

Mozgom upravljana tehnologija i njezine primjene

Marašek, Mihael

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:086954>

Rights / Prava: [Attribution 3.0 Unported](#)/[Imenovanje 3.0](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-10**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mihael Marašek

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr.sc. Zoran Kunica

Student:

Mihael Marašek

Zagreb, 2021.

ZADATAK



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
 Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
 proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
 materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Mihael Marašek** Mat. br.: 0035209411

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mozgom upravljana tehnologija i njezine primjene**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Brain controlled technology and its applications**

Opis zadatka:

Napredak znanosti omogućuje sve dublje pronicanje tj. analizu i objašnjavanje pojedinih fenomena, pri čemu se vrlo često radi upravo o želji za boljim sagledavanjem i razumijevanjem nas samih. Tako se racionalnim postupanjem omogućuje stvaranje sve naprednijih alata, u kojima se ogleda i opredmećena ljudskost, isprva u izvršnom, a zatim u upravljačkom smislu. Sa stanovišta upravljanja, od posebnog su interesa istraživanja mentalnih radnji i mozga.

U radu je potrebno:

1. istražiti i opisati mozgom upravljaju tehnologiju
2. opisati dostupnu opremu – EMOTIV EPOC X 14 Channel Mobile Brainwear
3. razmotriti i predložiti moguće primjene gornje i eventualno druge (dodatne) opreme u inženjerskom radu i proizvodnji (naprimjer: oblikovanje/projektiranje proizvoda i alata, procesa i sustava; snimanje, analiza i izvođenje rada).

Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

Zadatak zadao:

Prof. dr.sc. Zoran Kunica

Datum predaje rada:
1. rok: 18 veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predvideni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem prof. dr.sc. Zoranu Kunici na pomoći, savjetima te uloženom vremenu prilikom izrade završnog rada.

Ujedno bih zahvalio svojoj obitelji i prijateljima koji su mi bili potpora tijekom cijelog studija.

U Zagrebu, 23. rujna 2021.



Mihael Marašek

SAŽETAK

S brzim razvojem tehnologije, uporaba mozgom upravljane tehnologije u svakodnevnim aktivnostima sve je bliža ostvarenju. Napredak tehnologije te sve bolje razumijevanje funkcija mozga omogućili su stvaranje sve naprednijih uređaja za upravljanje koristeći mozak. Unutar ovog rada istražene su i opisane mozgom upravljane tehnologije i sučelja mozak–računalo. Opisan je način rada i primjena ovih tehnologija. Dan je pregled komercijalnog uređaja EMOTIV EPOC X za očitavanje EEG signala te su opisani softveri za obradu prikupljenih signala. Predložen je sustav koji bi pomoću mozgom upravljane tehnologije povećao efikasnost te poboljšao uvjete inženjerskog rada. Predloženi sustav implementirao bi uređaje EMOTIV EPOC te računalni program EMOTIVPRO kako bi dobio uvid u kognitivna stanja zaposlenika.

Ključne riječi: mozgom upravljana tehnologija, sučelje mozak–računalo, EMOTIV EPOC

SUMMARY

With the rapid development of technology, the use of brain controlled technology in everyday activities is getting closer to realization. Advances in technology and better understanding of brain functions have made it possible to create increasingly advanced brain controlled technology. Within this paper, brain-controlled technologies and brain-computer interfaces have been investigated and described. The mode of operation and application of these technologies is described. An overview of the commercial EMOTIV EPOC X device for reading EEG signals is given, and software for processing the collected signals is described. A system has been proposed that would use brain-controlled technology to increase efficiency and improve engineering conditions. The proposed system would implement EMOTIV EPOC devices and software solution EMOTIVPRO in order to gain insight into the cognitive states of employees.

Key words: brain controlled technology, brain-computer interface, EMOTIV EPOC

S A D R Ž A J

ZADATAK.....	I
IZJAVA	II
SAŽETAK.....	III
SUMMARY.....	IV
POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA	VI
POPIS SLIKA.....	VII
POPIS TABLICA.....	VIII
1. UVOD.....	1
2. MOZGOM UPRAVLJANA TEHNOLOGIJA.....	2
3. SUČELJE MOZAK–RAČUNALO.....	3
3.1. Povijest sučelja mozak-računalo.....	3
3.2. Način rada.....	4
3.2.1. Prikupljanje signala.....	5
3.2.2. Obrada signala	8
3.2.3. Klasifikacija signala.....	10
3.2.4. Interakcija s računalom	11
3.3. Primjena.....	12
4. EMOTIV EPOC X.....	14
4.1. Dijelovi uređaja	14
4.2. Specifikacije.....	15
4.3. Korištenje.....	17
4.4. BCI softveri.....	18
4.4.1. EmotivBCI.....	19
4.4.2. EmotivPRO.....	24
4.4.3. EmotivBrainViz	26
5. MOGUĆE PRIMJENE MOZGOM UPRAVLJANE TEHNOLOGIJE U INŽENJERSKOM RADU I PROIZVODNJI.....	29
5.1. Primjena sučelja mozak-računalo u proizvodnji	29
5.2. Prijedlog primjene mozgom upravljane tehnologije u inženjerskom radu.....	31
6. ZAKLJUČAK	33
7. LITERATURA.....	34

POPIS OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis
BCI		eng. <i>Brain-Computer Interface</i> – sučelje mozak-računalo
ECoG		elektrokortikografija
EEG		elektroencefalografija
eng.		engleski
fMRI		funkcionalna magnetska rezonanca
MEG		magnetoencefalografija
	USD	američki dolar, novčana jedinica

POPIS SLIKA

Slika 1.	Shema općenitog sustava BCI [18]	5
Slika 2.	Shema prikupljanja podataka invazivnim metodama [20]	6
Slika 3.	Shematski prikaz neinvazivne metode prikupljanja podataka [21].....	7
Slika 4.	EPOC+ 14 Channel Mobile Brainwear	8
Slika 5.	Shema uklanjanja neželjenih signala [26]	9
Slika 6.	Objedinjeni prikaz svih moždanih valova [29]	11
Slika 7.	Prvi komercijalni BCI sustav za kućnu upotrebu kompanije g.tec [30].....	12
Slika 8.	Prostetička ruka kontrolirana signalom EEG [34]	13
Slika 9.	Dijelovi uređaja EMOTIV EPOC X [41].....	15
Slika 10.	Pozicije senzora prema 10-20 sustavu [45]	16
Slika 11.	Postavljanje uređaja [46]	18
Slika 12.	Grafičko sučelje aplikacije EmotivBCI.....	19
Slika 13.	Registracijska forma u aplikaciji EmotivBCI	20
Slika 14.	Prikaz kvalitete kontakta senzora [51]	21
Slika 15.	Učenje algoritma uzorcima [50].....	22
Slika 16.	Učenje algoritma pokretima lica	23
Slika 17.	Mjera kognitivnih stanja na EmotivBCI sučelju [54]	24
Slika 18.	Prikaz neobrađenog EEG signala u EmotivPRO aplikaciji [55].....	25
Slika 19.	Uvid u senzora na lokaciji AF3 u aplikaciji EmotivPRO [55].....	26
Slika 20.	Prikaz moždane aktivnosti u EmotivBrainViz softveru [57]	27
Slika 21.	Prikaz funkcija određenih dijelova mozga u softveru EmotivBrainViz [57].....	28
Slika 22.	Prikaz industrijskog robota upravljanog BCI uređajem [60]	30
Slika 23.	Sustav prepoznavanja dijelova s greškom [63]	30
Slika 24.	Zavarivanje pomoću sučelja mozak-računalo [65]	31

POPIS TABLICA

Tablica 1. Tehničke specifikacije uređaja EMOTIV EPOC X [45]..... 17

1. UVOD

Brz napredak znanosti i tehnologije omogućuje sve bolje pojašnjenje funkcija i sposobnosti mozga. Mozak, kao najkompleksniji ljudski organ, funkcionira kao kontrolno središte u tijelu koje upravlja svim motoričkim (i mentalnim) radnjama te filtrira brojne informacije koje svakodnevno utječu na naša osjetila [1]. S boljim razumijevanjem funkcija mozga otvara se niz novih mogućnosti za implementaciju raznih tehnologija. Upravljanje računalom, robotima ili invalidskim kolicima koristeći isključivo misli, sve je bliže ostvarenju.

Direktna komunikacijska veza između računala i čovjeka već postoji pod nazivom sučelje mozak–računalo (engl. *Brain–Computer Interface*). Kompanije poput Neuralinka, Emotiva, Kernela ulažu velike resurse za unaprijeđenje ove tehnologije koja bi uvelike poboljšala kvalitetu svakodnevnog života. Mogućnosti su beskrajne, od pomoći osoba s invalidnošću do olakšanja obavljanja svakodnevnih radnih zadataka.

U svojim počecima, razvoj mozgom upravljane tehnologije bio je vezan isključivo za kontrolirane uvjete u laboratorijima [2]. Razvoj neinvazivnih metoda snimanja moždane aktivnosti omogućio je primjenu i razvoj mozgom upravljane tehnologije izvan laboratorijskog okruženja.

Cilj ovog rada je istražiti mozgom upravljane tehnologiju, opisati na koji način ona funkcionira te sukladno tome odrediti njezinu primjenu, posebice u domeni strojarstva. U sklopu rada, posebno je prikazana dostupna oprema – EMOTIV EPOC X 14 Channel Mobile Brainwear. Također, predložene su moguće primjene mozgom upravljane tehnologije u inženjerskom radu i proizvodnji.

2. MOZGOM UPRAVLJANA TEHNOLOGIJA

S brzim razvojem tehnologije, upravljane koristeći isključivo mozak sve je bliže svakodnevnoj primjeni. Mozgom upravljana tehnologija ima mogućnost vrlo široke primjene u današnjem društvu. U ovom dijelu rada opisana su dosadašnja postignuća u polju tehnologije te mogućnosti koje mozgom upravljana tehnologija nudi.

Trenutno se najveći dio istraživanja mozgom upravljane tehnologije odvija u polju medicine kako bi se pritom pomoglo ljudima kojima su potrebni prostetički implantati [3]. Primjerice, mozgom upravljana tehnologija bi osobi s paralizom mogla omogućiti upravljanje invalidskim kolicima ili prostetičkom rukom pomoću misli [3]. Trenutno se radi i na programima za komunikaciju koji bi osobama s nemogućnošću govora omogućilo da napišu poruku na računalu koristeći se isključivo mozgom [4].

Mozgom upravljana tehnologija mogla bi biti korisna i u vojnoj industriji. DARPA, Pentagonov odsjek za istraživanje i razvoj, trenutno radi na inicijativi „*Silent Talk*“ koja bi vojnicima omogućila komunikaciju samo pomoću misli [4].

Mozgom upravljana tehnologija ima veliku primjenu i u industriji videoigara [4]. Mnoge kompanije rade na videoigrama koje bi pomogle osobama koje boluju od Alzheimera popraviti pamćenje i djeci koja boluju od ADHD pomoći s vještinama koncentracije [4].

Većina ovih tehnologija temelje se na mjerenju električne moždane aktivnosti, elektroencefalografiji.

Pojam koji je usko povezan te se često isprepliće s mozgom upravljanom tehnologijom je sučelje mozak-računalo. Sučelje mozak-računalo predstavlja sustav koji prikuplja moždane signale, analizira ih te prevodi u naredbe na vanjskom uređaju [5]. Sučelja mozak-računalo pobliže su opisana u poglavlju 3.

3. SUČELJE MOZAK–RAČUNALO

Još od prvog izuma računala, korisniku se pokušava omogućiti što jednostavnija i lakša interakcija sa računalom. Načini interakcije čovjeka i računala važan su koncept od samog nastanka računala [6]. Od interakcije pomoću tipkovnice i miša prelazi se na interakciju *touchscreenom* te glasovnim naredbama [6]. Jedan od načina interakcije čovjeka i računala koji se trenutno intenzivno razvija su sučelja mozak–računalo. U ovom odjeljku поближе je opisan razvitak, način rada sustava te njegove primjene.

3.1. Povijest sučelja mozak-računalo

Razvitak sučelja mozak–računalo započeo je razvojem elektroencefalograma od strane Hansa Bergera [7]. Berger je prvi zabilježio ljudsku moždanu aktivnost koristeći EEG [7]. Sljedeći veliki korak napravio je Jacques Vidal nizom radova od 1973. do 1977. [8 i 9]. Vidal u svojim radovima prvi koristi naziv *Brain–Computer Interface* za ovu tehnologiju [7]. Vidalovi radovi dokazali su da se signali stvoreni moždanom aktivnošću mogu koristiti kako bi razaznali korisnikovu namjeru [10]. Nakon Vidalovih radova, 1980-ih nastaje mnogo radova u kojima se implementiraju sučelja mozak–računalo [11]. Tako Farwell i Donchin u svom radu iz 1988. pod nazivom „Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event – related brain potentials“ predstavljaju uređaj za prikazivanje slova temeljen na očitanjima EEG [11 i 12]. Bozinovski i Sestakov 1988. objavljuju rad „Using EEG alpha rhythm to control a mobile robot“ u kojem predlažu upravljenje robota koristeći elektroencefalografiju [7 i 13]. Nedugo zatim, Jonathan Wolpaw u radu „Brain-computer interfaces for communication and control“ razvija BCI u kojem korisnik može pomicati pokazivač miša [11 i 14]. Svi ovi radovi pomogli su postaviti temelj razvoju sučelja mozak–računalo.

