

Jolanta Zielińska
jzielin@op.pl
Instytut Pedagogiki Specjalnej
Uniwersytet Pedagogiczny
Kraków

Interfejs mózg – komputer w teorii i praktyce

1. Wprowadzenie: koncepcja informatyki neurokognitywnej

W ramach prac badawczych nad zbudowaniem sztucznego umysłu prowadzonych w neurocybernetyce tworzone są architektury kognitywne. Stanowią one podstawę koncepcji informatyki neurokognitywnej. Jej celem jest stworzenie systemów, osiągających poziom kompetencji przekraczający możliwości człowieka, opartych na wielkoskalowej architekturze mózgu i modelach funkcji jego wyspecjalizowanych obszarów. O ile udało się to w ramach takich zagadnień, jak rozpoznawanie przez komputery, efektywniej od człowieka, specyficznych wzorców w sygnałach, czy osiąganie wygranej w grach planszowych, o tyle nie jest to na razie możliwe w obszarze tzw. niższych funkcji poznawczych, jak percepcja, rozpoznawanie obiektów oraz analiza relacji między nimi [Duch, 2009, s. 271].

W ramach informatyki kognitywnej takie rodzaje pamięci, jak rozpoznawcza, skojarzeniowa, proceduralna, semantyczna, robocza są wspierane przez sieci neuronowe o specyficznej, dostosowanej do ich funkcji architekturze. Niemniej praktyczne architektury obliczeniowe ograniczają możliwości przetwarzania informacji i być może nigdy nie osiągną one podobnych do mózgu biologicznego możliwości zarówno w ramach niższych, jak i wyższych czynności poznawczych. Ograniczeniem w tym zakresie są chociażby możliwości techniczne komputerów, na których są implementowane [Duch, 2009, s. 272].

W ramach informatyki kognitywnej prowadzone są prace nad unowocześnianiem i rozwijaniem, zwłaszcza w aspekcie zastosowań praktycznych interfejsu mózg-komputer, czyli BCI (*Brain-Computer Interface*). Zostanie on scharakteryzowany w dalszej kolejności, po przedstawieniu ogólnej charakterystyki metod badania pracy mózgu, będących podstawą jego działania.

2. Metody badania pracy mózgu – ogólna charakterystyka

Przedstawiony podział metod pozwoli wskazać metody badania pracy mózgu, które można potencjalnie zastosować do uzyskiwania danych o przebiegu procesów poznawczych, i które można użyć bez problemów natury etycznej, czyli charakteryzujące się całkowitą bezinwazyjnością. Metody badania ośrodkowego układu nerwowego dzieli się na strukturalne i funkcjonalne. Metody strukturalne pokazują struktury mózgowe, natomiast metody funkcjonalne dostarczają danych o metabolizmie tkanki mózgowej. Do metod strukturalnych zaliczana jest tomografia komputerowa, nuklearny rezonans magnetyczny oraz angiografia. Do metod funkcjonalnych należy funkcjonalny rezonans magnetyczny, tomografia emisyjna pojedynczego fotonu, pozytronowa emisyjna tomografia, metoda

elektroencefalografii EEG oraz metoda potencjałów wywołanych. Kolejny podział metod dotyczy stopnia ich inwazyjności, czyli bezpieczeństwa osób badanych. Metody inwazyjne to tomografia komputerowa, angiografia oraz metody scyntygraficzne. Metody nieinwazyjne to metody rezonansowe oraz metoda EEG.

Do wykorzystania oceny pracy mózgu osób podczas wykonywania konkretnych zadań poznawczych przydatne są jedynie metody bezinwazyjne. Wśród nich można wprowadzić dodatkowe kryterium oceny, mobilność sprzętu do przeprowadzania badań. Sprzęt stacjonarny, o dużych gabarytach, związany z konkretnym miejscem nie pozwala na przeprowadzanie badań w różnych ośrodkach, na różnych grupach, uzyskania w określonym przedziale czasowym porównywalnych ze sobą danych. Całkowitą nieinwazyjnością i najwyższą rozdzielczością czasową, a więc bardzo dokładnymi pomiarami cechuje się magnetoencefalografia MEG. Oparta jest ona na zapisie pól magnetycznych generowanych przez płynące w mózgu prądy. Zapis pracy mózgu tą metodą wymaga stosowania bardzo drogiej i nieprzenośnej aparatury [Durka, 2009, s. 235]. Metoda MEG może więc służyć do celów diagnostycznych. Osoba badana siedzi wygodnie w fotelu skanera, bez dodatkowych elektrod na głowie, które stanowią ujemny aspekt badań metodą elektroencefalografii EEG.

