

Emilia Mikołajewska

10 Wojskowy Szpital Kliniczny z Polikliniką SP ZOZ w Bydgoszczy,

Dariusz Mikołajewski

Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

Interfejsy mózg-komputer jako rozwiązania dla osób niepełnosprawnych z uszkodzeniami układu nerwowego

Streszczenie

Wiele osób z najpoważniejszymi deficytami wymaga zapewnienia alternatywnych sposobów komunikacji i sterowania. Jednym z możliwych rozwiązań są interfejsy mózg-komputer, wykorzystujące pomiary aktywności elektrofizjologicznej do pozamięśniowej komunikacji człowieka z otoczeniem. Celem niniejszego artykułu jest ocena potencjału obecnych i przyszłych interfejsów mózg-komputer w terapii i opiece nad pacjentami z najpoważniejszymi deficytami, w tym wynikającymi z uszkodzeń układu nerwowego.

Słowa kluczowe: rehabilitacja, deficyty neurologiczne, zaburzenia świadomości, interfejs mózg-komputer, neuroproteza

Brain-computer interfaces as solutions for disabled persons with damages of the nervous system

Summary

Many people with the most severe deficits require providing alternative means of the communication and control. One of the possible solutions are brain-computer interfaces utilizing electrophysiological activity measurements to non-muscular communication with the outside world. The aim of this article is to evaluate the potential of current and future brain-computer interfaces in the therapy and care of patients with the most severe deficits, including those resulting from damages of the nervous system.

Keywords: rehabilitation, neurological deficits, disorders of consciousness, brain-computer interface, neuroprosthesis

Wprowadzenie

Postęp medycyny powoduje, że współczesna służba zdrowia i opieka społeczna stają w obliczu rosnącej przeżywalności wypadków komunikacyjnych, ciężkich schorzeń, zatruc itp. Mają one jedną wspólną cechę: powrót do pełnego zdrowia jest trudny i długotrwały, a niekiedy wręcz niemożliwy. Co więcej – mogą być one przyczyną poważnych deficytów, w tym neurologicznych, odbijających się na całym dalszym życiu. Przybywa również pacjentów w stanach najcięższych, wymagających szczególnie pieczołowitego podejścia, jednak nie rokujących nadziei na osiągnięcie samodzielności przy wykorzystaniu dotychczas dostępnych środków. Biopsychospołeczny model opieki zdrowotnej każe nam zająć się takimi

pacjentami holistycznie, zapewniając im nie tylko odpowiednią opiekę medyczną i pomoc społeczną, ale również odpowiednio wysoką jakość życia, sposobność komunikacji, a gdzie to możliwe, również nauki i pracy. W tej grupie niezbędne są zatem nowatorskie rozwiązania, także interdyscyplinarne, które rozszerzą ich możliwości i dadzą szansę na lepsze życie.

Od wielu już lat trwa współpraca nauk medycznych z naukami technicznymi (m. in. informatyką medyczną, inżynierią biomedyczną i rehabilitacyjną) oraz naukami poznawczymi (m. in. kognitywistyką), owocując urządzeniami znacznie rozwijającymi dotychczasowy repertuar oddziaływań medycznych o roboty rehabilitacyjne czy interfejsy mózg-komputer.

Analiza piśmiennictwa z zakresu interfejsów mózg-komputer (ang. *brain-computer interfaces* – BCIs) w wybranych medycznych bazach danych (PubMed, PeEDro, CINAHL i Scopus) przynosi interesujące rezultaty:

- liczba artykułów ze słowem kluczowym „BCI” wyniosła 1 515,
- od 2003 r. obserwuje się dynamiczny wzrost liczby publikacji, przy czym stosunek liczby prac na ten temat opublikowanych w 2011 r. do liczby prac opublikowanych w 2002 r. wyniósł 16:1,
- ograniczona liczba randomizowanych prób klinicznych (7%) oraz opisów przypadków (2%),
- ograniczona liczba prac przeglądowych (7%), całkowity brak wytycznych klinicznych.

Liczba publikacji na temat neuroprotezy jest odpowiednio mniejsza (272), ale o zbliżonej tendencji i charakterystyce. Wskazuje to na pożądany wzrost nie tylko ilości badań, ale i analiz w omawianym zakresie. Co ciekawe, idea BCI nie jest nowa – technika zapisu sygnałów EEG ma prawie 90 lat (Berger, 1924 r.), koncepcja sztucznej stymulacji mózgu – prawie 70 lat, a koncepcja sztucznej inteligencji i testu Turinga – ponad 60 lat¹. Jednak idea BCI długo uważana była za trudną i odległą w realizacji². Sytuacja ta uległa zmianie dopiero w ciągu ostatnich 10. lat.

Celem niniejszego artykułu jest ocena potencjału obecnych i przyszłych interfejsów mózg-komputer w poprawie samodzielności osób niepełnosprawnych z najpoważniejszymi deficytami, w tym wynikającymi z uszkodzeń układu nerwowego.

Podstawy technologii interfejsów mózg-komputer

Interfejsy mózg-komputer³ wykorzystują pomiary aktywności elektrofizjologicznej ośrodkowego układu nerwowego (np. sygnałów bioelektrycznych mózgu, takich jak EEG) do pozamięśniowej komunikacji człowieka z otoczeniem. Zatem BCI można uważać

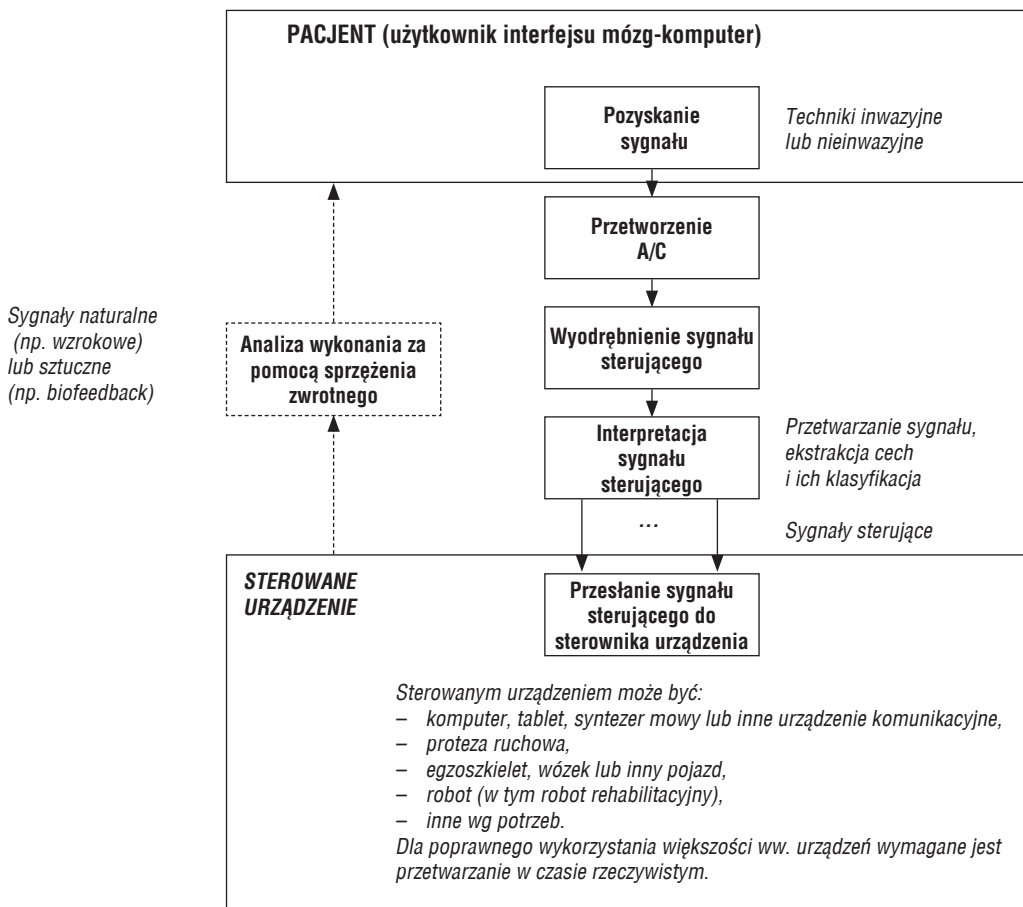
¹ Por. A. Turing, *Computing Machinery and Intelligence*, „Mind” 1950, Nr LIX(236), passim

