

*Studia z Psychologii w KUL*, tom 17  
red. O. Gorbaniuk, B. Kostrubiec-Wojtachnio,  
D. Musiał, M. Wiechetek, A. Błachnio, A. Przepiórka  
ISBN 978-83-7702-473-7 Lublin, Wyd. KUL 2011, s. 189-211

**Andrzej Cudo, Emilia Zabielska, Bibiana Bałaj<sup>1</sup>**

Instytut Psychologii

Katolicki Uniwersytet Lubelski Jana Pawła II

## WPROWADZENIE W ZAGADNIENIE INTERFEJSÓW MÓZG-KOMPUTER

### Streszczenie

Interfejsy mózg-komputer (Brain-Computer Interface – BCI) umożliwiają zamianę sygnału mózgowego na sygnał cyfrowy, który wysyłany jest do różnego rodzaju urządzeń pozwalających sterować aplikacjami komputerowymi oraz sprzętem elektronicznym (np. pilot wózka inwalidzkiego) bez udziału mięśni. Artykuł prezentuje podstawowe zagadnienia związane z problematyką zasad działania interfejsów, ustaleń terminologicznych, rodzajów aktywności neuronalnej wykorzystywanej do sterowania nimi, historię badań oraz obszary zastosowania. Działanie interfejsu mózg-komputer jest możliwe dzięki rejestracji aktywności bioelektrycznej mózgu osoby korzystającej z interfejsu i ma szczególne znaczenie dla odzyskania możliwości komunikacji ze światem przez osoby w ciężkich stadiach chorób neurodegeneracyjnych, po udarach lub wypadkach. Dodatkowo urządzenia te mogą służyć osobom zdrowym jako element ułatwiający codzienne czynności.

---

<sup>1</sup> Adres do korespondencji: Katedra Psychologii Eksperymentalnej, Instytut Psychologii, Katolicki Uniwersytet Lubelski Jana Pawła II, Al. Raclawickie 14, 20-950 Lublin; e-mail: andrew.cudo@gmail.com, zabielska.emilia@op.pl, bibiana.ba-laj@kul.pl.

**Słowa kluczowe:** interfejs mózg-komputer, wyobraźnia motoryczna, komponent P300, wolne potencjały korowe, wzrokowe potencjały stanu ustalonego, EEG, synchronizacja/desynchronizacja rytmów EEG.

## INTRODUCTION TO BRAIN-COMPUTER INTERFACES

### Abstract

Brain-computer interfaces (BCI) enable conversion of brain signals into a digital signal which is sent to a variety of devices. This allows to control computer applications and electronic equipment (eg wheelchair pilot) without the involvement of the muscles. This article presents the basics related to the issue of operating interfaces, understanding of terminology, types of neural activity used to control them, the history of research and application areas.

Brain-computer interface works by registering the cognitive activity of the brain of a person using the interface. It is particularly important for the regaining of the ability to communicate with the world by people in serious stages of neurodegenerative diseases, after stroke or accidents. Additionally, these devices can serve as a convenience in daily activities to healthy subjects.

**Key words:** brain-computer interface, motor imagery, P300, slow cortical potentials, steady state visual evoked potentials, EEG, mu ERD/ERS

## Wprowadzenie

Interfejs mózg-komputer (Brain-Computer Interface – BCI) jest rodzajem interfejsu człowiek-maszyna (Human-Machine Interface – HMI) ujmującego wszelkie interakcje zachodzące między człowiekiem a urządzeniem. Są one związane z jednej strony z obsługą urządzeń mechanicznych, z drugiej zaś z otrzymywaniem informacji zwrotnej od maszyn (Min, Marzelli, Yoo, 2010). W przypadku BCI mamy do czynienia z próbą stworzenia nowego kanału komunikacji pomiędzy człowiekiem a komputerem opartego na rejestracji specyficznych form aktywności mózgu. Stwarza to dotąd nieznaną możliwość eksploracji nowych obszarów badań, dlatego celem niniejszej pracy jest przybliżenie i zasygnalizowanie zagadnień związanych z tą dziedziną nauki. W szczególności przedstawienie problematyki terminologicznej, historii powstania interfejsów mózg-komputer, podziału metod w nich wykorzystywanych oraz zastosowań.

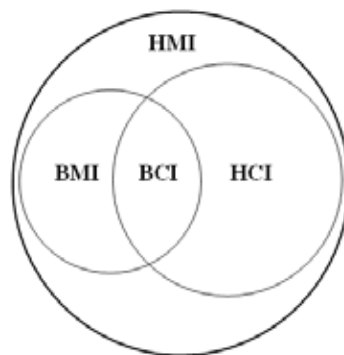
Na początku należy zwrócić uwagę, iż terminologia używana przez badaczy jest zróżnicowana. Według Graimann i in. (2010), terminów BCI (Brain Computer Interface), DBI (Direct Brain Interface) oraz BMI (Brain-Machine Interface) można używać jako synonimów, przy czym Wolpaw i in. (2002) definiuje BCI jako urządzenie, które zapewnia mózgowi nowy, niezwiązany z działaniem mięśni kanał komunikacji i kontroli. Ponadto Donoghue (2002) zwraca uwagę, iż głównym celem BMI jest wyodrębnienie sygnału pochodzącego z kory mózgowej, który służyłby do sterowania implantami lub innymi urządzeniami m.in. komputerami i robotami. Z kolei według Levine i in. (1999 za: Graimann, Allison, Pfurtscheller, 2010, s. 4), BDI przyjmuje dobrowolne polecenia bezpośrednio z mózgu bez konieczności fizycznego ruchu i może być użyty do obsługi komputera lub innej technologii. Jednakże Isa, Fetz, Müller (2009) zwracają uwagę, iż historycznie termin BCI był używany do określenia nieinwazyjnych metod rejestracji aktywności mózgu umożliwiającej naukę kontroli poruszania się kursora na ekranie komputera. Ta metoda wymagała treningu biofeedback oraz zapewniała efektywną komunikację przy stosunkowo niskiej ilości przesyłanych informacji. Natomiast termin BMI został wprowadzony w ostatniej dekadzie do opisu nowych metod związanych z rejestracją i analizą globalnej aktywności mózgu, projektami mikrochipów, algorytmami dekodowania i robotyką. Wykorzystują one m.in. neuronalną aktywność związaną z intencją ruchu rejestrowaną w części przedruchowej oraz motorycznej kory mózgowej do sterowania urządzeniami mechanicznymi. Obecnie zaś, zdaniem Isa, Fetz i Müller (2009), oba obszary problemowe związane z BCI oraz BMI stanowią wzajemnie przenikające się pole interdyscyplinarnych badań, a przez niektórych badaczy są ze sobą utożsamiane (Waldert i in., 2009; Coffey i in.,

2010). Jednakże inni dalej traktują te dwa rodzaje interfejsów jako całkiem oddzielne kategorie (Principe, McFarland, 2008).

Reasumując, trzy wymienione skróty – BCI, BMI i DBI – stosowane są jako określenia omawianych w pracy interfejsów mózg – komputer, jednakże służą one do podkreślenia różnych aspektów ich działania.

Ponadto można wyodrębnić szerszą płaszczyznę podziału zakresów pojęciowych związanych z szeroko rozumianymi interfejsami, co ilustruje schemat 1. Przy czym zaproponowane rozróżnienie jest propozycją autorów artykułu opartą o przegląd literatury przedmiotu pod kątem używanej terminologii. W tym przypadku najbardziej ogólną kategorią są interfejsy człowiek maszyna (HMI – *human-machine interface*), które, jak było zasygnalizowane wcześniej, obejmują interakcje zachodzące pomiędzy człowiekiem, a urządzeniem (Min, Marzelli, Yoo, 2010). Następnie mamy do czynienia z węższym zakresem pojęciowym, a mianowicie interfejsami człowiek-komputer (HCI – *human-computer interface*) oscylującymi wokół komunikacji człowieka z komputerem, przy czym może odbywać się ona w tradycyjny sposób za pomocą ruchów mięśni prowadzących do manualnej obsługi, np. pisanie na klawiaturze, lub w bardziej wyspecjalizowany sposób, m.in. za pomocą ruchów gałek ocznych (por. Krepki i in., 2007). Trzecią węższą kategorią są interfejsy mózg-maszyna (BMI – *brain-machine interface*) związane z wykorzystywaniem zarejestrowanej bezpośrednio aktywności mózgu do sterowania urządzeniami mechanicznymi lub układami elektronicznymi (Donoghue, 2002). Wypadkową zaś dwóch powyższych kategorii jest dział związany z interfejsami mózg-komputer (BCI – *brain-computer interface*).

