

Lana Popović Maneski, Branislava Jeftić

SIGNALI I SISTEMI U REHABILITACIJI

Akadska misao
Beograd, 2015.

Lana Popović Maneski, Branislava Jeftić
SIGNALI I SISTEMI U REHABILITACIJI

Recenzenti

Dr Dejan Popović
Dr Đuro Koruga

Izdaje i štampa

AKADEMSKA MISAO, Beograd

Dizajn naslovne strane

Zorica Marković, akademski slikar

Tiraž

80 primeraka

ISBN 978-86-7466-546-6

Objavlivanje ove knjige je delimično podržano u okviru TEMPUS projekta HUTON.

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.

Sadržaj

Umesto predgovora.....	5
Uvod.....	7
Literatura.....	10
1. Opšta klasifikacija signala	11
1.1 Signali u organizmu od značaja za rehabilitaciju	13
1.2 Prikupljanje i analiza signala	18
Literatura.....	20
2. Prenos informacija u organizmu	21
2.1 Čelijska membrana i kretanje jona.....	21
2.2 Ravnotežni membranski potencijal.....	23
2.3 Akcioni potencijal.....	25
2.4 Refraktorni period.....	26
2.5 Prenos akcionog potencijala	28
2.6 Kodiranje informacije akcionim potencijalima	30
Literatura.....	31
3. Nervni sistem	32
3.1 Mozak i moždani signali.....	35
3.2 Elektroencefalografija (EEG)	37
3.2.1 EEG ritmovi	41
3.2.2 Analiza EEG signala	42
Literatura.....	46
3.3 Kortikalni evocirani potencijali	47
3.3.1 Izdvajanje EP iz EEG signala	47
3.3.2 Analiza evociranih potencijala.....	49
3.3.3 Vrste evociranih potencijala	49
Literatura.....	54
3.4 Magnetoencefalografija (MEG).....	55
3.4.1 Analiza MEG signala.....	58
3.4.2 Poređenje MEG sa drugim sistemima.....	59
Literatura.....	60
3.5 Kompjuterska tomografija - CT sken	61
3.5.1. Formiranje CT slike	63
Literatura.....	66
3.6 Magnetna rezonanca (MRI)	67

3.6.1	Određivanje izvora MR signala	74
3.6.2	Formiranje MR slike	76
3.6.3	Funkcionalna magnetna rezonanca - fMRI	79
	Literatura.....	81
3.7	Signali u perifernom nervnom sistemu	82
3.7.1	Elektroencefalografija (EEG)	86
3.7.2	Analiza EEG i EMG signala.....	87
3.7.3	Hronaksimetrija (I-T kriva).....	89
	Literatura.....	91
4.	Mišićni sistem	92
4.1	Skeletni mišići.....	92
4.2	Elektromiografija (EMG).....	99
4.2.1	Karakteristike EMG signala.....	104
4.2.2	Analiza EMG zapisa.	105
	Literatura.....	110
4.3	Motorni evocirani potencijali.....	111
	Literatura.....	114
4.4	Srčani mišić.....	115
4.4.1	Elektrokardiografija (EKG)	121
4.4.1.1	EKG talasi i intervali	122
4.4.1.2	Merenje EKG signala.....	124
4.4.1.3	Patološki EKG zapisi	128
	Literatura.....	129
4.4.2	Fonokardiografija (FKG)	130
	Literatura.....	131
4.4.3	Ultrazvuk srca	132
4.4.3.1	Formiranje ultrazvučne slike.....	136
	Literatura	137
5.	Skeletni sistem	138
5.1	Rentgensko zračenje za posmatranje anatomije	143
	Literatura.....	145
5.2	Analiza pokreta	146
5.2.1	Sistemi za snimanje kinematike pokreta.....	147
5.2.1.1	Sistemi sa kamerama.....	147
5.2.1.2	Inercijalni senzori.....	150
5.2.1.3	Potenciometri i goniometri	152
5.2.1.4	Profili kinematičkih signala pri pokretima	154

5.2.2 Sistemi za merenje dinamike pokreta	158
Literatura.....	163
6. Vaskularni i respiratorni sistem	164
6.1 Vaskularni sistem.....	165
6.1.1 Srčani puls.....	165
6.1.2 Krvni pritisak	167
6.1.3 Brzina protoka krvi - Dopler krvnih sudova.....	169
6.2 Respiratorni sistem.....	173
6.2.1 Ritam disanja	174
6.2.2 Kapacitet pluća.....	175
6.2.3 Brzina protoka vazduha	176
6.2.4 Zasićenost krvi kiseonikom	177
Literatura.....	179

