

Lana Popović Maneski, Branislava Jeftić,  
Nebojša Malešević

# SIGNALI I SISTEMI U REHABILITACIJI

DRUGO IZDANJE

Akademski misao  
Beograd, 2019.

Lana Popović Maneski, Branislava Jeftić, Nebojša Malešević  
SIGNALI I SISTEMI U REHABILITACIJI

Drugo izdanje

*Recenzenti*

Dr Dejan Popović  
Dr Đuro Koruga

*Izdaje*

AKADEMSKA MISA0, Beograd

*Izrada CD izdanja*

AKADEMSKA MISA0, Beograd

*Dizajn naslovne strane*

Zorica Marković, akademski slikar

*Tiraž*

100 primeraka

ISBN 978-86-7466-794-1

Dostupno u elektronskoj formi na sajtu izdavača.  
[www.akademska-misao.rs](http://www.akademska-misao.rs)

## 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	Elektroneurografija (ENG) .....	86
3.7.2	Analiza ENG i EMNG 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
4.2.3	Intramuskularni EMG .....	110
4.2.4	Multikanalni EMG.....	115
4.2.5	Mehanomiografija (MMG).....	122
	Literatura.....	127
4.3	Motorni evocirani potencijali.....	128
	Literatura.....	131
4.4	Srčani mišić.....	132
4.4.1	Elektrokardiografija (EKG) .....	138
4.4.1.1	EKG talasi i intervali .....	139
4.4.1.2	Merenje EKG signala.....	141
4.4.1.3	Patološki EKG zapisi .....	145
	Literatura.....	146
4.4.2	Fonokardiografija (FKG).....	147
	Literatura.....	148
4.4.3	Ultrazvuk srca .....	149
4.4.3.1	Formiranje ultrazvučne slike.....	153
	Literatura.....	154
5.	Skeletni sistem .....	155
5.1	Rentgensko zračenje za posmatranje anatomije .....	160
	Literatura.....	162
5.2	Analiza pokreta .....	163
5.2.1	Sistemi za snimanje kinematike pokreta.....	164
5.2.1.1	Sistemi sa kamerama.....	164

5.2.1.2 Inercijalni senzori.....	167
5.2.1.3 Potenciometri i goniometri .....	169
5.2.1.4 Profili kinematičkih signala pri pokretima .....	171
5.2.2 Sistemi za merenje dinamike pokreta .....	175
Literatura.....	180
6. Vaskularni i respiratorni sistem .....	181
6.1 Vaskularni sistem.....	182
6.1.1 Srčani puls.....	182
6.1.2 Krvni pritisak .....	184
6.1.3 Brzina protoka krvi - Dopler krvnih sudova.....	186
6.2 Respiratorni sistem.....	190
6.2.1 Ritam disanja .....	191
6.2.2 Kapacitet pluća.....	192
6.2.3 Brzina protoka vazduha .....	193
6.2.4 Zasićenost krvi kiseonikom .....	194
Literatura.....	196



## 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 doživio 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 proćnosti 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. anatomske 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 mogućnost povrede mozga. Osnovni pregledi treba da uključe 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 ne 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, osteoporoza, 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 koji treba da u najvećoj meri omogućiti 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. Ovaj udžbenik razmatra makroskopske signale i sisteme 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 tretirano signal je funkcija koja zavisi od jedne ili više nezavisno promenljivih veličina. Na osnovu ove, prilično široke definicije, praktično svaka promena, odnosno svaka veličina koja se menja u prostoru ili vremenu se može smatrati signalom. Govorni signal (promena amplitude i frekvencije vibracija vazduha u vremenu) 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 vreme, itd.

Fizički tretirano signal se može posmatrati kao veličina koja dolazi iz nekog izvora 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 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 koji potiču od moždane aktivnosti (električna i magnetska polja), mišićne aktivnosti (električna i zvučna), itd. Drugoj klasi signala pripadaju signali koji nastaju merenjem interakcije trla sa okolinom radi procene stanja i oporavka pacijenta (npr., reakcija podloge pri stajanju, sila hvata, položaj tela i ili dela tela u prostoru).

Naglasak na informaciju koju sadrži signal je bitan jer postoje i promenljivi fizički fenomeni koji ne nose korisnu i upotrebljivu informaciju i ne karakterišu stanje organizma. 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 „zamagljuje“ informaciju koju taj signal nosi. Eliminacija ovog fenomena 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 ukratko 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