



## Primena mozak–računar interfejs sistema u komunikaciji osoba sa teškim motoričkim deficitima

Nadica Đ. Jovanović Simić, Ivana P. Arsenić, Zorica R. Daničić

*Univerzitet u Beogradu – Fakultet za specijalnu edukaciju i rehabilitaciju, Beograd, Srbija*

*Uvod:* Održavanje i unapređenje komunikacionih sposobnosti osoba sa teškim motoričkim deficitima su osnovni ciljevi logopedске rehabilitacije. Mozak–računar interfejs sistemi mogu da se koriste kao sredstva u komunikaciji ove grupe korisnika, s obzirom na to da im omogućavaju kontrolu spoljašnjih uređaja uz pomoć moždane aktivnosti. Ova asistivna tehnologija predstavlja novi komunikacioni kanal između ljudskog mozga i računara, ili drugih uređaja. Naime, nameru korisnika, koja se odražava u moždanim signalima, ovi sistemi prevode u autput koji se koristi za kontrolu eksternog uređaja, bez upotrebe mišićne aktivnosti. *Cilj:* Cilj ovog rada je da se opišu i navedu osnovne vrste i podele mozak–računar interfejs sistema, kao i njihov razvoj za komunikaciju kod osoba sa teškim motoričkim deficitima. *Metode:* Prilikom uvida u dostupnu literaturu korišćeni su servis Konzorcijuma biblioteka Srbije za objedinjenu nabavku – KOBSON, kao i pretraživači Google Scholar i Research Gate. *Zaključak:* Rani sistemi za komunikaciju, koji su bili zasnovani na tumačenju moždanih talasa, omogućavali su odgovore na jednostavna „da/ne” pitanja. Nakon toga njihova upotreba je bila moguća i u metodama spelovanja, čija je brzina vremenom postala veća. Razvoj mozak–računar interfejs sistema usmeren je ka smanjenju dužine obuke, jer su vremenski dugi treninzi jedna od glavnih prepreka za prihvatanje od korisnika. Pored toga, istraživanja u ovoj oblasti usmerena su na poboljšanje performansi u svim delovima sistema za komunikaciju, kao i na razvoj pouzdanog interfejsa između korisnika i računara.

*Gljučne reči:* asistivna tehnologija, motorički defцити, mozak–računar interfejs sistemi

---

Korespondencija: Zorica Daničić, [zoricadanivic@fasper.bg.ac.rs](mailto:zoricadanivic@fasper.bg.ac.rs)

Napomena: Rad je nastao kao rezultat istraživanja na projektu „Evaluacija tretmana stečenih poremećaja govora i jezika” (br. 179068), koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

## Uvod

Osobe sa teškim motoričkim deficitima, poput onih koji su izazvani traumatskim povredama mozga i kičmene moždine, amiotrofičnom lateralnom sklerozom i drugim progresivnim bolestima, imaju ograničene sposobnosti verbalne produkcije (Jovanović-Simić i sar., 2021). Iz tog razloga neophodna je primena alternativnih sredstava komunikacije za kompenzaciju progresivnog gubitka verbalne i neverbalne komunikacije. S druge strane, osobe koje su totalno paralizovane ne mogu da koriste ova sredstva niti konvencionalne nepotpomognute i potpomognute metode komunikacije, jer zahtevaju određeni stepen očuvane mišićne funkcije i kontrole. U tom slučaju potrebno je da se obezbedi i prilagodi asistivna tehnologija za komunikaciju, koja obezbeđuje razumljiv govorni output i koja može da se primenjuje u različitim situacijama (Arsenić, 2020).

Elektrofiziološka i druga merenja moždanih funkcija mogu da se upotrebe kao način komunikacije koji ne zahteva mišićnu aktivnost (Wolpaw, 2004). Mozak–računar interfejs (*Brain-Computer Interface – BCI*) predstavlja komunikacioni i/ili kontrolni sistem koji omogućava interakciju u realnom vremenu između ljudskog mozga i spoljašnjih uređaja (Mak & Wolpaw, 2009). BCI predstavlja jedan od sistema augmentativne i alternativne komunikacije koji koristi signale snimljene sa skalpa, sa površine moždane kore, ili iz unutrašnjosti mozga. Ovi moždani signali nastaju kao rezultat misaonog procesa i mentalnog stanja korisnika (Lacmanović, 2016). Promene koje su kodirane u spontanoj neuralnoj aktivnosti indukuju različiti mentalni zadaci ili spoljašnji stimuli (vizuelni, auditivni ili somatosenzorni) (Savić, 2014, str. 8). Snimljeni moždani impulsi prevode se u kontrolne signale za uređaje i na taj način omogućavaju korisnicima da kontrolišu i koriste različite aplikacije, kako one za komunikaciju, tako i za kretanje (Blankertz et al., 2004). To znači da namera korisnika da izvrši određene motoričke aktivnosti može da se detektuje direktno, na kortikalnom nivou. Ona se zatim pretvara u upravljački signal uređaja, bez korišćenja eferentnih puteva kičmene moždine i perifernog motoričkog sistema (Savić, 2014). Pored toga, korisnik dobija povratne informacije o ovom outputu, što zauzvrat utiče na moždane signale koji učestvuju u kodiranju namera, a samim tim i na sve naredne outpute (Daly & Wolpaw, 2008). Zato se smatra da BCI sistemi predstavljaju „komunikacioni most” između mozga i spoljašnjeg sveta (Abdulkader et al., 2015). Ovi kompjuterski zasnovani sistemi omogućavaju jednosmernu ili dvosmernu komunikaciju između mozga i spoljašnjih uređaja (Fouad & Labib, 2015). Prilikom dvosmerne komunikacije „jedan pravac uključuje prenos moždanih aktivnosti na računar gde računar prevodi moždane aktivnosti u motoričke komande, dok drugi pravac uključuje slanje informacija direktno u mozak putem računara” (Rogić, 2021, str. 1).

BCI sistemi imaju kliničku primenu u direktnoj kontroli uređaja asistivne tehnologije, kao i u procesu neurorehabilitacije (Mak & Wolpaw, 2009).

