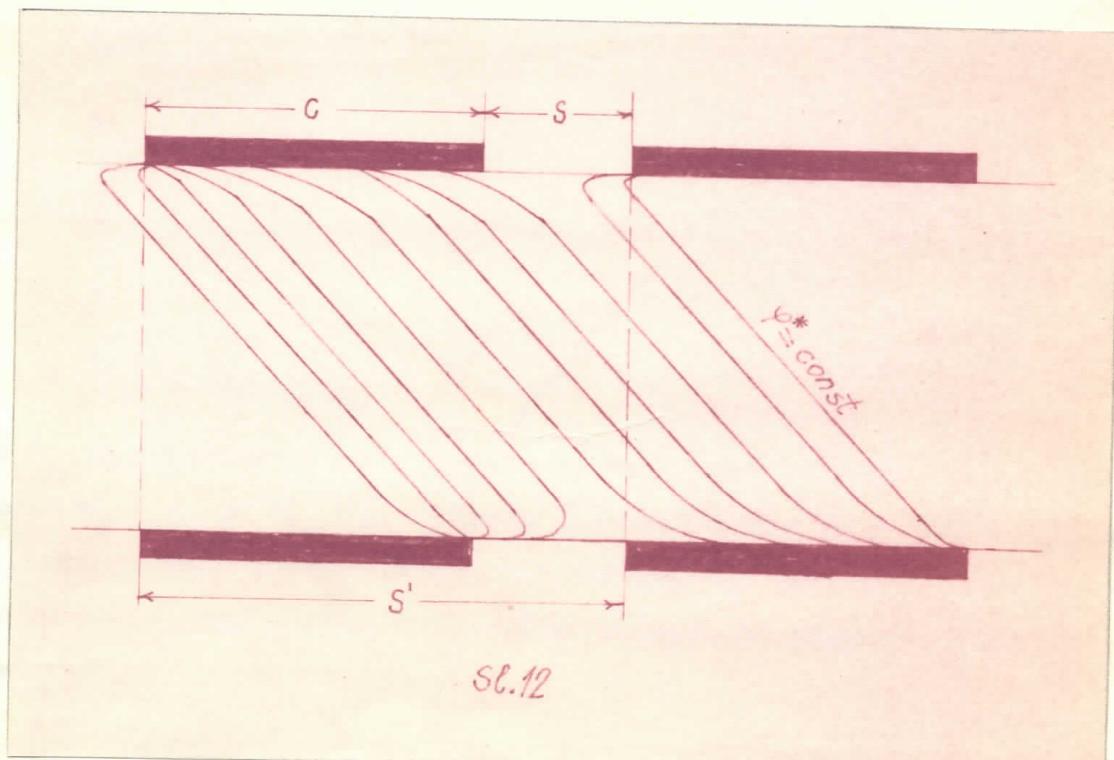


Veličina $s \cdot b$ uzeta je zbog širenja linijsa E /Sl. 11b/ pošto je zbog ovog, efektivna površina elektrode veća od stvarne površine p . To znači da je unutrašnji otpor generatora za par elektroda računat u delu kanala sa geometrijom $s \cdot b \cdot d$ a ne sa geometrijom $p \cdot d$ što je opravdano s obzirom na navedeni efekat širenja /Celinski Z. 1964/.

Jasno je da će za generator sa N parova elektroda tj. N nezavisnih potrošača veličina R , za N puta biti manja od R , za jedan par, veličina struje I , N puta veća dok e_0 ne zavisi od broja parova elektroda.

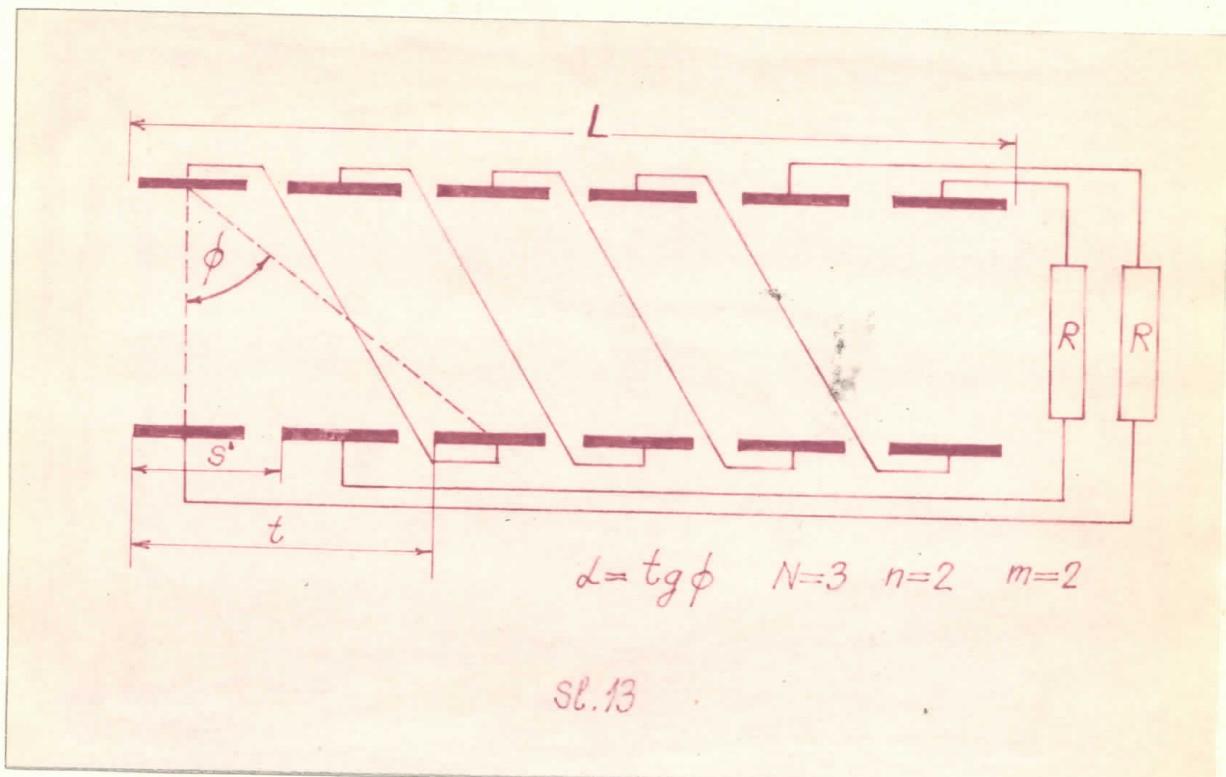
Nepogodnost zbog upotrebe velikog broja nezavisnih potrošača otklanja se rednim vezivanjem susednih parova elektroda Sl. 10c. Ovaj tip generatora naziva se faradejevski sa dijagonalnim vezivanjem i danas se skoro isključivo upotrebljava. Zbog konačne širine elektroda i konačnog razmaka izmedju susednih parova dolazi do preraspodele potencijala zbog čega se slika ekvipotencijala kod realnog generatora /Sl. 12/ bitno razlikuje od idealnog /Sl. 3/ kod koga je predpostavljeno da je širina elektroda c i razmak izmedju elektroda s vrlo veliki.

Kod idealnog generatora /Sl. 3/ sve linije $\psi^* = \text{const.}$ koje polaze od jedne elektrode završavaju se na drugoj elektrodi istog para, pošto zbog velikog rastojanja s nemogu da dosegnu susedni par elektroda. Kod realnog generatora, međutim, deo linija $\psi^* = \text{const.}$ završava se na susednom paru elektroda, zbog malog razmaka medju elektrodama, usled čega medju susednim parovima elektroda postoji razlika potencijala što omogućava dobijanje visokih napona, rednim vezivanjem susednih parova elektroda.



Sa Sl. 12 i Sl. 13 je jasno da će na raspodelu potencijala pored c i s uticati još niz parametara: d , s , α /definisano na Sl. 13/, broj nezavisnih potrošača n , broj parova elektroda vezanih redno za jedan potrošač N , i faktor dijagonalnog pomaka m .

$/m = \frac{t}{s'}$. Uzimajući pored ovog u obzir da je provodljivost tenzorskog karaktera jasno je da je slika odnosa u kanalu ovog MHD generatora veoma složena tako da zadovoljavajuća teorija ovog generatora, koja bi sadržala sve ove efekte, ne postoji, zbog čega se električni parametri određuju uz značne aproksimacije ili eksperimentalno. Uzimajući da je $\frac{c}{s} = 1$ i zanemarujući dipolne slojeve i nehomogenost polja vektora B i V , metodom konformnih transformacija /Schultz - Grunow F. Denzel D. 1964/ dobijeni su izrazi za EMS i unutrašnji otpor ovog generatora:



