

Technologia BCI jako forma neurorehabilitacji

Interfejs mózg-komputer (BCI) stanowi przełomowe narzędzie w rehabilitacji pacjentów z uszkodzeniami ośrodkowego układu nerwowego.

Jest to innowacyjna technologia, która tworzy bezpośrednią ścieżkę komunikacji między sygnałami elektrycznymi mózgu a urządzeniami zewnętrznymi, z pominięciem uszkodzonych ścieżek nerwowych lub mięśniowych.[1]

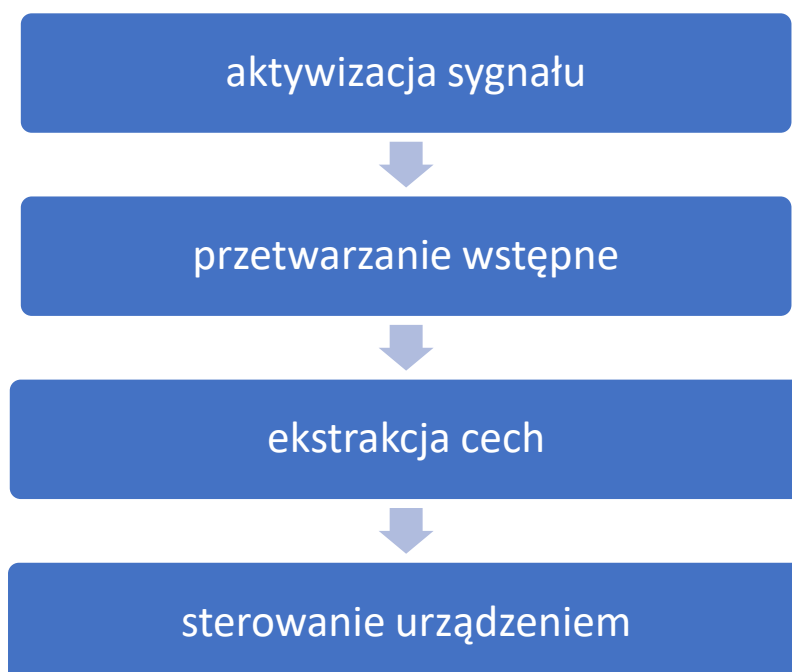
W skład tego procesu wchodzi:

- aktywizacja sygnału -rejestracja aktywności mózgu (głównie za pomocą nieinwazyjnej elektroencefalografii (EEG),

- przetwarzanie wstępne -usuwanie szumów i artefaktów,

- ekstrakcja cech- identyfikacja specyficznych wzorców,

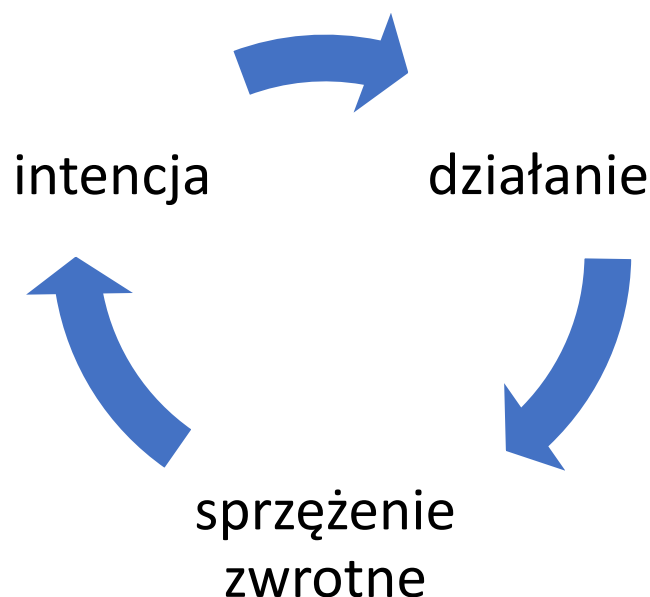
- sterowanie urządzeniem -przetworzenie sygnałów komendy w kierunku egzoszkieletów, robotów rehabilitacyjnych, systemów wirtualnej rzeczywistości (VR). [2]



Schemat 1. Proces technologii BCI.