² Por. L. F. Nicolas-Alonso, J. Gomez-Gil, *Brain computer interfaces, a review*, „Sensors (Basel)” 2012, Nr 12(2), passim; J. J. Shih, D. J. Krusienski, J. R. Wolpaw, *Brain-computer interfaces in medicine*, „Mayo Clinic Proceedings” 2012, Nr 87(3), passim

³ Por. E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Interfejsy mózg-komputer – zastosowania cywilne i wojskowe*, „Kwartalnik Bellona” 2011, Nr 2, s. 123–133

Słowo „interfejs” (ang. *interface*), zgodnie ze Słownikiem Języka Polskiego PWN, oznacza „zasady łączenia ze sobą i współpracy dwóch różnych urządzeń lub programów; też: urządzenie lub program realizujące te zasady”. Por. Słownik Języka Polskiego PWN, wersja internetowa: <http://sjp.pwn.pl/>.

za ogniwo łączące ośrodkowy układ nerwowy człowieka z komputerem – pozyskują one informację z układu nerwowego (np. w formie sygnału EEG z kory mózgu) i przetwarzają w celu wyodrębnienia (ekstrakcji) określonych cech (parametrów) sygnału. Poziom tych cech lub ich zmiana są następnie interpretowane (klasyfikowane), a wynik wykorzystywany jako informacja sterująca dla komputera (np. komunikacji) lub sterowanych za jego pomocą urządzeń (wózków, egzoszkieleatów, ale również sztucznych kończyn). Podobnie jak w procesach naturalnych (np. kontroli ruchu), tak i w tym przypadku zachodzi potrzeba istnienia sprzężenia zwrotnego. Może być ono realizowane za pomocą zachowanych przez pacjenta (użytkownika BCI) zmysłów (np. kontrola wzrokowa) lub z wykorzystaniem sztucznego wspomaganie (np. urządzeń do biofeedbacku). Proces ten przedstawia rysunek 1.



Rysunek 1. Idea interfejsów mózg-komputer

Źródło: E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Interfejsy mózg-komputer – zastosowania cywilne i wojskowe*, „Kwartalnik Bellona” 2011, Nr 2, s. 128; E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Neuroprostheses for increasing disabled patients’ mobility and control*, „Advances in Clinical and Experimental Medicine” 2012, Nr 21 (2), s. 265; E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Neurorehabilitacja XXI wieku: Techniki teleinformatyczne*, Kraków, Impuls, 2011, s. 74-76

Tabela 1. Wybrane sygnały bioelektryczne możliwe do wykorzystania przez interfejsy mózg-komputer (kolejność alfabetyczna)

Nazwa sygnału	Krótką charakterystyka
elektroencefalogram (ang. <i>electroencephalogram</i> – EEG)	potencjał endogeny P300, rytm alfa (8–12 Hz) lub rytm beta (18–25 Hz), elektryczne odpowiedzi wywołane SSVEP, desynchronizacja i synchronizacja EEG związana z bodźcem ERD/ERS
elektrokardiogram (ang. <i>electrocardiogram</i> – EKG, ECG)	głównie <i>precordial mapping</i> z powierzchni klatki piersiowej
elektrokochleogram (ang. <i>electrocochleogram</i> – EcochG)	zapis odpowiedzi elektrycznej w ślimaku ucha wewnętrznego powstałej na skutek bodźca słuchowego
elektrokortykogram (ang. <i>electrocorticogram</i> – EcoG)	odbierany inwazyjnie bezpośrednio z kory mózgowej
elektromiogram (ang. <i>electromyogram</i> – EMG)	zapis sygnałów elektrycznych związanych z pracą mięśni: pojedynczego włókna, grupy włókien lub całego mięśnia
elektroneurogram (ang. <i>electroneurogram</i> – ENG)	zapis sygnałów elektrycznych transmitowanych w nerwach obwodowych
elektrookulogram (ang. <i>electrooculogram</i> – EOG)	zapisu ruchu gałek ocznych – por. <i>eye tracking</i>
elektroretinogram (ang. <i>electroretinogram</i> – ERG)	zapis odpowiedzi elektrycznej siatkówki na bodziec świetlny, różne rodzaje: PERG, FCERG, mfERG
elektrogram pęczka Hisa (ang. <i>His Bundle Electrogram</i> – HBE)	odbierany inwazyjnie elektrodą wewnątrzsercową
potencjały ruchowe (ang. <i>Average Operant Potential</i> – AOP)	sygnały mózgowie towarzyszące zamierzonemu wykonaniu ruchu
powierzchniowy elektrogram pęczka Hisa (ang. <i>Surface His Bundle Electrogram</i> – SHBE)	odbierany nieinwazyjnie z powierzchni klatki piersiowej
słuchowe odpowiedzi wywołane (ang. <i>Auditory Evoked Responses</i> – AER)	różne rodzaje, otrzymywane z różnych ośrodków na skutek różnych bodźców: BSER, MLER, KLER
somatosensoryczne odpowiedzi wywołane (ang. <i>Somatosensory Evoked Response</i> – SER)	odpowiedzi układu czuciowego na bodźce m.in. dotykowe (np. laserowe LEP) i termiczne (np. ciepłe ChEP)
wzrokowe potencjały wywołane (ang. <i>Visual Evoked Potential, Visual Evoked Response</i> – WPW, VEP, VER)	wytwarzane w korze wzrokowej odpowiedzi na bodźce świetlne, rodzaje: FVEP, PVEP
węchowe odpowiedzi wywołane (ang. <i>Olfactory Evoked Responses</i> – OER)	odpowiedzi układu węchowego na bodźce zapachowe
ujemna fala oczekiwania (ang. <i>Contingent Negative Variation</i> – CNV)	fizjologiczny wskaźnik uwagi selektywnej

Źródło: E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Interfejsy mózg-komputer – zastosowania cywilne i wojskowe*, „Kwartalnik Bellona” 2011, Nr 2, s. 129–130

Neuroprotezy (ang. *neuroprostheses*)⁴ to, w dużym uproszczeniu, protezy zastępujące uszkodzone elementy układu nerwowego. W części przypadków mogą one umożliwić

⁴ Por. E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Technical and medical problems concerning wider use of neuroprostheses in patients with neurologic disorders*, „Pielęgniarstwo Neurologiczne i Neurochirurgiczne” 2012, Nr 1(3), passim; E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Neuroprostheses for increasing disabled patients’ mobility and control*, „Advances in Clinical and Experimental Medicine” 2012, Nr 21(2), passim

przywrócenie (u osób po uszkodzeniach traumatycznych lub wynikających z przebytych schorzeń) lub pozyskanie (u osób z deficytami wrodzonymi) określonych funkcji⁵. Neuroprotezy nie muszą (choć mogą) pozyskiwać sygnału sterującego bezpośrednio z ośrodkowego układu nerwowego.

Sygnały możliwe do wykorzystania przez interfejsy mózg-komputer (również: do monitorowania stanu zdrowia i szybkiego automatycznego ostrzegania o zaburzeniach) zostały przedstawione w tabeli 1.

