



ANALIZA PRIMENE SUVIH ELEKTRODA U ELEKTROFIZIOLOŠKIM MERENJIMA  
ANALYSIS OF THE USE OF DRY ELECTRODES IN ELECTROPHYSIOLOGICAL  
MEASUREMENTS

Vesna Kokotović, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

**Oblast – BIOMEDICINSKO INŽENJERSTVO**

**Kratka sadržaj** – Električni signali u organizmu odražavaju stanje njegovih bioloških sistema, njihova obrada se vrši u cilju proučavanja ponašanja tih sistema, odnosno organa. Snimanje elektrofizioloških signala se vrši korišćenjem elektroda, pomoću kojih se registruje razlika biopotencijala, nakon čega se dobijeni signal šalje ka pojačavaču i A/D konvertoru. Komercijalno dostupne elektrode za elektrofiziološka snimanja su elektrode prije čije upotrebe je potrebno pripremiti kožu, odnosno očistiti je i naneti sloj elektrofiziološkog rastvora, provodne paste ili gela. U ovom radu su proučavane elektrode koje se koriste bez prethodne pripreme kože, takozvane suve elektrode. Urađeno je snimanje EKG i EMG signala standardnim Ag/AgCl i suvim elektrodama i izvršeno poređenje dobijenih signala.

**Gljučne reči:** Elektrofiziološka snimanja, biopotencijali, EKG, EMG, Ag/AgCl elektrode, suve elektrode

**Abstract** – The electrical signals in an organism reflect the properties of its biological systems, their processing is done in order to study the behavior of those systems or organs. Recording of electrophysiological signals is done using electrodes, which register the difference of biopotentials. After that the received signal is sent to the amplifier and the A/D converter. Commercially available electrodes for recording of electrophysiological signals are electrodes that include skin preparation before use. Skin should be cleaned and applied with a layer of electrophysiological dilution, conductive paste or gel. In this paper, electrodes that are used without prior skin preparation - dry electrodes, were studied. Recording of ECG and EMG signals with standard Ag/AgCl and dry electrodes was performed and the obtained signals were compared.

**Keywords:** Electrophysiological signals, biopotentials, ECG, EMG, Ag/AgCl electrodes, dry electrodes

**1. UVOD**

Kao rezultat životnih funkcija, odnosno kao posledica različite koncentracije jona u sredinama razdvojenim ćelijskom membranom, u ćelijama i tkivima se javljaju biopotencijali. Elektrofiziološki (bioelektrični) signali predstavljaju promjenu biopotencijala, a njihovo snimanje i posmatranje se obavlja upotrebom elektroda.

**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Nikola Jorgovanović, red. prof.

Bioelektrični signali su posledica jonskih reakcija koje uzrokuje elektrohemijska aktivnost posebne grupe ćelija koje imaju svojstvo prenošenja električnih impulsa. Električni signali u tijelu odražavaju svojstva njegovih bioloških sistema, njihova obrada se vrši u cilju proučavanja ponašanja tih sistema, odnosno organa. Osnovni signali u elektrofiziološkim snimanjima su: elektroencefalogram (EEG), elektrookulogram (EOG), elektroretinogram (ERG), elektrokardiogram (EKG), elektroneurogram (ENG) i elektromiogram (EMG), a svako od ovih snimanja je omogućeno korišćenjem različitih vrsta elektroda. Osim elektroda, sistem za elektrofiziološko snimanje obuhvata pojačavač, A/D konvertor, kao i uređaj za prikazivanje i čuvanje signala.

**2. POJAČAVAČKI SISTEM U ELEKTROFIZIOLOŠKIM SNIMANJIMA**

Biopotencijali su signali male amplitude, zbog čega je pojačavač bitna komponenta pri njihovom snimanju. Osnovna uloga pojačavača je da omogući selektivno pojačanje korisnog signal uz istovremeno potiskivanje signala smetnji. Dobar elektrofiziološki pojačavač takođe mora da maksimalno redukuje pretvaranje signal zajedničkog moda u diferencijalni signal, što se postiže velikom ulaznom impedansom (veću od 100MΩ) uz malu ulaznu kapacitivnost (manju od 5 pF).