Kluczową różnicą między BCI a rehabilitacją konwencjonalną stanowi mechanizm „top-down”. Polega on na inicjowaniu procesu naprawczego bezpośrednio w korze mózgowej poprzez aktywne myślenie pacjenta. W zastosowaniu technologii BCI wymagane jest od pacjenta wyobrażenie ruchu (MI- obrazowanie ruchowe) lub próbę jego wykonania (MA-motor attempt), co jest niezbędne do reorganizacji kory mózgowej. [3]

Systemy BCI tworzą sztuczną pętlę „intencja-działanie-sprzężenie zwrotne”.



Schemat 2. Zasada działania interfejsu mózg-komputer (pętla pracy).

Nowe zastosowania kliniczne

Technologia BCI znajduje zastosowanie w wielu chorobach neurologicznych m.in. u pacjentów z ciężkim paraliżem, z urazami rdzenia kręgowego, po udarach, czy w pracy z zaburzeniami poznawczymi.

W przypadku udarów technologia wykorzystywana jest do przywracania funkcji kończyn górnych (np. chwytania) oraz poprawy sprawności kończyn dolnych (chodu). [4] Badania naukowe wykazują, że interwencja jest szczególnie skuteczna w fazie podostrej (od 2 tygodnia do 3 miesięcy po udarze). Zastosowanie tej technologii w leczeniu poudarowym odnosi korzyści w leczeniu deficytów uwagi i funkcji wykonawczych poprzez intensywną pracę mózgu i koncentrację na zadaniach. Badania pokazują, że pacjenci ćwiczący z BCI osiągają znacznie lepsze wyniki w testach sprawności np. skali Fugl-Meyera niż korzystający tylko z tradycyjnych metod. [5]

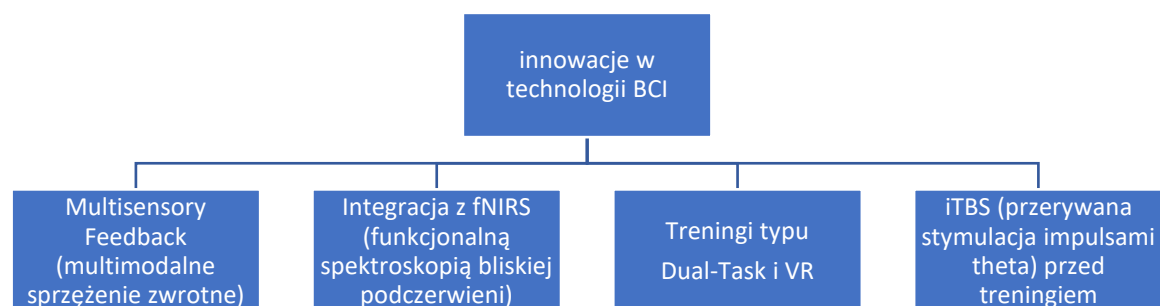
Systemy BCI mają zastosowanie w urazach rdzenia kręgowego pozwalając na omijanie miejsca uszkodzenia rdzenia, a tym samym umożliwiając sterowanie egzoszkieletami lub systemami elektrostymulacji bezpośrednio za pomocą myśli. Działania te poprawiają zarówno funkcje motoryczne, sensoryczne, jak również zdolność wykonywania czynności dnia codziennego. [6] BCI to ogromny wysiłek dla mózgu, który trenuje koncentrację i uwagę, oferując pacjentom aktywny wpływ na proces uzyskiwania niezależności w codziennych aktywnościach poprzez reorganizację sieci neuronalnych. [7]

Innowacyjne metody

Technologia BCI zwiększa swój zasięg o nowe stosowane metody. Dzięki nowościom w zakresie multimodalności i zaawansowanego monitorowania (fNIRS) systemy stają się bardziej precyzyjne i dopasowane do indywidualnych potrzeb pacjenta, stanowiąc kluczowy element przyszłych strategii leczenia ciężkich chorób tj. urazy rdzenia, czy stan po udarach.