Podstawowe z sygnałów bioelektrycznych wykorzystywanych przez BCI są następujące:

- pozyskiwane nieinwazyjnie poprzez skórę głowy: potencjał endogeny P300, rytm alfa (8–12 Hz) lub rytm beta (18–25 Hz), elektryczne odpowiedzi wywołane (ang. *steady-state visual evoked potentials* – SSVEP), desynchronizacja i synchronizacja EEG związana z bodźcem (ang. *event-related desynchronization/synchronization* – ERD/ERS),
- otrzymywane dzięki elektrodom inwazyjnie implantowanym do mózgu.

Duże znaczenie ma fakt, że obszar mózgu, z którego pobierane są sygnały sterujące, nie musi dokładnie odpowiadać sterowanej funkcji u zdrowego człowieka – neuroplastyczność układu nerwowego (w pewnych granicach) pozwala na ominięcie uszkodzonych obszarów. Jeśli przy sterowaniu BCI występuje brak zgodności pomiędzy funkcjami zachowanych obszarów mózgu a ich naturalnym (u zdrowego człowieka) przeznaczeniem, wówczas w celu nauczenia układu nerwowego „nowej” aktywności (tj. sterowania BCI) następuje konieczność reorganizacji aktywności neuronalnej w wykorzystywanym obszarze mózgu. Niestety, taka zmiana aktywności części mózgu wymaga od pacjenta (użytkownika BCI) nauczenia się wykorzystywania BCI od podstaw (w ramach szkolenia, o którym będzie mowa dalej), gdyż dotychczas wyuczone wzorce naturalne mogą okazać się nieprzydatne.

Sygnały wykorzystywane przez BCI są stałe i niezmiennie od lat, lecz wymagania na nie są niełatwe do spełnienia. Sygnał taki powinien być:

- łatwy do pozyskania (również nieinwazyjnie), w tym o wystarczającej amplitudzie, bez zakłóceń i artefaktów,
- stabilny, niewrażliwy na błędy i zakłócenia, wliczając te wywołane wahaniami stanu zdrowia, nastroju itp.,
- zapewniający szybkość transmisji wystarczającą do komunikacji lub wielokanałowego sterowania urządzeniami,
- szybki w przetwarzaniu i interpretacji, a przez to łatwy do wykorzystania w układach czasu rzeczywistego,
- bezpieczny w użyciu,

⁵ Zakres stosowania neuroprotez nie ogranicza się jedynie do układu ruchu, ale również dotyczą one zmysłów słuchu czy wzroku.

- umożliwiający produkcję masową (tzn. urządzenia mogą być dobierane i dostrajane indywidualnie, ale nie mogą być produkowane na indywidualne zamówienie),
- bez skutków ubocznych.

Zdolności adaptacyjne pacjenta (użytkownika) do BCI (i wzajemnie) wielokrotnie były już dyskutowane. Zakłada się, że możliwe są trzy rozwiązania w tym zakresie:

- adaptacja użytkownika – ciągłe szkolenie użytkownika w utrzymywaniu właściwych, stabilnych poziomów i charakterystyk sygnałów,
- adaptacja systemu – wykorzystanie uczenia maszynowego do poprawy parametrów BCI (wyodrębniania i interpretacji sygnału sterującego),
- wypadkowa obydwu tych podejść⁶.

Co ciekawe, odpowiedź nie jest jednoznaczna i zależy m. in. od wykorzystywanego sygnału i charakterystyki BCI. Potwierdza to m. in. badanie Denisa McFarlanda i in.⁷, w którym sposoby adaptacji pacjenta (użytkownika) do interfejsu dla BCI opartego na rytmie sensomotorycznym (ang. *sensorimotor rhythms-based BCI*, *SMR-based BCI*) musiały być odmienne od odpowiedników dla BCI opartego na P300 (ang. *P300-based BCI*).

Wykorzystanie interfejsów mózg-komputer do komunikacji

Komunikacja z otoczeniem jest podstawową potrzebą człowieka. Obejmuje ona nie tylko różnorodne kanały komunikacji werbalnej (wypowiedzi, ich znaczenie i kontekst), niewerbalnej (pozostałe zmysły, mimika, gestykulacja, pozycja ciała, relacje interpersonalne itd.) oraz niebezpośredniej (tradycyjne listy, e-maile, sms), ale też służy wyrażeniu potrzeb, dążeń i całej złożonej osobowości⁸.

Wzrost świadomości społecznej w obszarze potrzeb osób niepełnosprawnych spowodował zwiększony nacisk na zaspokojenie ich pragnień również w tym zakresie. U osób z najcięższymi deficytami konieczne było znalezienie rozwiązań alternatywnych. Pomimo ułomności, znalezione rozwiązania, w tym oparte na BCI, próbują sprostać niezwykle trudnym wymaganiom obejmującym:

- zapewnienie dodatkowych kanałów na potrzeby czynności codziennego życia,
- umożliwienie badań i terapii,
- zwiększenie samodzielności pacjenta i jego motywacji⁹.

Korzyści z poprawy komunikacji osób z najcięższymi deficytami nie ograniczają się zatem jedynie do obszaru opieki zdrowotnej, ale mogą mieć ważny wymiar społeczny i ekonomiczny (choćby przez lepsze ukierunkowanie pomocy). Rysunek 2 przedstawia model

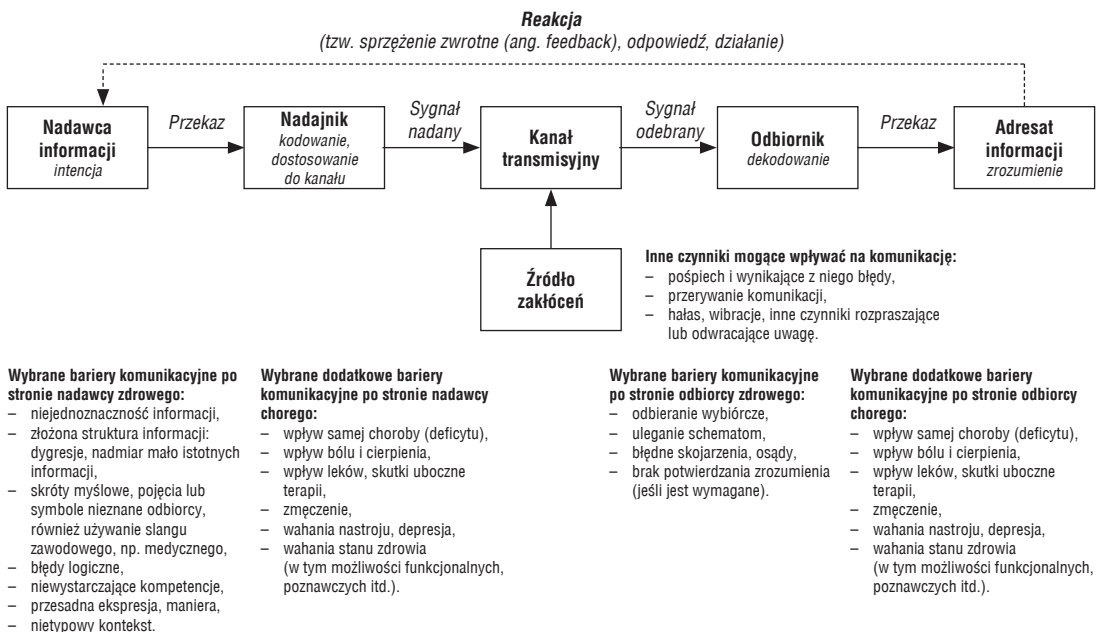
⁶ Por. D. J. McFarland, W. A. Sarnacki, J. R. Wolpaw, *Should the parameters of a bci translation algorithm be continually adapted?* „Journal of Neuroscience Methods” 2011, Nr 199 (1), passim

⁷ Tamże

⁸ Por. E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Komunikacja dla osób niepełnosprawnych w środowiskach nowych mediów*, „Lingua ac Communitas” 2012, vol. 22, s. 91-94

⁹ Tamże, s. 91-92

komunikowania się w kontekście czynników i barier wpływających na komunikację. Klasyfikacyjne bariery, dotyczące również osób zdrowych i w pełni sprawnych, wynikają głównie z różnic językowych, kulturowych, pojęciowych lub z niewłaściwego kontekstu. Osoby niepełnosprawne, ciężko chore i w podeszłym wieku, zarówno po stronie nadawcy, jak i odbiorcy, napotykają na dodatkowe utrudnienia w postaci wpływu samej choroby (deficytu), terapii (leków, metod terapeutycznych), ich skutków ubocznych, zwiększonego zmęczenia, wahań stanu zdrowia oraz nastroju. Bariery te, występując pojedynczo lub jednocześnie, mogą z różną intensywnością wpływać na ich zdolności funkcjonalne lub poznawcze, przekładając się bezpośrednio na ograniczenie lub nawet brak możliwości komunikacyjnych. W tej sytuacji nawet proste potwierdzenie zrozumienia przekazywanej informacji może stanowić problem.