$$e_o = \Omega VBL$$

3.2

$$R_i = \frac{\rho^2}{d} R_{io}$$

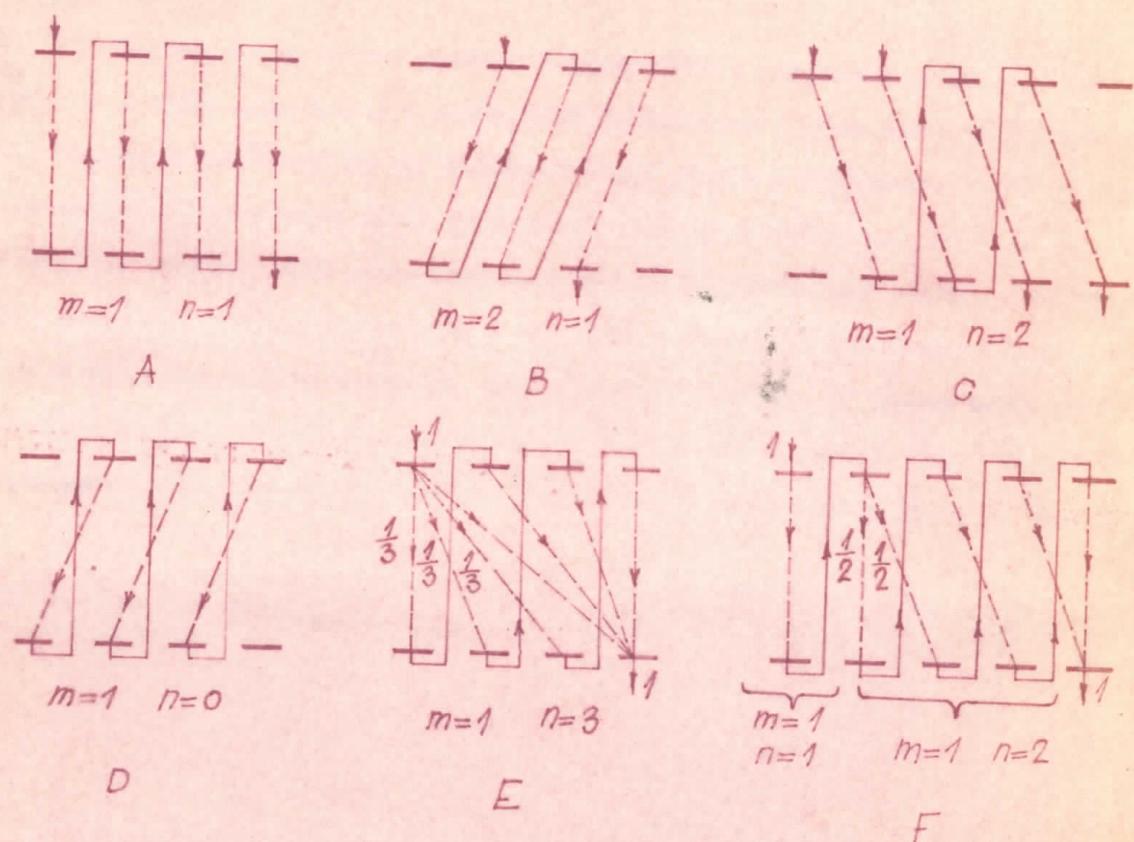
3.3

gde je R_{io} otpor generatora bez prisustva magnetnog polja a ρ funkcije navedenih parametara d , s , L , n , N , i m . Iz izraza 3.2 zaključujemo da je EMS ovog generatora srazmerna broju redno vezanih parova elektroda N , pošto je $L = N \cdot s / S$. 13/, što predstavlja značajnu prednost ovog načina vezivanja jer omogućava dobijanje visokih napona.

Strujni tokovi u generatoru, sem od načina vezivanja /broja potrošača i dijagonalnog pomaka/ veoma zavise od otpora potrošača. Na Sl. 14 prikazano je nekoliko karakterističnih slučajeva.

Generator A sa poprečnim tokom / $m = 1, n = 1$ / ima najbolje karakteristike s obzirom da struja u fluidu teče između naspramnih elektroda čemu se teži zbog smanjivanja unutrašnjeg otpora.

Generator B ima drugačiju šemu vezivanja / $m = 2, n = 1$ / a generator C ima dva potrošača / $m = 1, n = 2$ /.



Sl. 14

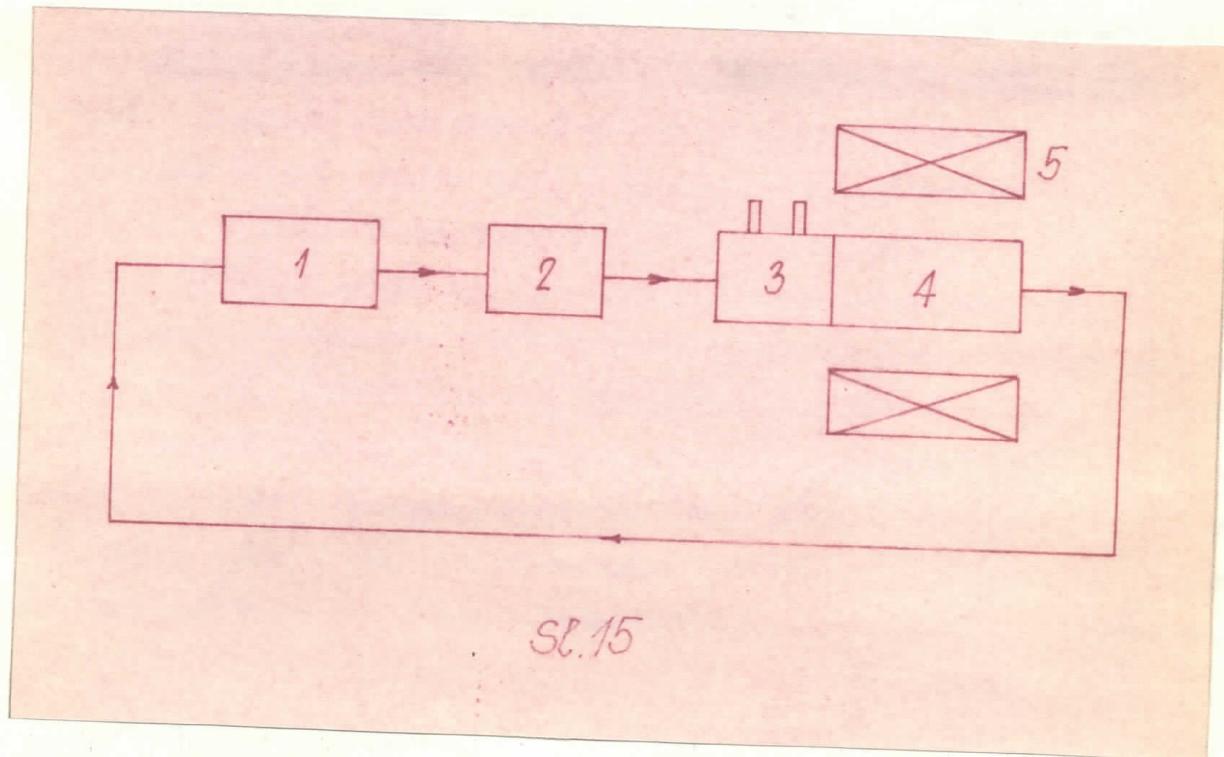
Pri veoma velikom otporu potrošača / $R \gg R_i$ / može da dođe do stvaranja dodatnih poprečnih i zatvornih strujnih tokova. Na primer ako uklonimo opterećenje sa generatora A dobijamo situaciju D. U režimu kratkog spoja, kada je spoljašnje opterećenje malo može doći do koncentrisanja struje na krajevima generatora. Režim rada ovog generatora je linearna superpozicija n normalnih radnih režima /slučaj E gde je $m = 1, n = 3$ /. Slučaj F pokazuje karakterističnu promenu režima rada generatora sa $n = 1$ i $m = 1$ pri smanjenju otpora potrošača. Efekti promene režima rada generatora sa promenom otpora potrošača, posebno koncentrisanje struje na krajevima generatora, predstavljaju veliki tehnički problem i vrlo teško se otklanjaju.

II D E O

II.1 KONSTRUKCIJA GENERATORA

Provera nekih od principa MHD metoda generisanja električne energije izvršena je na modelu generatora sa elektrolitom kao radnim telom, koji je u tu svrhu bio sagradjen.

S obzirom da su brzina proticanja elektrolita i magnetno polje koje smo mogli postići u našim uslovima bili mali, EMS indukovana u generatoru bila je mala. Zbog toga smo očekivali da će fizičko-hemiski efekti u elektrolitu imati znatan uticaj na vrednosti parametara MHD generatora posebno u režimu pri kome je napon na elektrodama dobijem MHD procesima uporediv sa naponima koji nastaju usled polarizacije elektroda, pojave kontaktnih i termičkih potencijala na samom kanalu generatora ili u delovima memog uredjaja. Kao elektrolit korišćen je veoma razblaženi rastvor NaCl zbog manje mogućnosti za stvaranje dipolnih slojeva i zbog manje hemijske aktivnosti. O ovom poslednjem se moralo voditi računa zbog toga što bi pri-



sustvo bilo kakvih nekontrolisanih primesa nastalih usled hemijskih reakcija radnog tela sa delovima uredjaja bitno menjalo fizičkohemijske karakteristike radnog tela koje su važni parametri generatora. O ovom je vodjeno računa prilikom izbora materijala i izrade pojedinih delova uredjaja. Generator je šematski prikazan na SI.15.

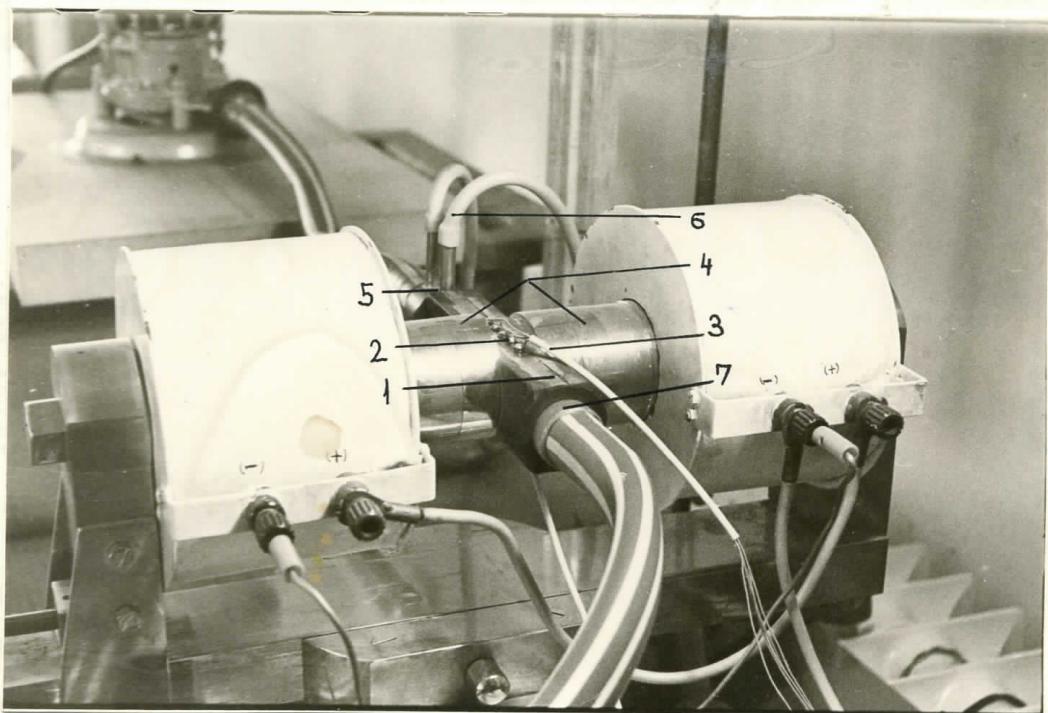
Iz rezervoara /1/ zapremine 35 l elektrolit se ubrzava pumpom /2/ odakle ulazi u kanal MHD generatora /4/ koji je postavljen izmedju polova elektromagneta /5/, predhodno prošavši kroz venturijev brzinometar /3/. Iz kanala se elektrolit ponovo vodi u rezervoar tako da je ostvaren zatvoren tok elektrolita. Rezervoar je bio metalni emajlirani da bi se spriječilo rđanje. Iz istog razloga su cevi koje spajaju pojedine delove uređaja bile plastične. Pumpa koja je korišćena za ubrzavanje elektrolita je električna centrifugalna sa sledećim karakteristikama:

