

U N I V E R Z I T E T U N O V O M S A D U

Prirodno-matematički fakultet

Institut za fiziku

Природно-математички факултет

Радна заједница заједничких послова

Р.	:	29. X. 1982
Opr. (A)	BP.	
03	10	/55

Šovanj Želimir

ODREĐIVANJE KARAKTERISTIKA BRZOPROMENLJIVOG IMPULSNOG
ELEKTROMAGNETSKOG POLJA KONDENZATORSKE BANKE I NJEGOV
UTICAJ NA FREKVENCIJU SRCA

- diplomski rad -

Novi Sad, 1982

M e n t o r:
prof.dr Miroslav Pavlov

Poveravajući prof.dr Miroslavu Pavlovu duže vremena prisutnu želju da radim diplomski rad vezan za multidisciplinarna istraživanja, naišao sam na veliko razumevanje, što je dovelo do mog delimičnog uključivanja u već uvelikorazvijena istraživanja dejstva elektromagnetskog polja na organizme, koja se, pod rukovodstvom doc.dr Bogosava Lažetića, vrše na Institutu za fiziologiju Medicinskog fakulteta u Novom Sadu.

Za vreme konstruisanja uređaja za generisanje polja, izračunavanja karakteristika polja, te svih ostalih fizičkih problema vezanih za ovaj rad, dobijao sam stalne savete od dr Pavlova, koji je uz svoje stalne obaveze uvek nalazio vremena da mi pomogne u rešavanju nastalih teškoća.

Poseban problem je, za mene, predstavljao fiziološki deo ovog rada, prvi susret sa elektrokardiografijom, eksperimentalnim životinjama itd., te tumačenje dobijenih rezultata. Od presudne važnosti kod prevazilaženja ovih problema bila je pomoć dr Lažetića.

I kod svih ostalih faza izrade ovog rada od obojice sam dobijao pomoć i savete, te im se na svemu najtoplje zahvaljujem.

Zaposleni u Laboratoriji za fizičku elektroniku pokazali su veliko razumevanje za moj rad u laboratoriji, te im se na tome zahvaljujem.

Posebno mi je ugodna dužnost da se zahvalim Marici Strmečki, Miroslavu Veskoviću i Dušanu T. Popiću, što su mi, pored ostalog, pomogli da što bezbolnije savladam neke tehničke probleme koje je sa sobom nosio eksperimentalni rad.

S A D R Ž A J

1.UVOD	1
2.SRCE I ELEKTROKARDIOGRAFIJA	6
2.1.Srce	6
2.1.1.Osnovne morfofunkcionalne karakteristike srca	6
2.1.2.Akcioni potencijal srčanog mišića	6
2.1.3.Sistem za stvaranje i provođenje impulsa . .	7
2.1.4.Regulacija funkcije srca	9
2.2.Elektrokardiografija	10
2.2.1.Opšte postavke	10
2.2.2.Normalan elektrokardiogram	11
2.2.3.Elektrokardiografski odvodi	12
2.2.4.Vektorska analiza	15
3.SISTEM ZA GENERISANJE ELEKTROMAGNETSKOG POLJA	18
3.1.Uvod	18
3.2.Podsistemi	19
3.2.1.Petlja sa prostorom za eksperimentalnu životinju	19
3.2.2.Baterija kondenzatora sa varničnikom kao prekidačem	20
3.2.3.Visokonaponski izvor	21
3.2.4.Jedinica za merenje visokog napona	21
3.2.5.Automatski okidač-komparator	22
3.2.6.Generator inicijalnog impulsa nivoa 400V .	22
3.2.7.Generator inicijalnog impulsa nivoa 10kV .	23
4.SISTEM ZA MERENJE	25
5.ODREĐIVANJE ELEMENATA RLC-KOLA I KARAKTERISTIKE ELEKTROMAGNETSKOG POLJA	28
5.1.Uvod	28
5.2.RLC-kolo	28
5.3.Odredivanje otpora prigušenja i koeficijenta samoindukcije	31
5.3.1.Opšti princip merenja	31

II

5.3.2.Merenje i rezultati	31
5.4.Magnetsko polje unutar petlje	37
5.4.1.Uvod	37
5.4.2.Funkcijska veza između jačine magnetskog polja i struje u kolu	37
5.4.3.Brojne vrednosti jačine polja	41
5.5.Električno polje unutar petlje	43
5.5.1.Uvod	43
5.5.2.Izraz za jačinu električnog polja	44
5.5.3.Brojne vrednosti jačine električnog polja .	48
5.5.4.Gustine struja	52
5.6.Opšte karakteristike polja	53
6.REZULTATI I DISKUSIJA	55
6.1.Uvod	55
6.2.Opis merenja	56
6.3. I grupa rezultata	57
6.3.1.Opšte napomene	57
6.3.2.Frekvencija srca	57
6.3.3.QRS-vektor i trajanje intervala	60
6.4. II grupa rezultata	65
6.4.1.Opšte napomene	65
6.4.2.Frekvencija srca	65
6.4.3.QRS-vektor i trajanje intervala	71
6.5.Diskusija	72
7.ZAKLJUČAK	76
8.DODATAK	77
9.LITERATURA	84

1. U V O D

Od nastanka prvih živih bića, pa sve do pre otprilike sto godina, fizičko-hemijska delovanja većih razmera na živi svet Zemlje bila su isključivo prirodnog porekla, kao posledica geoloških i planetarnih promena. Veći broj ovih delovanja ima, u većoj ili manjoj meri, izraženu periodičnost, dnevnu, sezonsku ili višegodišnju.

Organizmi su, evolucionim razvojem, izgradili adaptacione mehanizme, koji im omogućavaju da se, u određenim granicama, prilagode stanju ili promenama u biosferi. Tako npr. prirodan nivo radioaktivnosti, UV-zračenja, kosmičkog zračenja, jačine elektromagnetskih polja, koncentracije hemijskih jedinjenja u vodi, zemlji i vazduhu, temperature, itd., i njihova uobičajena kolebanja, nemaju katastrofalno delovanje na biosisteme.

Poslednjih stotinjak godina nagli tehnološki razvoj narušava ovu vekovima održavanu harmoniju. Štetno delovanje mnogih činioca čovek je uočio već kod prvih primena, dok je za druge trebalo da prođe duži vremenski period upotrebe, da bi se njihovo prisustvo u čovekovoj sredini proglašilo nepodesnim. Npr. snažni izvori rentgenskog i radioaktivnog zračenja već su kog svojih prvih istraživača izazivali promene, koje su ukazivale na njihovu štetnost, dok se npr. na neke oblike hemijskog zagadivanja tek danas, više godina nakon prve primene, gleda kao na moguće uzročnike čitavog niza obolenja.

Slično se i za relativno slaba elektromagnetska polja, i njihove prirodne i veštačke promene, smatralo da nemaju nikakvog znatnijeg delovanja na organizme. Do pre otprilike 20 godina, bilo je široko rasprostranjeno mišljenje, da se u takva elektromagnetska polja mogu ubrojiti sva ona, koja nisu dovoljno snažna da poremete termičko kretanje paramagnetskih i dijamagnetskih molekula u organizmu. Naravno takva shvatanja su bila posledica neverovatno siromašnog eksperimentalnog rada na tom području. Doduše, u više mjerava u prošlosti ispitivana su delovanja električnih struja magneta na organizam, ali sva ta istraživanja nisu mogla, često zbog sasvim nenaučnog pristupa, poslužiti kao dokaz dejstva elektromagnetskih polja na biološko tkivo. Još pre više od 2000 godina zabeleženi su prvi primeri magneto-

terapije od strane grčkog lekara Galena, koji je koristio magnet kao purgativno sredstvo, dok je 43. godine Scribonius Largus pisao o mogućnostima otklanjanja glavobolje i kostobolje primenom napona električnih riba. Kao što je poznato i prvi ozbiljniji radovi o elektricitetu Galvanija i Volte usko su povezani sa reakcijom organizma na električnu struju.

Tek početkom šezdesetih godina ovog veka ova istraživanja dobijaju veći značaj. Do danas je objavljen velik broj naučnih radova koji, na ovaj ili onaj način, dodiruju problem delovanja elektromagnetskog polja na živi svet. Kao što je to često slučaj, razvoj nove grane istraživanja praćen je pojmom velikog broja radova veoma neujednačenih kvaliteta, što otežava snalaženje, poređivanje i uopštavanje. Rezultati su ponekad sasvim proturečni, a metodika opisana na način koji ne omogućava ponavljanje eksperimenta od strane drugih istraživača. Dobrim delom krivac za takvo stanje je sastav istraživačkog tima, koji ne može da ispunи sve zahteve multidisciplinarnog pristupa problemu.

Istraživanja su se iskrystalizovala u dva osnovna pravca. Prvi pravac čine istraživanja veštačkih polja i njihove primene u terapijske svrhe. Drugi pravac izučava značaj prirodnih polja u životnoj aktivnosti organizama.

Posećna vrednost jačine električnog polja na površini Zemlje u toku vedrih dana iznosi 130 V/m , na visini od 50 metara 500 V/m , da bi na visini od 12 km pala na $2,5 \text{ V/m}$. Pred pojavu munje jačina polja dostiže par stotina kV/m . Magnetska indukcija na Zemlji trpi stalne promene u intervalu od 25 do $70 \mu\text{T}$. Promene su periodičnog karaktera i savise od rotacije Zemlje, magnetske aktivnosti Sunca i kretanja Meseca.

Dokazano je da ova, iako relativno slaba, polja imaju znatno delovanje na živi svet. Naredenjem dijagrama promena jačine geomagnetskog polja registrovanih za kalendarsku godinu i broja uočenih srčanih poteškoća za isti period, năđena je korelacija između broja poremećaja kardiovaskularnog sistema i poresta jačine geomagnetskog polja (Malin et al., 1979). Postoje i mnogobrojni radovi koji pokazuju pozitivnu korelaciju između povećane geomagnetske aktivnosti i: napada glaukoma (Čohov, Indejkin, 1971), povećanja broja saobraćajnih prekrša-

ja (Kisamura, 1971), povećanja smrtnosti od vaskularnih oboljenja velikog mozga (Alabovski, Babenko, 1971), povećanja broja infarkta miokarda (Novikova, Rikvin, 1971; Podšibjakin i sot., 1975), kao i mnogih drugih fizioloških parametara. U ovim, kao i mnogim drugim primerima, ostaje otvoreno pitanje preko kojih mehanizama deluju ovako male promene geomagnetskog polja.

Delovanje prirodnih polja ispitivano je i u vezi sa sposobnošću orijentacije nekih životinjskih i biljnih vrsta. Kod biljaka istraživan je rast korena prema geomagnetskim polovima (Tittman, 1963), dospevanje pšenice u funkciji orijentacije srna prema geomagnetskim linijama, brzina rasta biljaka u zavisnosti od električnog polja (Audus, 1960; Bee et al., 1963) itd. Radovi koji obrađuju orijentaciju nekih životinjskih vrsta (pčela, golubova, mukušaca, riba, itd.) mnogobrojni su, pa bi i samo njihovo navođenje, bez opisa rezultata, zauzelo, u ovakvom radu previše mesta.

Posebno interesantnu granu istraživanja, vezanu za istraživanja prirodnih polja, predstavlja proučavanje delovanja oslabljenih polja, i to iz dva razloga. Prvi razlog je vezan uz problem kosmičkih letova, jer je jačina magnetske indukcije u međuplanetarnom prostoru znatno manja (1 do 30 nT) nego na površini Zemlje, dok je drugi razlog savremeno stanovanje u zgradama sa armirano-betonskom konstrukcijom. Cvakav svojevrstan elektromagnetski oklop smanjuje jačinu polja u svojoj unutrašnjosti i do 100 puta. Kod stanovnika ovakvih zgrada uočen je porast zdravstvenih poteškoća (Kopanev i sot., 1979; Kunro et al., 1977). Obilan je i istraživački rad koji proučava delovanje hipomagnetske sredine na životinje. Duži boravak u takvoj sredini uzrokuje znatne fiziološke promene kod životinja, smanjuje im aktivnost i povećava smrtnost za 30% (Efimenko i sot., 1978; Kopanev i sot., 1979).

Promena prirodne elektromagnetske sredine od strane veštačkih polja stambenih, industrijskih, komunikacijskih i telekomunikacijskih sistema, te mogućnost primene elektromagnetskih polja u terapeutске svrhe, rodila je potrebu za ispitivanjem delovanja veštački stvorenih polja na biosisteme.

Nažalost, pored svih drugih efekata nuklearna eksplozija deluje i relativno snažnim elektromagnetskim impulsom (Pavlović i sar., 1978).

Poslednjih godina, sa dosta uspeha, vrše se istraživanja o baktericidnom i citostatičkom dejstvu magnetskih polja. (Čižov i sot., 1975).

U velikom broju radova utvrđeno je da polje usporava ili ubrzava neke hemijske procese u organizmu, ili ih čini verovatnijim.

Sa sve većom sigurnošću se može tvrditi da elektromagnetska polja imaju znatno dejstvo na nervne ćelije i aktivnost mozga (Antimonij i sot., 1980; Nahiljnickaja, 1972; Drecun i sar., 1982).

Brojna su i istraživanja dejstva magnetskih polja na endokrini sistem (Zagorskaja, 1981; Lažetić i sar., 1982).

Vremenski promenljivo magnetsko polje našlo je na više mesta terapeutku primenu. Tako se npr. koristi za izbacivanje kamena iz mokraćne bešike (Novikova i sot., 1980), ili za stimulaciju srastanja koštanih preloma (Majić, 1980).

Kao što se iz gornjeg vidi veštački stvorena polja imaju dejstvo na žive sisteme organizma, pa je logično pretpostaviti da ni kardiovaskularni sistem neće biti pošteđen od delovanja polja.

Ispitivanje žabljeg srca in vitro (Stamenović, Majić, 1974, 1975), u stalnom magnetskom polju jačine 221 mT, pokazalo je da dejstvo polja dovodi do smanjenja frekvencije srca, aritmije i bradikardije. Pored navedenog, zapaženo je da srce ima tendenciju postavljanja u određen položaj prema vektoru magnetskog polja. Smanjenje frekvencije bilo je znatno već posle nekoliko minuta, a prvi poremećaji ritma javili su se već u 10. minutu. Nakon 17. minute došlo je do blokade rada srca. Ispiranjem srca i zamenom korišćenog fiziološkog rastvora uspostavljena je normalna srčana aktivnost.

Od strane istih autora ispitivano je i delovanje stalnog magnetskog polja jačine 221 mT na srce in situ belog laboratorijskog miša. Bradikardija se u miševa pojavljivala 1,5 do 3 h posle početka magnetskog delovanja. Nakon prestanka srčane aktivnosti bilo ju je moguće povratiti u komori sa hipobaričkim kiseonikom.

Konstantno magnetsko polje jačine 0,7 T primenjeno je i kod ispitivanja dejstva na srce laboratorijskog pacova

(Lažetić i sar., 1982). Pacovi su tokom 60 minuta jednokratno izlagani dejstvu polja. Registrovanje EKG vršeno je pre uključivanja polja, svakih 5 min. tokom delovanja polja i tokom 30 min. po isključenju polja. Kod svih životinja nađeno je smanjenje frekvencije srca, koje je bilo najuočljivije u prvih 30 minuta, a održavalo se do kraja delovanja polja. U prvih 30 minuta oporavka frekvencija srca raste, ali je još uvek signifikantno niža od početne.

Da bi se omogućilo ispitivanje srčanog rada laboratorijskog pacova i u promenljivom elektromagnetskom polju prišlo se, u ovom radu, konstrukciji uređaja za generisanje impulsnog visokofrekventnog polja. Ovakvo polje izabrano je zato jer, na neki način, sadrži niskofrekventnu i visokofrekventnu komponentu, a po svom obliku, više ili manje, liči na polja koja su često prisutna u čovekovoj sredini. Doduše, upotrebljeno polje po svojoj jačini znatno premašuje polja sa kojima se čovek najčešće susreće, ali danas, pre svega u naučnim laboratorijama, ovakva polja nisu retkost. Iako nije, uz ovaj rad, detaljno istraženo, može se pretpostaviti da su polja sličnih karakteristika prisutna i kod većih energetskih postrojenja, pa bi, uzimajući u obzir dobijene rezultate, bilo neophodno da se tim pitanjem pozabave stručnjaci raznih profila. Čvo tim više zato jer donja granica jačine polja kod koje je još prisutno dejstvo na srce nije ispitivana, a prema rezultatima koja su dala ispitivanja geomagnetskog polja, može se očekivati da je ta granica relativno niska.

2. SRCE I ELEKTROKARDIOGRAFIJA

2.1. SRCE

2.1.1. Osnovne morfolofunkcionalne karakteristike srca

Srce je četverokomorna pumpa koja pulsira, a sastoji se od dve pretkomore (atrium-a) i dve komore (ventricul-e). Svojom kontrakcijom, istiskujući krv iz svoje šupljine-komore, daje kinetičku energiju krvi, što obezbeđuje njen kretanje kroz pluća i kroz periferni cirkulacijski sistem. Posebni mehanizmi u srcu obezbeđuju srčani ritam, i prenose kroz srčani mišić akcioni potencijal, koji izaziva kontrakciju tog mišića.

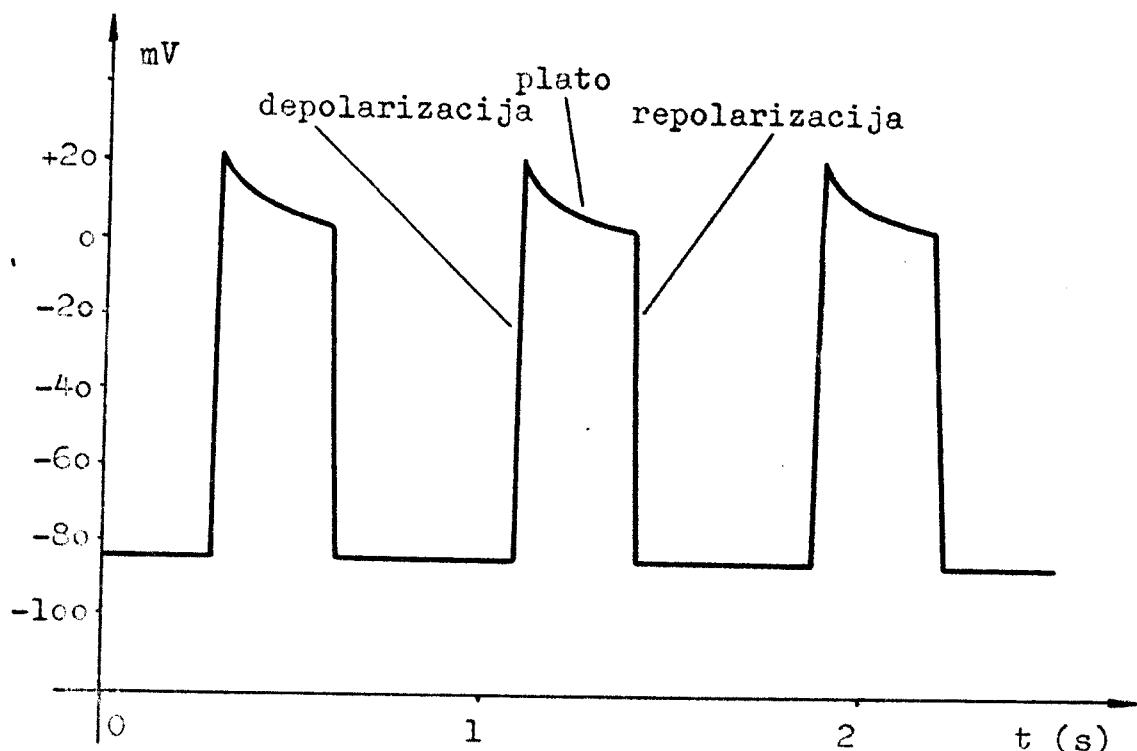
Srce je građeno od tri glavne vrste srčanog mišića: atrijumskega mišića, ventrikularnog mišića te specijalizovana mišićna vlakna, koja služe za stvaranje i provodenje impulsa. Atrijumska i ventrikularna mišića kontrahuju se gotovo na isti način kao i skeletni mišići. Specijalizovana vlakna, koja služe za stvaranje i provodenje impulsa, međutim, kontrahuju se vrlo slabo, i njihov je osnovni zadatak da čine ekscitacijski sistem srca.

2.1.2. Akcioni potencijal srčanog mišića

Srčana mišićna vlakna su niz srčanih mišićnih ćelija koje se serijski vežu jedna na drugu. Ćelije su tako vezane da akcioni potencijal prelazi na sve ostale mišićne ćelije ako se ekscitira jedna od njih.

U srčanom mišiću potencijal membrane u mirovanju iznosi oko -80 do -85 mV, te oko -90 do -100 mV u specijalizovanim provodnim vlaknima tzv. Purkinijevim vlaknima. Akcioni potencijal srčanog mišića iznosi oko 90 do 105 mV, pa se prema tome membranski potencijal menja od normalne negativne vrednosti na malo pozitivnu vrednost od oko +20 mV.

Akcioni potencijal srčanog mišića ima poseban oblik prikazan na slici 2.1. Nakon početnog šiljka membrana ostaje depolarizovana 0,15 do 0,30 sekundi, pa nastaje plato nakon kojeg sledi nagla repolarizacija. Usled ove platoa akcioni potencijal u srčanom mišiću traje 20 do 50 puta duže nego u



Sl.2.1. Shematski prikazan akcioni potencijal srčanog mišića snimljen mikroelektrodama.

skeletnom mišiću i ima za posledicu da i kontrakcija traje u odgovarajućoj meri duže.

Brzina provodenja akcionog potencijala u srčanom mišiću iznosi oko 0,3 do 0,5 m/s, dok je brzina provodenja u pojedinim delovima provodnog sistema različita i iznosi od dela metra do nekoliko metara u sekundi.

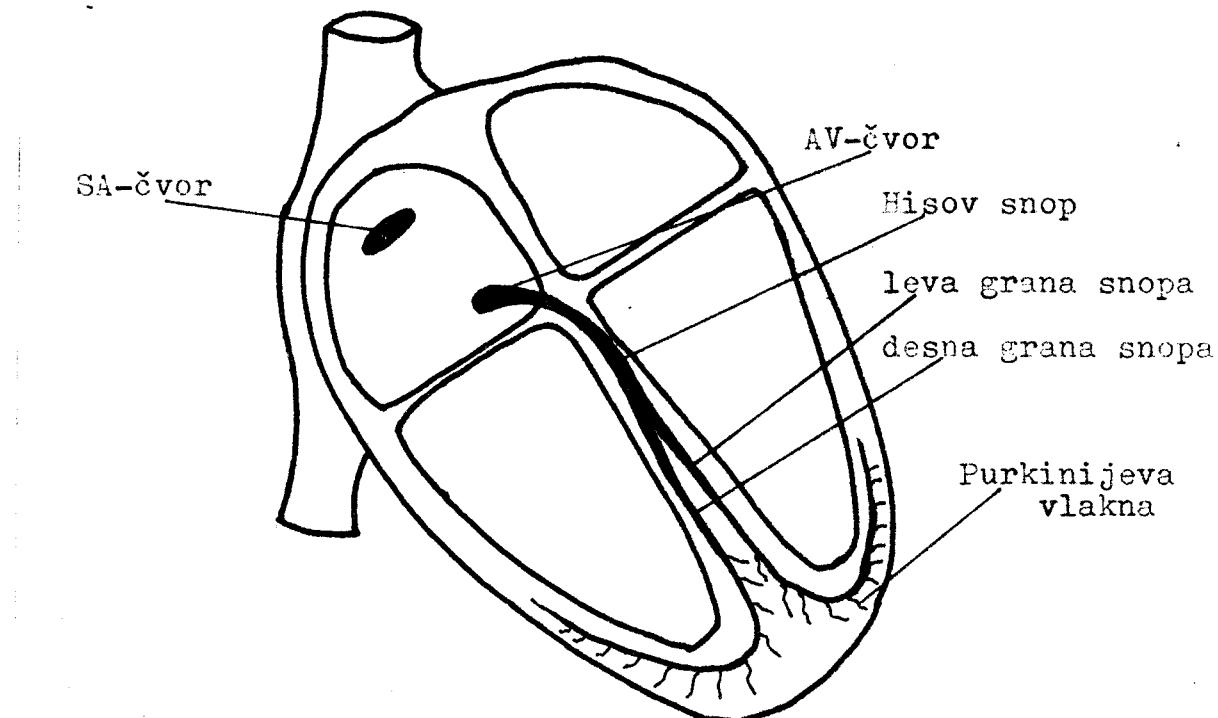
Period od završetka jedne kontrakcije srca do završetka druge kontrakcije naziva se srčani ciklus. Srčani se ciklus deli na dva dela: širenje (dijastola) i kontrakciju (sistola).

2.1.3. Sistem za stvaranje i provodenje impulsa

Za generisanje periodičnih impulsa, koji imaju za posledicu srčani ciklus, i za provodenje tih impulsa po srcu, zadužen je poseban sistem koji je shematizovano prikazan na slici 2.2.

Sinus-atrijalni čvor (SA-čvor) je oko 3 mm širok i 10 mm dug deo specijalizovanog mišića, a nalazi se u stražnjem zidu desne pretkomore neposredno ispod ušća gornje šupljje vene. Građen je od gusto isprepletenih Purkinijevih vlakana debelih od 3 do 5 μm . Vlakna SA-čvora nastavljaju se u vlakna atrijskog

mišića, pa se svaki akcioni potencijal koji nastane u SA-čvoru odmah proširi u pretkomore.



Sl.2.2. Sistem srca za stvaranje i provođenje impulsa

Većina srčanih vlakana je sposobna da spontano stvara impulse, čije širenje uzrokuje ritmičke kontrakcije miokarda. Vlakna SA-čvora imaju tu sposobnost naročito izraženu, pa je osnovna funkcija SA-čvora da bude glavni pacemaker. Ako SA-čvor otkaže i drugi delovi srca mogu preuzeti ulogu pacemakera. Tako se govori o ektopičkom pretkomornom pacemakeru, pacemaku-ru u AV-čvoru ili o pacemakeru u komori. Ovi se pacemakeri uključuju redom kako su navedeni ako svi prethodni otkažu, a istim redom im je i frekvencija generisanja impulsa sve manja.

Atrioventrikularni čvor (AV-čvor) se nalazi u dnu desne pretkomore. Eliptičkog je oblika dimenzija 6×3 mm. Kao i SA-čvor građen je od mreže Purkinijevih vlakana.

Rečeno je da akcioni potencijali, generisani u SA-čvoru, imaju mogućnost da se prošire u pretkomore. Na taj način dolaze i do AV-čvora. Kroz pretkomorni miokard impuls putuje brzinom od oko $0,3$ m/s, a kroz nekoliko sitnih snopova (internodalni snopovi) mišićnih vlakana, od kojih neki direktno spajaju SA-čvor i AV-čvor, impuls putuje brzinom od oko $0,45$ m/s.

Za očekivati je da se akcioni potencijal od SA-čvora

do AV-čvora i dalje u Hisov snop proširi veoma brzo za oko 0,04 sek. Međutim, vlakna koja spajaju internodalne snopove sa AV-čvorom veoma sporo prenose akcioni potencijal (oko 0,01 m/s), a sem toga i kroz vlakna samog čvora impuls se ne provodi brže od 0,1 m/s, tako da postoji osetno kašnjenje impulsa. Sve ovo daje pretkomorama dovoljno vremena da isprazne svoj sadržaj u komore pre nego što počne komorna kontraksija.

Hisov snop i Purkinijeva vlakna. Osnovni zadatak Hisovog snopa, čija se leva i desna grana dalje granaju u Purkinijeva vlakna, je da što brže proširi akcioni potencijal po komornom miokardu kako bi se svi delovi komore kontrahovali otprilike u isto vreme. Purkinijeva vlakna od kojih je čitav snop građen su veoma debela i imaju sposobnost brzog provođenja impulsa (od 1,5 do 4,0 m/s). Završna vlakna prodiru u mišićnu masu za oko trećinu njene debljine, te završavaju na mišićnim ćelijama. Od trenutka kad srčani impuls uđe u AV-snop do trenutka kad stigne do završetaka Purkinijevih vlakana proteže samo 0,03 sek.

2.1.4. Regulacija funkcije srca

Poznato je da različita stanja organizma zahtevaju i proticanje različite količine krvi, a prema tome i različit rad srca. Ova regulacija se vrši na dva osnovna načina i to : autoregulacijom kojom srce reaguje na promenu dotoka krvi i refleksnom kontrolom vegetativnim nervnim sistemom.

Prvi način se najjednostavnije može opisati Frank-Starlingovim zakonom, koji kaže, da što se srce u toku dijastole juče napuni to veću količinu krvi ubacuje u aortu. Drugim rečima, unutar fizioloških granica, srce će ispumpati svu krv koju stigne u njega, ne dozvoljavajući da se velika količina krvi nekući u venama. Mehanizam ovog načina regulacije se zasniva na sposobnosti poprečnoprugastih mišića da se jače kontrahuju ako su istegnuti. Tako usled povećanog dotoka krvi srčani mišić biva jače istegnut, pa se i kontrahuje znatno većom silom, što ima za posledicu izbacivanje veće količine krvi.

Drugi način regulacije funkcije srca zasniva se, kao što je rečeno, na refleksnoj kontroli vegetativnog nervnog sistema. U srcu se nalazi veći broj simpatičkih i parasympatičkih

nerava, koji su u mogućnosti da menjaju srčanu frekvenciju i jačinu kontrakcije srčanog mišića. Simpatički nervi, ako su podraženi, na svojim završecima oslobađaju noradrenalin, koji deluje na povećanje celokupne aktivnosti srca. U SA-čvoru se povećava frekvencija odašiljanja impulsa, povećava se sposobnost za inervaciju svih delova srca, a isto tako, pojačava se kontrakcija celokupnog miokarda.

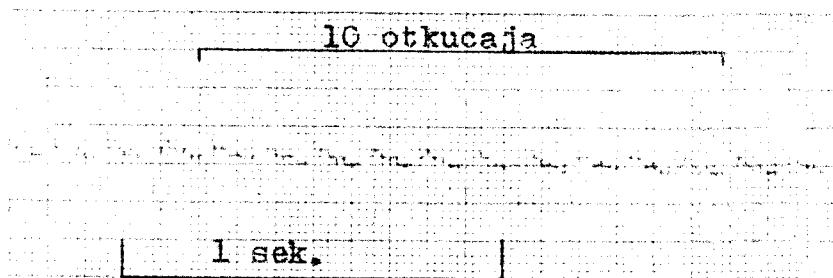
Ako se podraže parasimpatički nervi (vagusi), oslobođe se na njihovim završecima acetil-holin. Ovaj hormon deluje na smanjenje frekvencije odašiljanja impulsa u SA-čvoru i smanjuje podražljivost vlakana, koja se nalaze na prelazu između pretkomore i AV-čvora, čime se usporava prenos impulsa u komore.

2.2. ELEKTROKARDIOGRAFIJA

2.2.1. Opšte postavke

Akcioni potencijal, koji se širi srcem, nije ništa drugo no bioelektrični impuls, i sasvim je jasno da se njegovo širenje neće ograničiti samo na područje srca, ako je ekolna sredina provodna. Specifična provodnost raznih tkiva kreće se u rasponu od 10^{-4} do $10^{-4} \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$, tako da je strujnom impulsu, iako dosta oslabljenom, omogućeno da bude prisutan na površini tela. Postavi li se na površinu tela bar dve elektrode, s obe strane srca, i dobijeni signal pojača osetljivim pojačavачem, može se osciloskopski ili preko pisača registrirati električne potencijale koji nastaju u srcu. To je elektrokardiografija (EKG).