Rysunek 2. Transmisyjny model komunikowania się wg Shannona i Weavera, odniesiony do potrzeb i możliwości osób niepełnosprawnych

Źródło: E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Komunikacja dla osób niepełnosprawnych w środowiskach nowych mediów*, „Lingua ac Communitas” 2012, vol. 22, s. 90; C. E. Shannon, *A mathematical theory of communication*, „The Bell System Technical Journal” 1948, Nr 27, passim

Warto zatem wypracować rozwiązania mniej podatne na oddziaływanie ww. barier, przewidywane do wykorzystania w każdych warunkach. Należą do nich urządzenia komunikacyjne oparte na interfejsach BCI. Jeden z możliwych wariantów przedstawia rysunek 3.

Za najbardziej zaawansowany obecnie medyczny interfejs BCI uważa się Wadsworth BCI System, oparty na wykorzystaniu EEG. Zakupu tego typu urządzeń można obecnie dokonać w Wadsworth Center w Albany (USA) lub w Helen Hayes Hospital w West Haverstraw (USA).



Rysunek 3. Idea wykorzystania interfejsów mózg-komputer do komunikacji/wariant/

Źródło: E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Interfejsy mózg-komputer – zastosowania cywilne i wojskowe*, „Kwartalnik Bellona” 2011, Nr 2, s. 127; E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Neuroprostheses for increasing disabled patients' mobility and control*, „Advances in Clinical and Experimental Medicine” 2012, Nr 21 (2), s. 265; E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Neurorehabilitacja XXI wieku. Techniki teleinformatyczne*, Kraków, Impuls, 2011, s. 74

Interfejs składa się z zestawu czujników zakładanych na głowę w formie elastycznej opaski oraz urządzenia odbiorczego, podłączonego do laptopa lub komputera stacjonarnego. Komputer wyposażony jest w oprogramowanie umożliwiające trening wykorzystania BCI oraz, stosownie do możliwości i potrzeb pacjenta (użytkownika BCI), oprogramowanie komunikacyjne lub sterujące poprzez BCI. Zgodnie z zapewnieniami obu ośrodków cała procedura wymaga jedynie kilku wizyt pacjenta oraz jego rodziny/opiekunów w celu doboru i dostrojenia interfejsu oraz treningu jego wykorzystania. Część procedury może być zrealizowana również w domu pacjenta. Wizyty kontrolne, w zależności od stanu zdrowia pacjenta i jego wprawy w posługiwaniu się BCI, wymagane są co 1–2 miesiące. Producent zapewnia serwis urządzeń i wsparcie użytkownika (helpdesk). Doświadczenia te, poparte badaniami klinicznymi, mogą posłużyć do wypracowania wytycznych klinicznych w zakresie instalowania, treningu i wykorzystania BCI. Wraz ze wzrostem liczby pacjentów zwiększać się będzie liczba danych w tym zakresie, przekładając się zarówno na usunięcie niedogodności dla pacjentów, jak i na poprawę jakości usług. Oczywiście, w przypadku interfejsów implantowanych oraz konieczności przeprowadzenia zabiegu neurochirurgicznego, procedura znacznie się komplikuje i wymaga zindywidualizowanego podejścia. Fakt ten wskazuje na położenie nacisku na wykorzystanie BCI nieimplantowanych, a jedynie w przypadkach, w których nie będzie to możliwe – implantowanych. Pozwoli to zarówno skrócić czas pobytu pacjenta w szpitalu (o ile będzie to konieczne), zmniejszyć ryzyko komplikacji i obniżyć koszty.

Podstawowy wpływ na efektywność instalacji BCI ma trening pacjenta. Podczas niego uczy się intuicyjnie wykorzystywać interfejsy w oparciu o symulator wykorzystywany w systemach do biofeedbacku. W miarę postępów w nauce, mierzonych np. ilością popełnionych przez ćwiczącego pacjenta błędów w realizowanych zadaniach (grach itp.), zwiększa się pewność użytkownika oraz precyzja wykorzystania urządzenia. Zdolności poszczególnych pacjentów w tym zakresie mogą być silnie zindywidualizowane (również biorąc pod uwagę np. wiek i przyzwyczajanie do urządzeń elektronicznych), niemniej jednak podstawowy trening może się zamknąć już nawet w kilku sesjach.

Wykorzystanie interfejsów mózg-komputer u pacjentów z poważnymi deficytami motorycznymi lub po amputacjach

Poprawa w zakresie deficytów motorycznych może zmienić życie pacjentów po udarach, urazach czaszkowo-mózgowych oraz osób z uszkodzeniami rdzenia kręgowego. Stąd obecność uzupełniających się tendencji występujących w ramach rehabilitacji:

- tendencja do pełniejszego wykorzystania ukrytego potencjału tkwiącego w dotychczasowych rozwiązaniach, m. in. elektrostymulacji funkcjonalnej (ang. *functional electrical stimulation* – FES) oraz biofeedbacku (w tym biofeedbacku opartego na elektromiografii),
- tendencja do stworzenia zupełnie nowych rozwiązań opartych na BCI i (najczęściej) robotycznych kończynach dolnych i górnych.

Rozwiązaniem pośrednim jest wykorzystanie sygnału z BCI do stymulacji zachowanych funkcji naturalnych kończyn (np. w przypadku uszkodzenia nerwów obwodowych). Pomimo wielu dotychczasowych rozwiązań, wprowadzonych do użytku m. in. w USA, badania w tym zakresie są wciąż prowadzone.

Na rysunku 4., oprócz rozwiązania naturalnego, czyli sterowania kończynami poprzez rdzeń kręgowy, przedstawiono dwa podstawowe warianty wykorzystania neuroprotezy. Stanowią one duże uproszczenie. Pierwszy z przedstawionych wariantów zakłada zachowanie naturalnego efektora (np. mięśnia) oraz zastąpienie (całkowite lub częściowe, w zależności od potrzeb) naturalnego układu sterowania ww. efektora przez elementy elektroniczne. Odpowiada to (w dużym uproszczeniu) uszkodzeniu rdzenia kręgowego. Na rysunku przedstawiono sterowanie bezpośrednio z mózgu za pomocą BCI, ale nie jest to niezbędne – neuroproteza ruchowa zastępująca kończynę może być sterowana z innego miejsca układu nerwowego (np. najbliższego kończynie) spełniającego wymagania w zakresie jakości sygnału oraz możliwości sterowania. Drugi z przedstawionych wariantów zakłada wykorzystanie zarówno sztucznego odpowiednika rdzenia kręgowego, jak i kończyny. Odpowiada to np. uszkodzeniu rdzenia kręgowego połączonego z amputacją kończyny.

