

Prof. dr Dejan Popović
Prof. dr Mirjana Popović
As. mr. Milica Janković

BIOMEDICINSKA MERENJA I INSTRUMENTACIJA

Štampanje ovog udžbenika je finansirano od strane
TEMPUS Projekta No. 18015-2003

Printing of this textbook is financially supported by
TEMPUS Project No. 18015-2003

AKADEMSKA MISAO
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET
Beograd, 2010.

Prof. dr Dejan Popović
Prof. dr Mirjana Popović
As. mr. Milica Janković

BIOMEDICINSKA MERENJA I INSTRUMENTACIJA

Recenzenti
Prof. dr Branimir Reljin
Prof. dr Dejan Raković

Izdavači
Akademska misao, Beograd
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu

Dizajn korica
Milica Đurić-Jovičić

Štampa
Planeta print
Beograd

Tiraž
300 primeraka

ISBN 978-86-7466-371-4

NAPOMENA: Fotokopiranje ili umnožavanje na bilo koji način ili ponovno objavljivanje ove knjige u celini ili u delovima - nije dozvoljeno bez izričite saglasnosti i pismenog odobrenja izdavača

Ako niste sigurni koji iskaz je tačan, ova knjiga je za Vas?



-
- 1) U ravnotežnom stanju ćelije, propustljivost ćelijske membrane je:
- jednaka za jone K^+ i jone Na^+ ;
 - veća za jone K^+ nego za jone Na^+ ;
 - nula i za jone K^+ i za jone Na^+ .
-
- 2) $Na^+ - K^+$ pumpa ima zadatak da:
- kontroliše koncentraciju jona Na^+ u ćeliji;
 - generiše akcioni potencijal;
 - izjednači koncentracije jona Na^+ i K^+ u ćeliji.
-
- 3) U toku akcionog potencijala, unutrašnjost ćelije je:
- na nižem potencijalu u odnosu na spoljašnjost ćelije;
 - na višem potencijalu u odnosu na spoljašnjost ćelije za oko 1 V;
 - na višem potencijalu u odnosu na spoljašnjost ćelije za oko 25 mV.
-
- 4) Ag/AgCl elektrode:
- imaju stabilan i nestacionaran „ofset“ potencijal;
 - nisu fotosenzitivne;
 - imaju osobine nepolarizljivih elektroda.
-
- 5) Primena implantibilnih elektroda u elektrofiziologiji:
- cuff (mažetna) elektrode su namenjene snimanju mišićne aktivnosti;
 - epimizijalne elektrode su namenjene snimanju EKG signala;
 - intramuskularne elektrode se koriste za snimanje EEG signala.
-
- 6) Pri merenju električne aktivnosti srca:
- aVR, aVL i aVF prikazuju električnu aktivnost srca u profilnoj ravni;
 - PR interval ukazuje na vreme depolarizacije komora;
 - frekvencijski opseg signala je 0.05-100 Hz.
-
- 7) Pri električnoj stimulaciji motornog nerva povorkom impulsa frekvencije f , mišićna sila će pulsirati za:
- $f = 5$ Hz;
 - $f = 1000$ Hz.
-
- 8) Ako oko zgloba deluju agonist i antagonist mišići:
- posmatrani mišići ne mogu da budu istovremeno kontrakovani;
 - jedan mišić može da bude inhibiran, a drugi kontrakovan;
 - kokontrakcija je pojava kada su antagonist i agonist inhibirani.
-
- 9) Elektromiografski signal:
- ima frekvencijski opseg koji pripada opsegu čujnosti;
 - ima frekvencijski opseg do 100 Hz;
 - može se čuti samo specijalnim slušalicama.
-

10) Značajne funkcije glia ćelija su:

- uklanjanje ćelija koje su umrle ili povredene;
- prenos akcionih potencijala u kičmenoj moždini;
- usmeravanje migracije neurona.

11) Pri merenju brzine provođenja akcionih potencijala (AP):

- treba registrovati AP bar u tri tačke koje nisu na istoj liniji;
- na zapisu se pored evociranog AP vidi i artefakt stimulacije.

12) U EEG zapisu postoje:

- alfa talasi pri mirovanju u budnom stanju;
- beta talasi pri mentalnim naporima;
- teta talasi u trenucima radosti.

13) Instrumentacioni pojačavač je elektronski sklop za:

- ispravljanje kontinualnih signala;
- za analogno izdvajanje signala od interesa u odnosu na šum;
- analogno-digitalnu konverziju.

14) Neuromagnetsko polje u okolini glave:

- je reda 10^{-14} A/cm;
- potiče od struja u dendritima i posledica je postsinaptičkih potencijala;
- pretežno potiče od radijalnih struja u korteksu.

15) Pri primeni računara za merenje elektrofizioloških signala treba:

- primeniti A/D konvertor u cilju pojačanja signala;
- odabrati učestanost odabiranja od 100 uzoraka u sekundi pri merenju aktivnosti mišića;
- odabrati dvobitnu rezoluciju pri merenju EEG signala.

16) Pri bifaznoj nesimetričnoj kompenzovanoj stimulaciji:

- negativan i pozitivan impuls imaju jednake količine naelektrisanja;
- pozitivan i negativan impuls imaju identično dejstvo;
- ne postoji opasnost od trajnih promena na stimulisanim tkivima.

17) Kardioverter:

- je mehanički asistent radu srčanog mišića;
- se koristi kod pacijenata sa rizikom od nagle smrti;
- generiše impulse sa ciljem supresije ventrikularnih fibrilacija.

18) Za obradu elektrofizioloških signala se koristi:

- *Fourier*-ova transformacija (FFT, DFT);
- ARMA model;
- *Butterworth*-ov filter.

19) Ako se vlažnom rukom dodirnu kontakti baterije ($v_{\text{nominalno}} = 9 \text{ V}$):

- baterija će se isprazniti;
- struja kroz ruku će dostići prag osetljivosti.

20) Osnovne metode zaštite pacijenta od „strujnog udara” su:

- galvansko odvajanje mernih i terapijskih uređaja od napajanja;
 - korišćenje *Driven-Right-Leg* kola umesto klasičnog uzemljenja;
 - paralelno povezivanje strujnog limitera u merni sistem.
-

PREDGOVOR

Udžbenik „Biomedicinska merenja i instrumentacija” je namenjen studentima Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, ali i lekarima, istraživačima u oblasti biomedicinskog inženjerstva i drugim zainteresovanim za bolje razumevanje biomedicinskih merenja i instrumentacije. Knjiga uključuje informacije o inženjerskim aspektima biomedicinskih signala, načinu prikupljanja i memorisanja tih signala, i primeni u kliničkim i laboratorijskim uslovima.