Na slici 2.3. prikazan je jedan deo EKG-snimka, koji je nasumice odabran iz eksperimentalnog dela rada. Već se na



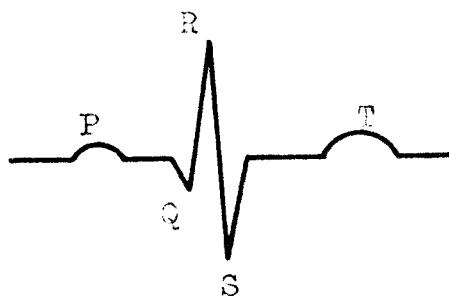
Slika 2.3. EKG-snimak iz eksperimentalnog rada snimljen brzinom kretanja trake od 50 mm/s.

prvi pogled primećuje razlike između ove slike i slike 2.1., iako su obe slike zapisi jedne iste pojave. Razlika je, naročito, posljedica drugačijeg načina registrovanja, naime, slika 2.1. je snimljena pomoću dve mikroelektrode, od kojih se jedna nalazila unutar mišićne ćelije, a druga izvan nje, dok je EKG na slici 2.3. snimljen sa obe elektrode izvan mišićne ćelije, tačnije izvan srčanog mišića. Proces depolarizacije, kao i proces repolarizacije, širi se od jednog kraja mišićnog vlakna ka drugom kraju, menjajući potencijal u unutrašnjosti vlakna. Mnogo složeniji oblik EKG-snimka od slike 2.1. dolazi otuda što se elektrokardiografijom sumarno registruju procesi u svim mišićnim vlaknima srca. Sa te strane mišić pretkomore i mišić komore predstavljaju odvojene sisteme, pa pojedini talasi ili grupa talasa na elektrokardiogramu predočavaju depolarizaciju, odnosno repolarizaciju, komore ili pretkomore.

2.2.2. Normalan elektrokardiogram

Normalan elektrokardiogram prikazan je na slici 2.4. Svaki normalan srčani ciklus ima na EKG-snimku sledeće elemente: P-talas, QRS-kompleks i T-talas. QRS-kompleks se, u stvari, sastoji iz tri talasa: Q, R i S.

Depolarizacija pretkomora ima za posledicu pojavljivanje P-talasa, dok je depolarizacija komora okarakterisana



Sl.2.4. Shematski prikazan normalan EKG.

QRS-kompleksom. Repolarizacija komora uzrokuje pojavljivanje T-talasa. Talas koji pokazuje repolarizaciju pretkomora, a koji sledi posle P-talasa najčešće se ne primećuje na elektrokardiogramu, jer je upotpunjeno u QRS-kompleks. Za analizu rada srca važni su i vremenski razmaci između pojedinih elemenata

elektrokardiograma. Tako govorimo o PQ-intervalu (segmentu), koji pokazuje koliko je bilo potrebno vremena impulu, da prođe iz pretkomora u komore, i o ST-intervalu (segmentu), koji daje vreme potrebno za repolarizaciju komora.

Odnos kontrakcije komora i pretkomora prema talsima elektrokardiograma je lako razumljiv kada se zna da talas depolarizacije pokreće hemijsko-fizičke procese kontrakcije. Tako se P-talas javlja neposredno pre kontrakcije pretkomora, a QRS-kompleks neposredno pre početka kontrakcije komora.

Elektrokardiogram se ispisuje na traci na koju je nanesena milimetarska podela, da bi se omogućilo merenje napona i vremena trajanja pojedinih elemenata. Traka se pokreće konstantnom brzinom od, najčešće, 25 milimetara u sekundi, tako da se vremenska osa nalazi duž trake. Normalno na ovu osu tj. širinom trake, mere se naponi pojedinih talasa. EKG-uredaj obično ima mogućnost kontinualnog menjanja osetljivosti, pa se pre merenja vrši kalibracija ispisivanjem napona od 1 mV, što je omogućeno pogodnim tehničkim rešenjem.

2.2.3. Elektrokardiografski odvodi

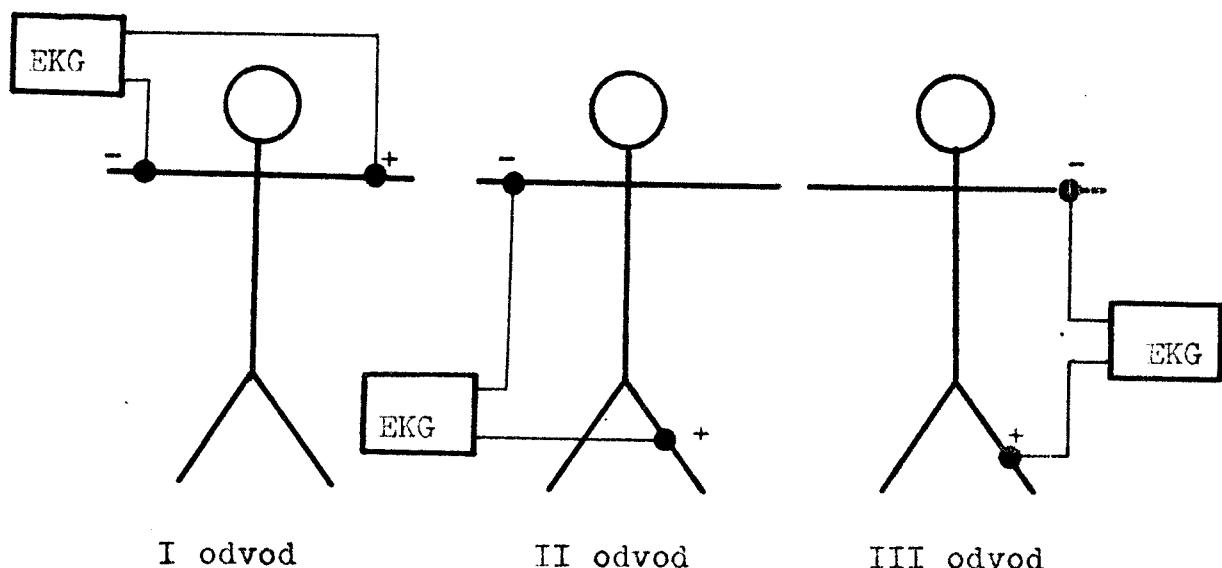
Kao što je rečeno, signal se u EKG-uredaj dovodi pomoću elektroda postavljenih na površinu tela. Postoji više raznih načina priključivanja elektroda, a svaki pojedini način se u elektrokardiografiji naziva odvodom. Registrovanje sa većeg broja različitih odvoda omogućuje da se srce "pogleda" sa različitim strana. Najčešće se koristi dvanaest različitih odvoda koji su podeljeni u dve grupe: periferni odvodi i prekordijalni odvodi.

Periferni odvodi se realizuju priključivanjem elektroda na tri ekstremiteta i to na levu ruku, desnu ruku i levu nogu. Prva tri periferna odvoda, prikazana na slici 2.5., dobijaju se tako da svaki par elektroda predstavlja poseban odvod i to :

I odvod - negativan pol ulaza elektrokardiografa se spaja sa desnom rukom, a pozitivan sa levom rukom.

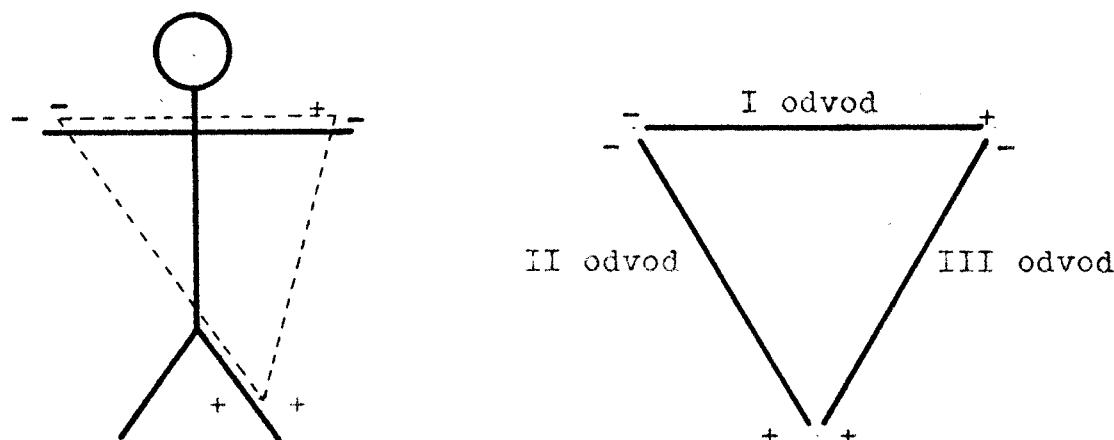
II odvod - negativan pol ulaza elektrokardiografa vezan je za desnu ruku a pozitivan za levu nogu

III odvod - negativan pol ulaza elektrokardiografa se spaja sa levom rukom a pozitivan sa levom nogom.



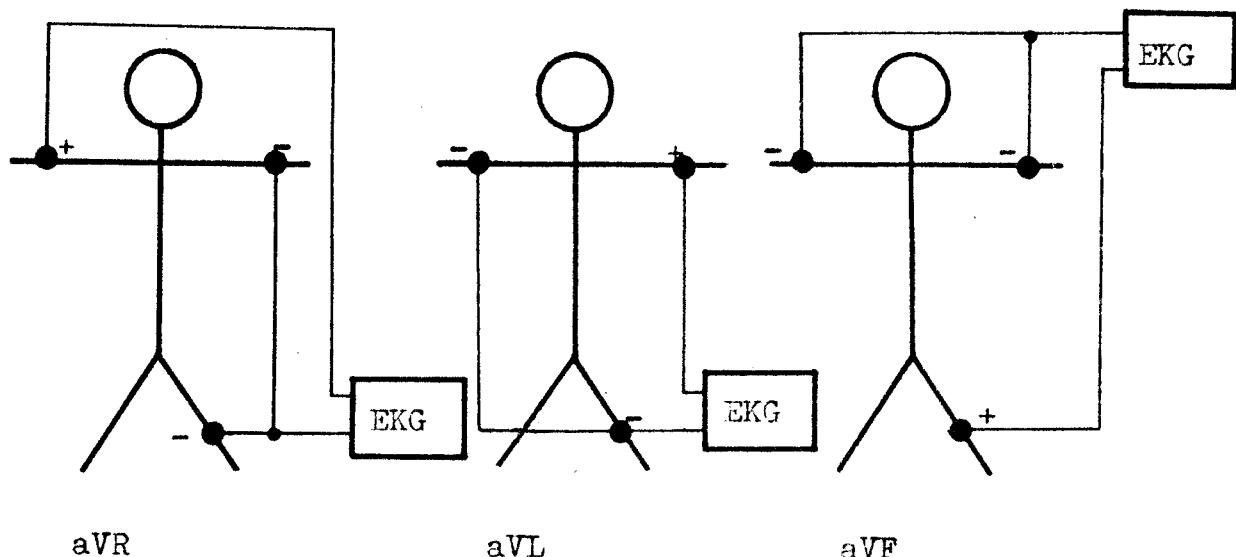
Sl.2.5. Prva tri periferna odvoda.

Cva tri odvoda se shematski prikazuju u obliku Einthovenovog trougla, čija je konstrukcija jasna sa slike 2.6. Važi pravilo, koje se obično zove Einthovenov zakon, da je, u svakom trenutku vremena, napon u bilo kojem odvodu jednak zbiru napona u preostala dva.



Sl.2.6. Einthovenov trougao

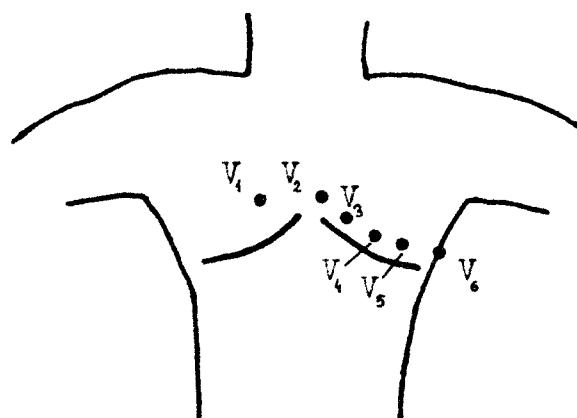
Druga tri periferna odvoda, koja se ponekad zovu i pojačani unipolarni odvodi, dobijaju se tako da se dva ekstremiteta zajednički vežu za negativan pol ulaza elektrokardiografa, a preostali treći ekstremitet na pozitivan pol ulaza, slika 2.7. Kad je pozitivan pol spojen sa desnom rukom, odvod



Sl.2.7. Pojačani unipolarni odvodi

se zove aVR, kad je spojen s levom rukom odvod se zove aVL, a kad je spojen sa levom nogom odvod se zove aVF. Nazivi dolaze iz engleskog jezika: a(augmented-pojačan), V(voltage-napon), R(right-desno), L(left-levo), F(foot-noga).

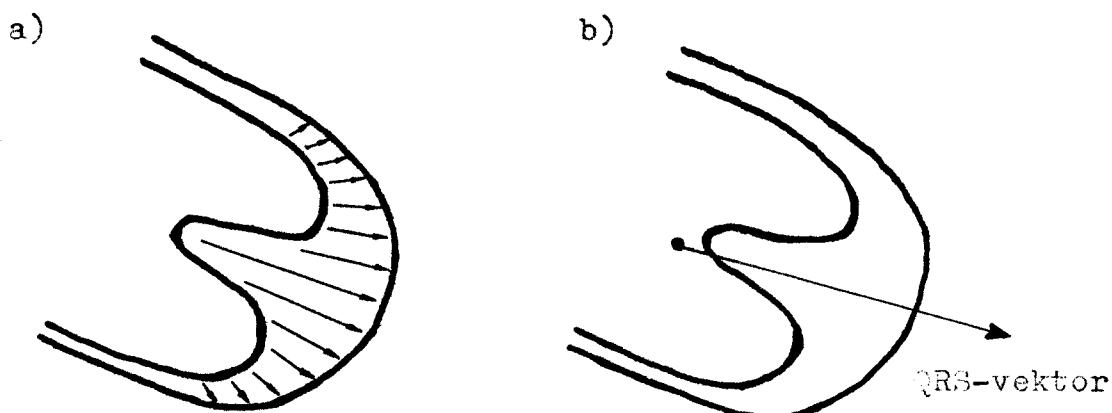
Prekordijalni odvodi se ostvaruju tako što se na negativan pol ulaza elektrokardiografa priključuju svi ekstremiteti ili leda, a pozitivna elektroda se premešta u razne položaje na prednjoj strani srudnog koša. Obično je u pitanju šest položaja prikazanih na slici 2.8. Ovi odvodi nose oznaku V sa indeksima od 1 do 6. Kako je površina srca vrlo blizu svaki prekordijalni odvod uglavnom pokazuje električni potencijal onog dela srca kojem se nalazi najbliže.



Sl.2.8. Prekordijalni odvodi

2.2.4. Vektorska analiza

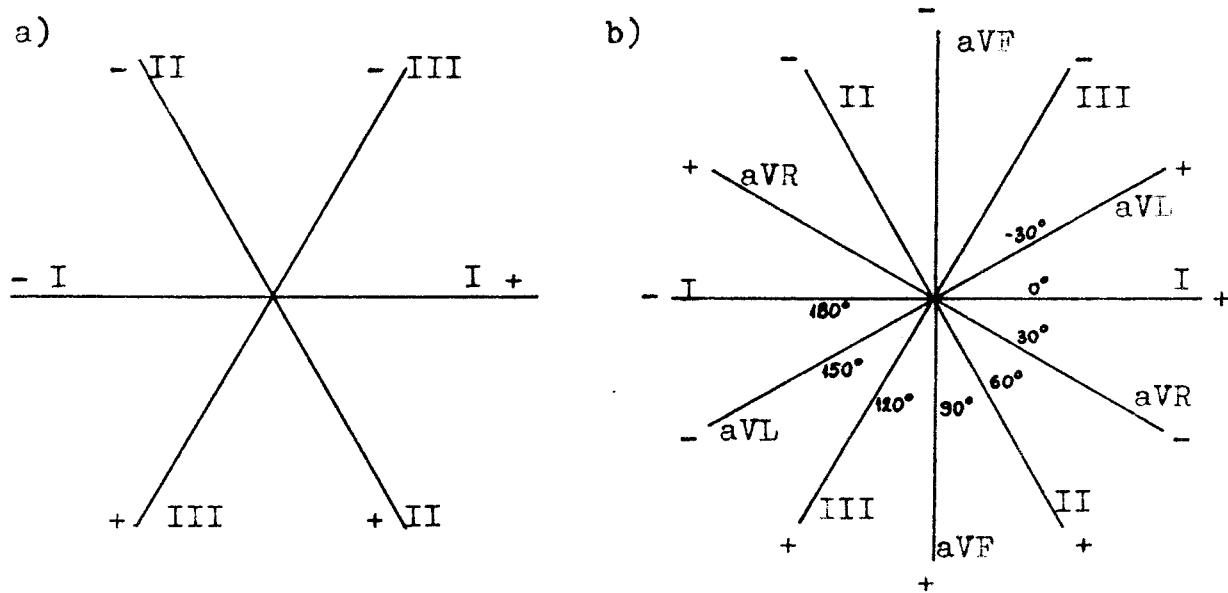
U elektrokardiografiji važnu ulogu ima i tkz. vektorska analiza, čije će najosnovnije postavke sada biti iznese- ne. U svakom trenutku srčanog ciklusa srčanim mišićem teku struje različitog smera i intenziteta. Nameće se da se te struje opišu vektorima, koji će ujedno pokazivati i smer širenja depolarizacije i repolarizacije u srcu. Na slici 2.9.a shema- tski je prikazan komorni mišić unutar kojeg su nacrtani vekto- ri koji prikazuju smerove širenja depolarizacionog talasa u pojedinim delovima mišića. Ako se svi ti vektori vektorski



S1.2.9. Širenje depolarizacije komornim mišićem i njegovo predstavljanje vektorom.

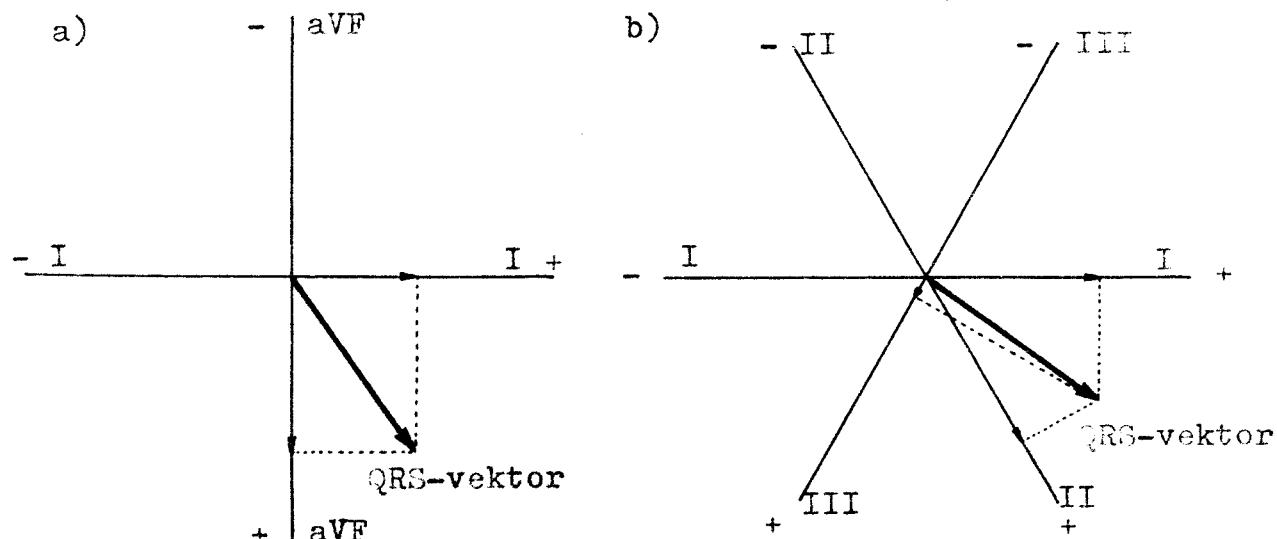
saberu dobije se vektor prikazan na slici 2.9.b. Njegov se početak, prema konvenciji, postavlja u AV-čvor, a naziva se QRS-vektor, jer pokazuje pravac širenja depolarizacije komo- rama.

Do intenziteta i smera ovog vektora dolazi se na osnovu EKG-snimaka i to na sledeći način. Pogleda li se načas slika 2.6. Einthovenovog trougla, i u mislima izvrši transla- cija njegovih stranica, tako da se sve tri stranice sekut u jednoj tački, koja se nalazi u području srca, ili tačnije u AV-čvoru, dobija se pomalo neobičan koordinatni sistem pri- kazan na slici 2.10.a. Isti postupak se može primeniti i na unipolarne odvode aVR, aVL i aVF, koji će zajedno sa odvodima I, II i III dati sliku 2.10.b. Tako svaki odvod definiše je- dan pravac, koji se naziva osovina, i koji zaklapa određen ugao sa ostalim pravcima (osovinama). Prema konvenciji pozitiv-



Sl.2.10. Csovine perifernih odvoda

tivan kraj I odvoda definiše ugao od 0° i pokazuje levu stranu grudnog koša. Ugao od $+90^\circ$ je definisan pozitivnim krajem aVF odvoda, ugao od 180° negativnim krajem I odvoda itd., kao što je na slici i prikazano. Izabравши u ovom šestoosnom koordinatnom sistemu bilo koja dva odvoda, odnosno osovine, moguće je razložiti QRS-vektor na komponente. Te komponente će upravo odgovarati naponima QRS-kompleksa u izabranim odvodima, pa konstrukcija, obrnutim postupkom, nije nimalo teška, što pokazuje i slika 2.11.a. Sasvim je jasno da se isto može



Sl.2.11. Konstrukcija QRS-vektora

učiniti i sa više od dva odvoda, kao na slici 2.ll.b.

Sem za QRS-vektor vektorska analiza koristi se još za T-vektor, koji pokazuje smer širenja repolarizacije u komorama. Čire uzevši, smatra se normalnim da se vektori nalaze u intervalu uglova od 0° do 90° , a prosečna vrednost je 59° . Važan je i međusobni ugao između QRS i T-vektora, koji kod normalnog stanja ne prelazi 60° . Položaji i intenziteti ovih vektora, uz EKG-snimke različitih odvoda, omogućavaju diagnosticiranje neverovatno velikog broja srčanih obolenja i praćenje mnogih promena u radu srčanog mišića.

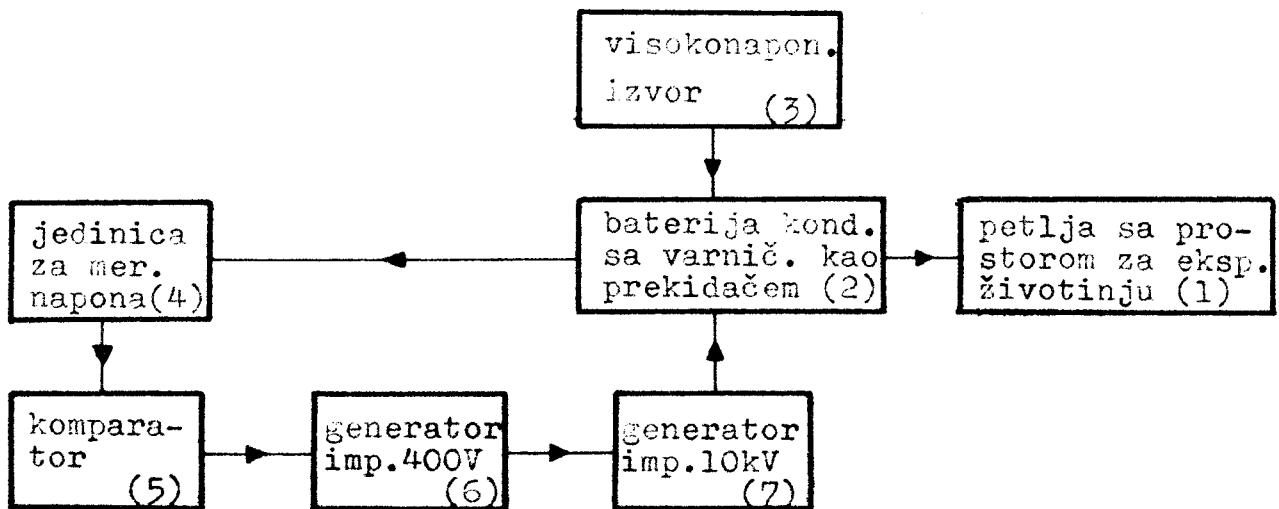
3. SISTEM ZA GENERISANJE ELEKTRO- MAGNETSKOG POLJA

3.1. UVOD

Radi ispitivanja delovanja elektromagnetskog polja na srce eksperimentalnih životinja, iz razloga iznesenih u prvoj glavi, neophodno je bilo kreirati elektromagnetsko polje reproducibilnih karakteristika i dovoljne jačine. Karakteristike samog polja biće posebno opisane zajedno sa opisom određivanja elemenata RLC-kola, jer se ove većine logično nadovezuju jedna na drugu.

Najveći deo sistema za generisanje elektromagnetskog polja razvijen je, već pre ovih eksperimenata, u Laboratoriji za fizičku elektroniku (LFE) za potrebe ispitivanja plazme. Svi podsistemi biće ukratko opisani nezavisno od toga da li su, ili nisu, pretrpeli modifikacije, odnosno bili posebno konstruisani za potrebe ovog rada.

Blok-shema celokupnog sistema data je na slici 3.1. Jezgro sistema čini RLC-kolo, slika 3.4., koje, kada ga var-



Sl.3.1. Blok-shema sistema za generisanje elektromagnetskog polja.

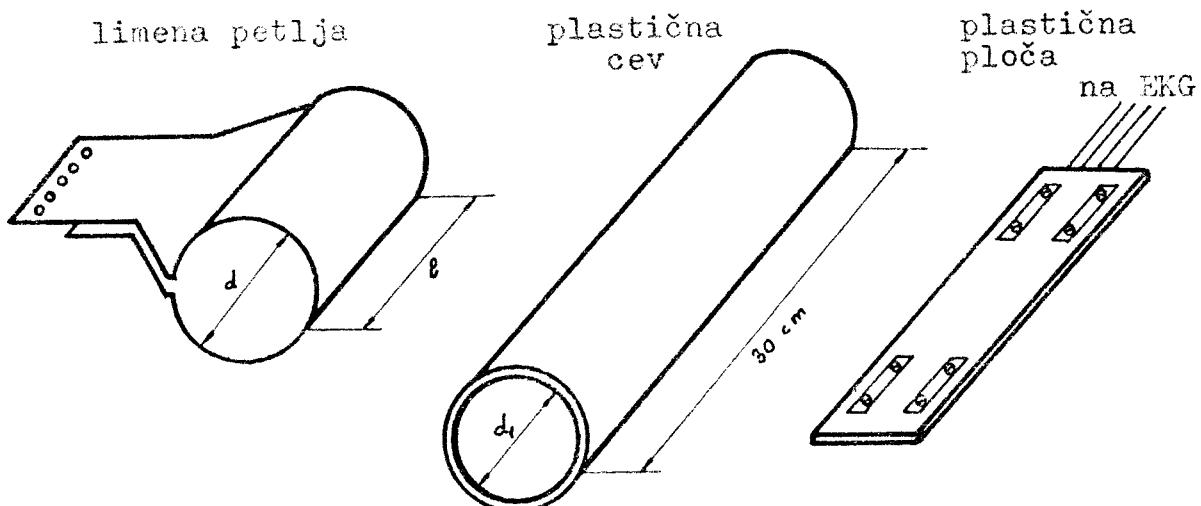
nica zatvori, prigušeno zaosciluje. Potrebna energija za oscilovanje se, putem punjenja baterije kondenzatora (2), dovođi kolu iz visokonaponskog izvora (3). Visina napona na bateriji kondenzatora, kod koje dolazi do varničenja, tj. do zatvaranja kola, reguliše se automatskim okidačem-komparatom (5). Generatori inicijalnog impulsa od 400 V (6) i 10 kV (7), pokrenuti automatskim okidačem-komparatorom, zaduženi su da na varničniku stvore dovoljno velik impuls za preskakanje vornice.

3.2. IODSISTEMI

3.2.1. Petlja sa prostorom za eksperimentalnu životinju

Akumulirano nanelektrisanje u kondenzatorskoj bateriji prolazi kroz limenu petlju, čineći električnu struju trenutne jačine preko 10^4 A. Unutar petlje, slika 3.2., stvara se željeno elektromagnetsko polje. Petlja je izrađena od mesingenog lima debljine 1 mm. Sa varničnikom i kondenzatorskom baterijom električki je spojena trakama istog lima širine 8 cm, što garantuje relativno male gubitke na termogenu otpornost, i što je još važnije, malu samoindukciju vodova.

U stvari, izradene su dve petlje, obe prečnika $d = 7,5$ cm, jedna dužine $l = 16$ cm i druga dužine $l = 3$ cm. Prilikom merenja eksperimentalna životinja je pričvršćena na plastičnu ploču, na kojoj su izrađena četiri kontakta od posinčanog lima. Kontakti se oklopljenim vodovima spajaju sa



Sl.3.2. Petlja sa prostorom za eksp. životinju

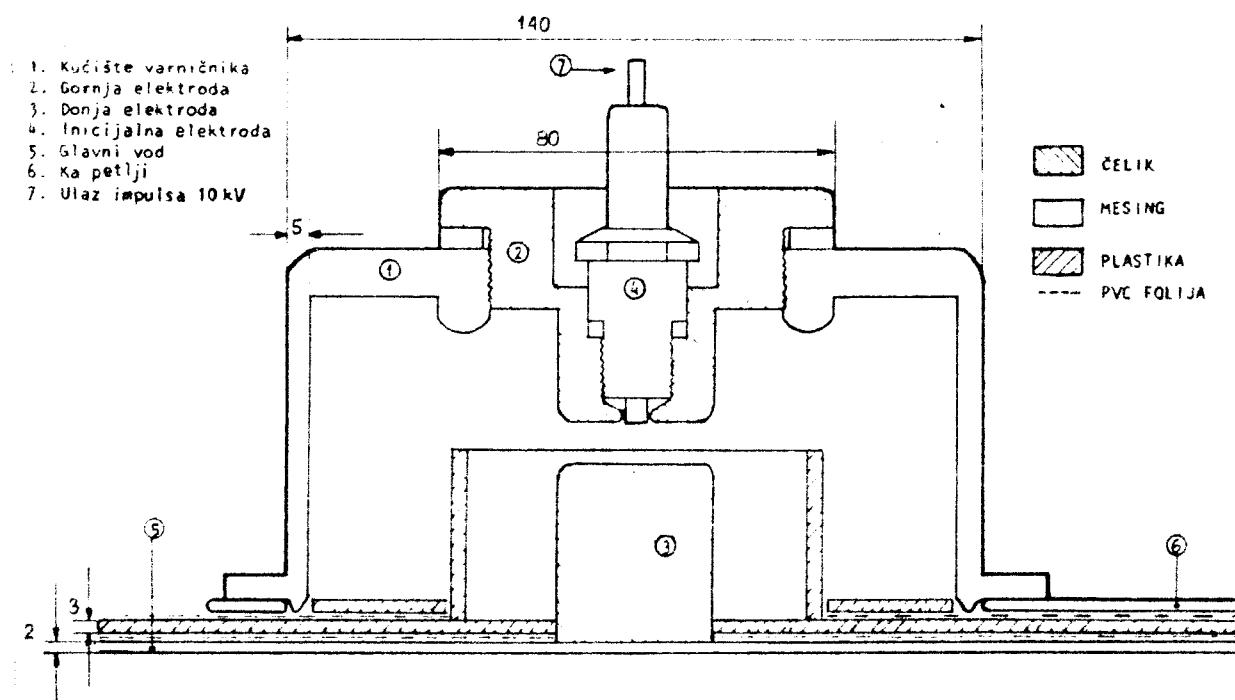
TKG-uredajem. Plastična ploča sa pričvršćenom eksperimenta-lnom životinjom se nalazi unutar plastične cevi, dužine 30 cm; spoljnog prečnika 7,5 cm i unutrašnjeg 6,5 cm, koja ima zadatak da zaštiti životinju od direktnog kontakta sa petljom. Cev, ploča i životinja su uvučeni unutar petlje.