Podsumowując przedstawione zagadnienia terminologiczne można powiedzieć, iż BCI jest rodzajem interfejsu umożliwiającego komunikację między komputerem (aplikacjami komputerowymi), a człowiekiem za pomocą bezpośredniej rejestracji jego aktywności mózgowej. W dalszej części artykułu będzie przyjęte takie rozumienie terminu interfejsy mózg-komputer (BCI – *brain-computer interfaces*).



Schemat 1. Zakresu pojęciowy odnoszący się do interfejsów człowiek-maszyna.

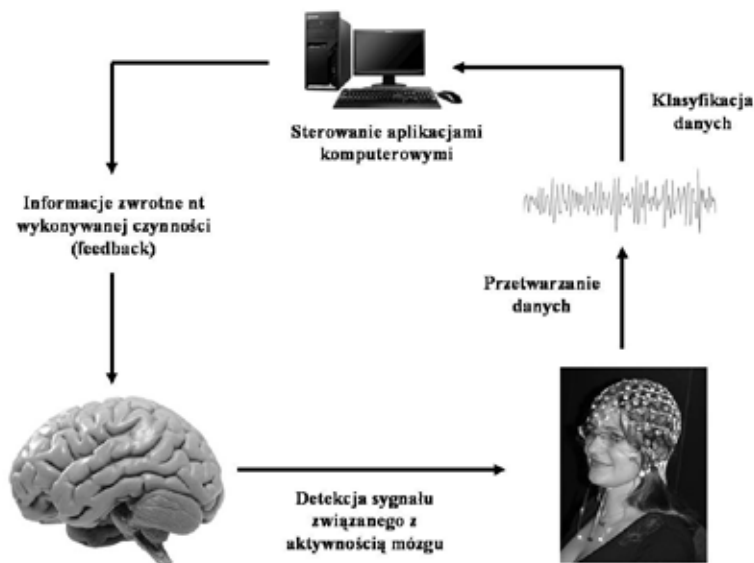
Działanie interfejsów mózg-komputer (Brain-Computer Interface – BCI) polega na zamianie sygnału związanego z aktywnością mózgu na sygnał cyfrowy, który następnie jest wysyłany do różnego rodzaju urządzeń pozwalających sterować aplikacjami komputerowymi, a także urządzeniami elektronicznymi. Odbywa się to bez udziału mięśni, co stanowi alternatywną drogę komunikacji pomiędzy człowiekiem a programami komputerowymi, czy sprzętem elektronicznym. Przy czym, pomimo różnorodnych rozważań terminologicznych, o których wspomniano wyżej, postuluje się, że każdy BCI składał się z czterech podstawowych komponentów (Wolpaw i in., 2002; Lebedev, Nicolelis, 2006; Allison, Wolpaw, Wolpaw, 2007; Graimann, Allison, Pfurtscheller, 2010), które zostały przedstawione na schemacie 1. Są nimi:

1) Rejestracja sygnału, która polega na zapisie aktywności mózgu osoby wykonującej daną czynność umysłową. Służy on jako sygnał wejścia do BCI (zob. Birbaumer, 2006).

2) Ekstrakcja charakterystycznych cech sygnału, polegająca na wydobywaniu z sygnału cyfrowego swoistych cech za pomocą odpowiednich procedur m.in. filtrowania przestrzennego, pomiaru amplitudy napięcia, analizy widma itp. (zob. Principe, McFarland, 2008; Schlögl, Vidaurre, Müller, 2010).

3) Dopasowanie zarejestrowanego sygnału do danych wzorców aktywności neuronalnej w celu określenia, jaką operację umysłową wykonuje użytkownik BCI.

4) Dwutorowe działanie obejmujące z jednej strony sformułowanie polecenia sterującego danym urządzeniem, a z drugiej przekazanie informacji zwrotnej użytkownikowi BCI.



Schemat 2. Ogólny schemat działania interfejsów mózg-komputer (BCI).

## Historia interfejsów mózg-komputer

Historia BCI (Brain Computer Interface) sięga roku 1964 kiedy to neurofizjolog dr William Grey Walter przypadkowo stworzył działający interfejs (Birbaumer, 2006; Birbaumer, Cohen, 2007; Graimann, Allison, Pfurtscheller, 2010). Podczas jednej z operacji zaimplantował elektrody do obszaru kory motorycznej pacjenta. Następnie rejestrował aktywność neuronalną w sytuacji, gdy badany przełączał kolejne slajdy na rzutniku przyciskając przycisk. W dalszej kolejności zmienił ustawienia systemu tak, aby projektor reagował w sytuacji, gdy zapis aktywności elektrycznej mózgu wskazuje, iż osoba chce nacisnąć przycisk. Zauważył wtedy, iż slajd zmieniał się zanim pacjent zdążył użyć przycisku. Jednakże dr William Grey Walter nie opublikował swojego przypadkowego odkrycia (Graimann, Allison, Pfurtscheller, 2010).

W tym też okresie Eberhard Fetz (1969) ogłosił swoje badania nad warunkowaniem instrumentalnym, w których wykazał, iż małpy mogą nauczyć się kontrolować wychylenie ramienia miernika za pomocą aktywności neuronalnej na zasadzie biofeedbacku. Mianowicie zaimplementował on elektrody do obszaru kory motorycznej małpy, a następnie za pomocą układu analogowego przekładał impulsy napięciowe z nich rejestrowane na wychylenia igły woltomierza. Układ został zaprojektowany tak, iż igła przesuwiała się w sytuacji, kiedy zwiększała się częstość generacji iglic w sygnale rejestrowanym z okolicy kory motorycznej. Przy czym zwierzę mogło patrzeć na wychylenia woltomierza. Gdy igła przekraczała zaznaczony punkt zostawało ono nagradzane. W tej sytuacji małpa szybko nauczyła się kontrolować aktywność swojego mózgu, aby powodować przesunięcie igły woltomierza w celu otrzymania nagrody. Te wczesne eksperymenty pokazały, iż małpy (i przypuszczalnie ludzie) mają zdolność do szybkiego nauczenia się świadomego modulowania schematów aktywności poszczególnych neuronów w celu sterowania urządzeniami zewnętrznymi (Taylor, Stetner, 2010).

Następnie Schmidt i in. (1978) wykazali, iż małpy były w stanie kontrolować aktywność neuronów i grup neuronów w zakręcie przedśrodkowym w pierwszorzędnej korze motorycznej oraz zmieniać ją w zależności od komend wzrokowych. Jednakże wydaje się, iż to określone komendy wzrokowe mogły wywoływać powtarzalne wzory aktywności mózgu. Z kolei Georgopoulos i in. (1988) zaobserwowali, iż neurony w korze ruchowej mają większą skłonność do wyłączenia w sytuacji, kiedy kierunek wykonywanego ruchu jest określony. Ponadto zauważyli, iż do przewidzenia kierunku ruchu w przestrzeni, przed jego rozpoczęciem, wystarczy zebranie sygnału z niewielkiej liczby komórek nerwowych (Taylor, Stetner, 2010).

Jednakże za pierwszą publikację naukową zajmującą się tematyką interfejsów mózg-komputer można uznać artykuły Jacque Vidala (1973; 1977).

Używał on jednak tego terminu w bardzo szerokim znaczeniu, odnosząc go do wszystkich komputerowych systemów, które dawały informacje o aktywności mózgu. W swoim systemie wykorzystywał wzrokowe potencjały wywołane rejestrowane z czaszki w okolicy wzrokowej w celu określenia kierunku, w którym patrzyły się osoby, a co za tym idzie kierunku, w którym użytkownik chce przesunąć kursor (Wolpaw i in., 2002).