Multimodalne sprzężenie zwrotne (Multisensory Feedback) [5] oferuje połączenie bodźców wizualnych (VR), proprioceptywnych (ruch robota) oraz dotykowych (wibracje), co silniej aktywuje korę czuciowo-ruchową. Zastosowanie funkcjonalnej spektroskopii bliskiej podczerwieni pozwala na bezbolesne i przenośne monitorowanie zmian w utlenowaniu mózgu w czasie rzeczywistym podczas ćwiczeń, co daje terapeutom lepszy wgląd w postępy neuroplastyczności (integracja z fNIRS). [8]

Wprowadzane są również inne metody tj. treningi typu Dual-Task, które łączą wyobrażenia ruchowe z grami kognitywnymi w VR, jak i wspomaganie neurostymulacji impulsami theta (iTBS). Stosowanie przerywanej stymulacji o tych pasmach częstotliwości na grzbietowo-boczną korę przedczołową przed treningiem BCI pomaga wyeliminować problem tzw. „nieefektywności BCI” -sytuacji, w której część pacjentów nie potrafi modulować sygnałów mózgowych. Zostają poszerzane możliwości współczesnej neurorehabilitacji w technologii BCI, oferując pacjentom narzędzia do aktywnej odbudowy utraconych funkcji. [9]



Schemat 3. Nowości zastosowane w interfejsach mózg-komputer.

Nieinwazyjne systemy BCI wykazują istotny wpływ na poprawę funkcji motorycznych, sensorycznych oraz zdolności wykonywania czynności życia codziennego u pacjentów z deficytami neurologicznymi. [6]

Technologia BCI stanowi przełom w neurorehabilitacji, oferując możliwość aktywnego wpływania na proces zdrowienia poprzez reorganizację sieci neuronalnych zarówno dzieci, jak i osób dorosłych.

Źródła:

1. Ji X., Lu X., Xu Y., Zhang W., Yang H., et al. (2025), "Effects and neural mechanisms of a brain-computer interface -controlled soft robotic glove on upper limb function in patients with subacute stroke: a randomized controlled fNIRS study", *Journal on NeuroEngineering and Rehabilitation*
2. Chen H., Yun G. (2026), "Efficacy of Brain-Computer Interface Therapy for Upper Limb Rehabilitation in Chronic Stroke: Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials", *Journal of Medical Internet Research*
3. Fan Y., Gao L., Lin Z., Zhang T., Bai X., Chen L. (2026), "The effect of brain-computer interface training on cognitive function in stroke patients: a systematic review and meta-analysis", *Journal of Neurology*
4. He J. Yuan Z., Quan I., Xi H., Guo J., et al. (2025), "Multimodal assessment of a BCI system for stroke rehabilitation integrating motor imagery and motor attempts: a randomized controlled trial", *Journal on NeuroEngineering and Rehabilitation*
5. Lu R., Pang Z., Gao T., He Z., Hu Y., et al. (2025), "Multisensory BCI promotes motor recovery via high-order network-mediated interhemispheric integration in chronic stroke", *BMC Medicine*
6. Sun Z., Hu S., Zhu J., Ye Z., Ma M., Ma G. (2025), "The impact of non-invasive brain-computer interface technology on the therapeutic effect of patients with spinal cord injury: a summary of evidence based on meta-analysis", *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*
7. Wan C., Zhang Q., Qiu Y., Zhang W., Nie Y., Zeng S., et al. (2025), "Effects of dual-task mode brain-computer interface based on motor imagery and virtual reality on balance and attention in patients with stroke: a randomized controlled pilot trial", *Journal on NeuroEngineering and Rehabilitation*
8. Zhang J., Zhang Z.Y., Wang Y.L., Zhou B., Xia C.Y., et al. (2025), "Unveiling the upper-limb functional recovery mechanisms in stroke patients using brain-machine interfaces: a near-infrared functional imaging-based study", *Scientific Reports*
9. Chen J., Liu Q., Cai G., Jiang J., Yang X., et al. (2025), "iTBS on RDL PFC improves performance of motor imagery: a brain-computer interface study combining EEG and fNIRS", *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*

Opracowała: Justyna Proniewska