

# Pokusi korištenjem mozgom upravljane tehnologije

---

**Sabolović, Borna**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*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:235:766743>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-11**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Borna Sabolović**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:



Prof. dr.sc. Zoran Kunica

Student:

Borna Sabolović

Zagreb, 2024.

## ZADATAK

 <p style="text-align: center;">SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  <b>FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE</b>          Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite          Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:          proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo          materijala i mehatronika i robotika</p> 	
Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: <b>602 – 04 / 24 – 06 / 01</b>	
Ur.broj: <b>15 – 24 –</b>	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Borna Sabolović** JMBAG: **0035221105**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Pokusi korištenjem mozgom upravljane tehnologije**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Experiments using brain-controlled technology**

Opis zadatka:

Napredak tehnike omogućuje sve dublje pronicanje u čovjeka i njegov rad, ne samo u mehaničkom smislu, već i u mentalnom. Suvremenom opremom omogućuje se promatranje čovjekovog mentalnog stanja pri obavljanju razolikih radnji, tj. prikupljanje i analiza određenih informacija za bolji uvid i razumijevanje procesa rada, što onda otvara nove mogućnosti poboljšanja radnih procesa te prijenosa ljudskih sposobnosti na strojeve.

U radu je potrebno:

1. istražiti i objasniti značaj mozgom upravljane tehnologije
2. opisati dostupnu opremu za promatranje aktivnosti mozga
3. osmisliti i opisati pokuse koje će se izvesti dostupnom opremom
4. izvesti pokuse te analizirati dobivene rezultate.

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Zadatak zadao:

  
 Prof. dr.sc. Zoran Kunica


Datum predaje rada:

**1. rok:** 22. i 23. 2. 2024.  
**2. rok (izvanredni):** 11. 7. 2024.  
**3. rok:** 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

**1. rok:** 26. 2. – 1. 3. 2024.  
**2. rok (izvanredni):** 15. 7. 2024.  
**3. rok:** 23. 9. – 27. 9. 2024.

Predsjednik Povjerenstva:

  
 Prof. dr. sc. Damir Godec

## **IZJAVA**

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

Zahvaljujem mentoru prof. dr.sc. Zoranu Kunici na savjetima, komentarima i zainteresiranosti tijekom izrade ovog rada. Posebno hvala mom prijatelju koji mi je bio podrška od srednje škole.

U Zagrebu, 22. veljače 2024.

Borna Sabolović

## **SAŽETAK**

Uz napredak tehnologije, mozgom upravljana tehnologija sve više dolazi do izražaja i njena svakodnevna upotreba sve se više bliži. Promatranjem čovjekovog mentalnog stanja pri prikupljanju i razumijevanju određenih informacija te pri obavljanju određenih radnji može se dobiti bolji uvid u proces rada te otvoriti nove mogućnosti u poboljšanju proizvodnje te prijenos ljudskih sposobnosti na stroj. U radu je istražena i opisana mozgom upravljana tehnologija te sučelje mozak-računalo. Objasnjen je i značaj takve tehnologije te njen način rada. Opisan je uređaj Emotiv EPOC+ za očitavanje EEG signala te softver koji se koristi. Navedenim uređajem provedeno je pet pokusa pomoću kojih je ispitana aktivnost mozga prilikom zapažanja boja, orijentiranja predmeta u prostoru, montaže i demontaže te razgovora.

Ključne riječi: mozgom upravljana tehnologija, Emotiv EPOC+, pokusi

## **SUMMARY**

With the advancement of technology, brain-controlled technology is becoming more relevant and its everyday use will soon become a reality. By observing a person's mental state when collecting and crunching information and when performing certain actions, we can get a better insight into work as a process and open up new possibilities in improving production and transferring human abilities to machines. In this paper brain-controlled technology and the brain-computer interface were described. The importance of such technology and its mode of operation are also explained. The Emotiv EPOC+ device for reading EEG signals and the software used are described. Five experiments were carried out with the aforementioned device, which tested brain activity during color perception, orientation of objects in space, assembly and disassembly, and conversation.

Key words: brain-controlled technology, Emotiv EPOC+, experiments

## SADRŽAJ

ZADATAK.....	I
IZJAVA.....	II
SAŽETAK.....	III
SUMMARY .....	IV
POPIS KRATICA, OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA .....	VII
POPIS SLIKA .....	VIII
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. MOZGOM UPRAVLJANA TEHNOLOGIJA.....</b>	<b>2</b>
<b>2.1. LJUDSKI MOZAK.....</b>	<b>2</b>
2.1.1. Moždano deblo i mali mozak .....	3
2.1.2. Veliki mozak .....	3
2.1.3. Živčani sustav i neuroni .....	5
2.1.4. Ljudski mozak u suvremenom svijetu.....	7
<b>2.2. SUČELJE MOZAK-RAČUNALO.....</b>	<b>8</b>
2.2.1. Način rada sučelja mozak-računalo.....	8
2.2.2. Prikupljanje signala .....	9
2.2.3. Predobrada ili pojačavanje signala .....	10
2.2.4. Izdvajanje značajki .....	11
2.2.5. Klasifikacija signala .....	12
2.2.6. Kontrolno sučelje .....	15
<b>3. PROBLEMI I IZAZOVI SUSTAVA MOZAK-RAČUNALO.....</b>	<b>16</b>
<b>4. UREĐAJ EMOTIV EPOC+ .....</b>	<b>18</b>
<b>4.1. DIJELOVI I SPECIFIKACIJE UREĐAJA.....</b>	<b>18</b>
<b>4.2. SOFTVERI ZA EMOTIV EPOC+.....</b>	<b>21</b>
4.2.1. EmotivPRO .....	21



---

4.2.2. EmotivBCI .....	26
4.2.3. Emotiv BrainViz .....	27
4.2.4. Alternativni softveri i programi.....	28
<b>4.3. POSTAVLJANJE UREĐAJA .....</b>	<b>29</b>
<b>5. POKUSI.....</b>	<b>33</b>
<b>5.1. POKUS 1.: PREPOZNAVANJE BOJA.....</b>	<b>33</b>
<b>5.2. POKUS 2.: ORIJENTIRANJE PREDMETA .....</b>	<b>36</b>
<b>5.3. POKUS 3.: MONTAŽA.....</b>	<b>38</b>
<b>5.4. POKUS 4.: DEMONTAŽA .....</b>	<b>42</b>
<b>5.5. POKUS 5.: OPUŠTEN RAZGOVOR .....</b>	<b>45</b>
<b>5.6. ZAKLJUČAK NAKON IZVEDENIH POKUSA .....</b>	<b>47</b>
<b>6. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>49</b>
<b>7. LITERATURA.....</b>	<b>51</b>

## POPIS KRATICA, OZNAKA I MJERNIH JEDINICA FIZIKALNIH VELIČINA

Oznaka	Mjerna jedinica	Značenje/Opis
3D		trodimenzionalan
$\alpha$	°	kut rotacijske simetrije predmeta oko osi okomite na os umetanja
$\beta$	°	kut rotacijske simetrije predmeta oko osi umetanja
$a$	cm	duljina, visina, širina
BCI		eng. <i>Brain-Computer Interface</i> – sučelje mozak-računalo
BMI		eng. <i>Brain-Machine Interface</i> – sučelje mozak-stroj
ECoG		eng. <i>ElectroCOrticoGraphy</i> – elektrokortikografija
EEG		eng. <i>ElectroEncephaloGraphy</i> – elektroencefalografija
eng.		engleski
$f$	Hz	frekvencija
FFT		eng. <i>Fast Fourier Transformation</i> – brza Fourierova transformacija
$m$	g	masa
SNR		eng. <i>Signal-to-Noise Ratio</i> – omjer signala i šuma
$U$	V	napon
USB		eng. <i>Universal Serial Bus</i> – univerzalna serijska sabirnica
USD		novčana jedinica, američki dolar

## POPIS SLIKA

Slika 1. Moždani režnjevi [12].....	5
Slika 2. Neuron [14].....	6
Slika 3. Artefakt uzrokovan treptanjem kao EEG signal [32].....	11
Slika 4. Ljudski moždani valovi [38].....	14
Slika 5. Mu valovi [36].....	14
Slika 6. Uređaj Emotiv EPOC+ [44].....	19
Slika 7. Sustav 10/20 [46].....	19
Slika 8. Sučelje softvera EmotivPRO: prvi prozor.....	22
Slika 9. Sučelje softvera EmotivPRO: drugi prozor.....	23
Slika 10. Treći prozor softvera EmotivPRO: Metrika učinka.....	25
Slika 11. Četvrti prozor softvera EmotivPRO [51].....	26
Slika 12. EmotivBCI [55].....	27
Slika 13. Emotiv BrainViz [56].....	28
Slika 14. Koraci pripreme i instalacije uređaja [61].....	30
Slika 15. Pravilno postavljanje uređaja na glavu [61].....	30
Slika 16. Kontaktna kvaliteta.....	31
Slika 17. Kvaliteta EEG signala.....	32
Slika 18. Alat za nasumični izbor boja [62].....	34
Slika 19. EEG podaci prvog pokusa.....	35
Slika 20. Analiza pojedinih elektroda i frekvencija prvog pokusa.....	35
Slika 21. Rotacijske simetrije za različita tijela [63].....	36

---

Slika 22. Drugi pokus: lijevo – početna situacija, desno – uspješno obavljene radnje umetanja .....	37
Slika 23. EEG podaci drugog pokusa.....	37
Slika 24. Igračka [65].....	39
Slika 25. EEG podaci trećeg pokusa .....	40
Slika 26. Prikaz metrike učinka trećeg pokusa .....	42
Slika 27. EEG podaci četvrtog pokusa.....	43
Slika 28. Prikaz metrike učinka četvrtog pokusa .....	45
Slika 29. EEG podaci petog pokusa .....	46

## 1. UVOD

Brz napredak tehnologije i znanosti omogućuje razvoj raznih uređaja koji, pored ostalog, služe za bolji uvid u funkcije ljudskog mozga. Uređaji spajaju ljudski um i tehnologiju te omogućavaju direktnu interakciju između njih [3]. Takva direktna komunikacijska veza naziva se sučelje mozak-računalo (eng. *Brain-Computer Interface* – BCI) [1]. Mozak, kao glavno čovjekovo oruđe kojim gradi, osmišlja i unaprjeđuje tehnologiju i svijet oko sebe, upravlja svim fizičkim i mentalnim radnjama čovjeka [2]. Što više razumijemo mozak više ćemo razumjeti radne i stvaralačke procese čovjeka. Naime, uspješnim snimanjem i analizom tih procesa stvaraju se osnove za njihovo postrojenje. Mozgom upravljana tehnologija ima vrlo širok spektar mogućnosti i može pojednostavniti život ljudima s poteškoćama (primjerice invalidima da lakše obavljaju svakodnevne zadaće), ali i svima ostalima. Nadalje, od posebne je važnosti moguća primjena u radnim procesima. Baš iz potrebe poticanja razvoja takvih primjena, vrlo je važan ekperimentalan rad s takvim uređajima.

U ovom radu opisat će se ljudski mozak, istražiti će se mozgom upravljana tehnologija, sučelje mozak-računalo, njegova povijest, upotreba te način prikupljanja podataka. Potom, za bolji uvid u što se zapravo događa u mozgu tijekom motoričkih i mentalnih aktivnosti, u ovom radu koristit će se EEG uređaj Emotiv EPOC+ koji će se detaljno opisati. Provest će se pokusi pomoću uređaja, a potom će se analizirati dobiveni podaci.

## 2. MOZGOM UPRAVLJANA TEHNOLOGIJA

Mozgom upravljana tehnologija koristi se kao pomoćna tehnologija ljudima s kojom oni mogu koristiti razne uređaje isključivo pomoću moždane aktivnosti [4]. S brzim napretkom tehnologije takva primjena postaje sve bliža svakodnevnom životu. Tehnologija vođena mozgom može se primijeniti u raznim industrijama kako bi se poboljšala produktivnost, uvjeti radnika u industriji, smanjila potreba za fizički napor te smanjila opasnost na radu i slično. No, najveće motivacije trenutno za razvijanje ove tehnologije su pomoć u poboljšanju kvalitete života ljudi s poteškoćama i invalidnošću [5]. Većina ovih tehnologija temelji se na mjerenju električne aktivnosti mozga, poznatom kao elektroencefalografija.

### 2.1. LJUDSKI MOZAK

Mozak je najkompleksniji organ u ljudskom tijelu. Zajedno s leđnom moždinom čini ključni dio središnjeg živčanog sustava. Smješten je unutar lubanje te je okružen zaštitnim ovojnica. Ovaj vitalni organ upravlja ključnim funkcijama poput disanja, rada srca, regulacije krvnog tlaka, gutanja i ostalim refleksnim reakcijama koje su neophodne za održavanje života. Također, pod njegovim nadzorom su i kontrola osnovnih potreba poput hrane, vode, zraka i tako dalje. Nadalje, mozak generira emocije, oblikuje misli te stvara dugoročna pamćenja, pohranjujući veliku količinu informacija. Omogućuje nam učenje i mišljenje, dok istovremeno oblikuje našu osobnost, suosjećanje te brojne druge aspekte ponašanja koji nas čine ljudskim bićima. [2]

Zbog njega bića posjeduju inteligenciju. Postoji više definicija inteligencije koje se mogu razlikovati ovisno o perspektivi, no često se povezuju s oblicima kognitivnih sposobnosti kao što su: sposobnost razumijevanja, učenja, rješavanja problema i donošenja zaključka. [6]

Kod sisavaca, mozak je iznimno složene strukture, te istraživanja pokazuju da veličina i težina mozga nisu nužno povezana s inteligencijom [2].

Tri su glavna dijela ljudskog mozga [2]:

- moždano deblo
- mali mozak
- veliki mozak.

### **2.1.1. Moždano deblo i mali mozak**

Moždano deblo povezuje mozak i leđnu moždinu. Moždano deblo čini produljena moždina, moždani most i srednji mozak, a kroz njega se proteže retikularna formacija koja svojim izgledom podsjeća na mrežu vlakana. Važno je naglasiti da moždano deblo igra ključnu ulogu u kontroliranju vitalnih funkcija, poput disanja i rada srca, te sudjeluje u regulaciji spavanja i održavanju pažnje [8]. Postoje tri glavna dijela srednjeg mozga, a to su tektum, tegmentum i moždani krakovi. [7]

Mali mozak igra ključnu ulogu u održavanju ravnoteže i koordinaciji pokreta te je važan suradnik velikog mozga. Nalazi se u stražnjem dijelu lubanje. Ovaj dio središnjeg živčanog sustava prima obilje informacija iz osjetilnih organa u mišićima i iz zglobova cijelog tijela. Njegova ključna uloga leži u učenju motoričkih vještina, posebice tijekom izvođenja novih pokreta. Oštećenja malog mozga mogu rezultirati različitim motoričkim poremećajima, uključujući nemogućnost precizne kontrole pokreta i poremećaja u koordinaciji trupa i udova, manifestirajući se kao teturanje. [9]

### **2.1.2. Veliki mozak**

Veliki mozak grade moždana kora kao vanjski dio, a moždana srž kao unutrašnji dio. Mozak je naboran zahvaljujući brazdama i vijugama. Naboranost mozga zapravo povećava njegovu površinu jer mu omogućuje da se na manjem prostoru rasporedi veći dio živčanih

stanica. Veliki mozak se, prema medijalnom presjeku, dijeli na dvije polutke ili hemisfere, te se dalje dijeli na međumozak i prednji ili krajnji mozak. [2]

U sastavu međumozga nalaze se talamus i hipotalamus, dok prednji mozak obuhvaća bazalne ganglije, limbički sustav i koru velikog mozga. Talamus, je smješten na vrhu moždanog debla te se sastoji od jezgara koja čine lijevi i desni talamus, a funkcija mu je primati veliku količinu informacija iz osjetljivih organa te ih proslijediti u koru velikog mozga na daljnju obradu. [2]

U neposrednoj blizini nalazi se hipotalamus, smješten ispod talamusa. Unatoč svojoj maloj veličini, hipotalamus ima centralnu kontrolu nad vegetativnim funkcijama, utječe na endokrini sustav, regulira tjelesnu temperaturu i druge važne funkcije. Osim toga, hipotalamus se aktivno uključuje u izražavanje emocija. [2]

Nadalje, postoji siva i bijela tvar u živčanom sustavu. Siva tvar obuhvaća tijela neurona, dendrite i nepriječene dijelove aksona. U mozgu, nalazi se na površini moždane kore te igra ključnu ulogu u procesiranju informacija, donošenju odluka te kontroli motoričkih funkcija. S druge strane, bijela tvar je smještena unutar sive tvari te se sastoji od mijelinskih vlakana koja tvore bijele snopove. Ova svijetla tvar olakšava prijenos informacija između različitih dijelova mozga te između mozga i ostatka tijela. [9]

Kora velikog mozga dijeli se na pet režnjeva te svaki od njih ima važnu ulogu u funkcioniranju čovjeka. Prvi je frontalni režanj koji ima brojne funkcije. Odgovoran je za kontrolu kretanja, planiranje, odlučivanje, osobnost i emocionalno ponašanje. Ovisno o specifičnim područjima, u frontalnom režnju se nalaze receptori za dodir, bol, temperaturu i druge osjetilne informacije. [10 i 2]

Drugi je parijetalni režanj koji obrađuje senzorne informacije poput dodira, boli, pritiska, temperature i prostorne orijentacije, s receptorima raspoređenim u perifernim dijelovima tijela. [10]

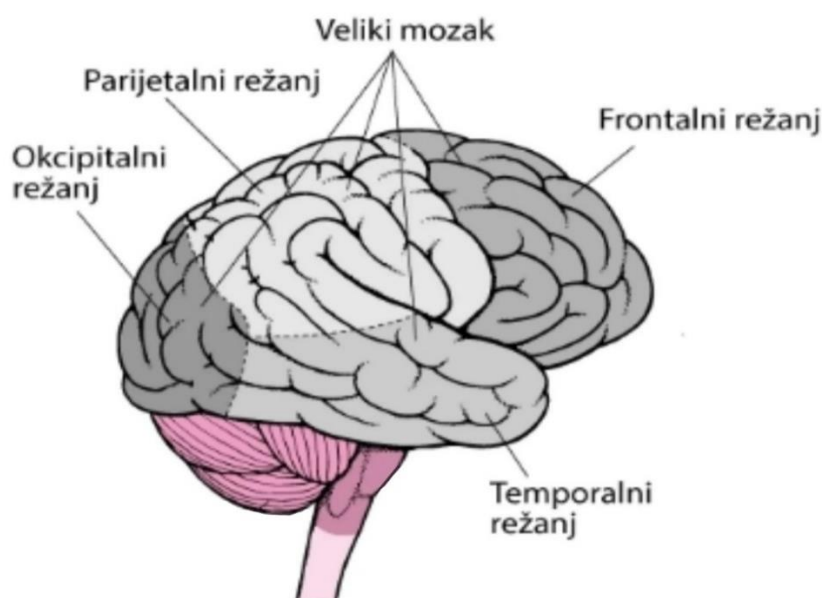
Treći, temporalni režanj, obrađuje slušne informacije i povezan je s pamćenjem i emocionalnim odgovorima, dok su receptori za sluh smješteni u ušima. Bavi se prepoznavanjem jezika i lica. Centri za govor, povezani s frontalnim, parijetalnim i temporalnim režnjevima, kontroliraju jezične sposobnosti integrirajući auditivne i vizualne informacije. [11]



Okcipitalni režanj je četvrti i najmanji moždani režanj. On kontrolira vizualne informacije, s receptorima za vid u mrežnici oka, a limbički sustav povezan je s emocijama, motivacijom, pamćenjem i formiranjem novih uspomena. [11]

Posljednji režanj, inzula, smješten je ispod temporalnog reznja, obavlja raznovrsne funkcije u mozgu. Ovo područje je povezano s emocionalnim doživljajima i raspoloženjem, igrajući ključnu ulogu u procesiranju osjetilnih informacija te utvrđivanju naših očekivanja i izbora. [12]

Na slici 1. prikazani su moždani reznjevi velikog mozga, a insula je skrivena u unutrašnjosti.



