

INTERFEJSY MÓZG-KOMPUTER W STEROWANIU URZĄDZENIAMI I SYSTEMAMI MECHATRONICZNYMI

Dariusz Mikołajewski*¹, Ewa Tomaszewska², Mariusz Karczmarek¹

¹ Uniwersytet Kazimierza Wielkiego, Wydział Matematyki, Fizyki i Techniki, Instytut Mechaniki i Informatyki Stosowanej,
ul. Kopernika 1, 85-074, Bydgoszcz, Polska

² magistrantka kierunku mechatronika
e-mail: dmikolaj@ukw.edu.pl

Słowa kluczowe: *Interfejsy mózg-komputer ustanowiły przełom w rozwoju współczesnych neuronauk i neurorehabilitacji. Niniejszy artykuł stanowi przegląd części technologii interfejsów mózg-komputer ukierunkowanej na sterowanie urządzeniami i systemami mechatronicznymi. Opisane zostały zarówno podstawowe rozwiązania z obszaru samych interfejsów, jak i przedyskutowane technologie mogące zapewnić sygnały sterujące dla urządzeń mechatronicznych. Pomimo ciągłego rozwoju problematyki wiele kwestii jest nierozwiązanych w zakresie udoskonalenia samych interfejsów oraz sklasyfikowania sygnałów sterujących.*

Słowa kluczowe: *mechatronika, inżynieria biomedyczna, interfejs mózg-komputer.*

Brain-computer interfaces in control of mechatronic devices and systems

Abstract: *Brain-computer interfaces (BCIs) have begun to constitute the another breakthrough in contemporary neuroscience and neurorehabilitation. This paper provides an overview of brain-computer interfaces (BCIs) technology that aims to address the priorities for control of mechatronic devices and systems. We describe basic solutions in the area of BCIs and discuss technologies that may provide command signals for mechatronic devices. Despite continuous development of the topic there still remains room for improvement, including future interfaces and control signal classification enhancements.*

Keywords: *mechatronics, biomedical engineering, brain-computer interface.*

1. Wprowadzenie

Rosnąca wiedza z zakresu: nauk medycznych, nauk o zdrowiu, nauk o kulturze fizycznej, kognitywistyki i psychologii, a także informatyki medycznej, biocybernetyki oraz inżynierii biomedycznej i rehabilitacyjnej, pozwala na rozwój zupełnie nowych, wcześniej niedostępnych, grup rozwiązań na potrzeby całkowicie lub częściowo zautomatyzowanej diagnostyki, komunikacji i/lub sterowania urządzeniami. Efektywne

pozyskiwanie oraz przetwarzanie sygnałów pochodzenia neurofizjologicznego stało się impulsem do poszukiwania ich zastosowań jako sygnałów sterujących, zarówno prostymi urządzeniami, jak i całymi systemami mechatronicznymi. Dotyczy to adaptacji urządzeń, systemów dotychczas wykorzystywanych (elektryczne wózki dla niepełnosprawnych, egzoskielety, systemy inteligentnego domu) i opracowania zupełnie nowych grup urządzeń (wyspecjalizowane systemy diagnostyczne, systemy komunikacyjne, neuroprotezy). Szczególną grupą

takich sygnałów neurofizjologicznych są sygnały pochodzące bezpośrednio z ośrodkowego układu nerwowego. Umożliwiają one realizację procesu dotychczas nieosiągalnego: pozamięśniową komunikację człowiek-maszyna. Otwiera się przy tym nowa szansa dla pacjentów z zaburzeniami świadomości (np. w śpiączce), po udarach lub z uszkodzeniami rdzenia kręgowego [1] i prostymi deficytami komunikacyjnymi. U osób zdrowych powstaje nowy, dotychczas niewykorzystywany kanał komunikacyjny, szybszy i efektywniejszy od dotychczasowych oraz bardziej odporny na podsłuchanie, przejęcie i nieuprawnione użycie.