Upotrebljavaju se u oblastima verbalne komunikacije, svakodnevnih aktivnosti, kretanja, kao i kontrole životne sredine. Tradicionalno, istraživanje BCI sistema fokusirano je na obnavljanje ili održavanje komunikacionih sposobnosti, što je najvažniji faktor za poboljšanje kvaliteta života osoba sa teškim motoričkim deficitima (Nijboer & Broermann, 2009). Pored toga, ova tehnologija može da se koristi u procesu oporavka, u cilju uspostavljanja efikasnije motorne kontrole. U tom slučaju BCI sistemi se koriste na bazi neurofidbeka (Savić, 2014). Upotreba BCI tehnologije može da poboljša uspešnost rehabilitacije korišćenjem elektroencefalografskih (EEG) signala za kontrolu patološke aktivnosti, za dopunu oslabljene mišićne kontrole, ili kao povratnu informaciju o trenutnom stanju moždane aktivnosti (Daly & Wolpaw, 2008). Proces ovladavanja BCI sistemom zavisi od principa neuralne plastičnosti, koja je slična onoj u standardnim procesima učenja. Kao i u slučaju veština koje su zasnovane na mišićnoj aktivnosti, upotreba BCI sistema treningom postaje automatska, što korisniku omogućava kontrolu uređaja samo uz pomoć moždanih signala. Ovaj cilj može da se postigne ukoliko korisnikova „želja za pokretom”, tj. zamišljanje pokreta ili pokušaj njegovog izvođenja, koja je identifikovana direktno iz moždane aktivnosti, pokreće adekvatan senzorni fidbek. Na taj način željeni pokret se reprodukuje „veštački”, primenom funkcionalne električne stimulacije ili pokretanjem spoljašnje ortoze (Savić, 2014). Zahvaljujući tome podstiče se prirodni oporavak oštećene ili izgubljene motoričke funkcije.

Cilj ovog rada je da se pregledom dostupne literature izdvoje i analiziraju radovi u kojima su opisane osnovne vrste i podele mozak–računar interfejs sistema, kao i razvoj ovih sistema za komunikaciju kod osoba sa teškim motoričkim deficitima.

## Metode

Kako bi se realizovao cilj rada, sistematski uvid u dostupnu literaturu izvršen je pregledom elektronskih baza podataka servisa Konzorcijuma biblioteka Srbije za objedinjenu nabavku – KOBSON, kao i putem specijalizovanih internet pretraživača – Google Scholar i Research Gate. U pretrazi su korišćene sledeće ključne reči i sintagme: mozak–računar interfejs sistemi za komunikaciju, vrste i podele mozak–računar interfejs sistema, upotreba mozak–računar interfejs sistema kod osoba sa teškim motoričkim deficitima, komunikacija kod osoba sa amiotrofičnom lateralnom sklerozom i *locked-in* sindromom (LIS).

U obzir su uzeti originalni i pregledni radovi, relevantne metaanalize, studije slučaja, knjige i poglavlja u knjigama koji opisuju različite vrste BCI sistema i načine njihove upotrebe za komunikaciju kod osoba sa teškim motoričkim deficitima. Radovi koji su uključeni u analizu objavljeni su na engleskom i srpskom jeziku. Prihvaćeni su radovi na srpskom jeziku, kako bi se utvrdilo koje se vrste BCI sistema koriste u našoj zemlji, kakve performanse poseduju i koje rezultate postižu. Prilikom prikupljanja literature za opis razvoja BCI komunikacionih sistema isključivani su oni

radovi u kojima su prvi put upotrebljeni novi vidovi BCI sistema u svrhu rehabilitacije motoričkih funkcija, samostalnog kretanja ili kontrole životnog okruženja.

Obuhvaćena je literatura od 1973. godine, kada je snimanje moždanih signala prvi put upotrebljeno u komunikaciji čovek – računar, do 2021. godine. Analiza je obuhvatila veliki broj radova, ali je za potrebe ovog rada izdvojeno 39 preglednih i istraživačkih radova.

## Rezultati istraživanja sa diskusijom

### Vrste i podele BCI sistema

Svaki BCI sistem sastoji se od četiri osnovne komponente: prijem i snimanje moždanih signala, obrađivanje, izdvajanje osobina signala i njihova klasifikacija (Abdulkader et al., 2015). Kada se posmatra kao sistem komunikacije, BCI se sastoji od inputa (npr. elektrofiziološka aktivnost korisnika), outputa (komande uređaja), komponenti koje prevode input u output, kao i protokola koji određuje početak, eventualna odstupanja i vreme rada (Wolpaw et al., 2002). Primljeni signali se analiziraju i digitalizuju kako bi se dobile njihove specifične karakteristike, kao što su amplitude određenih ritmova, komponente evociranih potencijala i brzina sprovođenja signala pojedinih kortikalnih neurona. Ove funkcije se u stvarnom vremenu prevode u komande koje služe za upravljanje računarom ili drugim uređajem.

BCI sistem zavisi od interakcije tri adaptivna dela: elektrofiziološke aktivnosti mozga korisnika (input), interfejsa, koji prevodi tu aktivnost u kontrolne signale za uređaje, kao i od samog uređaja ili aplikacije (npr. program koji omogućava realizaciju verbalne komunikacije) (Kübler et al., 2001). Ove komponente moraju da se prilagode individualnim mogućnostima i potrebama korisnika. Korisnik i BCI sistem nazivaju se adaptivni kontrolori, jer uspešna upotreba BCI sistema zahteva da korisnik na adekvatan način kodira komande u električne signale, a da BCI dekodira komande iz signala. Iz tog razloga, kako bi se postigle potrebne performanse, neophodno je da se oni inicijalno i neprekidno prilagođavaju (Wolpaw, 2004).

Kao što je rečeno, BCI određuje korisnikove namere tumačenjem različitih elektrofizioloških signala. Razne metode za snimanje moždane aktivnosti mogu poslužiti kao BCI (Wolpaw et al., 2002). Pored EEG-a, mogu da se koriste pozitronska emisiona tomografija (PET), magnetoencefalografija (MEG), funkcionalna magnetna rezonanca (fMRI), kao i optičko snimanje. Ipak, MEG, fMRI i PET nisu pogodni za široku svakodnevnu upotrebu zbog složenih tehničkih zahteva, troškova koje iziskuje njihova upotreba i ograničenih mogućnosti korišćenja u realnom vremenu (Daly & Wolpaw, 2008). Pored toga, ove metode su zavisne od protoka krvi, pa zbog tih ograničenja nisu pogodne za brzu komunikaciju. S druge strane, EEG i srodne metode mogu da funkcionišu u

većini okruženja, jer zahtevaju relativno jednostavnu i jeftinu opremu (Wolpaw et al., 2002).