Osnovni motiv za pisanje ove knjige je potreba za sistemskim, udžbeničkim prikazom metodologije i instrumentacije za merenje bioloških signala. Istovremeno, informacije koje pruža ova knjiga mogu da posluže kao početna tačka za detaljnija razmatranja pojedinih problema u oblastima biomedicinskog inženjerstva i tehnologija.

Sadržaj knjige je usklađen sa nastavnim i istraživačkim iskustvima koja su sakupljena u poslednjih dvadesetak godina na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu u domenu biomedicinskog inženjerstva i tehnologija, sa posebnim naglaskom na instrumentaciju i metode koje su deo svakodnevne kliničke prakse.

Biomedicinsko inženjerstvo i tehnologije zahtevaju interdisciplinarni i multidisciplinarni pristup, pa ova knjiga pored tehničkih aspekata razmatra i elemente anatomije i fiziologije. Ovakav prikaz je odabran sa namerom da čitaocima koji imaju tehničko predznanje objasni razlike i sličnosti u funkcionisanju tehničkih i živih sistema, kao i da im omogući da lakše komuniciraju sa kolegama kojima je osnovna struka biologija, medicina i njima srodne discipline.

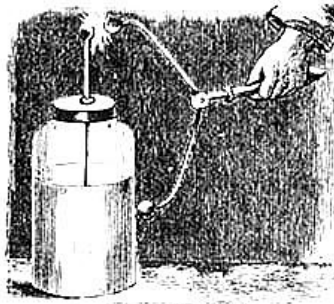
Pri pisanju knjige je korišćena obimna literatura, a za ugled su poslužili udžbenici iz oblasti medicinskih merenja i uređaja koji se koriste na univerzitetima u Evropi i Severnoj Americi, kao i informacije iz enciklopedija u oblasti biomedicine koje su objavljene poslednjih godina. Ova knjiga u potpunosti pokriva program predmeta Akvizicija elektrofizioloških signala koji se predaje na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu iz oblasti Medicinskog inženjerstva. Izbor materijala i ilustracija je napravljen u skladu sa najboljim saznanjima, i usmerenosti u naučno-istraživačkom radu autora knjige.

Ova knjiga uključuje i opise konstrukcija pojedinih uređaja koji se danas koriste u kliničkom radu, ali je najveća pažnja posvećena principima funkcionisanja uređaja. Principski opis instrumentacije treba da omogući inženjerima da zajedno sa ostalim stručnjacima koji se bave biomedicinom poboljšaju metodologiju i klinički rad, i omoguće optimalno korišćenje biomedicinske instrumentacije.

Istovremeno, razumevanje metodologije i principa u oblasti biomedicinskog inženjerstva omogućava i da se relativno jednostavnim tehnikama od uređaja opšte namene razviju specifični instrumenti potrebni za eksperimentalni i istraživački rad.

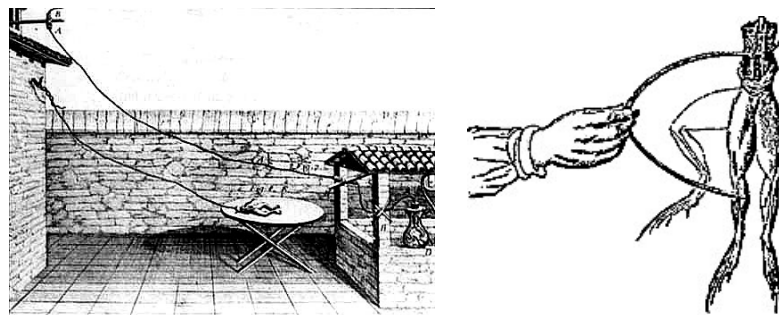
Biomedicinska instrumentacija brzo zastareva zbog napretka tehnologije, ali mnogo više kao posledica novih saznanja u mehanizmima koji karakterišu živi svet.

Primene električnih dejstava u medicini se vezuju za otkriće Lajdenske boce, Sl. 1. Eksperimenti sa statičkim elektricitetom su doveli do važnih rezultata u razumevanju značaja elektriciteta za pojave u organizmu. Peter Christian Abildgaard, lekar i naučnik, osnivač Kraljevske veterinarske škole u Danskoj, je 1773. godine počeo da primenjuje Lajdensku bocu za aktivaciju senzorno-motornih mehanizama. Treba istaći da se to odigralo čak 104 godine pre nego što je Thomas Edison otkrio električnu svetiljku!



Slika 1: Lajdenska boca: skladište velike količine elektriciteta, *Leyden University*, Holandija, 1742. (izvor: *The Telecommunications History Group, Inc.* www.telcomhistory.org - pristupljeno maja 2009).

Luigi Galvani, italijanski lekar, je otkrio „životinjski elektricitet“ i istraživao fenomene u organizmu koristeći svoje otkriće. Preciznije, 1786. godine je jedan od saradnika slučajno u toku eksperimenta dodirnuo nerv žabe metalnim skalpelom, Sl. 2. Pojavila se mala varnica, a noga žabe se zgrčila. Ovo je prvi eksperiment koji je povezo pokret i elektricitet.



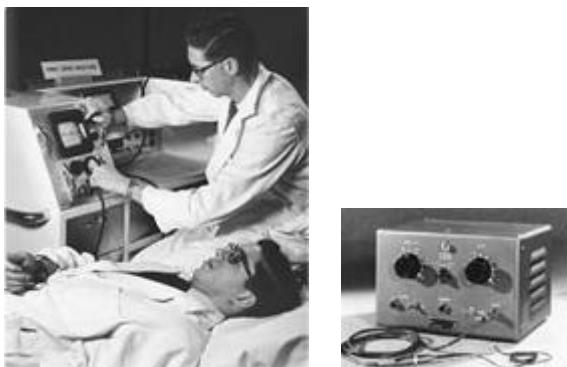
Slika 2: Skica eksperimenta pri kome je Galvani otkrio životinjski elektricitet (izvor: *Biological Sciences, University South Carolina*, www.biol.sc.edu i *Charles Sturt University*, www.hsc.csu.edu.au - pristupljeno maja 2009).

Guillaume Benjamin Amand Duchenne de Boulogne, francuski neurolog, je razvio niz instrumenata za pobude senzornog i motornog sistema, pa je između ostalog pri primeni električne stimulacije prikazao električni osmeh (1872), Sl. 3.



Slika 3: Duchenne i primena električne stimulacije: električni osmeh (izvor: *IEEE Global History Network*, www.ieeeahn.org - pristupljeno maja 2009).