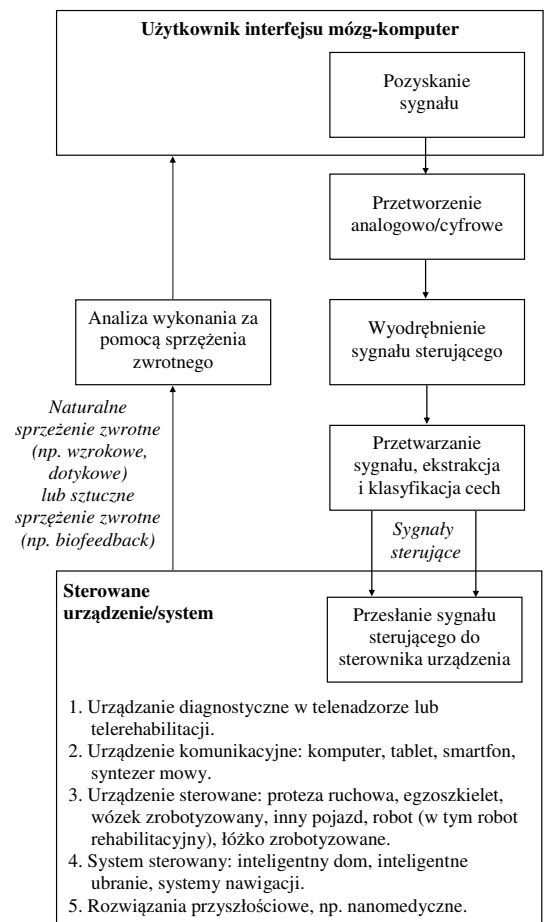
Celem niniejszej pracy jest analiza oraz podsumowanie potencjału mechatroniki w wykorzystaniu interfejsów mózg-komputer jako urządzeń sterujących, a także nakreślenie kierunków dalszych badań z tym związanych, prowadzonych w Instytucie Mechaniki i Informatyki Stosowanej UKW w Bydgoszczy.

2. Pozyskiwanie i analiza wybranych sygnałów neurofizjologicznych

Komunikacja wielomodalna, naturalna w relacji człowiek-człowiek, stanowi adaptacyjną mieszanię modalności (głosu, kierunku i sposobu patrzenia, mimiki twarzy, gestykulacji, dotyku, zapachu, modyfikacji otoczenia i innych), negocjowana w trakcie komunikacji. Brak lub osłabienie jakiegokolwiek modalności (np. wskutek deficytu neurologicznego związanego z czasowym lub stałym uszkodzeniem ośrodkowego układu nerwowego) czyni tę komunikację niekompletną. Z tego punktu widzenia korzystne może być posiadanie modalności wytworzonej sztucznie, która mogłaby uzupełnić, a w najpoważniejszych przypadkach nawet zastąpić tradycyjną komunikację wielomodalną, np. przez wykorzystanie klawiatury i myszy komputerowej, które nie jest naturalne dla człowieka, a pomimo to sprawdza się w codziennych zastosowaniach.

Rozwój tzw. nowych mediów, tj. technologii cyfrowych wchodzących do powszechnego użycia od początku lat 80-tych XX wieku wskutek dynamicznego rozwoju teleinformatyki przyniósł nowe możliwości nie tylko w zakresie ucyfrowienia sygnałów, ale również rozwoju nowych dziedzin i dyscyplin: systemów rzeczywistości wirtualnej i rzeczywistości rozszerzonej, telemedycyny, cyberterapii, cyberrehabilitacji, a także wzrostu interaktywności, adaptacyjności, podążania za użytkownikiem i wspierania go dzięki rozwojowi badań nad interakcją człowiek-komputer (ang. human-computer interaction - HCI), inteligencją otoczenia (ang. Ambient

Intelligence – AmI) oraz informatyką afektywną (anf. Affective Computing – AC). Pomocne okazały się przy tym rozwiązania z obszaru neuronauk obliczeniowych (ang. *computational neurosciences*).



Rysunek 1. Idea sterowania urządzeniami mechatronicznymi za pomocą interfejsu mózg-komputer [4, 5]. Uwaga: w większości przypadków dla poprawnego działania sterowanych urządzeń/systemów wymagane jest przetwarzanie w czasie rzeczywistym.

Do zasadniczych sygnałów neurofizjologicznych należą: elektroencefalogram (EEG), elektrokortykogram (CCoG), elektroneurograf (ENG), elektoretinogram (ERG), elektrokochleogram (ECochG), wzrokowe potencjały wywołane (VEP), słuchowe odpowiedzi wywołane (AER), węchowe odpowiedzi wywołane (OER), somatosensoryczne odpowiedzi wywołane (SER),

potencjały ruchowe (AOP) i inne [2, 3]. Sposób ich pozyskiwania i przetwarzania jest uzależniony od rodzaju sygnału. Nie wszystkie poddają się też automatyzacji.