Završetak 20. stoljeća i početak 21. stoljeća označio je značajan razvitak u istraživanjima sučelja mozak–računalo [11]. Nova saznanja o mozgu te naprednija tehnologija omogućili su kvalitetniju obradu EEG signala [11]. U isto vrijeme, započela su testiranja tehnologije na životinjama koja su pokazala mogućnost kontroliranja robotske ruke pomoću moždanih signala [11, 15 i 16]. Godine 1999. u SAD-u je održan prvi BCI istraživački susret [11].

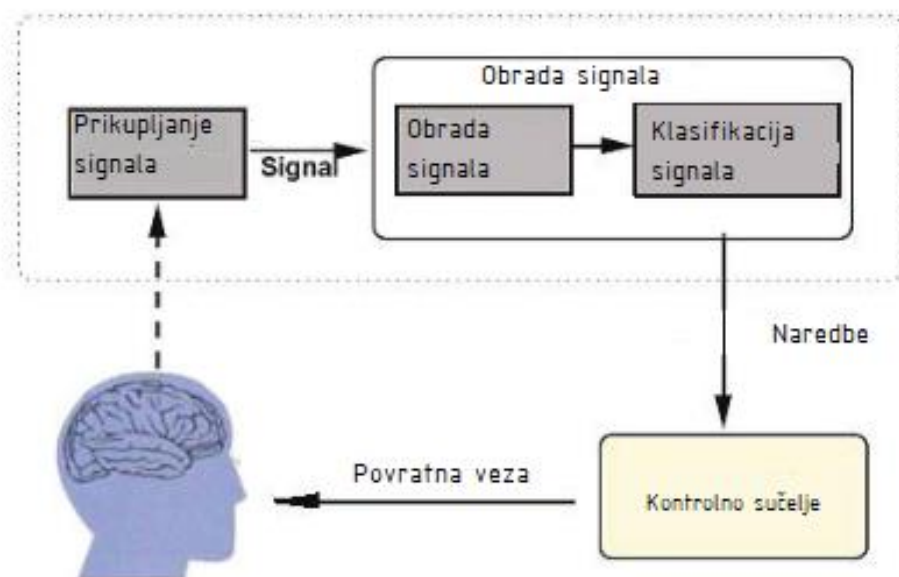
Daljnja istraživanja otvaraju sve više mogućnosti korištenja sučelja mozak–računalo. Invazivne metode EEG-a postaju sve djelotvornije, otkrivaju se nove tehnologije snimanja mozga, komercijalni uređaji za provođenje EEGa postaju sve učinkovitiji i dostupniji, algoritmi za obradu EEG signala sve se više poboljšavaju [11]. Trenutno razvijena sučelja mozak–računalo pokazuju da u kontroliranim uvjetima mogu pomoći korisnicima s komunikacijom i svakodnevnim aktivnostima te da je velik prostor ostavljen za njihov daljnji napredak [10].

3.2. Način rada

Glavni cilj sustava BCI (*engl.* brain–computer interface) je interakcija korisnika i uređaja [10]. Sustavi BCI obuhvaćaju mjerenje, analizu i evaluaciju složenih neurofizioloških obrazaca u mozgu očitovanih u električnoj aktivnosti mozga [17].

Općeniti model sučelja mozak–računalo prikazan je slikom 1. [18] BCI je sustav umjetne inteligencije koji ima sposobnost prepoznavanja određenih uzoraka signala mozga te se u općenitom slučaju struktura BCIA prikazuje u pet uzastopnih faza [18 i 19]:

- prikupljanje
- predobrada i pojačavanje signala
- izdvajanje značajki
- klasifikacija
- kontrolno sučelje.



Slika 1. Shema općenitog sustava BCI [18]

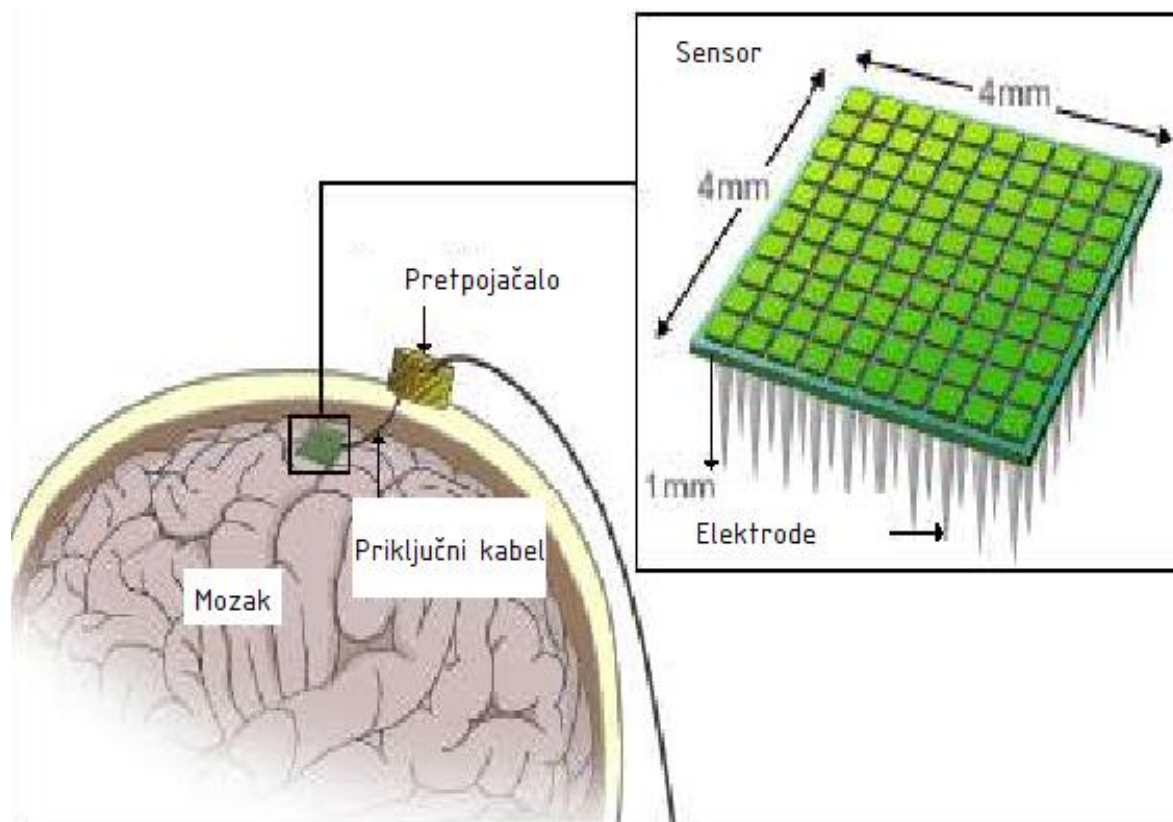
Prije samog rada sa sučeljima mozak–računalo potrebno je provesti kalibraciju sustava [6]. Postupak kalibracije obuhvaća namještanje klasifikacijskog algoritma, odabir optimalnih značajki za mjerenje te odabir lokacije senzora [6]. Moždana aktivnost svojstvena je za svakog korisnika, stoga se BCI sustavi kalibriraju te prilagođavaju svakom korisniku [6]. Prije rada s BCI sustavom potrebno je snimiti EEG signale koje korisnik stvara prilikom izvršavanja radnji koje se žele postići [6]. Primjerice, ako se želi pomicati miš na nekom sučelju putem BCI-a, potrebno je snimiti uzorak signala koje korisnik stvara prilikom obavljanja te radnje.

3.2.1. Prikupljanje signala

Prva faza rada svakog sustava BCI sastoji se od prikupljanja električnog signala stvorenog od strane moždanih stanica [20]. Prikupljanje signala moguće je postići na dva različita načina, pomoću invazivnih i neinvazivnih metoda [4].

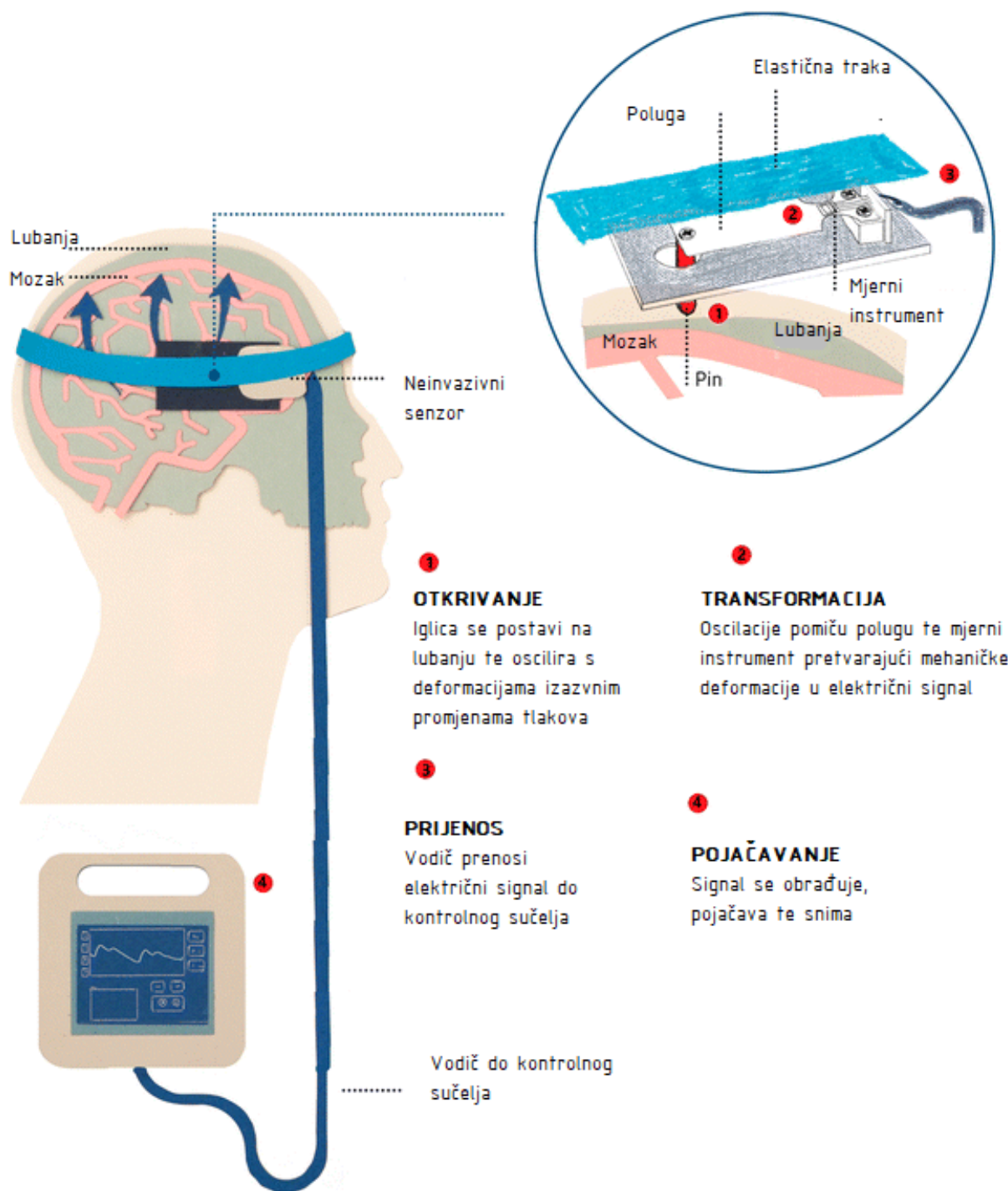
Invazivne metode koriste elektrode ugrađene izravno u moždano tkivo kako bi prikupljale signal [20]. Za provođenje invazivne metode potrebna je operacija pri kojoj se otvara lubanja te se elektrode postavljaju izravno na moždanu koru [20]. Ovakvo snimanje signala moždane aktivnosti naziva se elektrokortikografija (engl. *electrocortigraphy*, EcoG) [17]. Iako invazivne metode daju izvrsnu kvalitetu signala, ove metode su etički sporne te se trenutno

provode isključivo na životinjama [20]. Prikaz invazivne metode prikupljanja podataka prikazan je slikom 2.



Slika 2. Shema prikupljanja podataka invazivnim metodama [20]

Kod neinvazivnih metoda prikupljanja, moždana aktivnost se mjeri postavljenjem elektroda na glavu korisnika [20]. Shema rada osnovnog modela neinvazivne metode prikupljanja signala prikazan je na slici 3. [21]. Prednost neinvazivnih metoda je njihova jednostavnost u odnosu na invazivne metode, dok je nedostatak lošija kvaliteta signala te spori prijenos informacija [22].