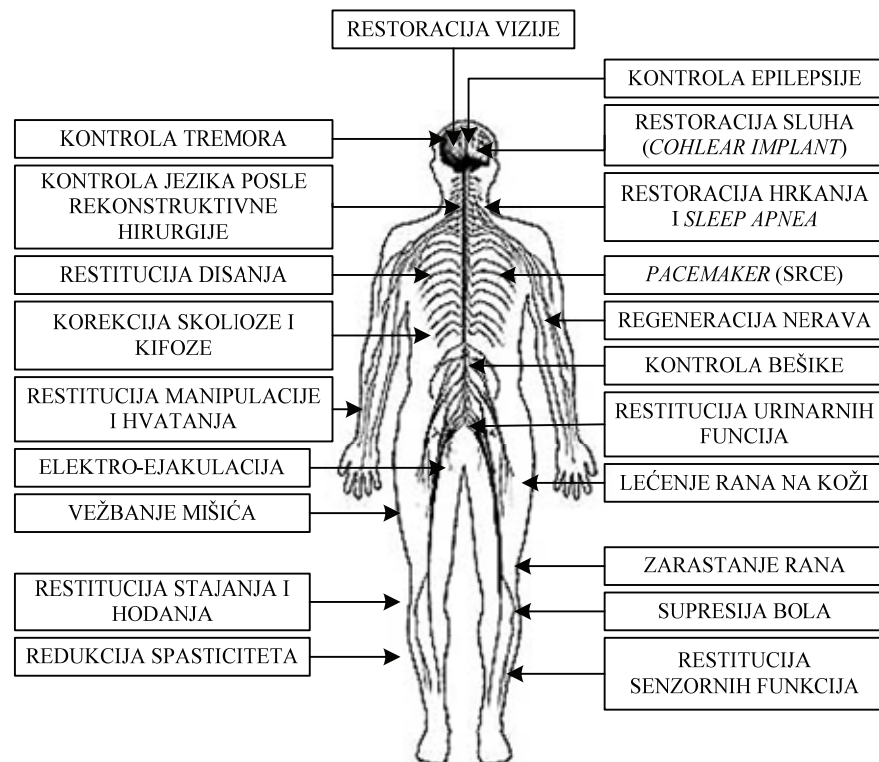
Posle otkrića Dr. William Bigelow-a i Dr. John Callaghan-a u Torontu, Kanada (1949) da ljudsko srce usporava ritam kada je na niskim temperaturama, počele su da se rade operacije na srcu. Jedan od problema koje je trebalo rešiti je kako ponovo pokrenuti normalni ritam srca. Dr. John Hopps (1950) je pokazao da kontrolisani električni impuls neće prouzrokovati nikakvu štetu na srčanom mišiću, i da će ga ponovo pokrenuti, odnosno da ako se na srce deluje povorkom impulsa, srce će pulsirati u ritmu spoljašnje pobude. To je direktno uslovalo razvoj prvog davača ritma srcu (*pacemaker*), koji je koristeći elektrode na srčanom mišiću omogućio ritmičke kontrakcije srca. Veličina uređaja je bila ograničavajući faktor (Sl. 4), ali je minijaturizacija omogućila da se već 1957. godine ugradi prvi baterijski napajani *pacemaker* pacijentu u Švedskoj.



Slika 4: Prvi davač ritma srčanom mišiću koji je primenjen na pacijentu (*pacemaker*), Hopps 1950. (izvor: *National Research Council Canada*, www.nrc-cnrc.gc.ca - pristupljeno maja 2009).

Na kraju ovog kratkog istorijskog uvoda ćemo pomenuti i rezultat Willem-a Einthoven-a, holandskog lekara, koji je uveo tehniku snimanja električne aktivnosti srca (1903). Ovaj rezultat je omogućio uvođenje EKG uređaja u medicinu 1912. godine (Sl. 5.1 u glavi 5).

Danas je izuzetno popularna ideja o stvaranju humanoida, replike čoveka sa svojstvima koja prevazilaze rezultate koje je postigla priroda kroz evoluciju. U tom pravcu se razvijaju mnoge komponente koje omogućuju vraćanje izgubljenih ili umanjениh funkcija (Sl. 5). Niz takvih pomagala je danas komercijalno dostupan. Slika 5 prikazuje samo dejstva električnog ili magnetskog polja na organizam. Takođe, razvijaju se novi materijali koji omogućuju zamenu kostiju, zglobova, krvnih sudova, i nekih drugih organa u telu. Složeni sistemi koji su konstruisani omogućuju i zamenu srca, bubrega, pa i nekih drugih organa.

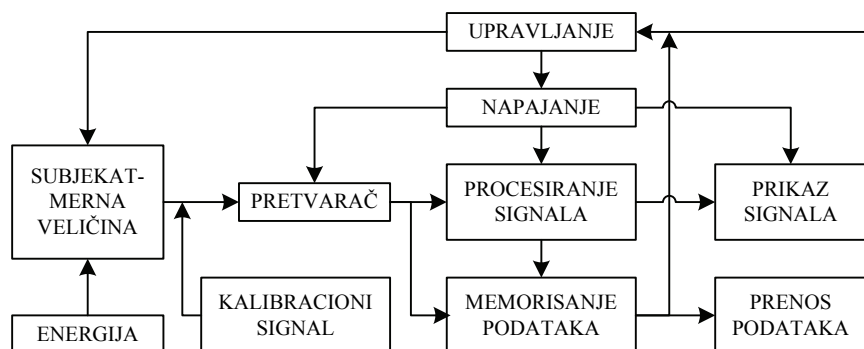


Slika 5: Šematski prikaz potencijalnih primena električne i magnetske stimulacije u cilju uspostavljanja funkcija.

Ovaj udžbenik ima dva dela, od koga je pred čitaocima deo posvećen elektrofiziologiji, a deo posvećen drugim važnim kliničkim merenjima i instrumentaciji će biti objavljen u najskorijoj budućnosti. Na kraju, s obzirom na to da je ovo prvo izdanje udžbenika u ovom obliku, izvinjavamo se čitaocima na eventualnim greškama i nedoslednostima. Istovremeno, unapred se zahvaljujemo čitaocima koji nam ukažu na nedostatke, kako bi sledeća izdanja udžbenika „Biomedicinska merenja i instrumentacija” bila bolja.