Metoda encefalografii wyróżnia się spośród wszystkich technik badania pracy mózgu najdłuższą historią zastosowań klinicznych, najniższym kosztem, całkowitą nieinwazyjnością oraz najwyższą rozdzielczością. Dwie ostatnie cechy ma opisana wcześniej metoda magnetoencefalografii [Durka, 2009, s. 235]. Badanie EEG polega na rejestracji przy pomocy elektrod umieszczonych na skórze głowy ze specjalnym żelem (co stanowi dużą niedogodność) czynnościowych prądów mózgu człowieka, które charakteryzują się niewielkim napięciem (od kilku do kilkuset mikrowoltów). Częstotliwość tych prądów waha się od 0,5 Hz do 50 Hz. Technologia zapisu EEG wykorzystuje obecnie wysokiej klasy, wyspecjalizowane urządzenia zapewniające próbkowanie badanych sygnałów w czasie i przestrzeni z częstotliwością tysięcy Hz oraz do 130 par elektrod używanych jako detektory wejściowe. Urządzenia te spowodowały dynamiczny rozwój stosowania tej metody w praktyce.

Aktualny stan badań nad mózgiem, realizowanych we współpracy neurobiologów i inżynierów (którzy dostarczają narzędzi informatycznych, pozwalających na przedstawienie wyników badań na ekranie komputera) spowodowały dynamiczny rozwój stosowania tej metody w praktyce. Wynikiem tej współpracy jest metoda QEEG (ang. *Quantitative EEG*) służąca do badania funkcji i dysfunkcji mózgu, a także planowania sesji biofeedback. Aktualnie jest ona stosowana w badaniach z zakresu psychologii i psychiatrii do diagnozy ADHD, depresji, dysleksji, schizofrenii oraz zaburzeń lękowych. Metoda QEEG umożliwia nie tylko zapis sygnału EEG, ale w oparciu o specjalny program komputerowy jego ilościową analizę. Analiza ta jest realizowana w postaci widma amplitudy względem częstotliwości, opisanego stabelaryzowanymi wartościami liczbowymi oraz jako mapa topograficzna pokazująca rozkład czynności EEG w różnych miejscach na powierzchni skóry głowy.

Potencjały wywołane EEG (ang. *evoked potentials*, EP) definiowane są jako ślady odpowiedzi mózgu na bodźce. W przypadku MEG stosowane jest określenie pola wywołane (ang. *evoked fields*, EF). Zwykle reakcja ta jest mała i w zapisie pojedynczej realizacji

reakcji na bodziec najczęściej niewidoczna wśród czynności pochodzącej od wielu innych procesów zachodzących w tym samym czasie w mózgu. Ich wyodrębnienie z tła EEG/MEG, czyli manifestacji elektrycznej innych, trwających w tym samym czasie w mózgu, procesów (aktywny prąd niezależny), wymaga zapisu odpowiedzi na szereg powtórzeń tego samego bodźca. Rozwój techniki komputerowej, odpowiednie oprogramowanie pozwala w chwili obecnej na cyfrowe uśrednianie kolejnych fragmentów EEG, zsynchronizowanych według momentu wystąpienia bodźca [Durka, 2009, s. 238].