ukupni pritisak /usisavanje + gubitci u cevima/	20 mV
kapacitet ukupnog pritiska 20 mV	$1,3 - 1,5 \frac{m^3}{h}$
snaga	350 W
napon napajanja	220 V
broj obrtaja	5500

Pumpa je bila postavljena na rezervoar pomoći pogodnog držača tako da je izlaz pumpe bio na horizontalnoj osi koja prolazi izmedju polova elektromagneta. Kao brzinometar korišćena je venturijeva cev napravljena od mesinga i proračunata tako da za srednju brzinu proticanja od oko $1,2 \frac{m}{s}$ visinska razlika stubova elektrolita u manometru bude 10 cm. Konstrukcija i dimenzije venturijeve cevi prikazani su na crtežu 2. Brzinometar je bio direktno spojen sa kanalom MHD generatora koji predstavlja ključni deo uređaja zbog čega je posebna pažnja bila posvećena njegovoj konstrukciji i izradi. Kanal je pravougaonog poprečnog preseka izradjen od pertinaksa debljine 8 mm. Konstrukcija i dimenzije kanala prikazani su na crtežu br. 1. a njegov položaj izmedju polova elektromagneta na fotografiji /Sl. 16/. Bočne strane su za elektrode bile zatepljene i zatim pritegnute zavrtnjima da bi se postigla što bolja hermetizacija. Kao elektrode su upotrebljene ugljene elektrode iz suvih elemenata prečnika 4 mm. Ugljene elektrode su korišćene da bi izbegli hemijske reakcije izmedju elektroda i elektrolita čije bi prisustvo zbog hemijskih potencijala unesilo velike greške. Obradi unutrašnjih površina kanala i montiranju elektroda posvećena je posebna pažnja pošto bi svaka neravnina u kanalu uticala na stvaranje turbulencija koje veoma smanjuju efikasnost interakcije elektroda i fluida. Iz istog razloga je ulaz u kanal iz brzinometra, bio posebno obradjen/ zaoobljene strane/ kako bi se izbeglo stvaranje turbulencija na prelazu iz okruglog preseka brzinometra u pravougaoni presek kanala. Pet parova elektroda postavljeno je u otvore odgovarajućeg prečnika na elektrodnim stranama i zatepljeno. Na metalne kapice koje su se nalazile na elektrodama zatepljeno je deset provodnika koji su elektrode

vezivali sa mernim pultom na kome je svakom paru elektroda odgovarao par metalnih buksni.

Venturijeva cev kao i izlazni priključak kanala spojeni su sa kanalom uvrštanjem pošto su na otvorima kanala predhodno bili urezani navoji. Radi hermetizacije, između kanala i ovih delova, postavljeni su gumeni zaptivači koji su zaptivali spojeve kanala i venturijeve cevi. Spoljašnji prečnici izlaznog priključka pumpe kao i priključaka kanala bili su odabrani tako da se na njih mogla navući plastična cev koja je spajala izlaz pumpe sa brzinometrom i kanalom i izlaz iz kanala sa rezervoarom. Razlika pritisaka u venturijevoj cevi merena je vodenim manometrom visine 80 cm spojenim na priključke venturijeve cevi gumenim crevima. Manometarske cevi su bile spojene zbog toga što je ukupni pritisak u konturi bio oko 2 atm, pa je bilo nepraktično koristiti otvorene manometre s obzirom na njihovu visinu.



Sl. 16 1 - kanal generatora 2 - elektrode 3 - ka mernom
pultu 4 - polovi E.M. 5 - venturijeva cev, ulazni prik-
lučak 6 - na manometar 7 - izlazni priključak

Elektromagnet koji je korišćen napajan je akumulatorom napona 12 V kapaciteta 180 Ah. Polski nastavci su bili prečnika 6 cm. Maksimalna vrednost magnetnog polja na osi pri rastojanju polova od 17 mm /odredjeno deblijinom kanala/ bila je 0,56 T. Parametri koji su menjani tokom eksperimenta bili su

brzina proticanja elektrolita i jačina magnetnog polja. Brzina proticanja elektrolita nije mogla biti regulisana promenom režima rada pumpe /promenom napona napajanja/ s obzirom da proizvodjač pumpe to zabranjuje. Zbog toga je na ulazni priključak pumpe bio postavljen ventil kojim je regulisan protok a samim tim i brzina proticanja. Promena brzine proticanja postignuta na ovaj način bila je od $1,2 - 1,54 \frac{m}{s}$ /TAB VI/.

Promena jačine magnetnog polja vršena je promenom napona napajanja elektromagneta. Promena jačine magnetnog polja postignuta na ovaj način bila je od $0,17 - 0,56 T$ /TAB VII/. Raspodela jačine magnetnog polja između polova magneta snimljena je teslametrom firme KOVO. Sonda je bila postavljena na sredini rastojanja između polova i zatim pomerana duž poluprečnika u koracima od po 5 mm od $R=30mm$. Raspodela je prikazana na grafiku br. 1 i u TAB VII. Primećujemo da je jačina polja u blizini oboda pola oko 60 % - 70 % jačine u centru što znači da u oblastima gde su pojedine elektrode postavljene imamo velike razlike u jačini polja. Zbog toga je za svaku elektrodu uzimana odgovarajuća vrednost jačine B u oblasti te elektrode pa su na taj način izbegnute značajne greške.

TAB. VI

$\Delta h/cm/$	8	9	10	11	12	13
$V/\frac{m}{s}/$	1,209	1,282	1,352	1,418	1,480	1,540

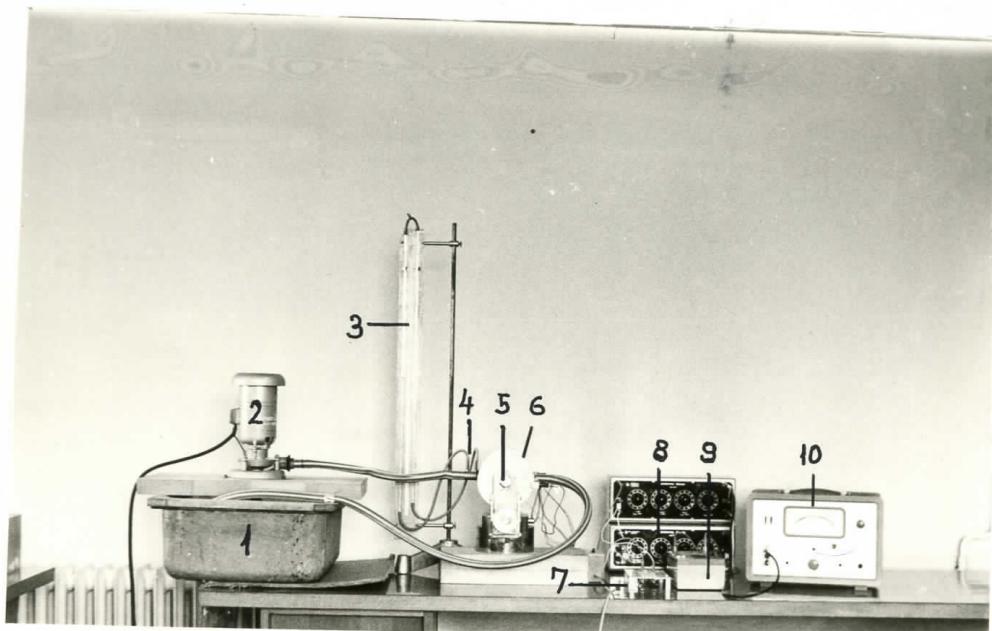
Iako su promene brzine proticanja V i jačine magnetnog polja B bile relativno male proizvod VBd ima vrednosti u intervalu od $3,5 - 14,66$ u koracima od po 0,4 prosečno.

Kompletan uredjaj bio je montiran po redosledu pri-kazanom na blok šemci Sl. 15, a njegov izgled prikazan je na fotografiji Sl. 17.

Raspodela magnetnog polja B (T) duž poluprečnika polova u funkciji rastojanja od centra pola r (mm) za različite nominalne vrednosti napona U (V), akumulatora za napajanje elektromagneta, data je u TAB. VII.