Slika 3. Shematski prikaz neinvazivne metode prikupljanja podataka [21]

Za sustave BCI koriste se razne metode oslikavanja mozga, primjerice encefalografija (EEG), elektrokortikografija (ECoG), magnetoencefalografija (MEG), infracrvena spektrofotometrija, funkcionalna magnetska rezonanca (fMRI) [23]. Ipak, EEG te ECoG su najpoželjnije zbog visoke razlučivosti koja prati veoma brze promjene moždane aktivnosti [23]. Za BCI je najvažnije da je metoda prikupljanja podataka takva da omogućava prikupljanje signala

visoke vremenske razlučivosti kako bi obrada signala što brže dala rezultat [23]. Prednost elektroencefalografija je i jednostavnost uporabe za korisnika te je EEG najčešće korištena metoda za mjerenje pri BCI sustavima [24]. S obzirom na sve navedeno, ovaj rad upravo najveću pažnju stavlja upravo na BCI sustave koji koriste EEG.

Na slici 4. prikazan je jedan od uređaja za neinvazivno prikupljanje podataka [25].

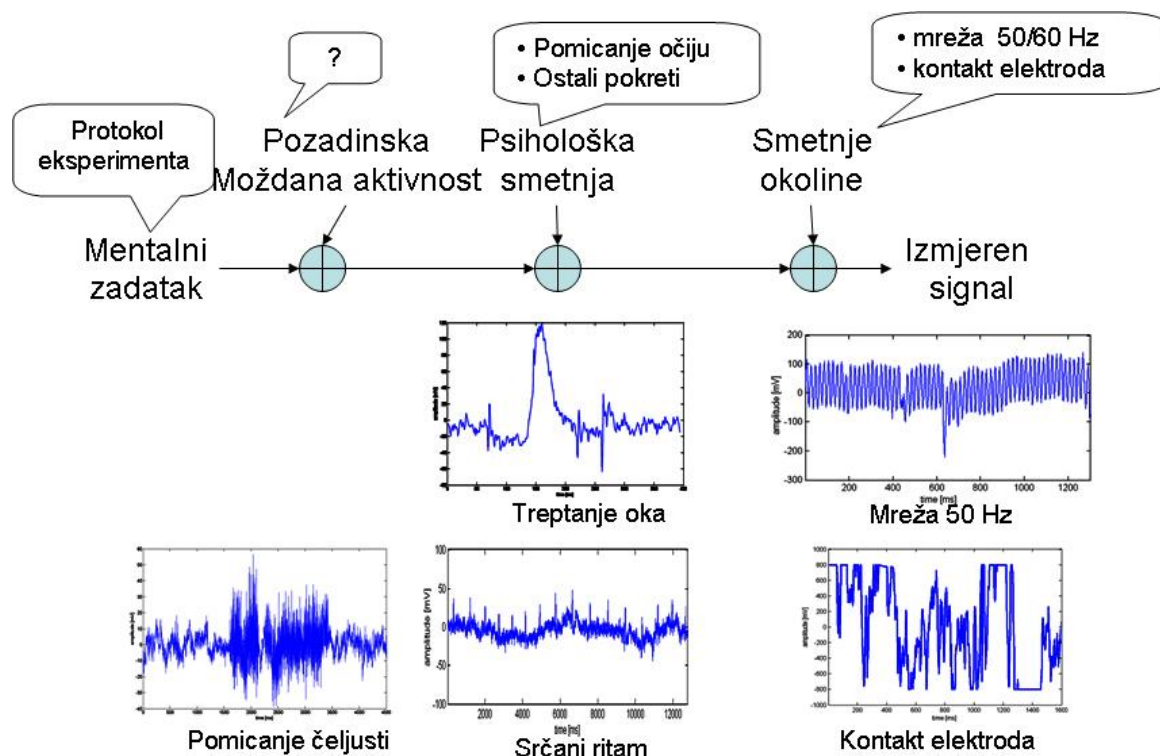


Slika 4. EPOC+ 14 Channel Mobile Brainwear

3.2.2. Obrada signala

U pravilu, signali prikupljeni EEG metodom imaju amplitudu u rasponu od $10 \mu\text{V}$ do $100 \mu\text{V}$, što znači da su vrlo slabi u odnosu na signale mišićne aktivnosti ili signale dobivene elektrokardiografijom, stoga zahtjevaju poboljšanje prije same obrade [19]. Mjerenjem moždane aktivnosti dobiva se velika količina podataka [6]. Snimljeni signal sastoji se od moždane aktivnosti koja je potrebna (aktivnost mentalnog zadatka, npr. namjera pomicanja dijela tijela), pozadinske moždane aktivnosti, psihološke smetnje (pokreti očiju, čeljusti, treptanje te sva druga živčana aktivnost u blizini mozga) i elektromagnetske smetnje okoline [26]. Kako ne bi došlo do pogreške u analizi signala, u ovoj fazi potrebno je obraditi signal

kako bi se uklonilo neželjene signale [27]. Neželjeni signali mogu se umanjiti ili potpuno ukloniti odvijanjem mjerenja u kontroliranim uvjetima [26]. Shema uklanjanja nepoželjnih signala prikazana je slikom 5. Prilikom obrade signala pokušava se izbaciti subjektova pozadinska moždana aktivnost koja nije potrebna za eksperiment [26]. Subjekt mjerenja mora biti potpuno usredotočen na radnju koju obavlja te se time umanjuje utjecaj pozadinske moždane aktivnosti [26]. Pomicanje očiju i ostali pokreti tijela koji stvaraju neželjeni signal mogu se umanjiti smirivanjem subjekta mjerenja [26].



Slika 5. Shema uklanjanja neželjenih signala [26]

Svi ostali neželjeni signali koji se nisu u mogućnosti ukloniti, najčešće se uklanjaju filtriranjem, pri čemu razlikuju se četiri osnovne vrste filtara [6]:

- *highpass* filteri – propuštaju frekvencije iznad željenog praga
- *lowpass* filteri – propuštaju frekvencije ispod željenog praga
- *bandpass* filteri – samo željena frekvencija se propušta
- *bandstop* filteri – zaustavljaju samo namještenu frekvenciju.

Nakon prolaska signala kroz filtarsku obradu u njemu i dalje ostaje pozadinska moždana aktivnost [28]. Sljedeći korak je biranje korisnog signala iz pozadinske aktivnosti (engl.

feature extraction) [28]. Korisni signal može se izvaditi u vremenu, frekvenciji i prostoru sljedećim metodama [28]:

- Vremensko–frekvencijski prikaz, TFR (engl. *Time Frequency Representation*)
- Mjera aktivnosti stanica (neurona)
- Gustoća spektra snage (engl. *Power Spectral Density*)
- Uspoređivanje uzoraka (engl. *Pattern Matching*)
- Čisti signal (engl. *Raw Signal*)
- Parametri modela (engl. *Model Parameters*).

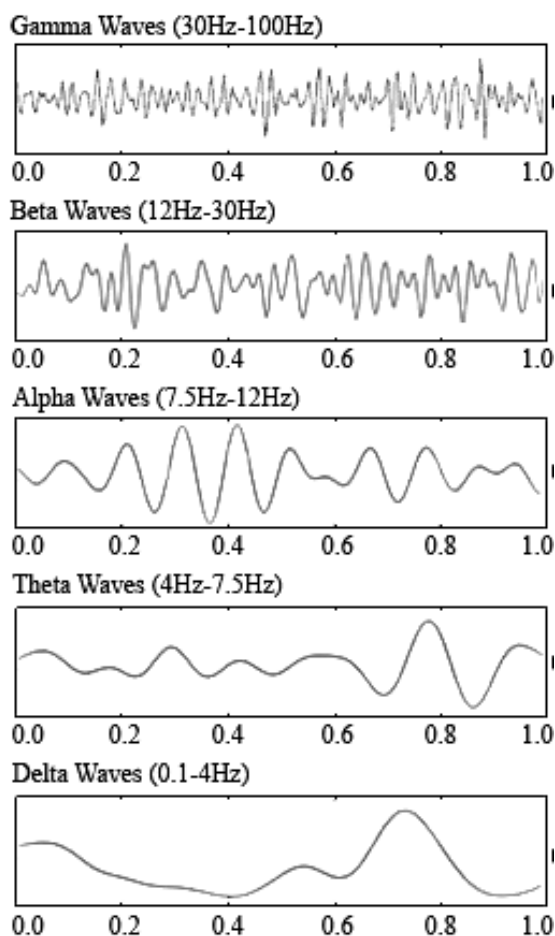
Sve navedene metode pobliže su opisane u [6].

3.2.3. Klasifikacija signala

Pretvaranje značajki signala u naredbe ključan je korak svakog BCI sustava, a kako bi se postigao ovaj korak koriste se algoritmi klasifikacije [6]. Nakon prikupljanja i obrade moždanih signala, potrebno je prepoznati određene korisne signale i klasificirati ih u upravljačke signale [26]. Prema Kameswara et.al. [20] (2012.) valovi se klasificiraju u šest različitih skupina:

- beta valovi frekvencije od 13 Hz do 50 Hz
- alfa valovi frekvencije od 8 Hz do 13 Hz
- theta valovi frekvencije od 4 Hz do 7 Hz
- delta valovi frekvencija od 0,5 Hz do 4 Hz
- gama valovi, frekvencija > 35 Hz
- mu valovi, podvrsta alpha valova, frekvencije od 8 Hz do 12 Hz.

Mozak oslobađa **beta** valove prilikom razmišljanja i rješavanja složenih problema [20]. **Alfa** valovi se oslobađaju kada je mozak opušten te se najbolje primjećuju kada subjekt ima zatvorene oči [26]. **Delta** valove može se snimiti u dubokom snu ili pri nekim neurološkim poremećajima, primjerice epilepsiji [26]. **Gama** valovi oslobađaju se prilikom opažanja i meditacije[26]. **Mu** valovi karakteristični su za pokrete tijela [20]. Objedinjen prikaz svih moždanih valova prikazan je slikom 6. [29].



Slika 6. Objedinjeni prikaz svih moždanih valova [29]

Postoji velik broj metoda klasifikacije te se one mogu podijeliti na linearne i nelinearne [28]. Klasifikacija signala te metode klasificiranja pobježe su opisane u [6] te [26].

3.2.4. Interakcija s računalom

Posljednja faza u BCI sustavu je izvršavanje naredbi na željenoj aplikaciji koristeći isključivo mozak [27]. Za izvršavanje naredbi koriste se analizirani i obrađeni signali iz prethodne dvije faze [27]. BCI sustavi podržavaju sve programske jezike, sve operacijske sustave te bilo koje razvojno okruženje [27]. Primjena sučelja mozga i računala su brojna te će se u daljnjem dijelu rada pobježe opisati primjena ovih sučelja od strane kompanije EMOTIV. Slika 7. prikazuje interakciju čovjeka s računalom koristeći prvi komercijalno dostupni BCI sustav za kućnu upotrebu. Na slici korisnik igra računalnu igru koristeći se isključivo mozgom.



Slika 7. Prvi komercijalni BCI sustav za kućnu upotrebu kompanije g.tec [30]

3.3. Primjena

Sučelja mozak–računalo pronalaze svoju primjenu u širokom polju područja. Primjere primjene sučelja mozak–računalo može se naći u medicini, obrazovanju, industriji igara te u sustavima za osiguranje sigurnosti [31].

Sučelja mozak–računalo pronalaze najširu primjenu u **polju medicine**. Hanafiah et al. (2010) u radu „EEG pattern of smokers for theta, alpha and beta band frequencies“ primjenjuju sučelja mozak–računalo pri istraživanju uzoraka moždane aktivnosti kod pušača [31 i 32].

Prostetička pomagala temeljena na BCI sustavima mogu koristiti kako bi osobama s invalidnošću omogućila ponovnu uporabu oštećenih dijelova tijela [33]. Prostetička ruka upravljana EEG signalom prikazana je slikom 8. [34].

Također, BCI sustavi mogu pomoći u otkrivanju poremećaja spavanja, disleksije, epilepsije i ostalih neuroloških poremećaja [31].



Slika 8. Prostetička ruka kontrolirana signalom EEG [34]

S razvojem pametnih telefona, pametnih kućanskih aparata i ostalih pametnih uređaja BCI sustavi bi se mogli implementirati u **svakodnevne aktivnosti** [31]. Lin et al. (2012) u radu „Brain Computer Interface-Based Smart Living Environmental Auto-Adjustment Control System in UpnP Home Networking“ predlažu pametni sustav temeljen na BCI sustavu koji prilagođava korisnikovu okolinu njegovom mentalnom stanju [35].

BCI sustavi mogli bi se implementirati i u obrazovni sustav. Primjerice, primjenom BCI sustava mogao bi se implementirati **personaliziraniji pristup učenju** u kojem bi predavači imali povratnu informaciju o mentalnom stanju učenika [36].

Industrija zabave i videoigara sve više koristi BCI sustave. Mnoge videoigre koriste EEG signale za upravljanje vozilima [37]. Sve je veći udio i videoigrama koje pomoću sučelja mozak–računalo smanjuju stres kod korisnika [31].

Navedene tehnologije su samo mali dio primjera koje ova tehnologija omogućuje. Brz razvoj ove tehnologije ponudit će još niz primjena koje će povećati korisnikovu kvalitetu života.