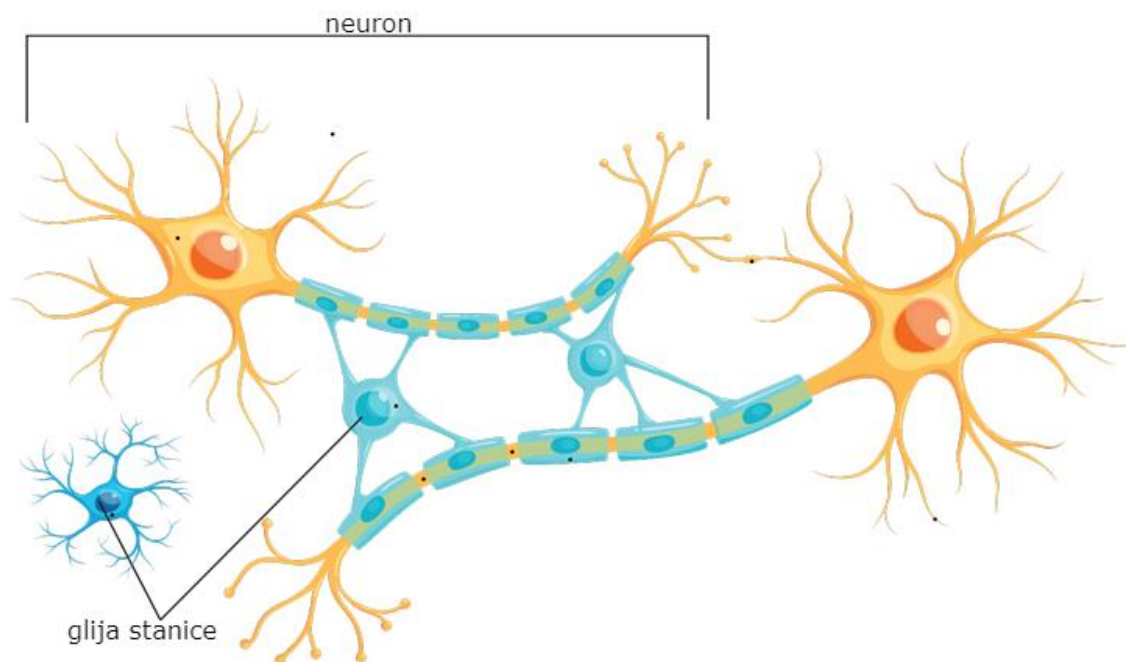
Slika 1. Moždani reznjevi [12]

### 2.1.3. Živčani sustav i neuroni

Živčani sustav čovjeka se osim središnjeg živčanog sustava, dijeli i na periferni živčani sustav. Ovaj dio živčanog sustava sastoji se od živaca koji se protežu po cijelom tijelu kao složena isprepletana komunikacijska mreža. [2]

Živčano tkivo građeno je od dviju vrste stanica. Prve su glija-stanice koje su odgovorne za potporu, zaštitu, ishranu i sveobuhvatno održanje živčanoga sustava. Druge su živčane stanice ili neuroni. [13]

Na slici 2. prikazani su neuron i glija stanica.



**Slika 2. Neuron [14]**

Neuron ili živčana stanica smatra se osnovnom jedinicom živčanog sustava i najsloženija je stanica u ljudskom organizmu [15]. Neuroni su električki nabijeni ili polarizirani. Također, imaju svojstva podražljivosti i provodljivosti. Podražaj može biti ograničen na mjesto na kojemu je djelovao ili se može proširiti membranom kroz cijeli neuron. Svi neuroni nose na svojim membranama električni naboj koji je s vanjske strane pozitivan, a s unutarnje negativan. Svaki podražaj neurona dovodi do promjena na membrani i ako je stimulus dovoljno jak da prijeđe prag podražljivosti mijenja se električni naboj neurona. Neuron se sastoji od dendrita koji prikuplja signale te ih šalje kroz aksione do završnih nožica koje potom prenose signal na sljedeći neuron. Sinapsa je mjesto komunikacije između dva neurona. [16]

Živčani sustav koordinira različite aktivnosti, djelujući slično računalu tako što prima podražaje i reagira na njih. Znači, svaki put kad se krećemo, mislimo, osjećamo ili se nečega prisjećamo, naši neuroni rade. Rade na način da odašilju signale električnim impulsima, koji putuju od neurona do neurona velikom brzinom. Tako na primjer, sve informacije koje se iz okoline prikupljaju osjetilima i podražajima, živčane stanice ili neuroni ih pretvaraju u električne signale koji putuju do mozga koji potom prima i obrađuje podatke. Također, informacije koje mozak šalje nazad tijelu imaju oblik električnih signala. [17]

Stanje ljudskog mozga može se klasificirati prema intenzitetu emitiranih moždanih valova. Najsporiji moždani valovi javljaju se tijekom faze spavanja, dok su u polusnu ili lakom

snu nešto brži, a najbrži su u stresnim situacijama ili stanjima uzbuđenja. Proces stalne izmjene iona s okolinom, bez obzira na to održava li se potencijal mirovanja ili dolazi do akcijskog potencijala, generira kontinuirane valove iona. Kada ovi ionizirani valovi dosegnu elektrode postavljene na lubanji, mogu utjecati na elektrone metala na elektrodama, što rezultira stvaranjem električnog napona. Aktivnosti poput promatranja, montiranja i demontiranja objekata, rješavanje mentalnih zadataka, razgovora i ostalih potiču različite dijelove mozga, stvarajući tako raznolike električne signale. [16]

#### **2.1.4. Ljudski mozak u suvremenom svijetu**

Današnji čovjek ima veći frontalni režanj i veći broj neurona u svojim asocijativnim područjima u odnosu na ostale primat. [18]

Ova evolucijska prednost omogućila mu je visoke kognitivne sposobnosti, sposobnost apstraktnog mišljenja i razvoj jezične komunikacije. Nadalje, industrijalizacijom, urbanizacijom, digitalizacijom i općenitim razvojem pojedinih društva čovjek stvara nove navike i uvodi nove radnje. U prošlosti, glavne aktivnosti čovjeka bile su lov, sakupljanje i izrada alata. Pred modernim je čovjekom izložen velik izbor gotove hrane i pića, prima veliki broj informacija, obrazuje se, radi, koristi strojeve i ima hobije. Čovjekov mozak je odgovoran za razvoj znanosti i tehnologije koje u konačnici imaju veliki utjecaj na društvo. Iako su neke aktivnosti zauvijek nestale, dok su se nove pojavile, određeni poslovi su nastavili svoje djelovanje, ali uz pomoć razvijene tehnologije i efikasnijih uređaja. Tehnološki napredak ostvario je značajne promjene u svim sferama društva, bilo da se govori o obrazovanju, poljoprivredi i proizvodnji, komunikaciji, zdravstvu i higijeni, transportu, okolišu, infrastrukturi ili upravljanju. Tehnologija je optimirala i ubrzala radne procese, što ishodi uštedama u vremenu i novcu, značajnom postignuću za društvo u cjelini. [19]

S druge strane, kako bi se očuvalo uzorno društveno okruženje, važno je osigurati da tehnološki napredak služi dobrobiti društva i okoliša. [19]

Dakle, suvremeno doba potiče nova rješenja te postoji velik potencijal razvoja ljudske kreativnosti i uporabe mentalne snage za budućnost. Um se danas može pratiti i analizirati pomoću opreme koja ljudima daje unaprijedni uvid u njegov rad. Tako značajan napredak dolazi i u istraživanju interakcije čovjeka i računala. [20]

## 2.2. SUČELJE MOZAK-RAČUNALO

Sučelje mozak-računalo, koje se često naziva i sučelje mozak-stroj (eng. *Brain-Machine Interface* – BMI) je hardverski i softverski komunikacijski sustav koji omogućuje samoj moždanoj aktivnosti da upravlja računalima ili vanjskim uređajima. Sustav omogućuje ljudima interakciju sa svojom okolinom, bez korištenja perifernih živaca i mišića, korištenjem signala koji se stvaraju elektroencefalografskom aktivnošću. [21]

### 2.2.1. Način rada sučelja mozak-računalo

BCI je sustav umjetne inteligencije koji može prepoznati određeni skup uzoraka u moždanim signalima prateći pet uzastopnih faza: prikupljanje signala, predobrada ili pojačavanje signala, izdvajanje značajki, klasifikacija i kontrolno sučelje. [22]

BCI koristi moždane signale kako bi prikupio informacije o namjerama korisnika. U tu svrhu, BCI se oslanja na fazu snimanja koja mjeri moždanu aktivnost i prevodi informaciju u mjerljive električne signale. Mogu se pratiti dvije vrste moždanih aktivnosti: elektrofiziološke i hemodinamične. [22]

Hemodinamična aktivnost je proces u kojem krv otpušta glukozu aktivnim neuronima većom brzinom nego u području neaktivnih neurona [23]. Glukoza i kisik dostavljeni kroz krvotok rezultiraju viškom oksihemoglobina u venama aktivnog područja te značajnom promjenom lokalnog omjera oksihemoglobina i deoksihemoglobina [23]. Te se promjene mogu kvantificirati metodama oslikavanja mozga (eng. *neuroimaging methods*) kao što su funkcionalna magnetska rezonancija i bliska infracrvena spektroskopija. Ovakve metode svrstavaju se kao neizravne, jer mjere hemodinamični odgovor koji, za razliku od elektrofiziološke aktivnosti, nije izravno povezan s neuronskom aktivnošću. [24]

Elektrofiziološku aktivnost stvaraju elektrokemijski prijenosnici koji razmjenjuju informacije između neurona. Neuron stvara ione struje koje teku unutar i preko neuronskih sklopova. Ove unutarstanične struje poznate su kao primarne struje. Očuvanje električnih naboja znači da su primarne struje zatvorene izvanstaničnim strujnim tokovima, koji su poznati kao sekundarne struje. Elektrofiziološka aktivnost mjeri se elektroencefalografijom,

elektrokortikografijom, magnetoencefalografijom i prikupljanjem električnog signala u pojedinačnom neuronu. [25]

Elektroencefalografija (eng. *ElectroEncephaloGraphy* – EEG) je proces snimanja električne aktivnosti pojedinih neurona u mozgu, kroz vlasitište. EEG mjeri električnu moždanu aktivnost uzrokovanu protokom električnih struja tijekom sinaptičkih pobuđenja dendrita u neuronima i iznimno je osjetljiv na učinke sekundarnih struja. Neinvazivni je način snimanja koji se koristi u gotovo svim modernim BCI aplikacijama, praktičniji je od elektrokortikografije, koja zahtijeva otvor kroz lubanju za izravan pristup moždanom tkivu [26]. Također, najkorištenija je metoda oslikavanja mozga zahvaljujući svojoj visokoj vremenskoj rezoluciji, relativno niskoj cijeni, visokoj prenosivosti i malim rizicima za korisnike te većina BCI-a sakuplja bitne informacije koristeći elektroencefalografiju [27]. BCI koji se temelji na elektroencefalografiji sastoji se od skupa senzora koji primaju elektroencefalografske signale iz različitih područja mozga. Elektrode koje se koriste kod EEG-a mogu biti aktivne ili pasivne. Aktivne elektrode imaju ugrađena pojačala signala, a pasivnim je potrebno vanjsko pojačalo za pojačanje izmjerenih signala. Međutim, na kvalitetu elektroencefalografskih signala utječu vlasitište, lubanja i mnogi drugi učinci, kao i pozadinska buka zbog koje se i koriste ugrađena ili vanjska pojačala. Šum je ključan za elektroencefalografiju i druge metode oslikavanja mozga, utoliko što smanjuje omjer signala i šuma (eng. *Signal-to-Noise Ratio* – SNR), a time i sposobnost izvlačenja relevantnih informacija iz snimljenih signala. [26]

### 2.2.2. Prikupljanje signala

Prikupljanje signala je prva faza rada svih BCI sustava i može se postići na dva načina: invazivnim i neinvazivnim metodama (na primjer elektrode) [28].

Invazivni BCI koriste elektrode usađene izravno u sivu tvar mozga neurokirurškim zahvatom. Koristeći čipove ugrađene na mozgu koji imaju stotine pribadača, tanje od širine ljudske dlake, koje strše iz njih i prodiru u moždanu koru, znanstvenici su u mogućnosti pročitati pojavljivanje stotina neurona u mozgu. Jezik neurona se zatim šalje računalnom prevoditelju koji koristi posebne algoritme za dekodiranje neuralnog jezika u računalni jezik. To se zatim šalje na drugo računalo koje prima prevedene informacije i govori stroju što treba učiniti. Dok su u svojoj tvari, invazivni uređaji proizvode najkvalitetnije signale od svih BCI uređaja te se većina znanstvenika slaže da se vraćanje pokretljivosti pomoću proteza s više

stupnjeva slobode može postići samo ovim metodama [29]. No, uređaji su skloni stvaranju ožiljaka zbog kojih signal postaje slabiji ili čak potpuno nestaje jer tijelo reagira na strano tijelo u mozgu. Ugradnja elektroda na koru mozga i ovakvo snimanje naziva se elektrokortikografija (eng. *ElectroCorticoGraphy* - ECoG). [30]

Neinvazivne metode koriste uređaje s elektrodama koje se postavljaju na površinu glave. Te elektrode mogu čitati moždane signale. Bez obzira na položaj elektroda, osnovni način rada je isti: elektrode mjere i zapisuju male razlike u naponu između neurona. Signal se zatim pojačava i filtrira. Signal tumači računalni program, koji prikazuje signale pomoću olovki koje su automatski ispisivale promjene to jest uzorke na neprekidnom listu papira. [21]

Iako lubanja blokira dosta električnog signala i stvara buku pri snimanju, neinvazivne metode su prihvaćenija od ostalih tipova zbog jednostavnosti i većih nedostataka koje ostali tipovi posjeduju [21]. Najkorištenija neinvazivna metoda kod BCI uređaja je EEG i to je ona koju koristi i uređaj koji će se koristiti u ovom radu.

### 2.2.3. Predobrada ili pojačavanje signala

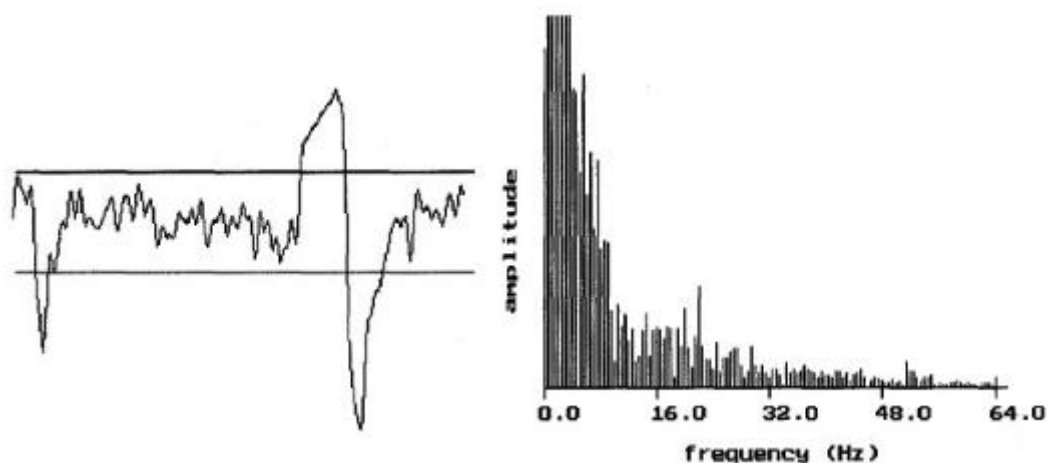
Kako ne bi došlo do pogreške u analizi signala, u ovoj fazi potrebno je obraditi signal kako bi se uklonile neželjene smetnje [31]. Jedan od glavnih problema u automatiziranoj EEG analizi je detekcija različite vrste interferencijskih valnih oblika (artefakata) dodanih EEG signalu tijekom snimanja [32]. Pojam artefakt u EEG-u odnosi na svaki šum (signal) u podacima koji se može pripisati određenom izvoru, a ne proizlazi iz samog mozga [33]. Dakle, treptaji očiju, pokreti očiju i kontrakcije mišića su sve vrste artefakata [33]. Postoje četiri glavna izvora artefakata [32]:

- EEG oprema
- električne smetnje izvan subjekta i sustava za snimanje
- elektrode
- subjekt: normalna električna aktivnost srca, treptanje oka, pokreti očiju i općenito mišići.

U slučaju pregleda sa stručnjakom, EEG stručnjaci mogu vrlo lako otkriti i prepoznati artefakte. Međutim, tijekom automatizirane analize ti artefakti često uzrokuju ozbiljne pogreške u klasifikaciji čime se smanjuje klinička upotrebljivost automatiziranih analitičkih sustava. [33]

Istraživanja su pokazala da artefakti kojih se najteže riješiti nastaju kao posljedica treptaja i pokretanja oka. Pokret oka i kapka uzrokuje promjenu potencijalnog polja zbog postojeće razlike potencijala od oko 100 mV između rožnice i mrežnice. U kliničkoj situaciji takvi se artefakti odbacuju stručnjakovim pregledom snimke. Postoje jednostavni kriteriji za prepoznavanje artefakata koji mogu pomoći i u automatskoj analizi. Neki jednostavni kriteriji su: visoka amplituda delta vala (0,5-4 Hz) u kanalima Fp1 i Fp2, sličnost signala u kanalima Fp1 i Fp2, brzi pad delta vala u pozadini (amplituda delta vala u Fp1 i Fp2 je puno veća nego u drugim kanalima). Kod automatiziranih sustava ovaj proces je puno kompliciraniji, no razvijaju se metode za što bolje prepoznavanje i uklanjanje ovih artefakata. Najbolji način za izbjeci ove smetnje je pokušati što više umiriti čovjeka koji je subjekt mjerenja. [32]

Na slici 3. prikazani su artefakti uzrokovani treptanjem u EEG signalu.



Slika 3. Artefakt uzrokovan treptanjem kao EEG signal [32]

Artefakti i sve smetnje tijekom EEG-a nastoje se ukloniti filtriranjem signala. Uglavnom se koriste četiri vrste filtera [34]:

- *highpass* – filteri koji propuštaju samo frekvencije iznad željene granice
- *lowpass* – filteri koji propuštaju samo frekvencije ispod željene granice
- *bandpass* – filteri koji propuštaju samo određeni raspon frekvencija
- *bandstop* – filteri koji ograničuju i ne propuštaju određeni raspon frekvencija.

#### 2.2.4. Izdvajanje značajki

Različite misaone aktivnosti rezultiraju različitim uzorcima moždanih signala. Relevantne informacije u moždanim signalima skrivene su u vrlo bučnom okruženju, a moždani

signali se sastoje od velikog broja istovremenih izvora. Signal koji bi mogao biti važan mogao bi se preklapati vremenski i prostorno s višestrukim signalima iz različitih moždanih aktivnosti. Iz tog razloga, u mnogim slučajevima, nije dovoljno koristiti jednostavne metode kao što je *bandpass* filter, već se koriste metode izdvajanja značajki (eng. *feature extraction*). [21]

BCI se koristi kao sustav za prepoznavanje uzoraka koji klasificira svaki uzorak u klasu prema njegovim značajkama, pokušavajući tako eliminirati neželjenu pozadinsku moždanu aktivnost. BCI izvlači značajke iz moždanih signala temeljeno na sličnosti s određenom klasom, ali i temeljeno na razlikama od ostalih klasa i kao takva ova faza je podskupina klasifikacije. Metode izdvajanja značajki mogu se podijeliti na tri glavne kategorije [21]:

- metode redukcije dimenzija (eng. *dimensional reduction methods*)
- vremensko-frekvencijske metode (eng. *time–frequency analysis*)
- algoritmi zajedničkog prostornog uzorka (eng. *common spatial pattern algorithm*).

### 2.2.5. Klasifikacija signala

Cilj faze klasifikacije u BCI sustavu je prepoznavanje namjere korisnika i prikazivanje te namjere klasama pomoću klasifikacijskih algoritama [35]. Istovremeno hvatanje signala u velikim količinama zbog brojnih elektroda uzrokuje poteškoće te nije moguće savršeno klasificirati valove [35]. Valovi se najčešće klasificiraju prema frekvencijama i obliku te postoji šest važnih vrsta signala: delta valovi, theta valovi, alfa valovi, mu valovi, beta valovi i gama valovi [32].