UVOD

U uvodu ćemo prikazati osnovne karakteristike biomedicinskih uređaja polazeći od njihovih osnovnih komponenti i elemenata. Biomedicinski instrumenti se u osnovi razlikuju od drugih tehničkih mernih instrumenata po tome što merne signale generiše biološki sistem, tj. merenje se ne vrši na mernom objektu, već se pri merenju komunicira sa subjektom. Zbog toga je neophodno koristiti i razviti kontakt osoba-mašina, tzv. interfejs sa subjektom, da bi merenja bez posledica, uključujući i psihološke aspekte, omogućila tačnu i brzu dijagnostiku i terapiju. Ukoliko se radi o terapijskom uređaju koji deluje na organizam, tj. predaje energiju organizmu, adekvatan interfejs je još značajniji, jer povrede i oboljenja koja mogu da se jave prilikom tretmana mogu da imaju i fatalne posledice. Savremeni biomedicinski merni sistem u zavisnosti od svoje namene sadrži jedan ili više elemenata prikazanih na Sl. 6. Primarni tok informacija je sa leve na desnu stranu.



Slika 6: Osnovne komponente savremenog biomedicinskog mernog sistema.

Da bi se bolje razumela specifičnost biomedicinskih instrumenata u odnosu na druge merne aparate definisaćemo osnovne blokove prikazane na Sl. 6:

1. Merna veličina. Fizičku veličinu, osobinu ili uslov koji je od interesa nazivamo merna veličina. Ovde ćemo nabrojati neke od fizičkih veličina (signala) koji su od interesa za biomedicinske tehnologije. Klasifikacija signala koju prikazujemo sledi fizičku prirodu signala:

Bioelektrični i biomagnetski signali. Bioelektrične signale generišu ćelije. Čelija ima dva stanja: ravnotežno i aktivno (pobuđeno). U toku procesa aktivacije dolazi do depolarizacije, tj. nastajanja akcionog potencijala. Pri prelasku ćelije iz ravnotežnog u pobuđeno stanje, dolazi do kretanja slobodnih jona, pre svega natrijuma (Na^+) i kalijuma (K^+), kroz ćelijsku membranu. Ove promenljive struje generišu promenljive napone koje nazivamo bioelektrični signali čiji

je naponski opseg od nekoliko μV do desetak mV , a frekvencijski opseg od 0 Hz (konstantni bioelektrični signali) do 10 kHz. Bioelektrične struje u svojoj okolini generišu veoma mala magnetska polja (indukcija reda $B = 10^{-15} \text{ T}$). Ova polja se mogu meriti veoma osetljivim magnetometrima u okolini tela i indukovane signale nazivamo biomagnetski signali. Ova merenja su od posebnog interesa za proučavanje aktivnosti korteksa. Bioelektrični i biomagnetski signali potiču od istog izvora i daju komplementarne informacije.

Bioimpedansa. Merenjem impedanse između pojedinih tačaka na telu dobijamo važne informacije koje se odnose na sastav, zapreminu krvi, raspodelu krvi, endokrinu aktivnost, aktivnost autonomnog nervnog sistema i slično. Bioimpedansu određujemo kao odnos amplituda napona i struje i fazne razlike napona i struje između dve odabrane tačke na telu. Pri ovome spolja generisana prostoperiodična struja sa učestanostima od nekoliko Hz do 1 MHz ima mali intenzitet ($\approx \mu\text{A}$) kako bi se izbegli bilo kakvi negativni efekti na tkivo.

Bioakustički signali. Merenjem zvuka koji potiče iz organizma dobija se informacija koja omogućava praćenje važnih pojava u organizmu. Npr., protok krvi u srcu kroz srčane zaliske ili kroz krvne sudove stvara karakterističan zvuk koji se koristi za dijagnostiku. Protok vazduha kroz disajne organe takođe generiše zvuk (kašljanje, hrkanje, itd.). Zvuk se takođe generiše u digestivnom traktu i u zglobovima. Takođe je poznato da kontrakcija mišića proizvodi zvučne signale, koji se još nazivaju i mišićni šum. Pošto akustički signali propagiraju kroz biološke sisteme, bioakustički signali mogu da se mere na površini sistema konvencionalnim pretvaračima (npr., mikrofon).

Biomehanički signali. Ovaj pojam obuhvata sve one signale koji nastaju kao rezultat mehaničkih funkcija biološkog sistema. Biomehanički signali su dužine, brzine, ubrzanja, pritisci, sile, protok, brzina protoka, i slično. Za merenje ovakvih signala potrebni su precizni pretvarači, ali je mnogo značajnija njihova aplikacija na organizam na neinvazivan ili minimalno invazivan način. Ovo je od posebnog značaja ako se meri na mestu gde biomehanički signal nastaje. Brzi razvoj tehnologija mikromašinstva (MEMS i MOEMS), a posebno biokompatibilnost novih pretvarača olakšavaju merenja biomehaničkih signala. Razvoj nanotehnologije i pretvarača koji koriste kvantno mehaničke efekte će svakako dalje doprineti unapređenju mernih metoda i olakšati dijagnostiku i terapiju.

Biohemijski signali. Biohemijski signali su rezultat hemijskih merenja na telesnom tkivu ili uzorcima koji se analiziraju u kliničkim laboratorijama. Merenje koncentracije različitih jona unutar ili u blizini ćelije posebnim jonskim elektrodama je samo jedan primer kada se dobija biohemijski signal. Parcijalni pritisak kiseonika (pO_2) i ugljen-dioksida (pCO_2) u krvi je drugi primer. Biohemijski signali su vrlo niskih učestanosti, pa većina njih može da se tretira kao da su nepromenljivi.

Biooptički signali. Biooptički signali su rezultat optičkih pojava koje se javljaju u organizmu, a nastaju prirodno ili su indukovani merenjem. Npr. oksidacija hemoglobina u krvi može da se odredi merenjem transmitovanog i odbijenog svetlosnog signala o tkivo (*in vivo* ili *in vitro*). Važne informacije o fetusu mogu da se dobiju merenjem fluorescentnih karakteristika amniotske tečnosti. Razvoj optičkih kablova i prateće tehnologije otvorio je široku primenu biooptičkih signala.

Sasvim je jasno iz ovog kratkog pregleda da signali koji postoje u organizmu imaju različito dejstvo. Danas je rasprostranjena primena računara, odnosno digitalna obrada električnih signala koji su dobijeni iz nekog drugačijeg energetskeg oblika.