Umesto predgovora

Signali i sistemi u rehabilitaciji? Neuobičajen naslov. Da bismo objasnili motivaciju za pripremu rukopisa za ovaj udžbenik namenjen akademski obrazovanim ljudima sa predznanjima u oblastima medicine, rehabilitacije, inženjerstva, sporta ili srodne discipline, prikazaćemo realne situacije u toku rehabilitacije.

- Pacijentkinja R.M. ima 63 godine, visoka je 175 cm, ima 80 kg, zaposlena u pošti, ne puši i ne pije, ima porodicu i doživela je moždani udar koji je saniran u jedinici za urgentnu medicinu. Prešla je u Kliniku za rehabilitaciju sa smanjenim sposobnostima da stoji, hoda, i koristi ruku (leva strana tela).
- Pacijent M.B. ima 27 godina, visok je 180 cm, ima 72 kg, bivši sportista, ne puši, umereno pije, nije oženjen, i doživeo je saobraćajnu nesreću (povreda vratnog dela kičme) koja je rezultovala paralizom od nivoa vrata na dole.
- Pacijentkinja I.G. ima 30 godina, visoka 170 cm, ima 63 kg, zaposlena u banci, ne pije i ne puši, ima porodicu i kao rezultat pada je izgubila kontrolu i senzacije na obe noge.
- Pacijent J.L. ima 74 godine, visok je 173 cm, ima 70 kg, penzioner je, polomio je kuk i urađena je operacija u kojoj mu je ugrađena bezcementna proteza kuka.

Opšta ocena je da svi treba da budu hospitalizovani i da im je potrebna maksimalna pomoć da bi u najvećoj meri unapredili korišćenje preostalih fizioloških resursa. Rehabilitacija treba da spreči atrofije, kontrakture i druge promene koje prate prestanak kretanja. Rehabilitacija služi da pacijente nauči novim veštinama koje mogu da im pomognu da se ponovo integrišu u socijalne strukture iz kojih potiču. Rehabilitacija mora da bude adaptirana pacijentu sa gledišta njegovih realnih potreba i mogućnosti.

Fiziološki i drugi signali su mere koje odražavaju stanje organizma (sistema). Različita poglavlja knjige se odnose na funkciju i dijagnostičke metode u okviru različitih sistema organa čoveka u cilju olakšanog i sveobuhvatnog sagledavanja problema koji prati pojedinog pacijenta.

Pacijentkinja R.M. je doživela moždani udar pa je od izuzetnog značaja pratiti anatomske promene koje su nastale u moždanim strukturama kao rezultat moždanog udara, nenormalne cirkulacije posle akutnog moždanog udara i primarnog prirodnog oporavka pomognutog nekim farmakološkim sredstvima. Praćenje anatomskih promena je moguće snimanjem moždanih elektrofizioloških signala (EEG, MEG), snimanjem anatomije primenom CT skenera ili magnetne rezonance (MRI), a posledice tih promena je moguće proceniti drugim neurološkim testovima koji uključuju elektromiografiju (EMG) i elektroneurografiju (ENG). Praćenje funkcionalnih promena je moguće primenom objektivnih metoda za praćenje pokreta. Moždani udar je u velikom broju slučajeva praćen promenama u kardiovaskularnom sistemu pa je posebno važno procenti i pratiti stanje srca (EKG, ultrazvuk) kao i stanje protočnosti krvnih sudova posebno u vratnom delu (krvni pritisak, kolor Dopler).

Pacijent M.B. pripada grupi koja se u skladu sa internacionalnim skalama zove tetraplegija. Tetraplegija može da bude kompletna ili nekompletna, tj. anatomski potpuni prekid kičmene moždine ili oštećenje pojedinih traktova kičmene moždine. Ovo je indikacija za snimanje kičmene moždine (MRI), ali ne samo neposredno posle

povrede već i posle nekog vremena kada dođe do potpunog povlačenja otoka i smirivanja lokalnih promena. U ovom slučaju posmatranje moždanih struktura nije od interesa, osim ako je pri povredi postojala i mogućost povrede mozga. Osnovni pregledi treba da uključuje analizu evociranih potencijala (EP), i na taj način diferencijalnu dijagnostiku koje funkcije mogu da se potencijalno vrate, a koje funkcije moraju da se kompenzuju primenom različitih alata i instrumenata koji su razvijeni za pacijente sa tetraplegijom. Posebno treba obratiti pažnju na autonomni nervni sistem, jer nemogućnost kontrole telesne temperature, disanja, znojenja, urinarnog i digestivnog sistema predstavljaju nevidljivog neprijatelja uspešne rehabilitacije.

