

**PRIMENA INTERFEJSA MOZAK-RAČUNAR U REHABILITACIJI NAKON  
MOŽDANOG UDARA****APPLICATION OF BRAIN MACHINE INTERFACE IN REHABILITATION AFTER A  
STROKE**

Nina Martinović, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

**Oblast – BIOMEDICINSKO INŽENJERSTVO**

**Kratak sadržaj** – *Motorna paraliza nakon moždanog udara ima razorne posledice po pacijente, porodice i negovatelje. Iako su terapije poslednjih godina poboljšane, tradicionalna rehabilitacija i dalje ne uspeva kod pacijenta sa teškom paralizom. Interfejs mozak-mašina (BMI – Brain Machine Interface) pojavio se kao obećavajući alat za vođenje intervencija motorne rehabilitacije jer se može primeniti na pacijente bez rezidualnog pokreta. Ovaj rad daje pregled efikasnosti BMI tehnologija za olakšanje neuroplastičnosti i oporavka motora nakon moždanog udara.*

**Ključne reči:** *interfejs mozak-mašina (BMI), moždani udar, rehabilitacija, motorni oporavak*

**Abstract** – *Motor paralysis after a stroke has devastating consequences for patients, families and caregivers. Although therapies have improved in recent years, traditional rehabilitation still fails for patients with severe paralysis. The Brain Machine Interface has emerged as a promising tool for guiding motor rehabilitation intervention because it can be applied to patients without residual motion. This paper reviews the efficacy of BMI technology to facilitate neuroplasticity and motor recovery after a stroke.*

**Keywords:** *brain-machine interface (BMI), stroke, rehabilitation, motor recovery*

**1. UVOD**

Moždani udar je kardiovaskularni udes u mozgu koji dovodi do motoričkih i senzornih oštećenja kod većine preživelih. Moždani udar može dovesti do potpune paralize ekstremiteta iako su senzorne sposobnosti normalno očuvane. Dok se funkcija nakon moždanog udara može značajno poboljšati u prvim nedeljama i mesecima, dalji oporavak je često spor ili nepostojeći u težim slučajevima koji obuhvataju 30–50% svih žrtava moždanog udara. Neurobiološki mehanizmi koji leže u osnovi oporavka kod ovih pacijenata nisu u potpunosti shvaćeni. Međutim, nedavne studije su pokazale izuzetan kapacitet mozga za funkcionalnu i strukturnu plastičnost i oporavak čak i kod teškog hroničnog moždanog udara. Kako sve uspostavljene strategije rehabilitacije zahtevaju preostalu motoričku funkciju, trenutno ne postoji standardizovan i prihvaćen tretman za pacijente sa potpunom hroničnom paralizom mišića.

**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Platon Sovilj, red. Prof.

Da bi se poboljšao uspeh tradicionalne motoričke rehabilitacije, predložene su nove terapije koje pokušavaju da reaktiviraju mehanizme funkcionalne plastičnosti mozga i da promovišu popravku i regeneraciju neurona u oštećenim neuronskim mrežama, čak i u hroničnoj fazi moždanog udara. Jedan efikasan i izvodljiv način da se stimuliše centralni/periferni nervni sistem koji bi mogao pomoći u ponovnom aktiviranju mehanizama funkcionalne plastičnosti su interfejsi mozak-mašina (BMI).

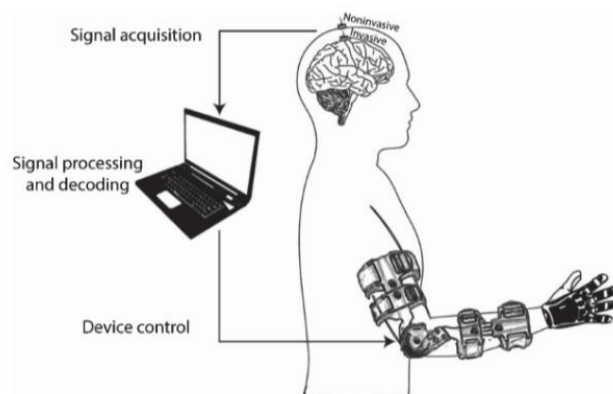
BMI prevodi moždane signale u kompjuterizovane komande, koje se zatim mogu koristiti za stimulaciju paralizovanih udova tela, uspostavljajući kontingentnu vezu između mozga i pokreta.

Motorni oporavak posredovan BMI-om kod pacijenata sa moždanim udarom mogao bi stoga da izazove ponovno povezivanje ili reaktivaciju tih puteva na bilo kom nivou nervnog sistema.