Pored navedenih delova izrađeni su i delovi koji su zaduženi da osiguraju mehaničku stabilnost petlje.

3.2.2. Baterija kondenzatora sa varničnikom kao prekidačem

Baterija kondenzatora se sastoji od četiri kondenzatora marke MAXWELL dimenzija 27 x 35 x 65 cm. Svaki kondenzator je kapaciteta $1 \mu\text{F}$ i maksimalnog radnog napona 75 kV. Kondenzatori su povezani paralelno u celinu trakastim vodovima koji istovremeno nose varničnik. Kod maksimalnog radnog napona ovako dobijena energetska jedinica može da akumulira energiju od 11,2 kJ.

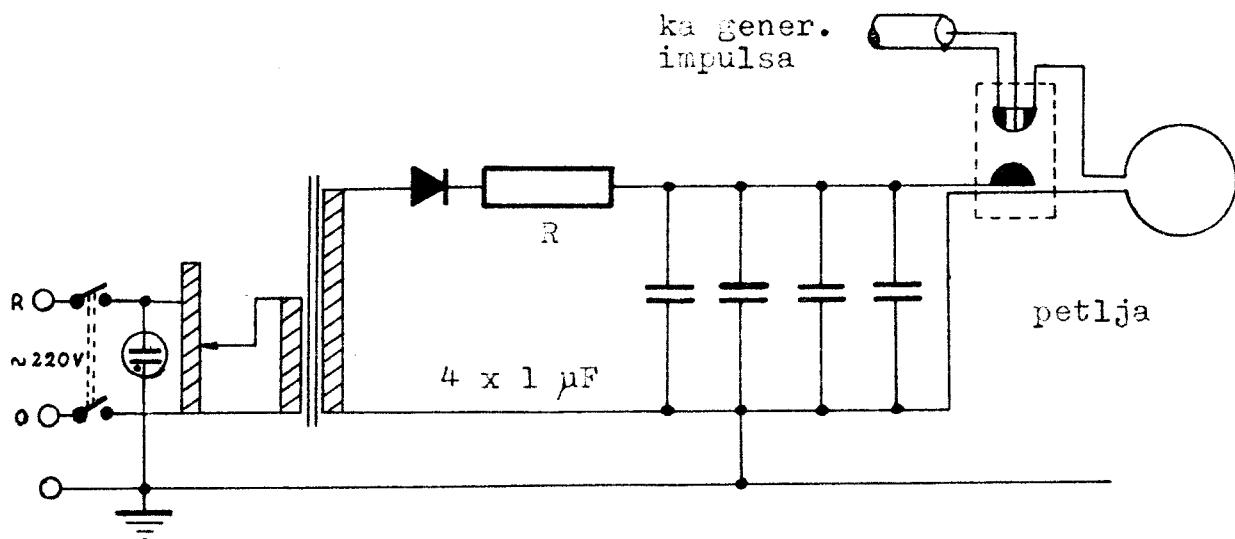
Konstrukcija varničnika je razvijena u LFE, a prikazan je na slici 3.3. Poseduje kvalitetnu zvučnu izolaciju i veliku pouzdanost proboga okidnim impulsom.



Sl.3.3. Varničnik

3.2.3. Visokonaponski izvor

Visokonaponski izvor je, takođe, originalna konstrukcija IFE. Shema veza izvora, baterije kondenzatora sa varničnikom i petlje data je na slici 3.4. U izvor je ugrađen varijak marke Iskra tip PRU 120, visokonaponski transformator marke Minel tip VEN-30, nazivne snage 90 W za struju frekvencije 50 Hz, izrađen po licenci NESSWANDLER BAU BAMBERG, i maksimalne trenutne snage 2,5 kW. Diodni sistem čine tri visokonaponske diode marke Semikron HSKE 17000/7600 - 0,3, a izdrži maksimalan inverzni napon od 150 kV, i maksimalnu vrednost srednje struje od 100 mA. Da bi se osiguralo, da kod napona nižih od 65 kV, struja ne prede 100 mA, ugrađen je zaštitni otpor R od $650 \text{ k}\Omega$. Kako se u početku punjenja na otporu razvija snaga od oko 6500 W , otpor je smešten u posebno kućište obloženo hladnjakom i ispunjeno transformatorskim uljem.



Sl.3.4. Visokonaponski izvor, baterija kondenzatora sa varničnikom i petlja.

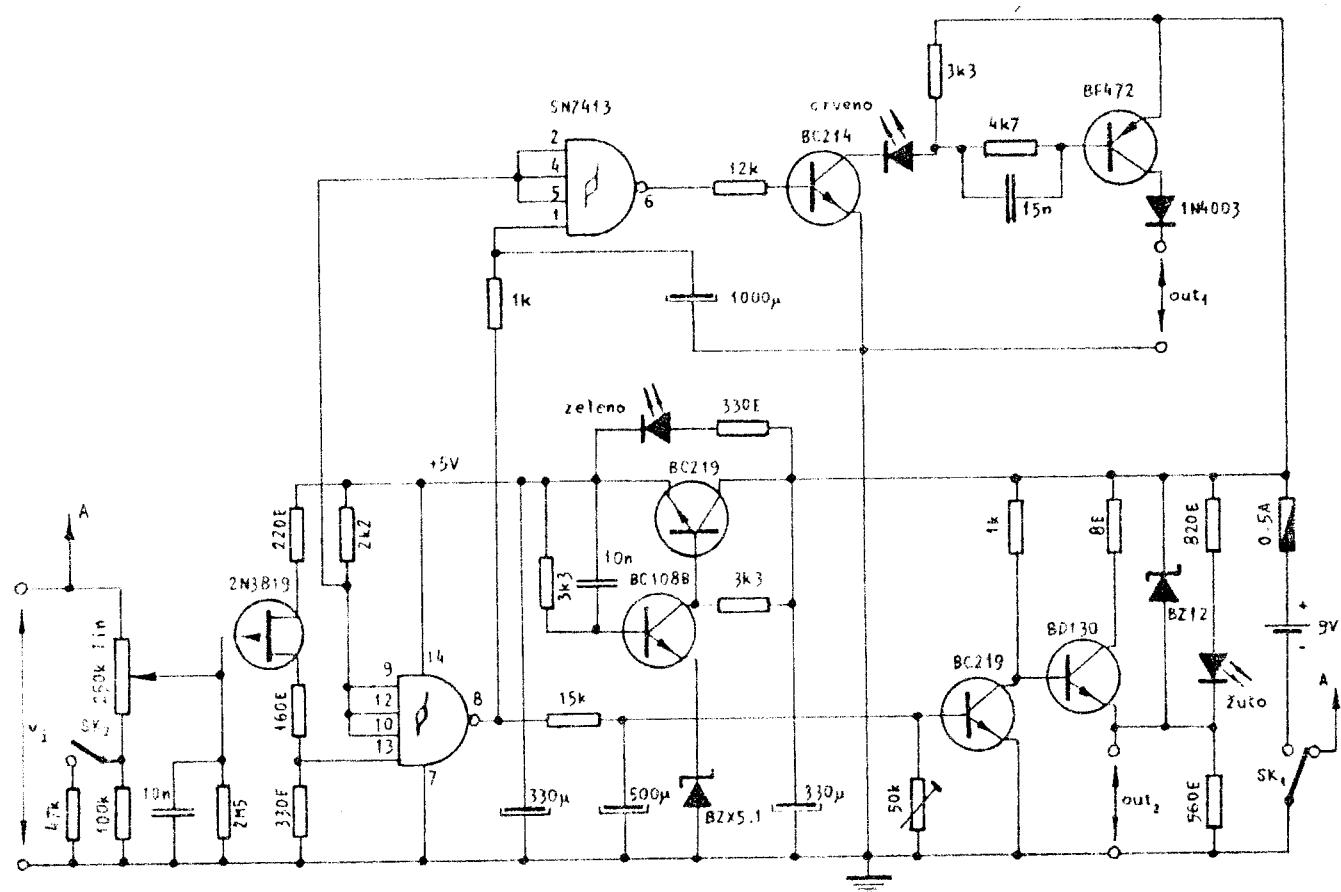
3.2.4. Jedinica za merenje visokog napona

Merenje visokog napona se ostvaruje preko razdelnika napona. Razdelnik čine visokonaponska sonda HEATHKIT otpora $1090 \text{ M}\Omega$ i instrument sa svojim unutrašnjim otporom od $10 \text{ M}\Omega$.

Upotrebljen je elektronski poluprovodnički multimeter UNIMER-1 proizvodnje Iskra.

3.2.5. Automatski okidač-komparator

Zadatak ovog podsistema je da meri-komparira napon na bateriji kondenzatora i da na zadatu vrednost sam izvrši okidanje generatora inicijalnog impulsa. Time je rukovanje sistemom znatno olakšano, jer pažnja operatora ne mora biti vezana za praćenje porasta napona na bateriji kondenzatora. Ovaj uređaj, kao i niže opisani generatori inicijalnog impulsa, razvijeni su u LFE. Shema automatskog okidača-komparatora data je na slici 3.5. Na shemi se vidi da uređaj ima dva izlaza. Jeden od njih je, prilikom ispitivanja plazme, korišćen za automatsko pokretanje kamere.

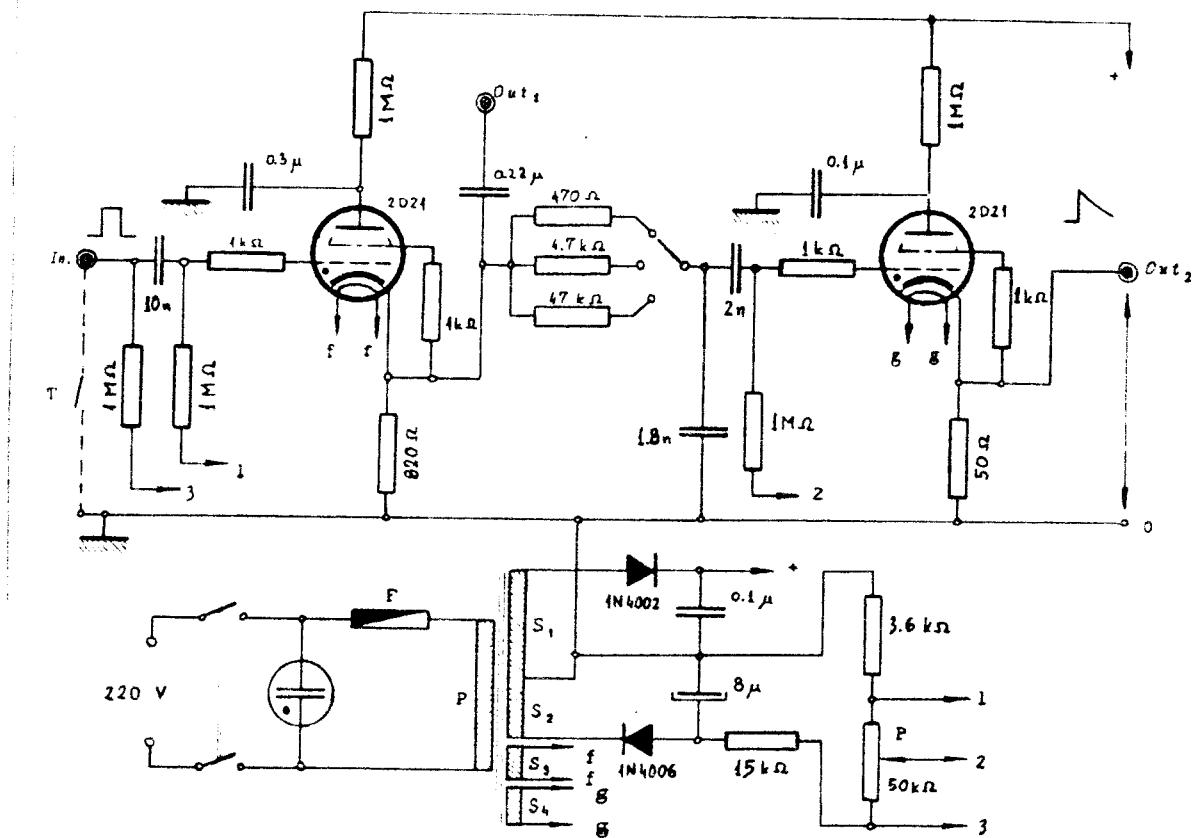


Sl.3.5. Automatski okidač-komparator

3.2.6. Generator inicijalnog impulsa nivoa 400 V

Ovaj uređaj ima zadatku da, pokrenut automatskim okidačem-komparatorom, na svom izlazu stvori impuls napona

400 V, koji će biti upotrebljen za okidanje sledećeg stepena. Shematski prikaz uređaja dat je na slici 3.6. Glavni aktivni deo generatora su tiratroni, proizvodnje G.E.C. England i oznake 2D21, minimalnog vremena oporavka 75 μ s. Vreme porasta

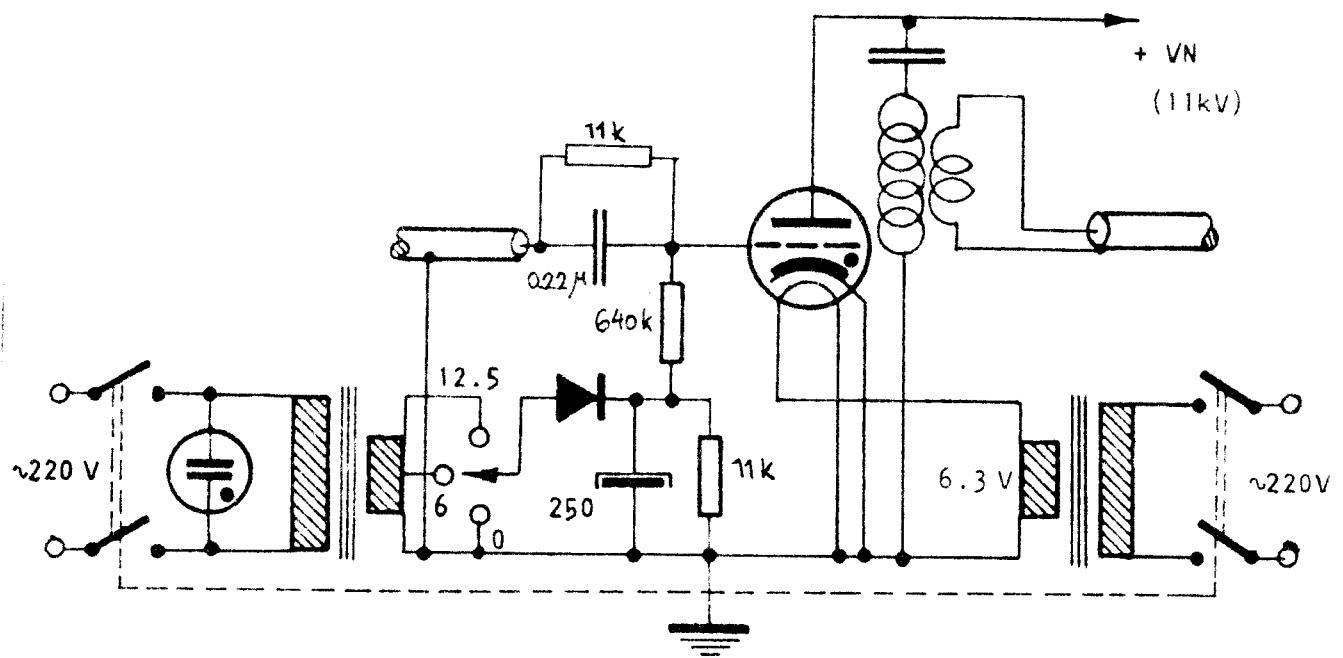


Slika 3.6. Generator inicijalnog impulsa nivoa 400 V

impulsa od 6 do 75% maksimalne vrednosti iznosi 0,03 μ s, a minimalno vreme između dva uzastopna impulsa 20 ms. Za potrebe ispitivanja plazme izvedeno je i posebno kolo za kašnjenje.

3.2.7. Generator inicijalnog impulsa nivoa 10 kV

Ovaj sklop predstavlja svojevrstan pojačavač inicijalnog impulsa od 400 V na 10 kV. U uređaju je ugrađen specijalan tiratron, oznake 8503 (FX 290) marke English Electric, maksimalnog vršnog napona 16 kV. Za potrebe napajanja uređaja konstruisan je i posebni izvor visokog napona od 11 kV. Shema uređaja data je na slici 3.7.



Sl.3.7. Generator inicijalnog impulsa nivoa 10 kV

4. S I S T E M Z A M E R E N J E

Na sistem za merenje su se u postavci eksperimenta stavljali sledeći zahtevi: Da omogući elektrokardiografsko snimanje svih perifernih odvoda pre uključivanja elektromagnetskog polja, neposredno posle isključivanja polja i ponovo nakon izvesnog vremena bez prisustva polja. Zatim da obezbedi merenje srčane frekvencije, na kraju kraćih vremenskih intervala (od 5 do 15 minuta), za čitavo vreme izvođenja eksperimenta, a da to usled relativno jakih elektromagnetskih polja ne dovede do ometanja rada ili čak izazivanja većih kvara na upotrebljenim uređajima. I konačno, da osigura neometano uzimanje i prenos signala od eksperimentalne životinje do uređaja za registrovanje.

Svi ovi zahtevi su, relativno jednostavno, rešeni sklopom prikazanim na slici 4.1. Na levoj strani slike vidi se ploča za pričvršćivanje životinje, koja je za razliku od slike 3.2. sada prikazana sa donje strane. Vezivanje pocinčanih kontaktnih ploča sa oklopljenim dovodnim kablovima je vidljivo sa slike. Kablovi dužine oko 2,5 m dovode signal do sistema prekidača, koji imaju dva položaja. U položaju 1 elektrokardiograf je električki odvojen od dovodnih kablova, koji su u isto vreme uzemljeni, tako da je EKG-uređaj zaštićen od većih indukovanih napona za vreme rada sistema za generisanje polja. Za vreme registrovanja srčane aktivnosti polje se isključuje, a prekidači prebacuju u položaj 2. Pošto za potrebe određivanja frekvencije srca, nije neophodno snimati signal sa svih šest perifernih odvoda, već samo sa jednog, isključivanje polja traje veoma kratko (10 do 15 sek.), što bitno ne remeti sam eksperiment.

Pokušano je više načina za pričvršćivanje eksperimentalne životinje. Prvobitno je bilo zamišljeno da se ekstremiteti, namazani specijalnim elektrodnim kremom, polože na kontaktne ploče i učvrste platnenom trakom. Međutim, krem je

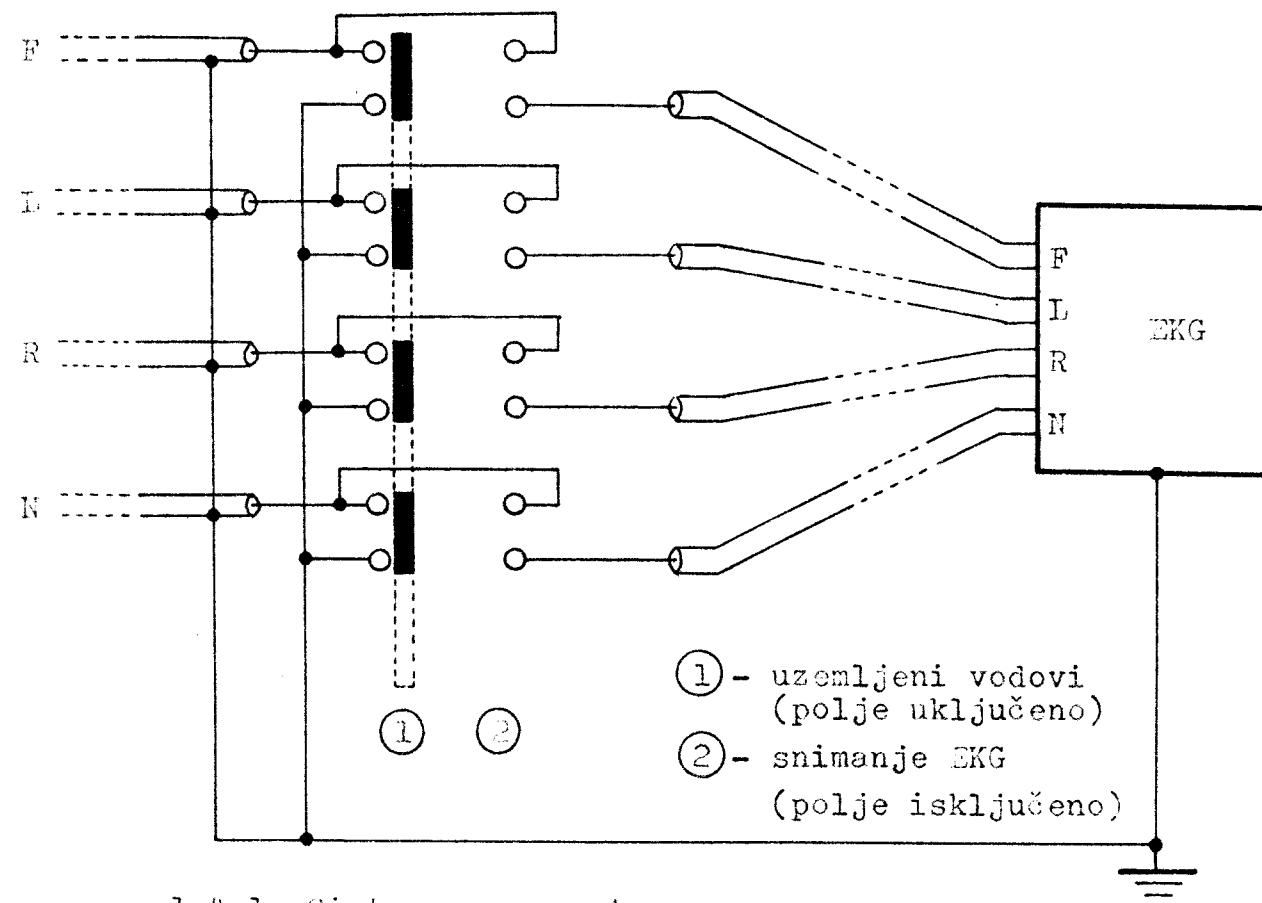
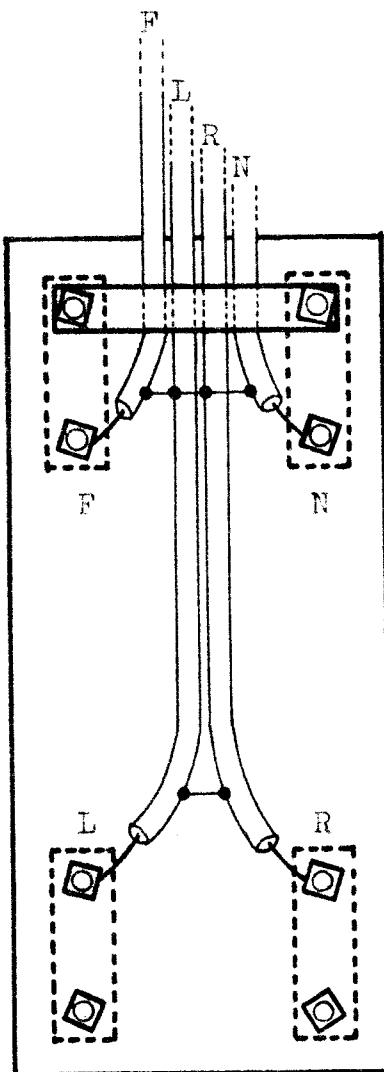
kontakti i vodovi

F - sa leve noge

L - sa leve "ruke"

R - sa desne "ruke"

N - sa desne noge (neutralna elekt.)



sl.4.1. Sistem za merenje

toliko smanjio trenje, da su se ekstremiteti pomerali iz željenog položaja pri svakom refleksnom pomeranju životinje. Bolji rezultat nije donelo ni zamenjivanje platnene trake sa lepljivom trakom, tako da se moralo preći na potkožno ubadanje igala, koje su izolovanom žicom bile električki spojene sa kontaktnim pločama. Ovaj način ostvarivanja kontakta dao je veoma dobre snimke i nije se dešavalo da se za vreme snimanja kontakti moraju popravljati.

Za registrovanje je upotrebljen jednokanalni prenosivi EKG-uredaj. Rad je započet elektrokardiografom ECG-100 T, proizvodnje Ei-Niš. Uredaj je frekventnog opsega 0,2 do 85 Hz, predviđen za napajanje iz gradske mreže. Registrovanje je moguće sa dve brzine pokretanja trake: 25 i 50 mm/s. Ispisivanje se vrši zagrejanom iglom pisača na termo-osetljivoj traci. Potrošnja uređaja je 26 W.

Kod oko polovine eksperimentalnog rada došlo je do kvara na gore opisanom uredaju, koji nije mogao biti otklonjen u kraćem vremenskom razdoblju, pa je izvršena zamena uređaja. Upotrebljen je nešto stariji tip uređaja oznake NEK-1 F2, proizvod nemačke firme RFT. Radi se o cevnom uredaju, koji za ispisivanje koristi pokretnu indigo traku. U odnosu na ECG-100 T rad sa ovim uredajem je nešto teži, jer je prilikom merenja potrebno izvršiti nekoliko operacija više, a snimke preko indigo trake su manje oštре.

5. ODREĐIVANJE ELEMENATA RLC KOLA I KARAKTERISTIKE ELEKTROMAGNETSKOG POLJA

5.1. UVOD

Da bi se precizno moglo odrediti karakteristike elektromagnetskog polja, kojem su izlagane eksperimentalne životinje, treba pre svega poznavati vrednosti elemenata RLC-kola. Kolo čine baterija kondenzatora sa svojim kapacitetom C , petlja sa svojim koeficijentom samoindukcije L i otpor prigušenja R , kojim se izražavaju sve vrste energetskih gubitaka, koji su odgovorni za prigušeno oscilovanje. Kako za nalaženje karakteristika polja nije neophodno znati posebno parazitne kapacitete i induktivitete, i posebno tačnu vrednost koeficijenta samoindukcije same petlje, smatraće se da su sve parazitne veličine obuhvaćene unutar L i R , pa neće biti posebno matematički izražavane.

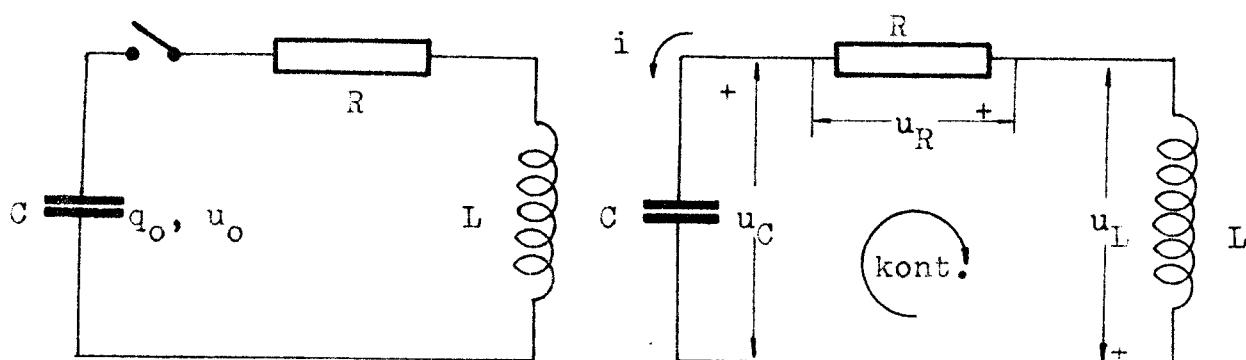
Iznaz po kojem se menja struja u kolu daje opšta teorija RLC-kola. Poznavanje ovog izraza i gornjih veličina omogućava primenu Laplaceovog, Biot-Savartovog i Faradayevog zakona, koji daju sve tražene odgovore o karakteristikama polja.

5.2. RLC-KOLO

Neka je kondenzator naelektrisan nekom količinom nenelektrisanja q_0 , slika 5.1.a. Na njegovim krajevima će, usled toga, vladati napon u_0 , dat izrazom:

$$u_0 = \frac{q_0}{C} \quad (5.2.1)$$

Zatvarenjem kola, slika 5.1.b., potećiće kolum struja i , koja je uz promenu nenelektrisanja, odnosno promenu napona na kondenzatoru vezana izrazima:



Sl.5.1. RLC-kolo

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_c}{dt}$$

Iz gornje jednačine sledi da je napon na krajevima kondenzatora jednak:

$$u_c = \frac{1}{C} \int i dt \quad (5.2.2)$$

Napon samoindukcije u_L i napon na krajevima otpornika R jednak su:

$$u_L = L \frac{di}{dt} \quad u_R = Ri \quad (5.2.3a, b)$$

II Kirchhoffovo pravilo za kolo sa slike daže:

$$u_c + u_R + u_L = 0$$

odnosno koristeći jednačine (5.2.2) i (5.2.3a,b):

$$\frac{1}{C} \int i dt + Ri + L \frac{di}{dt} = 0 \quad (5.2.4)$$

Diferenciranjem jednačine (5.2.4) po vremenu i sređivanjem izraza dobija se poznata homogena linearna diferencijalna jednačina drugog reda s konstantnim koeficijentima:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \frac{i}{LC} = 0 \quad (5.2.5)$$

Oblik rešenja diferencijalne jednačine (5.2.5) zavisi od značka izraza:

$$\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC} \quad (5.2.6)$$

Ako je ovaj izraz veći od nule rešenje diferencijalne jednačine opisuje aperiodično pražnjenje, dok u slučaju kada je izraz jednak nuli rešenje opisuje aperiodično kritično pražnjenje.

Od interesa je jedino slučaj kada je izraz (5.2.6) manji od nule, što znači da se dobija rešenje koje opisuje prigušene oscilacije. Uobičajeno je da se za članove izraza (5.2.6) uvedu oznake:

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC} \quad \zeta^2 = \frac{R^2}{4L^2} \quad (5.2.7a,b)$$

gde se ω_0 naziva sopstvena ugaona frekvencija, a ζ koeficijent prigušenja. Radi lakšeg pisanja, a prvenstveno zato što ima vlastiti fizički smisao, uvodi se oznaka:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \zeta^2} \quad (5.2.8)$$

za ugaonu frekvenciju prigušenih oscilacija. Uz tako uvedene oznake i pod navedenim uslovom rešenje jednačine (5.2.5) ima oblik:

$$i = \bigcirc^{-\zeta t} (K_1 \cos \omega t + K_2 \sin \omega t) \quad (5.2.9)$$

Gde su K_1 i K_2 integraciore konstante. Koristeći uslov da je u početnom trenutku, tj. za $t=0$, struja i bila jednaka nuli, a nanelektrisanje q_0 , mogu se odrediti vrednosti integracionih konstanti K_1 i K_2 , što daje:

$$i = \frac{q_0}{\omega LC} \bigcirc^{-\zeta t} \sin \omega t \quad (5.2.10)$$

ili kad se iskoristi (5.2.1):

$$i = \frac{u_0}{\omega L} \bigcirc^{-\zeta t} \sin \omega t \quad (5.2.11)$$

što je izraz po kojem se menja struja u kolu.