Natomiast pierwsza międzynarodowa konferencja na temat BCI odbyła się dopiero w 1999 roku w Rensselaerville Institute of Albany. Uczestniczyło w niej około pięćdziesięciu naukowców i inżynierów, którzy reprezentowali 22 różne grupy badawcze m.in. ze Stanów Zjednoczonych, Kanady, Wielkiej Brytanii, Niemiec, Austrii oraz Włoch. Ich głównym celem było dokonanie przeglądu aktualnego stanu badań związanych z BCI; określenie celów podstawowych i aplikacyjnych badań; zidentyfikowanie kluczowych problemów technicznych oraz opracowanie standardowych procedur badawczych i metod oceny (Wolpaw i in., 2000). Przedstawiono na niej aktualny i kompleksowy stan badań w zakresie interfejsów mózg-komputer. Ponadto podczas sześciu sesji tematycznych zastanawiano się nad definicją i podstawowymi cechami BCI; dopasowaniem BCI i sposobów jego sterowania do potrzeb użytkowników; inwazyjnymi metodami wykorzystywanymi w interfejsach mózg – komputer; analizą sygnału rejestrowanego podczas aktywności mózgu; algorytmami służącymi do przełożenia rejestrowanego sygnału na rzeczywiste polecenia sterujące urządzeniem oraz możliwościami zastosowania technologii BCI (Wolpaw i in., 2002).

Od tamtej pory nastąpił coraz szybszy rozwój badań w zakresie interfejsów umożliwiających komunikację między mózgiem człowieka a urządzeniami zewnętrznymi, w tym komputerem. Zdaniem Tan i Nijholt (2010), w chwili obecnej wychodzą one z opisu podstawowych funkcji interfejsów oraz wykorzystania w naśladowaniu już istniejących układów, np. sterowaniu klawiaturą bądź myszą komputerowa na poziom dojrzały, związany ze zrozumieniem i wykorzystaniem zawłości nowych technologii do tworzenia unikalnych doświadczeń dostarczających możliwości dotąd niedostępnych.

## Klasyfikacja BCI

Według Zander i in. (2010) można w zakresie BCI, zaś zdaniem Coffey i in., (2010) w zakresie BMI, wyróżnić trzy kategorie: (1) pasywnych BCI (2) aktywnych BCI oraz (3) reaktywnych BCI. Przy czym w przypadku pierwszej z nich BCI są wykorzystywane do systemów wsparcia, a nie bezpośrednio jako urządzenia sterujące. Opierają się na rejestracji spontanicznej



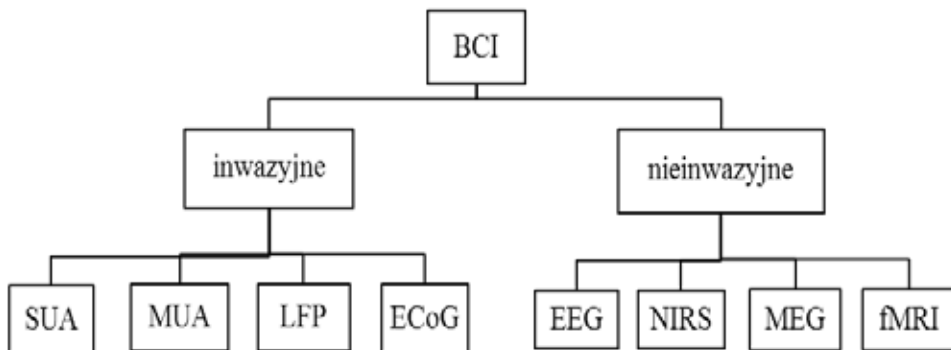
aktywności neuronalnej niezakłóconej przez manipulację związaną z przekierowywaniem uwagi przez użytkownika bądź ze zmianami w aktywności mózgowej lub motorycznej. Ta kategoria może mieć zastosowanie m.in. w neuroergonomii (zob. Scerbo, 2007; Coffey i in., 2010), która jest dziedziną zajmującą się poznaniem funkcjonowania ludzkiego mózgu w sytuacjach związanych z pracą. Ten dział ergonomii poszukuje również neuronalnych korelatów procesów poznawczych m.in. dotyczących koncentracji i przetrzutości uwagi, w warunkach obciążenia nadmiarem informacji, senności, stresu, bądź zmęczenia. Z kolei aktywne BCI są związane z bezpośrednim sterowaniem urządzeniami, które oparte jest na sygnałach powiązanych z aktywnością mózgową generowanych celowo przez użytkownika, np. sterowanie wózkiem inwalidzkim za pomocą zmian w częstotliwości sygnału EEG wywołanych przez wyobrażanie sobie ruchu lewej lub prawej ręki. Natomiast reaktywne BCI są kategorią znajdującą się pomiędzy dwiema powyższymi. W zależności od stopnia celowego zaangażowania użytkownika mogą one być bardziej pasywne lub aktywne. W przeciwieństwie do aktywnych BCI sygnał rejestrowany nie jest powiązany bezpośrednio z pojawieniem się bodźca np. sterowaniem wózkiem, ale z poznawczą reakcją na bodźce egzogeniczne, jak w przypadku potencjałów P300 związanych z pisanem słów na ekranie monitora. Powyższy podział w niektórych przypadkach jest nieostry, ale stanowi punkt wyjścia do dalszej dyskusji (Coffey i in., 2010).

Ponadto interfejsy mózg-komputer można podzielić na synchroniczne i asynchroniczne (Mason i in., 2006; Diez i in., 2011). Pierwsze z nich są związane z pojawianiem się konkretnego bodźca, np. figury na ekranie monitora. Rejestrowany sygnał EEG zaś jest analizowany i klasyfikowany zgodnie z ustalonymi i zdefiniowanymi oknami czasowymi powiązanimi z nim. Natomiast interfejsy asynchroniczne opierają się na spontanicznej aktywności mózgu niezwiązanej z zewnętrznym bodźcem wywołującym, np. podczas wyobrażania sobie ruchu. Sygnał EEG jest w tym przypadku symultanicznie poddawany analizie i klasyfikacji.

### **Podział metod wykorzystywanych w interfejsach mózg – komputer**

Aby lepiej zrozumieć działanie interfejsów mózg-komputer, należy przyjąć się sposobom pomiaru aktywności mózgowej i rodzajom sygnałów emitowanych przez mózg, które mogą być różnicowane. Takie rozróżnienie pozwoli lepiej zrozumieć główne metody wykorzystywane w interfejsach mózg-komputer.

Ponieważ aktywność mózgowa powoduje zmianę sygnału elektrycznego i magnetycznego, możliwe jest odbieranie tych sygnałów za pomocą odpowiednich urządzeń. Czujniki rejestrują zmiany aktywności mózgu powodowane różnymi stanami umysłowymi. Sygnał z mózgu może być odbierany bezpośrednio – dzięki implantacji elektrod na powierzchni kory mózgowej, jak również może być odbierany z powierzchni skóry głowy – metody nieinwazyjne. Sygnał rejestrowany bezpośrednio z powierzchni mózgu jest dokładniejszy, jednak ze względu na inwazyjność metody te są rzadziej stosowane. Stosowane metody inwazyjne to: SUA (*single-unit activity*), MUA (*multi-unit activity*), LFP (*local field potentials*), ECoG (elektrokortikogram) (Waldert, 2009). Wśród metod nieinwazyjnych wykorzystuje się fMRI (*Functional magnetic resonance imaging*), MEG (*magnetoencephalography*), NIRS (*near infrared spectroscopy*), EEG (*elektroencefalography*) (Birbaumer, 2006). Podział ten przedstawiono na schemacie 3.



Schemat 3. Podział interfejsów mózg-komputer ze względu na inwazyjność.