Električni potencijali, koji predstavljaju rezultat aktivnosti mozga, mogu biti snimljeni na koži lobanje (EEG aktivnost), na površini korteksa (elektrokortikografska /EcoG/ aktivnost) ili unutar mozga (neuralni akcioni potencijali) (Daly & Wolpaw, 2008). Na osnovu toga BCI sistemi se mogu podeliti na invazivne i neinvazivne. Invazivni BCI sistemi koriste aktivnosti koje su zabeležene pomoću mikro ili makroelektroda koje su implantirane u mozgu, dok neinvazivni BCI sistemi koriste moždane signale snimljene senzorima van granica tela (Birbaumer, 2006). Svaka metoda ima svoje prednosti i nedostatke. EEG snimanje je jednostavno i neinvazivno, ali ima ograničenu topografsku rezoluciju i frekvencijski opseg. Pored toga, snimci EEG-a podložni su kontaminaciji aktivnosti iz kranijalnih nerava. ECoG i intrakortikalne metode imaju bolju topografsku rezoluciju i širi frekvencijski opseg, ali zahtevaju implantaciju elektroda na kortikalnoj površini ili u mozgu (Wolpaw et al., 2002).

Postoje četiri vrste neinvazivnih BCI sistema, koje se razlikuju u odnosu na vrstu elektrofizioloških signala koje koriste. To su vizuelni evocirani potencijali (*Visual Evoked Potentials* – VEPs), spori kortikalni potencijali (*Slow Cortical Potential* – SCP), senzomotorni ritmovi (mu i beta ritam) i P300 evocirani potencijali (Cipresso et al., 2012). Vizuelni evocirani potencijali su elektrofiziološki potencijali vizuelnog sistema. Dobijaju se upotrebom vizuelnih stimulusa, kao što su bleskovi svetlosti ili treperenje svetla na ekranu. Spori kortikalni potencijali su vrsta ERPs (event-related potentials) potencijala, koji se razvijaju u periodu od < 0.5 do nekoliko sekundi od pojave stimulusa (Birbaumer et al., 1990). Senzomotorni ritmovi snimaju se sa vlasišta, preko senzomotornog korteksa. Korisnik kontroliše amplitude od 18 do 26 Hz beta ritma kako bi pomerio kursor do cilja na vrhu, dnu ekrana ili do ciljeva koji se nalaze između (Wolpaw et al., 2002). P300 evocirani potencijali mozga javljaju se 300 ms nakon novog, neočekivanog stimulusa. Amplitude ovih signala povećavaju se kada se pažnja usmeri na određeni stimulus (Chaudhary et al., 2016). P300 evocirani potencijali podržavaju rad jednostavnih uređaja i programa za obradu teksta, koji korisnicima omogućavaju da pišu reči brzinom od jednog ili nekoliko slova u minuti.

BCI sistemi mogu da se podele i na zavisne i nezavisne sisteme (Wolpaw et al., 2002). Zavisni BCI sistemi ne koriste nervne puteve za prenošenje poruke, ali je aktivnost u tim putevima neophodna za generisanje moždane aktivnosti. Tako, na primer, jedan zavisni BCI sistem prezentuje korisniku matricu slova, u kojoj se slova pojavljuju pojedinačno. Korisnik bira određeno slovo gledajući ga direktno. Željeno slovo može da se odredi jednostavno, na osnovu veličine odgovora koji generiše. Signal izazvan stimulusom koji korisnik fiksira znatno se povećava, jer pokriva centar vidnog polja (Sutter, 1992). U ovom slučaju

izlazni kanal mozga je EEG, ali stvaranje EEG signala zavisi od smera pogleda, a samim tim i od ekstraokularnih mišića i kranijalnih nerava. U ovom primeru pravac pogleda detektuje se nadgledanjem EEG-a, a ne direktnim nadgledanjem položaja očiju (Woplaw et al., 2002). S druge strane, nezavisni BCI sistemi ni na koji način ne zavise od aferentnih nervnih puteva, jer oni ne prenose poruku pa ni aktivnost u njima nije potrebna da bi se generisala moždana aktivnost (Cipresso et al., 2012). Upravo zato što mozgu pružaju potpuno nove izlazne puteve, nezavisni BCI sistemi imaju mnogo veći teorijski i praktični značaj od zavisnih (Woplaw et al., 2002). Prva grupa BCI sistema, koji koriste vizuelne evocirane potencijale, pripada zavisnom BCI sistemu jer zavisi od mišićne kontrole smera pogleda. Ostali BCI sistemi, koji koriste spore kortikalne potencijale, P300 evocirane potencijale, mu i beta ritmove, kao i evocirane potencijale kortikalnih neurona, pripadaju nezavisnim BCI sistemima (Cipresso et al., 2012).

### **Razvoj mozak–računar interfejs sistema u komunikaciji osoba sa teškim motoričkim deficitima**

Tokom godina, od rada nemačkog naučnika Hansa Bergera koji je prvi zabeležio električnu moždanu aktivnost, EEG je uglavnom korišćen u klinikama za procenu neuroloških oštećenja, kao i za ispitivanje moždanih funkcija u laboratorijama. Pored toga postojale su studije koje su se bavile mogućnostima njegovog korišćenja u terapijske svrhe. U ovog periodu naučnici su spekulisali da bi EEG mogao da ima još funkcija. Smatrali su da bi mogao da se koristi za kontrolu uređaja pomoću moždanih aktivnosti, bez korišćenja perifernih nerava i mišića, kao i za tumačenje misli ili namera, čime bi se omogućila komunikacija sa drugima (Woplaw et al., 2002).

Vidal (Vidal, 1973) je prvi u svom radu postavio pitanje da li se evocirani potencijali mogu koristiti kao nosioci informacija u komunikaciji čovek–računar ili u svrhu kontrole različitih uređaja. U tom radu prvi put se procenjuje mogućnost upotrebe moždanih signala u dijalogu čovek–računar. Pored toga, autor je smatrao da BCI sistem može biti usmeren na upotrebu kako spontanah EEG signala, tako i evociranih potencijala, koji nastaju kao rezultat vremenski zavisne senzorne stimulacije u različitim uslovima (Vidal, 1973). Vidal je razvio zavisni BCI sistem, koji je koristio vizuelne evocirane potencijale, koji su bili snimljeni sa skalpa, preko vizuelnog korteksa. Oni su se koristili za određivanje pravca pogleda. Na taj način identifikovan je smer u kojem je korisnik želeo da pomeri kursor na ekranu (Wolpaw et al., 2002).