Operacioni pojačavač je najvažniji element u analognoj obradi signala, sastoji se od nekoliko kaskadno povezanih pojačavačkih stepena [1]. Ovi ulazni signali su, u slučaju snimanja biopotencijala, korisni bioelektrični signal i zajednički signal koji se javlja između ulaza i uzemljenja. Dobar operacioni pojačavač ima veoma veliko naponsko pojačanje, veliku ulaznu i malu izlaznu impedansu. Ova vrsta pojačavača se proizvodi tehnikom integriranih kola.

Osnovni uslovi koje pojačavač u procesu elektrofiziološkog snimanja treba da ispuni su [2]: ne smije ni na koji način izobličiti signal koji se snima, treba da obezbijedi najbolje moguće izdvajanje željenog signal od šuma i ostalih smetnji, treba da pruža pacijentu zaštitu od opasnosti poput strujnog šoka, sam pojačavač mora biti zaštićen od oštećenja koja mogu nastati usled visokih ulaznih napona (tokom primjene defibrilatora ili elektrohirurške instrumentacije).

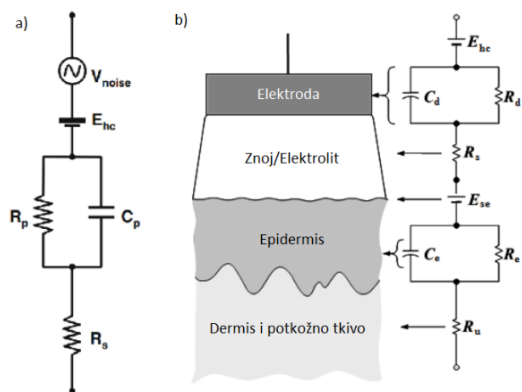
Ulazni signal u pojačavač se sastoji od sledećih komponenti: željeni biopotencijal, neželjeni biopotencijal, jednosmjerna komponenta koja je posledica elektroodskog ofseta i signal zajedničkog moda na 50 ili 60 Hz koji je posledica interferencije sa naponskom mrežom. Adekvatan pojačavač omogućava eliminisanje većeg dijela neže-

ljenog signala, a pojačava željeni biopotencijal. Ovaj biopotencijal se na ulazu diferencijalnog pojačavača pojavljuje kao signal razlike između dva ulaza.

Tri elektrode, od kojih dvije prikupljaju biološke signale (mjerne elektrode) koji se snimaju, a treća (referentna elektroda) obezbjeđuje referentni potencijal povezuju pacijenta sa pojačavačem. Glavni zadatak elektrofiziološkog pojačavača je da potisne signal smetnji (elektrodski ofset i signal zajedničkog moda) koji se javlja tokom snimanja. Da bi se to postiglo, pojačavač treba da ima visok faktor potiskivanja signala zajedničkog moda CMRR (između 120 dB i 140 dB), odnosno pojačanje signala zajedničkog moda treba da bude što manje, u idealnom slučaju 0, tada operacioni pojačavač ima beskonačan CMRR (idealni pojačavač).

### 3. TIPOVI ELEKTRODA ZA ELEKTROFIZIOLOŠKA SNIMANJA

Elektrode su pretvarači struje u jonskoj sredini (ljudski organizam se može smatrati jonskom sredinom) u struju slobodnih elektrona u provodniku. Za mjerenje bioelektričnih potencijala potrebne su dvije elektrode, jer je mjerenje napona, ustvari, mjerenje razlike trenutnih potencijala između te dvije elektrode. One mogu biti različitog oblika i sastava, a najčešće se prave od metala. Kako su tkiva u organizmu ispunjena rastvorima elektrolita, na mjestu kontakta elektrode i tkiva se javljaju tri neželjena efekta [3]: elektrohemijski procesi, kontaktni potencijal i polarizacija elektroda. Šematski generalizovani i uprošćeni električni model impedanse kontakta elektroda-tkivo je prikazan na slici 3.1.