### *Metody inwazyjne*

Obecny stan techniki pozwala na rejestrację sygnału z pojedynczych neuronów (SUA), rejestruje się również sygnał z grupy neuronów (MUA), jak też potencjały lokalne w polu neuronów (LFP). Informacje z dużej grupy neuronów można zebrać poprzez wszczepienie tablicy z mikroelektrodami na powierzchni kory mózgowej. Takie nagrania umożliwiają przechwytywanie skoków potencjałów w bliskim sąsiedztwie każdej końcówki elektrody. SUA uzyskuje się przez zastosowanie filtra górno-przepustowego, który przepuszcza sygnał o częstotliwości powyżej 300 Hz (aktywność o innej częstotliwości jest odfiltrowana, gdyż stanowi utrudnienie w analizach, to tzw. szum). Następnie skokowe aktywności są sortowane, co pozwala na przyporządkowanie każdemu skokowi potencjału aktywności odpowiedniego neuronu. MUA uzyskuje się podobnie, jednak bez sortowania skoków potencjałów, co oznacza, że sygnał może składać się z załamków pochodzących z wielu neuronów. Aktywność skokowa mierzona przez SUA i MUA może być zredu-

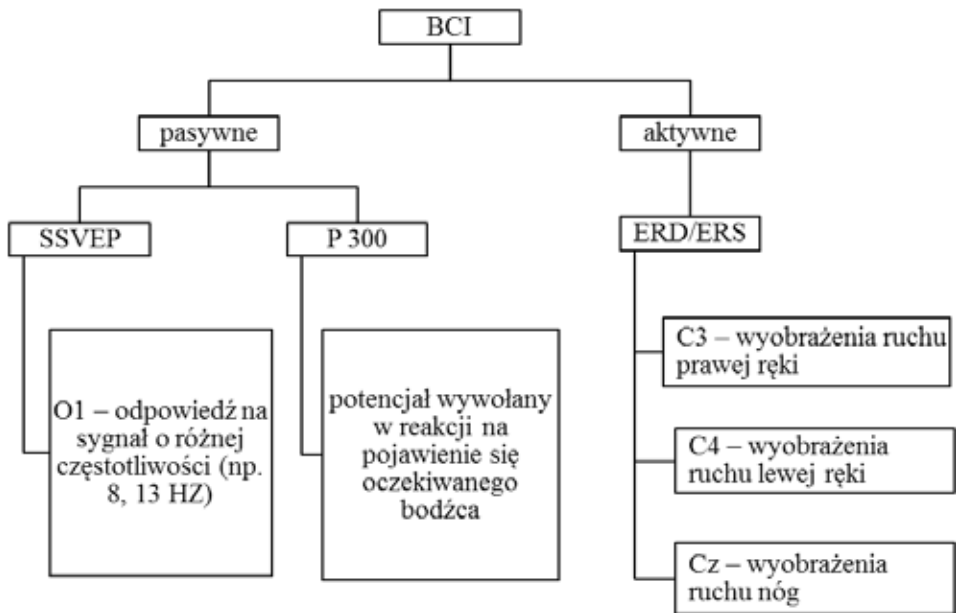
kowana do dyskretnych zdarzeń w czasie. LFP są wyodrębniane przez filtry dolnoprzepustowe, które przepuszczają sygnał o częstotliwości poniżej 300 Hz. Przyjmuje się, że odzwierciedlają one aktywność synaptyczną populacji neuronów w sąsiedztwie końcówki elektrody. LFP to sygnały analogowe. Elektrokortikogram (ECoG) to technika inwazyjna, która dzięki wszczępieniu na powierzchni kory lub też zewnątrzoponowo regularnych siatek, pasów elektrod umożliwia rejestrację sygnału z aksonów (Waldert, 2009).

#### *Metody nieinwazyjne*

Podobne sygnały, ale o mniejszej rozdzielczości przestrzennej mogą być rejestrowane nieinwazyjnie za pomocą elektroencefalografii (EEG) na skórze głowy lub magnetoencefalografii (MEG). Obie te metody odzwierciedlają działalność dużych populacji neuronów. W przeciwieństwie do EEG, która odzwierciedla napięcie zewnątrzkomórkowe, MEG odzwierciedla napięcia płynące przez dendryty, które wytwarzają pole magnetyczne. Wśród technik nieinwazyjnych wykorzystywany jest również funkcjonalny rezonans magnetyczny (fMRI) oraz funkcjonalna spektroskopia w podczerwieni (fNIRS), która umożliwia pośredni pomiar aktywności neuronalnej w oparciu o poziom natlenowania krwi. Te dwie techniki również były wykorzystywane do BCI, ale ze względu na mniejszą rozdzielczość czasową oraz duże koszty są znacznie rzadziej stosowane (Pfurtscheller, i in., 2010).

Obecnie najczęściej stosowane są metody BCI oparte o elektroencefalografię (EEG). Bardzo ważną cechą EEG jest wysoka rozdzielczość czasowa, co oznacza, że można mierzyć zmiany aktywności mózgowej zachodzące w krótkich przedziałach czasowych. Sprzęt do EEG jest lekki, niedrogi i łatwiejszy w użyciu w porównaniu do innych metod. Pomiar EEG jednak ma pewne wady, jak np. słabszą rozdzielczość przestrzenną (trudno dokładnie wskazać źródło sygnału), jak również podatność na zakłócenia sygnału (artefakty spowodowane mrugnięciami oczu, ruchami mięśni). Choć w badaniach EEG często stosuje się jak najwięcej elektrod (aby uzyskać jak najdokładniejszy sygnał), w zastosowaniu do BCI dąży się do minimalizacji liczby używanych elektrod. Jest to powiązane z praktycznym zastosowaniem i wygodą osób stosujących BCI. Również z powodów praktycznych zaczyna się w BCI stosować tzw. elektrody suche, które nie wymagają ani specjalnego przygotowania skóry głowy, ani zastosowania żelu do przytwierdzenia i lepszego przewodnictwa elektrod (Graumann, Alison, Pfurtscheller, 2010).

Ze względu na najczęściej wykorzystywaną metodę pomiaru aktywności EEG można wyróżnić BCI wykorzystujące: wzrokowe potencjały wywołane stanu ustalonego (SSVEP; *steady-state visual evoked potentials*), powiązaną ze zdarzeniem synchronizację/desynchronizację fal alfa (*event-related EEG desynchronization* (ERD) / *synchronization* (ERS)), potencjał gotowości (P300). Podział ten przedstawiono na schemacie 4.



Schemat 4. Podział interfejsów mózg-komputer ze względu na rodzaj analizowanego sygnału.

Wyróżniony podział najczęściej stosowanych metod BCI wskazuje, że wykorzystuje się metody pozwalające osobie aktywnie wytworzyć określony rodzaj sygnału mózgowego (ERD/ERS) lub jej mózg może pasywnie dostosować się do pojawiającego się bodźca (SSVEP, P300). Poszczególne metody korzystają z sygnałów rejestrowanych z różnych odprowadzeń EEG, czyli z różnych umiejscowień elektrod na skórze głowy. Wzrokowe potencjały wywołane stanu ustalonego (SSVEP) są odpowiedzią uwagi wzrokowej na określony bodziec, dlatego rejestrowane są z elektrody nad płatem potylicznym (pozycja elektrody: O1). Potencjał P300 najsilniej obserwowany jest z odprowadzenia z okolicy środkowo-ciemieniowej (pozycja elektrody: Pz). Natomiast desynchronizacja/synchronizacja (ERD/ERS) najlepiej widoczna jest w odprowadzeniach centralnych (Cz, C3, C4), w zależności od rodzaju sygnału. Elektrody C3 i C4 rejestrują zapis z okolicy bruzdy Rolanda w odpowiedzi na wyobrażony ruch prawej lub lewej ręki, zaś elektroda Cz rejestruje zmiany powstałe wskutek wyobrażenia ruchu nóg.

Potencjały wywołane stanu ustalonego SSEP (*steady-state evoked potentials*) występują, gdy z bardzo dużą częstotliwością prezentowane są zewnętrzne bodźce zmysłowe (np. migające światła), co powoduje, że pojedyncze potencjały stanowiące odpowiedź na te sygnały nakładają się na siebie. Pozwala to na zarejestrowanie w sygnale EEG nasilenia sygnału o częstotliwości zgodnej z częstotliwością prezentacji bodźca. Najczęściej do presenta-

cji używane są bodźce wzrokowe, zatem obserwowane są wzrokowe potencjały wywołane stanu ustalonego (SSVEP). Przykładowo, jeśli prezentowane są dwa obrazy migające z częstotliwością 8 Hz i 13 Hz, osoba koncentruje uwagę na jednym z nich a sygnał mózgowy dopasowuje się do tej częstotliwości. Dodatkowo widoczny jest również wzrost aktywności w częstotliwościach odpowiadających kolejnym składowym harmonicznym danego sygnału (np. dla 8 Hz kolejnymi harmonicznymi są wartości 16 Hz, 24 Hz, 32 Hz, czyli wielokrotności 8 Hz) oraz podharmonicznej (np. dla 8 Hz podharmoniczną jest wartość 4 Hz). Każdy bodziec wzrokowy powiązany jest z określoną komendą, jaką może wykonać urządzenie (np. poruszenie protezą). Migające bodźce wzrokowe są widoczne stale, natomiast osoba przenosząc uwagę na wybrany bodziec sprawia, że fale mózgowie dopasowują się do określonej częstotliwości (Graumann, Alison, Pfurtscheller, 2010).