2. Pretvarač. Pretvarač je uređaj koji pretvara energiju iz jednog u drugi oblik i ima za cilj da nestandardnu veličinu pretvori u standardnu veličinu za koju postoje jednostavne metode registrovanja i prikazivanja. Pretvarač za medicinske namene mora da bude neinvazivan, netoksičan, otporan na razne oblike delovanja, minijaturan, stabilan i predviđen za rad u amplitudskom i frekvencijskom opsegu koji je karakterističan za biološki mehanizam koji se posmatra. Pretvarači pre svega pretvaraju neki oblik energije u električni signal. U mnogim primena je neophodno obraditi originalni fizički signal pre pretvaranja u električni signal.

3. Procesiranje signala. Izlazni napon sa pretvarača obično nema pogodan oblik za direktno tumačenje. S obzirom na to, signal treba procesirati da bi se dobio oblik pogodan za dijagnostiku. Procesiranje signala najčešće ima tri faze: analogna obrada električnog signala dobijenog sa pretvarača (pojačavanje električnog signala uz izdvajanje korisnog signala iz šuma, eventualno filtriranje i slično), digitalizacija (pretvaranja analognog u digitalni signal) i digitalna obrada dobijenog rezultata.

4. Prikaz signala - *display*. Rezultat merenja treba prikazati u obliku koji je pogodan za dalju analizu i razumevanje. Prikaz rezultata može biti grafički ili numerički, diskretan ili neprekidan (kontinualan), stalni ili privremeni. Dobijeni rezultat se može direktno upoređivati sa standardnim veličinama ili prikazivati u neobrađenom i obrađenom obliku. U praksi se često signal prikazuje u frekvencijskom domenu, ili kao višedimenzionalna informacija (slika) sa pretvarača, a u novije vreme se koriste i različite tehnike prepoznavanja oblika (npr. veštačka inteligencija, veštačke neuronske mreže).

5. Kalibracioni signal za statička i dinamička merenja, blok za upravljanje i biološku povratnu spregu (*bio-feedback*), memorijski elementi i delovi za prenos signala (podataka) na daljinu su elementi sistema o kojima će kasnije biti više reči. Računari imaju posebnu i važnu ulogu u ovom delu sistema. Signal se obrađuje pre smeštanja podataka u memoriju, a u nekim metodama, naročito kod velikog broja podataka se podaci smeštaju u izvornom obliku, pa se obrada

obavlja kasnije. Informacije se prenose konvencionalnim metodama.

Kao što je već rečeno, pretvarač se „postavlja” na objekat merenja ako je merna veličina pristupačna, a procedura neinvazivna. U slučajevima kada merna veličina nije direktno pristupačna koriste se indirektno metode. Pri indirektnim merenjima meri se veličina koja jednoznačno odgovara biološkom signalu (npr., merenje pritiska snimanjem Korotkovljevih tonova, skeletne karakteristike prozračavanjem i slično).

U biomedicinskim merenjima nekada posmatramo kontinualne veličine (npr. EKG signal, EEG signal), a u drugim slučajevima posmatramo samo diskretne uzorke (npr. hemijske osobine gasova i tečnosti, temperaturu). Pretvarači mogu da koriste energiju dobijenu od organizma (npr. elektrode, termometri), dok je za druge primene potrebna spoljna energija da bi se realizovalo merenje (npr., X i γ zraci). Pretvarači se u zavisnosti od toga da li (ne) zahtevaju dovođenje spoljne energije dele na: generatorske (bez spoljne energije) i modulišuće (neophodna spolja energija). Izmereni signali mogu da se registruju i obrađuju u analognom obliku, a mogu se i diskretizovati i posle obrade prikazati u digitalnom obliku. Takođe, digitalizovana veličina se može ponovo pretvoriti u analognu veličinu radi lakšeg razumevanja i objašnjenja. Tipičan primer analognog prikazivanja posle digitalne obrade je analiza pojedinih signala u primenama ultrazvuka, γ kamere i nekih drugih radioloških metoda. U pojedinim merenjima od interesa je u realnom vremenu obraditi signal (npr. monitori, registrovanje pulsa, disanja, neuralne proteze), a u drugim primenama se analiza obavlja nezavisno od trenutka kad je merenje urađeno (npr. analiza krvi, kompjuterska tomografija, analiza EEG signala).

U Tabeli 1 je data skraćena lista mernih veličina sa odgovarajućim amplitudskim i frekvencijskim opsezima i standardnim pretvaračima koji se koriste.

Pored mernih medicinskih uređaja, koriste se i terapijski medicinski uređaji. Terapijski uređaji koriste pojedine oblike energije i uz odgovarajući interfejs tu energiju prenose organizmu. Primena npr. električne-stimulacije, magnetske-stimulacije, zračenja, hidroterapije ili sličnih postupaka utiče na funkcionisanje sistema u organizmu. Terapija se može shvatiti i u širem smislu, pa u ovu kategoriju svrstavamo i laserske uređaje za hirurgiju i druge metode mikrohirurgije.

Napokon, danas se razvija veoma značajna oblast medicinske tehnike koja se naziva oblast veštačkih organa. U ovoj oblasti postignuti su izvanredni rezultati i danas se uspešno primenjuju veštački ekstremiteti, elektrostimulatori srca, neuralne proteze, veštački krvni sudovi, kosti i zglobovi, veštački bubrezi, a mnogi veoma važni uređaji su u razvoju (veštačko srce, veštački pankreas, itd).

Merna veličina	Amplituda	Učestanost [Hz]	Standardni metod merenja
Balistokardiogram	0 - 7 mmHg	DC - 40	akcelerometar
Pritisak u mokraćnom mehur	0 - 100 cmH ₂ O	DC - 10	manometri sa mernim trakama
Protok krvi	1 - 300 ml/s	DC - 20	merač protoka
Arterijski pritisak	25 - 400 mmHg	DC - 50	auskultatorni metod
Venski pritisak	0 - 50 mmHg	DC - 50	merne trake
Pritisak O ₂ u krvi	30 - 100 mmHg	DC - 2	specijalne elektrode
Pritisak CO ₂ u krvi	40 - 100 mmHg	DC - 2	specijalne elektrode
Pritisak N ₂ u krvi	1 - 3 mmHg	DC - 2	specijalne elektrode
pH krvi	6.8 - 7.8	DC - 2	specijalne elektrode
Zapremina istisnute krvi	4 - 25 l/min	DC - 20	dilucione metode
Elektrokardiogram	0.5 - 4 mV	0.01 - 250	površinske elektrode
Elektroencefalogram	5 - 300 μV	DC - 150	površinske elektrode
Elektrokortikogram	10 - 5000 μV	DC - 150	mikro elektrode
Elektromiogram	10 - 1000 μV	DC - 10000	iglene elektrode
Elektroneurogram	0.01 - 3 μV	DC - 5000	elektrode
Elektroretinogram	0 - 900 μV	DC - 50	kontaktne elektrode
Elektrookulogram	50 - 3500 μV	DC - 50	kontaktne elektrode
Galvanski refleks	1 - 500 kΩ	0.01 - 1	površinske elektrode
Gastrična kiselost (pH)	3 - 13	DC - 1	pH elektrode
Fonokardiogram	10 ⁻⁴ Pa (80 dB)	5 - 2000	mikrofon
Ritam disanja	2 - 50 udisaja	0.1 - 40	termistor ili merne trake
Brzina respiracije	0 - 6 l/min	DC - 40	diferencijalni merač pritiska
Temperatura tela	32 - 42 °C	DC - 0.1	termistor

Tabela 1: Amplitudski i frekvencijski opsezi mernih veličina i metode merenja.