Delta valovi imaju frekvenciju između 0,5 i 4 Hz, a napon varira. Ovi valovi oslobađaju se najviše kod beba, a kod odraslih tijekom dubokog sna. Kod odraslih pojavljuju se u frontalnom režnju, a kod djece u okcipitalnom režnju. [36]

Theta valovi imaju frekvenciju između 4 i 7 Hz, a napon je oko 20  $\mu\text{V}$ . Oslobađaju se tijekom pospanosti i mogu se pojavljivati u nesvijesti ili tijekom duboke meditacije. Valovi se čak mogu stvarati kada je mozak pod emocionalnim stresom, napetošću, frustracijom ili razočarenjem. [37]

Alfa valovi imaju frekvenciju između 8 i 13 Hz, a napon je oko 30 do 50  $\mu\text{V}$ . Valovi nastaju u stražnjim dijelovima glave, na obje strane, a jači su na dominantnoj strani. Ovi valovi



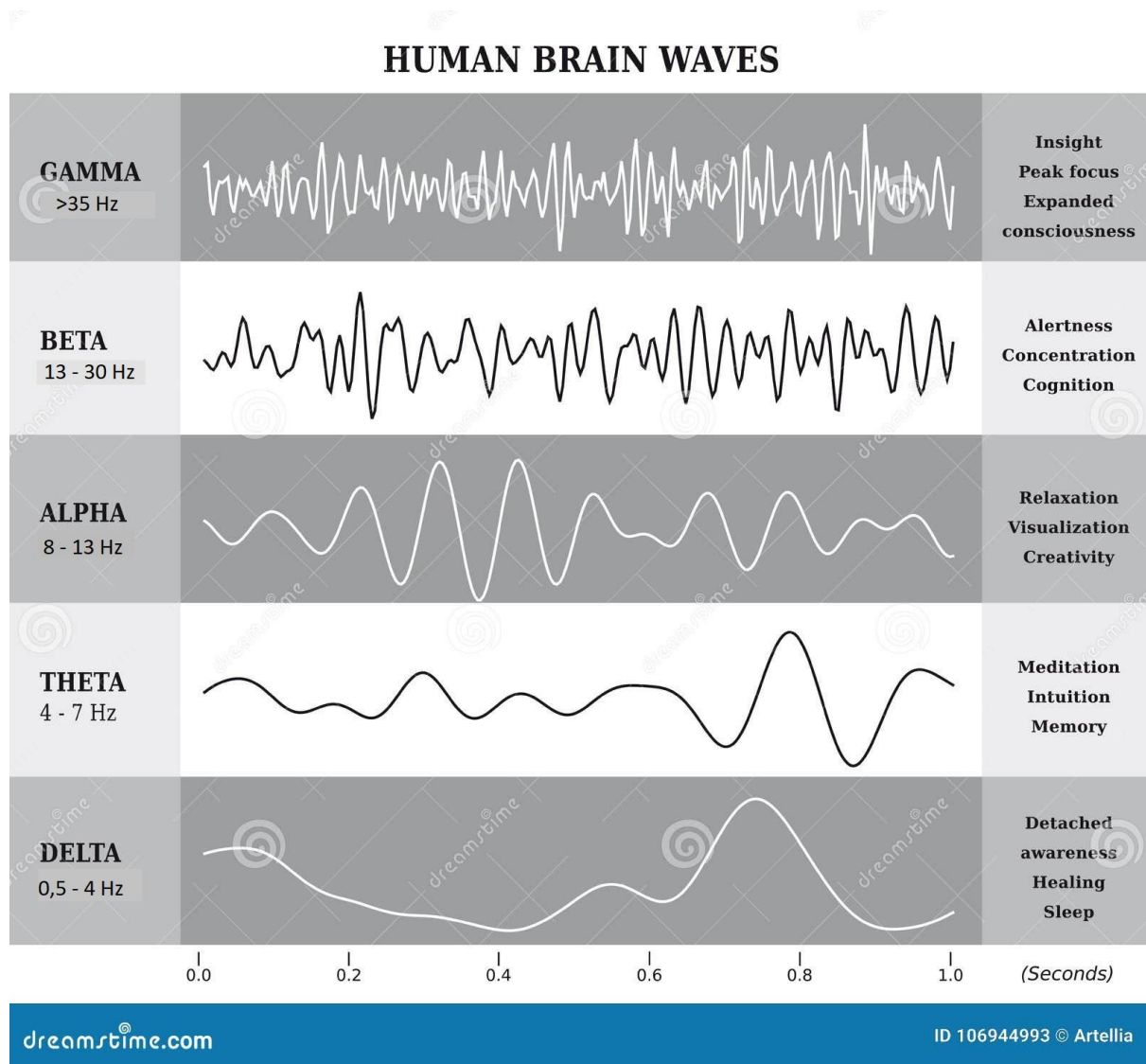
nastaju kada je mozak opušten ili barem kada nema složenih aktivnosti u frontalnom i okcipitalnom režnju. Alfa val može doseći frekvenciju od 20 Hz, što je u beta rasponu, ali ima karakteristike alfa stanja. Sama alfa više označava bezumno ili prazno stanje nego opuštena i pasivna stanja. Ovi valovi umanjuju se otvaranjem očiju, korištenjem ušiju i stvaranjem napetosti ili tjeskobe. [37]

Mu valovi imaju frekvenciju između 8 i 12 Hz te naznačuju pokrete tijela. Ovi valovi se oslobađaju pomoću spontanih moždanih aktivnosti poput motoričkih aktivnosti. Izgledaju poput alfa valova, ali se alfa valovi bilježe na okcipitalnom režnju, a mu valovi se bilježe u motoričkom centru lociranom na prednjem i središnjem dijelu mozga. [36]

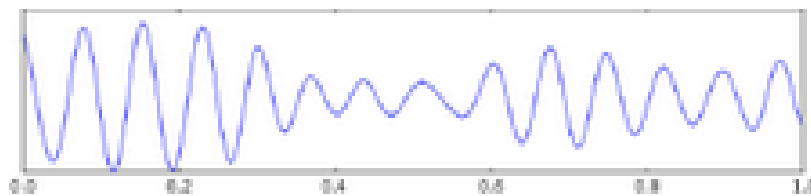
Beta valovi imaju frekvenciju između 13 i 30 Hz, a napon je oko 5 do 30  $\mu\text{V}$ . Valovi se stvaraju kada je mozak aktivan u fokusiranju, razmišljanju, rješavanju problema i slično. Ove frekvencije mogu doseći čak i do 50 Hz, tijekom intenzivnog rada mozga. Najviše se mogu vidjeti na prednjem dijelu mozga, simetrično su podijeljeni na obje strane i valovi su uglavnom niske amplitude. [37]

Gama valovi imaju frekvencije od 35 Hz ili više. Ovi valovi stvaraju se tijekom tok svijesti (eng. *stream of consciousness*) i prikazuju se tijekom korištenja kratkotrajnog pamćenja za povezivanje stvari, zvukova i taktilnih podražaja koje mozak prepoznaje. Prikazuju se u parijetalnom režnju u somatosenzornom korteksu. [36]

Na slikama 4. i 5. prikazani su valovi kao EEG signali.



**Slika 4. Ljudski moždani valovi [38]**



**Slika 5. Mu valovi [36]**

### 2.2.6. Kontrolno sučelje

Konačna faza kod sustava BCI je izvođenje naredbi isključivo putem mozga. Za ostvarivanje ovog koraka koriste se analizirani i obrađeni signali prikupljeni tijekom prethodnih faza. Važno je napomenuti da sustavi BCI podržavaju različite programske jezike, operacijske sustave i razvojna okruženja. [39]

Primjena sustava BCI je široka i postajat će sve šira s daljnjim razvojem tehnologije. Najkorištenija i najutjecajnija je upravo u medicinskom području. Njihova inovativna upotreba obuhvaća različite aspekte, uključujući istraživanje moždane aktivnosti za dijagnosticiranje bolesti i poremećaja, za rehabilitaciju te za praćenje stanja pacijenata. Istraživanja se često provode za dublju analizu moždane aktivnosti koje su povezane sa psihičkim poremećajima i navikama kao što su ovisnosti. Također, protetička pomagala temeljena na sustavima BCI omogućuju osobama s invaliditetom poboljšanu funkcionalnost i kvalitetu života. Iako jedinstvenost čovjeka i njegovog tijela može zakomplicirati uporabu i korištenje, razvojem tehnologije njegova prilagodljivost i personalizacija će biti olakšana. [40]

Nadalje, u obrazovnom sustavu, sustavi BCI omogućuju personalizirani pristup učenju s povratnom informacijom o mentalnom stanju učenika. Brojna istraživanja koriste tehnologiju BCI kod djece u nižim razredima osnovne škole kako bi uočili najaktivnije dijelove mozga, njihov fokus te koji način učenja stvara najefikasnije pamćenje [41]. Uz to, industrija zabave i videoigara sve više koristi sustave BCI te tako otvaraju nove kreativne ideje za kontroliranje i stvaranje likova pomoću mentalnih naredbi [42].

Implementacija u proizvodne sustave poboljšava kvalitetu rada i života. Robotizacija i automatizacija su do sada uvelike olakšale i ubrzale proizvodnju, a dodatno uvođenjem sustava BCI osiguravat će se još brže upravljanje i kontrola strojeva [26].

### 3. PROBLEMI I IZAZOVI SUSTAVA MOZAK-RAČUNALO

Područje BCI sustava je relativno novo, no dinamično raste. Privlači pažnju ljudi s poteškoćama, ali i zdravim ljudima. S druge strane, postoji nekoliko ključnih izazova koji sprječavaju njihovu širu implementaciju.

Za početak, kontrola vanjskim uređajima i strojevima pomoću mozga je kompleksan proces koji zahtijeva veliku brzinu, preciznost i pouzdano prevođenje korisničke namjere. Zahtijeva veliku i učinkovitu interakciju između korisničkog mozga koji proizvodi moždanu aktivnost i kodira namjeru, te BCI sustava, koji tu aktivnost prevodi u upravljačke naredbe uređaja. U suprotnom, dolazi do nepreciznosti interpretacije i do neželjenih naredbi. Time se stvara frustracija i nesigurnost korištenja od strane korisnika. [21]

BCI sustavi mogu postići najbolje rezultate u mirnom laboratorijskom okruženju, ali ne i u stvarnom svijetu. Već je zahtjevno ispuniti idealne uvjete kod stručnjaka s najboljom opremom, a još je zahtjevnije samostalno koristiti ovakve uređaje od doma. Naime, uređaji daju signale vrlo loše kvalitete jer signali moraju prijeći vlasništvo, lubanju i mnoge druge dijelove tijela. To znači da su EEG signali u elektrodama slabi i nerazumljivi. Osim toga, pozadinska buka, poput pomicanja glave i očiju, ozbiljno utječe na kvalitetu podataka. Nadalje, ključan izazov je i financijski aspekt. [43]

Dostupnost i pristupačnost ove tehnologije za širu populaciju je ograničena. U području osobne upotrebe, cijene BCI uređaja namijenjenih privatnim korisnicima variraju. Komercijalni proizvodi pružaju osnovne mogućnosti, ali sa smanjenom preciznošću u usporedbi s medicinskim sustavima. Najnapredniji uređaji s vrhunskim sensorima i softverom često su izuzetno skupi, postavljajući ih izvan dosega prosječnog potrošača. Osim skupog uređaja, potrebni su softveri i aplikacije za očitavanje podataka. Potrebne licence su skupe te su vremenski ograničene i zahtijevaju obnovu. [43]

Kontinuirano smanjenje cijena, povećanje kvalitete podataka, razvoj dostupnih softvera te sam razvoj tehnologije i učenje o interpretaciji podataka su faktori koji će u budućnosti omogućiti širu upotrebu i time smanjivati probleme ove tehnologije.

## 4. UREĐAJ EMOTIV EPOC+

Emotiv EPOC+ je komercijalan uređaj za provođenje elektroencefalografije koji je razvila tvrtka Emotiv Systems. Ovaj uređaj bilježi električne signale iz mozga na način da uspoređuje razliku električnog potencijala između neurona. Uređaj omogućuje pristup profesionalnim podacima o mozgu, uz to, dizajniran je za brzo i jednostavno korištenje. Emotiv proizvodi namijenjeni su samo za istraživačke svrhe i osobnu upotrebu te nisu dizajnirani niti namijenjeni za dijagnosticiranje ili liječenje bolesti. [44]

### 4.1. DIJELOVI I SPECIFIKACIJE UREĐAJA

Uređaj Emotiv EPOC+ dolazi u zaštitnoj kutiji u kojoj se nalaze (Slika 6.):

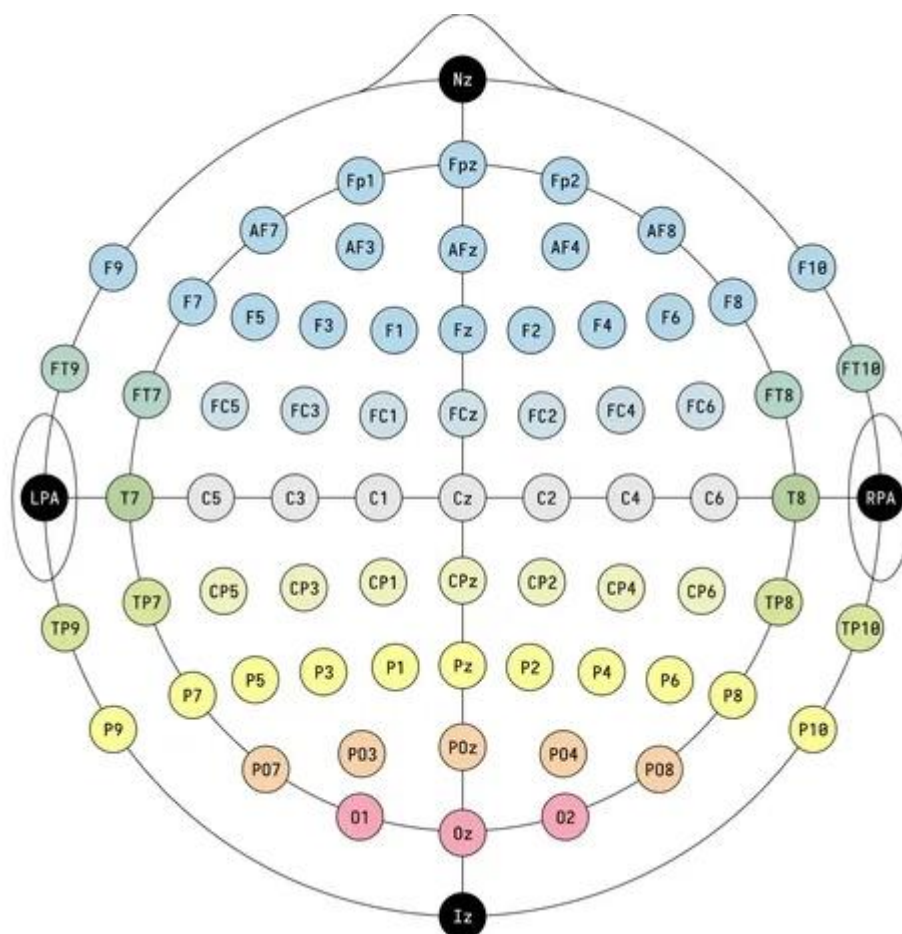
- EPOC+ uređaj
- USB stick za povezivanje uređaja s računalom
- fiziološka otopina
- USB kabel za punjenje tipa C
- senzori u obliku jastučića od filca odnosno pusta.

Uređaj koristi 14 kanala za očitavanje električnih signala iz različitih dijelova mozga i time osigurava dobru pokrivenost svih režnjeva. [45]

Prepoznatljive točke za elektroencefalografiju međunarodno su standardizirane i prihvaćene kao **sustav 10-20** (Slika 7.). Sustav se temelji na odnosu između položaja elektroda i područja ispod moždane kore, uz osiguravanje pokrivanja svih regija mozga. Elektroдна oznaka općenito definira područje mozga koje je pokriveno tom elektrodom. Naziv svake elektrode sastoji se od slova i broja. [46]



Slika 6. Uredaj Emotiv EPOC+ [44]



Slika 7. Sustav 10/20 [46]

Oznake slova elektroda se kreću od prednjeg prema stražnjem dijelu glave i uključuju sljedeće nazive po režnjevima: Fp (prefrontalni ili frontalni), F (frontalni), C (središnja linija mozga), T (temporalni), P (parijetalni) i O (okcipitalni). Nadalje, ponekad se koriste slova M i A za označavanje ušnih školjki, oni se često prikazuju kao reference za analizu signala. [46]

Brojčana oznaka povezana je s hemisferama mozga, znači, parni brojevi se nalaze na desnoj hemisferi, a neparni na lijevoj. [46]

Emotiv EPOC+ ima dva elektrodna kraka od kojih svaki sadrži po devet lokacija za senzore (sedam lokacija za senzore i dvije za referentne senzore). Dvije lokacije senzora (M1/M2) na sebi već imaju ugrađene gumene umetke jer su to alternativne pozicije za zadane reference (P3/P4). Emotiv EPOC+ koristi elektrode: AF3, F7, F3, FC5, T7, P7, O1, O2, P8, T8, FC6, F4, F8 i AF4. [47]

Elektrode AF3, AF4, F7 i F8 su zadužene za motoričko planiranje aktivnosti. Elektroda F7 predstavlja racionalnu aktivnost to jest racionalno razmišljanje, dok elektroda F8 predstavlja područje emocionalne regulacije poput samokontrole, emocionalne bistrine i stabilnosti. [48]

Elektrode F3 i F4 su postavljane na dijelu mozga koji je također zadužen za planiranje motoričkih aktivnosti. Osim toga, F3 i F7 na lijevoj strani mozga aktivno rade pri pisanju desnom rukom, dok je F4 na desnoj strani mozga aktivno pri pisanju lijevom rukom te uključuje planiranje i kontrolu pokreta. [48]

Elektrode FC5 i FC6 su postavljane u blizini motivacijskog centra, zapravo govori o motiviranosti koja se pojavljuje za izvršavanje neke aktivnosti. [49]

Slušna obrada se vrši u temporalnim mjestima kod elektrode T7. T8 je također povezan s auditivnom percepcijom, prepoznavanjem lica i memorijom. [49]

Područje P7 sudjeluje u procesima poput senzorne integracije i prostorne pažnje. P8 mjeri električnu aktivnost u desnom parijetalnom režnju također za procese poput prostorne percepcije, senzorne integracije i pažnje prema vanjskim podražajima. [49]

Elektrode O1 i O2 su za vizualnu percepciju. [49]

Nadalje, senzori koriste podloge natopljene fiziološkom otopinom i omogućuju bežičnu povezivost putem Bluetootha te putem USB prijemnika. Napajanje se osigurava putem interne litij-polimerne baterije te omogućuje do 12 sati trajanja baterije s USB prijemnikom. Uz raznovrsne detekcije kao što su mentalne naredbe, performansi i izrazi lica, uređaj nudi širok



spektar mogućnosti za praćenje i analizu moždane aktivnosti. Težina uređaja iznosi 170 g, dok su dimenzije 9 x 15 x 15 cm. [44]

## 4.2. SOFTVERI ZA EMOTIV EPOC+

Emotiv trenutno pruža tri različita BCI softvera: EmotivPRO, EmotivBCI, i EmotivBrainViz. Podržane platforme za korištenje su Windows, MAC, iOS i Android. [50]