**2. INTERFEJS MOZAK-MAŠINA**

Interfejs mozak-mašina (BMI) je sistem koji snima, dekodira i na kraju prevodi moždane signale u efektornu akciju ili ponašanje, bez nužnog uključivanja motornog sistema (videti sliku 1). U kontekstu motoričke rehabilitacije ili supstitucije, moždana aktivnost nastala tokom namera pokreta može se koristiti za kontrolu spoljašnjih uređaja.

Ovi uređaji mogu sami da izvode te pokrete u cilju zamene izgubljene motoričke funkcije (npr. robotska ruka). S druge strane, uređaji se mogu koristiti za vođenje paralizovanog ekstremiteta pacijenta (npr. mehanička ortoza), tako da se može izvesti željeni pokret, koji zauzvrat stimuliše oštećenu neuronsku mrežu i može imati neuroplastični i rehabilitacioni efekat.



*Slika 1. Opšti dijagram interfejsa mozak-mašina za motoričku rehabilitaciju gornjih ekstremiteta*

## 2.1. Tehnike snimanja

BMI koristi moždane signale za prikupljanje informacija o namerama korisnika. U tom smislu, BMI se oslanja na fazu snimanja koja meri aktivnost mozga i prevodi informacije u električne signale koji se mogu pratiti.

**Neinvazivni pristupi** su uspešno korišćeni za teško i delimično paralizovane pacijente kako bi ponovo stekli osnovne oblike komunikacije i kontrolisali neuroproteze i invalidska kolica. Uprkos izvanrednoj korisnosti neinvazivnih pristupa u BMI aplikacijama, oporavak je ograničen, zbog potrebe za signalima mozga veće rezolucije.

**Invazivni pristupi** moraju implantirati niz mikroelektroda unutar lobanje što uključuje značajne rizike po zdravlje i ograničava njihovu upotrebu u eksperimentalnim uslovima.

Neuroimidžing modaliteti:

- Elektroencefalografija (EEG)
- Magnetoencefalografija (MEG)
- Elektrokortikografija (ECoG)
- Snimanje intrakortikalnog neurona
- Funkcionalna magnetna rezonanca (fMRI)
- Blizu infracrvena spektroskopija (NIRS)

## 2.2. Tipovi kontrolnih signala u BMI

Brojne studije su opisale ogromnu grupu moždanih signala koji bi mogli poslužiti kao kontrolni signali u BMI sistemima. Ipak, samo oni kontrolni signali koji se koriste u trenutnim BMI sistemima biće spomenuti u daljem tekstu:

- vizuelni evocirani potencijali
- spori kortikalni potencijali
- P300 evocirani potencijali
- senzorimotorni ritmovi

## 2.3. Vrste BMI

Prema prirodi signala koji se koriste kao ulazni, BMI sistemi se mogu klasifikovati ili kao egzogeni ili endogeni.

**Egzogeni BMI** koristi aktivnost neurona koju u mozgu izaziva spoljašnji stimulus kao što su VEP ili slušni evocirani potencijali.

S druge strane, **endogeni BMI** se zasniva na samoregulaciji moždanih ritmova i potencijala bez spoljnih nadražaja.

Prema modalitetu obrade ulaznih podataka, BMI sistemi se mogu klasifikovati kao sinhroni ili asinhroni. **Sinhroni BMI** analiziraju moždane signale tokom unapred definisanog vremenskog perioda, dok **asinhroni BMI** kontinuirano analiziraju moždane signale bez obzira na to kada korisnik deluje.

## 3. REHABILITACIJA MOŽDANOG UDARA I PRIMENA BMI

U srcu paradigme BMI nalazi se operantna („voljna“) kontrola neuronske aktivnosti. BMI sistemi za rehabilitaciju motora oslanjaju se na paradigmu neurofeedback treninga, uspostavljajući takvu kontingentnu vezu između mozga i paralizovanih udova da bi se ponovo uspostavili oštećeni putevi, što bi moglo olakšati oporavak izgubljenih motoričkih funkcija.

## 3.1. Postojeće terapije rehabilitacije moždanog udara

Bilateralni trening ruku (BAT) i terapija izazvana pokretima (CIMT) su dve najpopularnije metode za lečenje motornih oštećenja povezanih sa moždanim udarom. BAT angažuje obe ruke istovremeno u simetričnim ili naizmeničnim obrascima, dok CIMT ograničava funkcionalni ekstremitet da bi primorao pacijenta da koristi paretički.

## 3.2. Neuroplastičnost i rehabilitacija moždanog udara

Neuroplastičnost je definisana kao sposobnost nervnog sistema da se restrukturira kao posledica učenja i stimulacije.