4. EMOTIV EPOC X

Emotiv EPOC X je komercijalni uređaj za provođenje elektroencefalografije proizveden od kompanije Emotiv Systems [38]. Emotiv EPOC X očitava električne signale iz mozga na način da uspoređuje razliku električnog potencijala između neurona [3]. Dobivene električne signale moguće je spremiti, analizirati i istraživati te tako naučiti način na koji mozak funkcionira [39]. U ovom poglavlju opisana je dostupna oprema, specifikacije, način korištenja uređaja EPOC X te su opisani softveri za obradu podataka prikupljenih EPOC X headsetom.

4.1. Dijelovi uređaja

Emotiv EPOC X uređaj dolazi u zaštitnoj kutiji u kojoj se nalaze [40]:

- EPOC X uređaj
- USB *stick* za povezivanje uređaja s računalom
- fiziološka otopina
- USB kabel za punjenje tipa C
- senzori u obliku jastučića od filca odnosno pusta

Sve navedene komponente prikazane su na slici 9.



Slika 9. Dijelovi uređaja EMOTIV EPOC X [41]

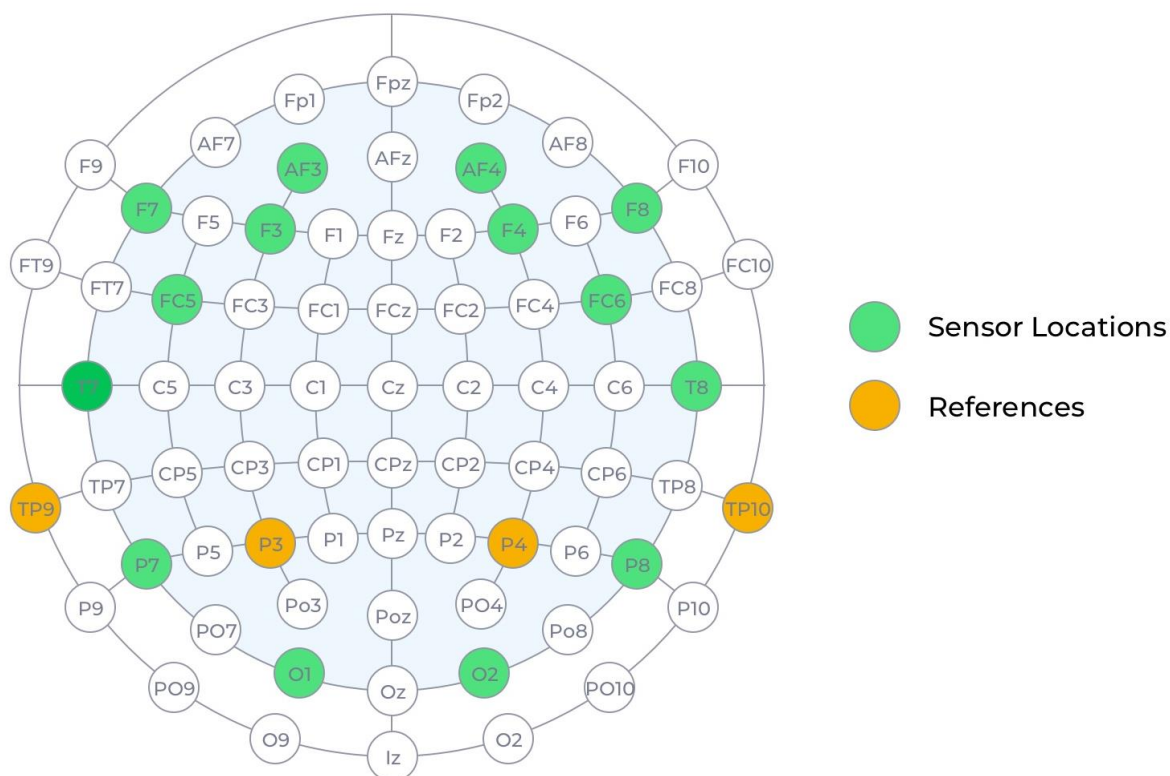
4.2. Specifikacije

EMOTIV EPOC X ima točnost od $0,51 \mu\text{V}$ za mjerenje električnog potencijala [42]. Električni potencijal se mjeri pomoću 14 elektroda postavljenih na optimalna mjesta lubanje prema sustavu 10-20 [42]. *International 10–20 System* je metoda koja određuje razmještaj elektroda na lubanji prilikom EEG pregleda, studije spavanja ili drugih sličnih istraživanja [43]. Metoda je razvijena kako bi se istraživanja standardizirala [44].

Svaka lokacije elektrode označena je slovom koje predstavlja određeni dio mozga [44]. Prema tome, oznaka Fp označava prefrontalni korteks, oznaka F označava frontalni režanj, oznaka T označava temporalni režanj, oznaka P označava parijentalni režanj, oznaka C označava centralni dio mozga te oznaka O označava okcipitalni režanj [44]. Oznaka Z označava referentne elektrode [44]. Uz slovnu oznaku stoji i brojeva oznaka. Elektrode označene s

parnim brojem (2, 4, 6, 8) nalaze se na desnoj strani glave, dok se elektrode označene s neparnim brojem (1, 3, 5, 7) nalaze na lijevoj strani glave.

Razlika u potencijalu mjeri se između 14 elektroda i dvije referentne točke za praćenje [3]. Senzori EPOCa daju informacije s frontalnog, temporalnog, parijentalnog te okcipitalnog režnja [45]. Smještaj senzora prikazan je slikom 10.



Slika 10. Pozicije senzora prema 10-20 sustavu [45]

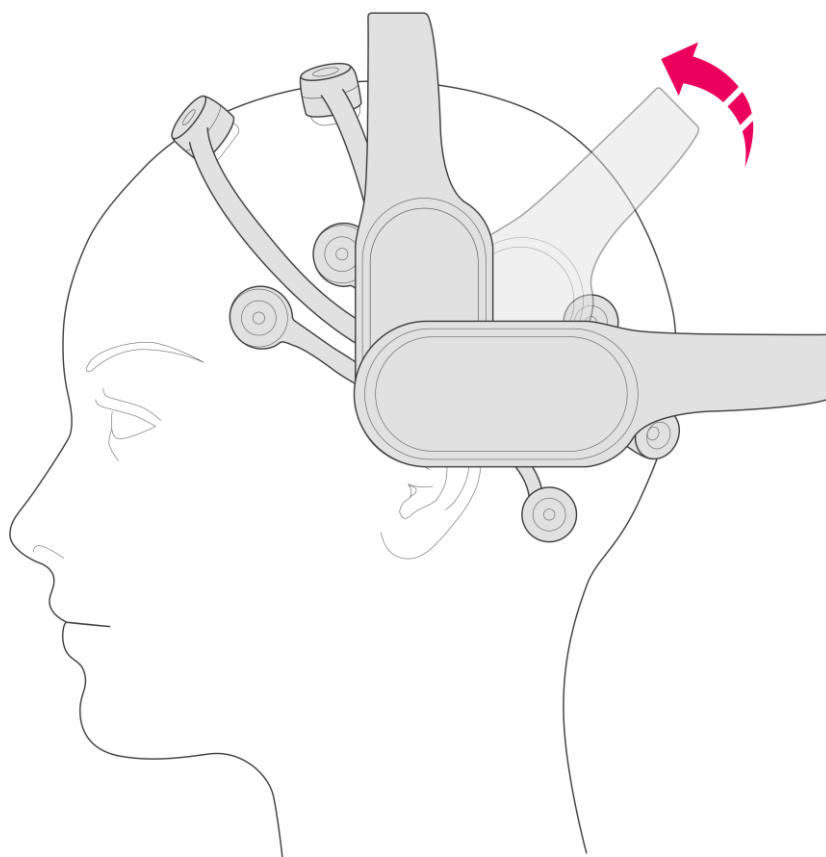
Ostale tehničke specifikacije navedene su u tablici 1.

Tablica 1. Tehničke specifikacije uređaja EMOTIV EPOC X [45]

Broj kanala	14
Pozicije senzora	AF3, F7, F3, FC5, T7, P7, O1, O2, P8, T8, FC6, F4, F8, AF4
Metoda uzorkovanja	Sekvecijalno uzorkovanje
Učestalost uzorkovanja	2048 Hz
EEG rezolucija	14 bita
Trajanje baterije	do 9 sati
Spajanje	Bežično
Materijal senzora	Ag/AgCl + filc + fiziološka otopina
Masa	170 g
Dimenzije, cm	9 x 15 x 15

4.3. Korištenje

Prije korištenja potrebno je navlažiti senzore fiziološkom otopinom. Uređaj i računalo povezuju se pomoću USBa danog s uređajem. Prvo je potrebno uključiti USB u računalo, a zatim uključiti uređaj. Svjetlosni signal na USB-u pokazuje stanje veze. Nakon obavljanja prethodnih akcija potrebno je staviti uređaj na glavu te je time uređaj spreman za uporabu. Pravilno postavljen uređaj prikazan je slikom 11.



Slika 11. Postavljanje uređaja [46]

Nakon postavljanja, uređaj je potrebno „upoznati“ s načinom rada osobe koja ga koristi [3]. Način „upoznavanja“ detaljnije je opisan u odjeljku 4.4. Za daljnji prikaz, analizu te uporabu prikupljenih podataka, koriste se softveri BCI. Odabir softvera ovisi o potrebama korisnika. U sljedećem odjeljku dan je pregled i opis nekoliko BCI softvera.

4.4. BCI softveri

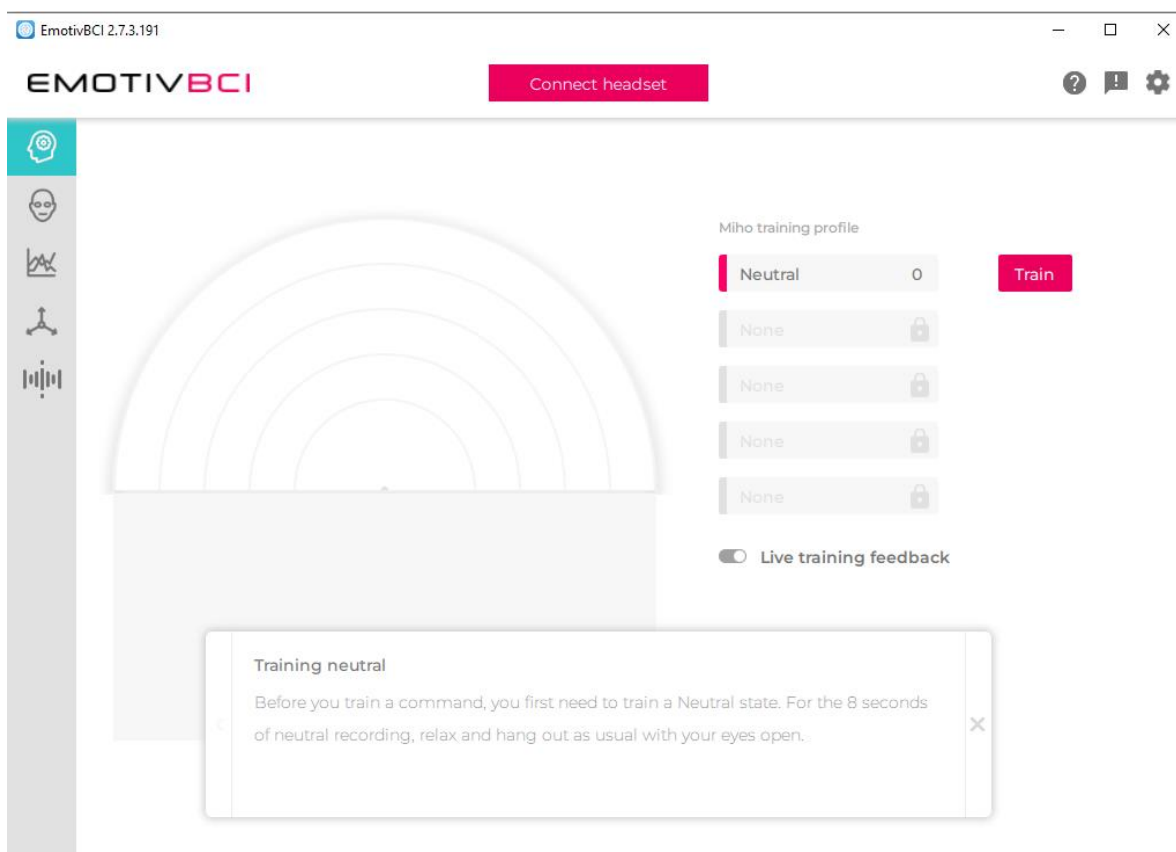
Emotiv trenutno nudi tri različita BCI softvera: EmotivBCI, EmotivPRO i EmotivBrainViz [47]. Na tržištu također postoje i mnogi drugi softveri poput OpenBCIa i OpenVibe [48 i 49].