Metoda ERD/ERS wykorzystuje zdarzenia związane z desynchronizacją sygnału neuronów w odpowiedzi na wykonywany, planowany lub wyobrażony ruch (Pfurtscheller, Lopes da Silva, 1999). ERD oznacza względny spadek mocy, zaś ERS oznacza wzrost mocy w poszczególnych składowych spektralnych w określonych obszarach mózgu. Wyobraźnia motoryczna jest to psychiczna symulacja ruchów, która jest wykorzystywana do wytworzenia zjawiska synchronizacji-desynchronizacji fal EEG. Zmianę ERD/ERS przy wyobrażonym ruchu obserwuje się w okolicach kory czuciowej i ruchowej w paśmie częstotliwości alfa (8-12 Hz). Możliwość wychwycenia i klasyfikacji sygnału EEG jako ERD/ERS dla wyobrażania sobie ruchów (lewej/prawej ręki, ruchów nóg) stanowi podstawę do zastosowania tej techniki w BCI (Neuper, Allison, 2010, Pfurtscheller, Neuper, 1994; Pfurtscheller, in. in., 1997).

Zastosowanie w BCI ma również tzw. „potencjał gotowości” (P300), który jest rejestrowany, gdy spośród kolejno prezentowanych bodźców pojawia się bodziec, na który osoba oczekiwała. Zwykle jako sekwencyjne bodźce stosowane są litery, ale mogą to być też inne symbole. Wybiórcza uwaga pozwala skupić się na wybranym symbolu, co wywołuje potencjał P300 obserwowany z odprowadzeń bliskich lokalizacji środkowo-ciemieniowej (elektroda Pz; rejestruje aktywność neuronalną z środkowej i przyśrodkowej okolicy ciemieniowej) za każdym razem, gdy na ekranie pojawia się pożądanym bodziec. Gdy osoba chce powiedzieć np. „cześć”, na ekranie wyświetlane są kolejno litery alfabetu i osoba reaguje „potencjałem gotowości” najpierw na pojawienie się litery „C” a następnie dla kolejnych liter. Zarejestrowanie i klasyfikacja odpowiedniego sygnału pozwala na określenie, który symbol osoba chce wybrać (Graumann, Alison, Pfurtscheller, 2010).

Warto wspomnieć również o metodzie wolnych potencjałów korowych (*slow cortical potentials*; SCPs). SCPs to bardzo powolne zmiany aktywności mózgowej, pojawiają się od 0,5 do 10 sekund po wydarzeniu. Te późne (>100 ms) odpowiedzi na bodziec są powiązane nie tylko z cechami bodźca, ale również w dużej mierze zależą od psychologicznego znaczenia tego bodź-

ca. Wykorzystuje się je w technice warunkowania instrumentalnego, gdzie poprzez informacje zwrotne osoby uczą się sterować falami mózgowymi. Pozwala to na nauczenie się sterowania kursorem do celu (np. przesunięcie kursora w górę lub w dół) po usłyszeniu sygnałów dźwiękowych. Ten rodzaj sygnału wykorzystywany jest zwłaszcza w komunikacji z osobami z pełnym paraliżem, z tzw. syndromem zamknięcia (Birbaumer i in., 1999).

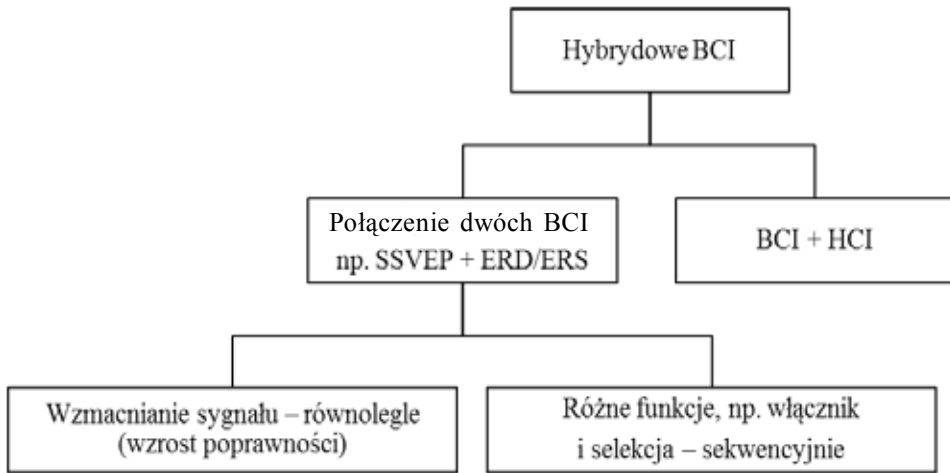
#### *Rodzaj zadań w BCI*

Innym spotykanym podziałem jest odwołanie do rodzaju zadania, które jest używane w sterowaniu interfejsami. W BCI wykorzystuje się zadania przygotowane tak, aby angażowały różne procesy psychiczne: selektywność uwagi, warunkowanie instrumentalne (proces kojarzenia) i wyobraźnię motoryczną. Najczęściej stosuje się zadania wymagające korzystania z wyobrażeń ruchowych. Wykorzystywane są również zadania arytmetyczne lub wymagające oceny relacji przestrzennych. Szeroko eksplorowano zastosowanie zadań powiązanych z percepcją wzrokową w odniesieniu do P300 i do SSVEP. Podejście do BCI oparte o warunkowanie instrumentalne może pozostawiać wybór stosowanej strategii (wyobrażeniowej lub innego zadania umysłowego) użytkownikowi (Curran, Stokes, 2003). Ponadto, ze względu na rodzaj zadań BCI można podzielić na synchroniczne (*synchronous, cue-paced*) i asynchroniczne (*asynchronous, self-paced*). BCI synchroniczne wymagają reakcji osoby w odpowiedzi na określony bodziec. Natomiast BCI asynchroniczne pozwalają osobie na reakcję w dowolnym czasie. Określone rodzaje zadań w dużej mierze odpowiadają określonym metodom stosowanym w BCI. Zadania synchroniczne (np. reakcja na bodziec wzrokowy) są wykorzystywane zwłaszcza w BCI opartych o P300 i SSVEP. Natomiast zadania asynchroniczne (np. wyobrażenia ruchowe wytwarzane w momencie, o którym decyduje użytkownik) są charakterystyczne dla BCI z wykorzystaniem ERD/ERS.

#### *Hybrydowe BCI*

Pojedynczy rodzaj sygnału EEG daje ograniczony zakres możliwości sterowania, zaledwie kilka rodzajów poleceń do wyboru, dlatego badacze pracują nad narzędziami wykorzystującymi BCI hybrydowe. Łączą one kilka metod wykorzystywanych w BCI lub BCI i interfejsach człowiek-komputer HCI (schemat 5).

Połączenie kilku interfejsów mózg-komputer może odbywać się poprzez zastosowanie różnych wzorów pobudzenia (równoległe) do zwiększenia poprawności klasyfikacji tego samego sygnału. Można również stworzyć aplikacje korzystające sekwencyjnie z różnych rodzajów sygnałów. Najpierw osoba może skorzystać z BCI opartego na ERD/ERS np. do włączenia aplikacji, a następnie już za pomocą BCI wykorzystującego SSVEP wybierać określone opcje.



Schemat 5. Podział interfejsów mózg-komputer hybrydowych.

Ponieważ BCI ma często ograniczoną liczbę opcji, które osoba może wybrać generując określony rodzaj sygnału mózgowego, co raz częściej łączy się interfejsy mózg-komputer z innymi interfejsami człowiek-komputer, zwłaszcza takimi, które wykorzystują ruchy oczu. Połączenie takie pozwala znacząco zwiększyć wachlarz możliwości osoby sterującej aplikacjami bądź urządzeniami za pomocą interfejsów hybrydowych.

### Zastosowania interfejsów mózg-komputer

Badania nad interfejsami mózg-komputer mają charakter w znacznej mierze aplikacyjny. Wprawdzie badania w tym nurcie poszerzają także wiedzę teoretyczną na temat funkcji poznawczych człowieka, jak na przykład wyobraźni motorycznej czy uwagi, ale interfejsy powstają głównie, aby usprawnić codzienne funkcjonowanie korzystających z nich osób.

Możemy wyróżnić kilka podstawowych obszarów ich zastosowania: (1) komunikacja, (2) rehabilitacja i protetyka, (3) rozrywka oraz (4) czynności codzienne.