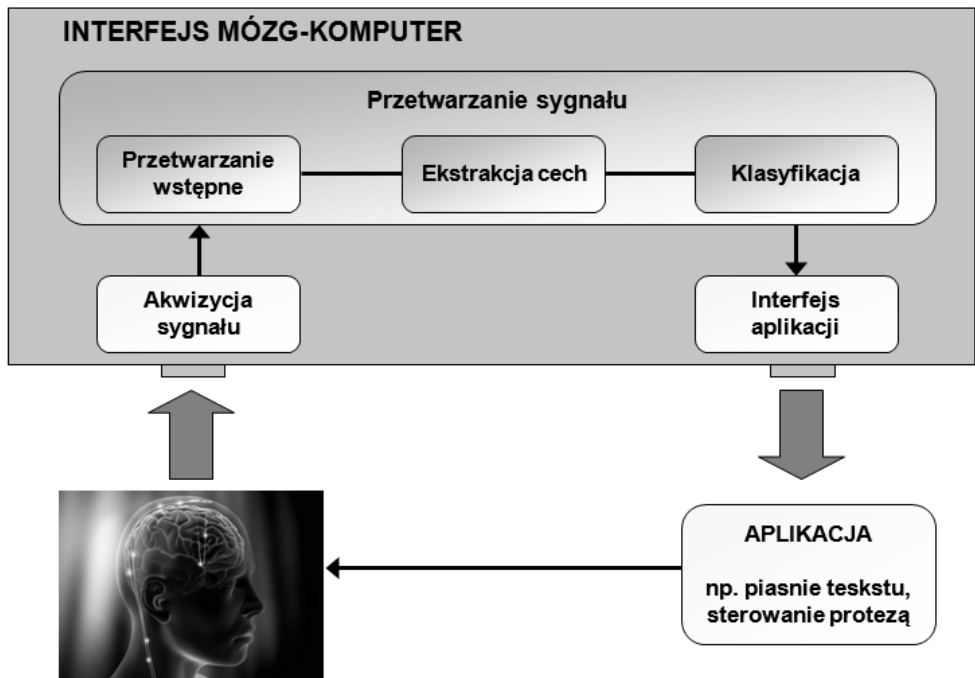
3. Charakterystyka interfejsu mózg-komputer (BCI – Brain-Computer Interface)

Interfejs mózg-komputer to rozwiązanie techniczne, pozwalające na bezpośrednią komunikację pomiędzy mózgiem a odpowiednimi, wybranymi do tego celu, technicznymi urządzeniami zewnętrznymi. Podstawowym celem prac badawczych prowadzonych nad interfejsem mózg-komputer jest usprawnienie lub/i/ naprawa działania ludzkich zmysłów lub/i/ czynności ruchowych. W komercyjnych zastosowaniach opisywana technologia dostępna jest przykładowo jako zamienniki joysticków lub klawiatur komputera [http://www.ele.uri.edu/courses/bme281/F12/JamesB_1.pdf, 2013].

Badania w opisywanym obszarze naukowym interfejsu mózg-komputer prowadzone są od wielu lat. Ich intensyfikacja w ostatnim okresie wynika z postępu technologicznego w zakresie przetwarzania sygnałów w czasie rzeczywistym i wykorzystania możliwości bardzo szybkich komputerów. Umożliwiło to stworzenie i praktyczną implementację wielu zastosowań. Można to ująć w następującym historycznym skrócie [http://www.ele.uri.edu/courses/bme281/F12/JamesB_1.pdf, 2013]:

- Lata 70. University of California – Los Angeles (UCLA) – rozpoczęto badania nad BCI, po raz pierwszy wprowadzono termin „*interfejs mózg-komputer*” w publikacjach naukowych.
- Od tego czasu dziedzina zastosowań BCI stale się rozwija w kierunku m.in. neuroprotetyki, której celem jest przywrócenie uszkodzonego słuchu, wzroku i czynności ruchowych.
- Po latach doświadczeń na zwierzętach pierwsze neuroprotezy implantowane ludziom pojawiły się w połowie lat dziewięćdziesiątych.
- Choć idea interfejsów mózg-komputer nie jest najnowsza, to dopiero zastosowanie przetwarzania sygnałów w czasie rzeczywistym i wykorzystanie szybkich komputerów, umożliwiło znaczący rozwój interfejsu w sensie zastosowań praktycznych.