Pored BCI sistema, razvijen je i sistem (*Brain Response Interface* – BRI) koji je podrazumevao tumačenje električnih signala iz vizuelnog korteksa mozga (Sutter, 1992). BRI je predstavljao zamenu za metode komunikacije koje se zasnivaju na praćenju pogleda, kao što su ETRAN okviri ili komunikacione table. Vizuelni evocirani potencijali mogu da se koriste u ovu svrhu, jer je pokazano da opaženi signali i promene u EEG aktivnostima nastaju samo

kao rezultat promene u stimulusima. Statički stimulusi u vizuelnom polju, s druge strane, ne izazivaju značajne promene u EEG aktivnosti. Sistem prototipa testiran je sa preko 70 zdravih ispitanika i sa oko 20 osoba sa nekom vrstom oštećenja i predstavljao je prvu praktičnu primenu signala iz centralnog nervnog sistema u svrhu rehabilitacije.

Miner i saradnici (Miner et al., 1998) prikazali su način obuke ispitanika za kontrolu senzomotornih ritmova i za njihovo korišćenje prilikom odgovora na jednostavna pitanja. Jedan od ispitanika imao je dijagnozu amiotrofične lateralne skleroze (ALS). Učesnici u studiji naučili su da koriste mu ritam (od 8 do 12 Hz) ili beta ritam (od 18 do 25 Hz) za kontrolu vertikalnog pomeranja kursora na ekranu (prema ciljevima koji su se nalazili na vrhu ili dnu ekrana). U narednim sesijama ciljevi su zamenjeni rečima „da” i „ne”, a ispitanici su koristili kursor da bi odgovarali na postavljena pitanja, koja su obuhvatala različite teme.

Jedan od prvih pokušaja formulisanja poruke uz kontrolisanje EEG signala objavljen je krajem dvadesetog veka (Birbaumer et al., 1999). Pri prvoj uspešnoj upotrebi neinvazivnog BCI sistema subjekti su kontrolisali spore kortikalne potencijale. U studiji su učestvovala dva ispitanika sa LIS, koji je nastao kao posledica ALS. Nakon serije treninga ispitanici su mogli da pišu poruku brzinom od dva karaktera u minuti. Nakon toga ova se metoda sve više razvijala kroz upotrebu neinvazivnog, ali i invazivnog snimanja moždanih aktivnosti. Pored toga obuhvatala je nivo senzomotornih i kognitivnih funkcija i inkorporirala u ovim zatvorenim sistemima nove fdbek mehanizme (Miranda et al., 2015).

Grupa autora (Neumann et al., 2003) u svojoj studiji obučavala je korisnika sa LIS da kontroliše promene u sporim kortikalnim potencijalima kako bi upravljao uređajem za komunikaciju. Direktna komunikacija između mozga i računara upravo se zasniva na mogućnostima samoregulacije akcionih potencijala za izbor slova, reči ili drugih simbola. Rezultati ove studije pokazali su da ispitanici, kroz trening samoregulacije, mogu da postanu osetljivi na promene u akcionim potencijalima. Korisnik sa LIS, koji je učestvovao u studiji, napisao je uz pomoć BCI sistema najdužu poruku do tada.

Dvadeset devet ispitanika sa ALS i šest ispitanika sa drugim motoričkim i neurološkim oštećenjima trenirani su da koriste različite BCI sisteme (spore kortikalne potencijale, senzomotorne ritmove i P300 akcione potencijale) u laboratoriji Medicinskog fakulteta Univerziteta u Tibingenu, u Nemačkoj (Kübler & Birbaumer, 2008). Ispitanici su koristili SCP-BCI, SMR-BCI, kao i P300-BCI, a dužina obuke zavisila je od njihovih individualnih sposobnosti. Svi su uspeali da postignu potrebnu kontrolu nad moždanim odgovorima. Pri tome ispitanici koji su koristili novije verzije BCI sistema brže su ovladali njihovom kontrolom, ne zato što su trenirani duži vremenski period, već zato što su ti sistemi bolje prilagođeni individualnim potrebama korisnika. Istovremeno je pokazano da veći stepen motoričkog oštećenja ne utiče na smanjenje u BCI performansama.

Invazivni BCI sistem prikazan je u radu Kenedija i saradnika (Kennedy et al., 2000). Ovaj sistem zahteva implantaciju posebnih elektroda u spoljašnje slojeve neokorteksa. U ovoj studiji snimljeni signali prenosili su se u obližnji prijemnik i obrađivali kako bi pokrenuli kursor na monitoru računara. BCI sistem je bio korišćen za kucanje teksta i produkciju sintetizovanog govora. Ispitanik je unosio tekst brzinom od tri slova po minuti po završetku studije, a dalji napredak očekivao se uz nastavak treninga. Upotreba invazivnih BCI sistema se, takođe, pokazala uspešnom kod korisnika sa LIS i ALS (Brumberg et al., 2009; Gilja et al., 2015). Prva „neuronska proteza” za produkciju govora, koja je bila zasnovana na BCI sistemu, kontrolisana je od osobe sa LIS. Proteza je mogla da predvidi frekvencije formantata vokala na osnovu nervne aktivnosti, koju su beležile mikroelektrode implantirane u motornom korteksu leve hemisfere. Ispitanik je tačno produkovao glasove sa maksimalnom stopom uspešnosti od 80 do 90%. Ovaj sistem omogućavao je i auditivni fdbek (Brumberg et al., 2009). Invazivna „neuronska proteza” uspešno je primenjena i kod dva korisnika sa ALS (Gilja et al., 2015). Ispitanici su pisali reči brzinom do 115 reči za manje od 19 minuta. Intrakortikalne mikroelektrode bile su postavljene u motornom korteksu. Merenja koja su izvršena nakon godinu dana od implantacije pokazala su do tada najveće objavljene performanse ovog sistema – bile su više nego dvostruko veće u odnosu na prethodne učesnike pilot kliničkih ispitivanja.