Interfejsy nie dają żadnych większych możliwości niż znane do tej pory środki komunikacji czy obsługi aplikacji. Można wręcz powiedzieć, że są mniej praktyczne i trudniej jest z nich korzystać niż z tradycyjnych metod. Przede wszystkim ich obsługa często wymaga treningu, a nawet on nie daje

stuprocentowej szansy, że użytkownik będzie w stanie posługiwać się interfejsem. W literaturze funkcjonuje nawet termin „analfabetyzmu BCI” (*BCI Illiteracy*, Allison, Neuper, 2010). Określa się nim osoby, które nie potrafią korzystać z interfejsów mózg-komputer. Przyczyn tych trudności może być wiele, gdyż ludzie różnią się zdolnościami wyobrażeniowymi, zdolnością do koncentracji uwagi, podatnością na zmęczenie, frustrację, dystraktory, osoby mogą być pod wpływem emocji lub nie mieć motywacji (Curran, Stokes, 2003).

Jednakże interfejsy mózg-komputer powstały głównie z myślą o osobach z niepełnosprawnością, często w tak ciężkich stadiach chorób, że komunikacja ze światem zewnętrznym jest dla nich praktycznie niemożliwa. Obecnie istniejące interfejsy nie mają dużej wartości dla osób, które mogą swobodnie komunikować się z otoczeniem, jednakże niektóre z nich powstają z także myślą o w pełni sprawnych użytkownikach. Szczególnie dotyczy to obszaru rozrywki i codziennych czynności.

Celem prac nad interfejsami mózg-komputer nie jest jednak zastąpienie konwencjonalnych metod komunikacji pomiędzy zwykłymi użytkownikami w standardowym otoczeniu. Jest nim raczej zastąpienie konwencjonalnych interfejsów takimi, które będą odpowiednie dla osób niepełnosprawnych, znajdujących się w standardowym otoczeniu oraz dla pełnosprawnych, znajdujących się w specyficznym otoczeniu. Dodatkowo interfejsy mózg-komputer mogą być dobrym uzupełnieniem obecnie stosowanych interfejsów.

### *Komunikacja*

Jak zostało wcześniej wspomniane, interfejsy mózg-komputer mogą być wykorzystywane do komunikacji ze światem. Chodzi tu przede wszystkim o pisanie bez udziału mięśni. Osoby cierpiące na takie choroby, jak stwardnienie zanikowe boczne (ang. *amyotrophic lateral sclerosis*, ALS), zespół Guillain-Barrea czy stwardnienie rozsiane (SM) wraz z postępem choroby tracą zdolności motoryczne (pojawiają się porażenia, niedowłady, zniesienie odruchów, zanik mięśni). Umysł pozostaje jednak sprawny. Jest to tragiczna sytuacja, w której pacjent zostaje odcięty od świata. Możliwe jest jednak nawiązanie komunikacji za pośrednictwem urządzenia niekorzystającego z siły mięśni, a jedynie z aktywności układu nerwowego.

Osoby niepełnosprawne mogą więc korzystać z interfejsów mózg-komputer na kilka sposobów: (1) zakomunikować swoje decyzje lub pragnienia przez wypowiedź typu „tak-nie”, (2) pisać zdania, (3) uzyskać dostęp do Internetu poprzez korzystanie z przeglądarki internetowej (Jackson, Mappus, 2010).

Urządzenie do Tłumaczenia Myśli (*Thought Translation Device*) umożliwia komunikację osobom z syndromem zamknięcia (*locked-in syndrome*) (Hintenberger i in., 2003; Kuebler i in., 2001). Osoba badana za pomocą feedbacku uczy się regulować wolne potencjały korowe (*Slow Cortical*



*Potentials*), dzięki czemu może wybierać litery, które chce zapisać. Wolne potencjały korowe mogą mieć dwie wartości – dodatnią i ujemną, co pozwala zaklasyfikować reakcje osoby badanej w systemie 0-1, a zatem pozwalają odpowiadać na pytania dwu-kategorialne typu „tak-nie”.

Podobne interfejsy służące do pisania mogą opierać się także na komponencie P300 lub wzrokowych potencjałach wywołanych stanu ustalonego (SSVEP).

### *Rehabilitacja i protetyka*

Szczególne nadzieje związane są z takimi obszarami prac nad interfejsami mózg-komputer, jak rehabilitacja i protetyka. Opracowywane są terapie, których celem jest odzyskanie przez pacjentów funkcji motorycznych, które utracili na przykład w wyniku udaru mózgu. Badacze chcieliby wykorzystać interfejsy mózg-komputer do pokierowania procesami plastyczności mózgu, tak aby przywrócić sparaliżowanym pacjentom utracone zdolności motoryczne (zob. Birbaumer, Cohen, 2007).

Plastyczność centralnego układu nerwowego jest związana z aktywnością człowieka. Funkcje motoryczne zlokalizowane w mózgu podlegają zmianom poprzez uczenie się. Plastyczne zmiany występują nie tylko w zdrowym mózgu, ale także mogą wystąpić w chorobie lub po urazie. Procesy plastyczności po udarze mogą prowadzić do odzyskania utraconych w jego wyniku funkcji motorycznych, lub, jeśli nieprawidłowe ruchy są powtarzane, do ich utrwalenia (Daly, Wolpaw, 2008). W związku z tym, celem rehabilitacji po udarowej jest przede wszystkim identyfikacja zachodzących zmian plastycznych oraz ich odpowiednie ukierunkowanie. Interfejs mózg-komputer może zostać wykorzystany do trenowania pacjenta w produkowaniu właściwych sygnałów motorycznych przez mózg albo do sterowania urządzeniem wykonującym ruchy (Daly, Wolpaw, 2008).

Pfurtscheller ze współpracownikami (2003) uczyli osobę z przerwaniem rdzeniem kręgowym kontroli nad rytmemi sensomotorycznymi, co miało pozwolić jej na sterowanie mięśniami ręki i dłoni. Na skórze ręki umieszczono powierzchniowe elektrody, które po otrzymaniu odpowiedniego sygnału z interfejsu wywoływały skurcz mięśni. Pacjent dzięki temu mógł m.in. chwytać szklankę.

Z kolei Matsuoka i współpracownicy (2006) pracują nad kontrolowaną za pomocą aktywności mózgu protezą ręki. Podejmując próbę zastosowania interfejsów mózg-komputer do sterowania sztuczną ręką, zwracają oni uwagę na potrzebę odkrycia związków między jej pozycją, a ruchami. To pozwoliłoby stworzyć system wykorzystujący sygnały nerwowe w taki sam sposób, jaki już funkcjonuje w układzie nerwowym.

### *Rozrywka*

Obserwowanie, jak sama aktywność umysłowa wpływa na otoczenie może być ekscytującym doświadczeniem. Powstało kilka gier, które oparte są na interfejsach mózg-komputer.

Jedną z pierwszych gier wykorzystujących taki interfejs był *BrainPong* (Jackson, Mappus, 2010), prosta gra, w której gracze za pomocą kontroli wolnych potencjałów korowych odbijają do siebie piłeczkę poruszającą się po monitorze komputera.

Najbardziej znane są dwie komercyjne produkcje, które pochodzą od organizacji NeuroSky (NeuroSky, 2011) i Emotiv (Emotiv, 2011). Zestaw *Mindset* NeuroSky opiera się na prostym interfejsie EEG, za pomocą którego można używać różnych aplikacji, na przykład wizualizującej fale mózgowe. Zawiera on także grę, w której osiąga się różne cele poprzez skupianie uwagi i relaksowanie się. Urządzenie *Epoc* od Emotiv jest oparte na EEG, EOG i EMG rejestrowanym z twarzy. W jednej z gier zadaniem gracza jest zebranie części budujących Stonehenge korzystając z wyobraźni motorycznej.

Trwają także prace nad wykorzystywaniem interfejsów mózg-komputer do poruszania się w wirtualnej rzeczywistości (*virtual reality*). W badaniach Pfurtschellera i współpracowników (2006) osoby badane poruszały się po wirtualnym środowisku wyobrażając sobie ruch nóg lub stóp, a dzięki wyobrażeniu ruchu ręki czy chwytania mogły za pośrednictwem swojego awatara dotykać obiektów w nim umieszczonych.