Wydaje się, że ograniczenie stanowią tu przede wszystkim dwa zasadnicze problemy:

- złożoność ruchów kończyn dolnych i górnych oraz wynikająca z tego trudność w sterowaniu nimi za pomocą sygnałów z BCI (często jednokanałowych, o szybkości transmisji nie wyższej niż 60 bitów na sekundę),
- brak sztucznych kończyn spełniających wszystkie założenia – jest to szczególnie widoczne w obszarze kończyn górnych, gdzie złożoność ruchów dłoni jest trudna do odtworzenia w sztucznym układzie.

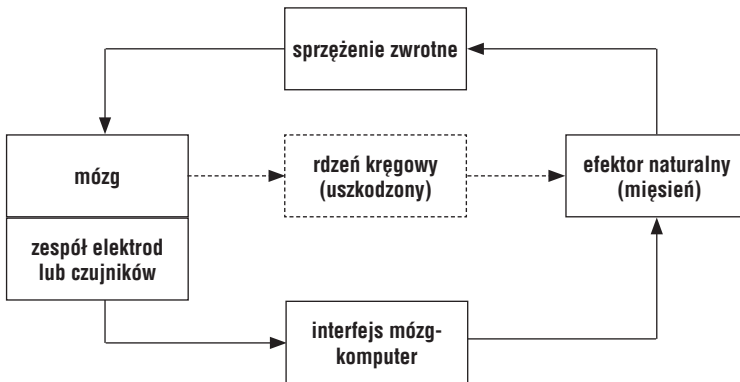
Pomimo przełomu, jakim było pokazanie sterowania sztuczną kończyną górną przez pacjenta z tetraplegią za pomocą interfejsu BrainGate w 2005 r.¹⁰ oraz prowadzenie dalszych

¹⁰ Por. L. R. Hochberg, M. D. Serruya, G. M. Friehs, *Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia*, „Nature” 2006, Nr 442(7099), passim

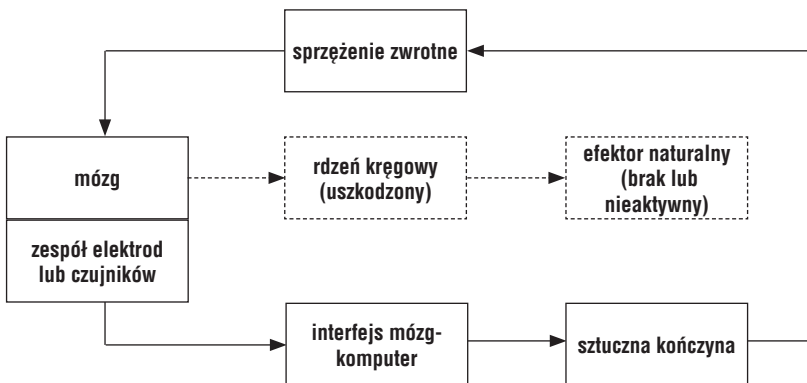
Rozwiązanie anatomiczne



Wariant I: uszkodzenie rdzenia kręgowego



Wariant II: uszkodzenie rdzenia kręgowego wraz z amputacją kończyny



Rysunek 4. Idea wykorzystania interfejsów mózg-komputer do sterowania neuroprotezami i innymi urządzeniami/warianty/

Źródło: E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Interfejsy mózg-komputer – zastosowania cywilne i wojskowe*, „Kwartalnik Bellona” 2011, Nr 2, s. 127; E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Neuroprostheses for increasing disabled patients’ mobility and control*, „Advances in Clinical and Experimental Medicine” 2012, Nr 21 (2), s. 265; E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Neurorehabilitacja XXI wieku: Techniki teleinformatyczne*, Kraków, Impuls, 2011, s. 75-76

badania nad rozwojem opisywanych rozwiązań, z ww. przyczyn nie można jeszcze mówić o pełnym dostępie do komercyjnych rozwiązań z obszaru zaawansowanych neuroprotez sterowanych z wykorzystaniem BCI.

Wykorzystanie interfejsów mózg-komputer u pacjentów z zaburzeniami świadomości

Zaburzenia świadomości (ang. *disorders of consciousness* – DOC) stanowią poważny problem medyczny. Należą do nich m. in. śpiączka (ang. *coma*), stan minimalnej świadomości (ang. *minimally conscious state* – MCS), stan wegetatywny (ang. *vegetative state*), przetrwały stan wegetatywny (ang. *persistent vegetative state* = *unresponsive weakfulness syndrome*), zespół zamknięcia (ang. *locked-in syndrome*). Zaburzenia świadomości są diagnozowane jako objawy innych schorzeń (udarów, poważnych urazów czaszkowo-mózgowych i in.), stąd niskie wartości danych epidemiologicznych: zaburzenia świadomości stanowią 5% wśród przyczyn hospitalizacji¹¹, a częstotliwość występowania np. stanu wegetatywnego wynosi w Europie 5–25/1 000 000 oraz 40–168/1 000 000 w USA. Dla części zaburzeń świadomości nawet takie dane nie są podawane¹².

Dotychczasowe badania wskazują na przydatność interfejsów BCI u pacjentów we wszystkich zaburzeniach świadomości za wyjątkiem całkowitego zespołu zamknięcia (ang. *completely locked-in-syndrome* – CLIS).

Najnowsze badania nad wykorzystaniem interfejsów BCI u pacjentów w stanie minimalnej świadomości¹³ pozwalają przypuszczać, że zapewnienie bezpośredniego wyjścia z ośrodkowego układu nerwowego pacjenta ze zdiagnozowanym MCS może umożliwić mu zarówno komunikację pozamięśniową, jak i, na skutek realizacji prostych zadań wymagających orientacji przestrzennej oraz planowania ruchu, przyczynić się do odzyskania poszczególnych funkcji i, w rezultacie, poprawy stanu zdrowia. Możliwości te potwierdzają badania nad możliwościami poznawczymi pacjentów z MCS¹⁴. Dość proste rozwiązanie komunikacji z pacjentami z zespołem zamknięcia, oparte na P300, zostało pokazane już wcześniej przez Andreę Kübler i in.¹⁵

Należy jednak zaznaczyć, że wszystkie z ww. badań wymagają nie tylko dopracowania i kontynuacji na większych grupach pacjentów, ale również opracowania powtarzalnych i bezpiecznych procedur klinicznych w zakresie przygotowania i edukacji pacjentów i ich rodzin/opiekunów, implantacji i dostrajania interfejsów oraz przeciwdziałania możliwym zmianom wtórnym i skutkom ubocznym.

¹¹ Por. G. L. Henry, N. Little, A. Jagoda i in., *Neurologic emergencies*, 3rd ed, New York, McGraw Hill, 2010, s. 77

¹² Por. J. G. Beaumont, P. M. Kenealy, *Incidence and prevalence of the vegetative and minimally conscious states*, „*Neuropsychological Rehabilitation*” 2005, Nr 15, passim

¹³ Por. G. Liberati, N. Birbaumer, *Using brain-computer interfaces to overcome the extinction of goal-directed thinking in minimally conscious state patients*, „*Cognitive Processing*” 2012, Nr 13, Suppl 1, passim

¹⁴ Por. D. Cruse, S. Chennu, C. Chatelle i in., *Relationship between etiology and covert cognition in the minimally conscious state*, „*Neurology*” 2012, Nr 78(11), passim

¹⁵ Por. A. Kübler, A. Furdea, S. Halder i in., *A brain-computer interface controlled auditory event-related potential (P300) spelling system for locked-in patients*, „*Annals of the New York Academy of Sciences*” 2009, Nr 1157, passim

Wykorzystanie interfejsów mózg-komputer w wózkach dla niepełnosprawnych i egzoszkieletach

Rozwiązania zwiększające mobilność, sterowane „myślą”, stawiają przed BCI duże wymagania, zarówno w zakresie czasu reakcji, szybkości transmisji, jak i dokładności sterowania. Są już pierwsze udane próby w tym zakresie.