Pomimo istnienia całego wachlarza sygnałów neurofizjologicznych wybranie odpowiedniego sygnału do sterowania urządzeniami mechatronicznymi nie jest łatwe. Do podstawowych wymagań należą:

- możliwość celowej zmiany jednego lub wielu parametrów sygnału przez użytkownika,
- możliwość stałego lub regularnego wykorzystywania: związana z tym stabilność samych sygnałów, elektrod i sensorów oraz całych systemów w czasie oraz ich niezależność od stanu zdrowia, wahań nastroju, podawanych leków, itp.
- efektywność przy niskich amplitudach sygnałów i niewielkich różnicach między nimi oraz przy niskim stosunku mocy sygnału do mocy szumu,
- brak efektów ubocznych, w tym długoterminowych,
- łatwość nauczenia użytkownika,
- w części lżejszych przypadków: możliwość normalnego funkcjonowania w warunkach domowych,
- w przypadku urządzeń implantowanych: powtarzalna procedura neurochirurgiczna w celu wszczęcia, wymiany i usunięcia oraz brak komplikacji medycznych.

3. Interfejsy mózg-komputer

Interfejs mózg-komputer (ang. brain-computer interface - BCI) pozyskuje informację z układu nerwowego (np. w formie sygnału EEG z kory mózgu), przetwarza ją w celu wyodrębnienia określonych cech (parametrów) sygnału, a następnie interpretuje ich poziom (lub ich zmianę) w celu wykorzystania jako informacji sterującej dla komputera (np. komunikacji) lub sterowanych za jego pomocą urządzeń (wózków, egzoszkieleatów, ale również sztucznych kończyn) [6].

Obecnie około 60% badań nad BCI opiera się na wykorzystaniu sygnałów EEG. Podstawowe z nich to:

- P300 wykorzystujący wykrywanie w sygnale EEG reakcji na kilkukrotne podświetlenie oczekiwanego znaku na macierzy cyfr i liter w celu wychwycenia różnicy widocznej przy podświetleniu tego znaku, o którym człowiek myśli. Najprostszy w użyciu, wymaga tylko kilku elektrod, łatwy do sterowania np. wirtualnym pilotem zdalnego sterowania (jedna komenda zajmuje ok. 4 sekund). Wady P300 obejmują konieczność krótkiej (rzędu minut) indywidualnej

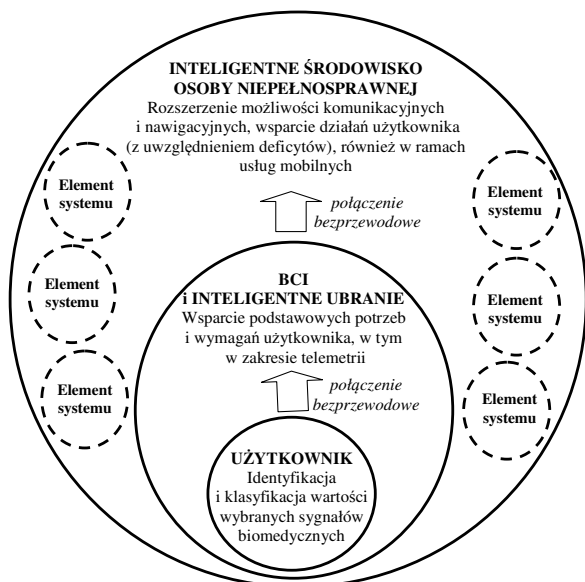
kalibracji, czasochłonność (4-6 liter/min.), co może budzić irytację przy powtarzających się błędach.

- Elektryczne odpowiedzi wywołane SSVEP (ang. Steady-State Visual Evoked Potentials) wykorzystujące wykrywanie zmian częstotliwościowych w sygnale EEG powstających przy silnym skoncentrowaniu się na jednym znaku z całej matrycy znaków (co najmniej 3x3), z których każdy miga z inną częstotliwością (z przedziału 3,5–75 Hz, które mają działanie synchronizujące na części mózgu przetwarzające bodźce wzrokowe). Po skupieniu uwagi na jednym z mrugających znaków w sygnale EEG pojawia się składowa o częstotliwości skorelowanej z częstotliwością jej mrugania. SSVEP cechuje wysoki stosunek sygnału do szumu oraz odporność na pozostałości sygnału poprzednio odebranego.
- Desynchronizacja i synchronizacja EEG związana z bodźcem ERD/ERS (ang. Event-Related Desynchronization/Synchronization) opiera się na wykrywaniu zmian w sygnale EEG (np. mocy w danym paśmie: alfa, beta lub gamma), występujących wskutek wyobrażenia sobie przez użytkownika wykonania ruchu dłońmi (lewą i prawą) lub stopą/stopami. Metoda ta wymaga większej liczby elektrod od poprzednich, ale daje bardziej naturalną możliwość sterowania, np. neuroprotezą ruchową, również dzięki naturalnej „wielokanałowości”.