### 4.2.1. EmotivPRO

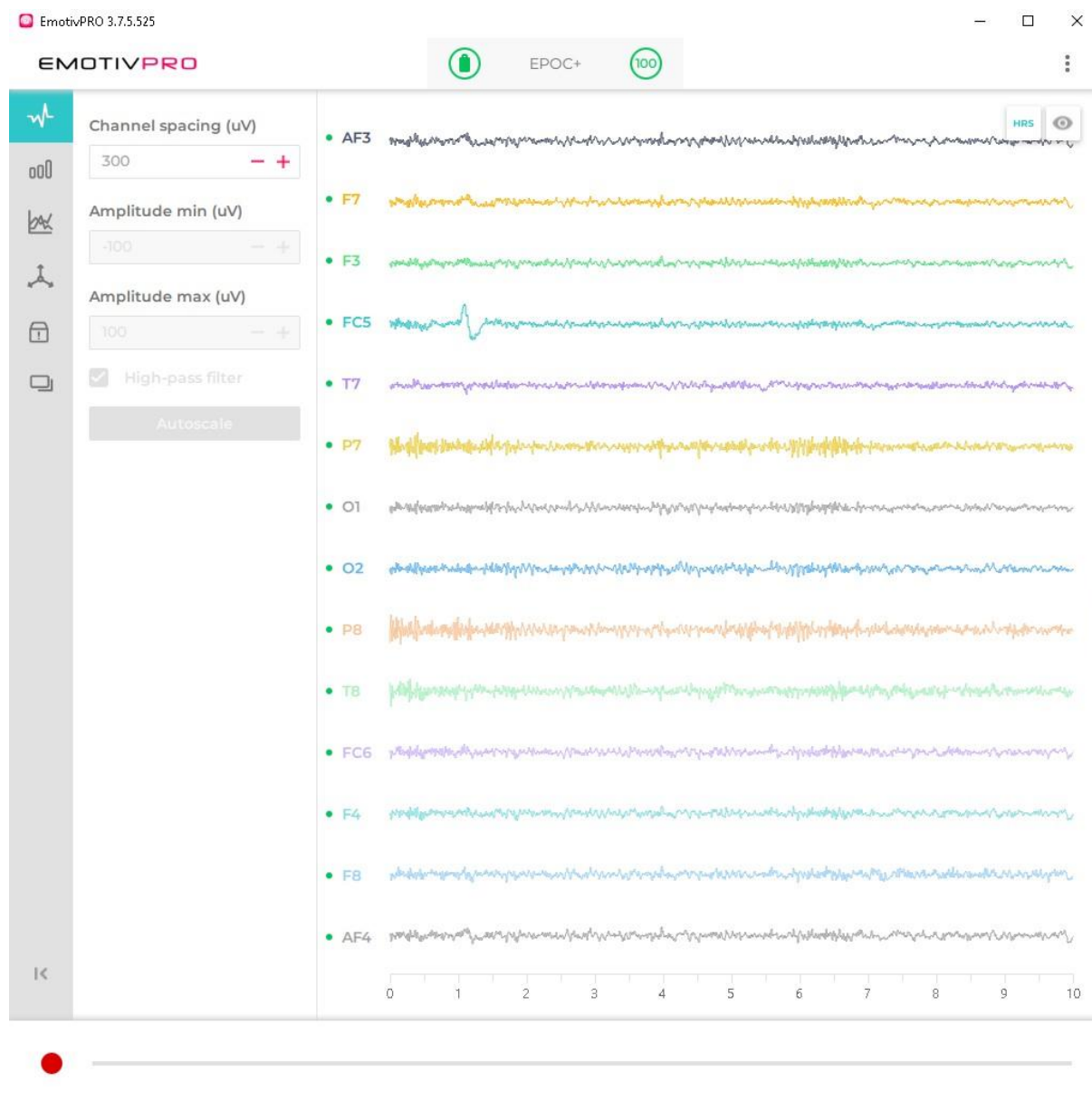
EmotivPRO zahtijeva plaćanje licence, a uz kupnju uređaja može se koristiti besplatna verzija EmotivPRO Lite. Cijene licenci variraju od 29 USD mjesečno za studentske licence do 224,08 USD mjesečno za poslovne licence. EmotivPRO donosi dodatne značajke [51]:

- pruža naprednije grafičke prikaze kognitivnih stanja, uključujući prikaz svake vrijednosti kognitivnog stanja odvojeno
- omogućuje prikaz neobrađenih EEG signala
- pruža mogućnost praćenja i analize samo jednog odabranog senzora
- daje prikaz brzine slanja i primanja podataka
- omogućuje neograničeno snimanje svih podataka tijekom istraživanja
- pruža mogućnost spremanja željenih podataka.

Također, korisnici mogu pratiti i analizirati samo odabrani senzor kako bi dobili specifičan uvid u područje mozga koje ih zanima, na primjer, frontalni režanj odgovoran za planiranje i izvršavanje naučenih i svjesnih radnji. Emotiv EPOC+ koristi AF3, F7, F3, FC5, T7, P7, O1, O2, P8, T8, FC6, F4, F8 i AF4 elektrode. [47]

Pokusi u ovom radu izvedeni su korištenjem besplatne licence pa će se u nastavku detaljnije objasniti što sve nudi EmotivPRO Lite.

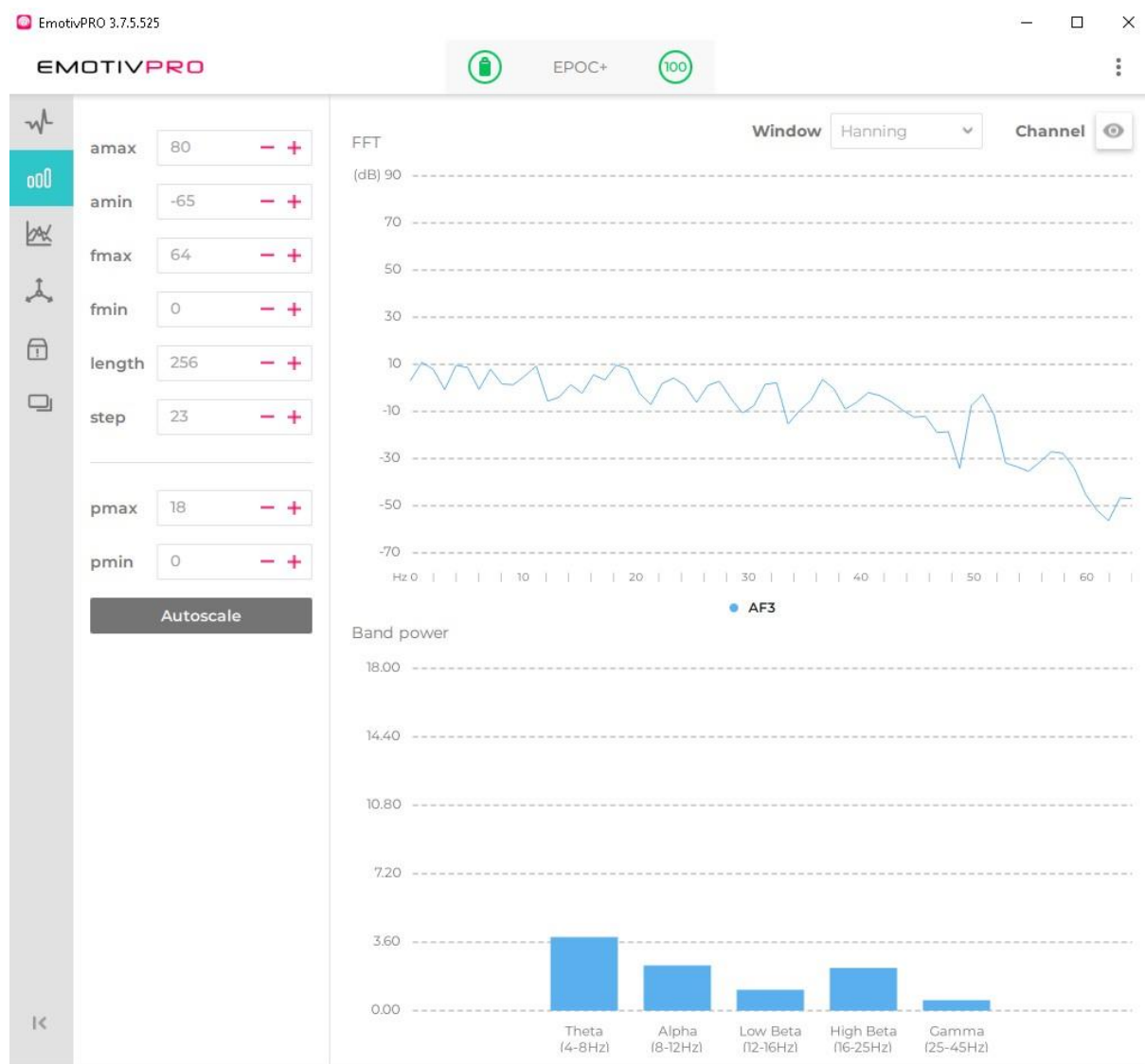
Slika 8. prikazuje sučelje softvera to jest njegov prvi prozor. Prozor omogućuje vizualizaciju sirovih EEG podataka u stvarnom vremenu. Može se vidjeti promjena napona na svih 14 elektroda, a podaci se mogu i snimiti. Podaci se mogu razlučiti na 128 ili 256 Hz. [52]



**Slika 8. Sučelje softvera EmotivPRO: prvi prozor**

Drugi prozor (Slika 9.) prikazuje detaljniju analizu frekvencija pojedine elektrode u stvarnom vremenu ili kao snimku. Osim analize jedne, mogu se gledati i dvije elektrode istovremeno radi usporedbe. Graf se prikazuje koristeći metodu Brze Fourierove Transformacije (eng. *Fast Fourier Transformation* – FFT) [52]. Apscisa grafa pokazuje frekvenciju (u Hz), a ordinata prikazuje amplitudu (u dB). Parametre frekvencije i amplitude je

moguće prilagoditi pomoću kontrola na lijevoj strani. Uz gornji graf, moguće je i pratiti kretanje to jest jačinu frekvencija theta, alfa, niskih i visokih beta te gama moždanih valova.



**Slika 9. Sučelje softvera EmotivPRO: drugi prozor**

Treći prozor (Slika 10.) prikazuje metriku učinka (eng. *performance metrics*). Emotiv tvrdi kako svoje metrike performansi grade i usavršavaju više od desetljeća koristeći vlastito razvijene algoritme strojnog učenja, umjetnu inteligenciju i najveći skup EEG podataka na svijetu te kako su prva neurotehnološka tvrtka u svijetu koja ih je izgradila. [53]

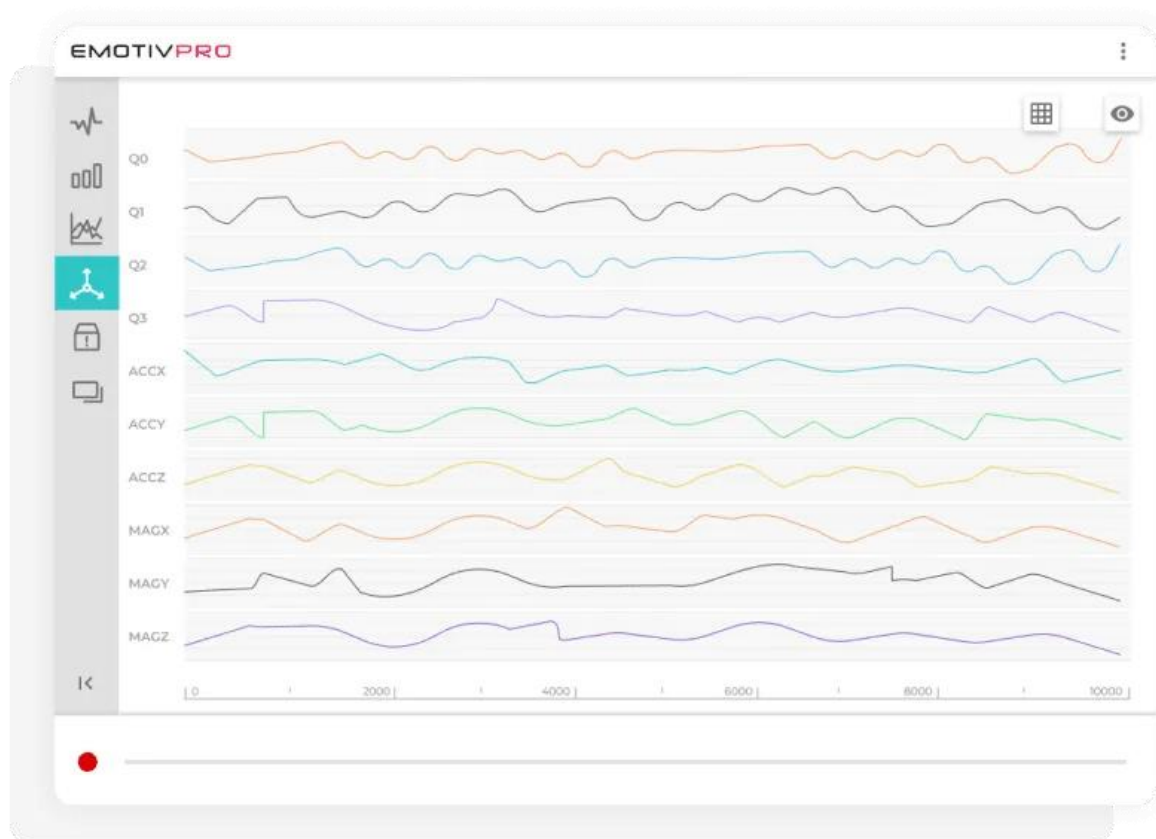
U prozoru postoji šest metrika učinka [53]:

- Pažnja (At) – mjeri budnu usredotočenost i dubinu pažnje tijekom obavljanja jednog zadatka. Učestalo mijenjanje zadatka i primanje velike količine različitih informacija bit će prikazano kao ometanje i smanjivat će iznos pažnje.
- Angažman (En) – prikazan je kao kombinacija koncentracije i pažnje te mjeri razinu uključenosti u neku aktivnost. Ova metrika je karakterizirana povećanim fiziološkim uzbuđenjem i beta valovima, zajedno s oslabljenim alfa valovima.
- Uzbuđenost (Ex) – osjećaj uzbuđenja može se mjeriti uz pomoć velike količine fizioloških odgovora kao što su proširenje zjenica, stimulacija žlijezda znojnica, povećanje otkucaja srca, širenje očiju i slično. Ove fiziološke pojave uzrokuje simpatički živčani sustav. Ova metrika mjeri taj emocionalni intenzitet u stvarnom vremenu koji nastaje kao posljedica podražaja ili okoline.
- Zainteresiranost (In) – mjeri privlačnost ili odbojnost prema trenutnoj aktivnosti, različitim podražajima i okolini. Niske razine zainteresiranosti pokazuju veliku odbojnost prema aktivnosti dok visoka zainteresiranost ukazuje na snažnu bliskost sa zadatkom.
- Opuštenost (Re) – mjeri mirni fokus nakon razdoblja intenzivne koncentracije. Ljudi koji meditiraju mogu postići visoke razine opuštenosti, dok nekim ljudima treba duže vrijeme da dosegnu opuštenost.
- Stres (St) – mjeri moždani napor potreban za izvršenje zadatka te frustracije tijekom izvođenja aktivnosti. Visoke razine stresa mogu se prikazivati zbog nesposobnosti izvršavanja zadatka, osjećaja preopterećenosti i straha od neuspjeha. One su najčešće destruktivne i neproduktivne, dok niže razine stresa mogu poboljšati produktivnost te time i pažnju, angažman i zainteresiranost.



**Slika 10. Treći prozor softvera EmotivPRO: Metrika učinka**

Četvrti prozor (Slika 11.) pokazuje tok podataka o kretanju. Podaci se dobivaju pomoću senzora na uređaju koji mjere položaj i orijentaciju samog uređaja. Također se može odabrati prikaz 3D vizualizacije pokreta predstavljenih kockom koja prikazuje rotaciju uređaja uz pomoć Kartezijevog koordinatnog sustava.



Slika 11. Četvrti prozor softvera EmotivPRO [51]

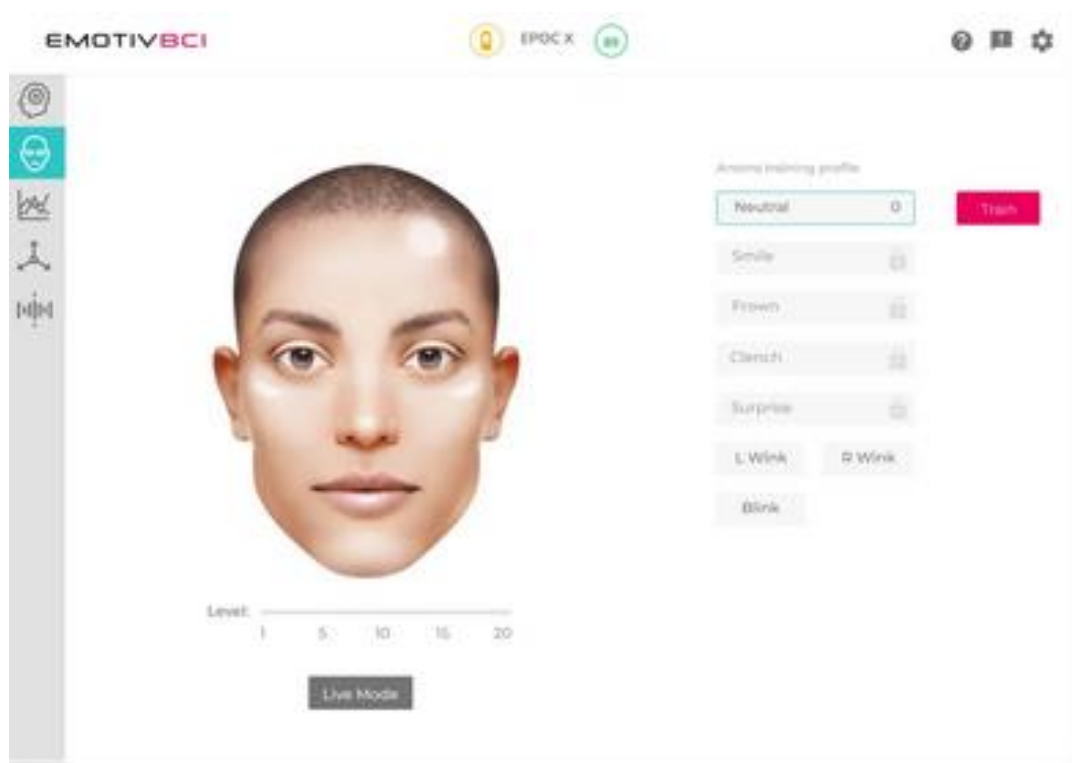
#### 4.2.2. EmotivBCI

Emotiv BCI je softver koji pruža mogućnost [54]:

- izvođenja specifičnih, prethodno naučenih radnji na računalu samo uz pomoć misli
- obavljanja radnji temeljenih na izrazima lica
- obavljanja radnji temeljenih na pokretima glave.