S obzirom na to da invazivne metode nose značajne kliničke rizike, grupa autora (Leuthardt et al., 2004) prikazala je upotrebu EcoG-a, koji, takođe, omogućava kontrolu kretanja kursora na ekranu. Tokom kratkih perioda obuke, od tri do 24 minute, četiri ispitanika koristila su ove signale i postigla stopu uspeha od 74 do 100%. Ti rezultati ukazali su da bi BCI zasnovan na EcoG-u mogao osobama sa ozbiljnim motoričkim oštećenjima da omogući način komunikacije i upravljanja koji je bolji od BCI zasnovanih na EEG-u, potencijalno stabilniji i manje traumatičan od invazivnih BCI sistema.

Prvi sistem koji je integrisao jezički model sa detekcijom moždanih signala za izbor slova za osobe sa LIS prikazan je u radu grupe autora (Oken et al., 2014). U ovom radu predstavljen je prvi BCI uređaj za osobe sa LIS koji je objedinio jezički model sa tumačenjem EEG signala. U pitanju je RSPV tastatura (*Rapid Serial Visual Presentation*). Pomoću ovog sistema jedno veliko slovo na ekranu prikazuje se 400 ms (ili kraće). Na taj način smanjuju se zahtevi za vizuelnom percepcijom, u poređenju sa drugim, komplikovanijim BCI sistemima. Statistički jezički model određuje verovatnoću teksta. Jezički modeli visokog stepena upotrebe mogu da se dobiju iz velikog uzorka tekstova na bilo kom jeziku. Radi se na tome da se izračuna koliko se često pojedinačna slova javljaju u određenim kontekstima. Ovi modeli su sastavni deo mnogih sistema i uređaja za komunikaciju. Danas se često koriste za ubrzavanje unosa teksta u uređajima za komunikaciju koji nisu BCI sistemi, a koriste se za osobe



sa teškim govornim i jezičkim poremećajima. U ovoj studiji učestvovala su dva ispitanika sa LIS koja su imala poteškoće uzrokovane neurološkim oštećenjem, u vidu nekontrolisanih pokreta. Ti faktori su EEG snimanja činili nepouzdanim. S obzirom na to da je obuka bila podeljena u pet nivoa, oba ispitanika savladala su prvi, osnovni nivo, dok je jedan od ispitanika savladao svih pet nivoa. Uz prevazilaženje ograničenja i poteškoća koje su se pokazale kao značajne u ovoj studiji, ovakav BCI sistem pokazao se korisnim za osobe sa nekompletnim LIS (Oken et al., 2014). Pored ovog modela, ubrzavanje unosa teksta omogućavaju i uređaji sa predikcijom reči. Rezultati studije u kojoj su učestvovali ispitanici bez govornih, jezičkih i motoričkih deficita (Ryan et al., 2010) pokazali su da vreme za izvršavanje zadatka sa uređajem koji omogućava predikciju reči iznosi 12 minuta i 43 sekunde, za razliku od uređaja bez predikcije, kada je za ispunjenje istog zadatka potrebno 20 minuta i 20 sekundi. Ovi nalazi su važni za kreiranje BCI sistema sa što većim performansama, budući da uređaji sa predikcijom reči mogu da omoguće korisniku da izvrši više operacija sa manje odabira.

BCI sistemi, kroz napredak u performansama i funkcijama koje omogućavaju, postaju pogodni za upotrebu za mnogo širu populaciju. Tako se koriste i kod osoba kod kojih je LIS posledica drugih etioloških faktora (kao što je moždani udar), a ne samo kao posledica ALS (Sellers et al., 2014). Sve više uspeha postiže se i u korišćenju ovog sistema kod osoba sa najtežim, totalnim oblikom ovog sindroma (Guger et al., 2017). Kod osoba sa totalnim LIS nisu mogući ni pokreti očiju. Iz tog razloga za ove osobe su veoma značajne, a nekada i jedini izbor, metode koje koriste aktivnosti biohemijskih i drugih promena u mozgu (Jovanović-Simić i sar., 2020). Devet od dvanaest ispitanika sa LIS, od toga dva od tri ispitanika sa kompletnim oblikom ovog sindroma, uspeo je da ovlada BCI sistemom zasnovanim na EEG-u. Oni su komunicirali sa većom tačnošću nego što je prikazano u prethodnim studijama. Pri tome taj uspeh postizali su u vremenskom periodu od 15 do 20 minuta. U ovoj studiji korišćen je MindBEAGLE sistem, koji je osmišljen tako da bude jednostavan za upotrebu, bez potrebe za posebnom tehničkom ekspertizom.

Odskora su u upotrebi, kao vid BCI sistema zasnovanog na EEG signalima, i stabilni vizuelni evocirani potencijali (*Steady-state Visual Evoked Potential – SSVEP*), koji predstavljaju periodični odgovor mozga na periodični, oscilirajući vizuelni stimulus (Hwang et al., 2017). U pomenutoj studiji ispitanici su imali zadatak da se fokusiraju na jedan od četiri vizuelna stimulusa, dok su njihove namere analizirane i klasifikovane u realnom vremenu. Ovaj BCI sistem korišćen je za odgovaranje na pitanja sa četiri ponuđena odgovora. Svih pet ispitanika pokazalo je jasne SSVEP odgovore na sve četiri osnovne stimulacijske frekvencije. Ovi rezultati ukazuju na to da BCI sistemi koji su zasnovani na SSVEP mogu uspešno da se koriste kod osoba sa teškim motoričkim i neurološkim oštećenjima, s obzirom na to da su svi pacijenti, osim jednog, imali kvadriparezu i da im je bila neophodna veštačka

ventilacija. Jedino sredstvo komunikacije bili su pokreti očiju, pri čemu su očuvani pokreti bili u rasponu od slabih do umerenih. Test–retest pokazao je stabilne performanse ovog BCI sistema tokom različitih dana, i onda kada su se podešavanja (npr. konfiguracija elektoda, vreme fiksacije, vizuelni ugao) koja su korišćena u prvom eksperimentu koristila bez značajnih promena.