TAB. VII

V/V/	r = 0	r = 5	r = 10	r = 15	r = 20	r = 25	r = 30
2	0,170	0,165	0,165	0,160	0,155	0,135	0,120
4	0,300	0,295	0,295	0,290	0,285	0,250	0,200
6	0,385	0,380	0,375	0,370	0,350	0,300	0,270
8	0,460	0,455	0,450	0,440	0,390	0,350	0,290
10	0,505	0,500	0,500	0,480	0,470	0,450	0,420
12	0,560	0,555	0,555	0,540	0,520	0,500	0,420



Sl. 17 1 - rezervoar 2 - pumpa 3 - manometar 4 - venturijska cev 5 - elektromagnet 6 - kanal /zaklonjen namotajem elektromagneta 7 - merni pult 8 - potrošač 9 - mikroampermeter 10 - cevni voltmeter

II. 2 MERENJE I REZULTATI

Merenja na modelu generatora vršili smo na sledeći način: posle uključenja pumpe ventilom na ulaznom priključku regulišemo brzinu proticanja elektrolita V tako što ventil namestimo u položaj pri kome na manometru čitamo jednu od vrednosti razlike pritisaka $\Delta h/u$ cm H_2O stuba/ kojoj prema TAB. VI odgovara neka brzina proticanja elektrolita V. Prekidačem uključujemo napajanje elektromagneta, pošto smo predhodno priključak na akumulatoru postavili tako da dobijemo potreban napon tj. magnetsko polje. Jačinu magnetskog polja je potrebno stalno kontrolisati pošto se zbog zagrevanja namotaja elektromagneta i u zavisnosti od stanja akumulatora menja. Ta merenja su vršena pomenutim teslametrom. Naponi na pojedinim elektrodama mereni su cevnim voltmetrom tipa GM 6020 firma PHILIPS čiji je unutrašnji otpor $100 M\Omega$ struja tranzistorskim AVO - metrom tipa UNIGOR 6e firme GOERZ unutrašnjeg otpora $1 K\Omega$ na opsegu $1 \mu A$ i $3 \mu A$. Pri određivanju elektrodnog faktora k voltmetar je direktno vezan za odgovarajuće parove elektroda dok su pri snimanju U - I karakteristika voltmetar, ampermetar i potrošač bili vezani prema odgovarajućoj šemi SI. 18. Kao potrošač korištene su dekadne kućište otpornika maksimalnog otpora $13 M\Omega$ sa korakom od po 10Ω firme ISKRA. Napajanje motora elektropumpe nije bilo stabilisano tako da su postojale zнатне fluktacije u brzini proticanja zbog čega su sva merenja vršena po tri puta i zatim uzete srednje vrednosti. Te srednje vrednosti nalaze se u tabelama i na graficima.

- Određivanje elektrodnog faktora k

Elektromotorna sila e, koja se indukuje na jednom paru elektroda prema jed. 1.6 iznosi VBd i jednaka je naponu U na otvorenom kolu. Ovo važi pod uslovom da su brzina proticanja elektrolita i jačina magnetskog polja homogeni. Zbog neizvezne nehomogenosti brzine proticanja elektrolita i jačine magnetskog polja EMS e, je umanjena za faktor k koji je pokazatelj gubitaka koji nastaju u procesu transformisanja kinetičke energije fluida u električnu, u kanalu MHD generatora. Na taj način je napon U na otvorenom kolu jednak :

$$U = k \cdot VBd$$

2.2.1

U slučaju kanala sa idealno gladkim zidovima i potpuno uniformnim magnetnim poljem B i brzinom proticanja V, $k = 1$. Pojavom turbulencije, nehomogenosti magnetskog polja i brzine, faktor k se veoma smanjuje zbog čega mlaznik i kanal genera-

tora moraju imati gladke površine i aerodinamičan oblik. Kod kvalitetnih kanala k dostiže vrednosti bliske jedinici dok su uobičajene vrednosti od 0,8 - 0,95. Elektrodi faktor je u sagradjenom uredjaju određen na sledeći način: za svaki par elektroda nacrtan je grafik zavisnosti merenog napona U od proizvoda VBd za razne vrednosti V i B. Ta zavisnost je prava koja prolazi kroz koordinatni početak /jed. 2.2.1/ i njen nagib predstavlja faktor k. Rezultati merenja prikazani su na grafiku 2. Vrednost k dobijene ovim merenjima kreću se od 0,74 do 0,94 što zavisi od položaja elektrode kako je to na grafiku prikazano. S obzirom da su dobijeni grafici prave u celom intervalu vrednosti VBd zaključujemo da se režim toka elektrolita u intervalu brzine od $1,2 - 1,54 \frac{m}{s}$ nemenja.

Relativno mala vrednost veličine k za dve krajnje elektrode /1. i 5./ mogla se očekivati s obzirom na izrazitu nehomogenost magnetnog polja u tim oblastima kanala /grafik 1/.

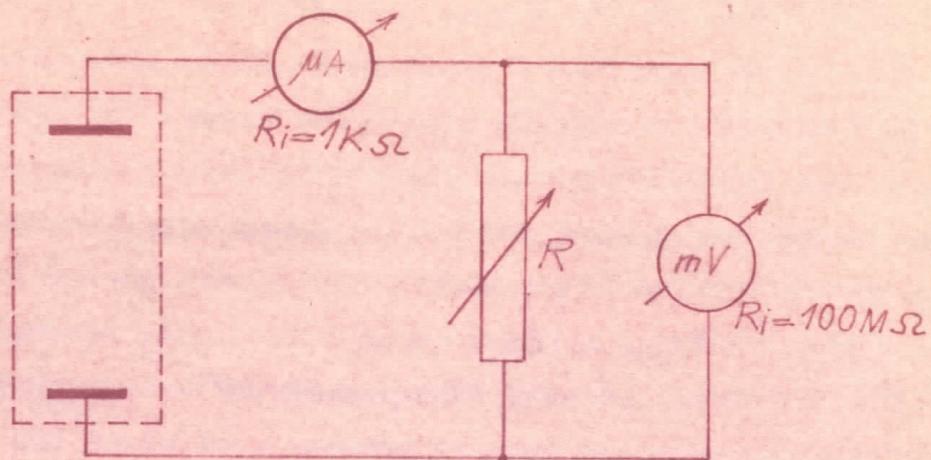
- U - I karakteristike MHD generatora

U - I karakteristike generatora snimljene su uredjajem čija je šema veza data na Sl. 18 na taj način što smo za fiksirane vrednosti parametara B i V menjali otpor potrošača R i merili odgovarajuće vrednosti struje I i napona U na potrošaču.

Na graficima 3, 4 i 5 prikazane su U-I karakteristike generatora za fiksiranu vrednost B i tri vrednosti brzine proticanja elektrolita V : maksimalnu $1,54 \frac{m}{s}$ srednju $1,35 \frac{m}{s}$ i minimalnu $1,2 \frac{m}{s}$. Lako je uočiti da se napon na elektrodama smanjuje proporcionalno smanjenu brzine proticanja elektrolita /jed. 2.1/, dok se oblik karakteristika pri tom nemenja što znači da se unutrašnji otpor generatora /nagib U-I karakteristike/ pri promeni brzine proticanja nemenja. Na grafiku 6 prikazana je familija U-I karakteristika za slučaj konstantne brzine proticanja elektrolita $1,35 \frac{m}{s}$ i šest vrednosti jačina magnetnog polja B kao parametra. I ovde možemo uočiti da se vrednost napona U menja proporcionalno jačini magnetnog polja B pri čemu opet nagib karakteristika /unutrašnji otpor/ ostaje konstantan.

Unutrašnji otpor generatora određen iz nagiba karakteristika iznosi $5,2 \text{ K}\Omega$, a provodljivost elektrolita izračunata iz unutrašnjeg otpora i geometrije kanala korišćenjem jednačine 3.1 iznosi $\gamma_m = 0,41 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega^{-1}}{\text{cm}}$. Provodljivost izračunata pomoću jed. 1.11 korišćenjem tabličnih vrednosti za pokretljivost jona Na^+ i Cl^- $\gamma_{\mu^+} = 4,62 \cdot 10^{-4} \frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$ i $\gamma_{\mu^-} = 7 \cdot 18 \cdot 10^{-4} \frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$ iznosi $\gamma_r = 1,14 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega^{-1}}{\text{cm}^{-1}}$.

Ista vrednost je dobijena pomoću izraza za ekvivalentnu provodljivost elektrolita:



Sl. 18

$$\Lambda = \frac{1000 \sigma}{C}$$

2.2.2

gde je $\Lambda = \lambda^+ + \lambda^-$ tj. ekvivalentna provodljivost jednaka zbiru jonskih provodljivosti jona Na^+ i Cl^- a C koncentracija elektrolita $/C = 0,01 \frac{\text{gr ekv}}{\text{l}}$. Brojne vrednosti jonskih provodljivosti su $\lambda^+ = 47,2 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ i $\lambda^- = 66,8 \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ a kao i vrednosti za μ uzete su iz Glestan S. Fizička hemija. Poredjenjem σ_m i σ_r primičujemo da je izmerena provodljivost σ_m manja od provodljivosti izračunate preko vrednosti μ ili λ za približno tri puta. Manja vrednost izmerene provodljivosti mogla se očekivati s obzirom na neizbežnu pojavu dipolnih slojeva ali zbog vrlo velike razlike trebalo bi razmotriti primenljivost izraza 3.1 na elektrolit. Pošto u našim uslovima nije postojala mogućnost za snimanje /sondiranje/ raspodele potencijala /to znači i električnog polja/ nije bilo moguće kvantitativno proučiti dipolne slojeve i pojavu širenja linijskog električnog polja.

Da bi ocenili uticaj dipolnih slojeva na vrednost provodljivosti elektrolita /unutrašnji otpor generatora/ otpor generatora je meren Vitstonovim mostom sa neizmeničnom strujom čime je uticaj dipolnih slojeva eliminisan. Dobijena vrednost otpora bila je manja tj. provodljivost veća za 20 % $/R_i = 4,2 \text{ k}\Omega/$, od vrednosti unutrašnjeg otpora određenog iz nagiba $U - I$ karakteristika, odakle zaključujemo da se zbog pojave dipolnih slojeva pri koncentraciji $C = 0,01 \frac{\text{gr ekv}}{\text{l}}$ i navedenim

vrednostima brzine V , provodljivost elektrolita smanjuje za 20 % tj. unutrašnji otpor generatora povećava za toliki iznos.