Pacijentkinja I.G. pripada grupi koje se prema internacionaloj klasifikaciji grupišu u paraplegije. Paraplegija može da bude kompletna i nekompletna. Paraplegija može da bude spastična (povrede kičmene moždine) ili flacidna (povrede perifernih nerava). Paraplegija će u zoni tela (dermatomi i miotomi) koja direktno odgovara nivou povrede, i koja može da zahvati i više segmenata, dovesti do smrti kičmenih nerava, pa samim tim denervacije mišića koji su inervirani tim nervima. Mišići kojima dolaze signali nervima koji polaze iz kičmene moždine ispod povrede će biti inervirani, ali pacijentkinja I.G. neće moći njima voljno da upravlja. Mišići koji su povezani sa nervima iznad nivoa povrede će sačuvati svoje normalne funkcije. Slično je i sa senzornim funkcijama, ali nivo senzornog gubitka i motornog gubitka ne moraju da budu identični. U slučaju nekompletne povrede će i motorne i senzorne funkcije delimično biti očuvane, ali jako modifikovane, što se može proceniti iz refleksnih odgovora na pobudu. Ako je povreda na gornjem delu toraksa pacijentkinja će imati teškoće i sa sedenjem, i svakako sa stajanjem. Ako je povreda na srednjem delu toraksa tada će sedenje biti relativno normalno. Ako je povreda na donjem kraju torakalnog dela (T12 i niže) noge će biti oduzete, ali će kukovi praktično normalno funkcionisati i pacijentkinja će već ukrućenjem kolena biti u stanju da stoji i da se kreće sa osloncem preko ruku. U odnosu na visinu povrede menjaće se i gubitak autonomnih funkcija (npr. urinarni trakt).

J.L. je pacijent kao rezultat traume i operacije. S obzirom na godine osnovni parametri koje treba pratiti su vezani za njegov opšti status (EKG, pritisak, stanje krvnih sudova, osteoporozu, i slično). U fazi rehabilitacije osnovna pažnja treba da bude posvećena pravilnom opterećivanju kako biološkog tako i implantiranog veštačkog kuka. Analiza hoda i trening, koji počinju u fazi u kojoj su strukture posle operacije formirane, je glavni element koji doprinosi optimalnom toku rehabilitacije.

Ova knjiga je uključila sve elemente koji su pomenuti na način koji omogućava akademski obrazovanim ljudima da brzo i efikasno nauče koji je najbolji pristup i kako se sa pravom merom može koristiti postojeća tehnologija u rehabilitaciji.

Uvod

Rehabilitacija je proces reedukacije organizma na način koji u najvećoj mери omogućava normalan i kvalitetan život čoveku posle bolesti ili povrede. Senzorno-motorna rehabilitacija je od posebnog značaja za osobe posle povrede ili oboljenja centralnog i perifernog nervnog sistema, mišićnog i skeletnog sistema, ali i za osobe sa genetskim promenama pomenutih sistema. Sadržaj ove knjige su signali i sistemi koji karakterišu organizam čoveka, a koji su od značaja za senzorno-motornu rehabilitaciju.

Na početku ćemo definisati pojam signala na način na koji ćemo ga koristiti u ovoj knjizi. Matematički gledano signal je funkcija koja zavisi od jedne ili više nezavisno promenljivih. Na osnovu ove, prilično široke definicije, praktično svaka promena, odn. svaka veličina koja se menja u prostoru ili vremenu se može smatrati signalom. Govorni signal (promena amplitude i frekvencije sa vremenom) se može predstaviti kao funkcija od jedne (1D) nezavisno promenljive: vremena, dok se recimo signal dobijen obradom slike može predstaviti kao funkcija dve (2D) nezavisno promenljive: dve prostorne koordinate (promena intenziteta osvetljenja pojedinog piksela u ravni u slučaju monohromatske slike), video signal se može tretirati kao funkcija tri (3D) nezavisno promenljive: dve prostorne koordinate i vremena, itd.