Aktualne systemy BCI bazują na odczytaniu wybranych sygnałów bioelektrycznej aktywności mózgu, zebranych bezpośrednio z mózgu, czyli inwazyjnie lub z powierzchni skóry czaszki, a więc bezinwazyjnie. W dalszej kolejności ma miejsce odpowiednie ich przetworzenie, wydobycie czyli ekstrakcja cech, selekcja tych cech i wreszcie wykorzystanie ich w procesie klasyfikacji. Działanie interfejsu mózg-komputer prezentuje rysunek 1.



Rys. 1. Poglądowe działanie BCI – interfejsu mózg-komputer

Źródło: opracowanie własne

Metody odczytywania aktywności mózgu wykorzystywane w tworzeniu interfejsu mózg-komputer, określane jako bezinwazyjne, czyli oparte na EEG dzieli się na trzy rodzaje. Należą do nich metody [<http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=1840314>, 2013]:

- SSVEP,
- P300,
- ERD/ERS.

Metody oparte na EEG to nieinwazyjne metody diagnostyczne służące do badania bioelektrycznej czynności mózgu za pomocą elektroencefalografu. Badanie polega na odpowiednim rozmieszczeniu na powierzchni skóry czaszki elektrod, które rejestrują zmiany potencjału elektrycznego na powierzchni skóry, pochodzące od aktywności neuronów kory mózgowej i po odpowiednim ich wzmocnieniu tworzą z nich zapis w postaci elektroencefalogramu. Jeśli elektrody umieszczone są bezpośrednio na korze mózgu (np. podczas operacji) badanie nosi nazwę elektrokortkografii (ECoG).

W standardowym badaniu przydatnym w tworzeniu interfejsu mózg-komputer umieszcza się 19 elektrod należących do systemu 10-20, zalecanego przez Międzynarodową Federację Neurofizjologii Klinicznej IFCN. Rozmieszczenie jest wtedy następujące: osiem elektrod nad każdą półkulą oraz trzy elektrody w linii pośrodkowej. Otrzymane w tym badaniu aktywności mózgu są charakteryzowane przez następujące fale:

- Fale delta (δ) mające częstotliwość do 4 Hz, obserwowane głównie w 3. i 4. stadium snu (stadium NREM).
- Fale theta (θ) mające częstotliwość od 4 do 8 Hz. Aktywność theta może być zaobserwowana podczas stanów hipnotycznych takich jak trans, hipnoza, lekki sen. Związane są z 1. i 2. stadium snu NREM. Odmienny rodzaj fal theta jest związany z aktywnością poznawczą, w szczególności uwagą, a także procesami pamięciowymi (tzw. rytm FM θ – frontal midline theta).
- Fale alfa (α) mające częstotliwość od 8 do 13 Hz. Ich amplituda wynosi około 30-100 μ V. Fale alpha są dobrze widoczne przy braku bodźców wzrokowych (w warunkach zamkniętych oczu u osoby badanej). Ich stłumienie następuje podczas percepcji wzrokowej. Fale alfa związane są również ze stanem relaksu i obniżonym poziomem aktywności poznawczej.
- Fale beta (β) mające częstotliwość od 12 do około 30 Hz i amplitudę poniżej 30 μ V. Obrazują one zaangażowanie kory mózgowej w aktywność poznawczą. Fale beta o małej amplitudzie występują podczas koncentracji uwagi. Dodatkowo, mogą być wywołane przez różne patologie oraz substancje chemiczne takie jak benzodiazepiny.
Wśród BCI opartych o EEG, najefektywniej działają trzy podstawowe paradygmaty:
- SSVEP – oparte o koncentrowanie uwagi na symbolu migającym z częstością, która jest odzwierciedlana w EEG. Na przykład na matrycy cyfr 3x3 każda klatka miga z inną częstością. Skoncentrowanie uwagi na jednej z cyfr powoduje pojawienie się w EEG odpowiadającej częstości.
- P300 – oparte o detekcję potencjałów wywołanych przez podświetlenie np. oczekiwanej litery. Tu najczęściej podświetlane są wiersze i kolumny macierzy liter. Podświetlenie wiersza lub kolumny, w której znajduje się litera, na której koncentrujemy uwagę, powoduje pojawienie się specyficznego potencjału wywołanego.
- ERD/ERS – oparte o odczyt intencji ruchu prawą/lewą ręką i np. stopą. Ten najbardziej „naturalny” tryb sterowania przez EEG, w którym np. wyobrażenie ruchu prawą ręką może oznaczać „skręć w prawo”, a ruchu stopą – „poruszaj się do przodu”, jest jednocześnie najbardziej skomplikowane w realizacji. Odróżnienie intencji ruchu np. lewą i prawą kończyną możliwe jest częściowo dzięki lateralizacji funkcji mózgu, więc wymaga stosunkowo dużej ilości elektrod. Jeszcze trudniejsza jest detekcja samych ERD/ERS, które w „czystej” postaci widoczne są po uśrednieniu EEG z wielu powtórzeń tego samego wyobrażenia.