Nakon jednostavne instalacije aplikacije koja je besplatna, korisnici trebaju izvršiti registraciju na Emotivovoj internetskoj stranici. Prilikom registracije, postavljaju se pitanja koja istražuju različite vještine korisnika, kao što su sviranje instrumenata, višejezičnost ili razina obrazovanja. Ova pitanja pridonose dobivanju preciznijih rezultata analize podataka. Registracijski obrazac, uključuje i informacije o optimalnom položaju i kontaktu senzora s glavom, što dodatno utječe na točnost prikupljenih podataka, a može se provjeriti u EmotivBCI aplikaciji. [54]

Kako bi se ostvarila funkcionalnost izvršavanja mentalnih naredbi, korisnici moraju "naučiti" algoritam. Algoritam se temelji na prepoznavanju uzoraka, a kako bi uređaj razumio način na koji mozak šalje električne signale tijekom određenih radnji, potrebno je zabilježiti naredbe. Potrebno je odraditi aktivnosti koje softver traži. Tako je potrebno izvršavati aktivnosti koje softver traži poput podizanja obrva kako bi algoritam prihvatio i zapamtio tu radnju, uz to, tu su aktivnosti poput smijanja, pokazivanja zubi i ostalih. Električna aktivnost pokreta lica i očiju često se smatra nepoželjnim signalom u većini EEG sustava, no Emotivovi uređaji omogućuju odvajanje i korištenje tog signala u svrhu upravljanja. [55]



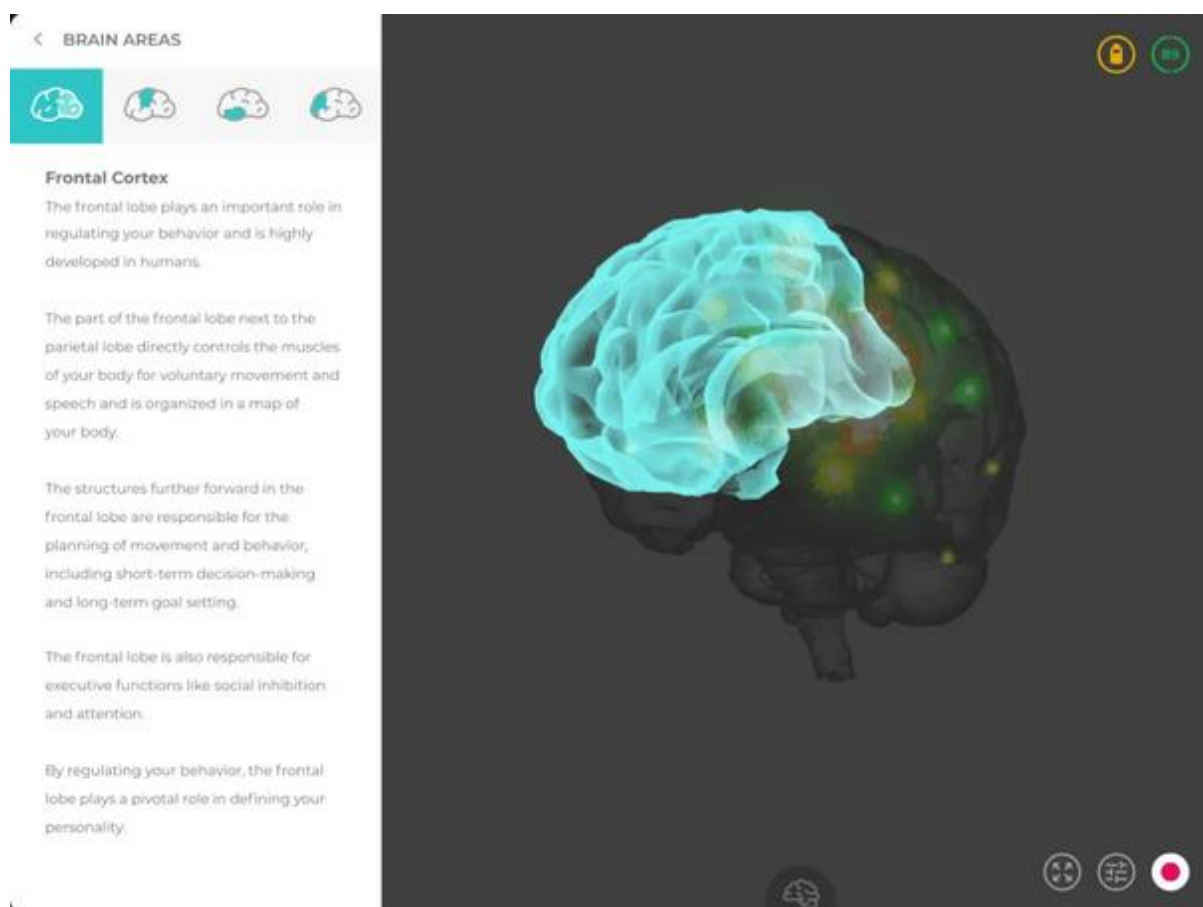
Slika 12. EmotivBCI [55]

#### 4.2.3. Emotiv BrainViz

Emotiv BrainViz predstavlja 3D vizualizacijski softver tvrtke Emotiv dizajniran za prikazivanje moždane aktivnosti. Za korištenje ovog softvera potrebna je jednokratna licenca od 79 USD, koja se ne obnavlja. Namijenjen je prvenstveno edukacijskim i istraživačkim svrhama, pružajući trodimenzionalni prikaz moždane aktivnosti. [56]

U 3D prikazu se prikazuju neobrađeni EEG podaci izmjereni Emotivovim uređajima. Sučelje omogućuje jasnu vizualizaciju alfa, beta, gama i theta moždanih signala, pri čemu svaki signal ima svoju karakterističnu boju. Ovaj pristup omogućuje korisnicima istovremen uvid u mjesto i vrstu moždane aktivnosti. [56]

Aplikacija pruža informacije o stanju mozga povezanom s frekvencijskim područjima, omogućujući izdvajanje specifičnih frekvencija moždanih signala za proučavanje. Također, softver pruža informacije o funkcijama određenih dijelova mozga, doprinoseći boljem razumijevanju i analizi moždane aktivnosti. [56]



Slika 13. Emotiv BrainViz [56]

#### 4.2.4. Alternativni softveri i programi

Postoji više otvorenih kodova za istraživanje i analizu podataka moždanih aktivnosti očitanih uređajem Emotiv EPOC+.



WinlabEEG je jedan od otvorenih kodova koji je dostupan za očitavanje BCI podataka koristeći bežični naglavni set Emotiv EPOC+. Koristi programski jezik C++ te daje brojčane podatke pojedinih elektroda s uređaja [57]. Također, postoji Wits koji koristi isti programski jezik te omogućava praćenje moždane aktivnosti i grafički prikazuje promjene na elektrodama. On prenosi vrijednosti od 128 Hz te ih očitava na grafu u rasponu od 1000 do 8000, a raspon se može i dodatno regulirati [58].

Potom, postoje otvoreni kodovi koji koriste drugi programski jezik poput Pythona. Emokit koristi ovaj programski jezik i pokazuje EEG signale te njihov spektar snage [59]. CyKIT je otvoreni kod koji prikazuje podatke o mikrovoltazi na grafu crnim linijama koje je moguće uvećati, uz to, prikazuje tablicu sa 16 kanala i njihove brojčane vrijednosti [60]. Prilikom odabira alata, treba razmotriti faktore poput programskog jezika, funkcionalnosti i jednostavnosti te mogu li se takvi podaci uopće uspješno interpretirati.

Zbog tehničkih poteškoća sa navedenim otvorenim kodovima i uređajem (uređaj je imao poteškoća prilikom spajanja sa softverima) za očitavanje podataka prilikom izvođenja pokusa, koristit će se Emotiv PRO-Lite koji je dostupan za preuzimanje na službenim stranicama Emotiva.

### **4.3. POSTAVLJANJE UREĐAJA**

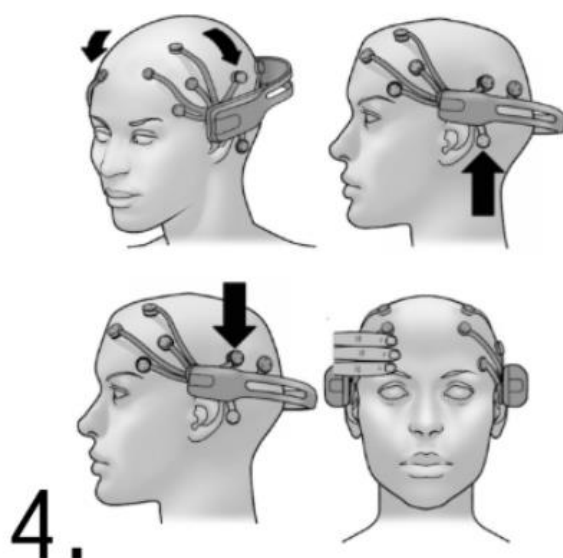
Uređaj i računalo povezuju se pomoću USB-a koji dolazi s uređajem. Prvo, potrebno je uključiti USB u računalo, a zatim uključiti uređaj. Drugo, važno je prije korištenja uređaja navlažiti senzore fiziološkom otopinom. Treći korak je instalirati senzore uređaja. Potrebno ih je izvaditi iz kutije za natapanje i lagano ih okretati u smjeru kazaljke na satu dok se ne čuje zvuk koji označava da je senzor prispojen na uređaj. [61]

Navedeni koraci prikazani su na slici 14.



Slika 14. Koraci pripreme i instalacije uređaja [61]

Nakon obavljanja prethodnih akcija, četvrti korak je postavljanje uređaja na glavu. Upute za pravilno postavljanje prikazane su na slici 15.

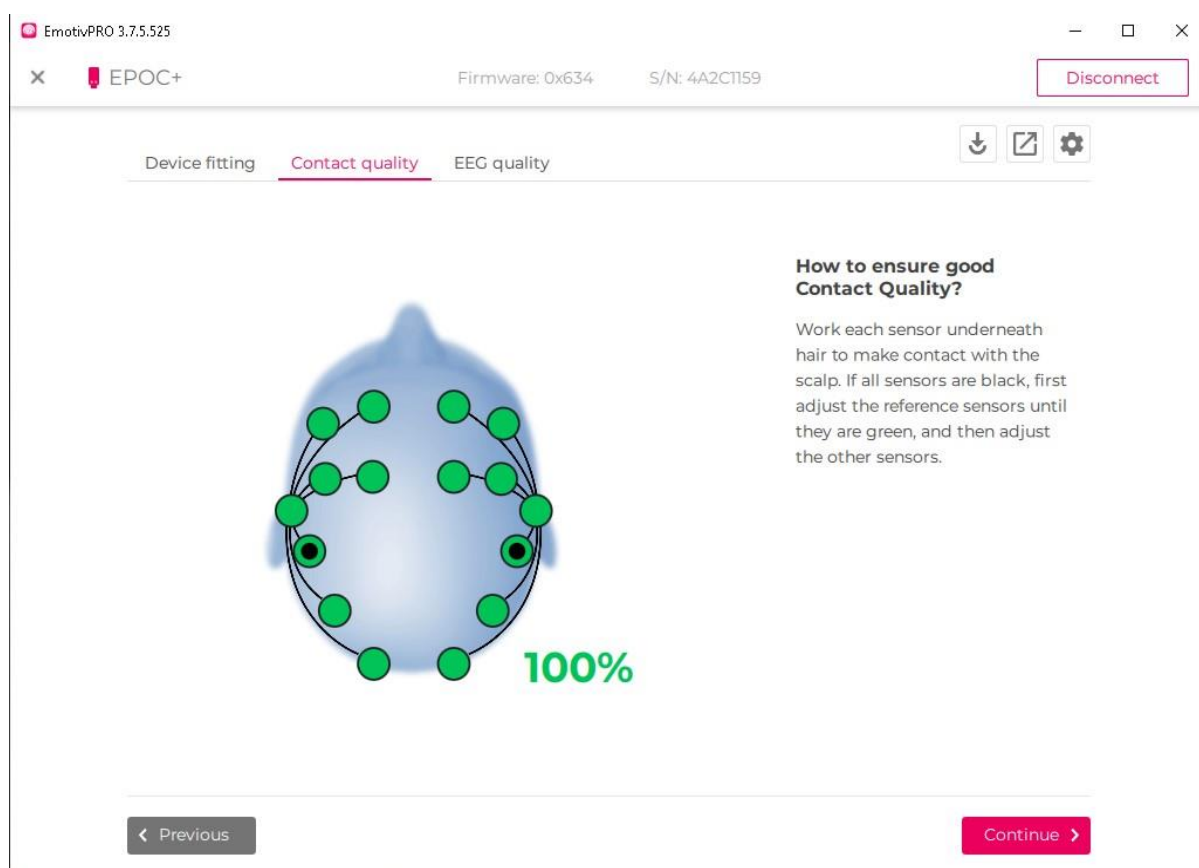


Slika 15. Pravilno postavljanje uređaja na glavu [61]

Važno je referentne senzore postaviti na predviđeno mjesto, a to je na kost iza uha. Nakon toga, uređaj je spreman za uporabu. Postoje četiri stanja kvalitete kontakta. Ovisno o boji, uređaj prikazuje status kvalitete kontakta. [61]

Tamnosiva ukazuje da uopće nije detektiran kontakt, crvena ukazuje na lošu kontaktnu kvalitetu. Nadalje, narančasta ukazuje na prosječnu kontaktnu kvalitetu, a zelena na dobru kontaktnu kvalitetu. [61]

Ukoliko senzori nisu zeleni, važno je provjeriti imaju li svi senzori dobar kontakt s tjemenu te jesu li senzori dovoljno vlažni. Slaba pozicija i suhoća senzora često su uzrok niske kontaktne kvalitete. Za postizanje optimalnih rezultata, potrebno je osigurati da svi senzori budu zelene boje kao na slici 16.



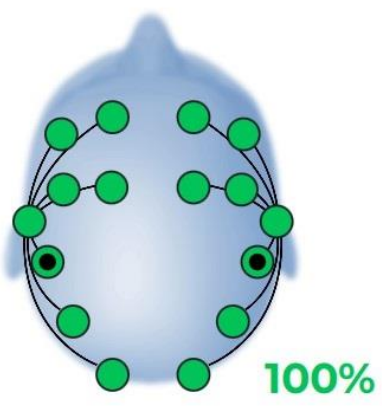
**Slika 16. Kontaktna kvaliteta**

Potom, gleda se kvaliteta EEG signala koja se također prikazuje u četiri stanja kontaktne kvalitete. Dobra kvaliteta postiže se mirovanjem i opuštanjem na nekoliko sekundi. Kada je kvaliteta signala dobra kao na slici 17. može se početi s korištenjem uređaja.

EmotivPRO 3.7.5.525 - □ ×

× EPOC+ Firmware: 0x634 S/N: 4A2C1159 Disconnect

Device fitting Contact quality EEG quality ↓ ↗ ⚙



100%

### How to ensure good EEG Quality?

Continue as for Contact Quality paying special attention to the references. Click on the sensors to compare the current signals with typical good quality EEG signals.

[Learn more](#)

← Previous Close

**Slika 17. Kvaliteta EEG signala**

## 5. POKUSI

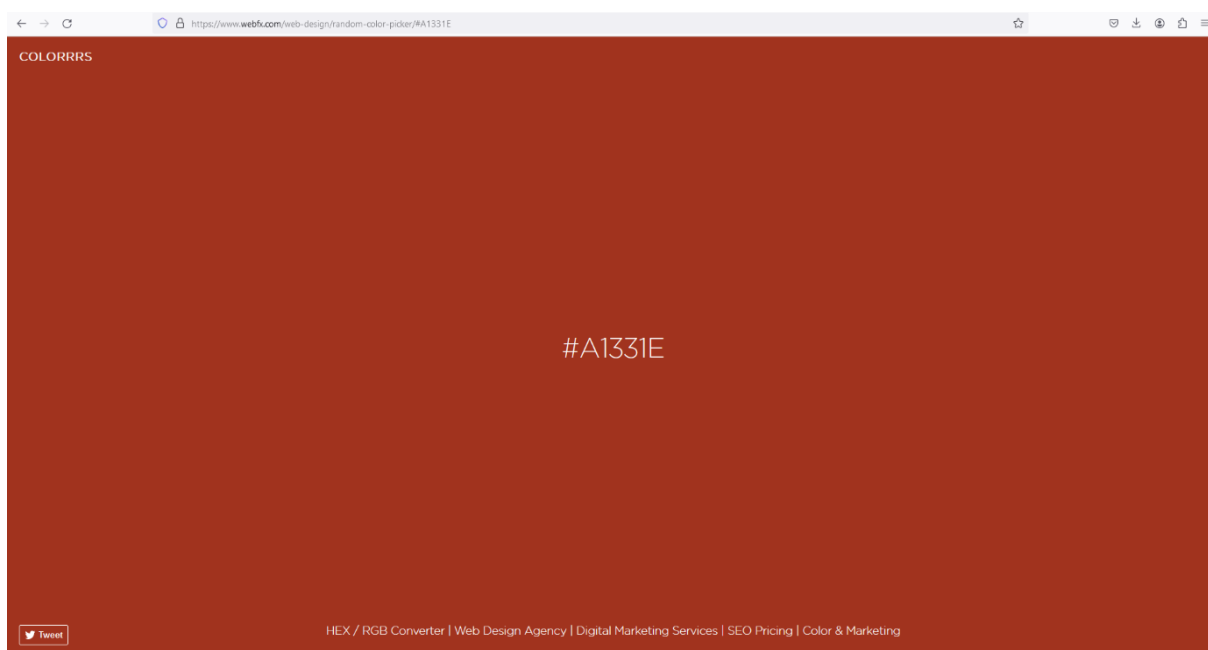
U svrhu očitavanja i analize moždanih aktivnosti te rada samog uređaja provedeno je nekoliko pokusa. Izvođenje najjednostavnijih radnji dovodi do moždane aktivnosti koja se može uređajem olakšano očitati i interpretirati. Štoviše, s ograničenjima za rad dostupne opreme za osobnu upotrebu upravo takve radnje su idealne za analizu podataka jer kompliciranije radnje dovode do velikih šumova i smetnji te su EEG signali lošije kvalitete.

Cilj pokusa je dobiti podatke uz pomoć mozgom upravljane tehnologije izvođenjem niza jednostavnih radnji poput: promatranja i prepoznavanja boja, stavljanja i zakretanja objekta u prostoru na zadan način, montaže i demontaže jednostavnih sklopova. Nakon obavljenih pokusa, analizirat će se dobiveni podaci, s očekivanjem da pruže dublji uvid u njihovu relevantnost za osmišljavanje mogućih primjena u industriji. Istraživanjem mogućnosti za te implementacije, otkrit će se kako se ti podaci mogu praktično primijeniti. Kroz ovu analizu također će biti ispitano i ocijenjeno u kojoj je mjeri korišteni uređaj efikasan i doprinosi ciljevima istraživanja.

### 5.1. POKUS 1.: PREPOZNAVANJE BOJA

U ovom pokusu ispitivat će se dijelovi mozga povezani s vizualnom percepcijom te koje se promjene događaju prilikom raspoznavanja. To će se ispitati pomoću testa jednostavnog prepoznavanja boja. Koristit će se internetska stranica koja prikazuje boje: klikom miša ili tipke boje se nasumično mijenjaju. Prikazivat će se dvadeset boja, svaka s intervalom od pet sekundi, te će se specifično tražiti crvena boja. Prilikom prikaza neke nijanse crvene boje dat će se

potvrđujuća povratna informacija laganim kimanjem glave. Pokus je izveden više puta u svrhu točnosti i dobivanja što boljih rezultata. Stranica koja će se koristiti je prikazana na slici 18.



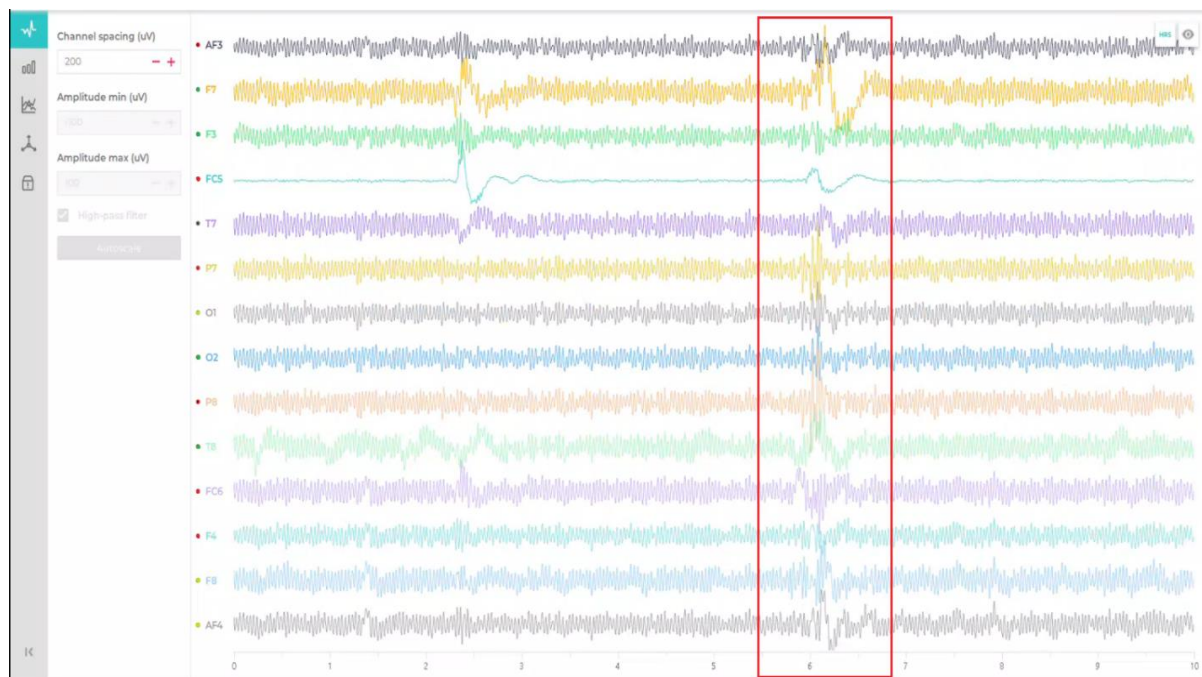
**Slika 18. Alat za nasumični izbor boja [62]**

Pokus se izvodi u svrhu razumijevanja što se točno događa u mozgu prilikom ljudskog vizualnog prepoznavanja stvari. Što se detaljnije i točnije to može razumjeti, to će se bolje iste stvari moći implementirati u industriji, na primjer na industrijske robote tijekom prepoznavanja objekta na pokretnoj traci i slično.