Badania nad wózkiem dla osób niepełnosprawnych sterowanym „myślą” pokazały, że znacznie efektywniej jest wykorzystywać sygnały z BCI jedynie do korekty toru jazdy oraz ruszenia/zatrzymania pojazdu¹⁶. Wyzwaniem są sytuacje awaryjne (np. ktoś nagle wyjedzie z boku) – pomimo niewielkich prędkości jazdy, należy przewidzieć opcję wyłącznika awaryjnego, natychmiast zatrzymującego pojazd.

Rywalami wózków elektrycznych stały się w ostatnich latach egzoszkielety. Są to zrobotyzowane szkielety zewnętrzne, zakładane bezpośrednio na użytkownika w formie upręży, odczytującej zamiar ruchu i wspomagającej ten ruch. Dotychczas stosowane systemy sterowania egzoszkieleciami (np. *proportional myoelectric control*) oparte były na zestawach czujników bioelektrycznych, obciążenia, przyspieszenia, kątów zgięcia w stawach itp. Prace nad egzoszkieletem sterowanym z użyciem BCI zostały podjęte w ramach projektu MINDWALKER, jednak jego wyniki nie zostały dotychczas opublikowane.

Problemy etyczne i prawne

Wykorzystanie interfejsów mózg-komputer oraz różnych odmian neuroprotez niesie ze sobą szereg zagrożeń. Problem *brain upgrading* (*brain enhancement*, najbliższym polskojęzycznym odpowiednikiem wydaje się być *udoskonalanie mózgu*) za pomocą implantowanych układów elektronicznych został już dość dokładnie przedyskutowany na skutek pojawienia się casusu wybitnego brytyjskiego cybernetyka, prof. Kevina Warwicka uważanego za pierwszego cyborga¹⁷, który implantował sobie urządzenie elektroniczne do sterowania.

Stymulatory mózgu już wkraczają do medycyny: są stosowane począwszy od terapii choroby Parkinsona aż po leczenie otyłości¹⁸. Biorąc pod uwagę dotychczasowe sukcesy, rozwiązania te, niekiedy uważane za kontrowersyjne, nie są wcale tak odległe od BCI jakby się wydawało na pierwszy rzut oka, zarówno pod kątem nadziei, jakie budzą w pacjentach, jak i zagrożeń, jakie mogą nieść ze sobą. Wydaje się, że rolą Agencji Oceny Technologii Medycznych (AOTM) jest stworzenie kontrolowanych warunków, w których terapie te będą mogły być stosowane.

¹⁶ Por. B. Rebsamen, E. Burdet, G. Cuntai i in., *Controlling a wheelchair using a BCI with low information transfer rate*, Proceedings of the IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR'07), Noordwijk, Holandia, 2007, passim

¹⁷ Por. K. Warwick, *I, cyborg*, Champaign, University of Illinois Press, 2004, passim

¹⁸ Por. prace prof. dr. hab. Marka Harata z Kliniki Neurochirurgii 10 Wojskowego Szpitala Klinicznego z Polikliniką SP ZOZ w Bydgoszczy, np. P. Sokal, M. Harat, *Stymulacja korzeni krzyżowych i stożka rdzenia w bólu kroczu – opis przypadków*, „Ból” 2010, Nr 11 (2), s. 23-27, *Neurochirurgia czynnościowa*, red. M. Harat, Bydgoszcz, TOM, 2007, s. 56

Tabela 2. Wybrane rozwiązania interfejsów mózg-komputer i neuroprotezy (kolejność alfabetyczna)

Nazwa i producent	Przeznaczenie
BETTER Project Consortium of research centers, Project in the ICT area under the European Community's 7th Framework Programme (FP7)	Wykorzystanie BCI w rehabilitacji pacjentów z zaburzeniami chodu po udarze.
Biosemi Active Two Starlab, Hiszpania	System do zapisu i analizy sygnału EEG.
BrainAble Project Consortium of research centers, EU FP 7 financed project	Wielomodalny BCI.
BrainGate2 Neural Interface System Cyberkinetics Neurotechnology Systems, Brown University, USA	Technologie mające na celu przywrócenie mobilności i samodzielności pacjentom z deficytami neurologicznymi lub po amputacjach.
BrainVision Brain Products GmbH, Niemcy	Rodzina sprzętu i oprogramowania BCI.
Cyberhand Cyberhand Project, Scuola Superiore Sant'Anna, Włochy	Robotyczna dłoń pięciopalcza.
DECODER Project Konsorcjum ośrodków badawczych	BCI do diagnostyki pacjentów z zaburzeniami świadomości.
Enobio system Starlab, Hiszpania	Przenośny, modułowy, bezprzewodowy system do zapisu i analizy sygnałów EEG, ECG i EOG.
FUTURE BICI Project Konsorcjum ośrodków badawczych	Współdziałanie między różnymi grupami prowadzącymi badania nad BCI.
g.BCIsys (family of devices) Guger Technologies, g-tec Medical Engineering, Austria	Komercyjny system do pozyskiwania, analizy i interpretacji sygnału EEG, umożliwiający neurofeedback.
g.EEGsys (family of devices), Guger Technologies, g-tec Medical Engineering, Austria	Komercyjny system EEG.
g.USBamp Guger Technologies, g-tec Medical Engineering, Austria	Komercyjny system do pozyskiwania, analizy i interpretacji sygnałów biomedycznych w obszarze aktywności mózgu, serca i mięśni, ruchu oka, parametrów oddechu, przewodności skóry i innych.
Minball Game Interactive Productline	Gra sterowana BCI.
MindSet NeuroSky	Komercyjne BCI służące do sterowania grami lub prostymi urządzeniami (Mac OS, iPhone, iPad).
NESS H200 Hand Rehabilitation System Bioness Inc., USA	Urządzenie do aktywacji (za pomocą stymulacji elektrycznej) różnych grup mięśniowych w dłoni i przedramieniu pozwalające na otwieranie i zamykanie dłoni.
Rehabilitation Gaming System Konsorcjum ośrodków badawczych	Usprawnianie funkcji motorycznych u pacjentów po udarach lub urazach czaszkowo-mózgowych.
RENACHIP Project UE	Wsparcie za pomocą BCI rehabilitacji w obszarze motorycznego uczenia się.
SM4ALL Project Konsorcjum ośrodków badawczych	Wykorzystanie BCI w środowisku inteligentnego domu.
TOBI Project Konsorcjum ośrodków badawczych Koordynator: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Szwajcaria	Narzędzia do BCI dedykowane poprawie jakości życia osób niepełnosprawnych.
Wadsworth BCI System Laboratory of Neural Injury and Repair, Wadsworth Center, USA	Urządzenie do pozamięśniowej komunikacji i sterowania.
WALK! cooperative patient driven neuroprosthetic system Center of Automation and Autonomous Systems, Technical University of Munich, Germany	Neuroprotezy kończyn dolnych.

Źródło: E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Neuroprostheses for increasing disabled patients' mobility and control*, „Advances in Clinical and Experimental Medicine” 2012, Nr 21 (2), s. 267-268

Do zagadnień etycznych należą bez wątpienia inne stwierdzone u pacjenta możliwe zmiany osobowości, nastroju i inne przekształcenia, mogące zajść wskutek zarówno właściwego, jak i niewłaściwego użycia BCI. Zainteresowanie, jakie już w zakresie tej chwili poświęca BCI przemysł rozrywkowy (np. gra Mindball Game – polegająca na sterowaniu kulką za pomocą myśli przez dwóch konkurujących zawodników) powoduje, że być może znaczna część rozwiązań komercyjnych z tego zakresu będzie pozostawała poza kontrolą wynikającą z funkcji systemu ochrony zdrowia. Ilość już dostępnych bądź opracowywanych rozwiązań pokazuje tabela 2. Ich liczba wskazuje, że możemy mieć do czynienia niedługo z problemem medycznym wskutek niewłaściwego lub nadmiernego używania BCI.