Na svim $U - I$ karakteristikama može se primetiti karakteristično krvljenje u oblastima malih napona /velika struja/ i malih struja /veliki napon/. Krivljenje karakteristika u oblasti velikih struja ispoljava se u tome što i pri veoma malom otporu potrošača /praktično kratak spoj/ na voltmetru postoji mali napon reda 1 mV. Posle detaljne analize memog kola i obrade rezultata (uračunat pod napona na ampermetu i kontaktni potencijal na priključcima) zaključeno je da nije u pitanju greška pri merenju. Mogući uzrok za ovu pojavu su kontaktni i termički potencijali na priključcima voltmetra, dekadne kutije otpornika /potrošač/ i priključnih vodova, kao i EMS indukovana u vodovima od strane magnetnog polja elektromagneta. Krivljenje karakteristika u oblasti malih struja takođe nismo mogli tumačiti greškama pri merenju. Predpostavljamo da su u pitanju struje curenja u zidovima samog kanala i potrošaču ali to u našim uslovima nismo mogli utvrditi zbog nepoznavanja karakteristika materijala koje smo koristili prilikom izrade uređaja /npr. električne osobine lepka koji smo koristili pri izradi kanala generatora/. Napominjemo da je zbog malih vrednosti struja i napona dobijenih u kanalu generatora teško suditi o propratnim MHD efektima pošto su oni maskirani potencijalima koji nisu MHD prirode.

II. 3 ZAKLJUČAK

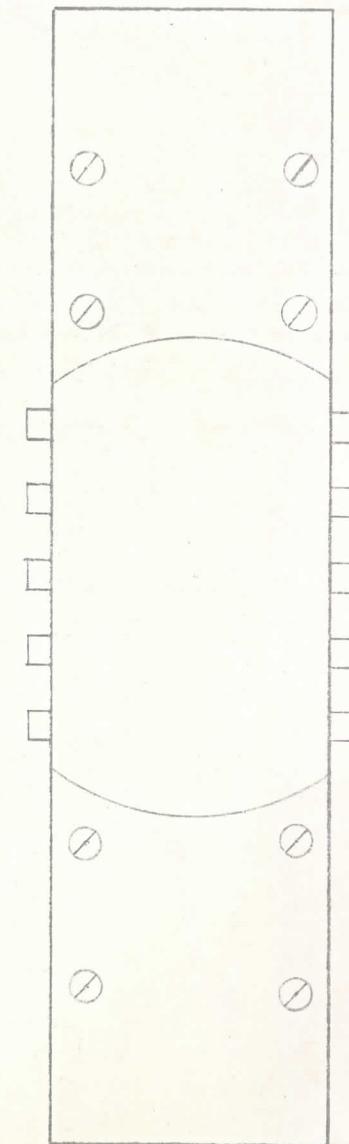
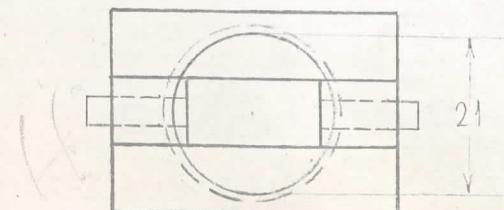
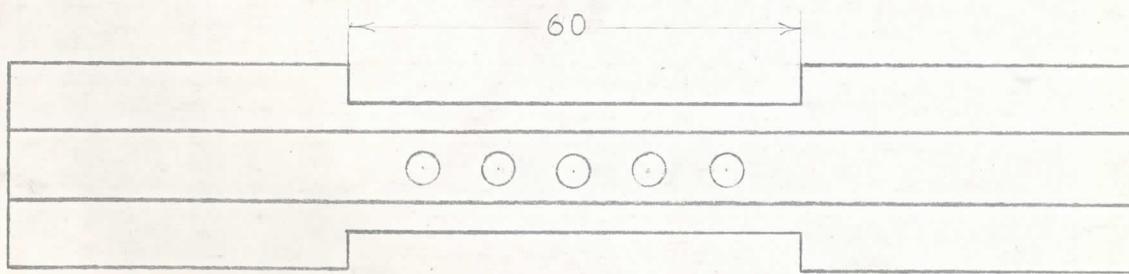
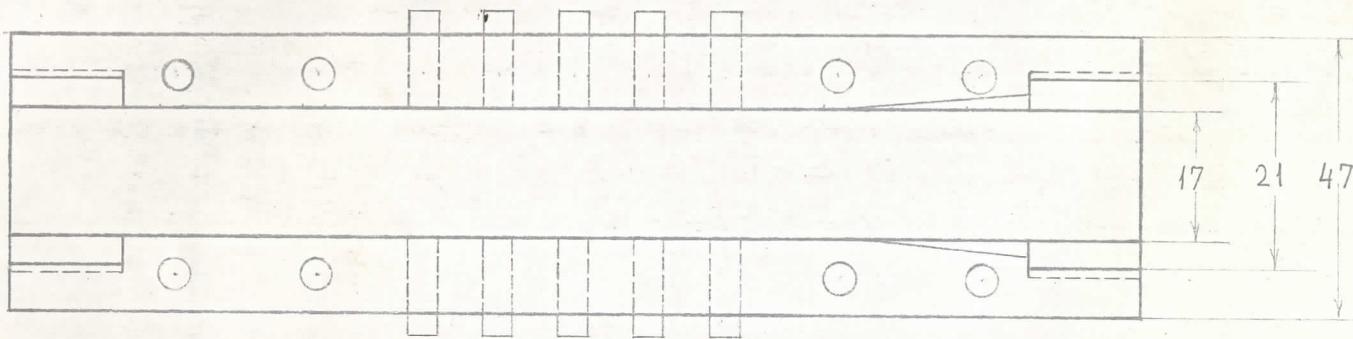
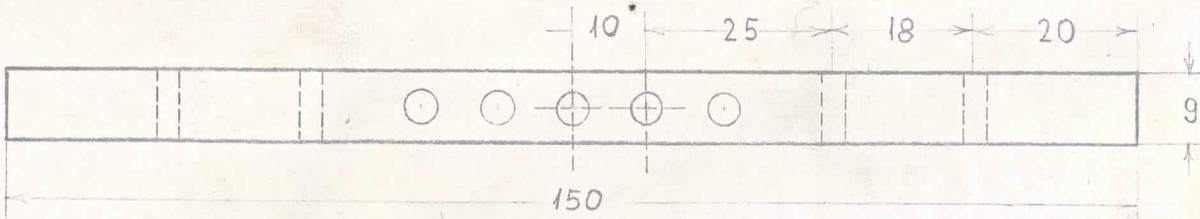
MHD metod generisanja električne energije, čiji su osnovni principi obrađeni u ovom radu, predstavlja nov i veoma perspektivan metod s obzirom na čitav niz prednosti koje ima u odnosu na ostale metode. Pre svega treba podvući veliki KKD i malu količinu nusprodukata koji zagadjuju sredinu. Veliki KKD omogućava značajne uštede u potrošnji prirodnih izvora energije što danas u opštoj energetskoj krizi ima izuzetan značaj, dok mala količina štetnih nusprodukata, posebno u elektranama sa zatvorenim MHD ciklusom, obezbeđuje mali uticaj na ekološku ravnotežu koja je, zahvaljujući nebrizi, ozbiljno poremećena.

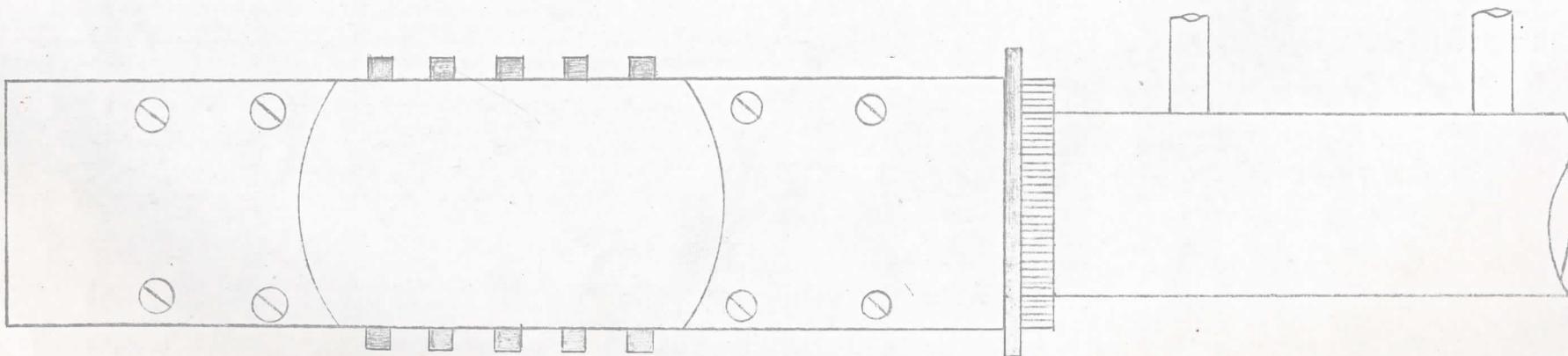
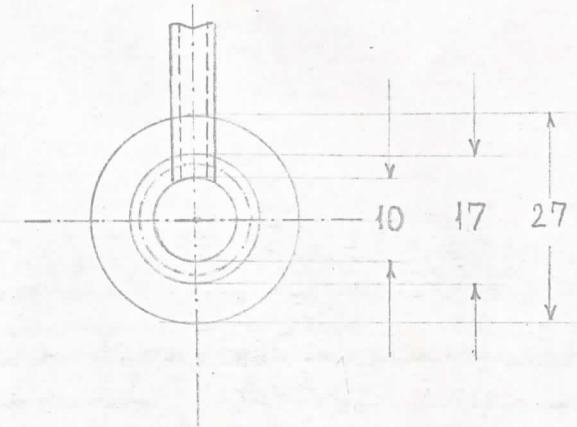
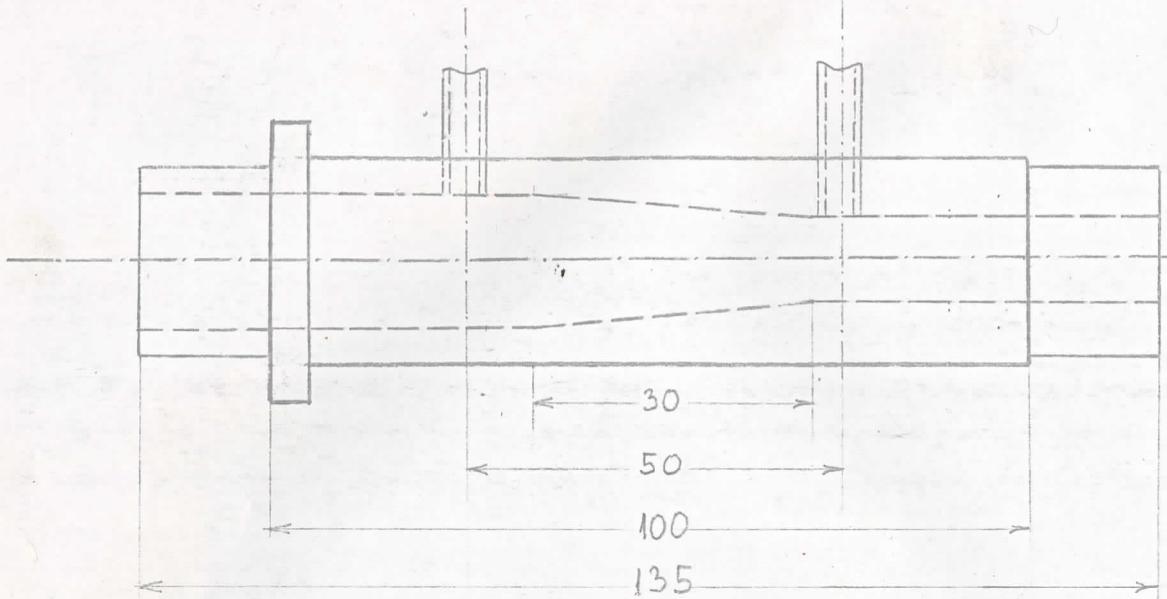
Iako jednostavne konstrukcije MHD generatori, zbog visoke radne temperaturе, zahtevaju specijalne termootpome materijale što predstavlja ozbiljan problem i glavni razlog njihove još ograničene primene. Zbog toga su naporи trenutno usmereni na stvaranje takvih materijala, provodnika i izolatora, u čemu su postignuti značajni rezultati.