Pineda i współpracownicy (2003) trenowali osoby badane w poruszaniu się po wirtualnym środowisku gry komputerowej typu *shooter* (gra polega na przechodzeniu kolejnych poziomów i pokonywaniu przeciwników poprzez strzelanie z różnego rodzaju broni palnej). Osoby badane wykorzystywały wyobraźnię motoryczną, aby poruszać się po terenie gry, ale musiały przejść wielogodzinny trening, który objął około dziesięć godzin na przestrzeni pięciu tygodni.

### *Czynności codzienne*

Prace nad interfejsami mózg-komputer prowadzą do powstania tak zwanej technologii towarzyszącej (*assistive technology*), której zadaniem jest pomaganie człowiekowi (niepełnosprawnemu, ale też sprawnemu) w codziennej aktywności.

Dla osób niepełnosprawnych szczególne znaczenie będzie miała możliwość sterowania wózkiem inwalidzkim czy protezą kończyny. Jednakże możliwe jest też wykorzystanie interfejsów do uruchamiania urządzeń elektronicznych, jak odbiornik telewizyjny, czy do włączania lub wyłączania światła w pomieszczeniu. Powstał już interfejs oparty o metodę SSVEP pozwalający na wybieranie numeru telefonu, pod który chce się zadzwonić (Cheng i in., 2002).

Bayliss i współpracownicy (2003, 2004) w wirtualnej rzeczywistości stworzyli *inteligentny dom*, w którym można sterować pięcioma różnymi urządzeniami w oparciu o interfejs korzystający z komponentu P300.

Podobne badania w wirtualnym środowisku prowadzą inni badacze. Interfejs oparty o metodę SSVEP i komponent P300 pozwala wybierać spośród 20-45 komend dotyczących kontrolowania wirtualnego mieszkania (Edlinger i in., 2010). Co ciekawe, osobom badanym wystarczy 10 minut treningu, aby osiągnąć poziom trafności klasyfikacji sygnału powyżej 80%. W innym badaniu osoba miała za zadanie poruszać się za pomocą wyobraźni motorycznej po wirtualnej ulicy, na której znajdowały się sklepy i kilkanaście awatarów ludzi (Guger i in., 2007).

Prowadzone są także badania nad występowaniem komponentu P300 podczas gdy osoba badana oczekuje na zmianę świateł drogowych w otoczeniu wirtualnej rzeczywistości (Bayliss, Ballard, 2000). Zwykle osoby sterujące interfejsem znajdują się w spokojnym i wyciszonym pomieszczeniu laboratoryjnym. Tymczasem jeśli interfejsy mają faktycznie towarzyszyć osobom w codziennej aktywności, potrzebne jest, aby dobrze funkcjonowały także w głośnym i zmieniającym się otoczeniu. Badania w wirtualnej rzeczywistości dają namiastkę naturalnych warunków i w związku z tym mają duże znaczenie dla rozwoju tej technologii.

Opisane w tej części artykułu zastosowania interfejsów-mózg komputer oczywiście nie wyczerpują wszystkich obszarów i możliwości. Jest to raczej przegląd najbardziej reprezentatywnych dla tej dziedziny przykładów. Prace nad interfejsami mózg-komputer trwają i są intensywne, zatem wciąż pojawiają się doniesienia na temat nowych możliwości lub perspektyw dla ich zastosowania.

## Podsumowanie

Badania nad interfejsami-mózg komputer przyspieszyły w ostatnich dziesięciu latach, i co ważne, przeniosły się z laboratoriów do środowiska naturalnego lub quasi-naturalnego, zaś systemy sterujące aplikacjami lub grami znajdują się obecnie w ofercie komercyjnych produktów przeznaczonych do sprzedaży. Pokazuje to potencjał tej dziedziny, ale przede wszystkim niezwykle właściwości ludzkiego umysłu.

Przed badaczami zajmującymi się interfejsami wciąż stoi wiele wyzwań i problemów do rozwiązania. Jedne mają naturę typowo techniczną, inne związane są z podmiotami, dla których interfejsy są projektowane.

Kwestie techniczne dotyczą przede wszystkim zwiększenia prędkości transferu danych (Allison, 2010) – za pomocą obecnie działających interfejsów można na przykład pisać zaledwie kilka znaków na minutę. Współczesne interfejsy opierają się głównie na metodzie EEG, ale prowadzi się coraz więcej badań nad zastosowaniem w tej dziedzinie innych sposobów pomiaru pracy mózgu, jak funkcjonalny rezonans magnetyczny lub magnetoencefalografia (Alisson, 2010).

Istotna jest także użyteczność interfejsów. Jak było wspomniane wcześniej, obecnie interfejsy mózg-komputer nie oferują lepszych możliwości niż te konwencjonalne, zaś aby mówić o użyteczności powinny one odpowiadać na potrzeby użytkowników i być dla nich łatwe w obsłudze. Z tego względu rozwijane są badania nad różnymi formami treningu, który najlepiej przygotowywałby do korzystania z nich. Pewne efekty odnosi trening oparty o metodę neurofeedback (zob. Hwang, Kwom, Im, 2009). Jest to metoda, która opiera się na tzw. sprzężeniu zwrotnym. Osoby badane otrzymują informacje o poziomie swoich reakcji fizjologicznych, aktywności kory mózgowej i tym podobne. Na tej podstawie mogą modyfikować swoją aktywność poznawczą, tak aby uzyskiwać skuteczniejszą kontrolę nad interfejsem.

Curran i Stokes (2003) wymieniają czynniki podmiotowe, które mogą mieć istotny wpływ na ułatwienie ludziom korzystania z interfejsów mózg – komputer. Są to przede wszystkim: (1) zdolność koncentracji uwagi, (2) poziom frustracji, (3) wpływ stanów emocjonalnych, (4) podatność na zmęczenie, (5) motywacja osób badanych. Można postawić hipotezę, że nawet jeśli ograniczenia techniczne dotyczące interfejsów mózg-komputer zostaną przełamane, to efektywność korzystania z nich nadal będzie modyfikowana przez zmienne związane z funkcjonowaniem osób badanych. Ich wpływ nie był jednak do tej pory systematycznie badany. Dlatego ważne są nie tylko psychologiczne badania nad neuronalnymi korelatami funkcji poznawczych, ale również podmiotowymi czynnikami mogącymi mieć związek ze zdolnością do posługiwania się interfejsami mózg-komputer.

### Literatura cytowana

- Allison, B. Z. (2010). Toward Ubiquitous BCIs. W: B. Graimann, B. Allison, G. Pfurtscheller (red.), *Brain Computer Interfaces Revolutionizing Human Computer Interaction* (s. 357-387). Berlin: Springer.
- Allison, B. Z., Neuper, Ch. (2010). Could Anyone Use a BCI? W: D.S. Tan, A. Nijholt (red.), *Brain-Computer Interfaces. Applying our Minds to Human-Computer Interaction* (s. 35-54). Londyn: Springer.
- Allison, B. Z., Wolpaw, E.W., Wolpaw, J. R. (2007). Brain-computer interface systems: progress and prospects. *Expert Review of Medical Devices*, 4, 463-474.