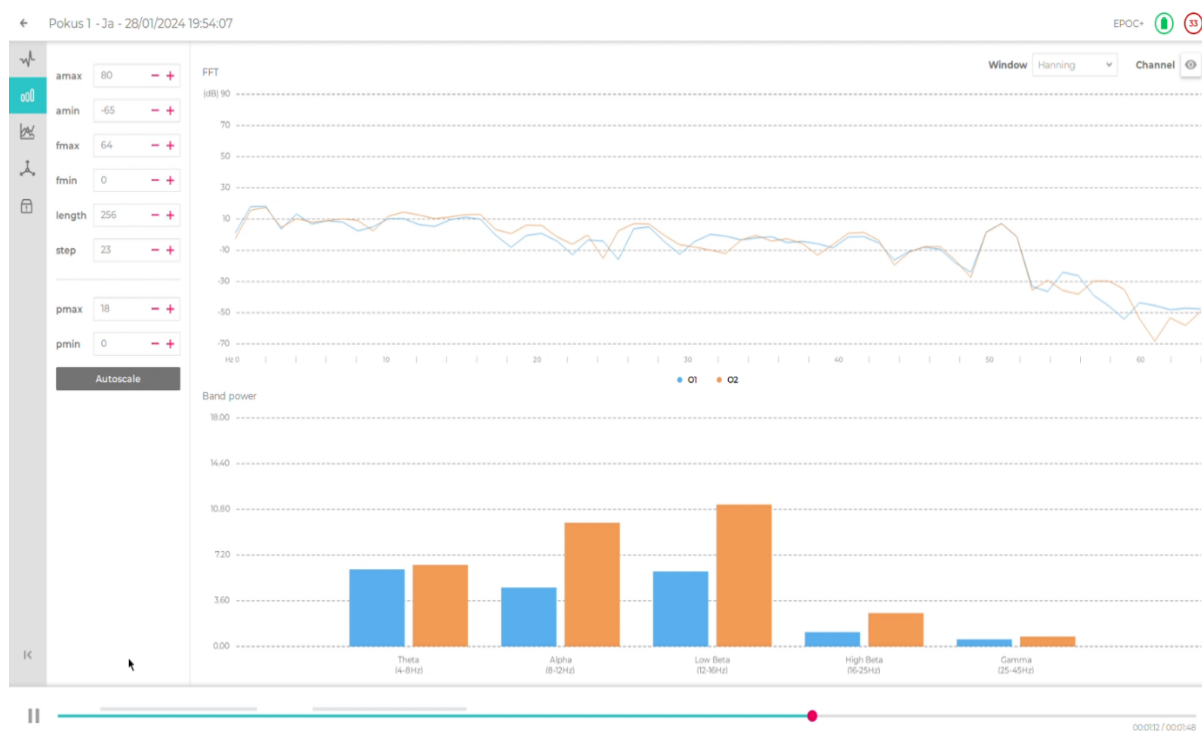
Pokus je proveden i dobiveni rezultati prikazani su slikama 19. i 20.

U trenutku označenom na slici 19. pomoću crvenog pravokutnika može se vidjeti drastična promjena na elektrodi F7 koja je zadužena za racionalnu aktivnost. Ta promjena ima smisla jer je u tom trenutku bila prikazana nijansa crvene (poput slike 18.) te mozak reagira na validnu informaciju i vraćena je povratna informacija laganim kimanjem glave. Kimanje je rezultiralo i promjenom na AF4 elektrodi koja je zadužena za motoriku. Uz veću promjenu na F7, također se može vidjeti veća promjena na elektrodi T8. Ta elektroda povezana je s memorijom te ukazuje da u trenutku javljanja crvene boje subjekt prepoznaje boju i prisjeća se da je ta boja točna u sklopu ovog pokusa. Nešto manje, ali vidljive promjene javljaju se i na O1 i O2 elektrodama koje su povezane s vizualnom percepcijom.

Promjene na P7 i P8 vjerojatno su uzrokovane lošim očitanjem budući da se s lijeve strane može vidjeti kako su u tom trenutku signali na navedene dvije elektrode bili loši. Ostale promjene zanemarivo su male.



Slika 19. EEG podaci prvog pokusa



Slika 20. Analiza pojedinih elektroda i frekvencija prvog pokusa

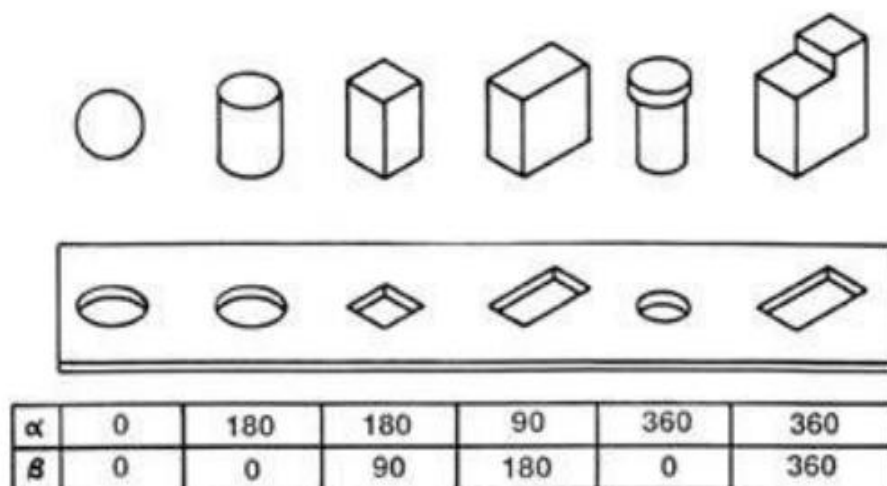
U drugom prozoru (slika 20.) može se vidjeti da u istom trenutku prepoznavanja boje dolazi do pojačanja frekvencija alfa i beta valova na elektrodama O1 i O2. Alfa valovi su dominantni pri aktivnostima u okcipitalnom režnju, a na tom režnju se nalaze same elektrode O1 i O2. Ovo ukazuje na jači vizualni podražaj. Beta valovi prisutni su tijekom koncentracije i

razmišljanja pa njihovo povećanje može upućivati na realizacije nečega (prepoznavanje točne boje). Također, na grafu iznad, može se vidjeti kako su frekvencije većinom bile najsnažnije u rasponu od 0 do 20 Hz.

## 5.2. POKUS 2.: ORIJENTIRANJE PREDMETA

U ovom pokusu ispitivat će se motorika i percepcija vezani uz orijentiranje predmeta u prostoru. Simetričnost predmeta određuje se faktorima simetričnosti  $\alpha$  i  $\beta$  [°]. Faktor  $\alpha$  predstavlja kut za koji se predmet (dio) mora okrenuti oko osi okomite na os umetanja kako bi postigao prvotnu orijentaciju. Faktor  $\beta$  označava kut za koji se dio mora okrenuti oko osi umetanja kako bi postigao prvotnu orijentaciju. [63]

Neka jednostavna tijela i njihovi pripadajući kutevi simetrije prikazani su na slici 21.



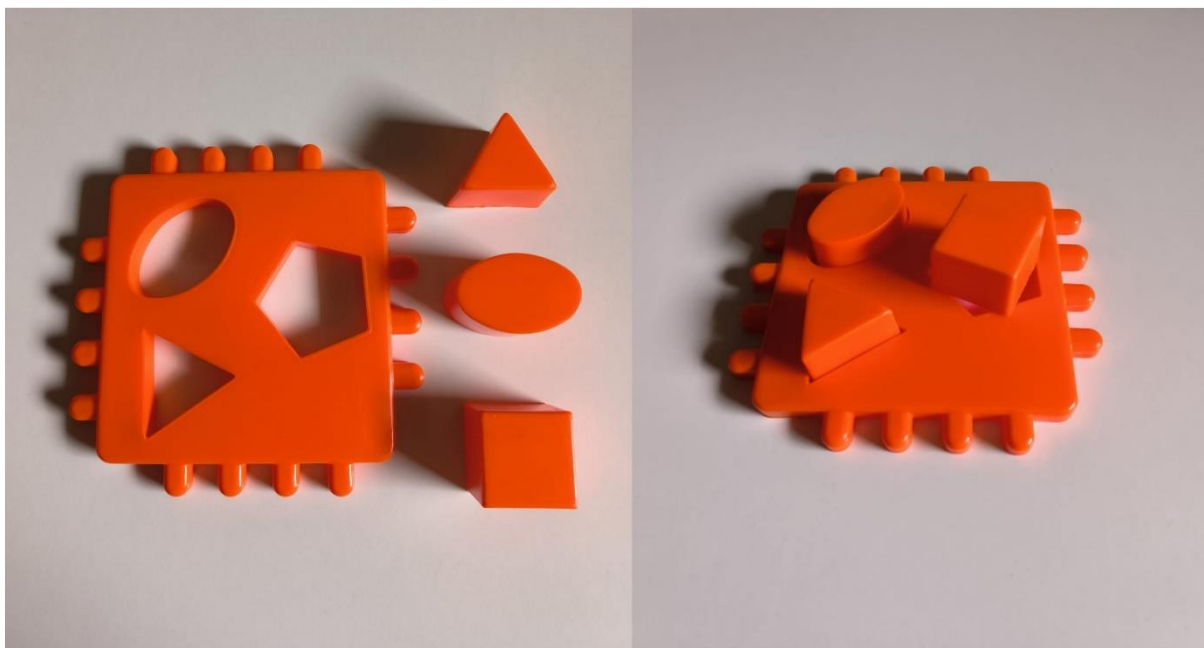
Slika 21. Rotacijske simetrije za različita tijela [63]

Za provedbu pokusa koristit će se dječja igračka u obliku kocke s rupama i odgovarajućim oblicima za ispunjenje tih rupa. U ovom pokusu koristit će se jedna strana igračke sa svojim rupama i pripadnim dijelovima za ispunu (Slika 22.). Dijelovi odgovarajućeg oblika umetnut će se u njima predviđena mjesta na stranici kocke. Jedan dio je takav da se ne može umetnuti niti u jednu rupu.

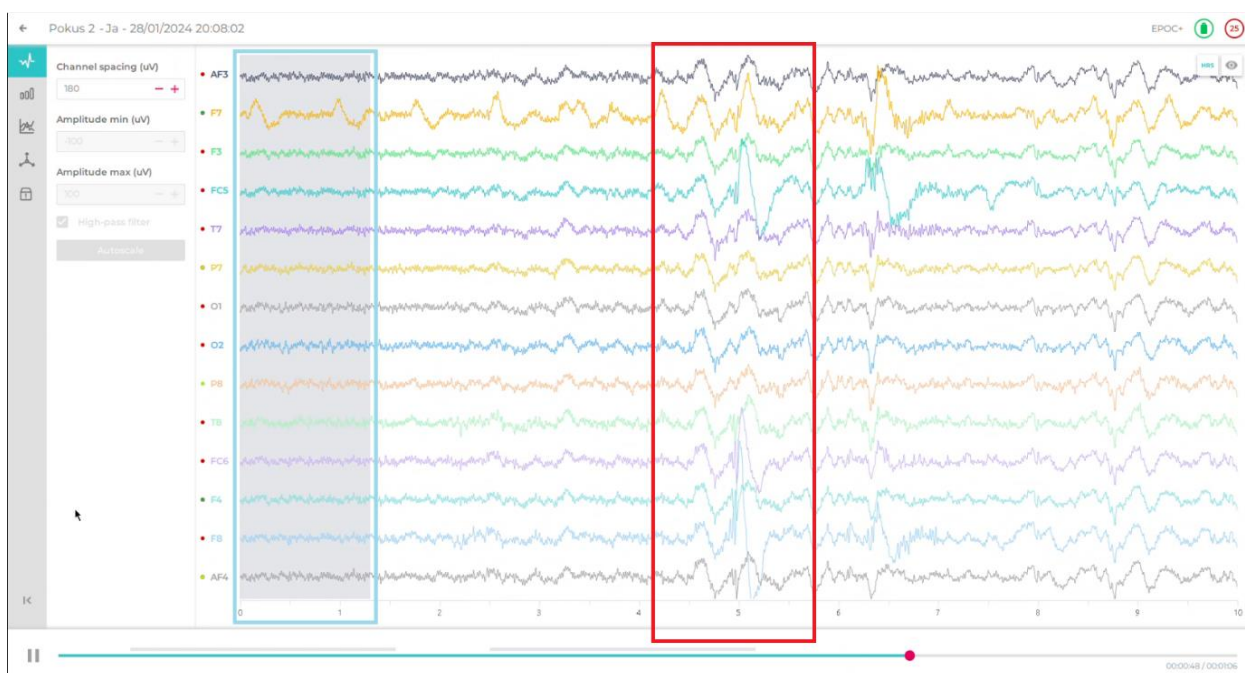
Cilj pokusa je praćenje moždane aktivnosti tijekom prostornog planiranja i prostorne recepcije objekta i njegove točne orijentacije te stresa koji nastaje u mozgu tijekom neuspjeha



(dio koji geometrijski ne odgovara i ne može se umetnuti u rupu). Rezultati su prikazani na slici 23.



**Slika 22. Drugi pokus: lijevo – početna situacija, desno – uspješno obavljene radnje umetanja**



**Slika 23. EEG podaci drugog pokusa**

Na slici 23., plavi pravokutnik prikazuje umjeravanje, naime u tom periodu softver traži mirovanje, sa zatvorenim očima, od 10 sekundi te potom ponovno mirovanje, ali s otvorenim očima. Na taj način se softver kalibrira. Crveni pravokutnik prikazuje trenutak u kojem se prstima vrtio trokutasti dio kako bi se postigla njegova točna orijentacija te kako bi se umetnuo

u pripadajuću rupu. Kao i u prošlom (prvom) pokusu, na elektrodi F7 vidi se značajnija promjena, što upućuje na fokusiranost i razmišljanje.

Uz F7, veće promjene mogu se zamijetiti na elektrodama FC5, FC6 i F8. Elektrode FC5 i FC6 postavljene su u blizini motivacijskog centra, što znači da se u trenutku okretanja trokutastog dijela povećava motivacija za stavljanjem dijela u pripadajuću rupu. Elektroda F8 prikazuje emocionalne impulse, njena promjena upućivala bi na stvaranje niske količine stresa prilikom pokušaja ubacivanja trokuta.

Nešto slabije promjene mogu se vidjeti na elektrodama F4 i AF4. Elektroda F4 mjeri planiranje i kontrolu pokreta: pošto su dijelovi manjih dimenzija, potrebna je veća točnost pa time i veća kontrola. AF4 nalazi se blizu motoričkog centra pa je do promjene na ovoj elektrodi došlo zbog obavljanja nekog rada.

Zanimljiv je nedostatak bitnije promjene na elektrodama P7 i P8. Naime, elektrode P7 i P8 zadužene su, između ostaloga, za prostornu pažnju i percepciju. Zbog jednostavnosti ove radnje, može biti da pri izvršavanju mozgu nije trebala prostorna percepcija već je racionalna aktivnost bila dovoljna. Također, može biti da na ovom području jači utjecaj na promjenu impulsa ima senzorna integracija, koja funkcionira na temelju akcije i reakcije, što ovdje nije bilo potrebno. U najgorem slučaju, razlog može biti mana u uređaju koji je u tom trenutku loše obradio signal.

Na slici 23., desno od crvenog pravokutnika može se vidjeti drastična promjena na elektrodama F7 i FC5. U ovom trenutku uzimala se kocka za stavljanje u peterokutnu rupu. Zbog nemogućnosti stavljanja kocke u peterokutnu rupu, racionalna aktivnost te emocionalni stres naglo su porasli.

### **5.3. POKUS 3.: MONTAŽA**

Ovaj pokus ispitivat će ponašanje mozga tijekom jednostavne montaže korištenjem igračke za djecu.

Montaža, ili sklapanje, jest svaka djelatnost kojoj je cilj spajanje dvaju ili više objekata u cjelinu, određene namjene. [64] U industriji, proces proizvodnje redovito završava sklapanjem. Montaža igračke je postupak sastavljanja igračke iz pojedinačnih dijelova. U ovom pokusu

koristit će se igračka čija se jedna strana koristila u prošlom pokusu. Igračka je prikazana na slici 24.



**Slika 24. Igračka [65]**

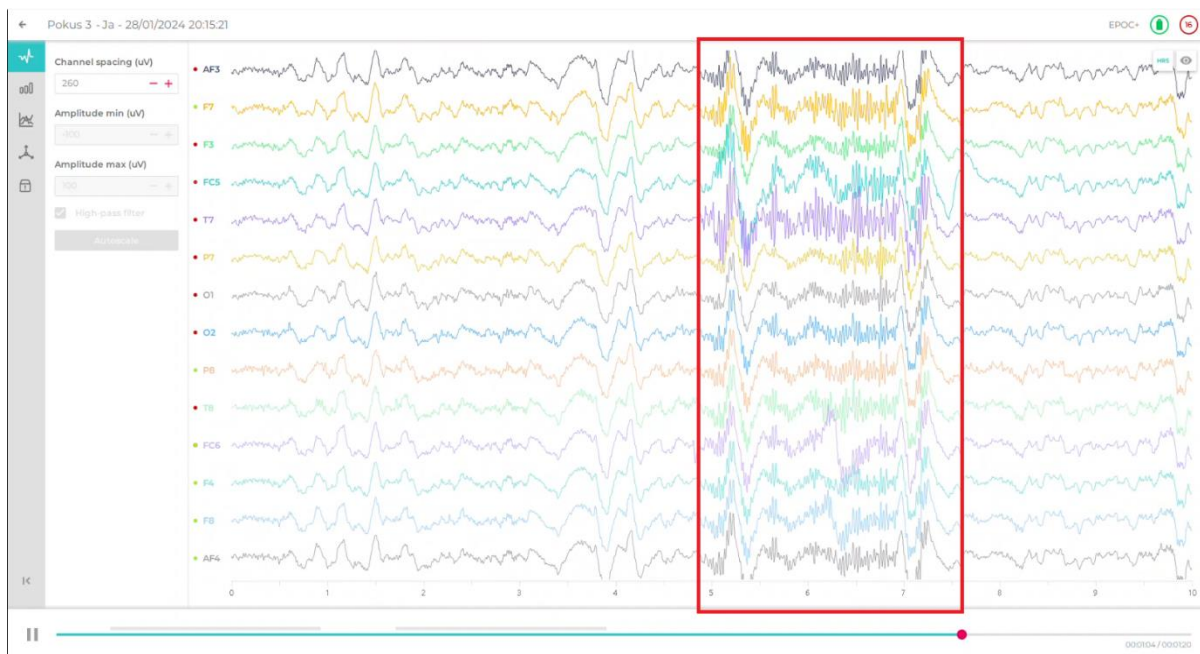
Igračka prikazana na slici 24. je u obliku kocke što znači da je sastavljena od šest stranica. Svaka stranica je različite boje, vidljive su plava, zelena, crvena, ljubičasta, žuta i narančasta. Svaka stranica na rubovima ima četiri zupca koja su postavljena tako da razmak zupca točno odgovara utoru za drugu stranicu. Sastavlja se i rastavlja koristeći pritisak i trenje kako bi se dijelovi čvrsto spojili, bez potrebe za dodatnim materijalima poput ljepila. Igračka je napravljena od polipropilenskog vlakna [65]. Njene dimenzije su 22 cm x 13,5 cm x 11,5 cm te dolazi u jednoj veličini [65]. Ova igračka napravljena je za djecu u ranoj dobi u svrhu razvijanja motorike, kontrole pokreta, planiranja i percepcije, to jest u svrhu razvijanja različitih dijelova mozga koje upravo pokriva i uređaj EPOC+. Osim nje, postoje razne igračke koje pomažu u razvoju motorike i zaključivanja kod djece.