5.3. ODREĐIVANJE OTPORA PRIGUŠENJA I KOEFICIJENTA SAMOINDUKCIJE

5.3.1. Opšti princip merenja

Iskoristi li se sistem jednačina (5.2.7b) i (5.2.8), uz pretpostavku da su koeficijent prigušenja \mathcal{L} i ugaona frekvencija ω poznate veličine, lako je, rešavanjem sistema, doći do vrednosti za otpor prigušenja R i koeficijent samoindukcije kola L . Problem određivanja veličina \mathcal{L} i ω rešava se osciloskopskim snimanjem talasnog oblika oscilacija u kolu. Signal se sa magnetske probe (mala žičana petlja) na ulaz osciloskopa dovodi pomoću oklopljenog kabla. U probi se, za vreme oscilovanja kola, indukuje signal koji je srazmeran promeni struje kola u jedinici vremena. Zbog nepoznavanja tačne vrednosti koeficijenta medusobne indukcije, između lime petlje i magnetske probe, nije moguće sa snimka odrediti vrednost struje. Međutim, upoređivanje relativnih vrednosti amplitudnih ekstrema, koje u određenoj proporciji sude funkciju $\dot{\Theta}^{\text{kt}}$, dovodi do određivanja koeficijenta prigušenja . Nalaženje ugaone frekvencije je mnogo lakše, jer se sa snimka jednostavno "procita" linearna frekvencija oscilovanja.

Za snimanje je korišćen osciloskop TEKTRONIK 454 A i kamera TEKTRONIK C-30A, specijalno dizajnirana za snimanje ekrana osciloskopa.

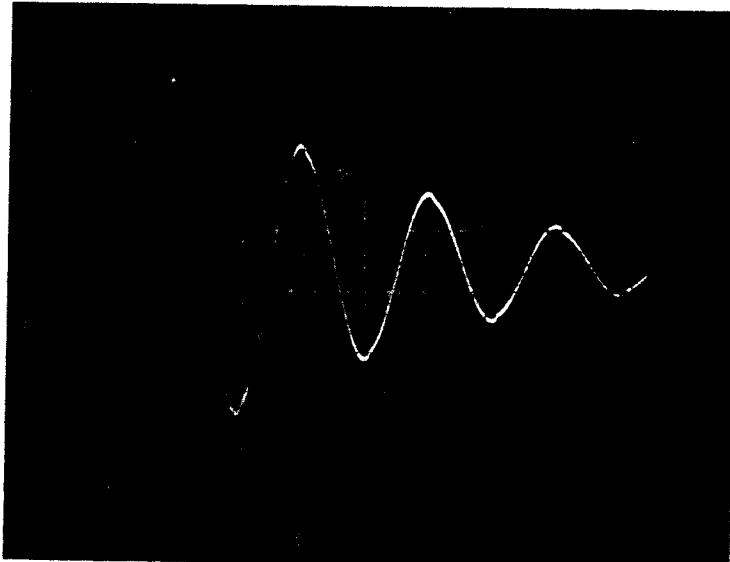
Već je rečeno da su u radu izradene i ispitane dve petlje različite dužine. U daljem tekstu će sve veličine koje se odnose na petlju dužine $l_1 = 16 \text{ cm}$ nositi indeks 1, za razliku od veličina vezanih uz petlju dužine $l_2 = 3 \text{ cm}$, koje će nositi indeks 2. Same petlje će se nazivati 1.petlja i 2.petlja, respektivno.

5.3.2. Merenje i rezultati

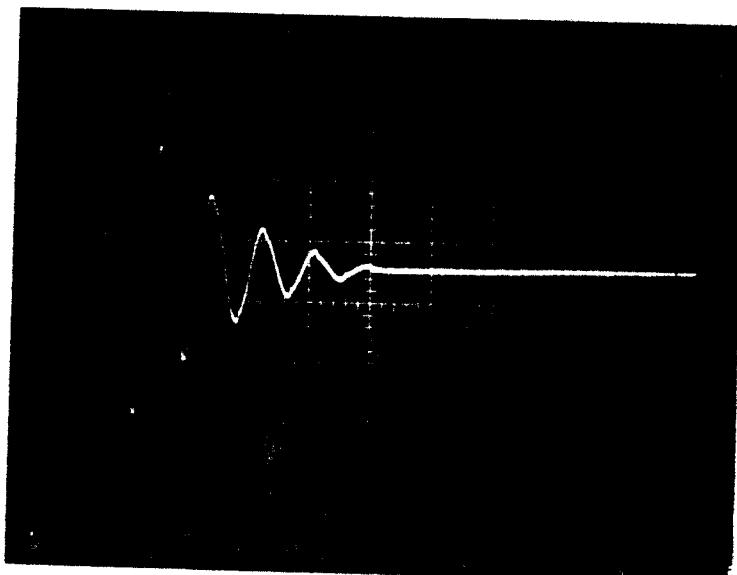
a) Za 1.petlju

Nakon što je montirana 1.petlja uključen je sistem za punjenje baterije kondenzatora, i podešeno je da pražnjenje nastupi kod napona $u_0 = 7 \text{ kV}$. U blizinu petlje prineta je magnetska proba povezana sa osciloskopom. Nedusobno rastojanje je izabранo tako, da indukovani napon u magnetskoj probi ne bude suviše visok, kako bi se zaštitio osciloskop. U tre-

nutku zatvaranja kola izvršeno je snimanje ekrana osciloskopa opisanom kamerom. Slika 5.2. snimljena je vremenskom bazom od $2 \mu\text{s}/\text{cm}$, a slika 5.3. vremenskom bazom od $5 \mu\text{s}/\text{cm}$.



Sl.5.2. Osciloskopski snimak talasnog oblika oscilacija za 1.petlju ($2 \mu\text{s}/\text{cm}$).



Sl.5.3. Osciloskopski snimak talasnog oblika oscilacija za 1.petlju ($5 \mu\text{s}/\text{cm}$).

Prosečna vrednost perioda oscilovanja T , dobijena sa slike 5.2., iznosi:

$$T_1 = 4,22 \mu\text{s}$$

pa je frekvencija oscilovanja:

$$f_1 = \frac{1}{T_1} = 236,9 \text{ kHz}$$

Iskoristi li se poznati odnos između linearne i ugaone frekvencije, za ugaonu frekvenciju oscilovanja se dobija vrednost:

$$\omega_1 = 2\pi f_1 = 1,49 \cdot 10^6 \text{ rad/s}$$

Sa slike 5.3. je vidljivo da ukupno vreme trajanja oscilovanja iznosi oko $20 \mu\text{s}$.

Rečeno je da ekstremi amplitude u određenoj proporciji slede funkciju \mathcal{E}^{kt} . Ekstremi se javljaju u tačkama za koje je:

$$t = t_e \pm k \frac{T}{2}$$

gde je t_e vreme u kojem se javlja neki proizvoljno odabrani ekstrem, a k ceo broj ili nula. Ako se uzmu u obzir samo ekstremi desno od t_e , tada se znak "-" ispred k može izostaviti, a relativna vrednost amplitude za neko k je data jednačinom:

$$A_k = \mathcal{E}^{-\mathcal{L}(t_e + k \frac{T}{2})}$$

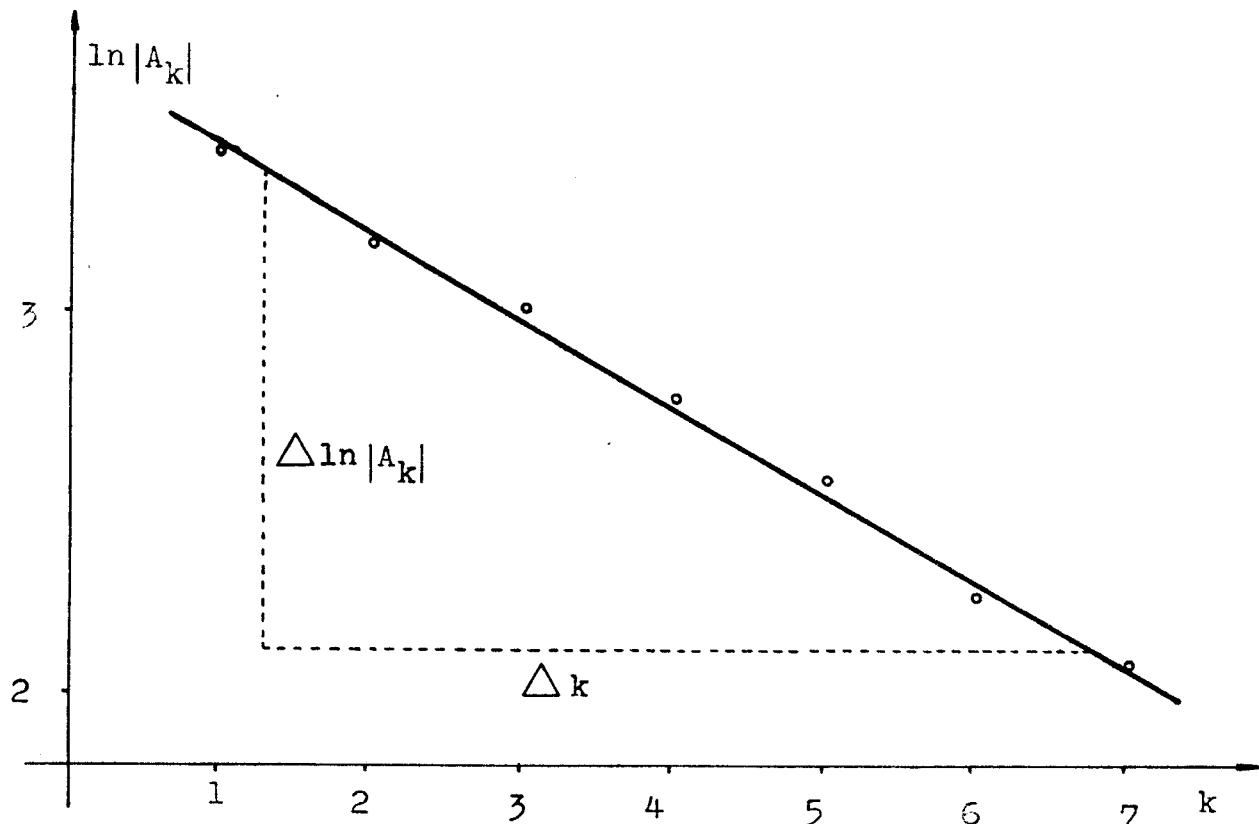
Logaritmovanje ove jednačine daje:

$$\ln |A_k| = -\mathcal{L}(t_e + k \frac{T}{2})$$

ili:

$$\ln |A_k| = -\mathcal{L}k \frac{T}{2} + \text{const} \quad (5.3.1)$$

Poslednjom jednačinom je predstavljena linearna zavisnost $\ln |A_k|$ od k , gde se $\mathcal{L}T/2$ javlja kao koeficijent pravca. Na slici 5.2. izmerene su relativne vrednosti amplitude i unesene na grafik, slika 5.4., u zavisnosti od pripadajuće vrednosti za k . Sa grafika se lako odreduje koeficijent pra-



Sl.5.4. Zavisnost $\ln |A_k|$ od k za 1.petlju.

vca iz kojeg sledi izraz za koeficijent prigušenja \mathcal{L} :

$$\mathcal{L} = \frac{\Delta \ln |A_k|}{\Delta k \cdot T/2} \quad (5.3.2)$$

Izračunata vrednost koeficijenta prigušenja za 1.petlju iznosi:

$$\mathcal{L}_1 = 106,2 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$$

Konačno, iskoristi li se već pomenuti sistem jednačina (5.2.7b) i (5.2.8), za L_1 i R_1 se dobijaju izrazi:

$$L_1 = \frac{1}{C(\omega_1^2 + \mathcal{L}_1^2)} \quad R_1 = 2\mathcal{L}_1 L_1 \quad (5.3.3a, b)$$

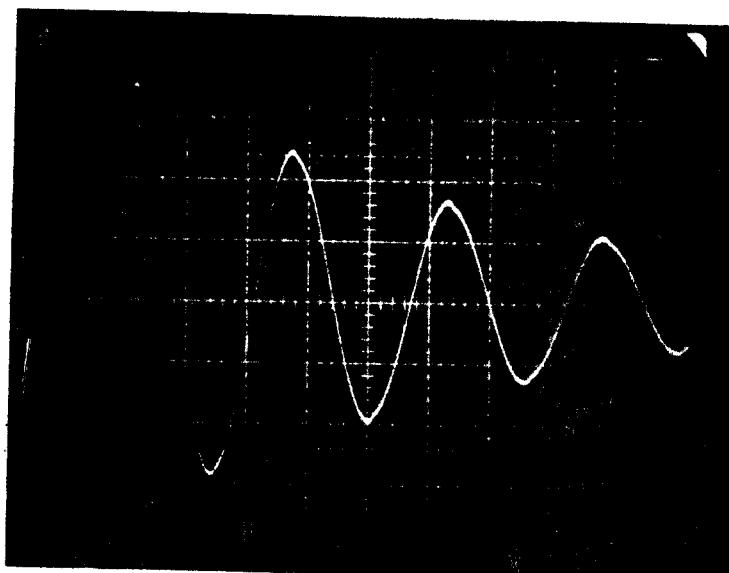
gde na desnim stranama jednačina sada figurišu poznate veličine, jer je kapacitet baterije kondenzatora poznat i iznosi $C = 4 \mu\text{F}$. Numeričko izračunavanje daje rezultate:

$$L_1 = 0,113 \mu\text{H} \quad R_1 = 23,9 \text{ m}\Omega$$

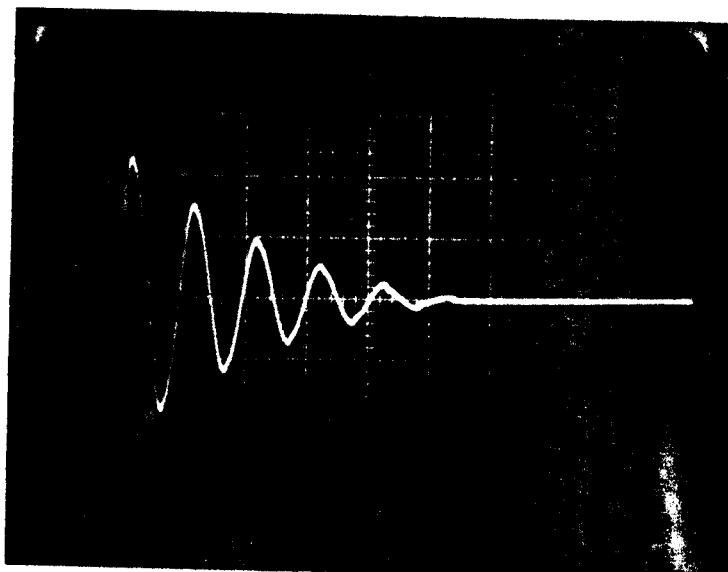
b) Za 2.petlju

Nakon zamene petlji ponovljen je, uz iste uslove kao kod prve petlje, postupak osciloskopskog snimanja talasnog oblika oscilacija. Snimci su dati na slikama 5.5. i 5.6. Prosečna vrednost perioda oscilovanja iznosi:

$$T_2 = 5,11 \mu\text{s}$$



S1.5.5. Osciloskopski snimak talasnog oblika oscilacija za 2.petlju ($2 \mu\text{s}/\text{cm}$).



S1.5.6.Osciloskopski snimak talasnog oblika oscilacija za 2.petlju ($5 \mu\text{s}/\text{cm}$).

a linearna i ugaona frekvencija oscilovanja:

$$f_2 = 195,8 \text{ kHz} \quad \omega_2 = 1,23 \cdot 10^6 \text{ rad/s}$$

Ukupno vreme trajanja oscilovanja iznosi oko 25 μs .

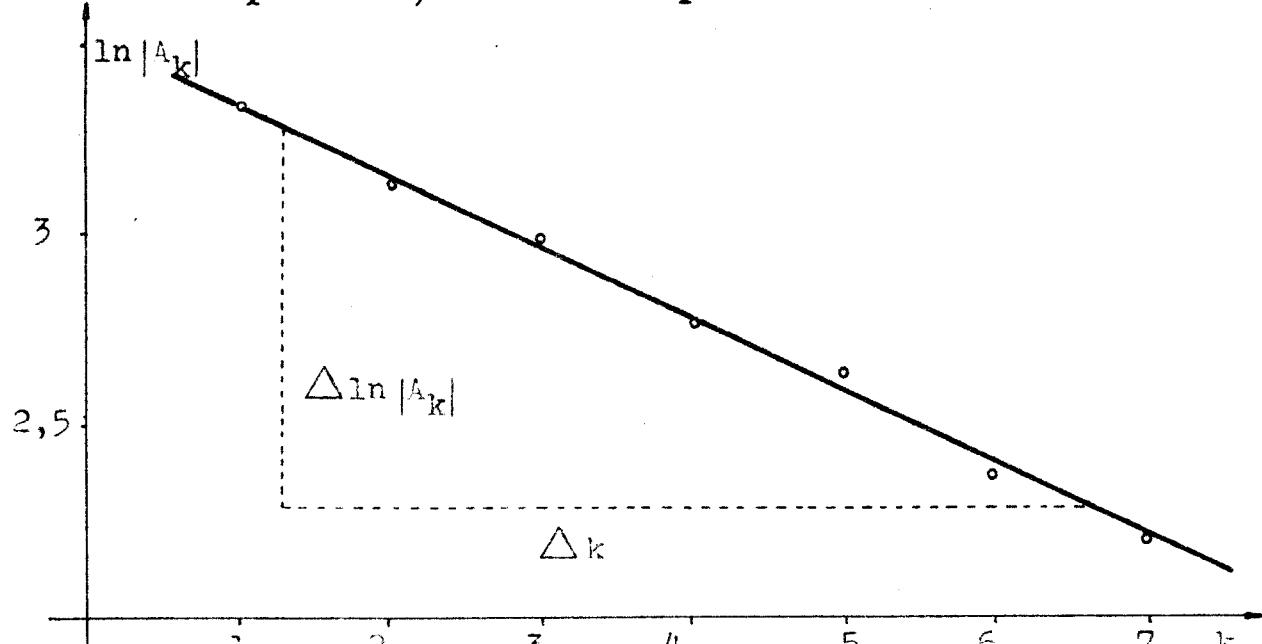
Linearna zavisnost $\ln|A_k|$ od k , data jednačinom (5.3.1), u slučaju 2.petlje daje grafik na slici 5.7. Podaci sa grafika ubačeni u jednačinu (5.3.2) daju:

$$\mathcal{L}_2 = 73,8 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$$

a jednačine (5.3.3a,b):

$$L_2 = 0,165 \mu\text{H}$$

$$R_2 = 24,3 \text{ m}\Omega$$



Slika 5.7. Zavisnost $\ln|A_k|$ od k za 2.petlju.

Dobijeni podaci za obe petlje su, još jednom, dati pregledno u donjoj tabeli:

VELIČINA	1.petlja	2.petlja	JEDINICA
T	4,22	5,11	μs
f	237	196	kHz
ω	1,49	1,23	10^6 rad/s
\mathcal{L}	106	74	10^3 s^{-1}
L	0,113	0,165	μH
R	23,9	24,3	$\text{m}\Omega$
C	4	4	μF

5.4. MAGNETSKO POLJE UNUTAR PETLJE

5.4.1. Uvod

Dobijene vrednosti za elemente RLC-kola, ugaonu frekvenciju oscilovanja i koeficijent prigušenja, omogućavaju da se prema jednačini (5.2.11) izračuna struja u kolu za bilo koji trenutak vremena. To je za neke vrednosti t i učinjeno u tabeli 5.1. Međutim još nije nađena veza između magnetskog polja unutar petlje i struje u kolu. Problem je rešen primenom Laplaceove, odnosno Biot-Savartovog zakona na element petlje, a zatim integracijom po celoj petlji, što je dole detaljno opisano. Rezultat daje vezu između struje i magnetskog polja na centralnoj osi petlje. Magnetsko polje unutar petlje ali izvan centralne ose, ima, naravno, neku drugačiju funkciju povezanost sa strujom u kolu, pa se i jačine magnetskog polja na osi i van nje razlikuju. Nalaženje te funkcijeske veze neminovno vodi na rešavanje eliptičkih integrala, a ovo opet na komplikovano numeričko izračunavanje jačine polja, pa to u ovom radu nije ni rađeno. Podaci o jačini polja na centralnoj osi i geometriji petlje jednoznačno određuju magnetsko polje. Sam toga, eksperimentalna životinja je izložena izvesnoj srednjoj vrednosti jačine polja, koja mnogo ne otstupa od jačine polja u centru petlje.

5.4.2. Funkcijeska veza između jačine magnetskog polja i struje u kolu

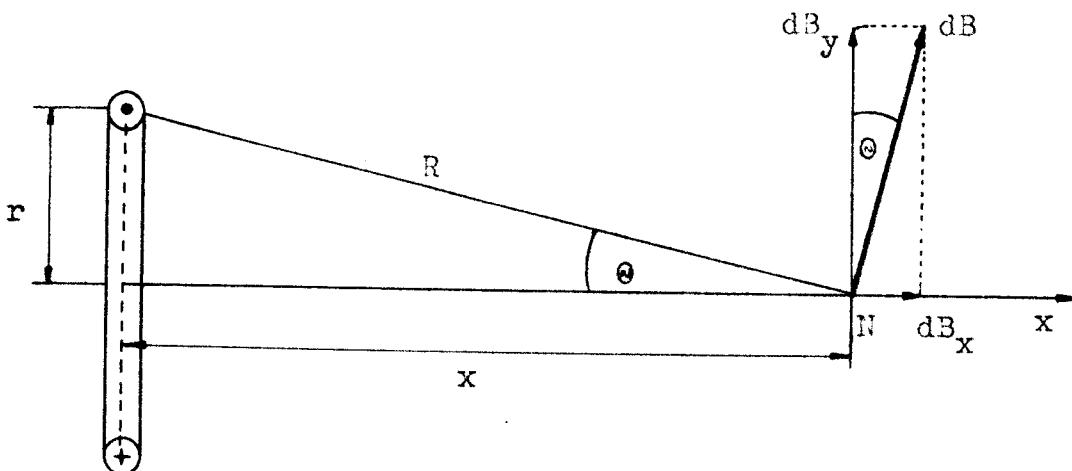
Premda Laplaceovom zakonu svaki element provodnika $d\vec{L}$, kroz koji prolazi struja i , u nekoj tački prostora udaljenoj za R od strujnog elementa $i d\vec{L}$, stvara magnetsko polje jačine:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i d\vec{L} \times \vec{R}}{R^3} \quad (5.4.1)$$

Zatvoreno strujno kolo će u toj tački proizvesti jačinu magnetskog polja datu sa:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_L \frac{i d\vec{L} \times \vec{R}}{R^3} \quad (5.4.2)$$

U tačkama ose, koja prolazi kroz centar kružne strujne konture, slika 5.8., i normalna je na njenu ravan,



Sl.5.8. Magnetsko polje kružne strujne konture.
jačina polja se može odrediti na sledeći način.

Prema jednačini (5.4.1), elementarna jačina magnetskog polja u tački N, koja se nalazi na rastojanju x od ravni konture, kroz koju prolazi struja i_k , ima intenzitet:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i_k dL}{R^2} \quad (5.4.3)$$

a pravac joj je normalan na \vec{R} i leži u ravni koju obrazuju \vec{R} i osa konture. Elementarna jačina magnetskog polja $d\vec{B}$ može da se razloži na komponentu dB_x u pravcu ose konture i komponentu dB_y , koja je normalna na tu osu. Pošto se komponente dB_y , koje potiču od dijagonalno suprotnih elemenata neusobno potiru, ostaju samo komponente:

$$dB_x = dB \sin \theta$$

što daje:

$$B = \oint dB_x = \oint dB \sin \theta$$

$$\frac{2r\pi}{2r\pi}$$

Iskoristi li se (5.4.3), i kako su R i θ konstantne veličine kod ovakve integracije, dobija se:

$$B = \frac{\mu_0 i_k}{4\pi R^2} \sin \theta \oint dL$$

$$\frac{2r\pi}{2r\pi}$$

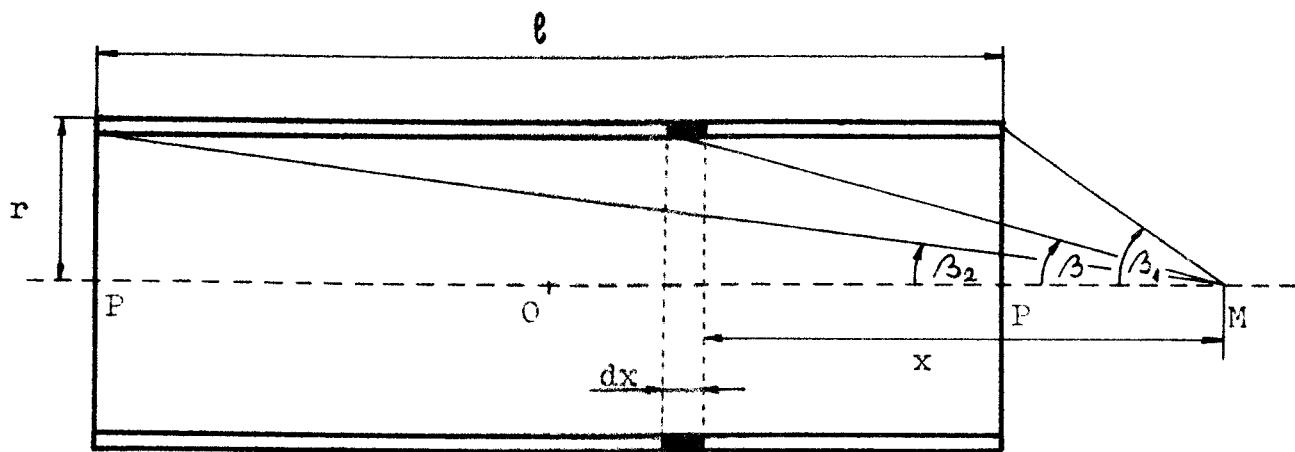
ili nakon integracije:

$$B = \frac{\mu_0 i_k}{2} \frac{r \sin \theta}{R^2}$$

Iz geometrijskih odnosa sledi da je $R^2 = r^2 + x^2$, i $\sin \theta = r/R$, pa je konačno:

$$B = \frac{\mu_0 i_k}{2} \frac{r^2}{(r^2 + x^2)^{3/2}} \quad (5.4.4)$$

Dobijen rezultat se može dalje iskoristiti za nalaženje jačine magnetskog polja petlje. Slika 5.9. shematski prikazuje presek petlje dužine ℓ i poluprečnika r . Na central-



S1.5.9. Shematski prikaz preseka petlje.

lnoj osi petlje proizvoljno je odabrana tačka M u kojoj se traži polje. Tačka O obeležava sredinu petlje, a tačke P njenе krajeve na centralnoj osi. Element petlje dx udaljen za x od tačke M može se aproksimirati kružnom strujnom konturom, za koju važi jednačina (5.4.4). U slučaju petlje struja i_k mora biti zamjenjena adekvatnom veličinom koja će opisati jačinu struje kroz element petlje dx . U tom cilju uvodi se linijska gustina struje:

$$s = \frac{i}{\ell}$$

gde je i jačina struje kroz petlju, a ℓ dužina petlje. Struja i_p kroz element petlje dx se sada može izraziti kao:

$$i_p = s dx = \frac{i}{\ell} dx \quad (5.4.5)$$

Element petlje dx , dakle, daje u tački M polje jačine:

$$dB = \frac{\mu_0 i}{2} \frac{r^2}{(r^2 + x^2)^{3/2}} \quad (5.4.6)$$

ili koristeći jednačinu (5.4.5):

$$dB = \frac{\mu_0 i}{2\ell} \frac{r^2}{(r^2 + x^2)^{3/2}} dx \quad (5.4.7)$$

Doprinos jačini polja u tački M svih elemenata petlje dobija se integracijom izraza (5.4.7). Radi lakše integracije uvodi se smena:

$$x = r \operatorname{ctg} \beta$$

koja sledi iz geometrijskih odnosa na slici 5.9. Diferenciranje daje:

$$dx = - \frac{r}{\sin^2 \beta} d\beta$$

Posle izvršene smene i sređivanja izraz (5.4.7) postaje:

$$dB = - \frac{\mu_0 i}{2\ell} \sin \beta d\beta$$

pa će polje u tački M biti jednak:

$$B_M = - \frac{\mu_0 i}{2\ell} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin \beta d\beta$$

ili nakon izvršene integracije:

$$B_M = \frac{\mu_0 i}{2\ell} (\cos \beta_2 - \cos \beta_1) \quad (5.4.8)$$

Uobičajeno je da se izraz (5.4.8) dalje uprosti za izražavanje jačine polja u tački O, jer se u slučaju kada je poluprečnik r znatno manji od njene dužine ℓ , može ugao β_1 aproksimirati sa 180° , a ugao β_2 sa 0° , što daje:

$$B_O = \frac{\mu_0 i}{\ell}$$

Slično, za tačku P na desnom kraju petlje, uz isti uslov $r \ll \ell$, može se ugao β_2 aproksimirati sa 0° , dok je ugao β_1 jednak 90° , pa se za jačinu polja dobija izraz:

$$B_P = \frac{\mu_0 i}{2 l}$$

Za 1.petlju ovakva aproksimacija dovodi do greške od oko 10% kod izračunavanja B_O , i greške od oko 3% kod izračunavanja B_P , dok za drugu petlju uslov $r \ll \ell$ nije ni približno ispunjen.

5.4.3. Brojne vrednosti jačine polja

1.petlja ($r = 3,75$ cm, $\ell = 16$ cm)

Za tačku O razlika kosinusa uglova β_2 i β_1 iznosi:

$$\cos \beta_2 - \cos \beta_1 \approx 1,81$$

pa jednačina (5.4.8) postaje:

$$B_{O1} = 1,81 \frac{\mu_0 i_1}{2 \ell_1} \approx 0,91 \frac{\mu_0 i_1}{\ell_1}$$

Ako se iskoristi i izraz (5.2.11) dobija se jednačina:

$$B_{O1} = 0,91 \frac{\mu_0 u_0}{\ell_1 \omega_1 L_1} \Theta^{-\ell_1 t} \sin \omega_1 t \quad (5.4.9)$$

koja pokazuje kako se u centru 1.petlje menja jačina magnetskog polja.