Za uspešnu primenu medicinske instrumentacije potrebno je zadovoljiti sledeće kriterijume:

- poznavanje prirode merne veličine. U tom cilju potrebno je precizno primeniti saznanja iz biologije, hemije, biohemije, molekularne biologije, biofizike i srodnih disciplina. Poznavanje anatomije i fiziologije je osnovni uslov za primenu metode, a za to je često potrebna medicinska ekspertiza;
- pravilan izbor metode merenja i pretvarača koji treba da detektuje mernu veličinu;
- odgovarajuće procesiranje signala u cilju smanjenja šuma. Šum u medicinskim signalima nazivamo „artifakt” i on često može da

bude mnogo veći od korisnog signala;

- pravilan izbor uređaja za prikazivanje (*display*) koji omogućava lako tumačenje, prepoznavanje i reprodukovanje;
- izbor odgovarajuće memorije i podataka koje je potrebno memorisati i prenositi;
- efikasna zaštita pacijenta od svih neželjenih efekata u primeni određene merne metode;
- zaštita osoblja koje rukuje određenim medicinskim uređajima.

INDEKS

A

acetilholin, 159
 agonist, 130, 141, 169
 akcioni potencijal, 29–37
 AP srca, 106
 provođenje AP, 33
 aktin, 134
 aktivni prenos, 21
 aktivno provođenje, 34
 akvizicija, 220
 amplitudski opseg, 9
 analogno-digitalna konverzija, 77
 analogno-digitalni konvertor, 88
 flash, 90
 sa linearnom rampom, 90
 sa sukcesivnim aproksimacijama, 90
 antagonist, 130, 141, 169
 AR model, 237
 ARMA model, 239
 arterija, 104
 arterijski pritisak, 9
 arteriola, 104
 artefakt, 154, 170, 216
 ARV, 152
 atrijum. *Vidi* pretkomora
 atrioventrikularni čvor, 107
 autokorelacija, 217

B

biartikularni, 130
 bioimpedansa, 6
 bipolarno merenje, 35
 blankiranje, 124
 brain mapping, 178
 brzina provođenja AP, 35, 36, 170

C

cauda equina, 166
 centralni generator ritma, 167
 cerebellum, 163
 cerebrum, 163
 cisterna, 137
 CMRR, 62
 CNS. *Vidi* nervni sistem (centralni)
 corpus callosum, 165
 ćelija
 glia, 157, 161
 mišićna, 133
 nervna, 157
 Švanova, 158
 ćelijska membrana, 14
 električni model, 26

D

DC/DC konvertor, 90
 „boost”, 92

„buck”, 91
 „flyback”, 92
 „forward”, 92
 defibrilator, 208, 244
 depolarizacija, 15
 diferencijator, 67
 difuzija, 20, 25
 digitalizacija, 78
 digitalno-analogni konvertor, 84
 4-bitni, 84
 lestvičasti, 85
 diastola, 106
 dipol, 113, 124, 126, 185, 192
 diskretizacija, 78
 diskretni signali, 222
 distorzija, 123, 121–23, 154, 211, 222–
 26, 234
 Driven-Right-Leg, 96

E

ECD, 185
 EEG. *Vidi* elektroencefalografija
 Einthovenov trougao, 115
 EKG. *Vidi* elektrokardiografija
 ekstenzor, 130
 ektopični otkucaji, 119
 elektrode, 39–54, 200
 cuff, 53
 epimizijalne, 53
 fleksibilne površinske, 46
 iglene, 48
 implantibilne, 52
 intramuskularne, 53
 intraneularne, 54
 jednoupotrebne površinske, 46
 mikroelektrode, 49
 nepolarizljive, 42
 polarizljive, 43
 stimulacione, 51
 višeupotrebne površinske, 45
 višeupotrebne prekordijalne EKG, 47
 za uzemljenje, 48
 elektroencefalografija, 9, 58, 172–79
 elektrokardiografija, 58, 103, 107–27
 fetalni EKG, 127
 vektorski EKG, 124
 elektromiograf, 146
 elektromiografija, 58
 sEMG, 143
 elektroneurografija, 58, 170–72
 EMG. *Vidi* elektromiografija
 ENG. *Vidi* elektroneurografija
 evocirani potencijal, 170, 180–84, 184,
 235
 auditorni, AEP, 183
 somatosenzorni, SEP, 181
 vizuelni, VEP, 182
 ezofagus, 118

F

facilitarni prenos, 20
 fascikula, 133
 fibrilacija, 119
 filter
 adaptivni, 228
 aktivni, 68
 digitalni, 229
 FIR, 231
 IIR, 231
 notch, 122, 154, 234
 prilagođeni, 227
 propusnik niskih učestanosti, 69
 propusnik opsega učestanosti, 69
 propusnik visokih učestanosti, 69
 višeg reda, 70
 voltage controlled voltage source, 70
 Wiener-ov, 184, 226
 flater, 119
 fleksor, 130
 frekvencija odabiranja, 78
 frekvencijski opseg, 9
 Furijeova transformacija, 153, 218
 diskretna, 222
 diskretna inverzna, 222
 kratkotrajna, 223

G

galvansko odvajanje
 izolacionim pojačavačem, 77
 transformatorom, 75
 Gibbs-Donnanov uslov ravnoteže, 20
 gradiometar, 189
 granica puštanja, 243
 gustina funkcije verovatnoće, 216

H

H talas, 171
 hiperpolarizacija, 15
 hipotalamus, 163
 Hisov snop, 107
 Hodgkin-Huxleyeve jednačine, 31–33
 holinesteraza, 159

I

inhibicija
 recipročna, 141
 integrator, 66
 interferencija, 122
 invertor, 60
 ishemija, 106
 ispravljač, 65