Fizički gledano signal se može posmatrati kao veličina koja dolazi iz nekog izvora energije ili, drugačije rečeno, promena energije nekog sistema ili njegovog dela.

U oba slučaja osnovni značaj signala je u informaciji koju signal sadrži. U ovom kontekstu u teoriji signala i sistema usvojena je definicija koja kaže je da je **signal vremenski ili prostorno promenljiv fizički fenomen koji nosi neku informaciju**.

Pod signalima koji su od značaja za rehabilitaciju posmatramo dve klase: biomedicinske signale koji potiču od organizma i signale koje generišu uređaji koji se primenjuju tokom rehabilitacije. Biomedicinski signali podrazumevaju sve ulaze i izlaze, kao i unutrašnje funkcije koje biološki sistemi obrađuju ili proizvode, kao što su napon, pritisak, pomeraj, temperatura, koncentracija hemijskih supstanci, itd. Ovoj klasi pripadaju signali moždane električne aktivnosti (EEG, MEG), mišićne aktivnosti (EMG), itd. Drugoj klasi signala pripadaju signali koji nastaju kao rezultat primene uređaja koji se koriste za različita merenja radi procene stanja i oporavka pacijenta kao što su signali sa merne platforme (*force plate*) kojima se procenjuje balans, snimci sa kamera kojima se prate parametri hoda, sila merena dinamometrom pri stisku šakom, itd.

Naglasak na informaciju koju sadrži signal je bitan jer postoje i promenljivi fizički fenomeni koji ne nose korisnu i upotrebljivu informaciju. Ovakvi fenomeni zovu se **šumovi** odn. **poremećaji**. Šum je nepoželjna pojava jer pored toga što ne nosi nikakvu informaciju često utiče na posmatrani signal i „zamazgljuje“ informaciju koju taj signal nosi. Eliminacija ovog fenomena je moguća i sprovodi se obradom signala.

Pri posmatranju nekog fizičkog fenomena o kome se želi dobiti informacija veoma često se koriste merni instrumenti koji informaciju o nekoj fizičkoj veličini pretvaraju u električni signal (napon, struju, i slično). Osnovni razlog je što su merenja električnih veličina pouzdana i tehnološki usavršena, a idealni su za obradu i memorisanje primenjujući računarske sisteme.

Objasnićemo ovde kratko i šta, formalno, podrazumevamo pod pojmom sistem. **Sistem je skup međusobno povezanih elemenata koji deluju kao jedna celina.** Kada je pobuđen nekim signalom (pobuda) na svom ulazu sistem će proizvesti odgovarajući signal (odziv) na svom izlazu. Sistem može biti mehanički, električni, biološki, ekonomski, ekološki, a često i kombinovan. Poseban oblik sistema, koji je glavni predmet razmatranja u ovoj knjizi je nastao milenijumskim procesom evolucije. Naime, od trenutka kada je nastala ćelijska membrana (polupropustljiva opna koja odvaja dve celine) se kroz proces samo-organizacije stvorio veoma složeni sistem koji integriše više sistema. Evolucija je koristeći mitozu (deljenje) od jedne ćelije doprinela da ljudski organizam danas integriše različite celine u okviru skeletnog, mišićnog, nervnog, vaskularnog, respiratornog, digestivnog, endokrinog, reproduktivnog, imunog sistema čije delovanje je potpuno različito u najvećem broju slučajeva od sistema koje je čovek napravio. U knjizi ćemo razmatrati i veštački, namenski projektovane sisteme koji imaju cilj da obezbede određenu funkciju (npr. električni stimulator sa elektrodama za aktivaciju mišića).