Do metod inwazyjnych odczytywania aktywności mózgu wykorzystywanych w tworzeniu interfejsu mózg-komputer zaliczane są [<http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=1840314>, 2013]:

- implantowane elektrody domózgowe,
- systemy oparte na fMRI (fMRI = functional Magnetic Resonance Imaging),
- systemy oparte na NIRS (NIRS = Near Infrared Spectroscopy).

Implantowane elektrody domózgowe wszczepiane są do mózgu w celu połączenia z odpowiednim urządzeniem elektronicznym. Mogą one rejestrować potencjał elektryczny mózgu lub stymulować neurony impulsami elektrycznymi pochodzącymi ze źródła zewnętrznego. Natomiast systemy oparte na fMRI określane jako funkcjonalny magnetyczny

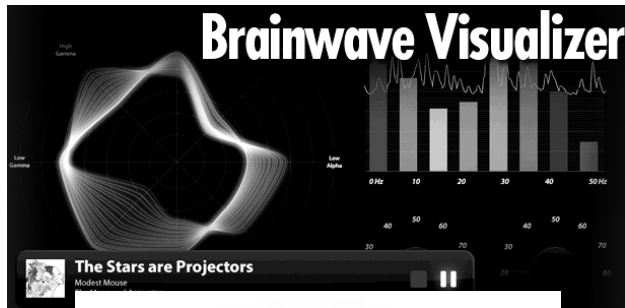
rezonans jądrowy to wyspecjalizowana odmiana obrazowania rezonansu magnetycznego. Za pomocą tej metody mierzona jest hemodynamiczna odpowiedź ośrodkowego układu nerwowego. Od początku lat dziewięćdziesiątych fMRI stał się dominującą metodą obrazowania mózgu ze względu na niską inwazyjność, brak promieniowania jonizującego i stosunkowo szeroki dostęp. Systemy oparte na NIRS obejmują technikę wizualizacji aktywności mózgu, polegającą na przepuszczeniu promieni lasera przez czaszkę osoby badanej. Lasery te są bardzo słabe i pracują z częstotliwością fali świetlnej (bliskiej podczerwieni), dla której czaszka jest przezroczysta. Krew zawierająca tlen absorbuje inne częstotliwości fal świetlnych niż krew, w której tlen został już pochłonięty. Stąd obserwując ilość światła o różnych częstotliwościach, odbijającą się od mózgu, naukowcy mogą śledzić przepływ krwi. W wypadku tworzenia mapy aktywacji technika ta jest nazywana tomografią optyczną światła rozproszonego (DOT). W przypadku rejestrowania rozproszenia światła w wyniku zmian w komórkach dokonujących się podczas pobudzenia neuronów jest to sygnał optyczny związany ze zdarzeniem (EROS) [<http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=1840314>, 2013].

4. Zastosowania praktyczne systemu BCI = Brain-Computer Interface – interfejsu mózg – komputer

Głównym zastosowaniem BCI interfejsu mózg-komputer jest obszar medycyny. System mózg-komputer umożliwia komunikację ze światem zewnętrznym pacjentom w ciężkich stadiach takich chorób, jak stwardnienie zanikowe boczne (*ang. amyotrophic lateral sclerosis, ALS*), udar mózgowy podkorowy, Zespół Guillaina-Barrégo, mózgowie porażenie dziecięce (*ang. cerebral palsy*), czy stwardnienie rozsiane (*SM*). Przykładem jest kosmolog Stephen Hawking, który żyje już 40 lat z ALS i z powodzeniem prowadził jeszcze do niedawna wykłady za pomocą generatora mowy sterowanego ruchami gałek ocznych. Stanowi to praktyczny przykład tak zwanego zależnego interfejsu mózg-komputer (*ang. dependent BCI*).