Pored stabilnih vizuelnih evociranih potencijala, pokazano je da i druga vrsta vizuelnih potencijala može biti korisna kod osoba sa ALS (npr. *code-modulated Visual Evoked Potentials* – cVEP) (Verbaarschot et al., 2021). Rezultati studije pokazali su da osobe sa ALS mogu da koriste uređaj za spelovanje uz kontrolu cVEP signala, s obzirom na to da je 27 od 30 učesnika ove studije bilo uspešno u tom zadatku, sa 79% tačnosti. Pri tome svih trideset učesnika moglo je da odgovara na jednostavna „da/ne” pitanja, sa tačnošću od 90%. U ovoj studiji izbor simbola trajao je oko dve do tri sekunde u zadacima slobodnog izbora slova i spelovanja, a oko pola sekunde tokom zadataka sa „da/ne” odgovorima. To znači da korisnici mogu da unose oko deset do 12 simbola u minuti tokom zadataka slobodnog spelovanja i oko 17 odgovora u minuti tokom odabira „da/ne” odgovora. Ovi rezultati su znatno iznad prosečne vrednosti brzine korišćenja P300 uređaja. Iako nisu svi ispitanici sa ALS mogli da koriste tastaturu i metodu spelovanja zbog nivoa fokusa koji je neophodan, čini se da binarna opcija sa „da/ne” odgovorima pruža dobru alternativu. Ova opcija može da bude posebno važna za osobe sa totalnim LIS, zato što su kod njih često očuvani samo ograničeni vertikalni pokreti očiju.

Među novim vidovima BCI sistema, koji se u studijama rađenim na tu temu prvi put pojavljuju, jeste i intrakortikalni BCI sistem za stabilnu i dugoročnu upotrebu (Milekovic et al., 2018). U pitanju je upotreba LFPs (*local field potentials*), signala koji su stabilniji od akcionih potencijala za dekodiranje namera korisnika. Alternativno, LFP signali mogu da se koriste za postizanje dugoročne pouzdane BCI kontrole. Rezultati studije ukazuju na to da intrakortikalni BCI sistem može da se koristi u domovima korisnika mesecima, uz minimalan tehnički nadzor. Svi ovi faktori su neophodni za jedan praktični sistem komunikacije. Mogućnost uspešne, samostalne upotrebe BCI sistema u kućnim uslovima pokazana je i u istraživanju sa osobama sa ALS (Wolpaw et al., 2018). U ovoj studiji praćena je upotreba BCI sistema tokom perioda od 18 meseci. Rezultati su pokazali da BCI kućni sistem može biti funkcionalan i da može pouzdano da se koristi u domovima korisnika.

### **Zaključak**

Rezultati prikazanih studija ukazuju na to da svi modaliteti BCI sistema, koji se koriste kao neinvazivne i invazivne metode, sadrže obećavajuće rešenje za realizaciju verbalne komunikacije. Pored toga u mnogim studijama uspešno je rešen problem dužine trajanja treninga korisnika, koji je u suštini smanjen.

Danas postoji veliki broj BCI sistema, sa širokom upotrebom, koji se koriste u svakodnevnom životu korisnika sa teškim motoričkim ili neurološkim oštećenjima.

Mnoge naučne spekulacije o BCI sistemima polaze od analogije „čitanja uma”. Ova pretpostavka odnosi se na to da je jedini cilj određivanje namera korisnika kroz snimanje moždane aktivnosti, koja se odražava u elektrofiziološkim signalima. Ovakva analogija zanemaruje suštinsku i centralnu činjenicu razvoja i rada BCI sistema. BCI menja elektrofiziološke signale u namenske proizvode te aktivnosti, u poruke i naredbe. Poznato je da sve funkcije, nakon početnog razvoja, zahtevaju stalno i kontinuirano prilagođavanje, koje se zasniva na kontroli krajnjih ishoda i rezultata. Isto tako, i svaki BCI sistem zavisi od povratnih informacija i od prilagođavanja moždane aktivnosti na osnovu njih (Wolpaw et al., 2002).

U našoj zemlji, u Laboratoriji za Biomedicinsko inženjerstvo i tehnologije Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, sprovode se klinička istraživanja koja obuhvataju razvoj motornih neuralnih proteza, asistivnih sistema za neurorehabilitaciju, novih rehabilitacionih tehnika, kvantitativnih tehnika neuroimidžinga, kao i testiranje neuralnih interfejsa, kao što su BCI sistemi. Pored toga, BCI sistemi se proučavaju u okviru predmeta na drugom stepenu studija na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu.

Razvoj BCI sistema trebalo bi da uključuje ne samo tehničke i elektrofiziološke principe već i dobro definisane, poznate principe učenja (Wolpaw et al., 2000). Fokus budućih studija trebalo bi da bude usmeren na to da se obrasci elektrofizioloških signala menjaju u zavisnosti od korisnikovih sposobnosti učenja, kao i da mogućnost višestrukog podešavanja signala može da utiče na bolje komunikacione sposobnosti (Lazarou et al., 2018). Naučnici iz ove oblasti postigli su mnogo od trenutka kada je postavljeno pitanje da li se moždani signali mogu koristiti u cilju komunikacije do danas, kada je BCI sistem postao praktična stvarnost za osobe sa teškim motoričkim i neurološkim oštećenjima. Bez obzira na to, autori smatraju da su potrebna dalja istraživanja kako bi se poboljšale performanse u svim delovima ovog komunikacionog sistema.

## Literatura

- Abdulkader, S. N., Atia, A., & Mostafa, M. S. M. (2015). Brain computer interfacing: Applications and challenges. *Egyptian Informatics Journal*, 16(2), 213-230. <https://doi.org/10.1016/j.eij.2015.06.002>
- Arsenić, I. (2020, 15 septembar). *Primena asistivne tehnologije kod odraslih osoba sa dizartrijom* [rezime saopštenja sa skupa]. Druga nacionalna konferencija Asistivne tehnologije i komunikacija (ASTEK), Beograd, Srbija.
- Birbaumer, N. (2006). Breaking the silence: Brain-computer interfaces (BCI) for communication and motor control. *Psychophysiology*, 43(6), 517-532. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2006.00456.x>