Jedna kategorija veštačkih sistema omogućava obradu signala. Ovi sistemi, u opštem slučaju, omogućavaju transformaciju jednog signala (ulaznog) u drugi, pogodniji ili poželjniji signal (izlazni). Signal se u sistemu može obrađivati kako bi se iz njega izvukla potrebna informacija i predstavila na način adekvatan za interpretaciju, dalju analizu i sl. Obrada signala može imati i za cilj da se na izlazu iz sistema dobije neki fizički efekat npr. generisanje radio signala ili pak neka funkcija aktivacije (npr. prekidanje strujnog kola ili zatvaranje nekog ventila). Korišćenjem informacija dobijenih obradom signala mogu se predvideti neki fenomeni koji će se dogoditi u budućnosti. Pored toga, obradom se signal može transformisati u oblik pogodniji za prenos na daljinu. Sistemi za obradu signala često primarno analogno obrađuju fizički signal (pojačanje signala, kašnjenje, prekidanje, itd.), pa zatim taj obrađeni signal pretvaraju u digitalnu formu. Deo obrade signala uključuje i digitalno procesiranje koje danas postaje sve značajnije zbor napretka računarstva i elektronskih komponenti koje pretvaraju analogni u digitalni oblik.

U ovom opštem uvodnom delu daćemo i objašnjenje šta je matematički model sistema ili signala. Iako su sistemi i signali, generalno, izuzetno raznovrsni pokazalo se da svi oni imaju neke zajedničke karakteristike i da se mogu, barem u izvesnoj meri, tretirati istim matematičkim aparatom tj. analizirati koristeći istu metodologiju. U osnovi analize i sinteze signala i sistema leži njihovo predstavljanje pomoću odgovarajućih jednačina, odnosno formiranje matematičkih modela sistema.

Možemo reći da je matematički model sistema skup jednačina koje opisuju fizički fenomen tako da se na osnovu poznavanja nezavisno promenljivih mogu proceniti vrednosti signala, odn. veličine koja je odabrana da reprezentuje taj signal. Na ovom mestu ćemo samo pomenuti da je razvoj veštačke inteligencije i mašinskog učenja (npr. veštačke neuralne mreže) doprineo da se neki procesi koji karakterišu sistem modeliraju primenjujući tzv. *black-box* model. Ovaj tip modela nije baziran na fizičkom procesu, već na utvrđivanju logičke mreže koja podešavanjem težinske

vrednosti pojedinih delova mreže dobija oblik koji povezuje ulazne i izlazne podatke sa velikom verovatnoćom, tj. minimalnom entropijom.

Treba voditi računa da je matematički model uvek samo aproksimacija, manje ili više tačna, realnog fizičkog signala odn. sistema. Ovo znači da se i rezultati analize moraju kritički posmatrati, te da se stalno mora voditi računa o odnosu teorijskih rezultata i fizičke realnosti.

U zavisnosti od vrste signala, matematička funkcija kojom se on modeluje može imati jednu ili više nezavisno promenljivih. Kod jedne široke klase 1D signala ta nezavisno promenljiva je vreme. U ovom slučaju signal se modeluje pomoću diferencijalnih jednačina (kontinualni signali) ili diferencnih jednačina (diskretni signali). Često je pogodno, sa stanovišta analize ili sinteze, da se vremenski zavisne funkcije koje opisuju signal odn. sistem odgovarajućim transformacijama prevedu u domen neke druge nezavisno promenljive veličine. Otuda se signali i sistemi modeluju i analiziraju u vremenskom, frekvencijskom i kompleksnom domenu. Moderne, napredne metode omogućavaju i analizu signala u npr. vremensko- frekvencijskom domenu (*wavelet* analiza).

Bitno je napomenuti, čisto radi konceptualnog razumevanja, da se proces obrade signala odvija na apstraktnim reprezentacijama fizičkih veličina a ne na tim samim veličinama. Takođe, i sam izbor tipa apstraktne reprezentacije datog fizičkog fenomena određuje prirodu elemenata za obradu signala. Na primer, signal koji nosi informaciju o temperaturi koja se meri termistorom će biti predstavljen promenom generisanog napona i u ovom slučaju će element za primarnu obradu signala biti neki operacioni pojačavač realizovan pomoću analognih elektronskih sklopova.

Obrada signala podrazumeva analognu i digitalnu obradu signala. Pod analognom obradom signala se podrazumeva obrada signala pomoću elektronskih kola dok se digitalna obrada signala obavlja pomoću računara. Većina signala u prirodi ali i većina veštački proizvedenih signala je analognog oblika. Analogni signal je opisan sa beskonačno mnogo izmerenih vrednosti i kao takav ne može da se podvrgne digitalnoj obradi zbog ograničenja memorije računara. Zbog toga se analogni signali prvo, po odgovarajućim pravilima, konvertuju u digitalne signale primenom analogno-digitalnih konvertora. Na digitalnim signalima se obavlja sva potrebna obrada, a potom se, prema potrebi, opet vraćaju u analogni oblik primenom digitalno-analognih konvertora.