- Bayliss, J. D. (2003). Use of the evoked potential p3 component for control in a virtual apartment. *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, 11(2), 113-116. 1534-4320.
- Bayliss, J., Inverso, S., Tentler, A. (2004). Changing the P300 brain computer interface. *Cyberpsychology and Behaviour*, 7(76), 694-704.
- Bayliss, J. D., Ballard, D. H. (2000). Single trial P3 epoch recognition in a virtual environment. *Neurocomputing*, 32-33, 637-642.
- Birbaumer, N. (2006). Breaking the silence: Brain-computer interfaces (BCI) for communication and motor control. *Psychophysiology*, 43, 517-532.
- Birbaumer, N., Cohen, L. G. (2007). Brain-computer interfaces: communication and restoration of movement in paralysis. *Journal of Physiology*, 579, 621-636.
- Birbaumer, N., Ghanayim, N., Hinterberger, T., Iversen, I., Kotchoubey, B., Kübler, A., Perelmouter, J., Taub, E., Flor, H. (1999). A spelling device for the paralysed. *Nature*, 398, 297-298.
- Cheng, M., Gao, X., Gao, S., Xu, D. (2002). Design and implementation of a brain-computer interface with high transfer rates. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 49(10), 1181-1186.
- Coffey, E.B.J., Brouwer, A.M., Wilschut, E.S., van Erp, J.B.F (2010). Brain-machine interfaces in space: Using spontaneous rather than intentionally generated brain signals. *Acta Astronautica*, 67, 1-11.
- Curran, E. A., Stokes, M. J. (2003). Learning to control brain activity: A review of the production and control of EEG components for driving brain-computer interface (BCI) systems. *Brain and Cognition*, 51, 326-336.
- Daly, J., Wolpaw, J. (2008). Brain-computer interfaces in neurological rehabilitation. *Lancet Neurological*, 7, 1032-1043.
- Donoghue, J. P. (2002). Connecting cortex to machines: recent advances in brain interfaces. *Nature Neuroscience*, 5, 1085-1088.
- Edlinger, G., Prueckl, R., Krausz, G., Holzner, C., Guger, C. (2010). P4-24 P300 and SSVEP based brain-computer interface for control of a smart home virtual environment. *Clinical Neurophysiology*, 121(1), 126.
- Emotiv Inc. (2011). Emotiv Epoc. Strona internetowa: <http://www.emotiv.com/>
- Fetz, E.E. (1969). Operant conditioning of cortical unit activity. *Science*, 163, 955-958.
- Georgopoulos, A. P., Kettner, R. E., Schwartz, A. B. (1988). Primate motor cortex and free arm movements to visual targets in three-dimensional space. II. Coding of the direction of movement by a neuronal population. *Journal of Neuroscience*, 8(8), 2928-2937.
- Graimann, B., Allison, B.Z., Pfurtscheller, G. (2010). Brain-Computer Interfaces: a gentle introduction. W: B. Graimann, B.Z. Allison, G. Pfurtscheller (red.), *Brain Computer Interfaces Revolutionizing Human Computer Interaction* (s. 1-28). New York: Springer Publishing.
- Guger, C., Leeb, R., Friedman, D., Vinayagamoorthy, V., Edlinger, G., Slater, M. (2007). Controlling virtual environments by thoughts. *Clinical Neurophysiology*, 118(4), 36.
- Hinterberger, T., Kuebler, A., Kaiser, J., Neumann, N., Birbaumer, N. (2003) .A brain-computer interface (BCI) for the locked-in: comparison of different EEG classifications for the thought translation device. *Clinical Neurophysiology*, 114, 416-425.
- Hwang H.-J., Kwom K., Im Ch.-H. (2009). Neurofeedback-based motor imagery training for brain-computer interface. *Journal of Neuroscience Methods*, 179, 150-156.

- Isa, T., Fetz, E.E., Müller, K.R. (2009). Recent advances in brain-machine interfaces. *Neural Networks*, 22, 1201-1202.
- Jackson, M.M., Mappus, R. (2010). Applications for Brain-Computer Interfaces. W: D.S. Tan, A. Nijholt (red.), *Brain-Computer Interfaces. Applying our Minds to Human-Computer Interaction* (s.89-104). Londyn: Springer.
- Krepki, R., Curio, G., Blankertz, B., Müller, K.R. (2007). Berlin Brain-Computer Interface-The HCI communication channel for discovery. *International Journal of Human-Computer Studies*, 65, 460-477.
- Kuebler, A., Kotchoubey, B., Kaiser, J., Wolpaw, J., Birbaumer, N. (2001). Brain-computer communication: Unlocking the locked-in. *Psychological Bulletin*, 127(3), 358-375.
- Lebedev, M. A., Nicolelis, M. A. L. (2006). Brain-machine interfaces: past, present and future. *Trends in Neurosciences*, 29(9), 536-546.
- Matsuoka, Y., Afshar, P., Oh, M. (2006). On the design of robotic hands for brain-machine interface. *Neurosurgical Focus*, 20(5), 1-9.
- Min, B. K., Marzelli, M. J., Yoo, S.S. (2010). Neuroimaging-based approaches in the brain-computer interface. *Trends in Biotechnology*, 28(11), 552-560.
- NeuroSky Inc. (2011). MindSet. Strona internetowa: <http://www.neurosky.com/>
- Pfurtscheller, G., Allison, B. Z., Brunner, C., Bauernfeind, G., Solis Escalante, T., Scherer, R., Zander, T., Müller-Putz, G., Neuper, C., Birbaumer, N. (2010). The Hybrid BCI. Strona internetowa: <http://www.frontiersin.org/neuroprosthetics/10.3389/fnpro.2010.00003/full>
- Pfurtscheller, G., Leeb, R., Keinrath, C., Friedman, D., Neuper, C., Guger, C. (2006). Walking from thought. *Brain Research*, 1071, 145-152.
- Pfurtscheller, G., Lopes da Silva, F.H. (1999). Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles. *Clinical Neurophysiology*, 110, 1842-1857.
- Pfurtscheller, G., Neuper, C. (1994). Event-related synchronization of mu rhythm in the EEG over the cortical hand area in man. *Neuroscience Letters*, 174, 93-96.
- Pfurtscheller, G., Neuper, C., Andrew, C., Edlinger, G. (1997). Foot and hand area mu rhythms. *Journal of Psychophysiology* 26, 121-135.
- Pfurtscheller, G., Mueller, G.R., Pfurtscheller, J., Gerner, H.J., Rupp, R. (2003). 'Thought' – control of functional electrical stimulation to restore hand grasp in a patient with tetraplegia. *Neuroscience Letters*, 351, 33-36.
- Pineda, J. A., Silverman, D.S., Vankov, A., Hestenes, J. (2003). Learning to control brain rhythms: making a brain-computer interface possible. *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, 11(2), 181-184.
- Principe, J. C., McFarland, D. J. (2008). BMI/BCI modeling and signal processing. W: T. W. Berger, J. K. Chapin, G. A. Gerhardt, D. J. McFarland, J. C. Principe, W. V. Soussou, D. M. Taylor, P. A. Tresco (red.), *Brain-Computer Interfaces An International Assessment of Research and Development Trends* (s. 47-64) New York: Springer Publishing.
- Scerbo, M.W. (2007). Adaptive automation. W: R. Parasuraman, M. Rizzo (red.), *Neuroergonomics* (s. 239-252). Oxford: Oxford University Press.
- Schögl, A., Vidaurre, C., Müller, K. R. (2010). Adaptive methods in BCI research – an introductory tutorial. W: B. Graimann, B.Z. Allison, G. Pfurtscheller (red.), *Brain Computer Interfaces Revolutionizing Human Computer Interaction* (s.331-356). New York: Springer Publishing.

- Schmidt, E. M., McIntosh, J. S., Durelli, L., Bak, M. J. (1978). Fine control of operantly conditioned firing patterns of cortical neurons. *Experimental Neurology*, 61(2), 349-369.
- Tan, D. S., Nijholt, A. (2010). Brain-Computer Interfaces and Human-Computer Interaction. W: D.S. Tan, A. Nijholt (red.), *Brain Computer Interfaces* (s. 3-20). London: Springer-Verlag.
- Taylor, D. M., Stetner, M.E. (2010). Intracortical BCIs: A brief history of neural timing. W: B. Graimann, B.Z. Allison, G. Pfurtscheller (red.), *Brain Computer Interfaces Revolutionizing Human Computer Interaction* (s. 203-220). New York: Springer Publishing.
- Vidal, J. J. (1973). Toward direct brain-computer communication. *Annual Reviews in Biophysics and Bioengineering*, 2, 157-180.
- Vidal, J. J. (1977). Real-time detection of brain events in EEG. *Proceedings of the IEEE*, 65(5), 633-641.
- Waldert, S., Pistohl, T, Braun, C., Ball, T., Aertsen, A., Mehring, C. (2009). A review on directional information in neural signals for brain-machine interfaces. *Journal of Physiology – Paris*, 103, 244-254.
- Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., Heetderks, W. J., McFarland, D. J., Peckham, P. H., Schalk, G., Donchin, E., Quatrano, L. A., Robinson, C.J., Vaughan, T.M. (2000). Brain-computer interface technology: a review of the first international meeting. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 8(2), 164-173.
- Wolpaw, J. R., Birbaumer, N., McFarland, D. J., Pfurtscheller, G., Vaughan, T. M. (2002). Brain-computer interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology*, 113, 767-791.
- Zander, T.O., Kothe, C., Welke, S., Roetting, M. (2009). Utilizing secondary input from passive brain-computer interfaces for enhancing human-machine interaction. *Lecture Notes in Computer Science*, 5638/2009, 759-771.