Za tačke P razlika kosinusa iznosi:

$$\cos \beta_2 - \cos \beta_1 \approx 0,97$$

pa se za B_{P1} dobija:

$$B_{P1} = 0,97 \frac{\mu_0 i_1}{2 \ell_1} \approx 0,49 \frac{\mu_0 i_1}{\ell_1}$$

Dakle, na krajevima 1.petlje jačina magnetskog polja će se menjati prema jednačini:

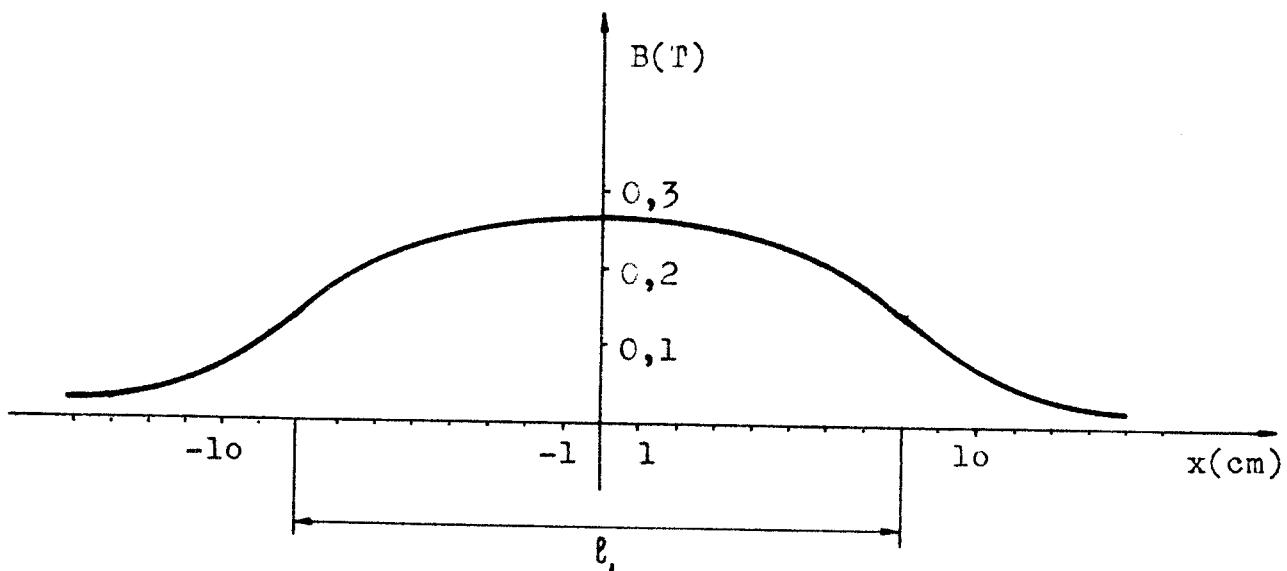
$$B_{P1} = 0,49 \frac{\mu_0 u_0}{\ell_1 \omega_1 L_1} \Theta^{-\ell_1 t} \sin \omega_1 t \quad (5.4.10)$$

Na slici 5.10. prikazana je jačina magnetskog polja 1.petlje, u trenutku $t = T/4$, duž centralne ose.

2.petlja ($r = 3,75$ cm, $\ell = 3$ cm)

Razlika kosinusa uglova β_2 i β_1 za tačku O kod ove petlje iznosi:

$$\cos \beta_2 - \cos \beta_1 \approx 0,74$$



Sl.5.10. Jačina polja duž centralne ose 1.petlje

pa jednačina (5.4.8) daje:

$$B_{02} = 0,74 \frac{\mu_0 i_2}{2 l_2} = 0,37 \frac{\mu_0 i_2}{l_2}$$

U centru 2.petlje jačina magnetskog polja menjaće se prema jednačini:

$$B_{02} = 0,37 \frac{\mu_0 u_0}{l_2 \omega_2 L_2} \bigcirclearrowleft^{-l_2 t} \sin \omega_2 t \quad (5.4.11)$$

Za tačke P razlika kosinusa iznosi:

$$\cos \beta_2 - \cos \beta_1 \approx 0,62$$

pa se slično kao gore dobija:

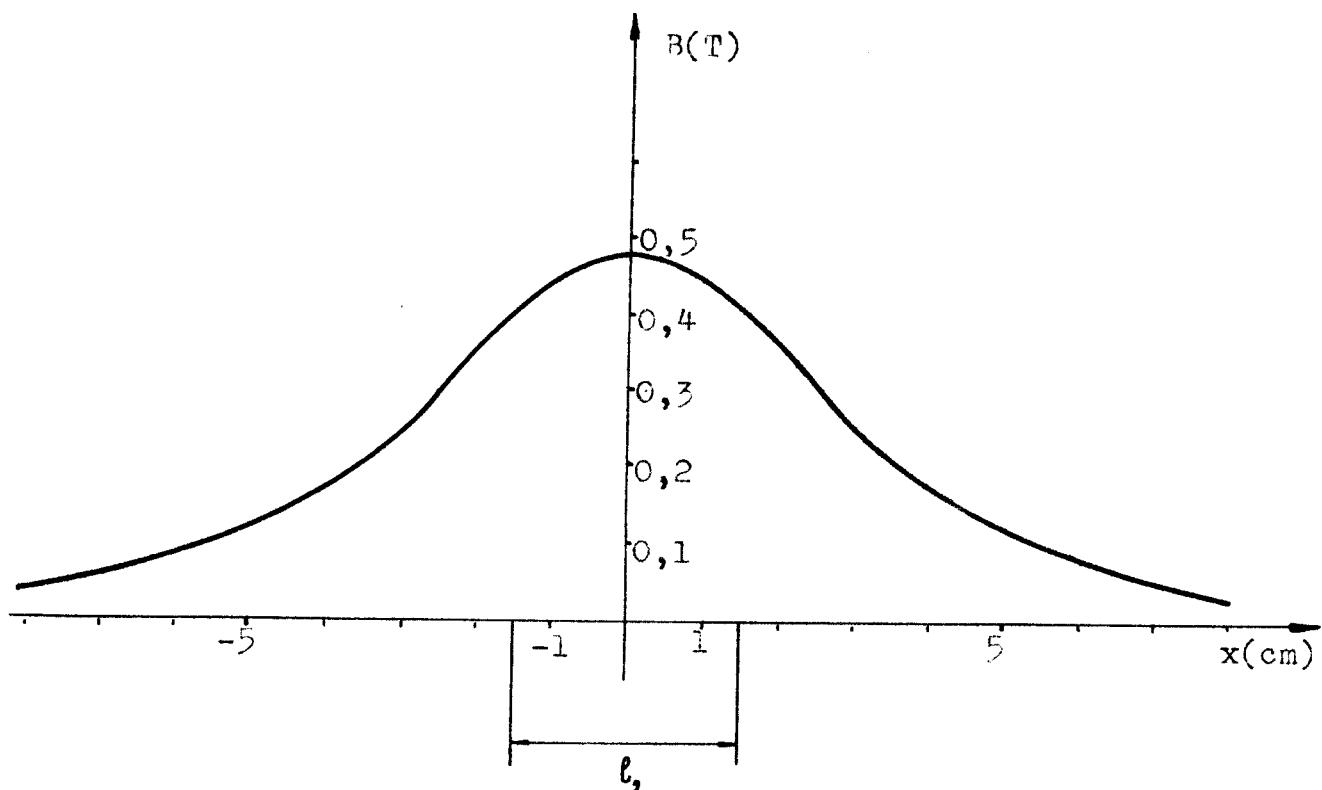
$$B_{P2} = 0,62 \frac{\mu_0 i_2}{2 l_2} = 0,31 \frac{\mu_0 i_2}{l_2}$$

i konačno:

$$B_{P2} = 0,31 \frac{\mu_0 u_0}{l_2 \omega_2 L_2} \bigcirclearrowleft^{-l_2 t} \sin \omega_2 t \quad (5.4.12)$$

Slika 5.11. prikazuje jačinu magnetskog polja 2.petlje, u trenutku $t = T/4$, duž centralne ose.

U tabeli 5.1. su prikazane izračunate vrednosti jačine struje prema jednačini (5.2.11), za obe petlje, u nekim specifičnim trenucima vremena. U istoj tabeli su, prema jed-



Sl.5.11. Jačina polja duž centralne ose 2.petlje.

načinama (5.4.9), (5.4.10), (5.4.11) i (5.4.12), prikazane izračunate vrednosti za jačinu magnetskog polja u centru i na krajevima obe petlje. Na temelju ovih izračunatih vrednosti na slici 5.12. prikazana je promena jačine struje kroz 1.petlju i promena jačine magnetskog polja u centru 1.petlje. Isto je, za drugu petlju, prikazano na slici 5.13. Sve vrednosti su izračunate za početni napon na bateriji kondenzatora od 7 kV, jer su tim naponom i vršena sva eksperimentalna merenja.

5.5. ELEKTRIČNO POLE U UNUTAR PETLJE

5.5.1. Uvod

Promenljivo magnetsko polje, prisutno u prostoru unutar petlje, indukuje i promenljivo električno polje određene jačine. Ovakvo električno polje izaziva, u provodnoj sredini organizma, pojavljivanje struje odredene gustine i frekvencije. Zavisno od njenih karakteristika ta struja će imati, više ili manje, izraženo delovanje na organizam u

$u_0 = 7 \text{ kV}$	1.petlja				2.petlja			
	t(μs)	i(10^4 A)	$B_{01}(\text{T})$	$B_{P1}(\text{T})$	t(μs)	i(10^4 A)	$B_{02}(\text{T})$	$B_{P2}(\text{T})$
T/4	1,06	3,72	0,266	0,143	1,28	3,14	0,487	0,408
3T/4	3,17	-2,97	-0,212	-0,114	3,84	-2,60	-0,404	-0,338
5T/4	5,28	2,38	0,170	0,092	6,39	2,12	0,328	0,275
7T/4	7,39	-1,90	-0,136	-0,073	8,94	-1,79	-0,278	-0,232
9T/4	9,50	1,52	0,109	0,058	11,50	1,48	0,230	0,192
11T/4	11,61	-1,21	-0,087	-0,047	14,08	-1,16	-0,180	-0,151
13T/4	13,72	0,97	0,069	0,037	16,62	1,01	0,157	0,131
15T/4	15,83	-0,78	-0,056	-0,030	19,19	-0,84	-0,131	-0,109
k T/2 k= 0,1,2,...	0	0	0	-	0	0	0	0

Tab.5.1. Jačine struja i magnetskog polja u centru i na krajevima petlji za neke trenutke vremena.

vidu zagrevanja tela, grčenja mišića ili specifičnog delovanja na neke vrste tkiva.

U ovom delu glave će se, na temelju već dobijenih podataka za magnetsko polje petlje, naći izraz po kojem se menja električno polje. Primenom ovog izraza biće izračunate vrednosti za električno polje na nekoj izabranjoj konturi i biće grafički prikazano menjanje jačine električnog polja u vremenu. Na temelju ovih vrednosti biće procenjena maksimalna vrednost gustine struje u telu eksperimentalne životinje.

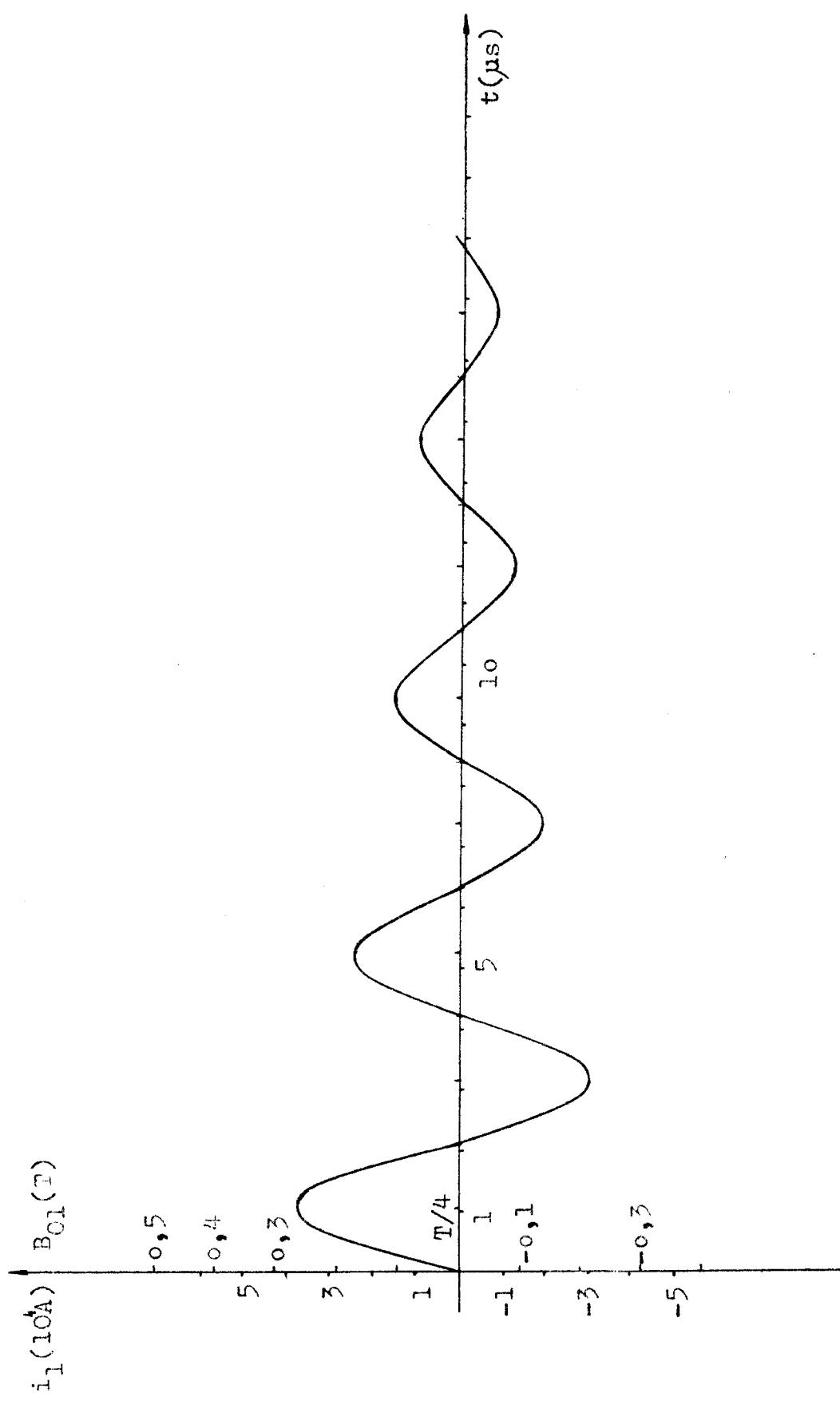
5.5.2. Izraz za jačinu električnog polja

Ako se u izrazu (5.4.8) razlika kosinusa uglova β_2 i β_1 zameni nekom konstantom D, a struja izrazi pomoću jednačine (5.2.11) dobija se:

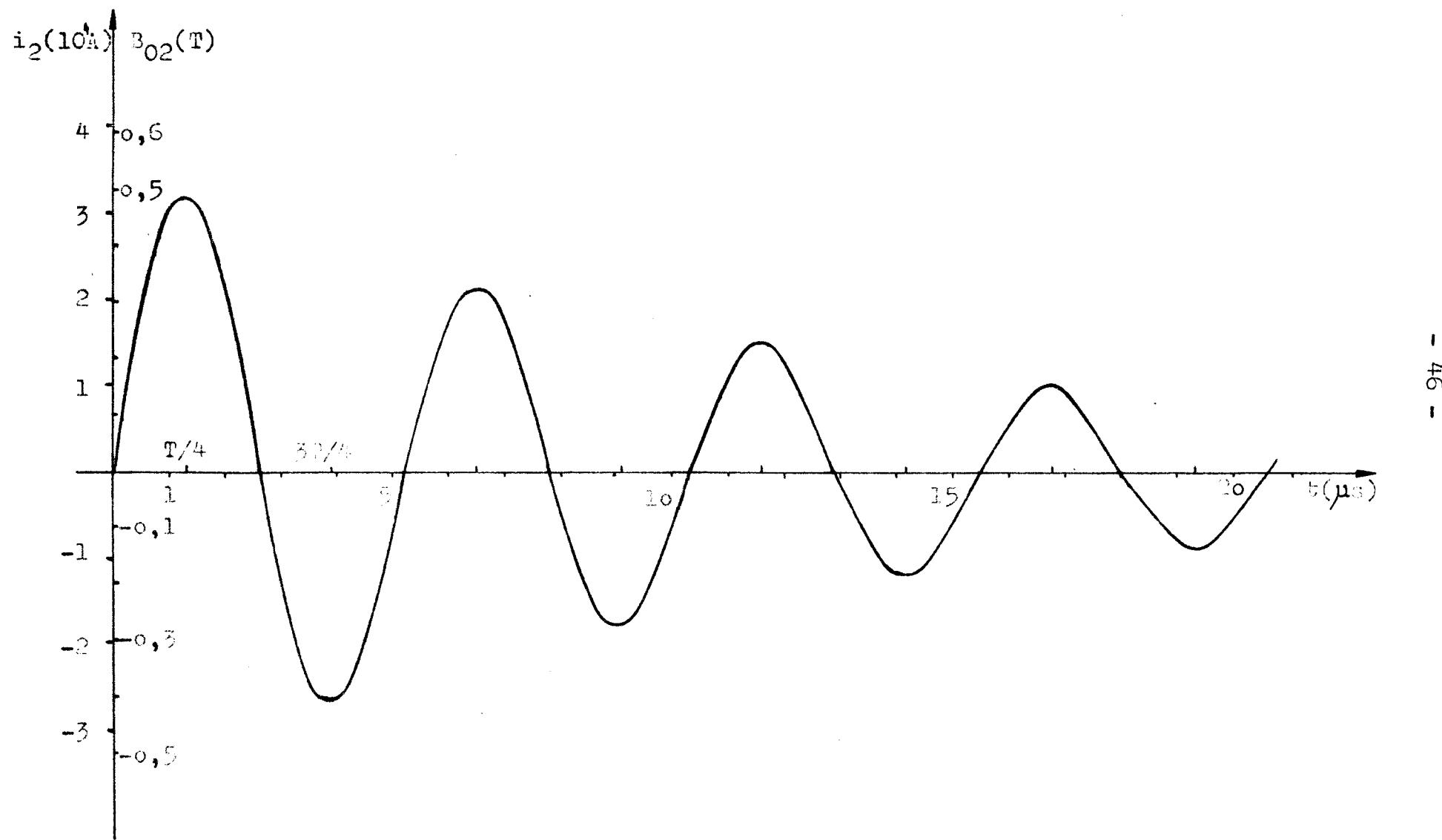
$$B(t) = D \frac{\mu_0 u_0}{2 \ell \omega L} \sin \omega t \quad (5.5.1)$$

što je opšti izraz za vremensku zavisnost jačine korišćenih magnetskih polja.

Veza između promenljivog magnetskog polja i indukovanih električnih polja data je Faradayevim zakonom, čiji je matematički oblik:



Sl.5.12. Promena jačine struje, i magnetskog polja, u centru 1.petlje



Sl.5.13. Promena jačine struje, i magnetskog polja, u centru 2.petlje

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = - \frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (5.5.2)$$

a smisao mu je: Svaka promena magnetskog fluksa, kroz ma koju otvorenu površinu, stvara električno polje duž konture te površine. Izaberemo li za površinu S kruž normalan na centralnu osu petlje, vektor magnetskog polja \vec{B} će u svakoj tački površine $d\vec{S}$ biti kolinearan sa normalom na tu površinu, i ako pretpostavimo da je na svim elementima površine S jačina magnetskog polja jednaka, otpada potreba za integralom na desnjoj strani jednačine (5.5.2). Sem toga, kako se položaj površine S ne menja u toku vremena, može se izvući ispred znaka za diferenciranje. Uz navedene uslove, položaj kružne konture L takođe ostaje nepromenjen u toku vremena, a vektor električnog polja kolinearan sa elementom konture $d\vec{\ell}$, što dozvoljava eliminisanje integrala na levoj strani jednačine (5.5.2), pa se dobija:

$$E(t) L = - S \frac{d}{dt} B(t) \quad (5.5.3)$$

Kako se radi o kružnoj površini, gde je $L = 2r\pi$ i $S = r^2\pi$, jednačina (5.5.3) postaje:

$$E(t) 2r\pi = - r^2\pi \frac{d}{dt} B(t)$$

što posle sređivanja daje:

$$E(t) = - \frac{r}{2} \frac{d}{dt} B(t) \quad (5.5.4)$$

Zamenom $B(t)$, u ovom izrazu, jednačinom (5.5.1) i posle izvršenog diferenciranja dobija se:

$$E(t) = - D \frac{r \mu_0 u_0}{4 \ell \omega L} \bigoplus_{-L}^{+L} (\omega \cos \omega t - \ell \sin \omega t) \quad (5.5.5)$$

što je traženi izraz za jačinu električnog polja.

Električno polje će biti jednak nuli za $t = \infty$ i za

one vremenske trenutke u kojima je izraz u zagradi jednačine (5.5.5) jednak nuli. Ovaj drugi uslov će biti zadovoljen kada je :

$$\omega \cos \omega t = \ell \sin \omega t$$

odnosno:

$$\operatorname{tg} \omega t = \frac{\omega}{\ell}$$

što za t daje vrednosti:

$$t_{E=0} = \frac{1}{\omega} (\operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\omega}{\ell} \pm k\pi) \quad (5.5.6)$$

Ekstremne vrednosti električnog polja dobijaju se na standardni način izjednačavanjem prvog izvoda jednačine (5.5.5) sa nulom. Posle diferenciranja i sređivanja dobija se:

$$\frac{d}{dt} E(t) = - D \frac{r \mu_0 u_0}{4 \ell \omega L} \bigcirclearrowleft^{\omega t} [(\ell^2 - \omega^2) \sin \omega t - 2\ell \omega \cos \omega t] \quad (5.5.7)$$

Gornji izraz jednak je nuli za $t = \infty$ i za one vrednosti t za koje je:

$$\operatorname{tg} \omega t = \frac{2\ell \omega}{(\ell^2 - \omega^2)}$$

što daje za t vrednosti:

$$t_{ext} = \frac{1}{\omega} \left[\operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{2\ell \omega}{(\ell^2 - \omega^2)} \pm k\pi \right] \quad (5.5.8)$$

5.5.3. Brojne vrednosti jačine električnog polja

1.petlja

Pošto je $k\pi/\omega_1 = kT_1/2$ i kako su od interesa samo trenuci vremena veći od nule jednačina (5.5.6) za 1.petlju postaje:

$$t_{E=0} = \frac{1}{\omega_1} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\omega_1}{\ell_1} + k \frac{T_1}{2}$$

Nakon zamene brojnih vrednosti dobija se:

$$t_{E=0} = (1,01 \cdot 10^{-6} + k \frac{T_1}{2}) \text{ s} \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

Slično se, prema jednačini (5.5.8), dobija za trenutke vremena u kojima $E(t)$ ima ekstremne vrednosti:

$$t_{ext} = (-0,096 \cdot 10^6 + k \frac{T_1}{2}) \text{ s} \quad k = 1, 2, \dots$$

Ekstremne vrednosti jačine električnog polja date su u tabeli 5.2. za obe petlje.

2.petlja

Analognim postupkom, kao kod 1.petlje, se za trenutke vremena u kojima je $E(t) = 0$ dobija:

$$t_{E=0} = (1,23 \cdot 10^6 + k \frac{T_2}{2}) \text{ s} \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

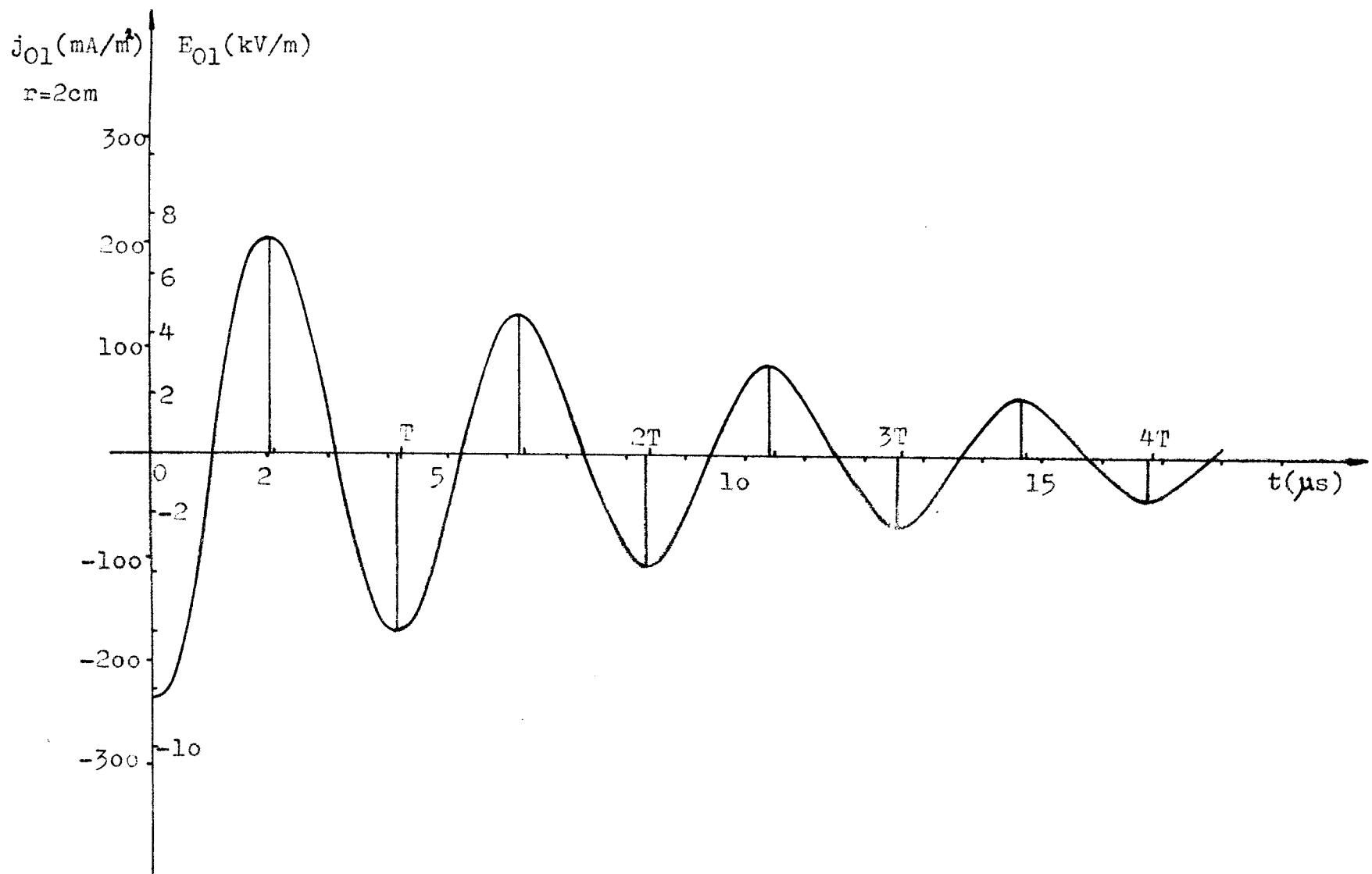
a za trenutke vremena u kojima $E(t)$ ima ekstremne vrednosti:

$$t_{ext} = (-0,086 \cdot 10^6 + k \frac{T_2}{2}) \text{ s} \quad k = 1, 2, \dots$$

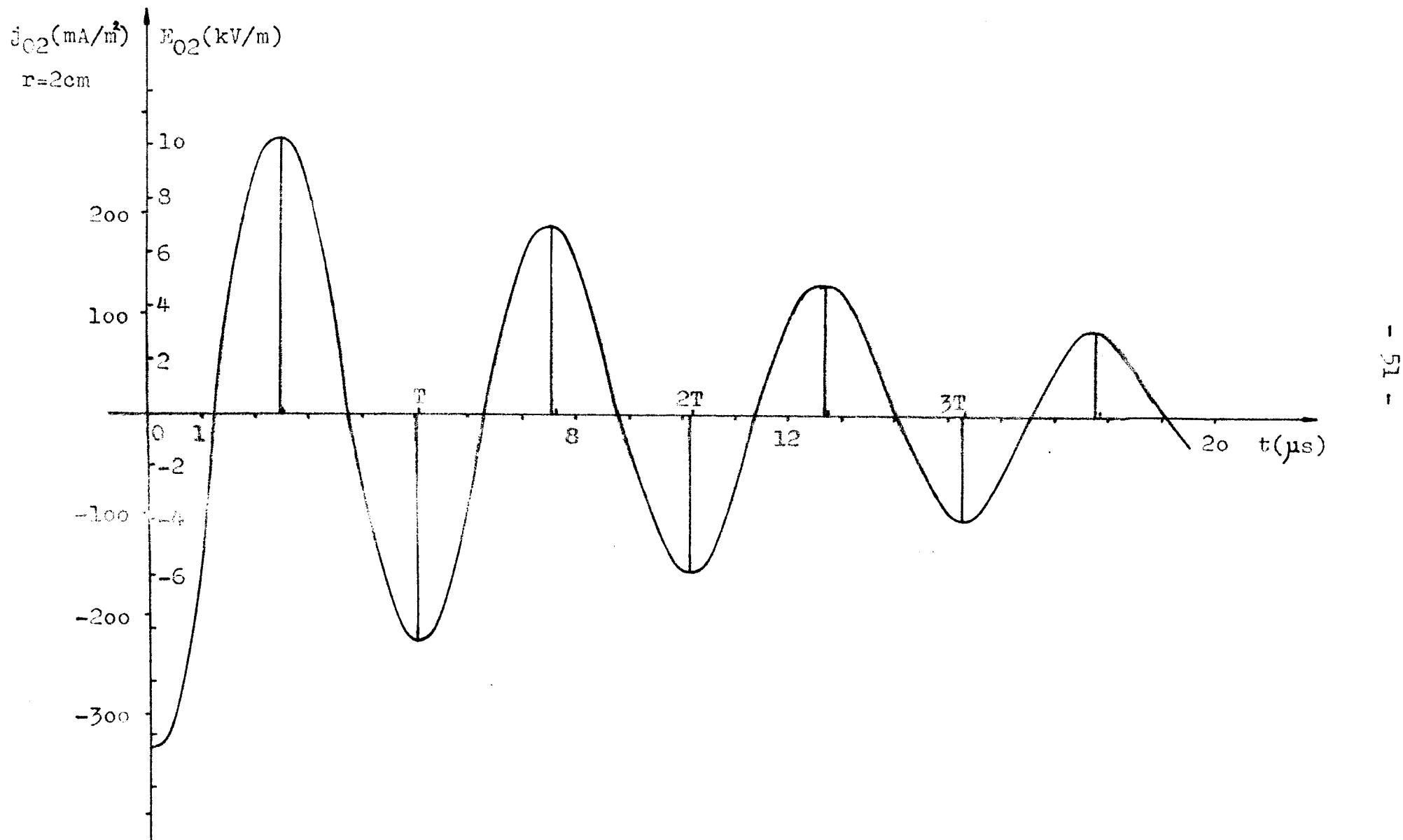
Za konturu najvećeg poluprečnika, tj. poluprečnika petlje $r = 3,75 \text{ cm}$, date su u tabeli 5.2. izračunate vrednosti za jačinu električnog polja u centru i na krajevima 1. i 2.petlje. Grafički prikaz promene jačine električnog polja za 1.petlju dat je na slici 5.14., a za 2.petlju na slici 5.15.

$u_o = 7 \text{ kV}$				$r = 3,75 \text{ cm}$			
1.petlja				2.petlja			
$t = -0,096 \cdot 10^6 + kT_1/2$				$t = -0,086 \cdot 10^6 + kT_2/2$			
k	t(μs)	$E_{01}(\text{kV/m})$	$E_{P1}(\text{kV/m})$	k	t(μs)	$E_{02}(\text{kV/m})$	$E_{P2}(\text{kV/m})$
-	0	-8,27	-4,45	-	0	-12,32	-10,32
1	2,01	7,27	3,91	1	2,47	10,35	8,66
2	4,12	-5,32	-3,13	2	5,02	-8,41	-7,15
3	6,23	4,65	2,50	3	7,57	7,06	5,93
4	8,34	-3,72	-2,00	4	10,13	-5,85	-4,91
5	10,50	2,95	1,59	5	12,71	4,84	4,05
6	12,57	-2,38	-1,28	6	15,26	-4,01	-3,36
7	14,68	1,90	1,02	7	17,81	3,32	2,74
8	16,79	-1,51	-0,81	8	20,35	-2,76	-2,31

Tab.5.2. Lokalne ekstremne vrednosti jačine električnog polja za obe petlje.



Sl.5.14. Promena električnog polja, i gustine struje, na centralnoj konturi 1.petlje.