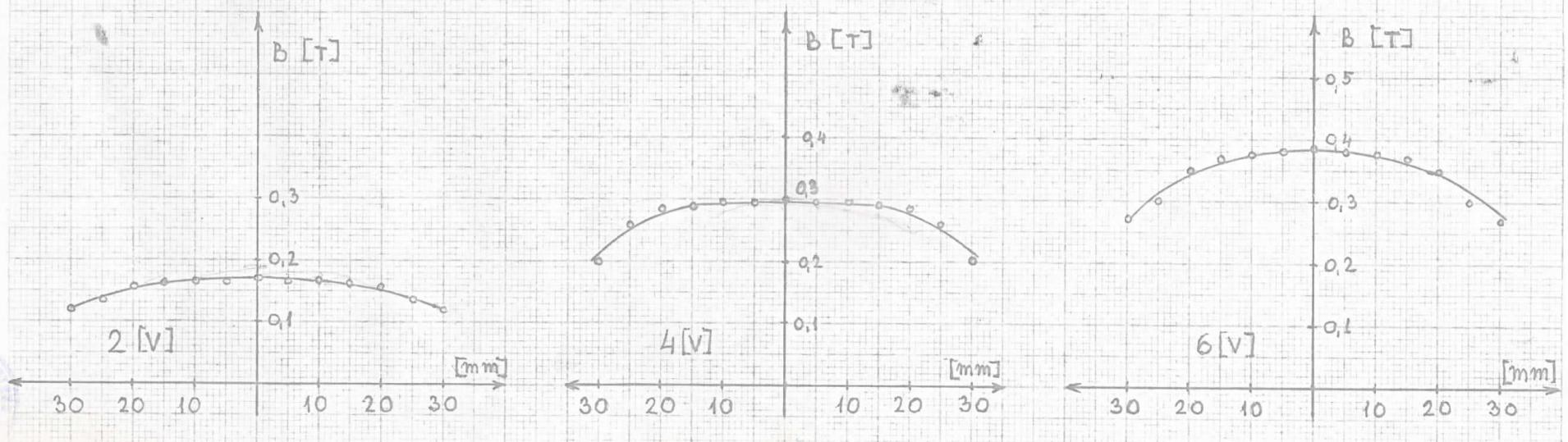
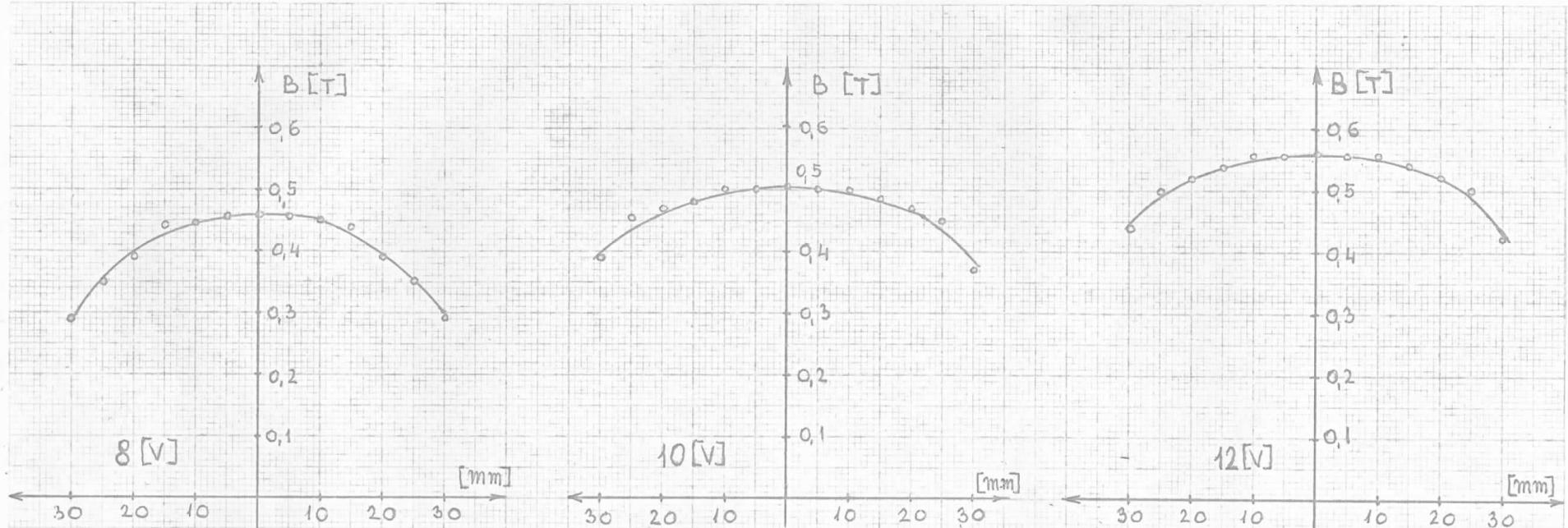
Model generatora koji smo konstruisali i ispitali imao je kao radno telo elektrolit koji se po električnim osobinama bitno razlikuje od fluida koji se koriste u komercijalnim generatorima /ionizovani gasovi i tečni metali/ pošto mu je provodljivost isključivo jonska. Zbog male pokretljivosti jona u elektrolitu Hidro polje se, kako je pokazano, može zanemariti što znatno uprošćava odnose u kanalu generatora.