4.4.1. EmotivBCI

EmotivBCI je besplatan računalni program prilagođen Windows i Mac operativnim sustavima koji omogućuje obradu i analizu podataka prikupljenih uređajem EMOTIV EPOC X [50]. Iako je softver besplatan, softver je namijenjen samo za interpretaciju podataka prikupljenih Emotiv uređajima. EmotivBCI računalni program omogućuje [50]:

- obavljanje specifičnih, prethodno naučenih radnji na računalu koristeći isključivo misli
- prepoznavanje i prikaz kognitivnih stanja, uključujući koncentriranost, uzbuđenje, zainteresiranost, stres i opuštenost
- obavljanje radnji na temelju izraza lica
- obavljanje radnji na temelju pokreta glave.

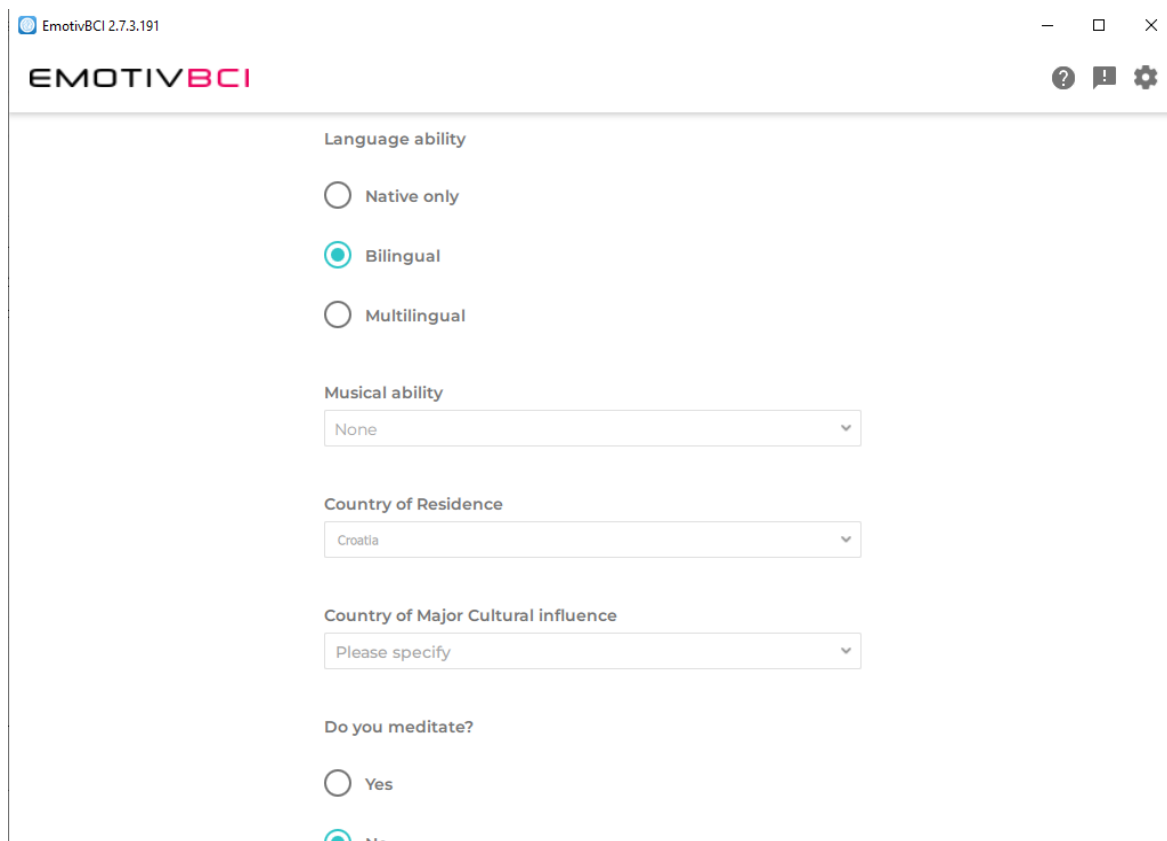
Grafičko sučelje aplikacije EmotivBCI prikazano je na slici 12.



Slika 12. Grafičko sučelje aplikacije EmotivBCI

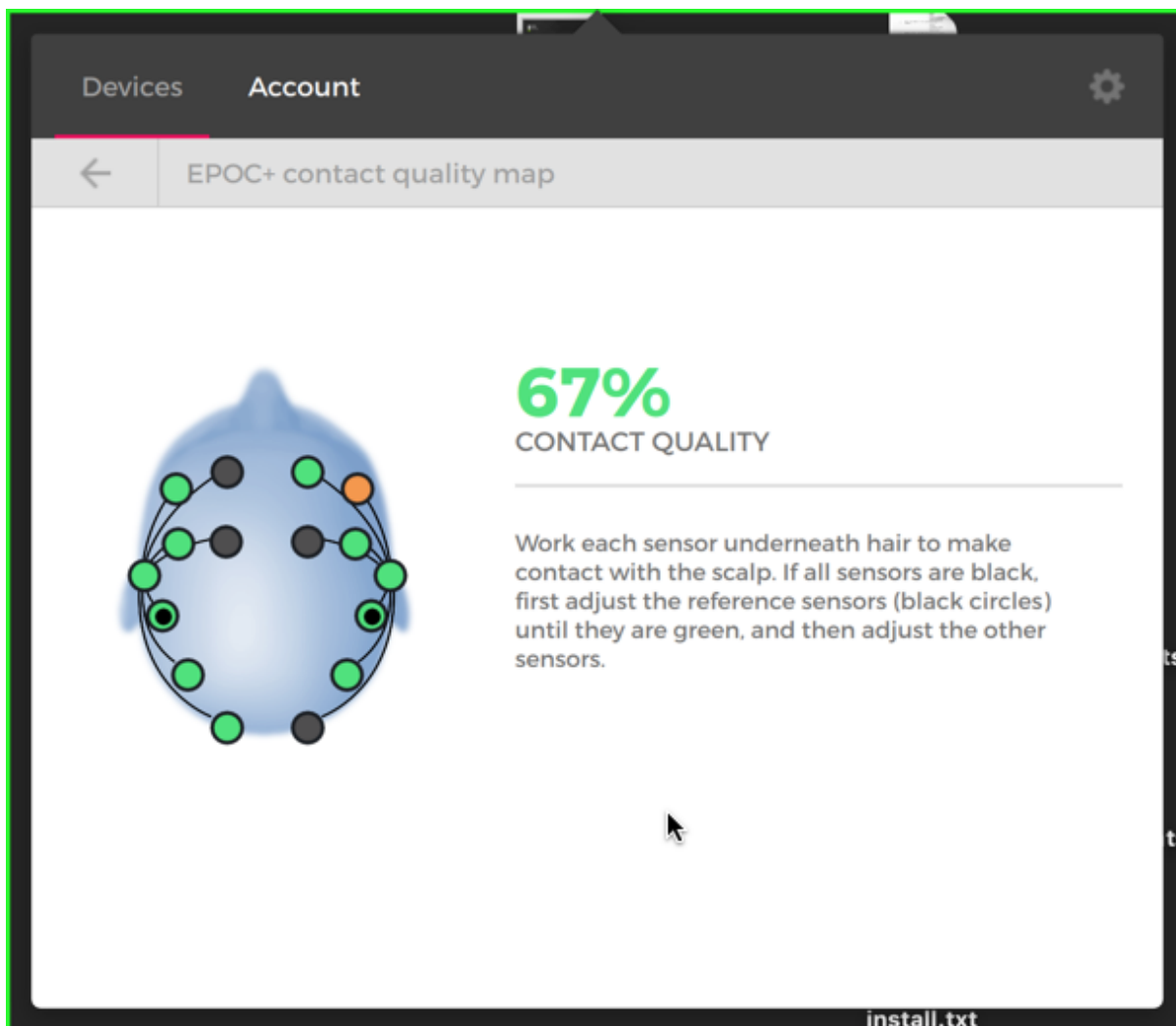
Nakon instaliranja aplikacije, potrebno je izvršiti registraciju na stranici Emotiva. Pojedine vještine korisnika, poput sviranja instrumenta, govorenja više jezika ili razina obrazovanja

moгу utjecati na način na koji mozak funkcionira [50]. Stoga se prilikom prvog registriranja korisnika ispituju navedena pitanja kako bi izmjereni podaci dali što bolje rezultate [50]. Dio registracijskog obrasca prikazan je slikom 13.



Slika 13. Registracijska forma u aplikaciji EmotivBCI

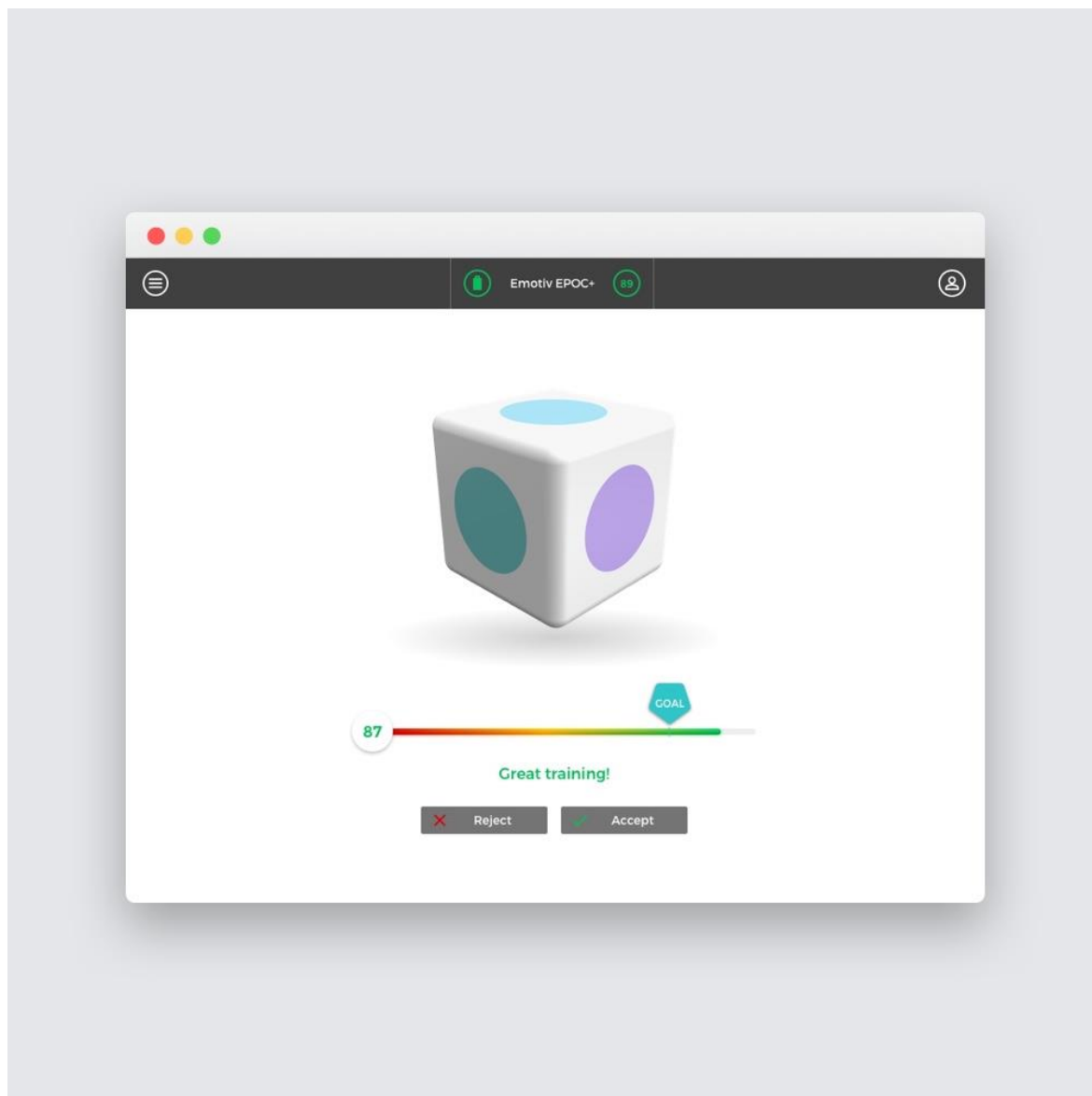
Na točnost prikupljenih podataka uvelike utječe i optimalan smještaj i dodir senzora s glavom [50]. Prikaz kvalitete kontakta senzora s glavom moguće je provjeriti u EmotivBCI aplikaciji kako je prikazano na slici 14. [51]



Slika 14. Prikaz kvalitete kontakta senzora [51]