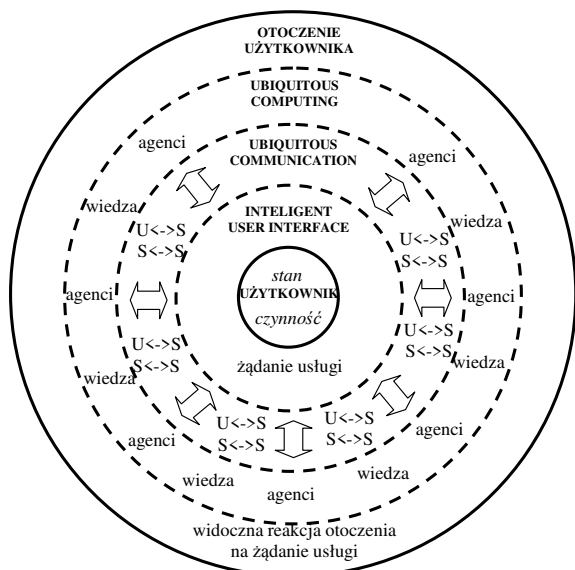
4. Badania własne

Badania w zakresie wykorzystania BCI prowadzi co najmniej kilka ośrodków w Polsce. Należą do nich przede wszystkim:

- Zakład Fizyki Biomedycznej Uniwersytetu Warszawskiego (UW),
 - Politechnika Warszawska,
 - Katedra Informatyki Stosowanej UMK, Laboratorium Neurokognitywne Interdyscyplinarne Centrum Nowoczesnych Technologii UMK,
- oraz firmy:
- BrainTech – firma prof. Piotra Durki (UW) z oprogramowaniem OpenBCI i Svarog,
 - Titanis.



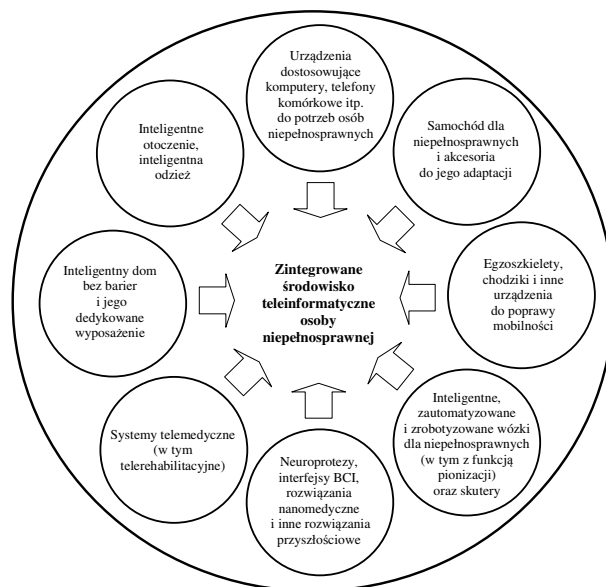
Rysunek 2. Użytkownik jako kluczowy element interfejsu człowiek-komputer opartego na identyfikacji sygnałów biomedycznych [7].



Rysunek 3. Interfejs użytkownika w wieloagentowej architekturze inteligentnego otoczenia [7]. Legenda: U<->S – połączenie użytkownik-czujnik/efektor AmI, S<->S – połączenie czujniki/efektor AmI – czujnik/efektor AmI.

Badania własne IMiIS UKW w omawianym zakresie obejmują:

- badania podstawowe nad urządzeniami BCI – predyspozycje pacjentów, w tym dzieci, osób w podeszłym wieku itp. – zarówno w ramach badań statutowych, jak i we współpracy z UMK (w tym ICNT UMK) w Toruniu, UMCS w Lublinie oraz 10 WSzKzP SP ZOZ w Bydgoszczy,
- badania nad wykorzystaniem BCI u osób z zaburzeniami świadomości – m.in. w ramach międzynarodowej grupy badawczej InterDoCTOR działającej przy ICNT UMK,
- wykorzystanie BCI do sterowania w ramach zintegrowanego środowiska teleinformatycznego osoby niepełnosprawnej (Rys. 2-4).