Jedan od ključnih mehanizama učenja pomoću kojih neuronska aktivnost pokreće plastičnost prvi je objasnio Donald Hebb 1949. godine. Prema njegovim rečima: „Kada je akson ćelije A dovoljno blizu da pobudi ćeliju B i stalno ili uporno učestvuje u njenom aktiviranju, neki proces rasta ili metabolička promena se odvija u jednoj ili obe ćelije tako da se efikasnost A, kao jedne od ćelija koje pokreće B, povećava“. Pokazano je da BMI indukuje neuronsku plastičnost.

## 3.3. BMI i motoričke slike

VR pruža snažnu vizuelnu povratnu informaciju o zamišljenom pokretu. Pomoću eksternih uređaja kao što su ortoze za ruke ili sistemi funkcionalne električne stimulacije (FES), zamišljeni pokret se može pretvoriti u očiglednu akciju, pružajući haptičku i proprioceptivnu povratnu informaciju.

### 3.3.1. Ortoza

Rezultati istraživanja potvrđuju da kombinacija BMI-MI plus ortoze sa fizičkim treningom može pomoći da se poboljša motorna kontrola gornjih ekstremiteta nakon moždanog udara.

### 3.3.2. Funkcionalna električna stimulacija

Funkcionalna električna stimulacija se zasniva na principu da se veštački može nadoknaditi gubitak dobrovoljne motoričke kontrole stimulacijom paralizovanih mišića zahvaćenog ekstremiteta. Kratki električni impulsi izazivaju akcione potencijale u referentnim nervima, izazivajući kontrakcije mišića ispod. U početku, FES je primenjen u pristupu odozdo prema gore: izazivanje plastičnosti mozga povezivanjem perifernih stimulusa. Povezivanjem FES-a sa BMI sistemom, kontrakcija mišića postaje direktan rezultat namere korisnika, menjajući je u spojenu petlju odozgo nadole/odozdo prema gore.

## 3.4. Robotski uređaji za rehabilitaciju

Neurološka rehabilitacija kod preživelih od moždanog udara prvenstveno je fokusirana na iskorištavanje neuronske plastičnosti centralnog nervnog sistema kako bi se obnovila funkcionalna pokretljivost u smislu normalnih, energetski efikasnih obrazaca kretanja. Ovo se postiže ponavljanom motoričkom praksom usmerenom na zadatak i cilj u direktnoj interakciji sa fizioterapeutom.

Po definiciji, ova rehabilitacija je „prilagodljiva“ potrebama pacijenata, što zahteva stalna prilagođavanja režima lečenja kako u pogledu vrste vežbi tako i doze vežbanja. Međutim, kao i kod bilo kojeg oblika

motoričkog učenja, ponavljanje ili vežbanje ostaje centralno načelo neurološke rehabilitacije. Ovaj princip omogućava integraciju robotskih uređaja u rehabilitaciju, jer se oni mogu programirati da obezbede ponavljajuće vežbanje usmereno na zadatak na objektivan i dosledan način.

### 3.5. Robotski uređaji za rehabilitaciju gornjih ekstremiteta

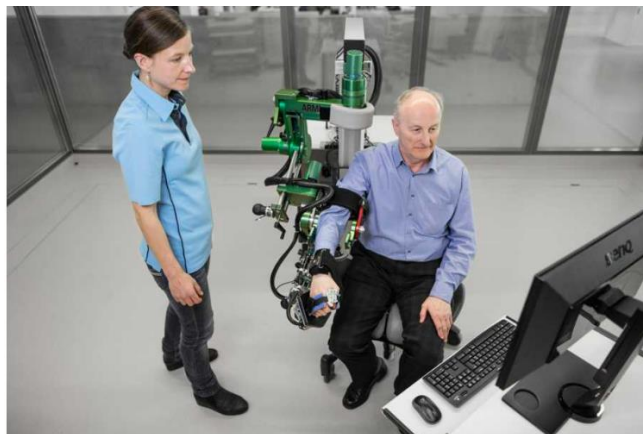
MIT-Manus robot, bio je prvi robotski uređaj dizajniran specijalno za rehabilitaciju gornjih ekstremiteta, slika 2. Ovo je aktivni robot koji omogućava dva DOF pokreta, tj. u ramenu i laktu za izvođenje antigravitacionih pokreta. Sile i pokreti se prenose na ruku korisnika preko robotskog manipulanda za hvatanje. Manipulandum ima malu inerciju, a motori se takođe mogu pokretati unazad, tako da se uređajem može upravljati u pasivnom režimu. Zbog toga se uređaj može koristiti uz varijabilnu pomoć od potpunih sila koje pokreće robot do potpunog pokreta koje pokreće korisnik.