J

jonski kanali
 gated, 15
 leaking channel, 16
 non-gated, 15
 voltage-gated, 15

Josephson-ov spoj, 186

K

kalcijum pumpa, 135
 kalibracija, 120
 kapilara, 104
 kardiovaskularni sistem, 104
 kardioverter, 209
 kauzalnost, 230
 kičmena moždina, 165
 kokontraktcija, 141
 komora, 105
 moždana, 162
 komparator
 prozorski, 64
 sa histerezisom, 64
 kontrakcija
 izometrična, 138
 izotonična, 138
 tetanična, 139, 202
 kronaksija, 36, 145
 kroskorelacija, 217
 kvantizaciona merna nesigurnost, 79

L

latenca, 170, 180

M

M talas, 171
 magnetoencefalografija, 184–96
 magnetska stimulacija, 211–13
 makrošok, 243, 245
 MAV. *Vidi* ARV
 medula, 162
 MEG. *Vidi* magnetoencefalografija
 membranski napon, 22–24
 merenje
 bipolarno, 115
 unipolarno, 118
 merna nesigurnost, 154
 merna veličina, 5
 meromiozin, 134
 mikrošok, 243, 245
 miofibril, 134
 miofilament, 134
 miozin, 134
 mišić
 srčani, 105
 monoartikularni, 130
 motorna jedinica, 133, 143
 moving average, 152
 multiartikularni, 130
 multiplekser, 87

N

natrijumsko-kalijumska pumpa, 24–25
 Nernstova jednačina, 16–19
 nerv
 cervikalni, 165
 kranijalni, 165

lumbarni, 165
 sakralni, 165
 spinalni, 165
 torakalni, 165
 nervni sistem, 162
 autonomni. *Vidi* vegetativni
 periferni, 167
 spinalni. *Vidi* periferni
 vegetativni, 167
 neuron, 157
 aferentni, 158, 166
 bipolaran, 160
 eferentni, 158, 166
 multipolaran, 160
 pseudo-unipolaran, 160
 unipolaran, 160
 neurotransmiter, 159
 Niquistova učestanost, 81

O

odvodi, 115
 ofset, 39, 45
 ogmentirani odvodi, 116

P

pacemaker, 203
 pamti-prati kolo, 86
 pasivno provođenje, 33
 period odabiranja, 78
 PNS. *Vidi* nervni sistem (periferni)
 pojačavač, 95
 diferencijalni, 61
 EKG pojačavač, 120
 eksponencijalni, 66
 idealni operacioni, 59
 instrumentacioni, 61
 izolacioni, 77
 logaritamski, 66
 realni, 71
 za merjenje bioelektričnih potencijala,
 74
 polučelijski potencijal, 40
 pons, 162
 prag osetljivosti, 243
 prag percepcije. *Vidi* prag osetljivosti
 prekordijalni odvodi, 117
 pretkomora, 105
 pretvarač, 7
 pripoj, 133
 proteini, 15
 prozorska funkcija, 222
 Purkinjeova vlakna, 107

Q

QRS kompleks, 111

R

Ranvierov čvor, 36
 ravan
 frontalna, 114

sagitalna, 114
 transverzalna, 114
 ravnotežni potencijal, 13–26
 refleksi
 Ahilov, 167
 fleksioni, 243
 Hofmanov. *Vidi* H talas
 kičmeni. *Vidi* Ahilov
 patelarni, 168
 spinalni, 171
 repolarizacija, 15, 31
 rezolucija, 78
 režanj, 164
 frontalni, 164
 okcipitalni, 164
 parietalni, 164
 temporalni, 164
 RMS, 152

S

saltatorno provođenje, 36
 sample and hold. *Vidi* pamti-prati kolo
 sarkomer, 134
 sarkoplazmatični retikulum, 135, 137
 Schmitt trigger, 64
 SENIAM, 149
 signal
 bifazni, 35
 bioakustički, 6
 bioelektrični, 5
 biohemijski, 6
 biomagnetski, 5
 biomehanički, 6
 biooptički, 7
 deterministički, 216
 monofazni, 35
 stohastički, 216
 sila
 ekscentrična, 132
 izokinetička, 132
 izometrična, 132
 izomorfna, 132
 koncentrična, 132
 mišićna, 129
 sinapsa, 158
 sinusatrijalni čvor, 107
 sistem 10-20, 174
 sistola, 106
 smoothing, 152
 spektar
 amplitudski, 218
 fazni, 218
 spektralna gustina snage, 218
 SQUID, 185
 stabilnost, 230
 stimulacija
 bifazna, 200
 kompenzovana, 200
 magnetska, 211–13
 naponski kontrolisana, 201
 strujno kontrolisana, 201
 struja reobaze, 37
 strujni izvor, 94

šum
ambijenta, 154
kvantizacije, 154
termalni, 154
ulaza pojačavača, 154

T

T talas, 111
t tubul, 135
tahikardija, 118, 119
talamus, 163
talas
 alfa, 173
 beta, 173
 delta, 174
 teta, 174
teorema odabiranja, 220
tetanizacija, 140
tetiva, 133
TMS. *Vidi* magnetska stimulacija
tonus, 140, 169
transkranijalna magnetska stimulacija.
 Vidi magnetska stimulacija
trasa, 148

tremor, 140
trijada, 135
tropomiozin, 134
troponin, 134
tunelski efekat, 187

U

U talas, 111
unipolarno merenje, 35
usrednjavanje, 172, 183, 234

V

varijansa, 217
vena, 104
Ventricular Activation Time, 112
ventrikula. *Vidi* komora
voltage clamp metoda, 29
voltage follower, 61