Drugim obszarem zastosowania BCI interfejsu mózg-komputer jest wojsko. Zastosowania wojskowe są z naturalnych względów znacznie mniej reprezentowane w publikacjach, jednak wydaje się, że nakłady na te badania są również bardzo duże [O'Shea, 2012, s. 151].

W dalszej kolejności w ramach praktycznych rozwiązań opartych na wizualizacji pracy mózgu metodą EEG, wykorzystanych w interfejsie mózg-komputer, możliwych do zakupienia przez przeciętnego użytkownika zostanie przedstawionych kilka rozwiązań komercyjnych. Rozwiązanie komercyjne o nazwie NeuroSky, zawiera dwie gry. Jedną z nich to Visualizer, pozwalająca obserwować reakcję mózgu na muzykę [<http://company.neurosky.com>, 2013]. Zestaw z grą prezentuje rysunek 2.



MindSet

\$199.00

Rys. 2. Zestaw NeuroSky: gra Visualizer, pozwalająca obserwować reakcję mózgu na muzykę [<http://company.neurosky.com>, 2013]

Druga z gier dostępnych w zestawie NeuroSky nosi nazwę NeuroBoy. Pozwala ona na przemieszczanie przedmiotów za pomocą fal mózgowych. Grę prezentuje rysunek 3.



Rys. 3. Zestaw NeuroSky: gra NeuroBoy, pozwalająca na przemieszczanie przedmiotów za pomocą fal mózgowych [<http://company.neurosky.com>, 2013]

Dodatkowo NeuroSky zawiera zestaw dla developerów, umożliwiający tworzenie własnych aplikacji. Istnieje również wiele dostępnych gier i aplikacji współpracujących z NeuroSky, przykładowe przedstawia rysunek 4.



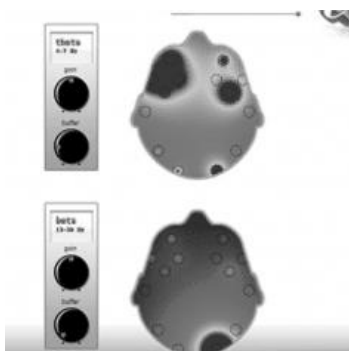
Rys. 4. Zestaw NeuroSky: gry i aplikacje [<http://company.neurosky.com>, 2013]

Kolejny komercyjny zestaw kilku gier i aplikacji to Emotiv 1/2. Jest to przedstawione na rysunku 5 urządzenie oparte również na metodzie EEG neuroobrazowania pracy mózgu, z uzyskiwaniem danych za pomocą 14 elektrod [<http://www.emotiv.com>, 2013].



Rys. 5. Urządzenie do zbierania danych o pracy mózgu w zestawie Emotiv 1/2 [<http://www.emotiv.com> dostęp, 2013]

Kolejne rysunki 6. i 7. przedstawiają przykładowe, dostępne w zestawie Emotiv 1/2 gry i aplikacje.



Rys. 7. Aplikacja z zestawu Emotiv 1/2 o nazwie Brain Activity Map, pozwalająca na obrazowanie aktywności poszczególnych obszarów mózgu [<http://www.emotiv.com>, 2013]



Special Nav & App Keys

Rys. 8. Urządzenie z zestawu Emotiv 1/2 o nazwie Neuro Key, klawiatura operowana za pomocą fal mózgowych [<http://www.emotiv.com>, 2013]

Kolejne rozwiązanie komercyjne nosi nazwę Emotiv 2/2. Przykładowe dostępne w nim aplikacje i gry pokazują rysunki 9 i 10.