Analiza signala od interesa za rehabilitaciji se bavi akvizicijom i obradom signala u kojima su sadržane informacije koje potiču od živih sistema, odn. čovekovog organizma. Ovi signali pružaju važne informacije o odzivu bioloških sistema i nezaobilazan su deo savremene medicinske dijagnostičke prakse.

Veoma je važna primena neinvazivnih ili minimalno invazivnih medicinskih mernih procedura. Ovo postavlja dodatne zahteve za preciznim poznavanjem zasebnih osobina biomedicinskih signala radi njihovog adekvatnog razlaganja i pravilnog tumačenja. Takođe, od posebnog značaja je strogo poštovanje etičkih principa koji su precizno definisani u medicini.

Povećan zahtev za dugoročnim praćenjem stanja pacijenata nameće potrebu za stalnim protokom informacija koji je ograničen efikasnošću njihovog skladištenja, odnosno kompresije. Savremene metode obrade signala omogućavaju razlaganje i prenos velike količine važnih informacija uz sve veće smanjenje vremenskog

kašnjenja. Ovakav tretman omogućava napredak medicinske tehnologije ka projektovanju sistema daljinske dijagnostike i telerehabilitacije.

Literatura

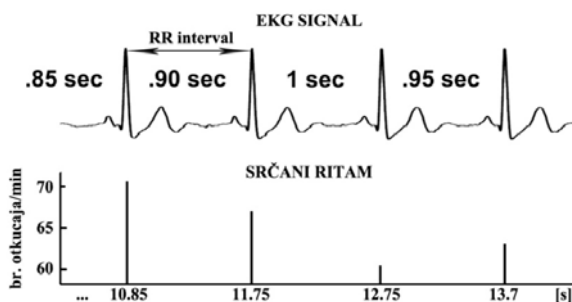
- [1] Barros de Mello C.A. (Ed.) Biomedical Engineering, InTech, ISBN 978-953-307-013-1, 658 p., 2009. (<http://www.intechopen.com/books/biomedical-engineering>)
- [2] Campolo D. (Ed.) New Developments in Biomedical Engineering, InTech, ISBN 978-953-7619-57-2, 724 pages, 2010 (<http://www.intechopen.com/books/new-developments-in-biomedical-engineering>)
- [3] Farina D., Jensen W., Akay M. (Eds.) Introduction to Neural Engineering for Motor Rehabilitation, ISBN: 978-0-470-91673-5, 600 p, 2013, Wiley-IEEE Press
- [4] Fazel-Rezai R. (Ed.) Biomedical Engineering - From Theory to Applications, InTech, ISBN 978-953-307-637-9, 498 p, 2011 (<http://www.intechopen.com/books/biomedical-engineering-from-theory-to-applications>)
- [5] Naik G.R. (Ed.), Recent Advances in Biomedical Engineering, InTech, ISBN 978-953-307-004-9, 660 p, 2009., Chapters published October 01, 2009 (<http://www.intechopen.com/books/recent-advances-in-biomedical-engineering>)
- [6] Webster J.G. (Ed.) Medical instrumentation: application and design, Fourth edition, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2009.
- [7] Đ. Koruga, I. Hut, B. Jeftić, Autorizovane beleške za predmet Obrada signala 2012/2013, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu

1. Opšta klasifikacija signala

Signali se na osnovu karakteristika informacija koje nose mogu podeliti u više klasa.

Na osnovu prirode nezavisno promenljive (npr. vreme) signali se mogu podeliti na kontinualne i diskretne.

Kao prvi primer posmatrajmo kontinualni signal (napon) izmeren između ručnih zglobova leve i desne ruke (sl. 1.1, gornji panel) i diskretni signal srčanog ritma (sl. 1.1, donji panel) koji pokazuje broj otkucaja srca u minutu. Srčani ritam se izračunava na osnovu trajanja intervala između pojave dva susedna R zupca u EKG signalu. Srčani ritam je bitan parametar u dijagnostici oboljenja kardiovaskularnog sistema, testovima opterećenja u sportskoj medicini, rehabilitaciji i sl.



Sl.1.1.1. EKG signal i dijagram promene srčanog ritma u toku vremena.