- Birbaumer, N., Elbert, T., Canavan, A. G., & Rockstroh, B. (1990). Slow potentials of the cerebral cortex and behavior. *Physiological Reviews*, 70(1), 1-41. <https://doi.org/10.1152/physrev.1990.70.1.1>
- Birbaumer, N., Ghanayim, N., Hinterberger, T., Iversen, I., Kotchoubey, B., Kübler, A., Perelmouter J., Taub, E., & Flor, H. (1999). A spelling device for the paralysed. *Nature*, 398(6725), 297-298. <https://doi.org/10.1038/18581>
- Blankertz, B., Muller, K. -R., Curio, G., Vaughan, T. M., Schalk, G., Wolpaw, J. R., Schlögl, A., Neuper, C., Pfurtscheller, G., Hinterberger, T., Schroder, M., & Birbaumer, N. (2004). The BCI competition 2003: Progress and perspectives in detection and discrimination of EEG single trials. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 51(6), 1044-1051. <https://doi.org/10.1109/TBME.2004.826692>
- Brumberg, J. S., Kennedy, P. R., & Guenther, F. H. (2009). Artificial speech synthesizer control by brain-computer interface. In *10th Annual Conference of the International Speech Communication Association 2009 (INTERSPEECH 2009)* (pp. 636-639). International Speech Communication Association.
- Chaudhary, U., Birbaumer, N., & Ramos-Murguialday, A. (2016). Brain-computer interfaces for communication and rehabilitation. *Nature Reviews Neurology*, 12(9), 513-525. <https://doi.org/10.1038/nrneurol.2016.113>
- Cipresso, P., Carelli, L., Solca, F., Meazzi, D., Meriggi, P., Poletti, B., Lulé, D., Ludolph, A. C., Silani, V., & Riva, G. (2012). The use of P300--based BCIs in amyotrophic lateral sclerosis: From augmentative and alternative communication to cognitive assessment. *Brain and Behavior*, 2(4), 479-498. <https://doi.org/10.1002/brb3.57>
- Daly, J. J., & Wolpaw, J. R. (2008). Brain-computer interfaces in neurological rehabilitation. *The Lancet Neurology*, 7(11), 1032-1043. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(08\)70223-0](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(08)70223-0)
- Fouad, I. A., & Labib, F. E. Z. M. (2015). Using emotiv EPOC neuroheadset to acquire data in brain-computer interface. *International Journal of Advanced Research*, 3(11), 1012-1017.
- Gilja, V., Pandarinath, C., Blabe, C. H., Nuyujukian, P., Simeral, J. D., Sarma, A. A., Sorice, B. L., Perge, J. A., Jarosiewicz, B., Hochberg, L. R., Shenoy, K. V., & Henderson, J. M. (2015). Clinical translation of a high-performance neural prosthesis. *Nature Medicine*, 21(10), 1142-1145. <https://doi.org/10.1038/nm.3953>
- Guger, C., Spataro, R., Allison, B. Z., Heilingner, A., Ortner, R., Cho, W., & La Bella, V. (2017). Complete locked-in and locked-in patients: Command following assessment and communication with vibro-tactile P300 and motor imagery brain-computer interface tools. *Frontiers in Neuroscience*, 11, Article 251. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00251>
- Hwang, J. -Y., Lee, M. -H., & Lee, S. -W. (2017, 9-11 January). A brain-computer interface speller using peripheral stimulus-based SSVEP and P300. In *5th International Winter Conference on Brain-Computer Interface BCI 2017* (pp. 77-78). IEEE.
- Jovanović-Simić, N., Arsenić, I., i Daničić, Z. (2020). Primena metoda augmentativne i alternativne komunikacije kod osoba sa locked-in sindromom. *Beogradska defektološka škola*, 26(2), 53-73.
- Jovanović-Simić, N., Arsenić, I., Daničić, Z., i Ječmenica, N. (2021, 18-21 februar). *Primena asistivne tehnologije u komunikaciji osoba sa teškim motoričkim deficitima* [rezime saopštenja sa skupa]. Stručno naučna konferencija sa međunarodnim učešćem Dani defektologa Srbije, Zlatibor, Srbija.

- Kennedy, P. R., Bakay, R. A. E., Moore, M. M., Adams, K., & Goldwaithe, J. (2000). Direct control of a computer from the human central nervous system. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 8(2), 198-202. <https://doi.org/10.1109/86.847815>
- Kübler, A., & Birbaumer, N. (2008). Brain-computer interfaces and communication in paralysis: Extinction of goal directed thinking in completely paralysed patients? *Clinical Neurophysiology*, 119(11), 2658-2666. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2008.06.019>
- Kübler, A., Kotchoubey, B., Kaiser, J., Wolpaw, J. R., & Birbaumer, N. (2001). Brain-computer communication: Unlocking the locked in. *Psychological Bulletin*, 127(3), 358-375. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.127.3.358>
- Lacmanović, D. (2016). *Modeliranje i razvoj računarskog sistema za korišćenje servisa e-uprave za osobe sa invaliditetom* [doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu]. NaRDuS. <https://nardus.mpn.gov.rs/bitstream/handle/123456789/5651/Disertacija3542.pdf?sequence=7>
- Lazarou, I., Nikolopoulos, S., Petrantonakis, P. C., Kompatsiaris, I., & Tsolaki, M. (2018). EEG-based brain-computer interfaces for communication and rehabilitation of people with motor impairment: A novel approach of the 21st century. *Frontiers in Human Neuroscience*, 12, Article 14. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2018.00014>
- Leuthardt, E. C., Schalk, G., Wolpaw, J. R., Ojemann, J. G., & Moran, D. W. (2004). A brain-computer interface using electrocorticographic signals in humans. *Journal of Neural Engineering*, 1(2), 140-154. <https://doi.org/10.1109/RBME.2011.2172408>
- Mak, J. N., & Wolpaw, J. R. (2009). Clinical applications of brain-computer interfaces: Current state and future prospects. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 2, 187-199. <https://doi.org/10.1109/RBME.2009.2035356>
- Milekovic, T., Sarma, A. A., Bacher, D., Simeral, J. D., Saab, J., Pandarinath, C., Sorice, B. L., Blabe, C., Oakley, E. M., Tringale, K. R., Eskandar, E., Cash, S. S., Henderson, J. M., Shenoy, K. V., Donoghue, J. P., & Hochberg, L. R. (2018). Stable long-term BCI-enabled communication in ALS and locked-in syndrome using LFP signals. *Journal of Neurophysiology*, 120(7), 343-360. <https://doi.org/10.1152/jn.00493.2017>
- Miner, L. A., McFarland, D. J., & Wolpaw, J. R. (1998). Answering questions with an electroencephalogram-based brain-computer interface. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 79(9), 1029-1033. [https://doi.org/10.1016/S0003-9993\(98\)90165-4](https://doi.org/10.1016/S0003-9993(98)90165-4)
- Miranda, R. A., Casebeer, W. D., Hein, A. M., Judy, J. W., Krotkov, E. P., Laabs, T. L., Manzo, J. E., Pankratz, K. G., Pratt, G. A., Sanchez, J. C., Weber, D. J., Wheeler, T. L., & Ling, G. S. F. (2015). DARPA-funded efforts in the development of novel brain-computer interface technologies. *Journal of Neuroscience Methods*, 244, 52-67. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2014.07.019>
- Neumann, N., Kübler, A., Kaiser, J., Hinterberger, T., & Birbaumer, N. (2003). Conscious perception of brain states: Mental strategies for brain-computer communication. *Neuropsychologia*, 41(8), 1028-1036. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(02\)00298-1](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(02)00298-1)
- Nijboer, F., & Broeremann, U. (2009). Brain-computer interfaces for communication and control in locked-in patients. In B. Graimann, G. Pfurtscheller, B. Allison, (Eds.), *Brain-Computer Interfaces* (pp. 185-201). Springer.
- Oken, B. S., Orhan, U., Roark, B., Erdogmus, D., Fowler, A., Mooney, A., Peters, B., Miller, M., & Fried-Oken, M. B. (2014). Brain-computer interface with language model-electroencephalography fusion for locked-in syndrome. *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 28(4), 387-394. <https://doi.org/10.1177/1545968313516867>