Sl.5.15. Promena električnog polja, i gustine struje na centralnoj konturi 2.petlje.

5.5.4. Gustine struja

Električno polje u provodnoj sredini izaziva kretanje slobodnih nosilaca nanelektrisanja, odnosno izaziva električnu struju gustine:

$$j(t) = \sigma E(t) \quad (5.5.9)$$

gde je σ specifična provodnost sredine.

Unutrašnjost petlje nije u potpunosti ispunjena provodnom sredinom, jer eksperimentalna životinja zauzima samo deo prostora unutar petlje. Približno se može uzeti da najveća kontura, koja leži u provodnoj sredini, ima poluprečnik $r = 2$ cm. Sve gore navedene vrednosti za jačinu električnog polja, na najvećoj konturi od $r = 3,75$ cm, lako je prevesti na ovu manju konturu množenjem sa faktorom 0,533.

Približno uzeta srednja vrednost za specifičnu provodnost organizma je:

$$\sigma_s = 5 \cdot 10^5 \Omega^{-1} m^{-1}$$

Pomoću jednačine (5.5.9) sada je lako naći približnu vrednost gustine struje u telu eksperimentalne životinje. Za $t = 0$, kada $E(t)$ ima najizrazitiju ekstremnu vrednost, gustina struje za 1. i 2. petlju na centralnoj konturi iznosi:

$$j_{01} = -228 \frac{mA}{m^2} \quad j_{02} = -322 \frac{mA}{m^2}$$

Cvo su maksimalne vrednosti gustine struje u telu eksperimentalne životinje, jer je za njihovo izračunavanje upotrebljena kontura najvećeg poluprečnika, velika približna srednja vrednost specifične provodnosti i najizrazitija ekstremna vrednost za jačinu električnog polja. Na ordinatama slika 5.14 i 5.15. nanesene su i vrednosti za gustinu struje, na konturi poluprečnika 2 cm u centru petlje.

Struje izračunatih gustina takođe proizvode magnetsko polje. Međutim, kako je to polje znatno slabije od magnetskog polja petlje, nije potrebno vršiti nikakvu korekciju na vrednostima polja unutar petlje.

Pošto se radi o frekvencijama većim od 10^5 Hz interesantno je oceniti u kojoj meri će biti izražen skin-efekt

kod proticanja struje. Opšta teorija skin-efekta daje jednačinu:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\mu \omega \sigma}} \quad (5.5.10)$$

za dubinu prodiranja struje u provodnoj sredini. Prema ovoj jednačini osnovni deo struje teče u površinskom sloju debljine Δ , jer je na ovoj dubini strujna gustina e puta manja od strujne gustine na površini provodnika. Za slučaj obe petlje može se uzeti približno: $\mu \approx \mu_0$, $\sigma \approx 5 \cdot 10^5 \text{ S/m}^2$ i $\omega \approx 1,5 \cdot 10^6 \text{ rad/s}$, što za Δ daje:

$$\Delta \approx 15 \text{ m}$$

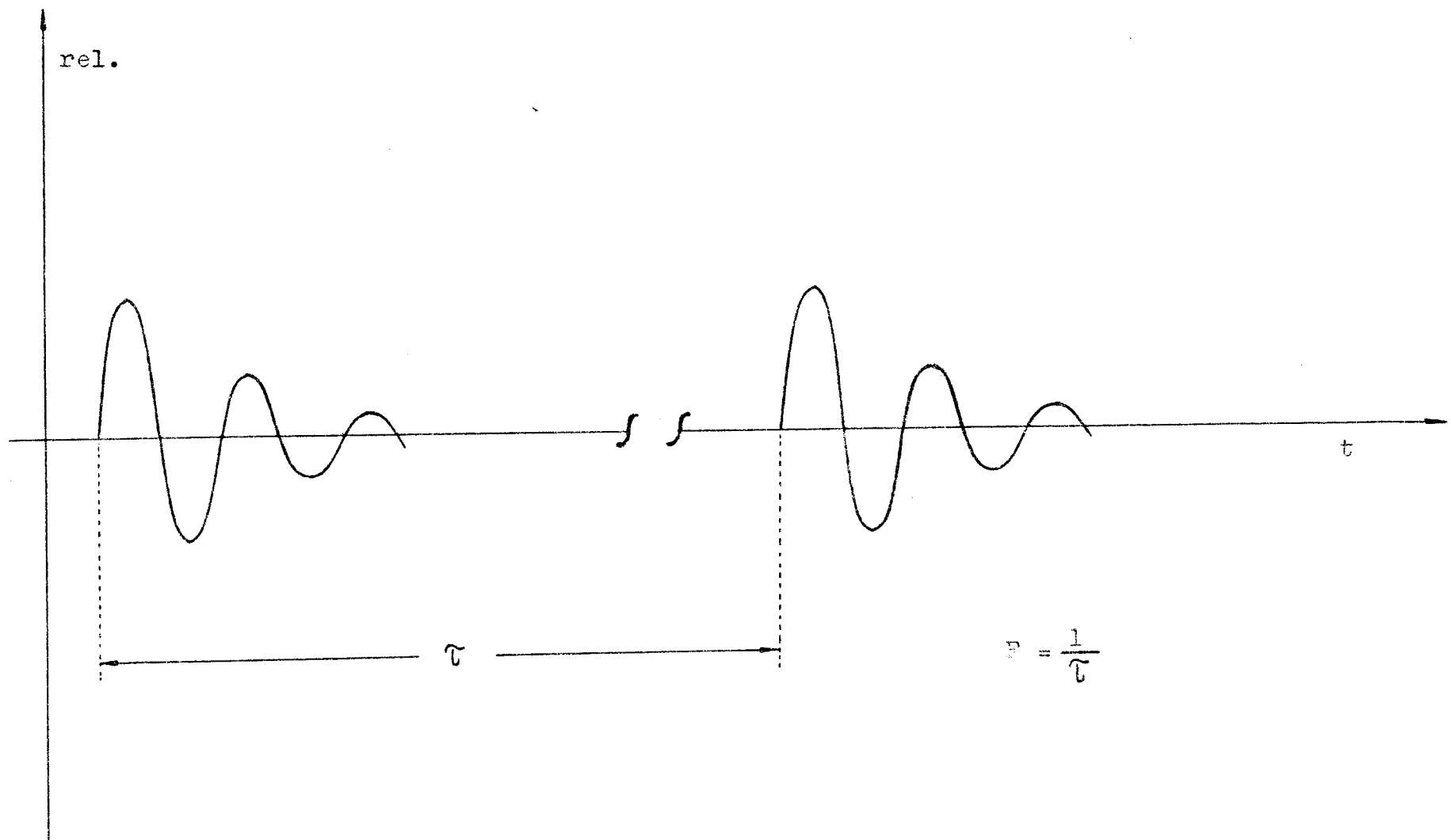
Dakle u telu eksperimentalne životinje, skin-efekt nije posebno izražen.

5.6. OPŠTE KARAKTERISTIKE PCLJA

Do sada su bile analizirane karakteristike samo jednog impulsa, tj. polja koje nastaje prigušenim oscilovanjem kola. Tokom ovih oscilacija baterija kondenzatora se isprazni, pa se visokonaponskim izvorom ponovo puni do izabranog napona, kako bi se omogućilo novo pražnjenje. Brzina punjenja baterije kondenzatora, odnosno vreme do ponovnog pražnjenja može da se reguliše varijakom na slici 3.4. Dakle, životinja je izložena polju koje ima opšte karakteristike prikazane na slici 5.16. Naravno odnosi na slici nisu realni jer vreme T iznosi nekoliko sekundi, a prigušene oscilacije, kako je već nadeno, traju oko 25 us. Uz vreme T između dva impulsa može se definisati i frekvencija pražnjenja kao:

$$F = \frac{1}{T}$$

Ove veličine su menjane tokom rada, pa će njihove vrednosti biti prikazane uz pojedine grupe rezultata.



$$\tau = \frac{1}{\omega}$$

Sl. 5.16. Opšte karakteristike polja

6. R E Z U L T A T I I D I S K U S I J A

6.1.UVOD

Da bi se, u dužem rādu, ispitala pouzdanost svih komponenti uređaja izvršena je serija merenja na manjoj grupi od 4 eksperimentalne životinje. U toj probnoj seriji merenja rešeno je više praktičnih detalja, kao npr. način pričvršćivanja životinje, raspored elemenata radi lakšeg manipulisanja itd. Korišćeno je elektromagnetsko polje koje daje 1. petlja uz napon na bateriji kondenzatora od 7 kV, a isprobana su polja različitih frekvencija ponavljanja impulsa radi utvrđivanja granice preopterećenosti uređaja. Naime, kod dužeg rada (60 minuta i više) uređaja i pri višim frekvencijama ponavljanja impulsa (0,5 Hz i više) dolazi do velikog zagrevanja zaštitnog otpora R i varijaka u visokonaponskom izvoru. Već kod ovog probnog ispitivanja uočeno je smanjivanje frekvencije srca eksperimentalnih životinja izloženih polju.

Kao što se vidi postojala je mogućnost izbora više parametara kojima su opšte karakteristike polja određene, i to:

- a) izbor petlje - čime je određena jačina, oblik i frekvencija f polja i trajanje jednog impulsa (1. ili 2.petlja)
- b) izbor napona na bateriji kondenzatora kod kojeg dolezi do pražnjenja - čime je određena jačina električnog i magnetskog polja.
(u granicama od 0 do 65 kV)
- c) izbor frekvencije ponavljanja impulsa F
(u granicama od 0 do nekoliko Hz u zavisnosti od b i d)
- d) izbor dužine izlaganja životinje impulsnom polju
(u granicama od 0 do više časova u zavisnosti od b i c)

Uredaj, dakle, ima širok spektar mogućnosti generisanja elektromagnetskog polja opisanog tipa. Kako je u ovom radu planirano, da se izvrše dve serije merenja sa po 12 životinja, nije bilo potrebe za promenom svih navedenih parametara. Tako su obe serije merenja uradene pomoću 2.petlje i napona na bateriji kondenzatora od 7 kV. Uz rezultate koji su prikazani u dve grupe (I i II grupa rezultata), sve izabrane vrednosti parametara su tačno navedene.

6.2.OVIS MERENJA

Kao eksperimentalne životinje korišćeni su laboratorijski pacovi, i to: 4 pacova soja "Mill-Hill-Hooded", u tabelama označeni rednim brojevima od 1. do 4., i 8 pacova soja "Wistar" označenih rednim brojevima od 5. do 12. Za čitavo vreme trajanja eksperimenta pacovi su držani u standarnim kavezima, a hrani su briketima. Svi pacovi su bili označeni, zadržavajući tako svoj redni broj tokom čitavog trajanja eksperimenta.

Merenje je provedeno na životinjama narkotisanim Uretanom, 1 cm³ (10%) na 100 grama telesne težine, datim intraabdominalno.

Nakon 15 do 20 minuta izvršeno je pričvršćivanje životinje na opisanu plastičnu ploču. Električni kontakt sa ekstremitetima je ostvaren potkožnim ubodanjem igala, dok je mehaničko fiksiranje ekstremiteta izvršeno lepljivom trakom.

Odmah po pričvršćivanju snimljen je EKG sa svih šest perifernih odvoda. Za vreme trajanja polja sniman je samo II odvod, na kraju kraćih vremenskih intervala, u trajanju od 15 do 20 sekundi. Ova snimanja zahtevala su kraće isključivanje polja i uspostavljanje veze između dovodnih kablova i EKG-uredaja. Isto tako registrovan je EKG tokom narednih 60 minuta, po prestanku polja.

Pomoću snimaka iz drugog odvoda, napravljenih za vreme trajanja polja i tokom 60 minuta nakon prestanka dejstva polja, izvršeno je određivanje srčane frekvencije na sledeći način.

Uzme li se u obzir da je brzina kretanja trake 50 mm/s, i ako se izmeri dužina D(mm), koju na traci zauzima dešet otkucaja, kao na slici 2.3., iz jednostavne proporcije sledi jednačina za izračunavanje broja otkucaja u minutu:

$$n \left(\frac{\text{otk}}{\text{min}} \right) = \frac{30\ 000}{D(\text{mm})} \quad (6.2.1)$$

Greška koja se čini ovakvim izračunavanjem srčane frekvencije je relativno mala, i iznosi oko 0,5%.

EKG-snimci sa svih šest perifernih odvoda poslužili su za određivanje položaja i veličine QRS-vektora, pre i posle delovanja polja. Pored toga na njima je kontrolisana dužina trajanja intervala između elemenata EKG-snimka.

Tokom I i II serije merenja, u više navrata, vršeno je kontrolno merenje. Ostvareni su isti eksperimentalni uslovi s tim izuzetkom što polje nije uključivano. Kod svih kontrolnih merenja frekvencija srca je ostajala približno konstantna, eventualno uz veoma blage i spore promene, koje nikad nisu prelazile 2%. U svim snimanim odvodima nije dolazilo do gotovo nikakvit promena, što znači da je i QRS-vektor ostao nepromjenjen po intenzitetu i smeru.

6.3. I GRUPA REZULTATA

6.3.1. Opšte napomene

Kod ove serije merenja upotrebljena je 2.petlja, napon na bateriji kondenzatora iznosio je $u_0 = 7 \text{ kV}$, vreme između dva impulsa je podešeno na $\bar{T} = 5 \text{ s}$, tj. frekvencija ponavljanja impulsa je bila $F = 0,2 \text{ Hz}$, dok je ukupno trajanje polja iznosilo 60 minuta.

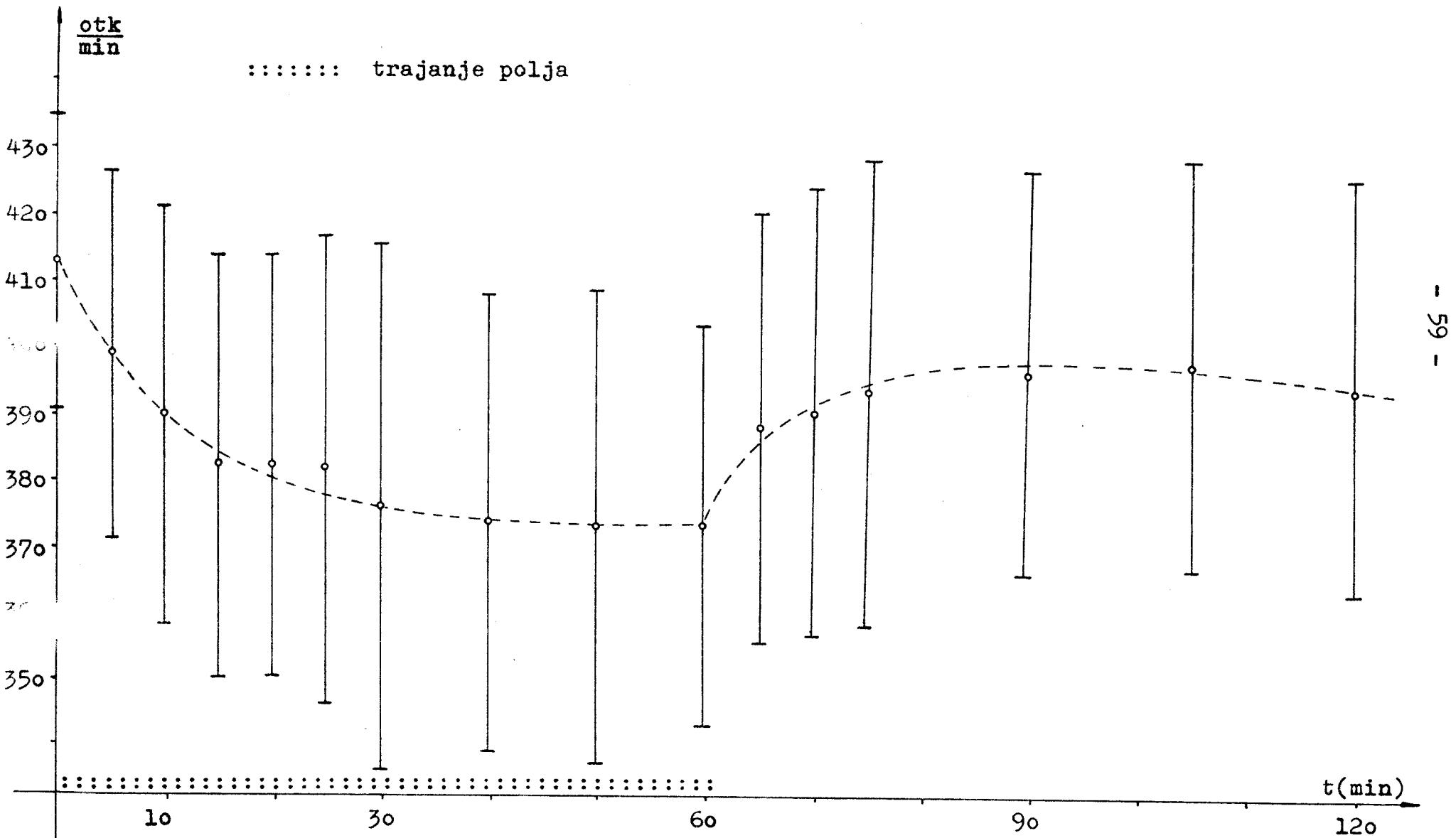
Frekvencija srca je za vreme trajanja polja merena na kraju vremenskih intervala od: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 i 60 minuta od uključivanja polja. Posle isključivanja polja merena je frekvencija srca još 60 minuta na kraju vremenskih intervala od: 5, 10, 15, 30, 45 i 60 minuta.

6.3.2. Frekvencija srca

Izmjerene vrednosti za frekvenciju srca prikazane su u tabeli 6.1. Na dnu tabele je za svaki vremenski interval data srednja vrednost frekvencije srca i standardna devijacija. Promena srednjih apsolutnih vrednosti u vremenu data je

VРЕМЕ (min)	ЗА ВРЕМЕ ПОЛЈА										ПОСЛЕ ПОЛЈА								
	0	5	10	15	20	25	30	40	50	60	5	10	15	30	45	60			
бр. зив.	F	R	E	K	V	E	N	C	I	J	A	S	R	C	A	(отк/мин)			
1	400	375	353	343	345	341	335	345	337	337	341	351	357	378	357	362			
2	422	403	368	355	343	331	328	330	335	345	355	382	419	435	422	405			
3	435	408	392	422	425	405	403	403	432	400	435	435	435	432	419	411			
4	419	419	417	417	411	419	422	411	414	395	405	419	425	408	417	417			
5	428	428	428	417	417	417	417	411	403	403	432	419	425	417	422	417			
6	435	432	428	417	428	408	400	389	382	408	392	395	392	385	392	385			
7	362	345	345	337	353	419	362	357	353	357	364	353	347	353	353	349			
8	425	387	373	366	368	403	375	375	375	385	368	373	366	375	366	362			
9	387	357	351	347	343	330	313	309	318	314	349	324	331	343	353	349			
10	435	429	422	423	421	395	392	395	417	405	432	428	428	428	425	433			
11	422	414	419	389	385	375	428	411	364	373	378	400	400	428	425	425			
12	403	398	392	385	375	357	353	349	353	353	411	408	405	405	411	400			
ср. ред.	314,4	399,5	390,7	383,1	382,5	381,6	376,5	373,7	373,5	372,9	388,5	390,5	394,1	397,4	397,9	394,1			
ст. дев.	22,5	28,4	32,0	32,4	32,2	35,9	40,5	35,1	36,6	31,2	33,0	34,4	35,5	31,0	31,9	32,1			

Tab.6.1. Апсолутне вредности фреквеније срца на крају датих интервала времена.



S1.6.1. Promena srednje absolutne frekvencije srca u vremenu.

na slici 6.1. Isprekidanom linijom označena je kriva oko koje se grupišu srednje vrednosti.

Početna vrednost frekvencije srca je individualna karakteristika svake životinje i kao što je vidljivo iz podataka, u ovom primeru se kreće u rasponu od 362 do 435 otk/min, sa srednjom vrednošću 414,4. Time se u izračunavanje standarde devijacije unosi i ova individualna razlika, pa samim tim standardna devijacija na predstavlja samo meru rasturanja od srednje vrednosti pod dejstvom polja, već sadrži i spomenutu komponentu rasturanja od srednje vrednosti usled individualnih razlika. Iz tog razloga su sve početne vrednosti frekvencije srca svedene na zajedničku vrednost, tj. izračunate su relativne vrednosti frekvencije srca, date u tabeli 6.2. I ovde su na dnu tabele, date srednje vrednosti uz pripadajuće standarde devijacije. Na slici 6.2. prikazana je promena srednjih relativnih vrednosti frekvencije srca tokom vremena.

Za vreme trajanja polja uočljivo je opadanje srednje vrednosti frekvencije srca, koje je nešto brže u početku, i već za 15 minuta dostiže 7,6%. Opadanje frekvencije se nastavlja nešto sporije tako da u 60-toj minuti ima najveću vrednost od 10 %. Prestankom delovanja polja frekvencija srca raste, ponovo nešto brže u početku, i nakon 60 minuta još uvek ne dostiže početnu vrednost.

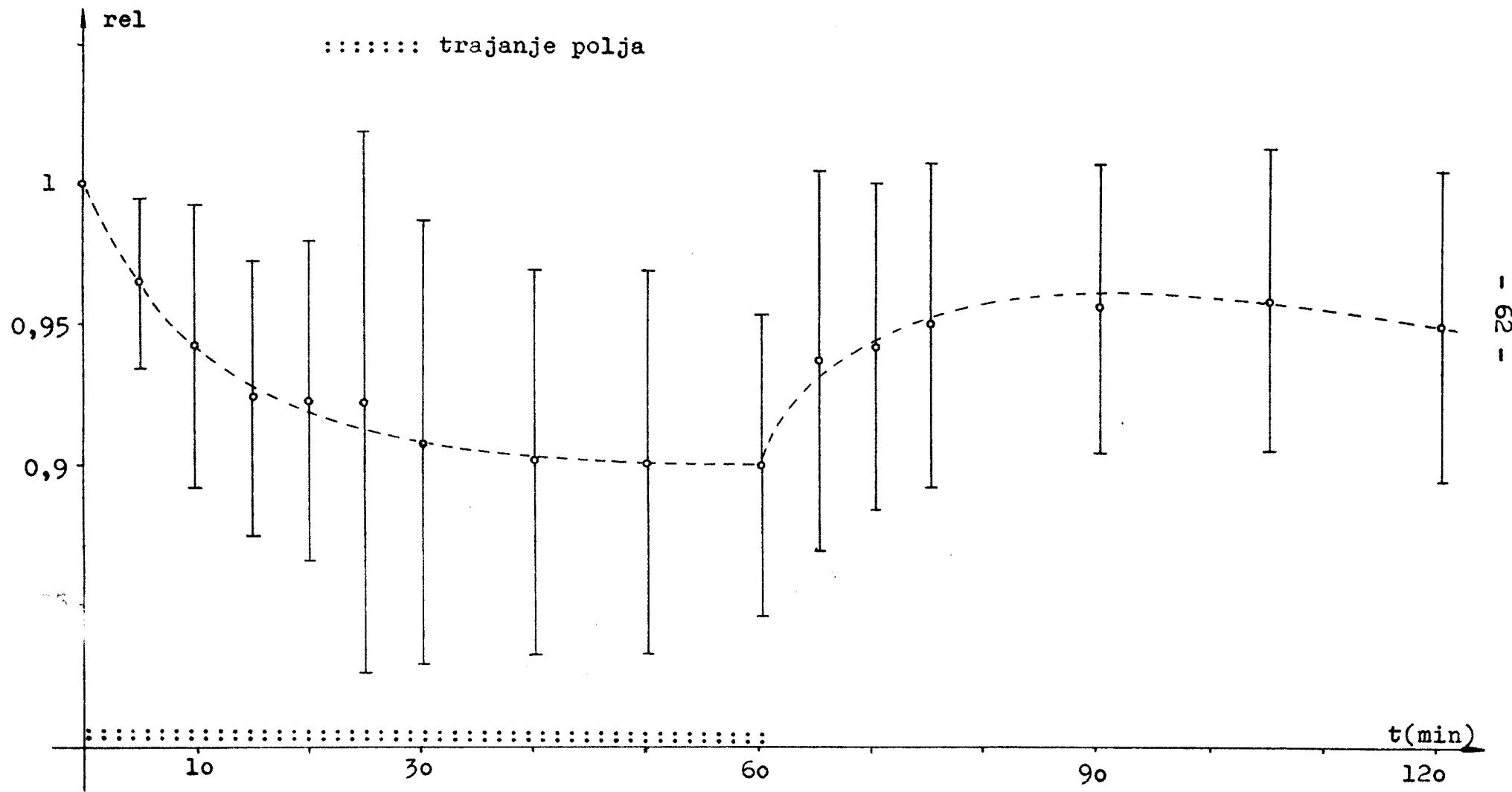
Promene frekvencije srca kod pojedinih životinja najčešće se razlikuju od prikazane promene srednje vrednosti. Smanjivanje frekvencije srca za vreme delovanja polja i njeno povećanje po prestanku delovanja je prisutno uglavnom kod svih životinja, ali se te promene odvijaju na različite načine. Dva primera su data na slici 6.3. Jasno su vidljive individualne razlike u ređovanju na polje. Ove razlike dovele su do relativno velike standardne devijacije.

6.3.3. QRS-vektor i trajanje intervala

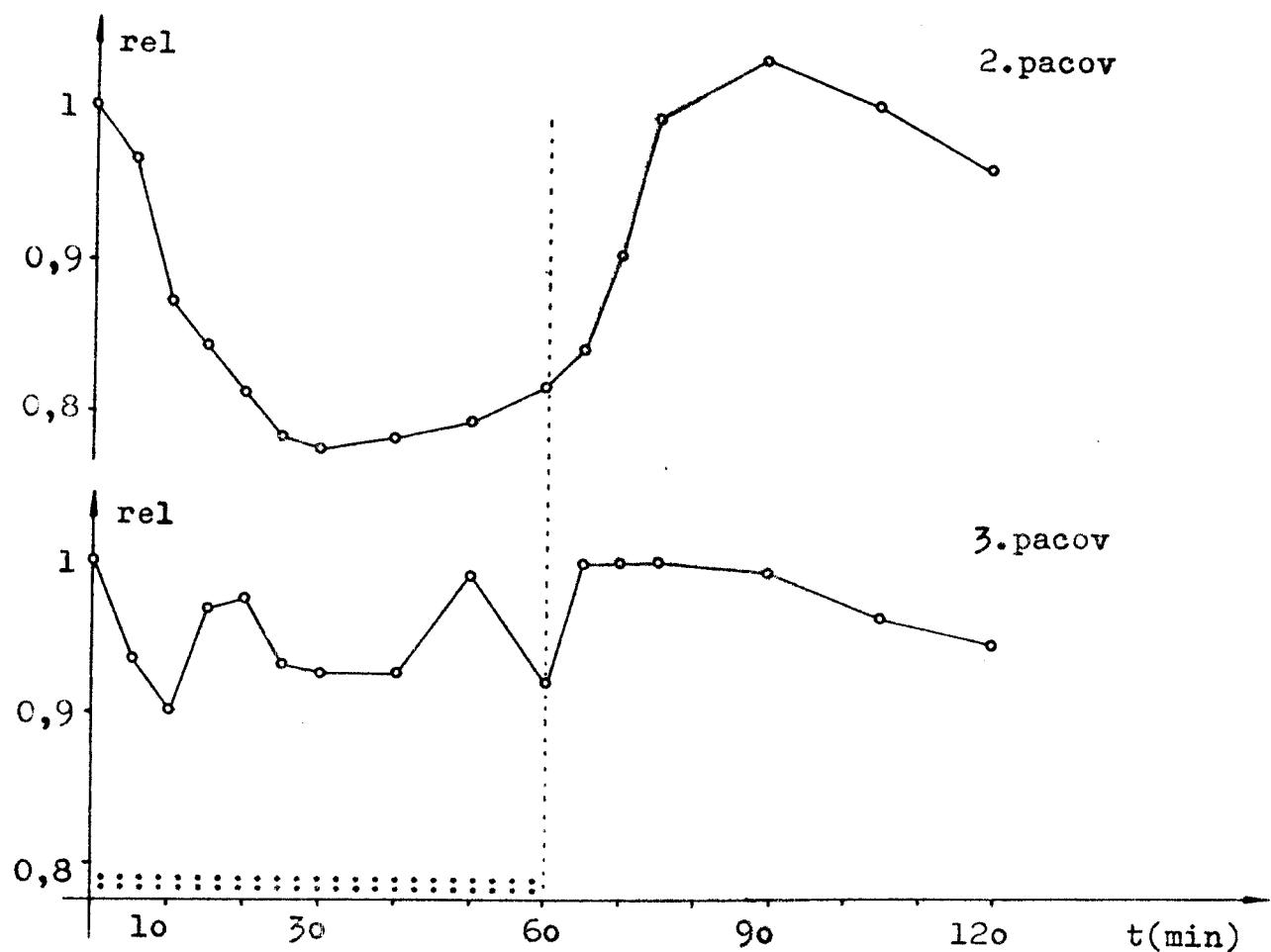
Prema izmerenoj voltaži QRS-kompleksa u I, II i III odvodu, za svaku životinju posebno, konstruisan je QRS-vektor pre i posle delovanja polja. U tabeli 6.3. date su izmerene vrednosti za uglove, njihove razlike i relativne intenzitete QRS-vektora. Pozitivna razlika uglova označava da je, za vreme delovanja polja, QRS-vektor zakrenut u pozitivnom smeru, tj. u smeru kazaljke na časovniku, za navedeni broj stepeni.

VRIJEME (min)	ZA VREMENJE POLJA										POSLE POLJA						
	0	5	10	15	20	25	30	40	50	60	5	10	15	30	45	60	
br. šiv.	RELATIVNA					FREKVENCija					SRCA						
1	1	0.938	0.883	0.858	0.863	0.852	0.838	0.863	0.843	0.843	0.852	0.878	0.893	0.945	0.893	0.905	
2	1	0.966	0.872	0.842	0.813	0.785	0.777	0.782	0.794	0.818	0.842	0.905	0.993	1.031	1.000	0.960	
3	1	0.938	0.901	0.970	0.977	0.931	0.927	0.927	0.994	0.920	1.000	1.000	1.000	0.994	0.964	0.945	
4	1	1.000	0.995	0.995	0.980	1.000	1.005	0.980	0.987	0.944	0.966	1.000	1.014	0.975	0.995	0.995	
5	1	1.000	1.000	0.975	0.975	0.975	0.975	0.960	0.943	0.943	1.009	0.979	0.994	0.975	0.985	0.975	
6	1	0.993	0.986	0.958	0.986	0.938	0.920	0.895	0.878	0.938	0.901	0.908	0.901	0.885	0.901	0.885	
7	1	0.954	0.954	0.932	0.975	1.156	1.000	0.986	0.976	0.986	1.005	0.975	0.958	0.976	0.976	0.964	
	1	0.911	0.878	0.862	0.866	0.949	0.883	0.883	0.883	0.906	0.866	0.878	0.862	0.883	0.862	0.852	
9	1	0.923	0.907	0.897	0.886	0.853	0.809	0.798	0.822	0.811	0.902	0.838	0.855	0.886	0.913	0.902	
10	1	0.984	0.970	0.927	0.915	0.908	0.878	0.908	0.958	0.931	0.994	0.984	0.984	1.006	1.000	1.006	
11	1	0.980	0.994	0.922	0.913	0.841	1.016	0.974	0.863	0.884	0.896	0.948	0.948	0.948	1.016	1.031	
12	1	0.988	0.972	0.955	0.930	0.885	0.876	0.866	0.876	0.876	1.019	1.012	1.003	1.003	1.019	0.993	
sred vred		1.000	0.964	0.943	0.924	0.923	0.921	0.908	0.902	0.901	0.900	0.938	0.942	0.951	0.959	0.960	0.951
st. dev.		0.000	0.029	0.050	0.049	0.057	0.096	0.079	0.068	0.068	0.055	0.067	0.058	0.057	0.051	0.054	0.055

Tab.6.2. Relativne frekvencije srca izračunate prema tabeli 6.1.