U procesu montaže igračke u obliku kocke, prvo se odabire jedna strana i postavlja se kao osnova, u ovom pokusu to je bila plava strana. Na tu se osnovu, pažljivo poravnavajući zupce s utorima, postavila druga strana, u ovom slučaju to je bila narančasta. Nježnim pritiskom prema

dolje, uz korištenje trenja, strane se spajaju i osigurava se čvrsto sjedanje zupca u utorima. Postupak se ponavljao s preostalim stranama, uz redovito provjeravanje poravnjanja zupca i utora. Kada su sve strane bile spojene, potrebno je još bilo nježno pritisnuti strane duž svih spojeva kako bi se osiguralo čvrsto prijanjanje.

Pokus se izvodi u svrhu mjerenja moždane aktivnosti tijekom montiranja i gledaju se dijelovi mozga odgovorni za percepciju, kontrolu pokreta i motoričko planiranje aktivnosti. Ovakve analize mogu pružiti dublji uvid u samu motoriku čovjeka što može daljnje unaprijediti i „motoriku“ strojeva. Rezultati pokusa prikazani su na slikama 25. i 26.

Na slici 25., u periodu prikazanom pomoću crvenog pravokutnika utiskivala se peta strana, plava, u kocku. Zbog prijanjanja plave strane na tri strane odjednom trebala se iskoristiti malo jača sila te su ti nagli i intenzivniji pokreti uzrokovali veće promjene svih elektroda, dijelom zbog korištenja više različitih dijelova mozga istovremeno i dijelom zbog pojave većih šumova u signalu. Najveće promjene mogu se vidjeti na elektrodama F7, FC5, FC6, F8 i T7. Promjena na elektrodi F7 ukazuje na koncentraciju tijekom utiskivanja pete strane. Elektrode FC5 i FC6 svojim velikim skokom pokazuju visoke razine motiviranosti što je logično jer se u obavljanju radnji koncentracija i motiviranost često povezuju.



**Slika 25. EEG podaci trećeg pokusa**

Elektroda F8 ukazuje na lagano povećanje razina stresa to jest povećanje adrenalina tijekom upiranja kocke i time povećanje iregulativnosti emocija.

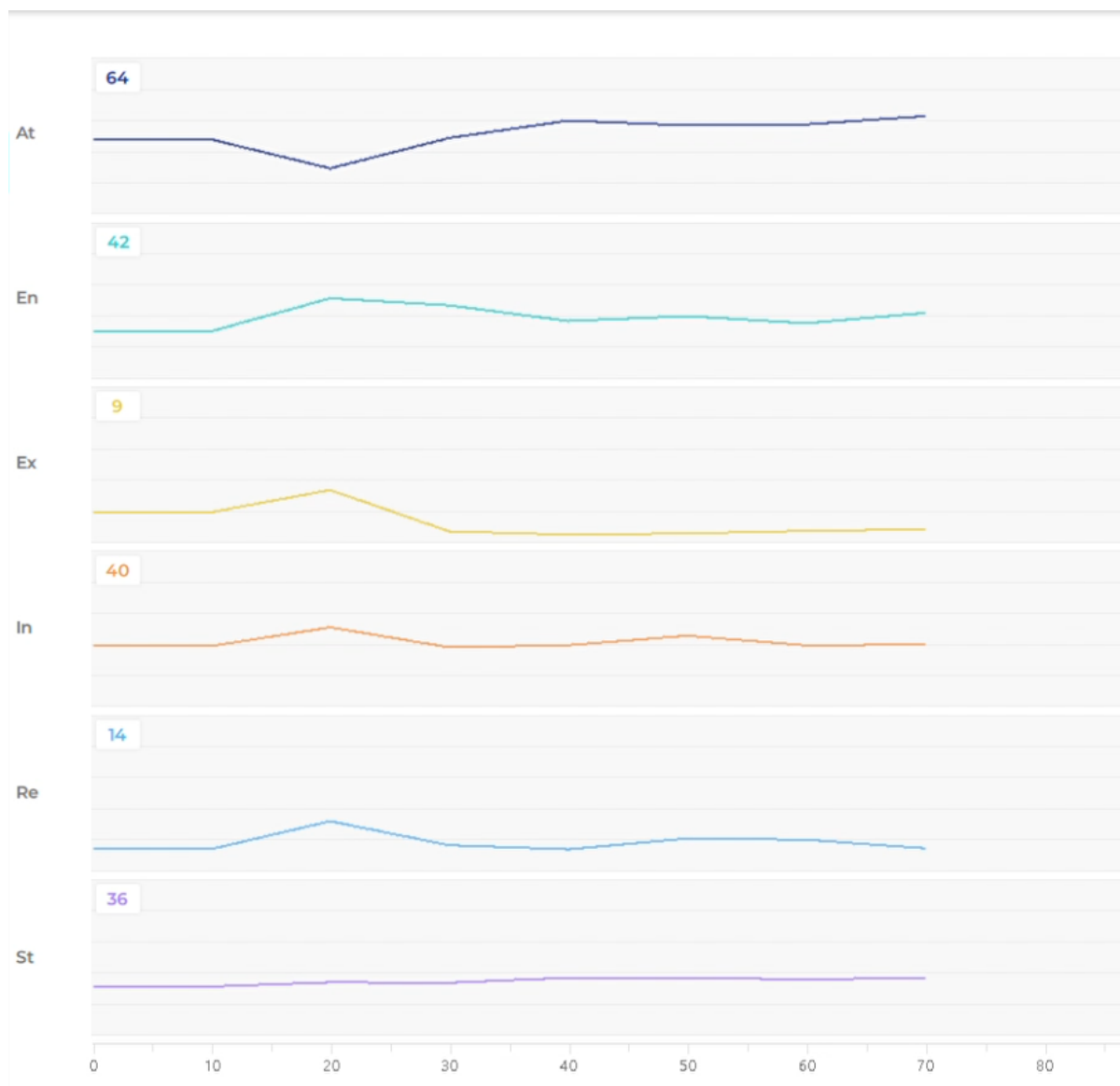
T7 elektroda odgovorna je za slušnu obradu, ova promjena može upućivati na reakciju mozga prilikom glasnijeg zvuka utiska strane kocke u ostale strane. Također, može biti samo smetnja u signalu budući da je u tom trenutku signal na navedenoj elektrodi bio slabiji.

Nešto slabija promjena može se vidjeti na elektrodi F4 što upućuje na kontrolu pokreta, no promjena je slabija nego u pokusu orijentacije što bi upućivalo na to da je manja točnost potrebna prilikom ove jednostavne montaže u odnosu na zakretanje dijela za točan kut.

Uz F4, nešto slabije promjene vidljive su i na elektrodama AF3 te AF4 koje se nalaze kod motoričkog centra što upućuje na nekakav rad koristeći šaku i prste. Nedostatak većih promjena na elektrodama AF3 i AF4 može upućivati na nepotrebnost velike točnosti tijekom obavljanja radnje, budući da su zupci prilično veliki i laki za međusobno spajanje, što korelira s manjom promjenom na elektrodi F4.

Na ostalim elektrodama nema značajnijih promjena.

Na slici 26., mogu se vidjeti zabilježene metrike učinka prilikom montaže kocke, koje nudi softver Emotiv. Može se uočiti povećane razine pažnje (At) te angažmana (En). Ovo je podupreno povećanim impulsima na elektrodama F7 te FC5 i FC6. Razina pažnje posebno je velika ovdje jer je koncentracija pridana jednom zadatku to jest slaganju kocke, a općenito razina pažnje je najveća prilikom fokusa na specifične aktivnosti bez vanjskih smetnji. Što više informacija mozak prima, pažnja sve više pada. Razina uzbuđenosti (Ex) je većinom niska jer se povećava fiziološkim pojavama i povećava se radom simpatičkog sustava. Budući da se ovdje montira kocka nema velikih podražaja poput znojenja, širenja zjenica i sličnost pa uzbuđenost ostaje niska. Razine stresa (St), opuštenosti (Re) i zainteresiranosti (In) uglavnom su konstantne i nepromijenjene.



Slika 26. Prikaz metrike učinka trećeg pokusa

## 5.4. POKUS 4.: DEMONTAŽA

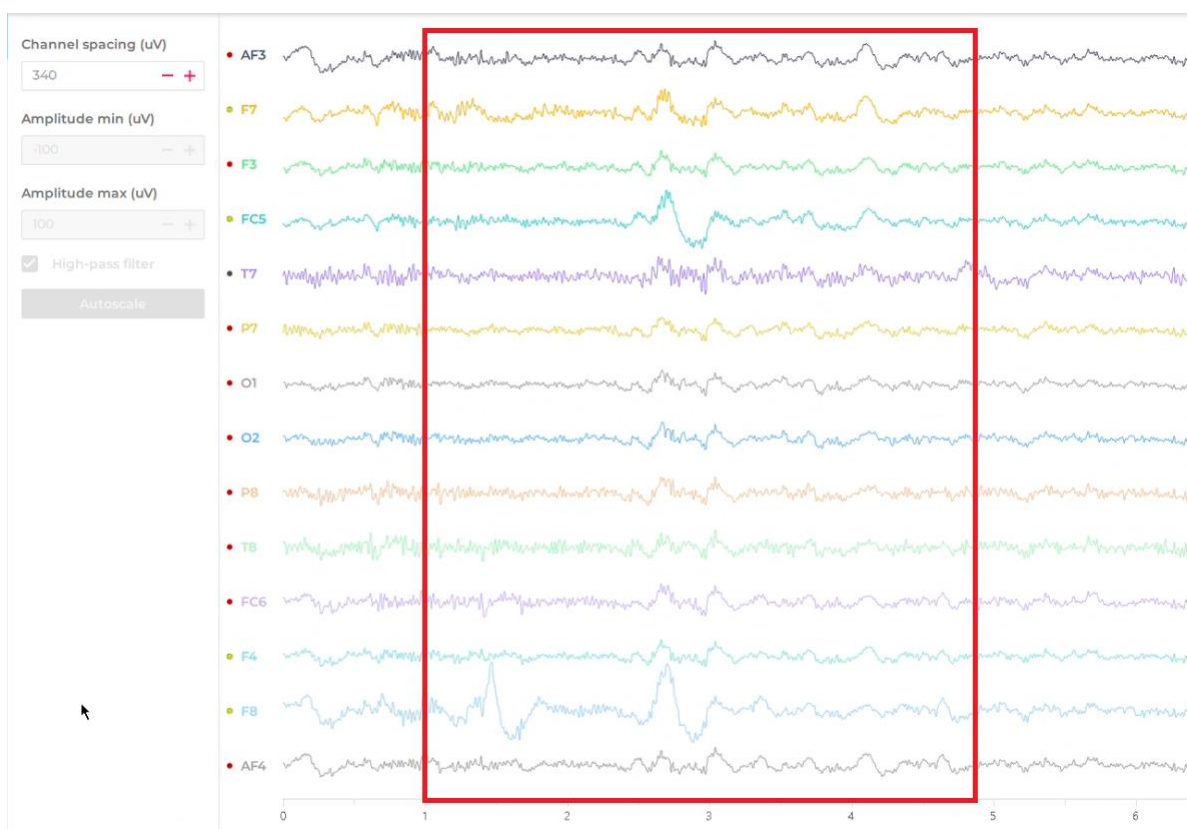
Općenito, demontaža je postupak rastavljanja nekog objekta – sklopa, koji je sastavljen. Ova radnja se provodi kako bi se omogućio popravak, održavanje, recikliranje, ponovno korištenje dijelova ili istraživanje unutarnje strukture objekta [66]. Obrnuti inženjering (eng. *reverse engineering*) je vrlo bitan proces, a njegov ključan dio je demontaža [67]. Ovaj proces može biti jednostavan, kao što je rastavljanje igračke, ili složen, u slučaju kompliciranih industrijskih sustava. Za ovaj pokus koristit će se ista igračka vidljiva na slici 24.



U procesu demontaže, potrebno je odabrati jednu stranu od koje će se kretati, u ovom pokusu to je bila crvena, nju je potrebno pažljivo povući po spojevima kako bi se oslobodili zupci iz utora. Ova strana je sada prva demontirana komponenta. Uzima se sljedeća strana, ljubičasta, i odvajaju se zupci od utora na preostalim stranama. Postupak se ponavlja za svaku stranu. Važno je paziti kako se zupci odvajaju da ne bi došlo do oštećenja igračke.

Pokus se kao i prošli izvodi u svrhu dobivanja informacija o ponašanju mozga tijekom demontaže to jest tijekom percepcije, kontrole pokreta i motoričkih aktivnosti. Ponovno, ovakve analize mogu pomoći u boljem razumijevanju motorike čovjeka te boljoj implementaciji motorike u strojeve. Rezultati pokusa prikazani su na slikama 27. i 28.

Demontaža kocke je jednostavnija i mnogo brža nego montaža, pa je sam pokus trajao znatno kraće. Zbog brzine i naglih pokreta signali su malo lošiji nego u ostalim pokusima. Na početku crvenog pravokutnika (Slika 27.) može se vidjeti skok elektrode F8: ovaj skok ukazuje na povećanje adrenalina tijekom hvatanja kocke u ruke, znači mozak se već priprema na rad.



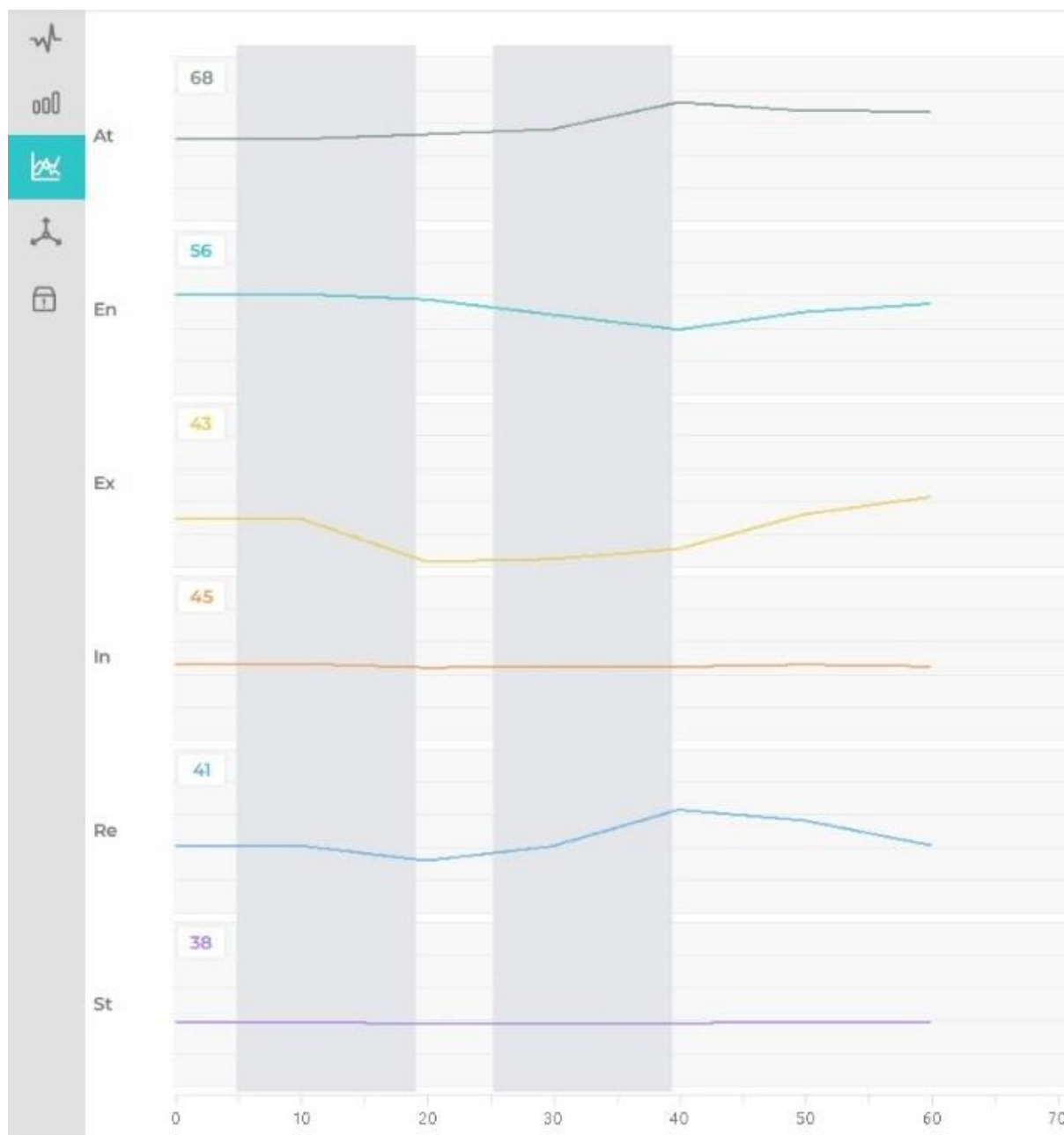
**Slika 27. EEG podaci četvrtog pokusa**

Zatim, značajnije promjene mogu se vidjeti kod elektroda F7 i FC5: elektroda F7 zbog razmišljanja o načinu i redosljedu demontaže te elektroda FC5 zbog istovremenog porasta

motivacije. Nešto manje značajne promjene mogu se vidjeti na elektrodama FC6 i AF3 zbog korištenja ruku prilikom rastavljanja kocke.

Prilikom gledanja metrike učinka tijekom demontaže kocke (Slika 28.), može se primijetiti mnogo sličnosti s metrikom učinka tijekom montaže. To bi upućivalo na valjajuće rezultate jer ovakva jednostavna montaža i demontaža su sličan proces i sami EEG signali pokazali su slične rezultate. Ponovno, mogu se primijetiti povećane razine pažnje (At) i angažmana (En). Isto tako, pažnja je ponovno najveća zbog visoke razine koncentracije bez primanja prevelike količine informacija. Stres (St) i zainteresiranost (In) ponovno su uglavnom konstantni, bez većih promjena. Razlike se mogu vidjeti u opuštenosti koja u oba slučaja pada, ali u ovom slučaju razina opuštenosti je znatnija. Veća razina opuštenosti ukazivala bi na jednostavniju radnju jer opuštenost kao metrika učinka prikazuje mirni fokus. Ovo je valjano jer je, u ovom slučaju, rastavljanje kocke mnogo jednostavnije od njenog sastavljanja. Također, veća razlika može se vidjeti u razini uzbuđenosti (Ex). Razina uzbuđenosti ovdje raste te je veća, što bi ukazivalo na povećan rad simpatičkog sustava. Ovo ima smisla budući da je rastavljanje jednostavnije i moguće je izvršiti u zadatak u vrlo kratkom vremenu uz malo više truda koji zahtijeva samo snagu, bez velike točnosti. Ova činjenica povećava adrenalin što uzajamno povećava i uzbuđenost.