Slika 3.1. Model impedanse kontakta elektroda-tkivo; a) uprošćeni električni model kontakta, b) šema kontakta i detaljniji model [prilagođeno iz 4]

#### 3.1. Standardne elektrode

Osnovni tipovi elektroda za elektrofiziološka snimanja su: površinske, iglene (potkožne ili hipodermijske) i mikroelektrode. Najčešće korišćena elektroda za ovakva snimanja je Ag/AgCl elektroda.

Površinske elektrode se najčešće koriste, pogotovo one za jednokratnu upotrebu. Postoje i površinske elektrode za višekratnu upotrebu, ali su one sve manje u upotrebi, a razlog tome je niska cijena jednokratnih elektroda. Pored toga, jednokratne elektrode su praktičnije rješenje i iz higijenskih razloga. Ove elektrode se prave od metalne pločice (uglavnom srebro) i prevlače slojem neke soli koja smanjuje mogućnost stvaranja ofset potencijala

(srebrohlorid). One su zatopljene u plastičnu masu, ili na lepljivu podlogu. Ako nemaju lepljivu podlogu (a to može biti čak i tkanina sa lepljivim materijalom), onda se između njih i očišćene kože stavlja određena količina provodne paste, gela ili elektrofiziološkog rastvora.

Iglene elektrode pripadaju vrsti elektroda za jednokratnu upotrebu. One se mogu koristiti za posmatranje elektrokardiografskog signala za vrijeme operacije, kao i za snimanje akcionih potencijala mišića i nerava ili potencijala u centralnom nervnom sistemu (mozak i kičmena moždina). Iglene elektrode se prave od nerđajućeg čelika, to su jednostavne potkožne (hipodermijske ili subkutane) igle.

Mikroelektrode se koriste za snimanje signala iz same ćelije, tj. za snimanje intracelularnih potencijala. Vrhovi takvih elektroda moraju biti veoma mali, odnosno tanki, jer ne smiju remetiti normalno funkcionisanje ćelija. Postoje dvije grupe mikroelektroda: staklene i metalne. Staklene elektrode su ustvari veoma tanke staklene cijevčice (kapilare) ispunjene elektrolitom, kroz koji je provučena metalna žica. Metalne imaju kupasti metalni vrh, a ostatak prekriven slojem izolacije. Vrhovi obje vrste ovih elektroda su reda mikrometra. U posljednje vrijeme, prave se i posebne intraneuralne elektrode od silicijuma sa minijaturnim metalnim kontaktima, a koriste se za snimanje potencijala moždanih ćelija.

#### 3.2. Suve elektrode

Za razliku od pomenutih elektroda za čiju upotrebu je potrebno nanošenje fiziološkog rastvora, provodne paste ili gela u cilju smanjenja impedanse tkiva, koncept suvih elektroda isključuje prethodnu pripremu kože.

Posljednjih decenija je razvijano nekoliko različitih vrsta suvih elektroda: na osnovu mikroelektro-mehaničkih sistema (MEMS), beskontaktnih i kapacitivnih (izolacionih) [3,5]. Ove elektrode bi mogle zamijeniti standardne u pogledu njihovih najvećih nedostataka, što bi bilo veoma značajno za potrebe različitih snimanja, naročito dugotrajnih.