Rys. 9. Aplikacja z zestawu Emotiv 2/2 o nazwie Mind Photo Viewer, pozwalająca przeglądać zdjęcia za pomocą fal mózgowych [<http://www.emotiv.com>, 2013]



Rys. 10. Gra przygodowo-fantastyczna z zestawu Emotiv 2/2 o nazwie Brain Activity Map Spirit Mountain, sterowana za pomocą fal mózgowych

5. Podsumowanie

Badania nad mózgiem trwają już jakiś czas i charakteryzują się dużą dynamiką wzrostową [Ramachandran, 2012, s. 11]. Wpisuje się w nie obszar przedstawiony w prezentowanym opracowaniu BCI interfejs mózg-komputer. Nie ulega wątpliwości, że omówiona implementacja interfejsu mózg-komputer ma szerokie możliwości i wiele zastosowań, a urządzenia i aplikacje tego typu będą w przyszłości rozwijane i coraz bardziej powszechne w zastosowaniu.

Przykład reprezentowanego obecnie podejścia naukowego w obszarze badań nad mózgiem, którym zajmuje się głównie neurobiologia, stanowi wydana w lutym 2011 roku książka Jerzego Vetulaniego „Mózg: fascynacje, problemy, tajemnice”. Pisze on: [...] *Neurobiologia jest dziś jedną z najważniejszych i najbardziej wszechstronnych nauk. Odpowiada lub pomaga odpowiedzieć na wielkie pytania, z którymi od dawien dawna mierzyła się filozofia, teologia, psychologia i nauki społeczne, a także małe pytania, które zadajemy sobie na co dzień* [...] [Vetulani, 2011, s. 43]. Kolejny przykład stanowi książka Blakemore Sahar-Jayne, Frith Uta „Jak uczy się mózg”. Autorki będące pracownikami naukowymi w Institute of Cognitive Neuroscience w Londyńskim University College, od lat zajmują się problemami dysleksji, autyzmu i zespołu Aspergera. Przykładowo zadawane przez nie pytania to: *W jaki sposób mózg ludzi głuchych przetwarza język migowy?, Czy naśladowanie jest czymś dobrym, czy tłumi ono zdolności twórcze?* Autorki nie udzielają odpowiedzi na postawione pytania, gdyż – jak same stwierdzają – nie mają stosownej wiedzy pedagogicznej. Piszą: [...] *jest obecnie bardzo niewiele materiałów na temat znaczenia badań nad mózgiem dla edukacji, które byłyby przystępne dla niespecjalistów* [...] *powstała luka między nauką o mózgu a pedagogiką* [...] [Blakemore, Frith, 2008, s. 3].

Problematyka naukowa dotycząca interfejsu mózg-komputer wpisuje się zarówno w obszar nauk technicznych, jak i społecznych. Z pewnością jest bardzo przydatna w obszarze praktycznych zastosowań w pedagogice specjalnej, obejmując swym zasięgiem osoby z niepełnosprawnością.

Bibliografia

Blakemore S. J., Frith U.: *Jak uczy się mózg*. Wydawca: Uniwersytet Jagielloński, Kraków 2008

Duch W.: *Architektury kognitywne, czyli jak zbudować sztuczny umysł*.

[W:] *Neurocybernetyka teoretyczna*. Red. nauk. R. Tadeusiewicz. Wydawca: Uniwersytet Warszawski, Warszawa 2009

Durka P.: *Badanie funkcji mózgu z wykorzystaniem encefalografii*. [W:] *Neurocybernetyka teoretyczna*. Red. nauk. R. Tadeusiewicz. Wydawca: Uniwersytet Warszawski, Warszawa 2009

O'Shea M.: *Mózg*. Gdańskie Wydawnictwo Psychologiczne, Gdańsk 2012

Ramachandran V. S.: *Neuronauka o podstawach człowieczeństwa. O czym mówi mózg*.

Wydawca: Uniwersytet Warszawski, Warszawa 2012

Vetulani J.: *Mózg: fascynacje, problemy, tajemnice*. Wydaw. Znak, Kraków 2011

http://www.ele.uri.edu/courses/bme281/F12/JamesB_1.pdf [dostęp 21.05.2013]

<http://www.emeraldinsight.com/journals.htm?articleid=1840314> [dostęp 21.05.2013]

<http://company.neurosky.com> [dostęp 21.05.2013]

<http://wikipedia.pl/> [dostęp 21.05.2013]

<http://www.emotiv.com> [dostęp 21.05.2013]