Rysunek 4. Zintegrowane środowisko teleinformatyczne osoby niepełnosprawnej [8-11].

Obecnie w IMiIS UKW trwają badania nad BCI z udziałem studentów, jak również budowa zespołu badawczego w oparciu o obecnych i nowych pracowników IMiIS UKW. Skupiają się one na kilku zasadniczych obszarach:

- rozwój interfejsu komunikacyjnego (w tym spolszczenie go oraz dostosowanie do potrzeb osób w podeszłym wieku i z deficytami neurologicznymi),
- rozwój interfejsu sterującego inteligentnym domem,

- rozwój BCI sterującego miniaturą elektrycznego wózka dla osób niepełnosprawnych, stanowiącego badanie wstępne do budowy BCI sterującego wózkiem dla niepełnosprawnych w normalnej skali,
- rozwój BCI sterującego egzoszkieletem (we współpracy z innymi ośrodkami).

5. Ograniczenia, szanse i zagrożenia

Ze stosowaniem nowych technologii, szczególnie w obszarach związanych z opieką zdrowotną, wiąże się szereg szans, ale również ograniczeń i zagrożeń, które trzeba wziąć pod uwagę. Rozwiązania niosące ze sobą największe szanse rozwojowe obejmują:

- pierwszy komercyjny medyczny system BCI: Wadsworth BCI System (Laboratory of Neural Injury and Repair, Wadsworth Center, USA) wykorzystujący sygnał EEG do sterowania komputerem, co ciekawe możliwa jest nauka pacjenta w domu, przy okresowej kontroli,
- odzwierciedlania w fMRI zmian aktywności obszarów mózgu w reakcji na zadane pytania: podczas badania prowadzonego przez prof. A. Owena, 39-letni Kanadyjczyk Scott Routley, 12 lat po ciężkim urazie mózgu w wyniku wypadku samochodowego, zdiagnozowany jako stan wegetatywny, zdołał w ten sposób skontaktować się z otoczeniem,
- sterowanie kończynami robotycznymi: 58-letnia pacjentka z porażeniem czterokończynowym sterowała na Brown University robotycznymi ramionami DEKA Arm System oraz DLR za pomocą interfejsu Brain Gate uzyskując trafność: do 62 % po 5-miesięcznym szkoleniu,
- przyszłościowe rozwiązanie w zakresie BCI: Wireless Ultra Low Power Broadband Neural Recording Mikrosystem opracowany na Brown University (USA): miniaturowy wszczepiany pod skórę głowy, przesyłanie sygnału z 16 kanałów, transmisja w podczerwieni przez skórę głowy, zasilanie bezprzewodowe, materiał: elastyczny polimer,
- neurochemiczna proteza rdzenia kręgowego – w trakcie badań od 2012r. [12, 13].

Ponadto z wykorzystaniem BCI wiąże się szereg dotkliwych ograniczeń:

- istnieje dużo możliwych sygnałów do wykorzystania, ale niewiele z nich spełnia jednocześnie wszystkie wymagania,
- brak jest rozwiązania uniwersalnego, działającego u wszystkich użytkowników, istnieje zatem konieczność

tworzenia urządzeń dedykowanych do poszczególnych zastosowań czy nawet grup użytkowników,

- złożone procedury analizy sygnału konieczne do przeprowadzania w czasie rzeczywistym – dodatkowe utrudnienie stanowi duża liczba różnych metod i technik, rzędu stu,
- relatywnie niskie prędkości transmisji w stosunku do oczekiwanych [14].

Zagrożenia związane z szerszym wykorzystaniem BCI są następujące:

- wpływ BCI na psychikę, nastrój pacjenta, w tym pacjenta z depresją oraz różnymi schorzeniami współistniejącymi,
- brak wytycznych w zakresie zachowania równowagi między autonomią BCI a wolą użytkownika, co w części sytuacji może budzić dyskusje, czy sygnał sterujący wygenerowany przez BCI rzeczywiście odzwierciedla zamiar użytkownika,
- wątpliwości związane z wykorzystaniem u osób z zaburzeniami świadomości i u dzieci,
- brak wytycznych klinicznych, utrudniający ocenę i porównanie proponowanych rozwiązań,
- brak przeciwwskazań, do których mogą należeć: nagłe ataki, silne tiki, niezdiagnozowani chorzy psychicznie, wykorzystanie u osób biorących silne leki,
- brain upgrade i rozrywka z wykorzystaniem BCI oraz wpływ długoterminowy wymienionych ćwiczeń,
- problemy prawne związane m.in. z odpowiedzialnością za niewłaściwie zinterpretowany zamiar użytkownika.