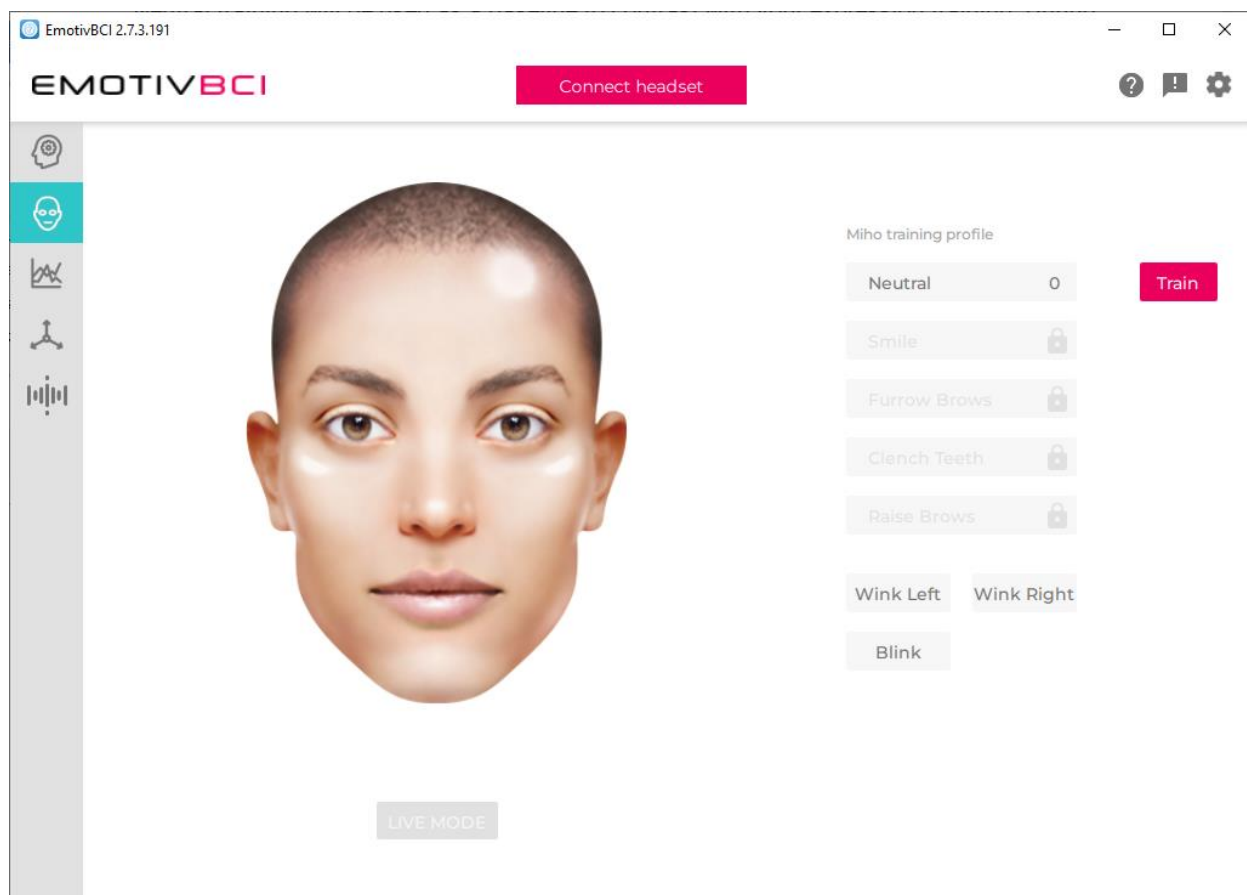
Kako je već spomenuto u odjeljku 4.3., naredbe koje se izvršavaju na sučelju potrebno je „naučiti“. Algoritam za izvršavanje mentalnih naredbi radi na principu prepoznavanja uzoraka [50]. Kako bi uređaj naučio način na koji mozak šalje električne signale kod određenih radnji, naredbe je potrebno zabilježiti [3]. Softver pokazuje zadatke koji se od osobe očekuju [3]. Primjerice, softver traži koncentraciju za podizanje 3D kocke [3]. Elektrode očitavaju i snimaju moždane valove dok se izvršava određena radnja te nakon toga sustav prepoznaje uzorak kao funkciju podizanja kocke [3]. Neke od akcija koje se zahtijevaju tijekom učenja su podizanje kocke, ispuštanje kocke, rotiranje kocke i slično [3].

Učenja algoritma uzorcima prikazano je slikom 15 [50].



Slika 15. Učenje algoritma uzorcima [50]

Osim mozga, električnu aktivnost odašilju i pokreti lica i očiju [50]. Većina EEG sustava klasificira tu električnu aktivnost kao nepoželjan signal [52]. Emotivovi uređaji odvajaju signal pokreta lica i očiju, ali pružaju mogućnost korištenja tog signala prilikom upravljanja [52]. Primjer uporabe električnog signala pokreta lica i očiju za upravljanje mobilnog robota primjenio je Paszkiel (2017) u radu „Facial expressions as an artifact in EEG signal used in the process of controlling a mobile robot with LabVIEW“ [53]. Robot bi se okrenio udesno kada bi sustav prepoznao da korisnik gleda udesno, robot bi zatrubio kada bi sustav zabilježio treptanje [53]. Učenje algoritma pokretima lica prikazan je slikom 16.

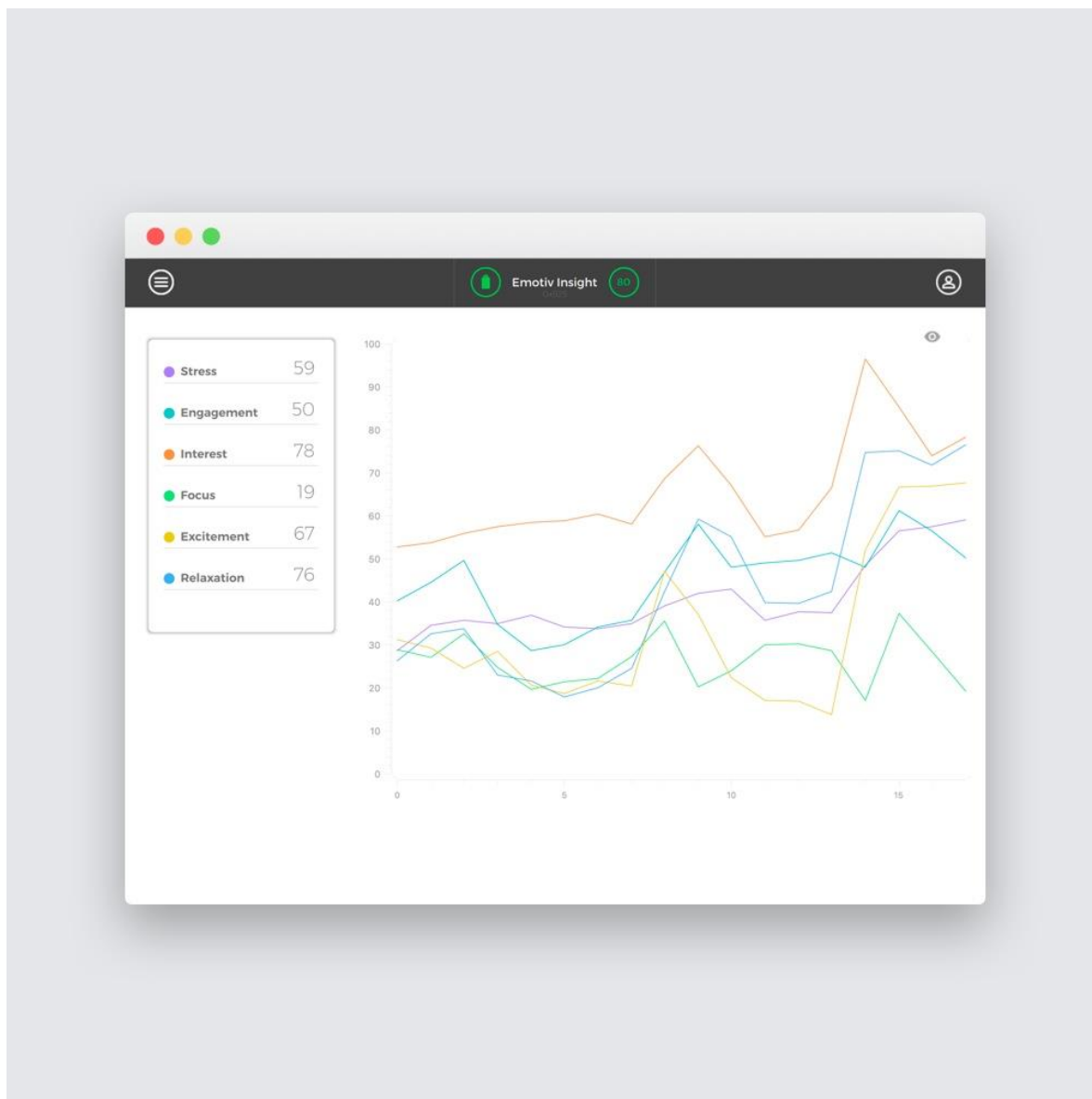


Slika 16. Učenje algoritma pokretima lica

EmotivBCI aplikacija omogućuje i uvid u kognitivnih stanja korisnika [50]. Aplikacija mjeri šest kognitivnih stanja [50]:

- koncentriranost – pokazuje fokusiranost korisnika na obavljanje samo jedne radnju
- zainteresiranost – pokazuje svjesno usmjerenje pažnje prema podražajima relevantnim za zadatak
- interes – pokazuje stupanj privlačnosti prema trenutnim podražajima, okolini ili aktivnosti
- uzbuđenost – pokazuje svijest ili osjećaj fiziološkog uzbuđenja s pozitivnom vrijednošću
- stres – pokazuje mjeru ugone uz trenutni izazov
- opuštenost – pokazuje u kojoj mjeri se korisnik može oporaviti od intenzivnog koncentriranja.

Prikaz ovih podataka na EmotivBCI sučelju dan je slikom 17.



Slika 17. Mjera kognitivnih stanja na EmotivBCI sučelju [54]

4.4.2. EmotivPRO

Drugi BCI softver u ponudi Emotiva je EmotivPRO. EmotivPRO nudi više mogućnosti od EmotivBCI softvera, međutim, korištenje EmotivPRO softvera iziskiva plaćanje licence. Cijene licenci sežu od 29 USD mjesečno za studentske licence do 199 USD mjesečno za poslovne licence [55]. Dodatne mogućnosti koje EmotivPRO omogućuje u odnosu na EmotivBCI su sljedeće [55]:

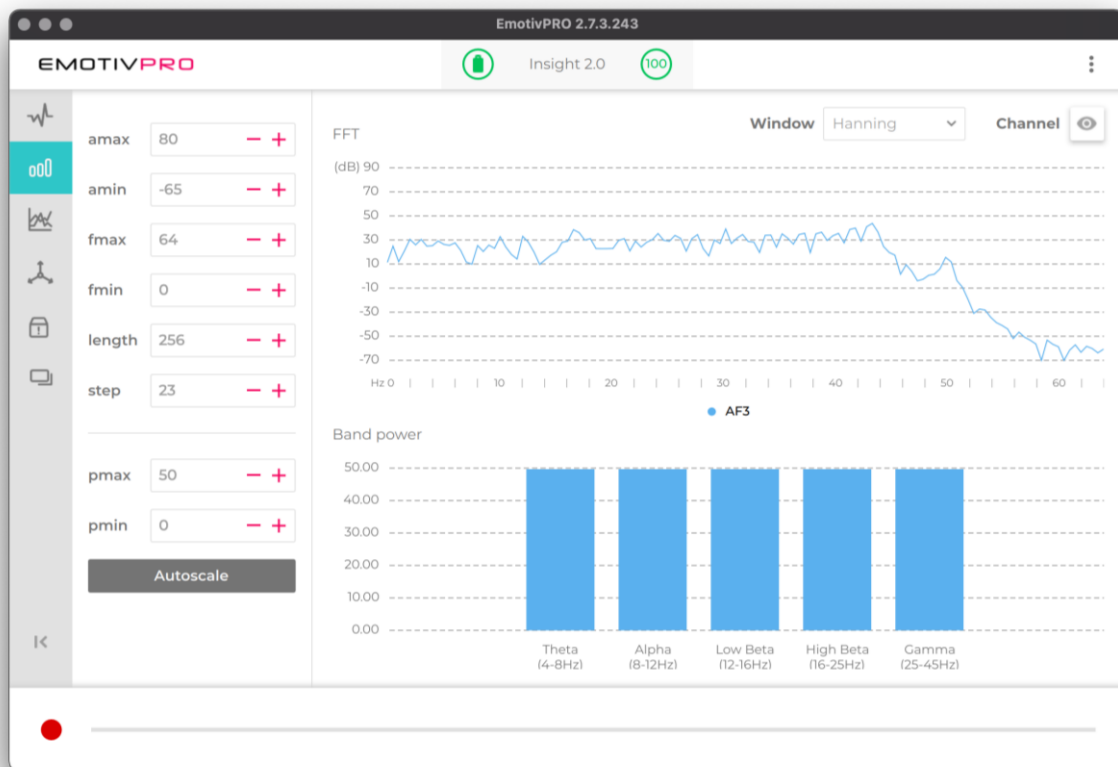
- više mogućnosti pri grafičkim prikazima kognitivnih stanja, primjerice prikaz svake vrijednosti kognitivnog stanja odvojeno
- prikaz neobrađenih EEG signala
- mogućnost praćenja i analize samo jednog, odabranog senzora
- prikaz brzine slanja i primanja podataka
- neograničeno snimanje svih podataka za vrijeme istraživanja
- zabilješku željenih podataka.

U odnosu na EmotivBCI, EmotivPRO omogućuje prikaz neobrađenih EEG signala kako je prikazano na slici 18 [55]. Time se omogućuje vlastita analiza i interpretacija podataka.