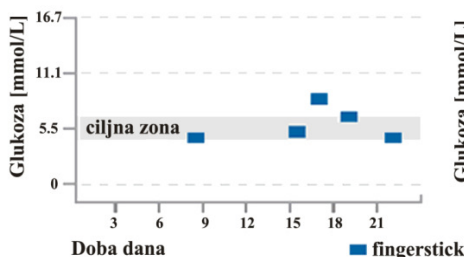
Drugi primer je prikazan na slici 1.2. Na levom dijagramu su prikazani rezultati diskretnog merenja nivoa glukoze u krvi pomoću uređaja kojim se koristi izolovani uzorak krvi iz prsta i direktno očitava vrednost na monitoru, i kontinualnog merenja koristeći implantirani biohemijski senzor i elektronski sklop koji taj signal pretvara u električni signal koji se bežično šalje do monitora (desni dijagram). Praćenje promena ovog signala je esencijalno kod osoba koje imaju poremećaj u lučenju insulina (dijabetes, tip I) ili efikasnosti iskorišćenja insulina (dijabetes, tip II). Ukoliko su očitane vrednosti iznad granica "ciljne zone" neophodno je dodavanje insulina u krvotok, a ako su očitane vrednosti ispod granice neophodno je unošenje ugljenih hidrata u organizam. Očigledno je da je za očitavanje diskretne vrednosti potrebno određeno vreme i da je broj ponavljanja merenja u toku dana ograničen pored ostalog i brojem uboda da bi se dobili uzorci krvi.

Navedeni primeri imaju nešto zajedničko, naime, prikazuju signale koji su **diskretni** (sl. 1.1, donji panel; sl 1.2, levi panel) u vremenu (uobičajena oznaka je DT signal od engleskih reči *Discrete-Time Signals*), te su praktično "sadržani" u kontinualnim signalima (sl. 1.1, gornji panel; sl 1.2, desni panel). Diskretni signali su definisani samo u pojedinim trenucima ili intervalima, kao što su sekunde, minuti, sati, dani, itd.

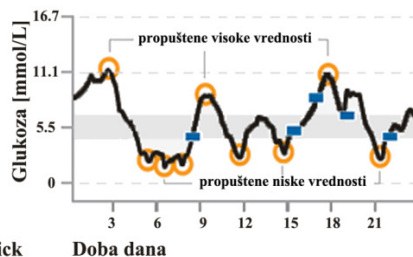
Bez obzira na to što je vreme neprekidna funkcija, ovi signali su diskretni ili zbog toga što mi merenja vršimo u fiksnim ili promenljivim intervalima ili zbog toga što je po svojoj prirodi signal diskretan (npr. u trenucima između pojave dva susedna R zupca u EKG signalu srčani ritam se ne menja, ili preciznije, nismo u mogućnosti da precizno izračunamo promenu ritma). **Kontinualni** signali u vremenu (sl. 1.1, gornji panel; sl. 1.2, desni panel) su signali merljivi u svakom trenutku (uobičajena oznaka za njih su CT signali od engleskih reci *Continuous-Time Signals*). EKG signal sa slike 1.1 prikazuje električnu aktivnost srčanog mišića koja je jako korelisana sa kontrakcijama srčanih pretkomora i komora i protokom krvi kroz aortu. Primećuje se da je ovaj signal periodičan jer se pikovi (izraženi maksimumi) pojavljuju u regularnim vremenskim intervalima. Drugi primer kontinualnog signala (sl. 1.2, desni panel) pokazuje da pri upotrebi implantiranog senzora rešavamo problem mogućnosti propuštanja detekcije odstupanja vrednosti od "ciljne zone".



DISKRETNO MERENJE



KONTINUALNO MERENJE



Sl.1.2. Rezultati merenja koncentracije glukoze u krvi iz uzoraka krvi iz prsta (fingerstick) u definisanim trenucima u toku dana (levo) i pomoću implantiranog senzora koji neprekidno meri koncentraciju.