Z

združena funkcija raspodele, 216

SADRŽAJ

PREDGOVOR	1
UVOD	5
DEO 1: AKVIZICIJA ELEKTROFIZIOLOŠKIH SIGNALA	5
1. ĆELIJA I ĆELIJSKA MEMBRANA: RAVNOTEŽNI POTENCIJAL	13
1.1 RAVNOTEŽNI POTENCIJAL ĆELIJSKE MEMBRANE	14
1.1.1 ĆELIJSKA MEMBRANA	14
1.1.2 JONSKI KANALI	15
1.2 RAVNOTEŽNI POTENCIJAL: NERNSTOVA JEDNAČINA	16
1.2.1. NERNSTOV POTENCIJAL ZA JONE KALIJUMA I NATRIJUMA	19
1.3 GIBBS-DONNANOV USLOV RAVNOTEŽE	20
1.4. PRENOS JONA KROZ MEMBRANU	20
1.5. RAČUNANJE MEMBRANSKOG NAPONA	22
1.6. NATRIJUM - KALIJUM PUMPA	24
1.7 ELEKTRIČNI MODEL MEMBRANE	25
2. AKCIONI POTENCIJAL	29
2.1 MERENJE STRUJE KROZ ĆELIJSKU MEMBRANU	29
2.2. HODGIN - HUXLEYEVE JEDNAČINE	31
2.3. PRENOŠENJE AKCIONOG POTENCIJALA DUŽ AKSONA	33
2.4. KRONAKSIJA: I - T KRIVA	36
3. ELEKTRODE ZA MERENJE BIOPOTENCIJALA	39
3.1. „ <i>OFFSET</i> ” POTENCIJAL NA KONTAKTU METALA I JONSKOG RASTVORA	39
3.2 KARAKTERISTIKE ELEKTRODNOG „ <i>OFFSET</i> ” POTENCIJALA	45
3.3 ELEKTRODE ZA UZEMLJENJE	48
3.4 IGLENE ELEKTRODE	48
3.5 MIKROELEKTRODE	49
3.6 ELEKTRODE ZA STIMULACIJU	51
3.7 IMPLANTIBILNE ELEKTRODE	52
4. ELEKTRONSKI SKLOPOVI ZA AKVIZICIJU ELEKTROFIZIOLOŠKIH SIGNALA	57
4.1 ELEKTRONSKA KOLA ZA ANALOGNU OBRADU ELEKTROFIZIOLOŠKIH SIGNALA	58
4.1.1 IDEALNI OPERACIONI POJAČAVAČ	59
4.1.2 KOLO ZA INVERTOVANJE	60
4.1.3 KOLO ZA PRAĆENJE	61
4.1.4 INSTRUMENTACIONI POJAČAVAČ	61
4.1.5 KOMPARATOR	63
4.1.6 PROZORSKI KOMPARATOR	64
4.1.7 ISPRAVLJAČ	65
4.1.8 INTEGRATOR	66
4.1.9 KOLO ZA DIFERENCIRANJE	67
4.1.10 AKTIVNI FILTRI	68
4.2 OSOBINE REALNIH (NEIDEALNIH) POJAČAVAČA	71
4.3 SPECIFIČNOSTI BIOELEKTRIČNIH POJAČAVAČA	74
4.4 GALVANSKO ODVAJANJE DELOVA SISTEMA	75
4.5 ANALOGNO - DIGITALNA KONVERZIJA	77
4.5.1 DISKRETIZACIJA I DIGITALIZACIJA KONTINUALNOG SIGNALA	78
4.5.2 D/A KONVERTOR	84
4.5.3 PAMTI - PRATI (SAMPLE AND HOLD) KOLO	86
4.5.4 MULTIPLEKSER	87
4.5.5 A/D KONVERTOR	88

4.6	IZVORI ZA NAPAJANJE (DC/DC KONVERTORI).....	90
4.7	STRUJNI IZVORI ZA NAPAJANJE	94
4.8	PRIMER REALIZACIJE ELEKTROFIZIOLOŠKOG POJAČAVAČA.....	95
5.	ELEKTROKARDIOGRAFIJA - EKG	103
5.1	KARDIOVASKULARNI SISTEM ČOVEKA.....	104
5.1.1	AKCIONI POTENCIJAL SRCA	106
5.1.2	RITMIČKA EKSCITACIJA SRCA I EKG SIGNAL	107
5.1.3	TALASNI OBLIK EKG SIGNALA.....	111
5.2	MERENJE EKG SIGNALA	113
5.2.1	MERENJE EKG SIGNALA U FRONTALNOJ RAVNI.....	115
5.2.2	MERENJE EKG SIGNALA U TRANSVERZALNOJ RAVNI.....	117
5.2.3	MERENJA EKG SIGNALA U SAGITALNOJ RAVNI	118
5.3	EKG UREĐAJ	119
5.4	VEKTORSKI EKG.....	124
5.5	FETALNI EKG.....	126
6.	ELEKTROMIOGRAFIJA - EMG	129
6.1	SKELETNI MIŠIĆNI SISTEM	129
6.1.1	MODEL SKELETNIH MIŠIĆA	129
6.1.2	GRADA SKELETNIH MIŠIĆA.....	133
6.1.3	MEHANIZAM KONTRAKCIJE SKELETNIH MIŠIĆA.....	135
6.2	GLATKI MIŠIĆNI SISTEM.....	142
6.3	ELEKTROMIOGRAFIJA - EMG	143
6.4	UREĐAJ ZA SNIMANJE ELEKTROMIOGRAFIJE	146
6.4.1	STANDARDI ZA OPIS EMG ZAPISA.....	149
6.4.2	PARAMETRIZACIJA EMG SIGNALA.....	152
6.4.3	MERNA NESIGURNOST PRI SNIMANJU EMG SIGNALA	154
7.	MERENJE AKCIONIH POTENCIJALA NERNVIH ĆELIJA.....	157
7.1	NERVNA ĆELIJA.....	157
7.2	ORGANIZACIJA NERNVOG SISTEMA	162
7.3	ELEKTRONEUROGRAFIJA - ENG	170
7.4	ELEKTROENCEFALOGRAFIJA - EEG	172
7.5	KLINIČKA ELEKTROENCEFALOGRAFIJA	174
7.6	EVOCIRANI POTENCIJALI - EP	180
7.6.1	METODE OBRADJE EVOCIRANIH POTENCIJALA	183
7.7	MAGNETOENCEFALOGRAFIJA - MEG.....	184
7.7.1	SIGNALI PRI MERENJU MEG-A	191
7.7.2	OBLASTI PRIMENE MEG-A.....	193
8.	ELEKTRIČNA I MAGNETSKA STIMULACIJA.....	199
8.1	ELEKTRIČNA STIMULACIJA.....	199
8.2	ELEKTRIČNA STIMULACIJA SRČANOG MIŠIĆA	203
8.3	DEFIBRILATOR.....	208
8.4	BEŽIČNI PRENOS SIGNALA	210
8.5	MAGNETSKA STIMULACIJA.....	211
9.	RAČUNARSKA OBRADA BIOMEDICINSKIH SIGNALA.....	215
9.1	PRIKAZ SIGNALA U FREKVENCIJSKOM DOMENU.....	218
9.2	DIGITALIZACIJA I DIGITALNO PROCESIRANJE SIGNALA.....	219
9.3	DISKRETNi SIGNALI.....	222
10.	SIGURNOST I ZAŠTITA U ELEKTRIČNIM MERENJIMA BIOMEDICINSKIH SIGNALA	243
	INDEKS.....	249