Zasadnicze kierunki rozwoju BCI obejmują:

- bezprzewodowe pobieranie sygnału: nadprzewodzące interferometrii kwantowe (ang. superconducting quantum interference device – magnetoencephalography - SQUID-MEG),
- neuroprotezy ruchowe, zarówno pojedynczych kończyn i ich części, jak również egzoszkielec sterowany BCI zrealizowany w ramach projektu MindWalker – jako „neuroproteza ruchowa całego ciała”,
- hybrydowe BCI, wykorzystujące więcej niż jedną technologię [15-17].

6. Wnioski

Dalszy rozwój technologiczny urządzeń i systemów mechatronicznych sterowanych za pomocą BCI może przynieść przełom zarówno w opiece zdrowotnej, jak i w technologiach szybkiego, niezakłóconego sterowania wykorzystywanych w przemyśle czy służbach mundurowych.

Literatura

1. Lobel D. A., Lee K. H. Brain Machine Interface and Limb Reanimation Technologies: Restoring Function After Spinal Cord Injury Through Development of a Bypass System, *Mayo Clinic Proceedings*, 2014; 89(5):708-714.
2. Augustyniak P., *Przetwarzanie sygnałów elektrodiagnostycznych*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków, 2001.
3. Kuniszyk-Józkowiak W., *Przetwarzanie sygnałów biomedycznych*, Wydawnictwo UMCS, Lublin 2011.
4. Lin W., Pierce A., Skalsky A. J., McDonald C. M., Mobility-assistive technology in progressive neuromuscular disease, *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics in North America*, 2012; 23:885-894.
5. Dias M. S., Pires C. G., Pinto F. M., Teixeira V. D., Freitas J. Multimodal user interfaces to improve social integration of elderly and mobility impaired, *Studies in Health Technology and Informatics*, 2012; 177:14-25.
6. Akcakaya M., Peters B., Moghadamfalahi M., i in., Noninvasive brain-computer interfaces for augmentative and alternative communication. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 2014; 7:31-49.
7. Mikołajewska E., Mikołajewski D., Integrated IT environment of disabled people – a new concept, *Central European Journal of Medicine*, 2014; 9(1):177-182.
8. Mikołajewska E., Mikołajewski D., Wheelchairs development from the perspective of physical therapists and biomedical engineers. *Advances in Clinical and Experimental Medicine*, 2010; 19:771-776.
9. Mikołajewska E., Mikołajewski D., Exoskeletons in neurological diseases - current and potential future applications, *Advances in Clinical and Experimental Medicine*, 2011; 20:227–233.
10. Mikołajewska E., Mikołajewski D., E-learning in the education of people with disabilities, *Advances in Clinical and Experimental Medicine*, 2011; 20:103-109.
11. Mikołajewska E., Mikołajewski D. Neuroprostheses for increasing disabled patients' mobility and control, *Advances in Clinical and Experimental Medicine*, 2012; 21:263-272.
12. van den Brand, R., Heutschi, J., Barraud, Q., i in., Restoring voluntary control of locomotion after paralyzing spinal cord injury, *Science*, 2012; 336:1182-1185.
13. 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; 18:1142-1147.
14. Baranauskas G., What limits the performance of current invasive brain machine interfaces? *Frontiers in Systems Neuroscience*, 2014; 8:68.
15. Khan M. J., Hong M. J., Hong K. S., Decoding of four movement directions using hybrid NIRS-EEG brain-computer interface, *Frontiers in Human Neuroscience*, 2014; 8:244.
16. Lecuyer A., George L., Marchal M. Toward Adaptive VR Simulators Combining Visual, Haptic, and Brain-Computer Interfaces, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2013; 33(5):18-23.
17. Koo B., Lee H. G., Nam Y., i in. A Hybrid NIRS-EEG System for Self-Paced Brain Computer Interface with Online Motor Imagery. *Journal of Neuroscience Methods*, 2015; 244:26-32.