Materijal od koga se izgrađuju suve elektrode ne smije da korodira (npr. usled kontakta sa znojem), niti da izaziva alergijske reakcije na koži. Zato se, najčešće, za pravljenje ovih elektroda koristi nerđajući čelik, koji se premazuje slojem titanijuma. Osim titanijuma, kao premaz se može koristiti silicijum-nitrat, koji takođe ima odgovarajuća hemijska i električna svojstva ali zbog vrlo male debljine sloja ( $0.2 \mu\text{m}$ ) može postati nesposoban da izdrži intenzivnu upotrebu [6]. Bitne karakteristike suvih elektroda baziranih na  $\text{TiO}_2$  su hemijska stabilnost, mehanička robusnost i dobar odnos signal – šum [6].

Najveću poteškoću za mjerenje biopotencijala sa tijela predstavlja obezbjeđivanje dobrog, stabilnog električnog kontakta elektroda sa kožom. Površina kože ima suvi dielektrični sloj, koji može prouzrokovati smanjenje prelaza jona u elektrone, pa je to razlog zašto se koristi provodni gel, njegova uloga je da izazove da površina kože bude visoko provodljiva.

Za razliku od konvencionalnih Ag/AgCl elektroda, kod kojih je provodnost omogućena tek nakon nanošenja abrazivnog gela, polimerna suva elektroda, zahvaljujući svojim karakteristikama, obezbjeđuje provodnost, kao i polarizaciju. Ovakve polimerne suve elektrode se mogu

koristiti za mjerenje biopotencijala bez prethodne pripreme kože i korišćenja provodnog gela. Pored toga, elastična podloga elektrode omogućava visoku geometrijsku usaglašenost, odnosno nalijeganje između elektrode i površine tijela na koju se ona postavlja (naročito glave) i održavanje niske impedanse kontakta elektroda – tkivo, čak i prilikom pomjeranja.

#### 4. SNIMANJE SIGNALA I REZULTATI

Urađeno je snimanje EKG i EMG signala, prvo korišćenjem standardnih Ag/AgCl elektroda, a potom je isti postupak ponovljen sa suvim elektrodama. Za snimanje signala su korišćeni SMARTING uređaj i MATLAB GUI aplikacija. Unutar ove aplikacije se nalazi filter propusnik opsega, a nakon što su dobijeni signali, dodatno je izvršeno filtriranje šuma iz njih. Ulazna impedansa SMARTING pojačavača je  $500\text{ M}\Omega$ , opseg ulaznog napona  $\pm 100\text{ mV}$ , a CMRR je veći od  $130\text{ dB}$ .

##### 4.1. Snimanje EMG signala

Pri ovom eksperimentu je urađeno snimanje električne aktivnosti jednog mišića podlaktice (*lat. Flexor carpi radialis*) naizmjeničnim kontrakcijama i relaksacijom. Za snimanje su korišćene tri elektrode – mjerna, DRL i referentna, koje su bile postavljene kao što je prikazano na slici 4.1. Elektroda označena brojem 1 je mjerna elektroda i ona se postavlja na trbuh mišića čija aktivnost se snima; 0 je referentna, postavlja se što bliže mjernoj elektrodi; dok je elektroda označena brojem 10 DRL elektroda i ona je postavljena ispod šake, dalje od 0 i 1.

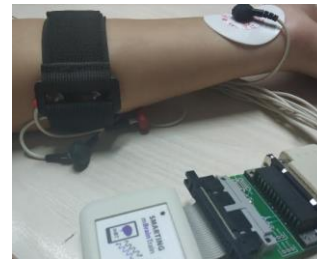


Slika 4.1. Elektrode za snimanje EMG-a mišića podlaktice

Ekvivalentan postupak je urađen i sa suvim elektrodama. Na slici 4.2 su prikazane korišćene suve elektrode, a na slici 4.3 njihova postavka pri snimanju. Korišćene su dvije suve elektrode, mjerna i referentna, a DRL elektroda je ista kao i u prethodnom slučaju.