Sl.6.2. Promena srednje relativne vrednosti frekvencije srca u vremenu.



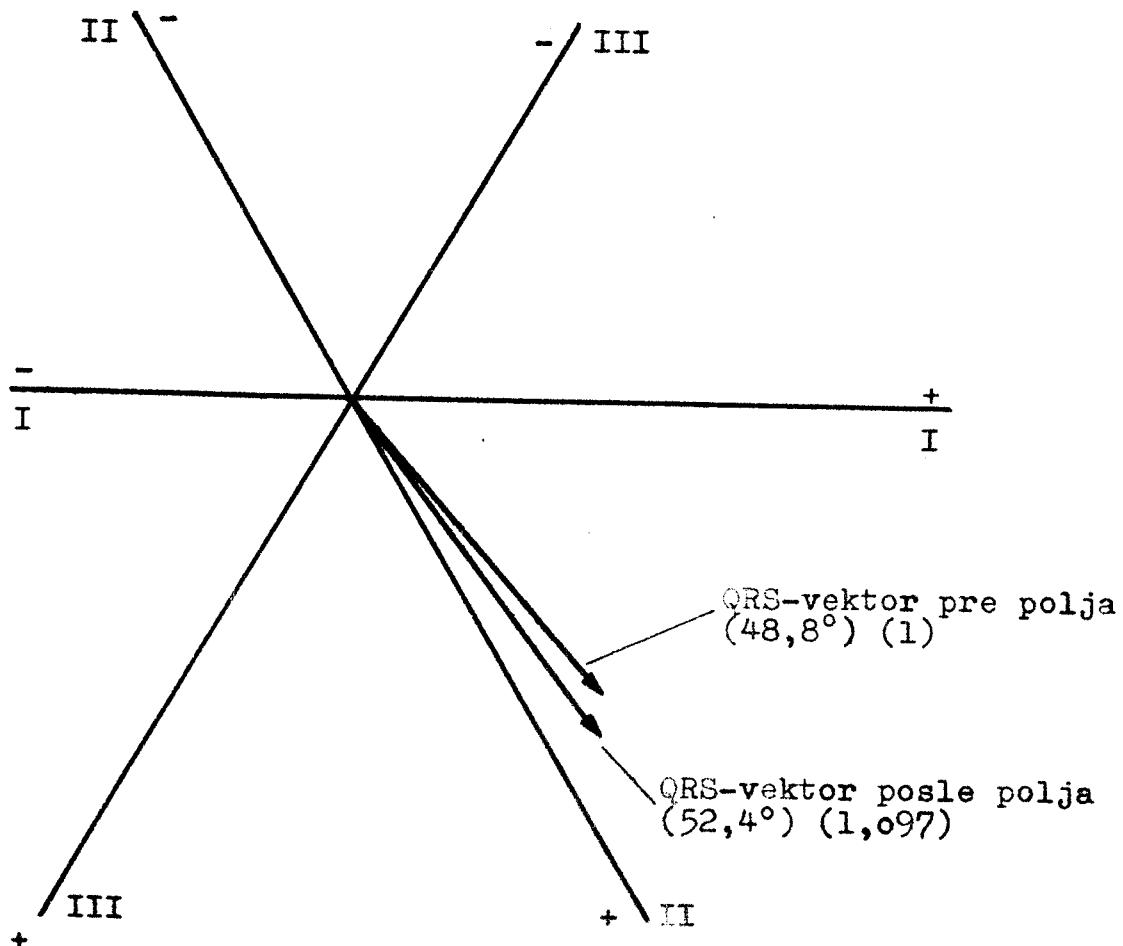
Sl.6.3. Dva primera različitog individualnog reagovanja na dejstvo polja.

Broj život.	$\triangle QRS$ pre polja	$\triangle QRS$ posle polja	$\Delta \triangle$	rel.int. pre polja	rel.int. posle polja
1	23°	40°	$+17^\circ$	1	1,15
2	75°	75°	0°	1	1,00
3	46°	46°	0°	1	1,00
4	55°	55°	0°	1	1,00
5	38°	40°	$+2^\circ$	1	1,16
6	-14°	11°	$+25^\circ$	1	1,15
7	81°	83°	$+2^\circ$	1	0,89
8	51°	52°	$+1^\circ$	1	1,09
9	45°	45°	0°	1	1,44
10	52°	61°	$+9^\circ$	1	1,27
11	82°	69°	-13°	1	1,02
12	52°	52°	0°	1	1,00
srednja vred.	$48,8^\circ$	$52,4^\circ$	$+3,58^\circ$	1	1,097
stand. devij.	-	-	$9,54^\circ$	-	0,149

Tab.6. Uglovi i relativni intenziteti QRS-vektora pre i posle dejstva polja.

Konstrukciji QRS-vektora pomoću tri odvoda (koordinatne ose) prišlo se radi veće tačnosti, pa se najčešće dešavalo da se sve tri koordinate za vrh vektora ne podudaraju, kao što je to slučaj na slici 2.11.b. Tako su se umesto jedne tačke, dobijale tri, čineći mali trougao. U takvom slučaju izvršeno je grafičko usrednjavanje, pa je za vrh vektora birana tačka u centru trougla. Prosečna veličina trougla mogla je poslužiti i za procenu greške u određivanju ugla i intenziteta vektora, pa se može reći da je prosečna relativna greška oko 10 %.

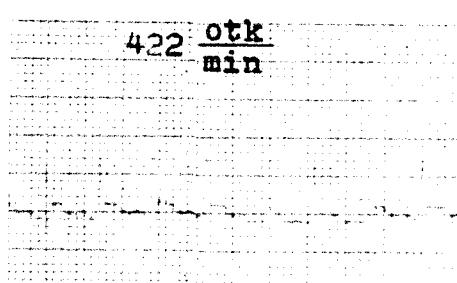
Na osnovu podataka iz tabele 6.3. izračunate su srednje vrednosti za ugao i intenzitet QRS-vektora pre i posle polja i prikazane na slici 6.4. Ako se uzmu u obzir izračunate standardne devijacije i prethodno izneta napomena o prosečnoj veličini relativne greške, veoma je nezahvalno na osnovu slike 6.4. donositi zaključke o promeni QRS-vektora.



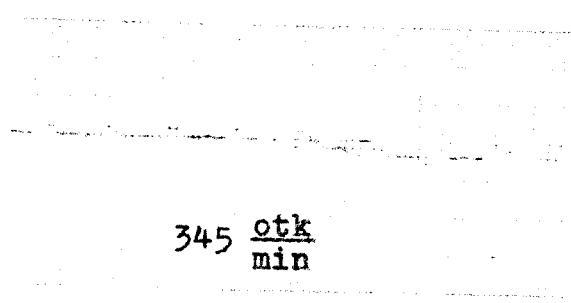
Sl.6.4. Srednja vrednost QRS-vektora pre i posle 60 minuta polja.

Analizom EKG-snimaka svih šest perifernih odvoda ustanovljeno je da polje nije uzrokovalo promenu u dužini intervala (segmenata). Smanjenje frekvencije srca ostvaruje se produženjem vremena između srčanih ciklusa, a ne produženjem intervala (segmenata) unutar svakog od ciklusa. To je ilustrovano na slici 6.5., gde je prikazan aVF odvod, snimljen kod 2. pacova, pre delovanja polja (Sl.6.5.a) i posle delovanja polja (Sl.6.5.b).

a)



b)



Sl.6.5. aVF odvod kod 2. pacova pre i posle polja

6.4. II GRUPA REZULTATA

6.4.1. Opšte napomene

U drugoj seriji merenja promenjeno je vreme između dva impulsa na $T = 10$ s, tj. frekvencija ponavljanja impulsa na $F = 0,1$ Hz. Ukupno trajanje polja je produženo na 120 minuta, dok je i dalje upotrebljavani 2. petlja uz napon na bateriji kondenzatora $u_0 = 7$ kV.

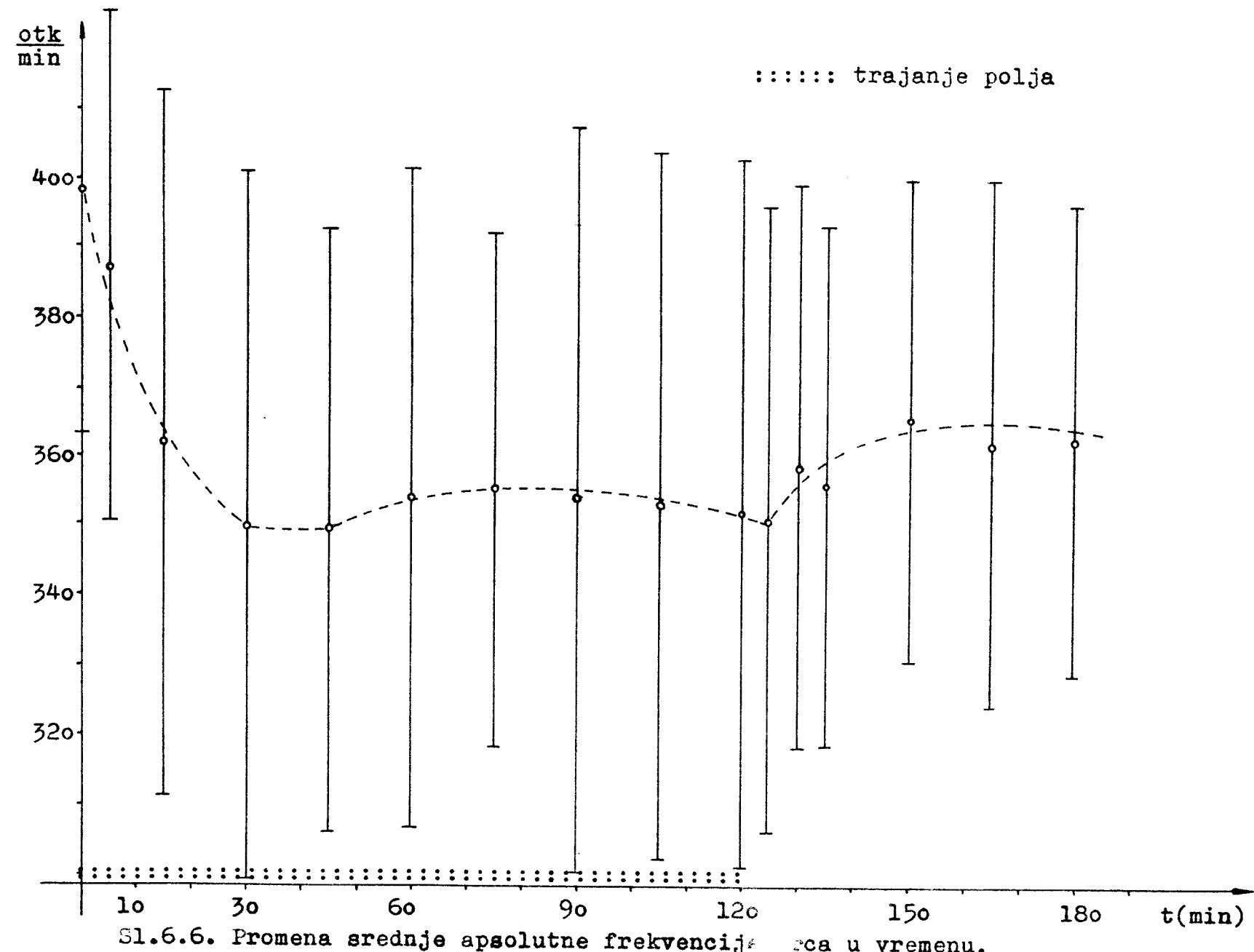
Za vreme trajanja polja frekvencija srca je merena na kraju vremenskih intervala od: 5, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 i 120 minuta od uključivanja polja. Posle isključivanja polja frekvencija srca je merena na kraju istih vremenskih intervala kao i kod prve serije merenja.

6.4.2. Frekvencija srca

Izmerene absolutne vrednosti frekvencije srca date su u tabeli 6.4., a relativne vrednosti u tabeli 6.5., zajedno sa srednjim vrednostima i standardnim devijacijama. Promena srednjih apsolutnih vrednosti prikazana je na slici 6.6., a rela-

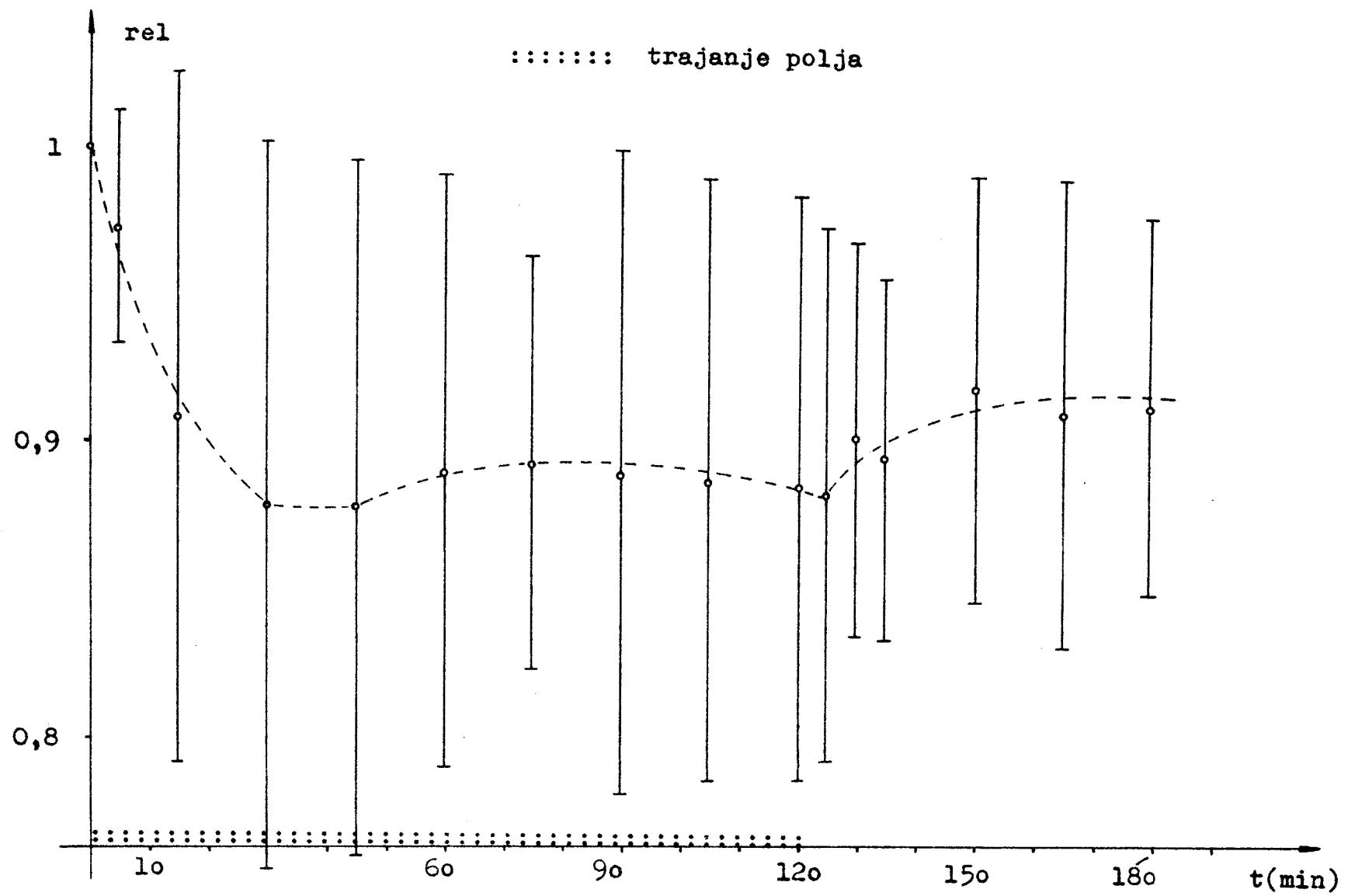
VРЕМЕ (min)	ЗА ВРЕМЕСА ПОЉА											ПОСЛЕ ПОЉА					
	0	5	15	30	45	60	75	90	105	120	5	10	15	30	45	60	
бр. рив.	F	R	E	K	V	B	T	C	I	J	A	S	R	C	A	(otk/min)	
1	326	324	306	311	319	293	298	292	280	282	282	287	286	318	308	294	
2	389	385	357	309	355	358	370	369	314	305	316	316	316	333	362	371	
3	387	366	313	271	286	186	287	284	286	282	283	297	330	387	378	371	
4	414	389	271	248	248	278	339	284	278	284	292	355	339	316	290	314	
5	414	395	392	369	385	398	382	380	375	380	375	373	362	385	371	368	
6	400	395	375	362	366	366	368	371	364	366	362	359	347	351	349	357	
7	442	461	442	395	395	435	387	442	428	419	389	398	371	366	368	371	
8	385	380	368	355	357	345	353	341	362	357	362	366	362	366	355	366	
9	349	343	380	351	371	353	349	375	357	349	349	347	345	337	333	337	
10	435	432	417	400	378	385	387	385	392	400	400	405	408	417	411	400	
11	417	366	313	324	349	347	368	373	395	400	395	395	400	403	403	403	
12	417	405	398	395	378	387	411	405	400	398	403	405	408	408	408	398	
sred. vred.	397,9	386,7	361,0	349,1	348,9	353,8	354,9	353,4	352,6	351,8	350,6	358,5	355,7	365,3	361,3	362,5	
st. dev.	33,7	36,7	50,8	51,0	43,8	47,3	37,0	53,9	51,2	51,2	45,1	40,8	37,4	34,5	37,8	33,3	

Tab.6.4. Апсолутне вредности фреквеније срца на крају датих временских интервала



VREME (min)	Z A V R S M E P O L J A										P O S L E P O L J A								
	0	5	15	30	45	60	75	90	105	120	5	10	15	30	45	60			
br. ziv.	R E L A T I V N A					F R E K V E N C I J A										S R Č A			
1	1	0.994	0.938	0.954	0.978	0.914	0.914	0.896	0.858	0.865	0.865	0.880	0.878	0.976	0.945	0.902			
2	1	0.964	0.917	1.000	0.912	0.946	0.848	0.794	0.807	0.784	0.812	0.812	0.812	0.856	0.931	0.954			
3	1	0.946	0.809	0.700	0.738	0.738	0.742	0.734	0.738	0.728	0.732	0.767	0.854	1.000	0.977	0.959			
4	1	0.939	0.654	0.598	0.598	0.672	0.818	0.686	0.672	0.686	0.705	0.858	0.817	0.764	0.700	0.758			
5	1	0.953	0.947	0.939	0.929	0.962	0.923	0.918	0.906	0.918	0.906	0.902	0.874	0.929	0.897	0.889			
6	1	0.988	0.937	0.905	0.915	0.915	0.919	0.927	0.910	0.915	0.905	0.897	0.867	0.877	0.873	0.893			
7	1	1.042	1.000	0.894	0.894	0.984	0.875	1.000	0.968	0.948	0.880	0.901	0.839	0.828	0.833	0.839			
8	1	0.988	0.956	0.912	0.927	0.896	0.917	0.886	0.940	0.927	0.940	0.951	0.940	0.951	0.922	0.951			
9	1	0.983	1.089	1.066	1.062	1.012	1.000	1.075	1.022	1.000	1.000	0.934	0.928	0.966	0.954	0.966			
10	1	0.993	0.959	0.920	0.909	0.885	0.889	0.885	0.901	0.920	0.920	0.931	0.938	0.959	0.945	0.920			
11	1	0.878	0.751	0.777	0.637	0.632	0.662	0.695	0.947	0.959	0.947	0.947	0.947	0.959	0.966	0.966			
12	1	0.971	0.954	0.946	0.906	0.926	0.986	0.971	0.959	0.954	0.966	0.971	0.978	0.978	0.978	0.954			
sred. vred.		1.000	0.972	0.908	0.878	0.877	0.839	0.892	0.788	0.886	0.884	0.881	0.901	0.894	0.918	0.909	0.911		
st. dev.		0.000	0.040	0.117	0.124	0.118	0.100	0.070	0.109	0.102	0.099	0.091	0.066	0.061	0.072	0.079	0.063		

Tab.6.5. Relativne vrednosti frekvencije srca izračunate prema tabeli 6.4.

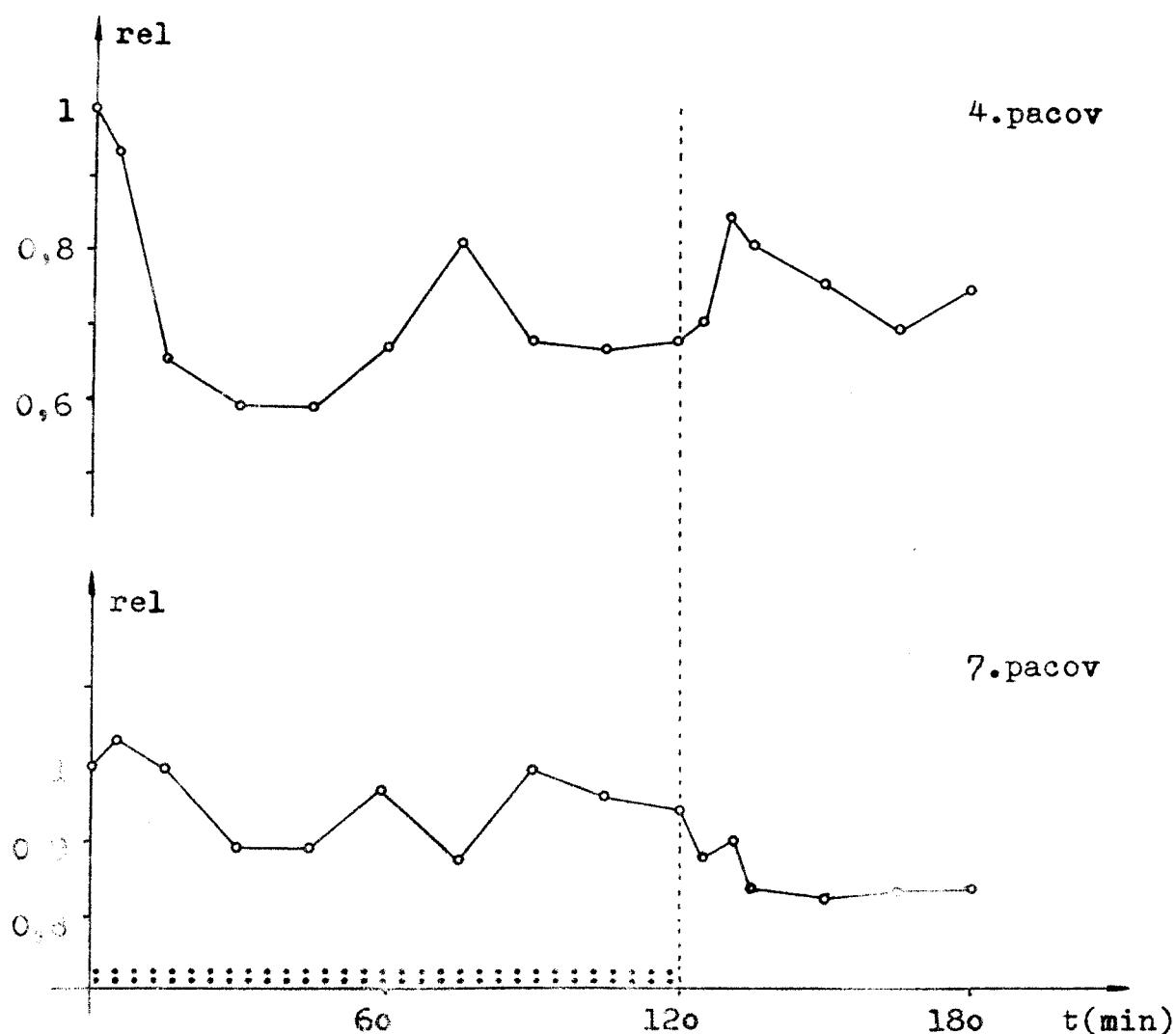


S1.6.7. Promena srednje relativne vrednosti frekvencije srca u vremenu.

tivnih na slici 6.7.

Kao što se vidi rezultati su u glavnim karakteristama slični rezultatima I grupe, tj. za vreme delovanja polja frekvencija srca opada, da bi se, po isključivanju polja, poslako približavala početnoj vrednosti. Međutim, u ovoj grupi rezultata srednja vrednost ima svoj minimum u 45-om minuti, a opadanje frekvencije u toj tački iznosi 12,3 %. Samog toga, uočljivo je opadanje frekvencije srca i u prvih 5 minuta od isključivanja polja.

Individualne razlike u reagovanju na polje, u ovoj seriji merenja, još su jače izražene, što je imalo za posledicu dalje povećavanje standardne devijacije. Dva primera različitog reagovanja na polje data su na slici 6.8.



Sl.6.8. Dva primera individualnog reagovanja na polje.

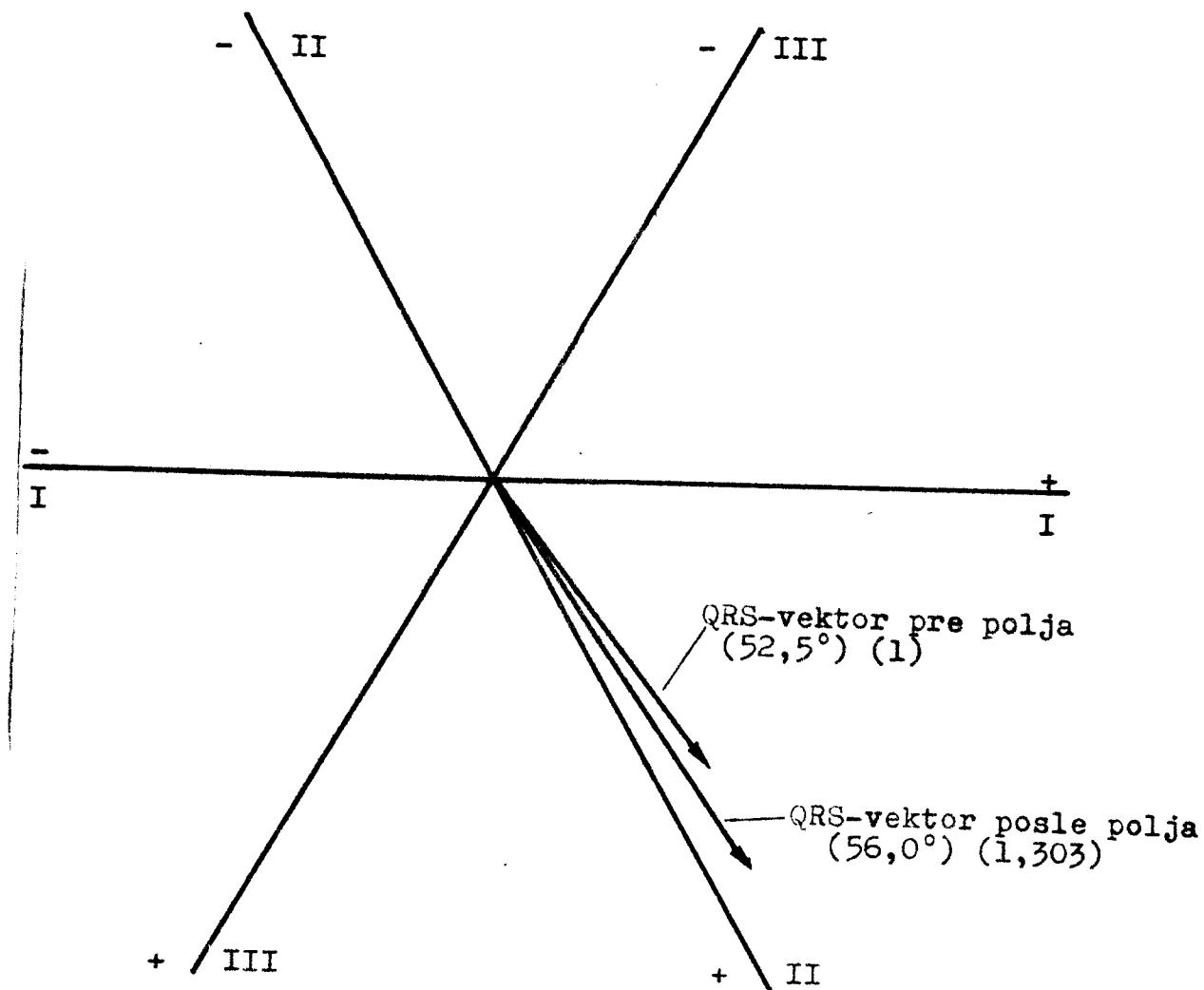
6.4.3. QRS-vektor i trajanje intervala

Na isti način kao i kod prve grupe rezultata i u ovoj grupi odredeni su uglovi i relativni intenziteti QRS-vektora pre i posle delovanja polja. Nadene vrednosti date su u tabeli 6.6., a srednje vrednosti su prikazane na slici 6.9. Velike standardne devijacije i greške kod određivanja pojedinih QRS-vektora ni ovde ne dozvoljavaju da se o promeni ugla i intenziteta QRS-vektora donesu sigurni zaključci.

Smanjivanje frekvencije je, i kod ove serije mernja, ostvareno na račun produženja intervala između srčanih ciklusa, dok su intervali (segmenti) unutar ciklusa ostali sačuvani.

Broj život.	QRS pre polja	QRS posle polja	$\Delta \angle$	rel.int. pre polja	rel.int. posle polja
1	61°	44°	- 17°	1	0,69
2	54°	57°	+ 3°	1	1,22
3	55°	49°	- 6°	1	1,00
4	56°	47°	- 9°	1	1,57
5	43°	47°	+ 4°	1	1,33
6	-42°	25°	+ 67°	1	0,53
7	64°	67°	+ 3°	1	2,18
8	90°	72°	- 18°	1	1,07
9	72°	72°	0°	1	1,00
10	75°	75°	0°	1	2,92
11	88°	84°	- 4°	1	1,02
12	14°	33°	+ 19°	1	1,11
srednja vred.	52,5°	56,0°	+3,50°	1	1,303
stand. devij.	-	-	22,4°	-	0,666

Tab.6.6. Uglovi i relativni intenziteti QRS-vektora pre i posle dejstva polja.



Sl.6.9. Srednja vrednost QRS-vektora pre i posle 120 minuta polja.

6.5. DISKUSIJA

Evidentno je da elektromagnetsko polje opisanih karakteristika deluje na srce pacova snižavajući mu frekvenciju rada. Po prestanku dejstva polja dolazi do oporevljanja koje nije potpuno ni nakon 60 minuta, kako je to kod prikazivanja rezultata opisano.

U II seriji merenja upotrebljeno je polje manje frekvencije ponavljanja impulsa, pa bi s te strane bilo logično očekivati da će efekat biti manje izražen. Nedutim, rezultati pokazuju upravo suprotno tj. smanjenje frekvencije srca je bilo veće nego kod prve serije merenja. To može biti posledica jačeg polja primjenjenog u II seriji, ili posledica statističke razlike.

Rezultati su veoma slični rezultatima dobijenim uz primenu konstantnog magnetskog polja (Stamenović, Majić, 1974, 1975; Lažetić i sar., 1982). Za razliku od rezultata Stamenovića i Majića nije dolazilo do pojave aritmije, bradikardije i blokade srčanog rada, što se sa jedne strane može objasniti činjenicom da su istraživanja opisana u ovom radu sprovedena na topokrvnim životinjama, a sa druge strane time što se srce nalazi u organizmu tj. in situ. Ovo omogućava da se u regulaciju rada srca uključuju komponente koje se suprotstavljaju delovanju elektromagnetskog polja, tj. padu frekvencije srca.