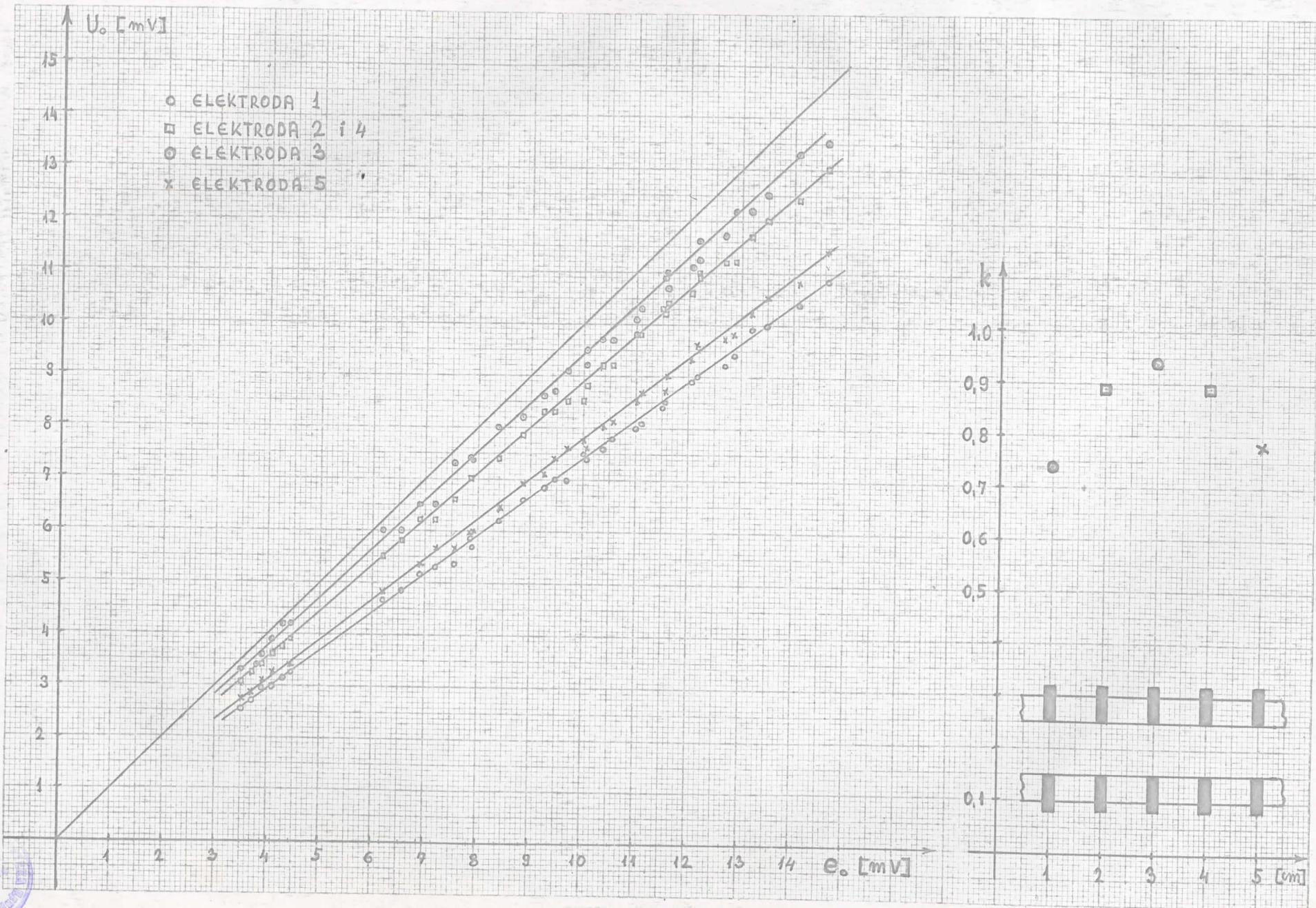
Usled relativno malih vrednosti magnetnog polja i brzine proticanja elektrolita dobijeni napon i struja imali su male vrednosti $U_{\max} = 12 \text{ mV}$, $I_{\max} = 2,2 \mu\text{A}$ / zbog čega su efekti nemagnetohidrodinamičke prirode /hemski, kontaktni i termički potencijali i dipolni slojevi/ imali znatan uticaj na tečnost izmerenih vrednosti.

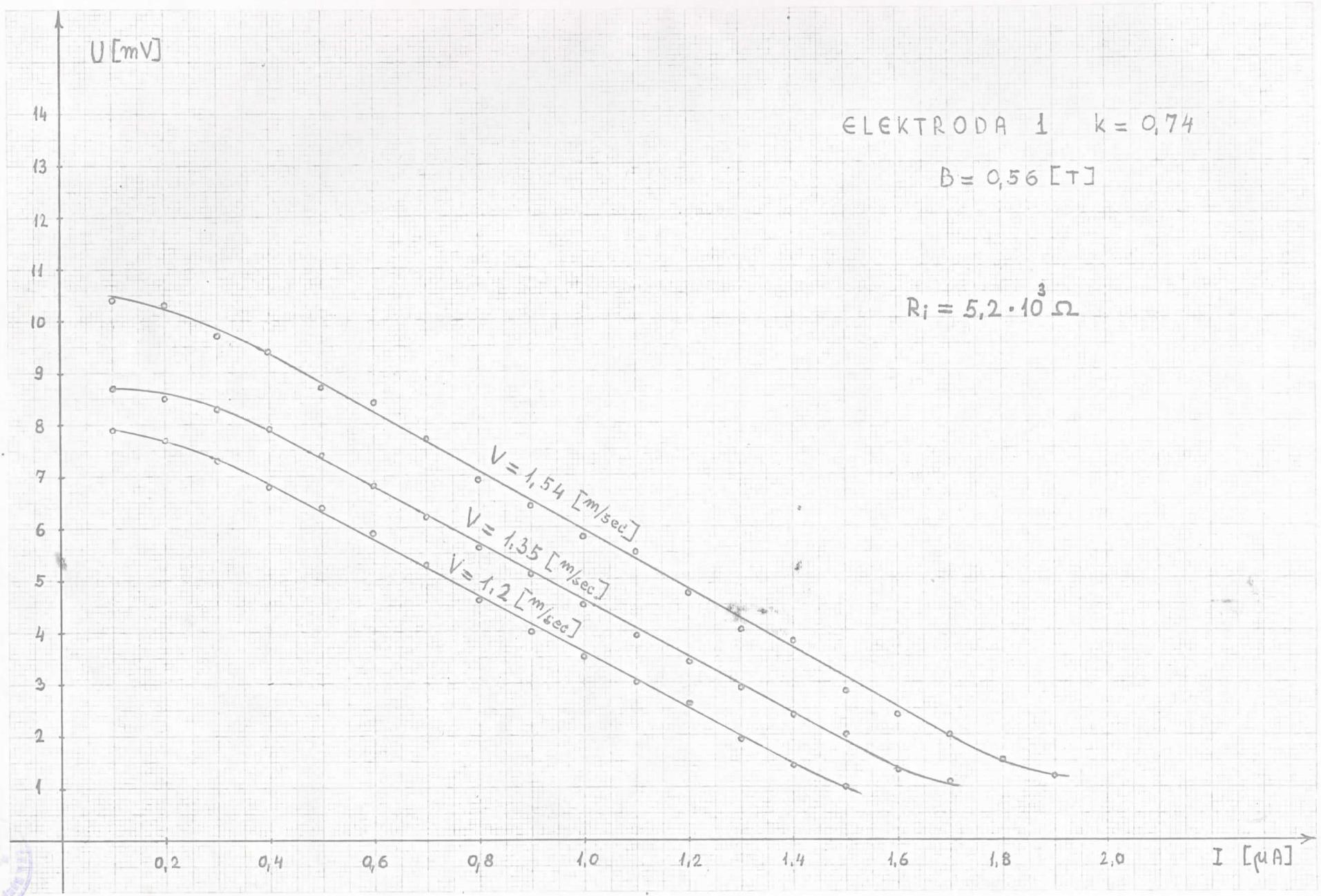
Velika vrednost unutrašnjeg otpora nije mogla biti u potpunosti objašnjena uticajem dipolnih slojeva ali smatramo da uzrok ove pojave leži u prisustvu navedenih stranih potencijala u samom kanalu generatora ili u delovima memog uredjaja. Napominjemo da je tokom rada primećen znatan uticaj temperaturskih promena na merene vrednosti što predstavlja interesantnu mogućnost daljeg ispitivanja ove problematike. Isto tako ovaj model omogućava ispitivanje fizičkohemiskih osobina elektrolita u magnetnom polju što, kao i prethodni efekat, izlazi iz okvira ovog rada.