U skorije vreme, MIT-Manus takođe može biti opremljen dodatnom jedinicom za zglob za pokrete fleksija-ekstenzija, abdukcija-adukcija i pronacija-supinacija podlaktice i hvataljkom za pokrete zatvaranja i otvaranja.



Slika 2. MIT-Manus rehabilitacioni robot

Drugi tip robota za gornji ekstremitet jeste onaj koji je modelovan kao egzoskelet koji se može povezati sa gornjim ekstremitetom, a ne kao robotski manipulandum, odnosno robotski polu-egzoskelet ARMin, slika 3. Ovaj uređaj ima šest DOF, i ima senzore položaja i sile.



Slika 3. Robotski polu-egzoskelet ARMin

Distalni deo, koji karakteriše egzoskelet, pokreće samo lakat, dok se rameni zglob pokreće endefektnim delom

koji povezuje nadlakticu sa osovinama postavljenim na zid, omogućavajući vertikalnu i horizontalnu rotaciju ramena (tj. fleksiju/ekstenziju i abdukciju/adukciju u obe ravni).

Dodatno, poseban rotirajući modul za nadlakticu po meri koji je povezan sa nadlakticom preko ortotičke školjke postiže unutrašnju/spoljnu rotaciju ramena. Ovaj trodimenzionalni pokret ramena omogućava simulaciju ADL-a spajanjem proksimalnih pokreta ramena i distalnog lakta i može pomoći u treniranju funkcionalnih višezglobnih sinergijskih pokreta.

### 3.6. Robotski uređaji za rehabilitaciju donjih ekstremiteta

Obuka hoda je važan cilj u rehabilitaciji moždanog udara kako bi se ovim pacijentima omogućilo funkcionalno nezavisno kretanje. Dizajn robotskih uređaja sa pogonom na donje udove suočava se sa dodatnim izazovom uračunavanja podrške telesnoj težini, nekog načina postizanja kontrole ravnoteže i prenosa težine između udova neophodnih za normalan hod. U kontekstu robotskih uređaja za donje ekstremitete, među prvima su dizajnirani robotski uređaji za vežbanje hodanja zasnovani na traci za trčanje, a to su Locomat<sup>TM</sup> (Hocoma) i egzoskelet sa pogonom na donje ekstremitete (LOPES<sup>TM</sup>).

Ovi uređaji omogućavaju obuku hodanja na traci za trčanje sa aktiviranim DOF za zglobove donjih ekstremiteta sa promenljivom podrškom telesne težine. Oni se prvenstveno fokusiraju na promovisanje normalnijih obrazaca hoda preko robotskih aktuatora koji neprestalno vode i paretične i nezahvaćene segmente donjih udova kroz unapred programirane cikluse hoda. Glavna prednost ovakvog treninga je da pacijent sa moždanim udarom može praktikovati funkcionalne višezglobne sinergističke obrasce pokreta, koji mogu poboljšati motorički oporavak kroz učenje motora.



Slika 4. Locomat<sup>TM</sup>

### 3.7. Kombinovanje BMI i rehabilitacije uz pomoć robota

Imajući u vidu prednosti BMI i robotski potpomognutih uređaja u rehabilitaciji moždanog udara, prirodan korak je kombinovanje ove dve tehnologije kako bi se integrisale u opštu rehabilitaciju. Zajedno, ove tehnologije mogu osigurati angažman pacijenata i osnažiti pacijenta za aktivnu ulogu u povratku funkcije i blagostanja. U tom smislu, postoje uspešni pristupi kombinovanju BMI sa robotskim uređajima gornjih ekstremiteta kod pacijenata



sa moždanim udarom. U poređenju sa ortozom za ruke korišćenom u studijama, MIT-Manus je korišćen kao robotski uređaj koji se kontroliše pomoću BMI zasnovanog na motornim slikama kod pacijenata sa moždanim udarom.

Koliko je poznato, još uvek nije bilo studija koje bi dokumentovale kombinovane BMI sisteme sa robotskim uređajima donjih ekstremiteta u kontekstu rehabilitacije moždanog udara. Stoga je jasno da je kombinovani BMI-robotski trening za rehabilitaciju moždanog udara još uvek u ranoj fazi prevođenja kao klinički terapijski modalitet. Definitivno postoje određena važna pitanja koja treba uzeti u obzir pri pravljenju ovog skoka iz laboratorije u kliniku koristeći ovu tehnologiju.