Slika 18. Prikaz neobrađenog EEG signala u EmotivPRO aplikaciji [55]

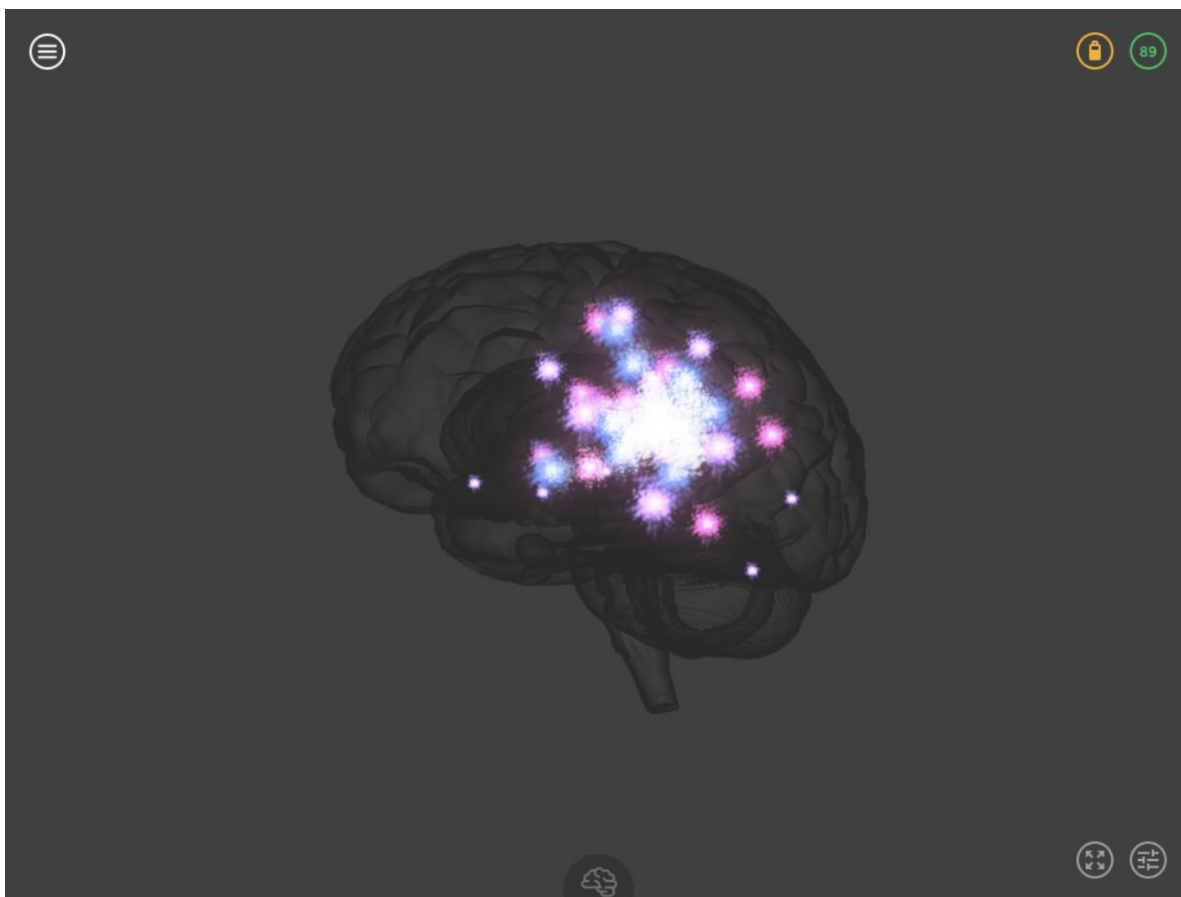
Mogućnost praćenja i analize samo jednog, odabranog senzora prikazuje slika 19. Primjerice, ako korisnika zanima dio mozga odgovoran za planiranje i izvršavanje naučenih i svjesnih radnji, može dobiti uvid u njega gledajući samo senzor na frontalnom režnju [56].



Slika 19. Uvid u senzora na lokaciji AF3 u aplikaciji EmotivPRO [55]

4.4.3. EmotivBrainViz

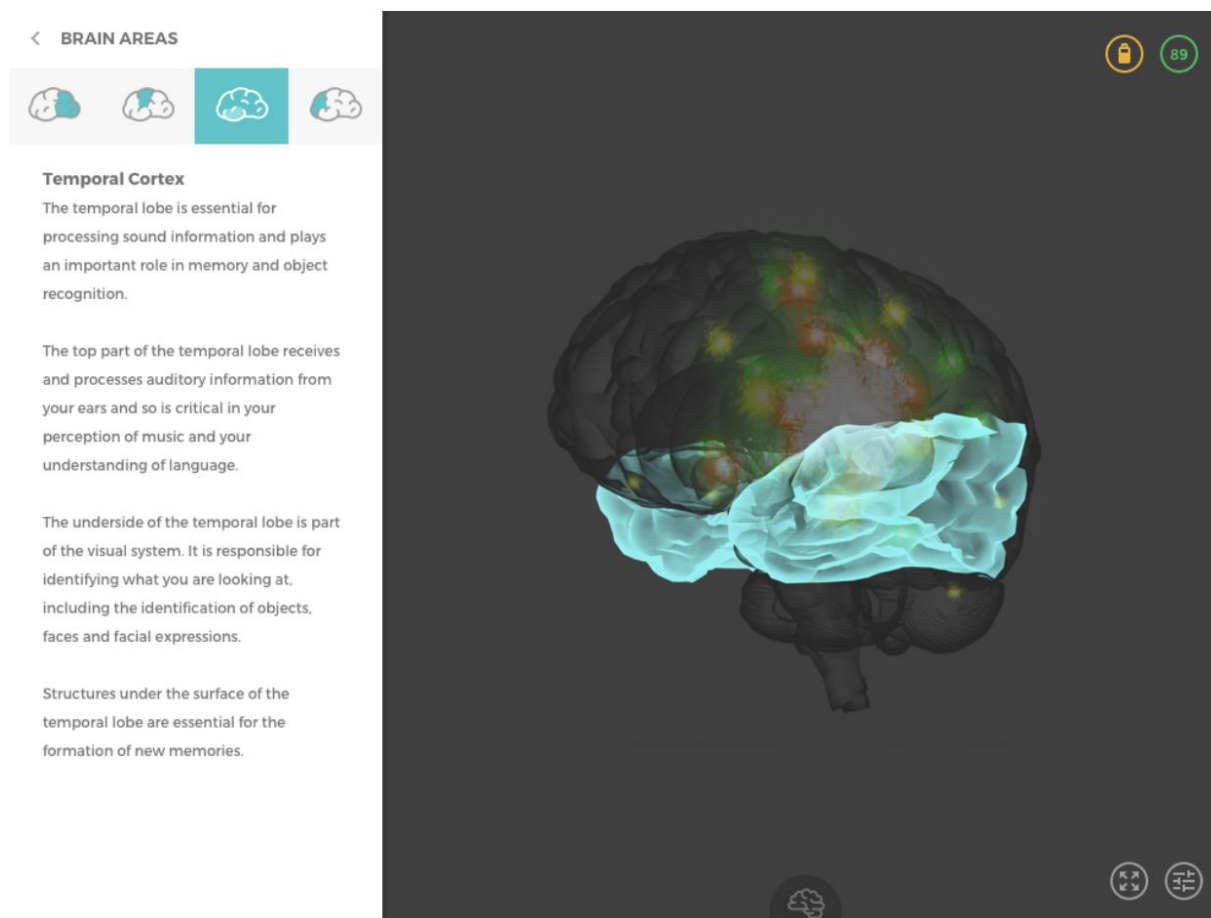
EmotivBrainViz je Emotivov 3D vizualizacijski softver za prikazivanje moždane aktivnosti [57]. Za korištenje softvera potrebna je licenca od 79 dolara koju nije potrebno obnavljati [57]. Softver je namijenjen za edukacijske i istraživačke svrhe, a glavna mu je namijena trodimenzionalan prikaz moždane aktivnosti kako je to prikazano na slici 20.



Slika 20. Prikaz moždane aktivnosti u EmotivBrainViz softveru [57]

U trodimenzionalnom prikazu dani su neoobrađeni EEG podaci izmjereni nekim od Emotivovih uređaja [57]. Na sučelju se prikazuju alfa, beta, gama i theta moždani signali odijeljeni različitim bojama [57]. Time se omogućuje istovremen uvid gdje se moždana aktivnost odvija te o kojoj vrsti moždane aktivnosti je riječ [57].

Aplikacija daje informacije o tome kakvo je stanje mozga povezano sa svakim od prikazanih frekvencijskih područja te je omogućeno izdvajanje frekvencije moždanih signala koje se želi proučavati [57]. Također, softver daje informacije o funkcijama određenih dijelova mozga kako je prikazano na slici 21.



Slika 21. Prikaz funkcija određenih dijelova mozga u softveru EmotivBrainViz [57]

5. MOGUĆE PRIMJENE MOZGOM UPRAVLJANE TEHNOLOGIJE U INŽENJERSKOM RADU I PROIZVODNJI

Kako bi udovoljiti rastućim zahtjevima tržišta, poduzeća su primorana neprekidno implementirati nove informacijsko-komunikacijske tehnologije u svoju proizvodnju [58]. Premda se mozgom upravljana tehnologija u svom početku primarno upotrebljavljiva i razvijalna u medicinske svrhe, posljednjih godina razvija se sve više tehnologije upravljane mozgom u inženjerske svrhe [58]. U ovom dijelu rada dan je pregled dosadašnje tehnologije koja se primjenjuje te su dani prijedlozi gdje bi se još mogla primjenjivati.

U radu visoko digitaliziranih proizvodnih sustava ljudi imaju središnju ulogu [58]. Osim uobičajenih sučelja (tipkovnica, *touch-screen* i glasovne naredbe) koja se koriste u proizvodnim sustavima, sve se više razmatra primjena sučelja mozak-računalo [58]. Mozgom upravljane tehnologije mogle bi imati veliku ulogu u budućnosti proizvodnih sustava [58].

5.1. Primjena sučelja mozak-računalo u proizvodnji

Razvojem mozgom upravljane tehnologije, sve se više govori o njenoj implementaciji u proizvodne sustave [58]. Prema predviđanjima istraživačke kompanije Gartner **još smo desetak godina daleko od uporabe mozgom upravljane tehnologije u proizvodnji** [59].

Mozgom upravljana tehnologija mogla bi uvelike pojednostaviti i ubrzati proizvodni proces. U nastavku su dani primjeri uporabe mozgom upravljane tehnologije u proizvodnji.

U svom radu „Brainwaves driven human-robot collaborative assembly“ Mohammed i Wang razvijaju pristup upravljanja industrijskim robotom koristeći moždane valove [60]. Tehnologija opisana u radu pruža operateru kontrolu nad industrijskim robotom koristeći se moždanim signalima [60]. Kako bi poboljšao razinu kolaboracije između čovjeka i robota za vrijeme montažnih operacija, sustav ima mogućnost prepoznavanja pokreta te glasovnih

naredbi [60]. Cilj ovakve kolaboracije je spojiti ponovljivost robota te fleksibilnost ljudske radne snage [60]. Opisani sustav prikazan je na slici 20.



Slika 22. Prikaz industrijskog robota upravljaniog BCI uređajem [60]

Li i Thenkurussi (2018) su razvili sustav u kojem izdvaja defektne dijelove isključivo informacijom prikupljenom iz EEG uređaja [61]. Sustav je zamišljen tako da radnik, koji na sebi nosi EEG uređaj, pregledava dijelove te kad uoči škart dio se pomoću robota uklanja s pokretne trake [62]. Shema rada sustava prikazana na slici 23.



Slika 23. Sustav prepoznavanja dijelova s greškom [63]

Li i Thenkurussi (2019) u svom radu „Welding Robotic Co-Worker Using Brain Computer Interface“ razvijaju sučelje mozak-računalo koji bi pomogao pri zavarivanju [64].



Slika 24. Zavarivanje pomoću sučelja mozak-računalo [65]

5.2. Prijedlog primjene mozgom upravljane tehnologije u inženjerskom radu

Kao sinteza ovoga rada predlaže se sustav za kontrolu, praćenje i poboljšavanje uvjeta inženjerskog rada. Sustav bi implementirao korištenje Emotivovih uređaja i softvera kako bi umanjio greške u inženjerskom radu. Sustav bi primarno bio namijenjen uporabi u projektantskim uredima, ali mogao bi se implementirati i u druga radna okruženja poput obrazovnih ustanova i proizvodnih pogona.

Kako EmotivPRO i EmotivBCI omogućuju uvid u kognitivna stanja korisnika, tako je ovaj sustav osmišljen da zaposlenici projektanskog ureda tijekom rada koriste Emotiv EPOC X uređaje kako bi se poslodavcu dala povratna informacija o kognitivnom stanju zaposlenika. Te informacije bi poslodavcu dale uvid u dijelove inženjerskog rada koje bi bilo potrebno dodatno provjeriti ili poboljšati. Primjerice, uvidom u sustav podataka, poslodavac bi mogao zaključiti u kojem je stadiju rada koncentracija zaposlenika bila najniža. Samim time bi se pooštrila kontrola kvalitete projektantskih proizvoda razvijenih u vrijeme najniže vrijednosti

koncentracije. Također, uvidom u podatke o stresu zaposlenika, poslodavac bi imao mogućnost poboljšanja uvjeta na radnom mjestu.