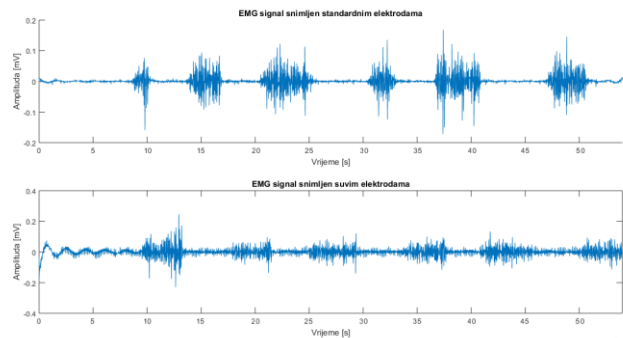


Slika 4.2. Suve elektrode korišćene pri snimanju



Slika 4.3. Snimanje EMG-a korišćenjem suvih elektroda

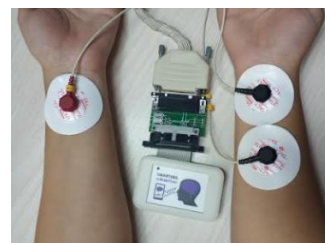
Na slici 4.4. prikazani su snimljeni signali nakon filtriranja šuma.



Slika 4.4. Filtrirani EMG signali snimljeni standardnim Ag/AgCl (gore) i suvim elektrodama (dole)

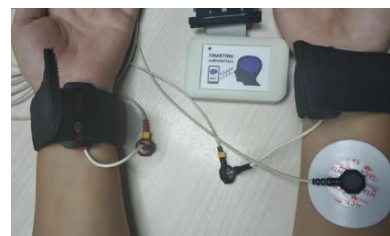
##### 4.2. Snimanje EKG signala

EKG signal je snimljen bipolarnim odvodom, između desne i lijeve ruke, postavka elektroda je prikazana na slici 4.5. Na desnoj ruci su postavljene DRL i referentna elektroda, dok je mjerna na lijevoj.



Slika 4.5. Bipolarno snimanje EKG-a standardnim elektrodama

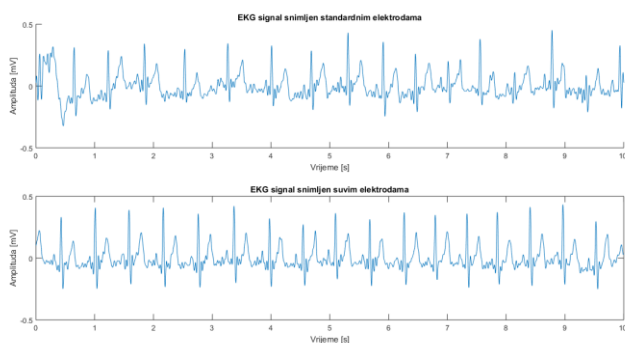
Za snimanje EKG-a su korišćene iste suve elektrode kao i za snimanje EMG-a, način njihovog postavljanja, odnosno pričvršćivanja na ruke je dat na slici 4.6.



Slika 4.6. Snimanje EKG signala korišćenjem suvih elektroda

Na slici 4.7 je, ekvivalentno primjeru sa EMG signalom, dat prikaz filtriranih EKG signala, dobijenih pri snimanju korišćenjem ove dvije vrste elektroda.





Slika 4.7. Filtrirani EKG signali snimljeni standardnim Ag/AgCl (gore) i suvim elektrodama (dole)

## 5. DISKUSIJA

Može se primjetiti da je amplituda EMG signala dobijenog korišćenjem suvih elektroda manja u odnosu na signal sa standardnih Ag/AgCl elektroda. Osim toga, ovaj signal je više zašumljen u odnosu na signal dobijen korišćenjem Ag/AgCl elektroda.

S obzirom na to da se električni kontakt suve elektrode sa kožom ostvaruje njenim pričvršćivanjem na odgovarajuće mjesto pomoću „čičak“ trake, moguće je da dođe do pomjeranja elektrode u toku snimanja, što se manifestuje pojavom šuma u signalu. Takođe, naleganje šiljaka elektrode na kožu nije idealno, što je još jedan od potencijalnih razloga zašto su ovako dobijeni rezultati lošiji u odnosu na one snimljene korišćenjem elektroda sa provodnim gelom.