### 3.8. Adaptacija

„Adaptacija“ unutar petlje korisnik-BMI-robotski uređaj je važna. Omogućava promene unutar algoritma koji izdvaja i optimizuje kontrolni signal BMI tako da je u skladu sa mogućnostima korisnika kako se menjaju tokom treninga. Ovo je kritično, jer kako se pacijenti poboljšavaju tokom treninga, očekuje se da će se prostorna i vremenska distribucija njihove neuronske aktivnosti promeniti što ukazuje na neuroplastičnost izazvanu samim treningom. Ako je tako, u odsustvu adaptivnog algoritma, nivoi performansi će imati tendenciju da se smanje ili neće biti u skladu sa poboljšanim neuronskim kapacitetom pacijenta i ovo će biti štetno za rehabilitaciju. U konvencionalnoj fizičkoj rehabilitaciji, zahtevi zadatka i poteškoće se progresivno povećavaju kako bi se izazvalo poboljšanje pacijenta.

### 3.9. Hibridni BMI

Kao što ime sugeriše, hibridni BMI se može programirati da koristi dodatne fiziološke signale kao ulaze pored jednog ili više neuronskih signala zasnovanih na mozgu. Ovo može uključivati aktivnost elektromiografije, otkucaje srca, druge funkcionalne alate za neuromodulaciju kao što je neinvazivna stimulacija mozga, itd. Prednost ovih hibridnih BMI je u tome što kada su različiti fiziološki signali povezani, pouzdanost otkrivanja namere, a samim tim i robusnost kontrole algoritama, može se značajno povećati. Pored toga, ovi različiti signali se takođe mogu programirati da kontrolišu različite aspekte robotskog uređaja, na primer, različite DOF.

Konačno, kombinacija ovih različitih signala takođe može biti korisnija za stvaranje „prilagodljivog“ BMI jer se dodatne karakteristike mogu koristiti za kreiranje potpunije konstrukcije konteksta i potreba zadatka, zajedno sa unutrašnjim stanjem pacijenta.

## 4. ZAKLJUČAK

Ovaj rad je dao pregled najsavremenijih BMI sistema, govoreći o osnovnim aspektima dizajna BMI sistema. Predstavljeni su najznačajniji ciljevi koji su pokrenuli istraživanje BMI u poslednjih 20 godina. Primećeno je da su mnogi rezultati postignuti u istraživanjima BMI.

U BMI su uspešno primenjeni različiti pristupi neuroimaging-u: EEG, koji obezbeđuje signale prihvatljivog kvaliteta visoke prenosivosti i daleko je najčešći modalitet u BMI, fMRI i MEG, koji su dokazane i efikasne metode za lokalizaciju aktivnih regiona unutar mozga, NIRS, koji je vrlo obećavajući način neuro-snimanja u BMI i invazivni modaliteti, koji su predstavljeni kao vredne metode za obezbeđivanje visokokvalitetnih signala potrebnih u nekim višedimenzionalnim kontrolnim aplikacijama, na primer, kontrola neuroproteze. Širok izbor karakteristika signala i algoritama klasifikacije testiran je u BMI dizajnu. Iako je istraživanje BMI relativno mlado, mnogi napreci su postignuti u nešto više od dve decenije, jer se mnoge od ovih metoda zasnivaju na prethodnim istraživanjima obrade signala i prepoznavanju obrazaca.

Sve u svemu, može se zaključiti da su BMI sistemi obećavajući alat za dodavanje alata za rehabilitaciju motora. Njegova potencijalna korisnost za populaciju pacijenata pokazala se na različitim nivoima, a raznovrsnost u aplikacijama interfejsa čini ga prilagodljivim velikoj populaciji.

## 5. LITERATURA

- [1] <https://www.mdpi.com/1424-8220/12/2/1211>
- [2] <https://content.iospress.com/articles/neurorehabilitation/nre172394>
- [3] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096996114003714>
- [4] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877065714018338>
- [5] <https://link.springer.com/article/10.1007/s40141-014-0051-4>
- [6] <https://www.mecharithm.com/upper-limb-rehabilitation-robotics>
- [7] <https://sms.hest.ethz.ch/research/current-research-projects/armin-/armin-v.html>
- [8] [https://hocoma.b-cdn.net/wp-content/uploads/2016/08/09085514/Patient-story-Phillip-Bryant-L6\\_Phil\\_140410\\_edit.jpg](https://hocoma.b-cdn.net/wp-content/uploads/2016/08/09085514/Patient-story-Phillip-Bryant-L6_Phil_140410_edit.jpg)

### Kratka biografija:



**Nina Martinović** rođena je u Subotici 1997. god. Diplomirala je na fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, na katedri za električna merenja 2020. godine.

kontakt: [nina.martinovic97@gmail.com](mailto:nina.martinovic97@gmail.com)