Velika sličnost postoji sa rezultatima Lažetića i saradnika. Zavisnost frekvencije srca od dužine izlaganja je gotovo identična, što pokazuje da su u pogledu delovanja na biosisteme konstantno i promenljivo polje veoma slični. Ovaj pokazatelj bi mogao biti značajan u pogledu objašnjavanja preko kojih mehanizama dolazi do delovanja polja na srčanu frekvenciju.

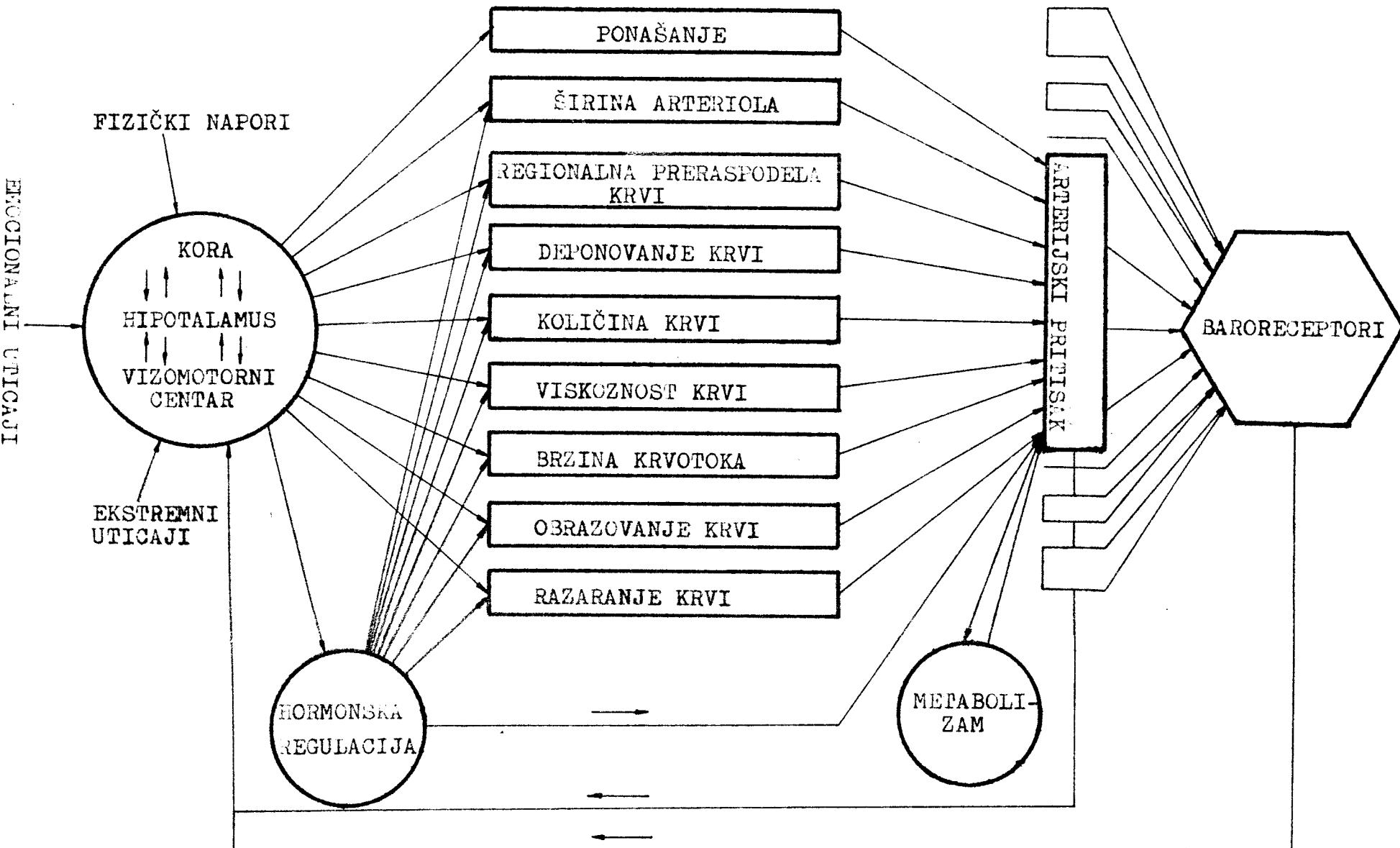
Za sada se izvesno tumačenje može dati preko teorije automatske regulacije, čiju je primenu u biološkim eksperimentima najbolje dao P.K. Anohin, u poznatoj teoriji funkcionalnih sistema. Osnovne postavke ove teorije bi se mogle sažeti u nekoliko sledećih rečenica (K.V. Sudakov, 1976).

Za normalan rad organizma neophodno je da su osigurani mnogi spoljni i unutrašnji faktori, koji predstavljaju određene konstante organizma. Te konstante su, naravno, prilično plastične, a njihove optimalne vrednosti stalno su narušavane mnogim spolnjim i unutrašnjim dejstvima. Održavanje optimalnih vrednosti konstanti organizma osnovni je zadatak funkcionalnih sistema. To se ostvaruje preko uključivanja aparata samoregulacije odgovarajućeg funkcionalnog sistema, koji ima zadatak da obezbedi korisni adaptacioni rezultat. Svaki otklon tog rezultata od nivoa, koji obezbeđuje normalnu životnu aktivnost организма, brzo se prima od strane receptornih aparata, i posredstvom nervne i humoralne povratne aferentacije, mobilisti se specijalni centralni aparati. Poslednji preko izvršnih pribora vraćaju korisni adaptacioni rezultat na neophodan normalan nivo. Svi ti procesi protiču neprekidno s konstantnim informisanjem centra o uspehu rezultata.

Funkcionalni sistem za održavanje optimalnog arterijskog pritiska u organizmu dat je, po K.V.Sudakovu, na slici 6.10. Kao što se vidi sa slike, jedan od izvršnih pribora za održavanje pritiska je i rad srca. Delovanjem elektromagnetskog polja, kao spoljnog faktora, narušava se ravnoteža ovog sistema, te se uključuju kompenzatorne strukture radi uspostavljanja "dinamičke ravnoteže" na nekom novom nivou. Na prvo-stepenu grubu regulaciju srčane frekvencije nadovezuje se fino usaglašavanje povratnom vezom. Brzina i efikasnost grube i fine regulacije razlikuje se od individue do individue.

Sa takvog stanovišta, krive koje pokazuju promenu frekvencije srca u vremenu rezultat su delovanja polja s jedne strane, i kompenzatornih struktura s druge strane. Na taj način se lako može objasniti naglo opadanje frekvencije srca u prvim minutama delovanja polja, kasnije formiranje novog nivoa srčanog rada sa finim oscilovanjem, porast frekvencije po prestanku dejstva polja i, u svemu tome, prisutne individuelne razlike.

Na kraju, trebalo bi još jednom podvući, da istraživanja ovakvog karaktera zasluzu posebnu pažnju, posebno ako se ima u vidu da je ekološka sredina svakim danom sve zasićenija najraznovrsnijim elektromagnetskim poljima.



Sl.6.10. Funkcionalni sistem za održavanje arterijskog pritiska (po K.V.Sudakov, 1976)

7. Z A K L J U Č A K

Na osnovu provedenih istraživanja i dobijenih rezultata, mogu se izvesti sledeći zaključci:

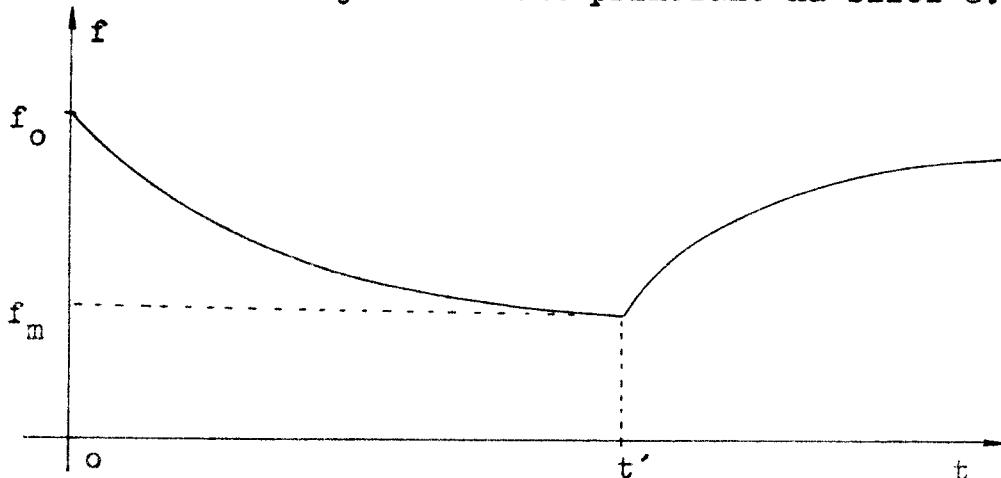
1. Brzopromenljivo impulsno elektromagnetsko polje opisanih karakteristika, izaziva smanjivanje frekvencije rada srca laboratorijskog pacova.
2. Smanjivanje frekvencije rada srca je najintenzivnije u toku prvih 30 minuta delovanja polja.
3. Efekt delovanja elektromagnetskog polja, iako slabiji po prestanku delovanja polja, prisutan je i u toku 60 minuta oporavka.
4. Ne postoji suštinska razlika u delovanju elektromagnetskih polja opisanih parametarskih razlika. Izvesna razlika u veličini smanjenja frekvencije ne može biti sa sigurnošću pripisana razlici u karakteristikama polja.
5. Promena ugla i relativnog intenziteta QRS-vektora ne može, usled velikih grešaka, sa sigurnošću biti pripisana delovanju polja.

8. DODATAK

Promena frekvencije srca kao rezultat dejstva magnetskog polja i kompenzacionog mehanizma organizma.

Vremenska zavisnost promene srčane frekvencije prilikom izlaganja organizma magnetskom polju, može da se posmatra kao rezultat dejstva magnetskog polja na organizam sa jedne strane, i odgovarajućeg dejstva kompenzacionog mehanizma organizma sa druge strane.

Prilikom izlaganja životinje impulsnom elektromagnetskom polju maksimalne magnetske indukcije B i frekvencije ponavljanja impulsa F , utvrđena je vremenska zavisnost frekvencije srca f kao što je shematski prikazano na slici 8.1.



Sl.8.1. Shematski prikazana vremenska zavisnost frekvencije srca f , za vreme, i posle dejstva polja.

U toku vremena 0 do t' životinja je izlagana opisnom impulsnom elektromagnetskom polju, dok je posle vremena t' polje isključeno, pa je na frekvenciju srca delovao samo kompenzacioni mehanizam organizma.

Promena frekvencije srca u jedinici vremena $(df/dt)_B$ zbog prisustva elektromagnetskog polja, zavisi od maksimalne vrednosti magnetske indukcije B (povećava se sa porastom B), talasnog oblika impulsa, i od frekvencije ponavljanja

impulsa F (takođe se povećava sa porastom F):

$$\left(\frac{df}{dt} \right)_B = - g(B, F) \quad (8.1)$$

gde je funkcija $g(B, F) \geq 0$ i ne zavisi od vremena, već samo od B i F , kako je to gore opisano. $g(B, F) = 0$ kada nema elektromagnetskog polja, a to je kada je $B=0$, ili pak u slučaju impulsnog polja kada je $F=0$ (polje se ne pojavljuje). Bolje poznavanje $g(B, F)$ treba utvrditi eksperimentalno, kako će biti opisano na kraju ove glave. Znak " $-$ " ispred $g(B, F)$ u jednačini (8.1) stoji zbog činjenice da se frekvencija srca f , u prisustvu elektromagnetskog polja, smanjuje sa vremenom. Vreme pojavljivanja impulsa elektromagnetskog polja u odnosu na impulse srca, takođe može da ima veliki uticaj na vrednost funkcije g , što treba posebno ispitati.

Promena frekvencije srca f u jedinici vremena $(df/dt)_C$ zbog kompenzacionog mehanizma organizma je utoliko veća ukoliko je veće odstupanje frekvencije srca f od vrednosti f_0 koja je bila pre izlaganja organizma polju (preciznije, koja bi postojala da organizam nije bio izlagan polju, mada je frekvencija srca pre izlaganja životinje polju bila vrlo stabilna - unutar 2 %):

$$\left(\frac{df}{dt} \right)_C = \frac{1}{\Theta} (f_0 - f) \quad (8.2)$$

Koeficijent srazmernosti je obeležen sa $1/\Theta$, gde je Θ vremenska konstanta promene frekvencije, a zavisi samo od kompenzacionog mehanizma životinje. Što je kompenzacioni mehanizam jači to je Θ manje. Zavisnost Θ , odnosno kompenzacionog mehanizma od B , F , t' , itd. treba ispitati, no dosadашnja merenja u impulsnom polju pokazuju da je Θ nezavisno od ovih veličina.

Rezultujuća promena frekvencije srca u jedinici vremena data je zbirom promena datim u jednačinama (8.1) i (8.2):

$$\frac{df}{dt} = \left(\frac{df}{dt} \right)_B + \left(\frac{df}{dt} \right)_C$$

odnosno:

$$\frac{df}{dt} = -g(B,F) + \frac{1}{\Theta} (f_0 - f) \quad (8.3)$$

Cpšti integral ove diferencijalne jednačine je:

$$f = f_0 + \Theta A \left(e^{-\frac{t}{\Theta}} - \Theta g(B,F) \right) \quad (8.4)$$

Na početku izlaganja životinje polju tj. u trenutku $t=0$ frekvencija srca je bila f_0 što za integracionu konstantu A iz jednačine (8.4) daje:

$$A = g(B,F)$$

Tako da partikularno rešenje jednačine (8.3) za vreme $0 \leq t \leq t'$ je:

$$f = f_0 - \Theta g(B,F) \left(1 - e^{-\frac{t}{\Theta}} \right) \quad (8.5)$$

Ovaj izraz odlično zadovoljava eksperimentalno dobijene podatke za pogodno odabranu vrednost vremenske konstante Θ .

Najmanja vrednost frekvencije srca f_m se postiže posle vremena $t > > \Theta$ i iznosi:

$$f_m = f_0 - \Theta g(B,F)$$

ili pak najveće smanjenje frekvencije srca $f_0 - f_m$ je:

$$f_0 - f_m = \Theta g(B,F)$$

Dakle, najveće smanjenje frekvencije srca je obrnuto сразмерно jačini kompenzacionog mehanizma organizma (prema jednačini (8.2) jačina kompenzacije promene frekvencije je obrnuto сразмерna vrednosti Θ).

Analizom promene frekvencije srca u toku vremena individualnih životinja može se zaključiti da je bilo kompenzacioni mehanizam (vrednost Θ) nestabilna veličina, bilo da je $g(B,F)$ zavisno od vremena postojanja impulsa B u odnosu na puls srca. Ovo su razlozi zbog čega su standardne devijacije merenih rezulta prilično velike. se utvrđio pravi ra-

zlog ovome, neophodno je dalje ispitivanje funkcije $g(B, F)$.

Računajući ponovo vreme t od trenutka t' (u trenutku t' je $t=0$) može se iz opšteg integrala (8.4) naći partikularan integral. U toku ovog vremena elektromagnetsko polje je isključeno, pa prema definiciji, jednačina (8.1), je:

$$g(B, F) = 0 \quad (8.7)$$

u toku celog ovog vremena. Pored toga početni uslov za ovo vreme je za $t=0$, $f = f_1$. Na osnovu uslova (8.7) i početnog uslova za ovo vreme, dobija se:

$$A = -\frac{f_0 - f_1}{\Theta}$$

pa se za partikularni integral dobija:

$$f = f_0 - (f_0 - f_1) e^{-\frac{t}{\Theta}} \quad (8.8)$$

ili kao smanjenje frekvencije $f_0 - f$ i smanjenje u trenutku isključivanja polja $f_0 - f_1$:

$$f_0 - f = (f_0 - f_1) e^{-\frac{t}{\Theta}} \quad (8.9)$$

I ova funkcija se dobro slaže sa merenim tokom frekvencije. Značajno je primetiti da se ovaj proces odvija istom vremenskom konstantom.

Promene frekvencije i u toku ovog vremena bile su u priličnoj meri individualne. Otuda velika standardna devijacija. Kako u ovom vremenu ne figuriše $g(B, F)$ može se zaključiti da je kompenzacioni mehanizam organizma tj. vrednost vremenske konstante Θ nestabilna veličina.

U cilju potvrde gore iznetih tvrdnji izvršeno je određivanje vremenskih konstanti Θ_I i Θ_{II} , te vrednosti funkcije g_I i g_{II} za obe grupe eksperimentalnih podataka. Određivanje je izvršeno metodom najmanjih kvadrata uz pomoć računara. Sve vrednosti su određene sa greškom od $\pm 0,5$. Za prvu grupu podataka, u vremenu od 0 do t' , dobijene su vrednosti:

$$\Theta_I = 10,0 \text{ min}^{-1} \quad g_I = 4,0$$

čijom primenom jednačina (8.5) daje za frekvenciju srca vrednosti:

$t(\text{min})$	0	5	10	15	20	25	30	40	50	60
$f(\frac{\text{otk}}{\text{min}})$	414,4	398,7	389,1	383,3	379,8	377,7	376,4	375,1	374,7	374,5

Za trenutke vremena veće od t' dobijena je za Θ vrednost:

$$\Theta'_I = 30,0 \text{ min}^{-1}$$

pa jednačina (8.8) daje za teorijske vrednosti frekvencije srca:

$t(\text{min})$	5	10	15	30	45	60
$f(\frac{\text{otk}}{\text{min}})$	379,3	384,7	389,2	399,1	405,1	408,8

Prema ovim vrednostima na slici 8.2. prikazane su funkcije (8.5) i (8.8) izvučene punom linijom, dok su eksperimentalne vrednosti označene tačkama.

Druga grupa podataka daje:

$$\Theta''_{II} = 12,0 \text{ min}^{-1} \quad g_{II} = 4,0$$

pa jednačina (8.5) daje za teorijske vrednosti frekvencije srca u intervalu vremena od 0 do t' :

$t(\text{min})$	0	5	15	30	45	60	75	90	105	120
$f(\frac{\text{otk}}{\text{min}})$	397,9	381,6	363,7	353,8	351,0	350,3	350,1	350,0	349,9	349,9

Za trenutke vremena veće od t' dobija se:

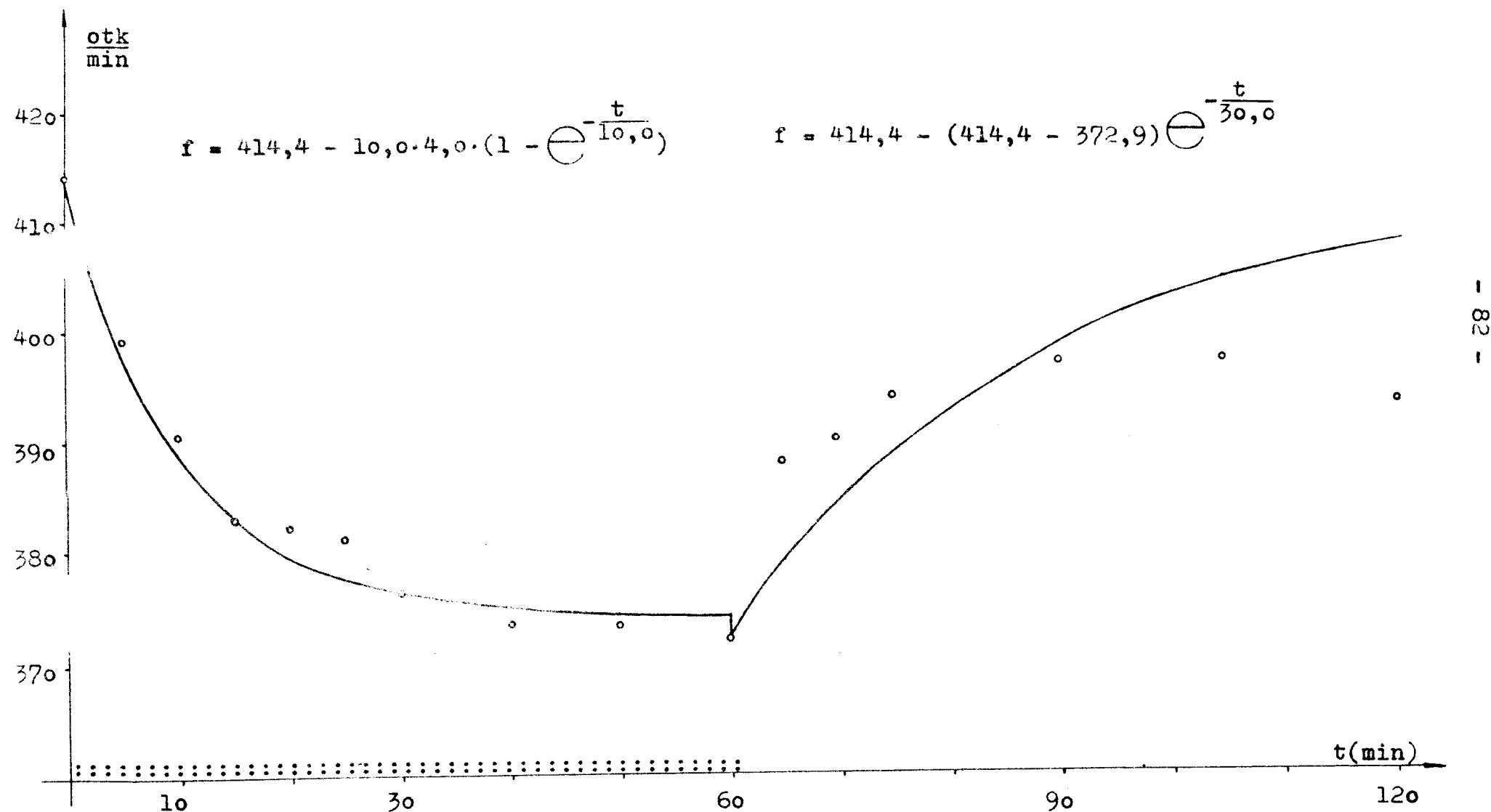
$$\Theta''_{II} = 195,0 \text{ min}^{-1}$$

pa jednačina (8.8) daje:

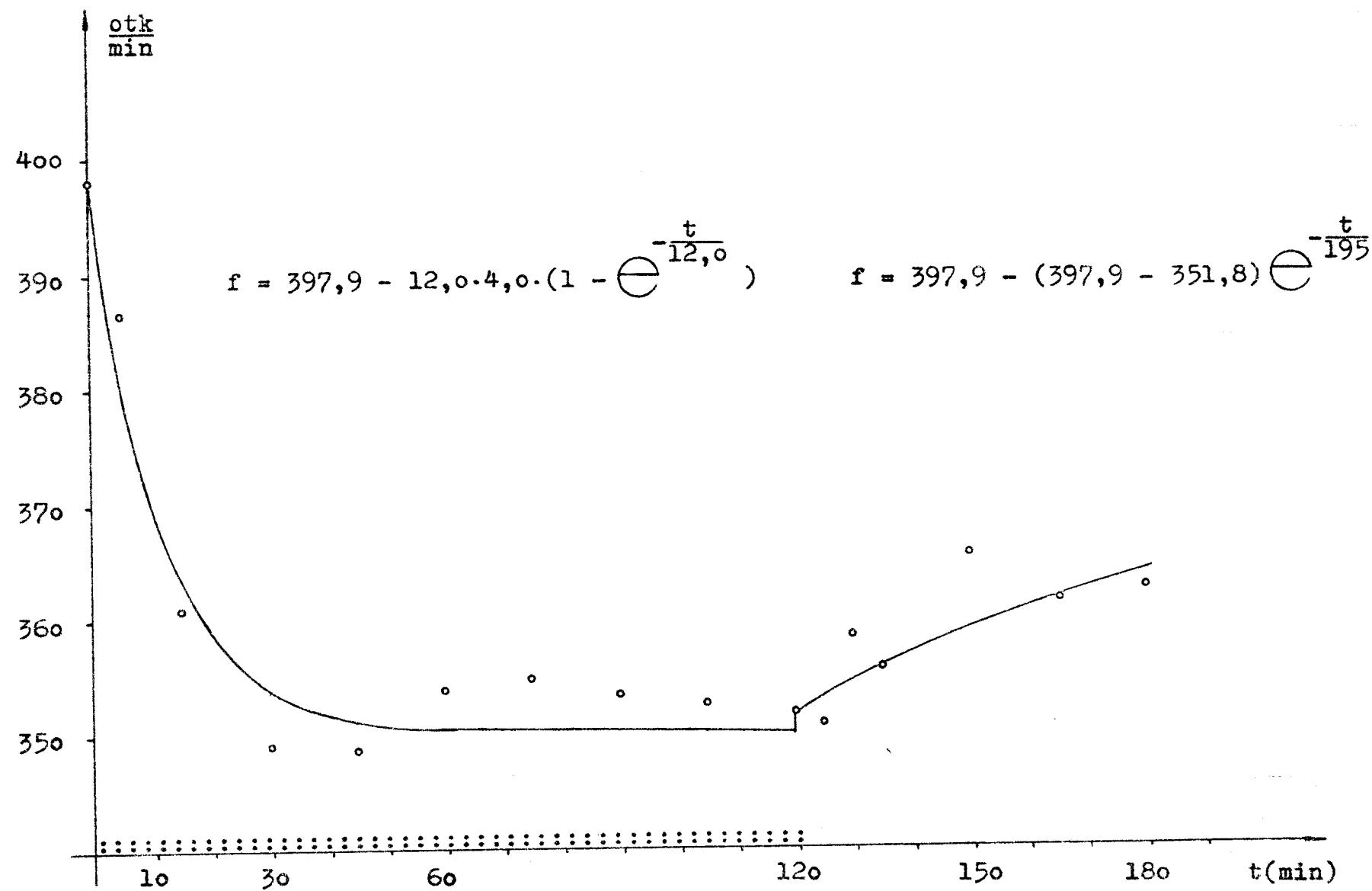
$t(\text{min})$	5	10	15	30	45	60
$f(\frac{\text{otk}}{\text{min}})$	353,0	354,1	355,2	358,4	361,3	364,0

Na slici 8.3. su, prema ovim vrednostima, nacrtane funkcije (8.5) i (8.8) uz eksperimentalne vrednosti.

Napomena: Ideja, i njena razrada, za ovaku matematičku analizu rezultata iznetu u ovoj glavi, dolazi od dr Miroslava Pavlova.



Sl.8.2. Teorijske i eksperimentalne vrednosti frekvencije srca (vidi tekst)



Sl.8.3. Teorijske i eksperimentalne vrednosti frekvencije srca (vidi tekst)

9. LITERATURA

1. Antimonij G.D., Salamov R.A.: Dejstvie modulirovannogo elektromagnitnogo polja na eksperimental'no vyzvannuju epileptiformnuju aktivnost' mozga u krys, Bjulleten' eksperimentalnoj biologii i medicini, 2, 145-148, 1980.
2. Audus L.J.: Magnetotropism: A New Plant-Growth Response, Nature, 185, Jan. 16, 132-134, 1960.
3. Boe A. A., Salunkhe D.K.: Effects of Magnetic Fields on Tomato Ripening, Nature, 199, Jul. 6, 4886, 91-93, 1963.
4. Čižov S., Sinjak J., Šikina M., Uhanova S., Krasnoščekov V.: O dejstviji magnitnog polja na kišečnuju paločku, Kosmičeskaja biologija i avioskosmičeskaja medicina, 5, 26-31, 1975.
5. Drecun M., Jamakosmanović A., Nakaš M., Shore M.L.: Uticaj hroničnog mikrotalasnog zračenja 2450 MHz na EEG od-raslih pacova, Zbornik radova 12. kongresa saveza društava fiziologa Jugoslavije, P.11-149, 1982.
6. Dubin Dale: Brza interpretacija EKG, Sportska knjiga, Beograd, 1977.
7. Efimenko G.D., Šakula A.V., Unspenskij V.M., Grinevič V.B., Galeev I.S.: Gistohimičeskaja harakteristika sлизистой оболочки желудка и двенадцатиперстной кишки крольчат, развивавшихся в условиях экранирования от магнитного поля земли, Kosmičeskaja biologija i avioskosmičeskaja medicina, 2, 78-80, 1978.
8. Guyton C. Arthur: Medicinska fiziologija, Medicinska knjiga, Beograd-Zagreb, 1978.
9. Kopanev V.I., Efimenko G.D., Šakula A.V.: O biologičeskom dejstvii na organizm gipomagnitnoj sredy, Izvestija akademii nauk SSSR, serija biologičeskaja, 3, 342-353, 1979.

10. Lažetić B., Milin J., Bajić M., Pavlov M.: Uticaj konstantnog magnetnog polja na endokrini sistem, Zbornik rada 12. kongresa saveza društava fiziologa Jugoslavije, P.12-182, 1982.
11. Lažetić B., Milutinović B., Bajić M., Pavlov M.: Uticaj konstantnog magnetnog polja na frekvencu srca pacova, Zbornik radova 12. kongresa saveza društava fiziologa Jugoslavije, P.13-247. 1982.
12. Lončar Josip: Osnovi elektrotehnike, Tehnička knjiga, Zagreb, 1956.
13. Majić Vidan: Mogućnosti primene elektromagnetske stimulacije na biološke procese u nekim tkivima, doktorska disertacija, Beograd, 1980.
14. Malin S.R.C., Srivastava B.J.: Correlation Between Heart Attacks and Magnetic Activity, Nature, 277, 646-648, 1979 ; 283, 111, 1979.
15. Munro M., Piekarski K.: Stress Aided Diffusion in Haversian Bone, First Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering, Sorrento, Digest 1, 1-29 do 1-32.
16. Mušicki Đorđe: Uvod u teorijsku fiziku II, Zavod za izdavanje udžbenika SRS, Beograd, 1965.
17. Nahil'nickaja Z.N.: O biologičeskom dejstvii postojaniih magnitnih polej, Kosmičeskaja biologija i avioskosmičeskaia medicina, 3-15, 1972.
18. Novikova N.I., Volkova F.A., Bešli-Ogly D.A.: Opyt primenjenja induktotermii i sinusoidal'nyh tokov dlja izgnanija kamenej, Voprosy kurortologii fizioterapii i lečebnoj fizičeskoj kultury, 2, 66-67, 1980.
19. Pavlović M., Majić V.: Zaštita od elektromagnetskog impulsa nuklearne eksplozije, Vojnotehnički glasnik, 1, 72-85, 1978.
20. Pittman U.J.: Magnetism and Plant Growth, Journal of Plant Science , 43, 513-518, 1963.
21. Snedecor W. George, Cochran G. William: Statistički metodi, "Vuk Karadžić", Beograd, 1971.

22. Stamenović B., Majić V.: Dokaz o oštećenju srčane funkcije pod dejstvom stalnog magnetskog polja, V jugoslovenski simpozijum iz biofizike, 1974.
23. Stamenović B., Majić V.: Heart Function in Magnetic Field, Period. Biol. 77, 57-61, 1975.
24. Sudakov K.V.: Funkcional'nie sistemi organizma, Izd. Ministerstvo zdravohranenija SSSR, Moskva, 1976.
25. Surutka Jovan: Elektromagnetika, Građevinska knjiga, Beograd, 1975.
26. Zagorskaja E.A.: Vlijaniye postojannogo magnitnogo polja na endokrinnuju sistemu, Kosmičeskaja biologija i aviko-smičeskaja medicina, T.15, 5, 14-17, 1981.