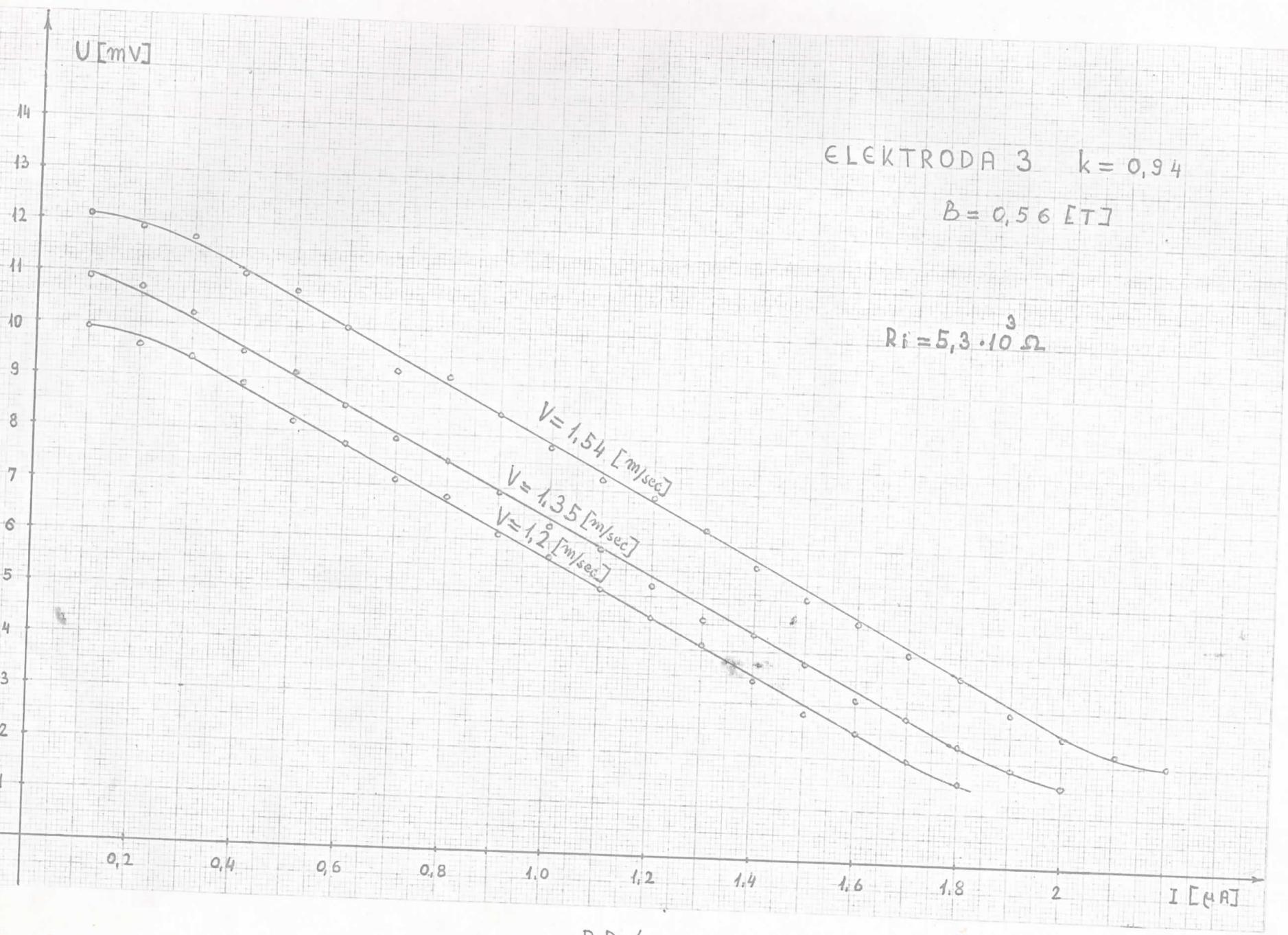




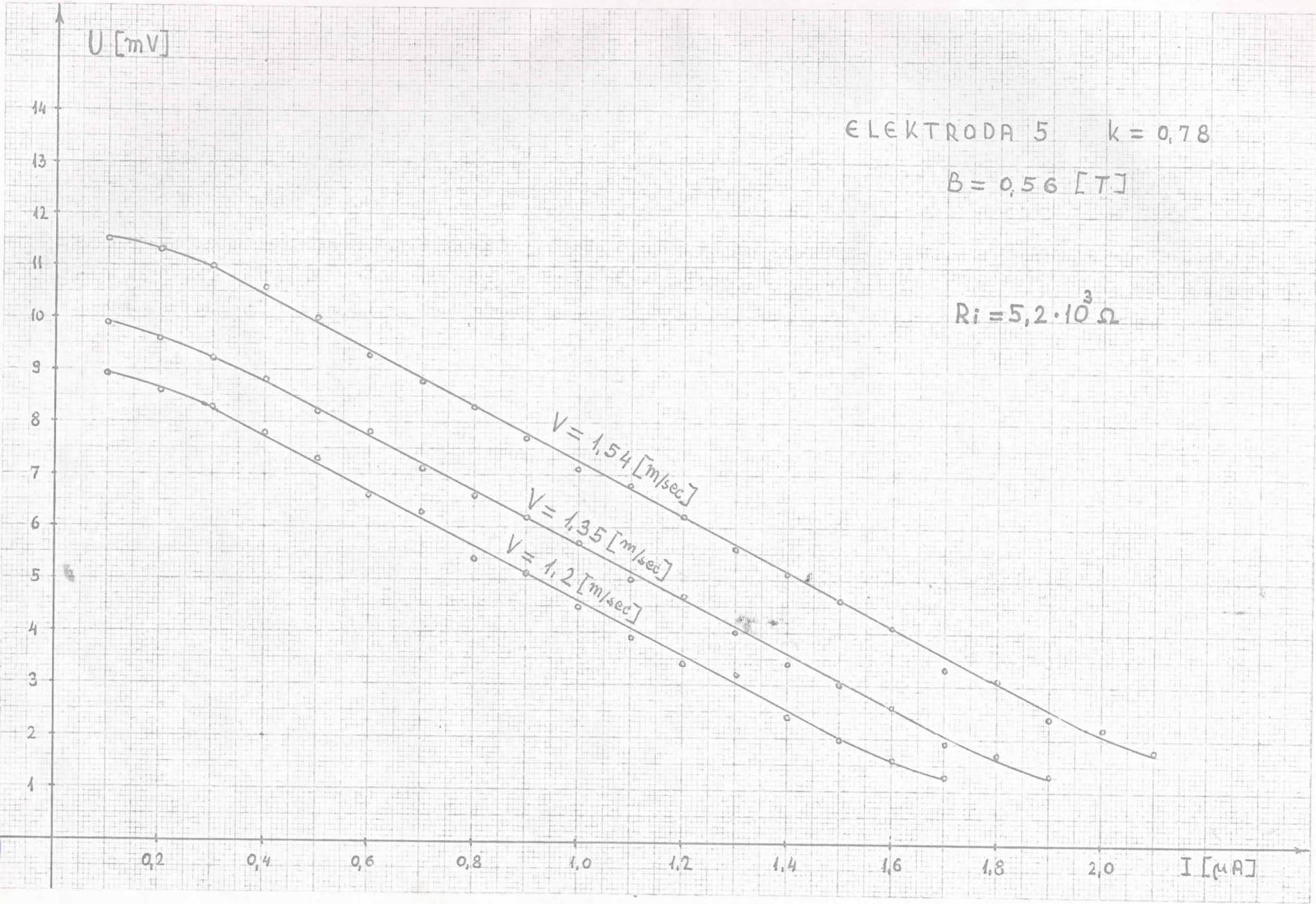








BR.4



BR.5

U [mV]

14

13

12

11

10

9

8

7

6

5

4

3

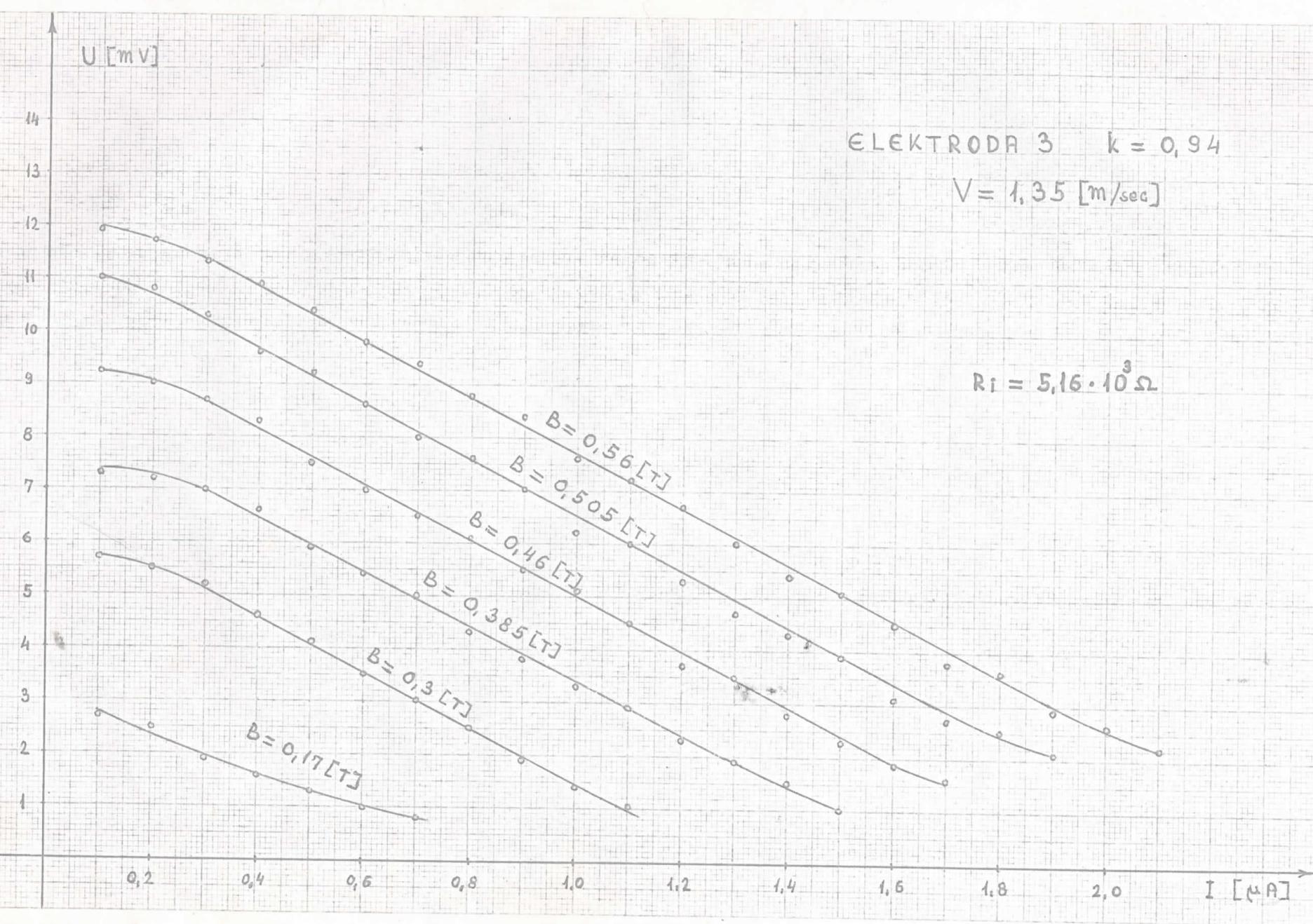
2

1

ELEKTRODA 3 $k = 0,94$

$V = 1,35 \text{ [m/sec]}$

$R_i = 5,16 \cdot 10^3 \Omega$



BR.6

LITERATURA

1. MGD generatori otkritovo cikla. Kolektiv autorov /prevod sa engleskog/ MIR, MOSKVA 1972.
2. MGD generatori, TOM II. Trudi Međunarodnoga simpozijuma po proizvodstvu elektroenergije s pomoću MGD generatorova, Zaljeburg 1966. A. N. SSSR, MOSKVA 1966.
3. MGD metod polučenjija eljektroenergije. Sbornik perevodov, ENERGIJA, MOSKVA 1971.
4. NIZKOTEMPERATURNJA PLAZMA. Trudi Međunarodnoga simpozijuma po svojstvam i primjenjenu nizkotemperaturnoj plazmi pri XX Međunarodnom kongresu po teoretičeskoj i prikladnoj himiji, MOSKVA 1965. MIR, MOSKVA 1972.
5. AMERICAN JOURNAL of PHYSICS vol. 38 JUNE 1970.
6. A. Simon, W.B. Thompson, Advances in PLASMA PHYSICS vol. 1 J. WILEY SONS, NEW YORK, LONDON, SYDNEY 1968.
7. S. Gleston, UDŽBENIK FIZIČKE HEMIJE.. NAUČNA KNJIGA, BEograd 1967.
8. L. Landau, E. Lifšic, ELEKTROMAGNETIKA KONTINUALNIH SREDINA, BEOGRAD 1971.
9. VOPROSI MAGNITNOJ GIDRODINAMIKI, Kolektiv autorov, A. N. LITV. SSR RIGA 1963.