Za razliku od EMG signala koji je, pri snimanju sa suvim elektrodama, bio više zašumljen i manje amplitudne u odnosu na onaj dobijen snimanjem sa standardnim Ag/AgCl elektrodama, EKG signali dobijeni na ova dva načina nemaju značajnijih razlika. S obzirom na to da su za obje vrste snimanja korišćene iste suve elektrode i sva ostala potrebna oprema, može se zaključiti da je razlog zbog koga je dobijeni EMG signal lošiji bilo neadekvatno fiksiranje elektroda pri snimanju.

## 6. ZAKLJUČAK

Komercijalno dostupne elektrode da snimanje elektrofizioloških signala su elektrode uz čiju upotrebu se podrazumjeva korišćenje abrazivnog gela, provodne paste ili elektrofiziološkog rastvora.

Neki od nedostataka koji se javljaju pri ovakvom načinu snimanja su: performanse ovih elektroda su uslovljene kontaktnom impedansom elektroda-tkivo; pri dugoročnom snimanju, gel se suši što dovodi do smanjenog kvaliteta signala, a ponovno nanošenje gela često nije moguće bez prekidanja snimanja. Zbog toga, ove elektrode nisu pogodne za dugoročna snimanja elektrofizioloških signala. Osim toga, činjenica da je provodni gel lepljiva supstanca, stvara neprijatnosti prilikom snimanja, pogotovo u slučaju EEG signala.

Zbog svega navedenog, suve elektrode se nameću kao adekvatna zamjena za ove elektrode, jer snimanje nije uslovljeno sušenjem provodnog gela, nema neprijatnosti prilikom snimanja, a najveći problem koji se javlja u ovom slučaju je impedansa kontakta elektroda-tkivo. S obzirom na to da nema provodnog gela koji bi smanjio ovu impedansu, potrebno je da pojačavač koji se koristi ima veliku ulaznu impedansu.

Poređenje signala snimljenih standardnim Ag/AgCl i suvim elektrodama pokazalo je zadovoljavajuće rezultate u korist suvih elektroda, njihove performanse su slične performansama standardnih elektroda. Jedan od razloga za ovakve rezultate svakako je upotreba elektrofiziološkog pojačavača sa veoma dobrim karakteristikama.

## 7. LITERATURA

- [1] A. Barna, D. I. Porat, „Operational Amplifiers“, A Willey Interscience Publication, 1998.
- [2] M. Teplan, „Fundamentals of EEG measurement“, Measurement Science Review, Volume 2, Section 2, 2002.
- [3] A. Searle, L. Kirkup, „A direct comparison of wet, dry and insulating bioelectric recording electrodes“, Physiol. Meas. 21 (2000) 271–283.
- [4] J. Guerreiro, A. Lourenco, A. L. N. Fred, „A Biosignal Embedded System for Physiological Computing“, Thesis for: Master in Electronic and Telecommunications Engineering, 2013.
- [5] M. A. Lopez-Gordo, D. Sanchez-Morillo, F. Pelayo Vale, „Dry EEG Electrodes“, Sensors 2014.
- [6] C. Fonseca, J. P. Silva Cunha, R. E. Martins, V. M. Ferreira, J. P. Marques de Sá, M. A. Barbosa, A. Martins da Silva, „A Novel Dry Active Electrode for EEG Recording“, IEEE transactions on biomedical engineering, Vol. 54, No. 1, 2007.

### Kratka biografija:



**Vesna Kokotović** rođena je u Trebinju 1995. godine. Osnovne akademske studije na Fakultetu tehničkih nauka, smer Biomedicinsko inženjerstvo završila je 2018. godine. Iste godine upisuje master akademske studije istog usmerenja, koje završava 2019. godine.

kontakt: vesnakokotovic95@gmail.com