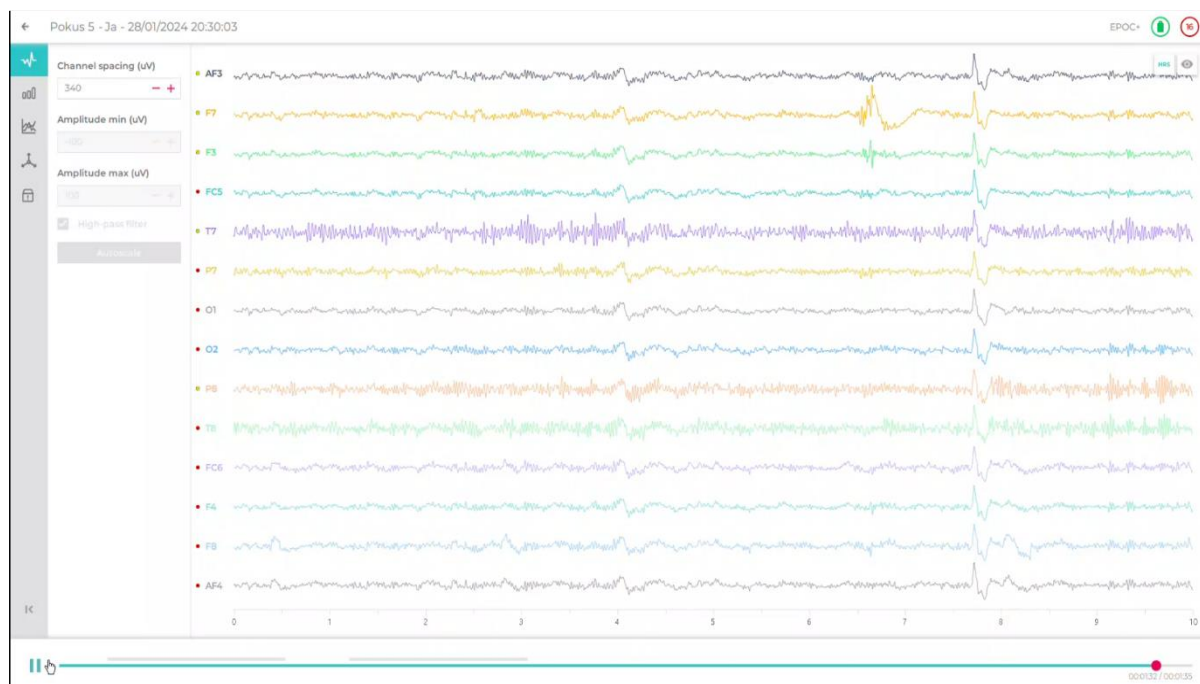


Slika 28. Prikaz metrike učinka četvrtog pokusa

## 5.5. POKUS 5.: OPUŠTEN RAZGOVOR

Posljednji, peti pokus proveden uređajem Emotiv EPOC+ je imao cilj istražiti njegovu sposobnost praćenja moždanih aktivnosti tijekom opuštenog razgovora s prijateljem. Informacije koje su se razmjenjivale bile su nasumične i neplanirane, na primjer standardna

pitanja poput: „Kako si?“, dojmovi o danu, novosti o nekoj relevantnoj temi i tako dalje. Pokus se provodio kako bi se vidjelo koliko je napredna komercijalna mozgom upravljana tehnologija prilikom složenijih moždanih aktivnosti poput vođenja razgovora. Na slici 29. prikazani su zabilježeni rezultati.



**Slika 29. EEG podaci petog pokusa**

Tijekom vođenja razgovora mogle su se vidjeti različite promjene. Jedna od vodećih elektroda bila je T7 koja prikazuje slušnu obradu. Uz nju bilo je promjena i na elektrodi T8 koja uz slušnu obradu prikazuje i prepoznavanje lica te memoriju, što može biti povezano s razgovorom o temama koje se vežu međusobno (na primjer sugovornik priča kako je kasnio na posao što mu se dogodilo više puta pa se subjekt toga prisjeća). Prilikom iznošenja nekih novosti u razgovoru, mogli su se vidjeti i skokovi na elektrodi F7, koji označavaju aktivno razmišljanje. Elektroda P8 također je imala značajnije promjene, a za nju je karakteristično mjerenje pažnje prema vanjskim podražajima, što znači da se pažljivo sluša sugovornika. Zbog gesta, držanja, gledanja, slušanja i slično prilikom interakcije s ljudima EEG signali sadrže puno smetnja i time je sam signal većinom loš.

Ispostavlja se da je korištenjem ovog uređaja otežano očitati podatke s uređaja tijekom vođenja razgovora s drugom osobom zato što mozak prima veliku količinu informacija i podražaja koji uzrokuju smetnje. Koliko god razgovor bio jednostavan, samim time što se osoba nalazi u nekoj prostoriji i koristi svoja osjetila te mijenja raspoloženja prilikom razgovora,

zapravo rezultira velikom aktivnošću mozga te je teško popratiti sve promjene na elektrodama. Zaključno, ovaj pokus je najteže interpretirati i usporediti baš zbog njegove komplicirane prirode, jedinstvenosti subjekata i komunikacije.

## 5.6. ZAKLJUČAK NAKON IZVEDENIH POKUSA

Zaključak pokusa je, između ostalog, da čovjek to jest korisnik uređaja u ovom pokusu ponajviše i konstantno koristi frontalni moždani režanj, gdje se najviše impulsa vidi u prostoru za racionalnu aktivnost i aktivno razmišljanje. Dakle, čak su i pri jednostavnim radnjama, razmišljanje i racionalizacija najprisutniji. Ovo se može vidjeti kod prvog pokusa, gdje iako se primarno koristio vid za raspoznavanje boja, najveću ulogu imale su racionalizacija te memorija za izvršavanje zadatka.

U drugom pokusu, pokusu orijentiranja predmeta, iako se obavljao rad, najveću količinu impulsa nisu imale elektrode za motoriku i kretanju, već ponovno racionalizacija te ovaj put i motivacija. Općenito, iz izvedenih pokusa zaključilo bi se kako porastom zahtjevnosti zadatka, raste i motivacija. Također, **motivacija raste s količinom fizičkog rada kojeg zadatak sadrži. Iz ovog dalo bi se zaključiti da je motivacija veća kada korisnik ulaže mehaničku energiju u izvršavanje nekog zadatka, nego kada korisnik razmišlja o zadatku i miruje, bez fizičkih pokreta.**

Prilikom drugog pokusa javili su se i emocionalni impulsi tijekom umetanja dijela u rupu koja nije istog oblika. Zaključak iz ovoga bio bi kako se pri izvedbi neostvarivih radnji povećava razina stresa. Pokusi montaže i demontaže ukazuju na slične stvari. Ponovno, porastom složenosti aktivnosti povećava se koncentracija, motiviranost, a time i nešto manje povećanje stresa. Tijekom rada vidi se povećanje pažnje i uzbuđenosti te više razine angažmana i niže razine opuštenosti. Iz ovoga se može zaključiti kako je **pažnja korisnika veća** što je problem specifičniji to jest što je manje vanjskih smetnji i **što se više koriste ruke**, korisnikova pažnja te angažman su veći.

Zaključak je za posljednji, peti pokus, da je komunikacija između ljudi vrlo kompleksan proces i kako se tijekom razgovora u ljudskom mozgu događa više različitih procesa istovremeno. Unaprjeđenjem tehnologije i daljnjim fokusom na interakciju ljudi mogli bi se

izvući zanimljivi te korisni podaci koji bi mogli biti važan korak u daljnjem razvoju tehnologije, pogotovo područja umjetne inteligencije.

Za kraj, provođenje ovakvih pokusa kod kuće omogućuje proučavanje promjena na elektrodama te ponovne izvedbe u svrhu dobivanja što boljih rezultata. Isto tako, potiče znatiželju i kreira nove ideje za nove pokuse. Uz to, pruža bolji uvid u funkcioniranje samog uređaja Emotiv EPOC+.

Tijekom provođenjem pokusa došlo je do tehničkih poteškoća, poput gubitka signala i utjecaja raznih šumova koji su potom ometali praćenje. Iako su elektrode bile dobro natopljene, veza bi odjednom nestala što ukazuje na osjetljivost i ograničenu kvalitetu uređaja. Uređaj je srednje kvalitete te svakako postoji prostor za njegov napredak. Plastika na uređaju je lošije kvalitete te je uređaj krhak i lomljiv. Električni kontakti su loše zalijepljeni te padaju s uređaja, također same elektrode pucaju te se ne mogu više dobro spojiti na uređaj. Prilikom pokretanja uređaja i dovođenja kontaktne kvalitete do najbolje moguće, svedeno se javljaju problemi kod EEG signala zbog velike količine smetnji koje utječu na signale i zbog nedovoljno razvijene komercijalne opreme. Svi nedostaci i prepreke trebaju postati prilika i poticaj za daljnje poboljšanje proizvodnje i istraživanje.

## 6. ZAKLJUČAK

Mozgom upravljana tehnologija koristi mozak za kontrolu i upravljanje različitim uređajima. Osim što poboljšava produktivnost i uvjete rada u industriji, takva tehnologija olakšava život osobama s invalidnošću. Postoje razni uređaji koji mjere električnu aktivnost mozga te se pomoću njih stvara dublji uvid u način rada mozga.

Mozak je najkompleksniji ljudski organ. Sastoji se od moždanog debla, malog mozga i velikog mozga koji je raspodijeljen na režnjeve. Svaki režanj ima u sebi određene centre pomoću kojih ljudi obavljaju svakodnevne zadatke. Cijeli živčani sustav čovjeka je zadužen za slanje signala, to jest informacija kroz tijelo. Upravo zbog kompleksnosti mozga te želje za boljim razumijevanjem, pojavilo se krajem 20. stoljeća sučelje mozak-računalo.

Sučelje mozak-računalo je hardverski i softverski komunikacijski sustav koji omogućuje da se računalima ili vanjskim uređajima upravlja samom moždanom aktivnošću. Radi tako što prati pet uzastopnih faza: prikupljanje signala, predobrada ili pojačavanje signala, izdvajanje značajki, klasifikacija i kontrolno sučelje. Sustav klasificira valove prema frekvencijama i obliku te postoji šest standardiziranih vrsta signala: theta valovi, delta valovi, alfa valovi, mu valovi, beta valovi i gama valovi. Ovakvi sustavi konstantno se razvijaju s primarnom motivacijom da pomognu osobama s poteškoćama, ali sve većim razvojem otvara se i nova motivacija za unaprjeđenje industrije i tehnologije. Najveći problem ove tehnologije je nedovoljna razvijenost i nedostupnost. Ti problemi vidljivi su u njegovoj složenosti rada i u brojnosti uvjeta koji moraju biti zadovoljeni a za dobivanje kvalitetnih rezultata. Najbolji uređaji vrlo su skupi i koriste se u medicinske svrhe. Uređaji dostupni za korisnike često nisu kvalitetni te ih razni šumovi ometaju u prikupljanju i davanju povratnih informacija iz mozga. Stoga takvi uređaji nisu vjerodostojni za medicinsku upotrebu i dijagnosticiranje.

Potrebno je provoditi jednostavne pokuse, sa što jednostavnijim zadacima kako bi se izbjegle velike smetnje i šumovi na elektrodama. Također, prilikom korištenja uređaja Emotiv EPOC+ potrebno je u potpunosti spojiti i osposobiti uređaj kako bi sve elektrode hvatale signale. Provođenje pokusa svejedno dovodi do jakih promjena na elektrodama zbog toga što se mnogo stvari odvija u mozgu tijekom najobičnijih aktivnosti.

U radu je provedeno pet pokusa: raspoznavanja boja, orijentiranja predmeta u prostoru, montaže i demontaže te razgovor. Iz pokusa se moglo vidjeti kako čak i pri jednostavnim radnjama mozak najviše koristi područja za racionalizaciju, aktivno razmišljanje i memoriju. Također, može se vidjeti da tijekom otežane racionalizacije to jest nastanka problema raste i stres. Iz pokusa orijentacije te montaže i demontaže može se još zaključiti kako **porastom zahtjevnosti zadatka raste i motivacija**. Konačno, može se još zaključiti kako je pažnja veća što je zadatak koji čovjek obavlja veće točnosti te uz manje smetnji. Daljnjim pokusima, mogle bi se razviti strategije za poboljšanje uvjeta radnika u industriji te bi se time povećala i produktivnost. Tijekom provođenja pokusa bilo je i poteškoća zbog nerazvijenosti u radu korištenog komercijalnog uređaja i velike količine šumova, no svi nedostaci i prepreke su prilika za poboljšanje i unaprjeđenje uređaja i tehnologije.

Zaključno, proveli su se pokusi mozgom upravljanom tehnologijom te su se dobili podaci o promjenama tijekom izvršavanja i rješavanja jednostavnih radnji. Čak i najskuplja oprema najbolje mjeri moždane aktivnosti prilikom potpunog mirovanja zatvorenih očiju, te bilo kakvi pokreti garantirano uzrokuju smetnje. Koristili su se besplatni Emotivovi programi za očitavanje podataka. Industrija medicine koristi visokokvalitetne uređaje za dijagnosticiranje bolesti i razvoj protetičkih pomagala, a njihov razvoj u budućnosti garantira poboljšanje, veću uporabu i korist. Razvoj ovakvih uređaja dovest će i do razvoja komercijalnih uređaja koji će s vremenom postajati sve korisniji i precizniji, razvijat će se i softveri za bolje očitavanje podataka, no njihova cijena će određivati koliko će korisnici moći kupovati ovakve uređaje za osobnu upotrebu.

## 7. LITERATURA

- [1] Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., Heetderks, W. J., McFarland, D. J., Peckham, P. H., Schalk, G., Vaughan, T. M. Brain-computer interface technology: a review of the first international meeting. *IEEE transactions on rehabilitation engineering*, 2000, 8(2), 164-173.
- [2] Šimić N, Valerjev P, Nikolić Ivanišević M. Mozak i um: Od električnih potencijala do svjesnog bića. Sveučilište u Zadru; 2020.
- [3] Allison, B. Z., Wolpaw, E. W., Wolpaw, J. R. Brain-computer interface systems: progress and prospects. *Expert review of medical devices*, 2007, 4(4), 463-474.
- [4] Ienca, M., Haselager, P. Hacking the brain: brain-computer interfacing technology and the ethics of neurosecurity. *Ethics and Information Technology*, 2016, 18, 117-129.
- [5] Moore, M. M. Real-world applications for brain-computer interface technology. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2003, 11(2), 162-165.
- [6] Brody, N. A plea for the teaching of intelligence: Personal reflections. *Intelligence*, 2014, 42, 136-141.
- [7] Paxinos, G., Huang, X. F. *Atlas of the human brainstem*. Elsevier. Academic Press, Sydney; 2013.
- [8] Cruccu, G., Iannetti, G. D., Marx, J. J., Thoenke, F., Truini, A., Fitzek, S., Hopf, H. C. Brainstem reflex circuits revisited. *Brain*, 2005, 128(2), 386-394.
- [9] Hofman, M. A. Evolution of the human brain: when bigger is better. *Frontiers in neuroanatomy*, 2014, 8, 15.
- [10] Lynch, G., Granger, R. *Big brain: The origins and future of human intelligence*. St. Martin's Press, 2008.

- [11] Hagmann, P., Cammoun, L., Gigandet, X., Meuli, R., Honey, C. J., Wedeen, V. J., Sporns, O. Mapping the structural core of human cerebral cortex. *PLoS biology*, 2008, 6(7), e159., 1479-1493.
- [12] <https://www.hemed.hr/Default.aspx?sid=13661>, Pristupljeno: 2024-01-05
- [13] Fonseca-Azevedo, K., Herculano-Houzel, S. Metabolic constraint imposes tradeoff between body size and number of brain neurons in human evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(45), 18571-18576.
- [14] <https://hr.izzi.digital/DOS/87562/87628.html>, Pristupljeno: 2024-01-05
- [15] Sporns, O. *Networks of the Brain*. MIT press, Massachusetts, 2016.
- [16] Bertoša, P., Cetinić, E., Harbaš, I., Jakovina, M., Valent, K. Analiza EEG signala, 2012, 1-29
- [17] Tucak, A., Kostović, I., Spoznaje o mozgu. IBL Osijek, Medicinski fakultet sveučilišta J.J. Strossmayera u Osijeku, 2003.
- [18] Neubauer, S., Hublin, J. J., Gunz, P. The evolution of modern human brain shape. *Science advances*, 2018, 4(1), eaao5961.
- [19] Naikoo, A. A., Thakur, S. S., Guroo, T. A., Lone, A. A. Development of society under the modern technology-a review. *Scholedge International Journal of Business Policy & Governance*, 2018, 5(1), 1-8.
- [20] Hoc, J. M. From human-machine interaction to human-machine cooperation. *Ergonomics*, 2000, 43(7), 833-843.
- [21] Nicolas-Alonso, L. F., Gomez-Gil, J. Brain computer interfaces, a review. *sensors*, 2012, 12(2), 1211-1279.
- [22] Khalid, M. B., Rao, N. I., Rizwan-i-Haque, I., Munir, S., Tahir, F. Towards a brain computer interface using wavelet transform with averaged and time segmented adapted wavelets. In *2009 2nd international conference on computer, control and communication* (pp. 1-4). IEEE, 2009.
- [23] Laureys, S., Boly, M., Tononi, G. Functional neuroimaging. *The Neurology of Consciousness: cognitive neuroscience and neuropathology*, (s 1). Elsevier, Oxford, 2009.
- [24] Weiskopf, N., Mathiak, K., Bock, S. W., Scharnowski, F., Veit, R., Grodd, W., Birbaumer, N. Principles of a brain-computer interface (BCI) based on real-time functional magnetic resonance imaging (fMRI). *IEEE transactions on biomedical engineering*, 2004 51(6), 966-970.





- [39] Kute, S., Sonalikularni. Data acquisition through EEG for meditative states in BCI using non-invasive EmotivEpocNeuroheadset. International Conference on Global Trends in Engineering, Technology and Management, 2016.
- [40] Dasgupta, D., Miserocchi, A., McEvoy, A. W., Duncan, J. S. Previous, current, and future stereotactic EEG techniques for localising epileptic foci. Expert Review of Medical Devices, 2022, 19(7), 571-580.
- [41] Tumari, S. M., Sudirman, R., Ahmad, A. H. Identification of working memory impairments in normal children using wavelet approach. 2012, 326-330.
- [42] <https://spectrum.ieee.org/elden-ring-hands-free-controller>, Pristupljeno: 2024-01-11
- [43] Blankertz, B., Muller, K. R., Krusienski, D. J., Schalk, G., Wolpaw, J. R., Schlogl, A., Birbaumer, N. The BCI competition III: Validating alternative approaches to actual BCI problems. IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering, 2006, 14(2), 153-159.
- [44] <https://www.emotiv.com/epoc/>, Pristupljeno: 2024-01-13
- [45] <http://www.riteh.uniri.hr/ustroj/zavodi/zae/laboratoriji/laboratorij-za-asistivnu-tehnologiju/asistivna-tehnologija/seminari/brain-computer-interfaces/emotiv-epoc/>, Pristupljeno: 2024-01-13
- [46] <https://info.tmsi.com/blog/the-10-20-system-for-eeeg>, Pristupljeno: 2024-01-13
- [47] <https://www.emotiv.com/product/emotiv-epoc-14-channel-mobile-eeeg/#tab-description>, Pristupljeno: 2024-01-13
- [48] <https://brain-trainer.com/answers/about-the-brain/10-20-sites-cortical-functions/>, Pristupljeno: 2024-01-13
- [49] <https://brain-trainer.com/answers/about-the-brain/10-20-sites-cortical-functions/>, Pristupljeno: 2024-01-13
- [50] <https://www.emotiv.com/glossary/eeg-headset/>, Pristupljeno: 2024-01-14
- [51] <https://www.emotiv.com/emotivpro/>, Pristupljeno: 2024-01-14
- [52] <https://www.emotiv.com/raw-eeeg/>, Pristupljeno: 2024-01-14
- [53] <https://www.emotiv.com/performance-metrics/>, Pristupljeno: 2024-01-14
- [54] <https://emotiv.gitbook.io/emotivbci/>, Pristupljeno: 2024-01-15
- [55] <https://www.emotiv.com/emotiv-bci/>, Pristupljeno: 2024-01-15
- [56] <https://www.emotiv.com/emotiv-brainviz/>, Pristupljeno: 2024-01-15
- [57] <https://github.com/willpan/WinlabEEG>, Pristupljeno: 2024-02-01
- [58] <https://github.com/dashersw/wits>, Pristupljeno: 2024-02-01

- [59] <https://github.com/openyou/emokit>, Pristupljeno: 2024-02-01
- [60] <https://github.com/CymatiCorp/CyKit>, Pristupljeno: 2024-02-01
- [61] <https://www.emotiv.com/setup/epoc/>, Pristupljeno: 2024-01-15
- [62] <https://www.webfx.com/web-design/random-color-picker/>, Pristupljeno 2024-01-23
- [63] Boothroyd, G. Assembly automation and product design. Wakefield, Rhode Island; 2005.
- [64] Kunica, Z. Montaža, e-kolegij Zavarivanje i montaža, ak.god. 2023./2024. FSB, Zagreb.
- [65] <https://www.sinsay.com/hr/hr/igracka-7692p-mlc>, Pristupljeno: 2024-01-30
- [66] Lazarević, M., Ostojić, G., Stankovski, S., Rakić-Skoković, M. Implementation of RFID technology in disassembly and recycling systems, 2007, (6), 151-155.
- [67] Eilam, E. Reversing: secrets of reverse engineering. John Wiley & Sons; 2011.