Nie do końca wiadomo, jak ustalić granicę pomiędzy samodzielnością człowieka a autonomią oprogramowania, szczególnie u pacjentów w najcięższych stanach. Wydaje się, że w tych przypadkach należy wypracować rozwiązania szczególnie w obszarze dynamicznej adaptacji w sytuacjach awaryjnych, w tym potencjalnie zagrażających życiu i zdrowiu pacjenta.

Kolejnym punktem dyskusyjnym jest użycie BCI u dzieci. Z badań wynika, że użycie BCI u dzieci z deficytami ruchowymi jest możliwe, prawdopodobnie z nie gorszym skutkiem niż u dorosłych¹⁹. O ile jednak kontrolowane wykorzystanie tych urządzeń u dorosłych osób niepełnosprawnych, ciężko chorych oraz w podeszłym wieku nie budzi większych zastrzeżeń, to nie do końca wiadomo, jaki wpływ będzie miało długookresowe wykorzystanie interfejsu mózg-komputer na młody, rozwijający się dopiero układ nerwowy, i czy nie zajdzie tu efekt zbliżony do „człowieka w pułapce rzeczywistości wirtualnej”. Z tym problemem pediatria i neurologia dziecięca dopiero będą musiały się zmierzyć.

W zakresie problemów prawnych, związanych z szerszym zastosowaniem interfejsów mózg-komputer, powstaje szereg kwestii, które mogą wymagać ponownej definicji w ramach istniejących regulacji prawnych, szczególnie w obszarach:

- odpowiedzialności za długoterminowe szkodliwe efekty oddziaływania implantu,
- szkodliwych działań wynikających z uszkodzenia interfejsu lub niewłaściwego interpretowania przez niego poleceń użytkownika (np. będącego pod wpływem leków, ale również alkoholu lub środków odurzających),
- przesunięcia granic braku świadomości pacjenta i chęci jego współdecydowania (np. przy braku możliwości uzyskania podpisu, potwierdzenia decyzji głosem itp.).

Przygotowanie personelu medycznego

Zwraca uwagę fakt, że wykorzystanie interfejsów mózg-komputer leży w zakresie zainteresowania całego wielodyscyplinarnego zespołu terapeutycznego, sprawującego zwykle opiekę nad pacjentem, np. na oddziałach neurologicznych czy rehabilitacji neurologicznej. Z jednej strony powoduje to, że wszyscy niezbędni specjaliści medyczni są już dostępni i znają stan zdrowia

¹⁹ Por. J. D. Breshears, C. Gaona, J. L. Roland i in., *Decoding motor signals from the pediatric cortex: implications for brain-computer interfaces in children*, „Pediatrics” 2011, Nr 128(1), passim

i upośledzenia funkcjonowania oraz możliwości i potrzeby pacjenta, z drugiej jednak wymaga przygotowania ich do stosowania nowej technologii. Warto zatem już teraz włączyć treści „techniczne” do programów nauczania przed- i podyplomowego specjalistów medycznych.

Wydaje się, że na chwilę obecną grupą zawodową najlepiej przygotowaną do szerszego wdrożenia interfejsów mózg-komputer w zastosowaniach klinicznych są inżynierowie biomedycy. Powoduje to potrzebę współpracy interdyscyplinarnej oraz rozważenia dwóch alternatywnych rozwiązań:

- włączenie inżynierów biomedycznych w tok pracy w placówkach służby zdrowia na zasadzie zbliżonej do informatyki medycznej,
- współpracę z inżynierami biomedycznymi świadczącymi usługi.

Bariery do pokonania oraz kierunki dalszych badań

Bariery w szerszym wykorzystaniu interfejsów mózg-komputer oraz związanych z nimi neuroprotezy stanowią przede wszystkim:

1. brak szczegółowych:
 - wskazań do stosowania BCI, stałej niezdolności do korzystania z konwencjonalnych urządzeń do komunikacji i sterowania przy zachowanej zdolności do rozumienia oraz wydawania prostych komend, a także zapewnieniu sprzężenia zwrotnego (naturalnego, sztucznego),
 - przeciwwskazania do stosowania BCI w przypadkach: zaburzeń psychicznych, tików nerwowych, nadciśnienia, tachykardii, skutków ubocznych niektórych leków i inne, opartych na badaniach klinicznych zgodnie z paradygmatem Medycyny Opartej na Faktach,
2. nieznaną, potencjalnie różną, zdolność poszczególnych pacjentów do wykorzystywania określonych sygnałów elektrofizjologicznych do komunikacji/sterowania – istnieje konieczność wprowadzenia ujednoczonych testów w tym zakresie,
3. brak ogólnie akceptowanych powtarzalnych procedur przygotowania pacjenta i jego opiekunów, instalacji (w tym implantacji) interfejsu, treningu pacjenta, terapii i opieki nad pacjentem z BCI,
4. ograniczona identyfikacja potencjalnych komplikacji oraz skutków ubocznych stosowania BCI, szczególnie długoterminowych, u dzieci i osób w podeszłym wieku,
5. brak ogólnie akceptowanych standardów, umożliwiających ocenę i porównanie poszczególnych urządzeń i ich oprogramowania (choć istnieją miary trafności klasyfikacji czy szybkości działania lub prędkości transferu informacji), jak również np. ich późniejsze serwisowanie, modernizacja lub wymiana,

Kierunki dalszych badań:

1. zapewnienie biokompatybilności implantów,
2. zmniejszenie wymiarów oraz poboru mocy poszczególnych urządzeń,

3. poprawienie algorytmów sterowania w kierunku:
 - szybkości i zrozumiałości komunikacji użytecznej w czynnościach codziennego życia oraz nie irytującej pacjenta/użytkownika i jego otoczenia – docelowo tłumaczenie sygnałów z BCI na komunikację wielomodalną,
 - płynnej (zbliżonej do naturalnej) pracy sterowanych urządzeń (w tym np. sztucznych kończyn) w czasie rzeczywistym,
4. opracowanie szeregu niezbędnych zaawansowanych technicznie urządzeń sterowanych poprzez BCI, ze szczególnym uwzględnieniem pięciopalczastej kończyny górnej z funkcją czucia (tzw. interfejsem haptycznym) jako sprzężeniem zwrotnym,
5. uwzględnienie zagadnień związanych z bezpieczeństwem pacjenta i jego otoczenia, w tym w przypadku fizycznego uszkodzenia interfejsu oraz próby celowego włamania do oprogramowania interfejsu (tzw. obszar *neurosecurity*),
6. zwiększenie możliwości współdziałania z innymi urządzeniami i systemami, takimi jak funkcje telemedyczne i telerehabilitacyjne infrastruktury inteligentnego domu (ang. *smart home*), inteligentnego ubrania (ang. *i-wear*), środowisk dedykowanych osobom niepełnosprawnym, a przyszłościowo: systemów *Ambient Intelligence* i *Affective Computing* opartych na Internecie Rzeczy (ang. *Internet of Things*).

Pomimo że badania nad BCI i neuroprotezami są interdyscyplinarne, w ww. elementach widać wyraźnie linię podziału na badania w obszarze medycznym oraz pozostałe. Należy jednak zaznaczyć, że szybki postęp techniczny jest warunkiem skoordynowanego rozwoju w pozostałych obszarach, w tym w zastosowaniach klinicznych BCI i neuroprotez. Z tego powodu ważnym kierunkiem rozwoju mogą być symulacje komputerowe układu nerwowego człowieka oraz układu człowiek-BCI. Ze względu na możliwość symulacji różnych warunków chorobowych, w obecności zakłóceń oraz adaptacyjnej modyfikacji oprogramowania BCI, komputerowe modele symulacyjne mogą być, obok badań na zwierzętach, jednym z głównych obszarów badawczych w tym zakresie. Jest to tym bardziej prawdopodobne, że już teraz modele obliczeniowe znajdują zastosowanie w modelowaniu niektórych schorzeń, w tym autyzmu i ADHD²⁰ oraz zaburzeń świadomości²¹.