- Rogić, N. (2021). Mozak-računar interfejs i njegova primena u upravljanju dronom. *Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka*, 36(10), 1835-1838. <https://doi.org/10.24867/14RB02Rogic>
- Ryan, D. B., Frye, G. E., Townsend, G., Berry, D. R., Mesa-G, S., Gates, N. A., & Sellers, E. W. (2010). Predictive spelling with a P300-based brain-computer interface: Increasing the rate of communication. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 27(1), 69-84. <https://doi.org/10.1080/10447318.2011.535754>
- Savić, A. (2014). *Elektoencefalografski signali za upravljanje računarskim interfejsom u neurorehabilitaciji* [doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu]. NaRDuS. <https://nardus.mpn.gov.rs/handle/123456789/8339>
- Sellers, E. W., Ryan, D. B., & Hauser, C. K. (2014). Noninvasive brain-computer interface enables communication after brainstem stroke. *Science Translational Medicine*, 6(257), Article 257re7. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.3007801>
- Sutter, E. E. (1992). The brain response interface: Communication through visually-induced electrical brain responses. *Journal of Microcomputer Applications*, 15(1), 31-45. [https://doi.org/10.1016/0745-7138\(92\)90045-7](https://doi.org/10.1016/0745-7138(92)90045-7)
- Verbaarschot, C., Tump, D., Lutu, A., Borhanazad, M., Thielen, J., van den Broek, P., Farquhar, J., Weikamp, J., Raaphorst, J., Groothuis, J. T., & Desain, P. (2021). A visual brain-computer interface as communication aid for patients with amyotrophic lateral sclerosis. *Clinical Neurophysiology*, 132(10), 2404-2415. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2021.07.012>
- Vidal, J. J. (1973). Toward direct brain-computer communication. *Annual Review of Biophysics and Bioengineering*, 2(1), 157-180. <https://doi.org/10.1146/annurev.bb.02.060173.001105>
- Wolpaw, J. R. (2004). Brain-computer interfaces (BCIs) for communication and control: A mini-review. *Supplements to Clinical Neurophysiology*, 57, 607-613. [https://doi.org/10.1016/S1567-424X\(09\)70400-3](https://doi.org/10.1016/S1567-424X(09)70400-3)
- Wolpaw, J. R., Bedlack, R. S., Reda, D. J., Ringer, R. J., Banks, P. G., Vaughan, T. M., Heckman, S. M., McCane, L. M., Carmack, C. S., Winden, S., McFarland, D. J., Sellers, E. W., Shi, H., Paine, T., Higgins, D. S., Lo, A. C., Patwa, H. S., Hill, K. J., Huang, G. D., & Ruff, R. L. (2018). Independent home use of a brain-computer interface by people with amyotrophic lateral sclerosis. *Neurology*, 91(3), e258-e267. <https://doi.org/10.1212/WNL.0000000000005812>
- Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., Heetderks, W. J., McFarland, D. J., Peckham, P. H., Schalk, G., Donchin, E., Quatrano, L. A., Robinson, C. J., & Vaughan, T. M. (2000). Brain-computer interface technology: A review of the first international meeting. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 8(2), 164-173. <https://doi.org/10.1109/tre.2000.847807>
- Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., McFarland, D. J., Pfurtscheller, G., & Vaughan, T. M. (2002). Brain-computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology*, 113(6), 767-791. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(02\)00057-3](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(02)00057-3)

## Application of brain-computer interface system in communication of people with severe motor deficits

Nadica Đ. Jovanović Simić, Ivana P. Arsenić, Zorica R. Daničić

*University of Belgrade – Faculty of Special Education and Rehabilitation, Belgrade, Serbia*

*Introduction.* Maintaining and improving communication skills of people with severe motor deficits are the main goals of speech therapy. Brain-computer interface systems can be used as a means of communication in this group of users, since they allow them to control external devices with the help of brain activity. This assistive technology represents a new communication channel between the human brain and computers, or other devices. These systems translate the user's intention, reflected in brain signals, into the output used to control an external device, without muscular activity. *Objective.* The aim of this paper was to describe and list basic types and divisions of the brain-computer interface system, as well as their development for communication in people with severe motor deficits. *Methods.* A systematic review of the available literature was performed by searching electronic databases available through the service of the Serbian Library Consortium for Coordinated Acquisition – KOBSON, as well as through Google Scholar and Research Gate. *Conclusion.* Early communication systems, based on the interpretation of brain waves, provided answers to simple "yes/no" questions. After that, they were also used in spelling methods, whose speed became higher over time. The development of a brain-computer interface system aims to reduce the length of training, as time-consuming training is one of the main obstacles for the users. In addition, research in this area is aimed at improving performance in all parts of the communication system, as well as developing a reliable interface between users and computers.

*Keywords:* assistive technology, brain-computer interface systems, motor deficits

PRIMLJENO: 14.12.2021.  
REVIDIRANO: 08.02.2022.  
PRIHVACENO: 10.02.2022.