Za implementaciju predloženog sustava bila bi potrebna nabava Emotiv EPOC X uređaja te kupnja EmotivPRO licence. Količina, a time i cijena nabave ovisila bi o veličini projektantskog ureda. Cijena jednog Emotiv EPOC X uređaja iznosi 850 USD, a cijena mjesečne licence za EmotivPRO iznosi 200 USD mjesečno. Dakle, za ured s petero ljudi, trošak bi iznosio 16 250 USD godišnje.

6. ZAKLJUČAK

Napredak tehnologije te sve bolje razumijevanje funkcija mozga omogućili su stvaranje sve naprednijih uređaja za upravljanje koristeći mozak. Mozgom upravljana tehnologija ima mogućnost rješavanja problema u širokom spektru područja. U području strojarstva, ova tehnologija bi omogućila veći stupanj automatizacije proizvodnih procesa. Primjerice, upravljanje robotom za zavarivanje koristeći misli dovelo bi do veće točnosti izrađenih proizvoda.

Sučelja mozak-računalo, kao izravna veza između računala i čovjeka, predstavljaju temelj dosadašnjih znanja o mozgom upravljanoj tehnologiji. U ovom radu dan je pregled mozgom upravljane tehnologije, sučelja mozak-računalo te je istražena dostupna oprema na tržištu. U radu je dan način rada te određene primjene spomenutih tehnologija. Također, dan je prijedlog uporabe mozgom upravljane tehnologije u inženjerskom području, no primjenjivom i u bilo kojem drugom radnom procesu gdje se zbivaju mentalne radnje koje bi mogle biti od interesa.

Istraživanja mozgom upravljane tehnologije započela su tek krajem dvadesetog stoljeća. Trenutna tehnologija nije dovoljno razvijena kako bi omogućila konkretne primjene uređaja upravljanih mozgom u svakodnevnom životu. Procjena je da će za proizvodne svrhe tehnologija biti dovoljno zrela za primjenu za desetak godina. U sklopu toga napora daljnji bi se rad mogao usmjeriti na razvijanje kognitivnih uređaja u sklopu kojih bi se koristile teorije motivacije i psihološko-psihijatrijski obrasci. Mozgom upravljana tehnologija mogla bi učiti načine na koji ljudski mozak rješava probleme te implementirati te načine prilikom autonomnog rada.

7. LITERATURA

- [1] Šimić N, Valerjev P, Nikolić Ivanišević M. Mozak i um: Od električnih potencijala do svjesnog bića. Sveučilište u Zadru; 2020.
- [2] Kübler A. The history of BCI: From a vision for the future to real support for personhood in people with locked-in syndrome. *Neuroethics*. 2020 Jul;13(2):163–80.
- [3] Emotiv EPOC [Internet] [pristupljeno 2021 Sep 11]
- [4] Hammock A. The future of brain-controlled devices. *CNN*. 2010;6.
- [5] Shih JJ, Krusienski DJ, Wolpaw JR. Brain-Computer Interfaces in Medicine. *Mayo Clin Proc*. 2012 Mar;87(3):268–79.
- [6] Martišius I. Data acquisition and signal processing methods for brain-computer interfaces. Kaunas University of Technology. 2016; 162.
- [7] Wikipedia:Brain–computer interface [Internet]. 2021 [pristupljeno 2021 Sep 14].
- [8] Vidal JJ. Toward Direct Brain-Computer Communication. *Annu Rev Biophys Bioeng*. 1973 Jun;2(1):157–80.
- [9] Vidal JJ. Real-time detection of brain events in EEG. *Proceedings of the IEEE*. 1977 May;65(5):633–41.
- [10] Vallabhaneni A, Wang T, He B. Brain-Computer Interface. In: He B, editor. *Neural Engineering* [Internet]. Boston, MA: Springer US; 2005 [pristupljeno 2021 Sep 14]. p. 85–121. (Bioelectric Engineering).
- [11] Lotte F, Nam CS, Nijholt A. Introduction: Evolution of Brain-Computer Interfaces.
- [12] Farwell LA, Donchin E. Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*. 1988 Dec 1;70(6):510–23.
- [13] Bozinovski S, Sestakov M, Bozinovska L. Using EEG alpha rhythm to control a mobile robot. In: *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*. 1988. p. 1515–6 vol.3.

- [14] Wolpaw JR, Birbaumer N, McFarland DJ, Pfurtscheller G, Vaughan TM. Brain–computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology* [Internet]. 2002 Jun 1 [pristupljeno 2021 Sep 15];113(6).
- [15] Chapin JK, Moxon KA, Markowitz RS, Nicolelis MAL. Real-time control of a robot arm using simultaneously recorded neurons in the motor cortex. *Nat Neurosci* [Internet]. 1999 Jul [pristupljeno 2021 Sep 15];2
- [16] Nicolelis MAL. Actions from thoughts. *Nature* [Internet]. 2001 Jan [pristupljeno 2021 Sep 15];409(6818)
- [17] Medved M, Friganović K. Sučelje mozga i računala temeljeno na evociranim potencijalima stabilnog stanja. *Fakultet elektrotehnike i računalstva*. 2015;
- [18] Kraljević L. Napredna sučelja za interakciju čovjeka i računala.
- [19] Baporikar V, Bawane N. A Literature Survey on Wireless sensor network for Brain Computer Interface using ATMEGA128RFA1. 2012 May 17;
- [20] Kameswara T, Rajyalakshmi M, T. Dr. An Exploration on Brain Computer Interface and Its Recent Trends. *IJARAI*. 2012;1(8).
- [21] Ballesterio M, Vilela GHF, Cabella B, Oliveira S, De oliveira R. Prediction of intracranial hypertension through noninvasive intracranial pressure waveform analysis in pediatric hydrocephalus. *Child’s nervous system : ChNS : official journal of the International Society for Pediatric Neurosurgery*. 2017 Sep 1;33.
- [22] Vokorokos L, Madoš B, Ádám N, Baláž A. Data Acquisition in Non-Invasive Brain-Computer Interface Using Emotiv EPOC Neuroheadset. *Acta Electrotechnica et Informatica*. 2012 Jan 1;12(1).
- [23] Knežević A. Sučelje mozak-računalo. [pristupljeno 2021 Sep 15];
- [24] Rao TK, Lakshmi MR, Prasad TV. An Exploration on Brain Computer Interface and Its Recent Trends [Internet]. 2012 Nov 12 [pristupljeno 2021 Sep 15];
- [25] Refurbished EPOC+ 14 Channel Mobile Brainwear® [Internet]. EMOTIV. [pristupljeno 2021 Sep 16]
- [26] Orlović J. Sučelje mozak - računalo. *Fakultet elektrotehnike i računalstva*. 2017;16.

- [27] Kute S, Sonalikul Karni. Data acquisition through EEG for meditative states in BCI using non-invasive Emotiv EPOC Neuroheadset 2016.
- [28] Wikipedija: Sučelje mozak-računalo [Internet]. 2021 [pristupljeno 2021 Sep 16].
- [29] Human Brain Waves Diagram / Chart / Illustration Stock Vector - Illustration of delta, alpha [Internet] [pristupljeno 2021 Sep 17].
- [30] New World Notes: Play World of Warcraft... With Your Mind! [Internet]. [pristupljeno 2021 Sep 17].
- [31] Abdulkader SN, Atia A, Mostafa M-SM. Brain computer interfacing: Applications and challenges. *Egyptian Informatics Journal*. 2015 Jul 1;16(2):213–30.
- [32] Hanafiah ZM, Taib MN, Hamid NHA. EEG pattern of smokers for Theta, Alpha and Beta band frequencies. In: 2010 IEEE Student Conference on Research and Development (SCORED). 2010. p. 320–3.
- [33] Jones CL, Wang F, Morrison R, Sarkar N, Kamper DG. Design and Development of the Cable Actuated Finger Exoskeleton for Hand Rehabilitation Following Stroke. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2014 Feb;19(1):131–40.
- [34] Researchers Build Brain-Machine Interface to Control Prosthetic Hand [Internet]. [pristupljeno 2021 Sep 17]
- [35] Lin C-T, Lin B-S, Lin F-C, Chang C-J. Brain Computer Interface-Based Smart Living Environmental Auto-Adjustment Control System in UPnP Home Networking. *IEEE Systems Journal*. 2014 Jun;8(2):363–70.
- [36] Sorudeykin KA. An Educative Brain-Computer Interface [Internet]. 2010 Mar 12 [pristupljeno 2021 Sep 17]
- [37] Royer AS, Doud AJ, Rose ML, He B. EEG Control of a Virtual Helicopter in 3-Dimensional Space Using Intelligent Control Strategies. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2010 Dec;18(6):581–9.
- [38] EEG Headset [Internet] [pristupljeno 2021 Sep 11]
- [39] Emotiv EPOC [Internet] [pristupljeno 2020 Nov 17]
- [40] EPOC X [Internet] [pristupljeno 2021 Sep 11]

- [41] EMOTIV [Internet] [pristupljeno 2021 Sep 11].
- [42] Aguiar S, Yanez W, Benitez D. Low complexity approach for controlling a robotic arm using the Emotiv EPOC headset. In: 2016 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC) Ixtapa, Zihuatanejo, Mexico: IEEE; 2016 [pristupljeno 2021 Sep 11]. p. 1–6
- [43] Homan RW, Herman J, Purdy P. Cerebral location of international 10–20 system electrode placement. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*. 1987 Apr 1;66(4):376–82.
- [44] 10–20 system (EEG) In: Wikipedia [Internet]. 2021 [pristupljeno 2021 Sep 13]
- [45] Introduction to EPOC X [Internet] [pristupljeno 2021 Sep 11].
- [46] Fitting your EPOC X [Internet] [pristupljeno 2021 Sep 13].
- [47] EMOTIV [Internet] [pristupljeno 2021 Sep 11]
- [48] OpenBCI - Open Source Biosensing Tools (EEG, EMG, EKG, and more) [Internet]. [pristupljeno 2021 Sep 19]
- [49] OpenViBE [Internet] [pristupljeno] 2021 Sep 19].
- [50] EmotivBCI [Internet]. [pristupljeno] 2021 Sep 19].
- [51] Gensler J. Tour of the EPOC+ [Internet]. Medium. 2018 [pristupljeno 2021 Sep 19]
- [52] Facial Expression Detections [Internet] [pristupljeno 2021 Sep 19]
- [53] Paszkiel S. Facial expressions as an artifact in EEG signal used in the process of controlling a mobile robot with LabVIEW. *ELECTROTECHNICAL REVIEW*. 2017 Apr 5;1(4):158–62.
- [54] BCI-3.1 [Internet] [pristupljeno 2021 Sep 20]
- [55] EmotivPRO [Internet] [pristupljeno 2021 Sep 19]
- [56] MSD priručnik dijagnostike i terapije: Funkcija i disfunkcija moždanih režnjeva [Internet] [pristupljeno 2021 Sep 20]
- [57] EMOTIV BrainViz [Internet] [pristupljeno 2021 Sep 21]

- [58] Camarinha-Matos LM, Afsarmanesh H, Antonelli D, editors. Collaborative Networks and Digital Transformation: 20th IFIP WG 5.5 Working Conference on Virtual Enterprises, PRO-VE 2019, Turin, Italy, September 23–25, 2019, Proceedings [Internet] Cham: Springer International Publishing; 2019 [pristupljeno 2021 Sep 20]. (IFIP Advances in Information and Communication Technology; vol. 568)
- [59] 5 Trends Emerge In Gartner Hype Cycle For Emerging Technologies 2018 [Internet]. Gartner. [pristupljeno 2021 Sep 20]
- [60] Mohammed A, Wang L. Brainwaves driven human-robot collaborative assembly. *CIRP Annals*. 2018;67(1):13–6.
- [61] Li Y, Kesavadas T. Brain Computer Interface Robotic Co-Workers: Defective Part Picking System. In American Society of Mechanical Engineers Digital Collection; 2018 [pristupljeno 2021 Sep 20]
- [62] Why manufacturers should care about brain-computer interfaces [Internet]. *Medical Design and Outsourcing*. 2016 [pristupljeno 2021 Sep 20]
- [63] Li Y, Kesavadas T. Brain Computer Interface Robotic Co-Workers: Defective Part Picking System. In American Society of Mechanical Engineers Digital Collection; 2018 [pristupljeno 2021 Sep 20]
- [64] Li Y, Kesavadas T. Welding Robotic Co-Worker Using Brain Computer Interface. In American Society of Mechanical Engineers Digital Collection; 2019 [pristupljeno 2021 Sep 20].
- [65] Yao Li. Welding Robot Brain Computer Interface [Internet]. 2018 [pristupljeno 2021 Sep 20]
- [66] BCI Guide [Internet] [pristupljeno 2021 Sep 19]