Nową jakość do obszaru badań związanego z neuroprotezami mogą wnieść neuroprotezy elektrochemiczne, współpracujące z interfejsami robotycznymi, opisane przez Rubię van den Brandt i in. oraz Nadię Dominici i in.²² z Politechniki w Lozannie. Jednoczesne wykorzystanie

²⁰ Por. W. Duch, W. Nowak, J. Meller i in., *Computational approach to understanding autism spectrum disorders*, „Computer Science Journal” 2012, Nr 13(2), passim; W. Duch, W. Nowak, J. Meller i in., *Consciousness and attention in autism spectrum disorders*, Proceedings of Cracow Grid Workshop 2010, Kraków 2011, passim

²¹ Por. E. Mikołajewska, D. Mikołajewski, *Consciousness disorders as the possible effect of brainstem activity failure – computational approach*, „Journal of Health Sciences” 2012, Nr (2)2, passim

²² Por. R. van den Brand, J. Heutschi, Q. Barraud i in., *Restoring voluntary control of locomotion after paralyzing spinal cord injury*, „Science” 2012, Nr 336(6085), passim; N. Dominici, U. Keller, H. Vallery i in., *Versatile robotic interface to evaluate, enable and train locomotion and balance after neuromotor disorders*, „Nature Medicine” 2012, Nr 18(7), passim

u szczurów neuroplastyczności mózgu (poprzez przemodelowanie projekcji korowych) wraz z elektrochemicznym przywróceniem funkcji w obszarze uszkodzonego odcinka rdzenia kręgowego spowodowało częściowe przywrócenie funkcji chodu wymuszanej ruchem bieżni. Może to ukierunkować badania nad neuroprotezami dla pacjentów z uszkodzeniami rdzenia kręgowego na co najmniej kilka następnych lat: bardziej w kierunku regeneracji chemicznej i wspomagania funkcji niż jej zastępowania.

Podsumowanie

Nie ulega wątpliwości, że interfejsy mózg-komputer są jednymi z najnowocześniejszych rozwiązań mogących wspomóc terapię oraz poprawić jakość życia pacjentów z najpoważniejszymi deficytami. Szersze ich wprowadzenie trzeba jednak poprzedzić rzetelnymi badaniami klinicznymi oraz przygotowaniem współdziałania zarówno personelu medycznego jak i specjalistów w zakresie inżynierii biomedycznej.

Literatura

- Beamont J. G., Kenealy P. M., *Incidence and prevalence of the vegetative and minimally conscious states*, „Neuropsychological Rehabilitation” 2005, Nr 15
- Birbaumer N., Cohen L. G., *Brain-computer interfaces: communication and restoration of movement in paralysis*, „Journal of Physiology” 2007, Nr 579(Pt 3)
- Brand R. van den, Heutschi J., Barraud Q. i in., *Restoring voluntary control of locomotion after paralyzing spinal cord injury*, „Science” 2012, Nr 336(6085)
- Breshears J. D., Gaona C., Roland J. L. i in., *Decoding motor signals from the pediatric cortex: implications for brain-computer interfaces in children*, „Pediatrics” 2011, Nr 128(1)
- Cruse D., Chennu S., Chatelle C. i in., *Relationship between etiology and covert cognition in the minimally conscious state*, „Neurology” 2012, Nr 78(11)
- Dominici N., Keller U., Vallery H. i in., *Versatile robotic interface to evaluate, enable and train locomotion and balance after neuromotor disorders*, „Nature Medicine” 2012, Nr 18(7)
- Duch W., Nowak W., Meller J. i in., *Computational approach to understanding autism spectrum disorders*, „Computer Science Journal” 2012, Nr 13(2)
- Duch W., Nowak W., Meller J. i in., *Consciousness and attention in autism spectrum disorders*, Proceedings of Cracow Grid Workshop 2010, Kraków 2011
- Henry G. L., Little N., Jagoda A. i in., *Neurologic emergencies, 3rd ed*, New York, McGraw Hill, 2010
- Hochberg L. R., Serruya M. D., Friehs G. M., *Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia*, „Nature” 2006, Nr 442(7099)
- Kübler A., Birbaumer N., *Brain-computer interfaces and communication in paralysis: extinction of goal directed thinking in completely paralysed patients?*, „Clinical Neurophysiology” 2008, Nr 119(11)
- Kübler A., Furdea A., Halder S. i in., *A brain-computer interface controlled auditory event-related potential (P300) spelling system for locked-in patients*, „Annals of the New York Academy of Sciences” 2009, Nr 1157
- Laureys S., Antoine S., Boly M. i in., *Brain function in the vegetative state*, „Acta Neurologica Belgica” 2002, Nr 102
- Liberati G., Birbaumer N., *Using brain-computer interfaces to overcome the extinction of goal-directed thinking in minimally conscious state patients*, „Cognitive Processing” 2012, Nr 13, Suppl 1

- McFarland D. J., Sarnacki W. A., Wolpaw J. R., *Should the parameters of a bci translation algorithm be continually adapted?*, „Journal of Neuroscience Methods” 2011, Nr 199(1)
- Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Consciousness disorders as the possible effect of brainstem activity failure – computational approach*, „Journal of Health Sciences” 2012, Nr (2)2
- Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Interfejsy mózg-komputer – zastosowania cywilne i wojskowe*, „Kwartalnik Bellona” 2011, Nr 2
- Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Komunikacja dla osób niepełnosprawnych w środowiskach nowych mediów*, „Lingua ac Communitas” 2012, vol. 22
- Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Neuroprostheses for increasing disabled patients’ mobility and control*, „Advances in Clinical and Experimental Medicine” 2012, Nr 21(2)
- Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Neurorehabilitacja XXI wieku: Techniki teleinformatyczne*, Kraków, Impuls, 2011
- Mikołajewska E., Mikołajewski D., *Technical and medical problems concerning wider use of neuroprostheses in patients with neurologic disorders*, „Pielęgniarstwo Neurologiczne i Neurochirurgiczne” 2012, Nr 1(3)
- Monti M. M., Owen A. M., *The behavior in the brain: using functional neuroimaging to assess residual cognition and awareness after severe brain injury*, „Journal of Psychophysiology” 2010, Nr 24(2)
- Monti M. M., Laureys S., Owen A. M., *Vegetative state*, „British Medical Journal” 2010, Nr 341
- Neurochirurgia czynnościowa*, red. Harat M., Bydgoszcz, TOM, 2007
- Nicolas-Alonso L. F., Gomez-Gil J., *Brain computer interfaces, a review*, „Sensors (Basel)” 2012, Nr 12(2)
- Rebsamen B., Burdet E., Cuntai G. i in., *Controlling a wheelchair using a BCI with low information transfer rate*, Proceedings of the IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR’07), Noordwijk, Holandia, 2007
- Shannon C. E., *A mathematical theory of communication*, „The Bell System Technical Journal” 1948, Nr 27
- Shih J. J., Krusiński D. J., Wolpaw J. R., *Brain-computer interfaces in medicine*, „Mayo Clinic Proceedings” 2012, Nr 87(3)
- Sokal P., Harat M., *Stymulacja korzeni krzyżowych i stożka rdzenia w bólu krocza – opis przypadków*, „Ból” 2010, Nr 11 (2)
- Turing A., *Computing Machinery and Intelligence*, „Mind” 1950, Nr LIX(236)
- Warwick K., *I, cyborg*, Champaign, University of Illinois Press, 2004