Iako većina bioloških signala nije diskretna, diskretni signali imaju važnu ulogu zbog napretka digitalne tehnologije. Sofisticirani medicinski uređaji pretvaraju kontinualne signale iz ljudskog organizma u sekvence diskretnih signala. Ovi diskretni signali se mogu efikasno analizirati i interpretirati pomoću računara. Jednostavan primer je kompjuterska tomografija (CT skener) ili kompjuterska aksijalna tomografija kod kojih se formiraju digitalni signali na izlazu detektora na koje deluje kontinualno zračenje. Ove digitalizovane i diskretne vrednosti se zatim digitalno obrađuju (npr. *back projection*) da bi se generisala 3D kompjuterska slika unutrašnjih organa ispitanika. Na kraju procesa obrade signala se formirani diskretni signali pretvaraju u tonove na sivoj skali i prikazuju kao slike organa na monitoru ili filmu.

Signali se takođe mogu klasifikovati kao deterministički ili stohastički (slučajni ili *random*) signali.

Deterministički signali su signali čija se vrednost može tačno predvideti u budućnosti. Deterministički signali se mogu opisati u analitičkom obliku (matematičkom funkcijom) ili u grafičkom obliku. Vrednosti determinističkih signala

se mogu tokom vremena ponavljati i tada se oni nazivaju **periodični signali** i predstavljaju se u sledećem obliku:

$$s(t) = s(t + nT)$$

gde je t vreme, n ceo broj i T perioda ponavljanja signala.

Realni biološki sistemi gotovo uvek sadrže neki nepredviđeni šum ili promenu parametara i zato nisu u potpunosti deterministički. EKG normalnog rada srca u mirovanju je primer signala koji je prividno identičan od otkucaja do otkucaja, ali ipak sadrži nepredviđene komponente. Osnovni EKG talasni oblik sadrži P talas, QRS kompleks i T talas koji se ponavljaju. Međutim, precizni oblik P talasa, QRS kompleksa i T talasa se razlikuje od otkucaja do otkucaja srca.

Stohastički signali se ne mogu prikazati matematičkim izrazima jer nemaju karakteristike koje se opisuju funkcijama zbog toga se sastoje iz slučajnih nizova vrednosti. Za analizu slučajnih signala se najčešće koriste statističke metode i teorija verovatnoće. Primenjujući statističke metode mogu se proceniti neke karakteristike signala (npr. srednja vrednost (*mean*), standardna devijacija (*std*), medijana). Elektrofiziološki signali koji su sumarne aktivnosti većeg broja ćelija su karakteristični primeri stohastičkih (sličajnih) signala (npr. elektromiogram ili elektroencefalogram).

Stacionarni slučajni signali su signali za koje statistički ili frekvencijski spektar ostaju konstantni u toku posmatranja. S obzirom da procesi koje modeliramo kao determinističke često sadrže komponentu koja ima karakteristike slučajnog procesa, klasa slučajnih signala ima veliki značaj u obradi i analizi signala.

1.1 Signali u organizmu od značaja za rehabilitaciju

Biomedicinski signali ili biosignali su prostorni, vremenski ili prostorno-vremenski zapisi bioloških pojava kao što su npr. moždana aktivnost ili aktivnost mišića. Biosignali sadrže informacije koje su od velikog značaja za razumevanje fizioloških mehanizama specifičnih bioloških pojava ili sistema od kojih potiču ovi signali.

Signali od značaja za rehabilitaciju često pripadaju klasi „mehaničkih“ signala koji nastaju interakcijom organizma i objekata u prostoru (npr. sila reakcije podloge prilikom hoda ili sila između objekta i šake/prstiju pri hvatu), kretanjem u prostoru (npr. kinematika hoda), ili interakcijom unutrašnjih sistema u organizmu (npr. promenljivi pritisak krvi na zidove krvnih sudova koji rezultuje pulsiranjem i zvukovima koji mogu da se registruju stetoskopom ili drugim pretvaračem).

Signali koji potiču od čovekovog organizma pružaju važne informacije o stanju unutrašnjih organa, odzivu na spoljne stimulse, opštoj kondiciji, ukupnom zdravstvenom stanju i raznim drugim parametrima i nezaobilazan su deo savremene medicinske dijagnostičke prakse.

Signali koji nastaju kao rezultat dejstva uređaja na organizam ili signali koji nastaju usled obavljanja određenih akcija telom i unutar tela mogu da se koriste i kao elementi povratne sprege za kontrolu veštačkih organa (npr. kontrola mioelektrične proteze šake kontrakcijama očuvanih mišića podlaktice), *biofeedback* i slično.

Na osnovu porekla signali od interesa u rehabilitaciji se mogu podeliti u sledeće grupe: