

# Interfejsy mózg-komputer

## – krótka historia

Artykuł recenzowany

**ANDRZEJ MICHNIK<sup>1, 2</sup>**

<sup>1</sup>Sieć Badawcza Łukasiewicz  
- Instytut Techniki  
i Aparatury Medycznej  
ul. Roosevelta 118, 41-800 Zabrze  
andrzej.michnik  
@itam.lukasiewicz.gov.pl

<sup>2</sup>Wydział Inżynierii Biomedycznej,  
Szkoła Doktorów,  
Politechnika Śląska, ul. Akademicka 2a,  
44-100 Gliwice  
andrzej.michnik@polsl.pl

*Słowa kluczowe:*  
interfejs mózg-komputer,  
neuralink, mózg

*Keywords:*  
brain-computer interface,  
neuralink, brain

### Streszczenie

*Nie tak dawno temu, interfejsy mózg-komputer były jedynie domeną powieści science-fiction. Obecnie dla wielu osób niepełnosprawnych ruchowo, interfejsy mózg-komputer stają się powoli nadzieją na przywrócenie lub kompensację utraconych funkcji. Niezależnie od branży medycznej, interfejsy mózg-komputer stanowią również bardzo interesujący temat dla firm działających w branży rozrywkowej czy mediach społecznościowych. W artykule zostały przedstawione najpopularniejsze techniki odczytywania aktywności mózgu wykorzystywane w interfejsach mózg-komputer. Przedstawiono również przykłady najnowszych prac prowadzonych w tej dziedzinie.*

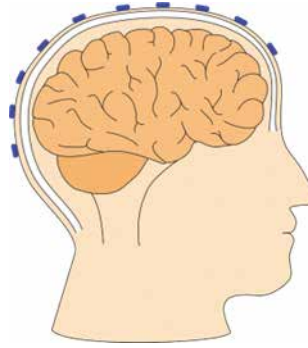
### Abstract

*Not so long ago, brain-computer interfaces were only the domain of science fiction novels. Currently, for many people with motor disabilities, brain-computer interfaces are slowly becoming a hope for restoring or compensating for lost functions. Regardless of the medical industry, brain-computer interfaces are also a very interesting topic for companies operating in the entertainment and social media industry. The article presents the most popular brain activity reading techniques used in brain-computer interfaces. Examples of recent work in this field are also presented.*

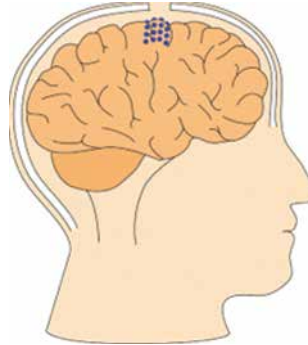
## WPROWADZENIE

Pierwsze popularne komputery osobiste, na początku lat 80-tych, komunikowały się z użytkownikiem za pomocą trybu tekstowego, a podstawowym interfejsem wejściowym była klawiatura, gdzie interfejsem wyjściowym był telewizor lub monitor (kineskopowy). W kolejnych latach systemy operacyjne przeszły do graficznych interfejsów komunikacji, gdzie klawiatura pojawiała się w towarzystwie myszki, którą później, głównie w przypadkach laptopów, zastąpił lub uzupełnił gładzik. W kolejnym kroku rozwoju naszej współpracy z komputerami, będziemy coraz częściej korzystali z przestrzeni wirtualnej, do której na początku będziemy się przenosili korzystając z gogli VR a także z użyciem nowych interfejsów, o których dzisiaj jeszcze niewiele wiemy. Wciąż trwają poszukiwania interfejsów bardziej intuicyjnych i niezawodnych, np. wydaje się, że możliwość rozmowy głosowej z komputerem jest rozwiązaniem najbardziej intuicyjnym, jednak już dzisiaj widzimy, korzystając z asystentów głosowych takich jak: Siri, Cortana, Alexa czy Google Assistant, że są to rozwiązania wolne i z ograniczeniami. Wciąż trwają poszukiwania doskonalszego sposobu komunikacji człowieka z komputerem. W dzisiejszych rozwiązaniach, pomiędzy myślą, która powstaje w naszym mózgu a wprowadzeniem informacji do komputera, pośredniczą nasze mięśnie wprowadzające odpowiednio kończyny w ruch, które znów wchodzą w interakcję z urządzeniami elektronicznymi takimi jak np.: klawiatura, myszka lub gładzik. Powstaje pytanie, czy można wyeliminować tych pośredników? Są przypadki, w których np. z powodu wypadku lub choroby, człowiek traci władzę w kończynach lub traci kończynę. Wtedy pojawiają się rozwiązania, które pozwalają na komunikację bezpośrednio z mózgiem lub układem nerwowym człowieka. Rozwiązaniami interfejsów mózg-komputer zainteresowane jest także wojsko, np. 25 listopada 2020 został opublikowany artykuł na portalu c4isrnet [1] o tym, iż armia USA chce zbadać potencjalne możliwości bezgłośnej komunikacji żołnierzy na polu walki za pomocą interfejsów mózg-komputer. Niezależnie od wcześniej opisanych zastosowań medycznych czy wojskowych, interfejsy mózg-komputer stają się również interesujące dla firm produkujących urządzenia powszechnego użytku. Może w niedalekiej przyszłości zamiast uczyć się pisać na klawiaturze, będziemy się uczyć obsługiwać interfejs mózg-komputer, który stanie się tak powszechny jak dzisiejsza klawiatura?

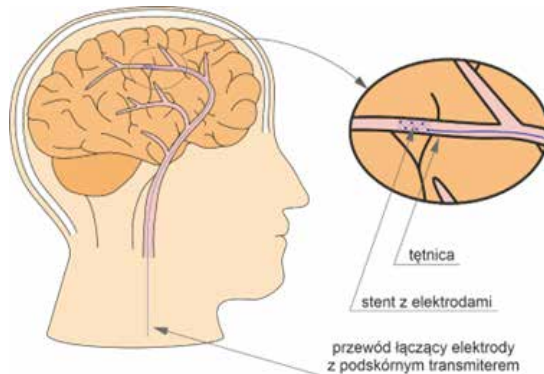
Mózg jest najbardziej skomplikowanym organem człowieka. Obecnie, pomimo już posiadanej przez naukę ogromniej wiedzy na temat budowy i realizowanych przez ludzki mózg funkcji, wciąż jest organem, który skrywa niezliczoną ilość tajemnic [2]. Jedną z przyczyn takiego stanu rzeczy jest to, iż



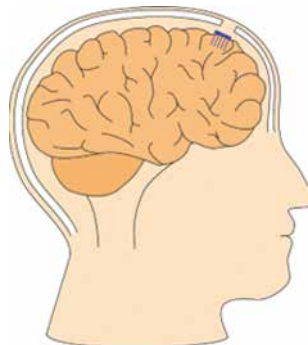
Rysunek 1. Przykładowe rozmieszczenie elektrod EEG lub czujników fNIRS, źródło własne.



Rysunek 2. Elektro-kortykografia (ECoG), źródło własne.



Rysunek 3. Elektrody ECoG umieszczone na stencie, źródło własne.



Rysunek 4. Implant w postaci elektrod wbitych w tkankę mózgu, źródło własne.

natura w drodze ewolucji, zabezpieczyła ten organ z każdej strony twardą kością czaszki wraz z dodatkową osłoną w postaci opon mózgowych [3]. Taka

osłona zapewnia skuteczną ochronę przed urazami mechanicznymi a jednocześnie utrudnia wykradanie informacji o sposobie funkcjonowania mózgu przez badaczy.

Jedną z najprostszych i najstarszych technik nieinwazyjnego odkrywania tajemnic mózgu jest badanie jego czynności bioelektrycznej czyli elektroencefalografia (EEG) za pomocą elektrod mających kontakt elektryczny ze skórą głowy. Pierwsza rejestracja sygnału EEG człowieka została przeprowadzona przez Hansa Bergera w roku 1929. Jednak szczegółowe analizowanie aktywności elektrycznej, niecałych 100 miliardów neuronów, naszego mózgu za pomocą kilku czy nawet kilkuset elektrod umieszczonych na głowie, przez grubą ścianę kości i tkanek miękkich, nie pozwala odczytać zbyt szczegółowych informacjach kłębiących się w jego wnętrzu.

Inną techniką, która łączy badanie EEG ze stymulacją za pomocą bodźców np. wzrokowych, głosowych lub czuciowych, jest technika potencjałów wywołanych, przykłady zastosowania tej bardzo interesującej techniki zostaną opisane w dalszej części artykułu. Elektrody EEG przedstawione na Rys.1 mogą również zostać zastąpione przez czujniki optyczne funkcjonalnej spektroskopii w bliskiej podczerwieni (fNIRS), taki pojedynczy czujnik jest czujnikiem podobnym do czujnika pulsoksymetrycznego, badającego zmiany poziomu natlenienia krwi w danym obszarze mózgu. Badanie jest możliwe dzięki dobremu przenikaniu fal bliskiej podczerwieni (700–1000nm) przez skórę i kości. Jeżeli dany obszar mózgu będzie wykonywał jakieś absorbujące zadanie, to czujnik fNIRS po pewnej chwili będzie w stanie wykryć wzrost przepływu i natlenienia krwi w tym obszarze[4]. Dzięki tej metodzie, w stosunkowo tani i nieinwazyjny sposób możemy obrazować aktywność mózgu, niestety nie jest to metoda potrafiąca szybko reagować na zmiany aktywności mózgu.

Jeżeli jednak będziemy chcieli zbadać aktywność mózgu z większą szczegółowością, możemy zastosować inwazyjną metodę zwaną elektrokortykografią (ECoG) Rys.2, która polega na nałożeniu elektrod na powierzchnię mózgu, co niestety w tym przypadku wymaga usunięcia fragmentu czaszki naturalnie chroniącej mózg.

Metodę ECoG możemy również zastosować w sposób mniej inwazyjny, nie uszkadzając naturalnych barier ochronnych mózgu w postaci kości czaszki i tkanek miękkich, można to uzyskać za pomocą specjalnego stenta-elektrody, wprowadzonego za pomocą angiografii cewnikowej do naczynia krwionośnego w wybranym obszarze mózgu. Na obwodzie stenta rozmieszczone są mikroelektrody, które przylegając do ścianek naczynia krwionośnego pozwalają odczytywać aktywność mózgu lub go stymulować, Rys.3. Taki stent musi współpracować

z dodatkowym transmitterem umieszczonym pod skórą w innej części ciała.

Kolejnym krokiem uzyskania jeszcze dokładniejszej informacji z mózgu jest wbicie implantu w postaci elektrod w tkankę nerwową, Rys.4. W tym wypadku uzyskamy sygnał o dużej amplitudzie z dużą rozdzielczością czasową, dzięki takiemu sygnałowi będziemy w stanie precyzyjnie analizować pracę neuronów mózgu, niestety jest to metoda wysoce inwazyjna.

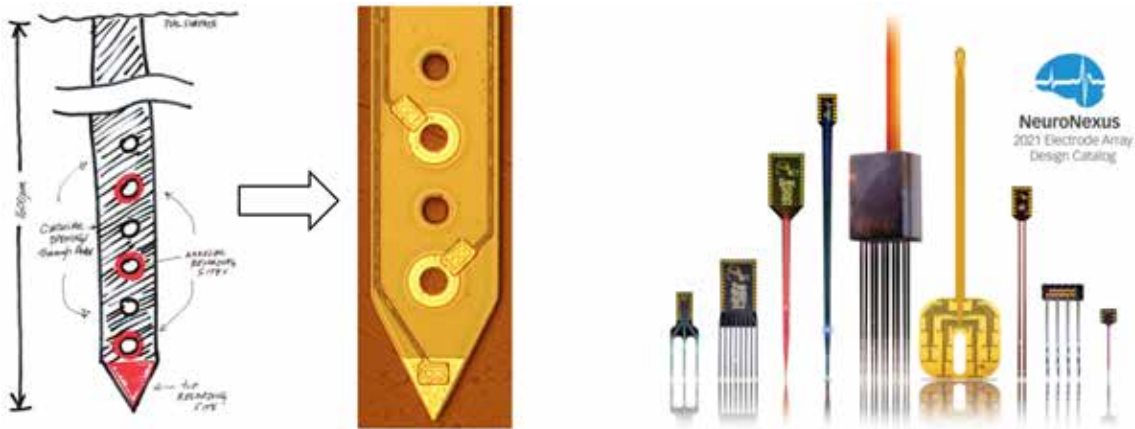
Pojedyncza igła implantu może się składać z kilku elektrod na różnych głębokościach, umożliwiających odczyt sygnałów elektrycznych z różnych głębokości tkanki nerwowej. W Internecie można znaleźć firmy, które specjalizują się w produkcji tego typów implantów do przeprowadzania badań na mózgach, głównie zwierząt. Przykładem takiej firmy jest np. NeuroNexus [5], Rys. 5.

## ■ WZROST ZAINTERESOWANIA INTERFEJSAMI MÓZG – KOMPUTER

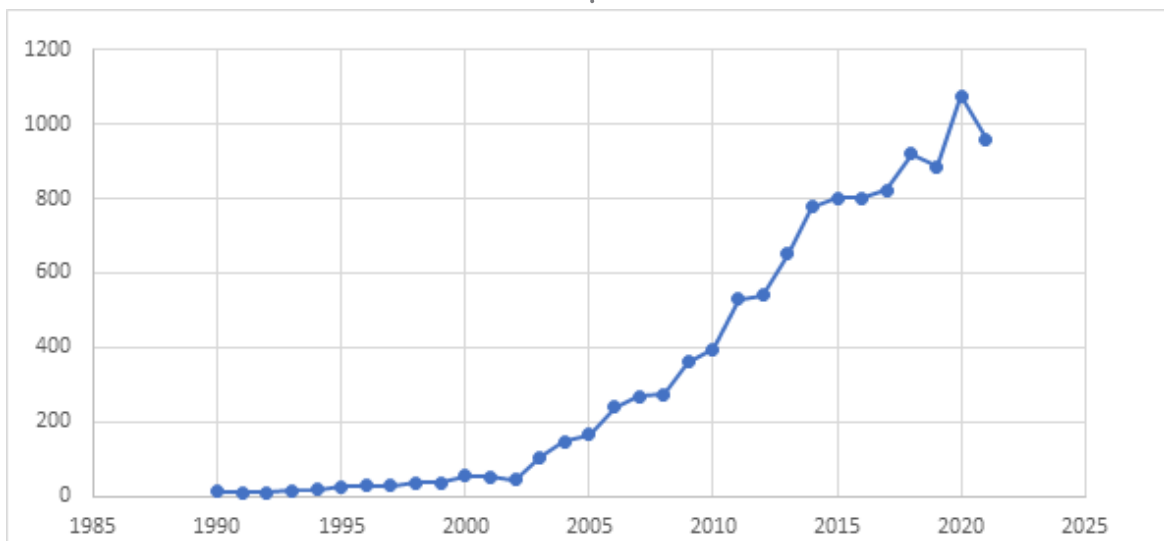
Prostą metodą sprawdzenia zainteresowania danym zagadnieniem jest przeszukanie bazy artykułów naukowych. Analizując wyniki przeszukania w bazie PubMed, można zauważyć ciągły wzrost zainteresowania zagadnieniami interfejsów mózg-komputer. Bazę przeszukano na obecność słów kluczowych zawierających hasła: Brain – Computer Interface (BCI) lub Brain – Machine Interface (BMI), użyto zapytania: „(brain) AND ((computer) OR (machine)) AND (interface)”. Wykres zaprezentowany na Rys.6 przedstawia ilość artykułów na temat interfejsów mózg-komputer w poszczególnych latach, można łatwo zauważyć, że szczególną datą jest rok 2002, od którego następuje liniowy wzrost zainteresowania, który w chwili przeprowadzenia przeszukania (2021-11-30) przekracza 1000 artykułów rocznie. Można podejrzewać, że przyczyną zwrócenia uwagi naukowców na temat interfejsów mózg-komputer był odważny eksperyment przeprowadzony przez zespół Kevina Warwicka w roku 2002, który został szczegółowo opisany w dalszej części artykułu. Innym czynnikiem wzrostu zainteresowania, może być również wzrost zainteresowania sieciami neuronowymi, które znakomicie ułatwiają wielokanałową analizę sygnałów neuronalnych mózgu w czasie rzeczywistym.

## ■ EEG

Pierwszym przykładem techniki, która może posłużyć do budowy interfejsu mózg-komputer, jest elektroencefalografia. Takie rozwiązanie zostało opracowane na amerykańskim uniwersytecie w Houston. Badaczom udało się stworzyć algorytm, który na podstawie nieinwazyjnie odczytanych sygnałów z 64-kanalowego EEG, był w stanie sterować otwieraniem i zamykaniem protezy dłoni, Rys. 7. Algorytm



Rysunek 5. Przykład oferty producenta implantów elektrodowych firmy NeuroNexus[5].



Rysunek 6. Zainteresowanie interfejsami mózg-komputer na podstawie przeszukania PubMed.



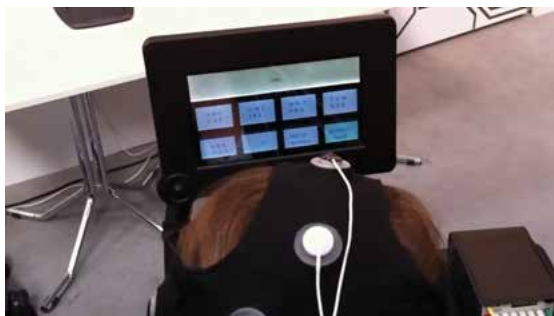
Rysunek 7. Eksperyment kontroli protezy za pomocą myśli, zdjęcie z komunikatu prasowego University of Houston[6].

sterowania protezą powstał na bazie analiz aktywności mózgu zdrowych osób podczas chwytania różnych przedmiotów. Wyniki prac nad algorytmem zostały opublikowane w roku 2015 [6], wcześniej uważano, że taka kontrola protezy jest możliwa tylko dzięki sygnałom mózgowym odczytanym inwazyjnie z wnętrza lub z powierzchni mózgu. Jednocześnie można zauważyć, że zastosowane rozwiązanie nie pozwala na selektywne odczytywanie pobudzeń wielu mięśni a jedynie na proste zamykanie i otwieranie protezy.

#### ■ POTENCJAŁY WYWOŁANE

Kolejnym przykładem nieinwazyjnej i dość widowiskowej metody komunikacji z komputerem jest technika potencjałów wywołanych. Jednym z popularnych zastosowań potencjałów wywołanych jest wypisywanie tekstu za pomocą skupiania wzroku na kolejnych literach lub grupach liter. W tej technice,





**Rysunek 8.** Zdjęcie ekranu komputera z elektrodami EEG na głowie badanej osoby. Wczesna wersja programu „Blinker” z roku 2012, polskiej firmy BrainTech [7].



**Rysunek 9.** Kadr z filmu reklamowego firmy NextMind, prezentujący kontrolę myślami interfejsu programu multimedialnego [8].



**Rysunek 10.** Zdjęcie z artykułu opisującego przypadek Terrego Haringtona [9].



**Rysunek 11.** Przykład obrazów wygenerowanych na podstawie zmierzonej aktywności mózgu. Zdjęcie: Grigory Rashkov/Neurobotics [11].

na monitorze wyświetlane jest kilka pól, na których wypisane są litery (Rys. 8). Istotne jest, że każde z tych pól pulsuje ze swoją charakterystyczną częstotliwością. W następnym kroku należy odczytać tą charakterystyczną częstotliwość z sygnału EEG osoby badanej. Taka metoda znacząco upraszcza problem „czytania myśli”.

Wykorzystanie potencjałów wywołanych może być nieocenione dla osób z porażeniami lub amputacjami, jednocześnie można również zauważyć pewien trend wykorzystania tych technik przez osoby zdrowe w życiu codziennym. Przykładem takiego zastosowania jest urządzenie opracowane przez francuski startup NextMind, który w roku 2020 udostępnił proste urządzenie odczytujące skupienie uwagi wzrokowej na elementach graficznych np. interfejsu programu multimedialnego, Rys. 9. Ten interfejs może również współpracować z okularami VR.

Ciekawostką jest, że potencjały wywołane, w tym wypadku słuchowe potencjały wywołane, są już obecnie powszechnie wykorzystywane podczas badania słuchu u noworodków. To nieinwazyjne badanie (ABR) pozwala już w pierwszych dniach życia zapłodzonego dziecka sprawdzić czy dziecko dobrze słyszy.

Inne bardzo interesujące wykorzystanie wzrokowych potencjałów wywołanych wiąże się z reakcjami mózgu na pokazywane obrazy. Mózg inaczej reaguje na obrazy, które zna osoba badana, a inaczej na obrazy nieznanne. Reakcję mózgu bada się za pomocą technik EEG. Wyniki takiego badania mogą zostać wykorzystywane w sądownictwie. Przykładem praktycznego wykorzystania tej techniki jest przypadek Terrego Haringtona [9], który po 23 latach spędzonych w więzieniu, poddał się takiemu badaniu, w wyniku czego został zwolniony z odbywania kary. Jako 17-latek został oskarżony o zabójstwo i skazany na dożywocie. Podczas badania Terrego (Rys.10), analizowano pojawianie się fali P300 (P300 oznacza załamek dodatni na przebiegu EEG, który pojawia się z opóźnieniem 300ms od wyświetlenia obrazu) w odpowiedzi na pokazywane mu zdjęcia z miejsca zbrodni i zdjęcia z koncertu, na którym jak twierdzi był w czasie popełnienia zbrodni.

Badanie czy dana osoba rozpoznaje przedstawiane jej obrazy lub frazy, zostało nazwane „Brain Fingerprinting”. W latach 2016-2017, doktor Larry Farwell prowadził liczne badania w USA nad ocenianą dokładności i wiarygodności tej techniki. Może ta technika pozwoli w przyszłości odciążać wymiar sprawiedliwości przez szybkie rozstrzygnięcie spraw, które obecnie toczą się latami? Z drugiej strony, czy nie zbliżamy się do momentu w historii ludzkości, w którym myśli ludzi przestaną być ich prywatną własnością? Takie pytanie powoli przestaje być tylko pytaniem retorycznym, są już dostępne publikacje,

które opisują eksperymenty odczytywania z mózgu obrazów (Rys.11), które widzimy, śnimy lub wyobrażamy sobie [10][11].

### ■ FACEBOOK (META)

Nowymi interfejsami mózg-komputer interesują się również najwięksi giganci technologiczni. Podczas konferencji Facebooka, w roku 2017 dr Regina Dugan, wiceprezes Facebooka ds. inżynierii, ujawniła plan opracowania w ciągu dwóch lat nieinwazyjnego interfejsu mózg-komputer, który umożliwi wpisywanie tekstu z szybkością 100 wyrazów na minutę. Ten rezultat miał być osiągnięty poprzez odczytywanie aktywności neuronalnej ośrodka mowy w mózgu za pomocą funkcjonalnej spektroskopii w bliskiej podczerwieni (fNIRS). W roku 2021 projekt prowadzony przez Facebook Reality Labs został zamknięty z uwagi na nieosiągnięcie zamierzonych rezultatów. Siły zespołu Facebook Reality Labs zostały skupione m.in. na elektromiograficznej (EMG) opasce odczytującej elektryczne pobudzenia mięśni przedramienia (Rys.12). Opaska jest rozwinięciem wcześniejszej opaski Myo opracowanej przez startup Thalmic Labs, do której patenty zakupiła firma CTRL-labs, która następnie w roku 2019 została przejęta przez Facebooka.

Innym ważnym wydarzeniem dla Facebooka było w roku 2014 przejęcie firmy Oculus, która była twórcą dobrze znanych okularów VR Oculus Rift. Obecnie okulary VR Oculus Quest 1 i 2 potrafią również śledzić dłonie i palce za pomocą wbudowanych w nie czterech kamer (Rys.13), jednak nie jest to rozwiązanie wolne od wad z uwagi ograniczeń wynikających z zastosowania kamer, takich jak np. przysłanianie jednej ręki drugą. Te ograniczenia można wyeliminować stosując opaski EMG.

Facebook jest bardzo silnie zaangażowany w budowanie ekosystemu bazującego na wirtualnej rzeczywistości. W 2021 ogłosił stworzenie w Europie 10 tyś. nowych miejsc pracy [14], które pomogą w rozwoju metawersum, czyli nowego wirtualnego świata, w którym będzie można: pracować, spotykać się, grać czy robić zakupy.

### ■ KEVIN WARWICK – PIERWSZY CYBORG

Historia bardziej inwazyjnego podejścia, a jednocześnie dająca większe możliwości, rozpoczęła się w roku 2002, gdy profesor Kevin Warwick wraz z zespołem z Uniwersytetu Coventry z Wielkiej Brytanii, pozwolił wszczepić sobie matrycę elektrod 10x10 (Utah) do nerwu pośrodkowego w lewym przedramieniu (Rys.14). Celem eksperymentu była ocena potencjalnych możliwości takiego interfejsu i możliwości powikłań [15].

W trakcie eksperymentu, trwającego 96 dni, wykorzystano wzmocnione sygnały do kontroli pracy



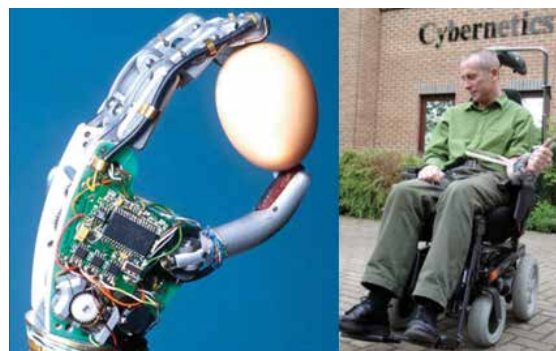
Rysunek 12. Kadr z filmu prezentujący prototyp opaski Facebooka [12].



Rysunek 13. Kadr z prezentacji możliwości okularów VR Oculus Quest należącej do Facebooka [13].

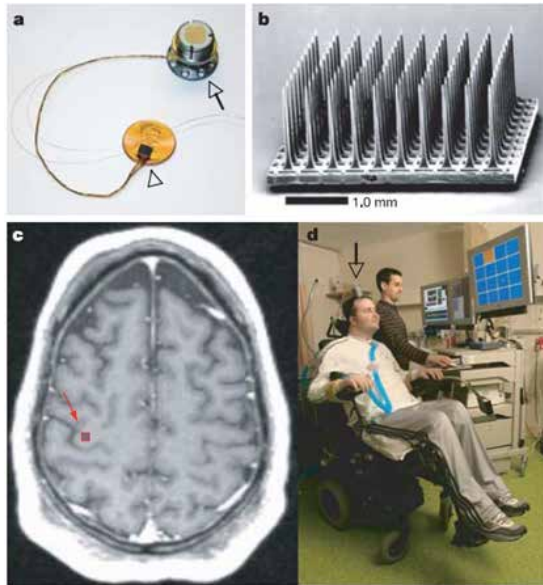


Rysunek 14. Po lewej zdjęcie matrycy Utah 10x10, po prawej zdjęcie z operacji wszczepienia matrycy [15].

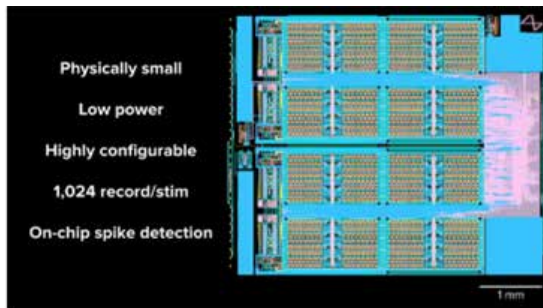


Rysunek 15. Zdjęcie protezy i wózka inwalidzkiego kontrolowanego przez wszczepiony implant [15].

protezy dłoni, a także prowadzono stymulację nerwów w celu uzyskania wrażenia dotyku. Implant został również wykorzystany do sterowania wózkiem inwalidzkim. Główną obawą podczas trwania eksperymentu był problem wystąpienia stanu zapalnego



Rysunek 16. Zdjęcie z opublikowanego artykułu, a – porównanie matrycy elektrod z monetą 1-dno pensową i złączem przytwierdzonym do czaszki, b – powiększone zdjęcie matrycy Utah 100-elektrodowej, c – wskazanie miejsca umieszczenia matrycy, d – pacjent z implantem podłączony przewodowo do komputera [17].



Rysunek 17. Zdjęcie struktury układu N1, materiały prasowe Neuralink [18].



Rysunek 18. Zdjęcie elementów składowych interfejsu LINK w raz z opisami, materiały prasowe Neuralink [18].

związanego z przechodzeniem przewodów przez skórę eksperymentatora.

Jako ciekawostę można wspomnieć, że Kewin Warwick był autorem artykułu w „Medical Robotics Reports” 2/2013 po tytule „The Diminishing Human-Machine Interfaces” [16], do którego nawiązuje obecny artykuł.

### BRAINGATE

Kolejnym przykładem w zbliżaniu się do źródła informacji, czyli do mózgu, był projekt BrainGate zrealizowany w Massachusetts General Hospital, Brown University oraz przez Department of Veterans Affairs w latach 2004-2006. W ramach tego projektu przeprowadzono badania kliniczne na czterech osobach z tetraplegią, czyli porażeniem czterokończynowym. Eksperyment polegał na implantacji matrycy elektrod 10x10 (Utah) do kory ruchowej, a przetworzone sygnały z tych elektrod umożliwiły kontrolę kursora na ekranie komputera, otwieranie poczty elektronicznej lub obsługę urządzeń np. telewizora (nawet podczas rozmowy).

Przeprowadzony eksperyment i uzyskane rezultaty zostały szczegółowo opisane w artykule opublikowanym w czasopiśmie Nature w 2006 [17]. W tym eksperymencie zastosowano ten sam typ matrycy Utah użytej wcześniej przez Kevina Warwicka. Tutaj również dużym ograniczeniem technicznym były przewody. Do gniazda zamocowanego do czaszki pacjenta był mocowany interfejs w postaci sporej wielkości skrzynki z przedwzmacniczami, którą widać na Rysunku 16d, następnie z tej skrzynki biegł przewód do komputera. W tym eksperymencie również występowało ryzyko pojawienia się stanu zapalnego, związane z przechodzeniem przewodów przez skórę pacjenta z wnętrza mózgu.

### NEURALINK

Opisane wyżej doświadczenia były w roku 2016 inspiracją do powstania firmy Neuralink, której właścicielem jest Elon Musk. W roku 2020 firma zaprezentowała opracowany przez siebie specjalizowany układ scalony o nazwie N1 o rozmiarach 5x5x2mm (Rys.17), który umożliwia obsługę 1024 elektrod, służących do rejestracji lub stymulacji wybranego obszaru mózgu. Wewnątrz konfigurowalnej struktury układu scalonego zawarte jest wstępne przetwarzanie sygnałów, pozwalające ograniczyć ilość danych przesyłanych drogą radiową do dalszej obróbki.

Następnie został zaprezentowany gotowy interfejs mózg-komputer o nazwie LINK, którego sercem jest układ N1. Komunikacja interfejsu z komputerem zrealizowana została za pomocą bezprzewodowego standardu Bluetooth Low Energy, czyli opracowana technologia wolna jest od głównej wady wcześniejszych rozwiązań. Zasilaniem implantu jest akumulator, którego pojemność według Neuralinka powinna wystarczyć na cały dzień pracy. Ładowanie akumulatora rozwiązano za pomocą sprzężenia indukcyjnego. Obudowa interfejsu ma średnicę 23mm i wysokość 8mm (Rys.18), co umożliwia „instalację” interfejsu w otworze wykonanym w kości czaszki pacjenta i zakrycie go skórą głowy bez powstania wybrzuszenia w miejscu implantacji. Dodatkowo



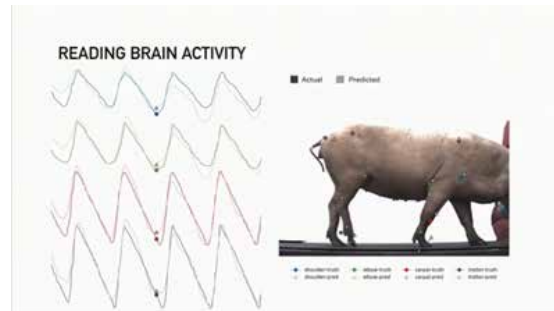
w interfejsie umieszczone są czujniki mierzące przyspieszenia, temperaturę i ciśnienie. Po kompresji danych możliwy jest bezprzewodowy transfer danych z szybkością 1Mbit/s, oczywiście transmitowane są jedynie wybrane kanały z 1024 elektrod, z których odczytuje się najbardziej reprezentatywne sygnały dla danej aktywności.

W sierpniu 2020 roku odbyła się prezentacja, na której Elon Musk przedstawił możliwości implantu LINK. Na jednym ze slajdów udostępnionej prezentacji [18], Elon Musk wymienia długą listę chorób neurologicznych takich jak: utrata pamięci, utrata słuchu, ślepota, paraliż, depresja, bezsenność, silny ból, drgawki, lęki, uzależnienie, udar, uszkodzenie mózgu, dla których implant mózgowy mógłby być skutecznym i niedrogim „lekarstwem”. Można sobie wyobrazić, że walka z wymienionymi chorobami wymagałaby różnych scenariuszów działania, w niektórych przypadkach konieczna będzie tylko stymulacja odpowiedniego obszaru mózgu, w innych przypadkach taki implant musiałby być interfejsem współpracującym z innym zewnętrznym urządzeniem np.: mikrofonem, kamerą, bioniczną protezą dłoni itd. W każdym z wymienionych przypadków taki implant programowany byłby dedykowanym oprogramowaniem i umiejscawiany byłby w odpowiednim miejscu głowy, by móc współpracować z powiązaniem z danym schorzeniem rejonem mózgu. Na tej prezentacji przedstawiane również zostały wyniki prace ze świniami, którym wszczepiono implanty. Jako pokaz możliwości implantu, przedstawione zostało porównanie markerów optycznych z odwzorowaniem ruchów kończyn na podstawie odczytów z kory motorycznej (Rys.19).

Ważnym elementem tworzonej technologii, który został również zaprezentowany na opisywanej konferencji był robot chirurgiczny (Rys.20), którego zadaniem będzie automatyzacja procesu implantacji interfejsu. Według zaprezentowanych informacji, operacja implantacji będzie trwała poniżej godziny, pacjent będzie mógł wrócić do domu tego samego dnia.

Na innym slajdzie (Rys.21) przedstawione zostały kroki „instalowania” implantu za pomocą opracowanego robota chirurgicznego.

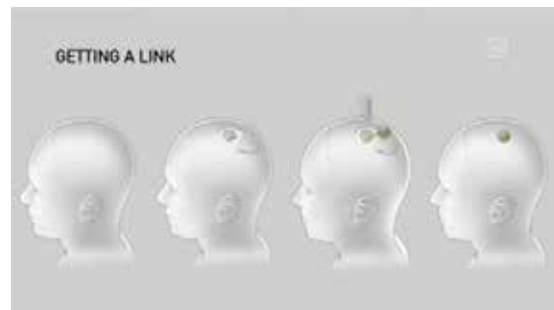
By pokazać potencjał tworzonej technologii, Neuralink w kwietniu 2021 roku udostępnił film [19], którego bohaterką jest małpka o imieniu Pager (Rys.22). Małpce wszczepiono implanty do dwóch półkul mózgowych w korze motorycznej. Na filmie można zobaczyć, jak w pierwszej fazie eksperymentu, małpka porusza kursorem przy pomocy joysticka, podążając za zmieniającymi pozycję kwadratami. W nagrodę za poprawne wykonanie zadanie, małpka nagradzana jest sokiem bananowym podawanym przez rurkę. Podczas pierwszej fazy eksperymentu,



Rysunek 19. Prezentacja dokładności śledzenia ruchów kończyn świni, materiały prasowe Neuralink [18].



Rysunek 20. Robot chirurgiczny do implantowania interfejsu LINK, materiały prasowe Neuralink [18].



Rysunek 21. Etapy instalowania interfejsu LINK, materiały prasowe Neuralink [18].

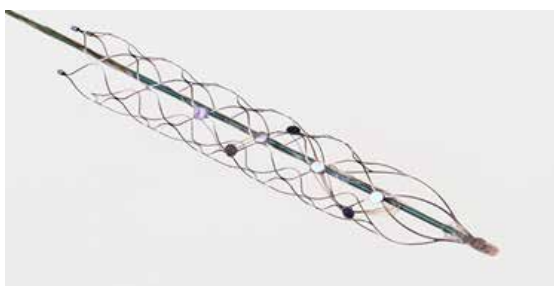
porównywana jest reakcja kory mózgowej z ruchami kończyny ruszającej joystickiem. Równoległe w tej fazie następuje uczenie sztucznej sieci neuronowej korelacji sygnałów odczytanych z mózgu z sygnałami odczytanymi z joysticka. W następnej fazie eksperymentu, po procesie nauczania sieci neuronowej, joystick jest odłączany, a później demontowany, małpka już porusza kursorem tylko za pomocą myśli i interfejsu LINK.

Obecnie Neuralink przygotowuje się do przeprowadzenia eksperymentu klinicznego na ludziach, w lipcu 2021 Neuralink ogłosiło pozyskanie finansowania w wysokości 205 milionów dolarów na dalsze prace [20]. Patrząc na efekty osiągnięte podczas prac nad innymi futurystycznymi projektami prowadzonymi przez firmy Elona Muska, można z dużym

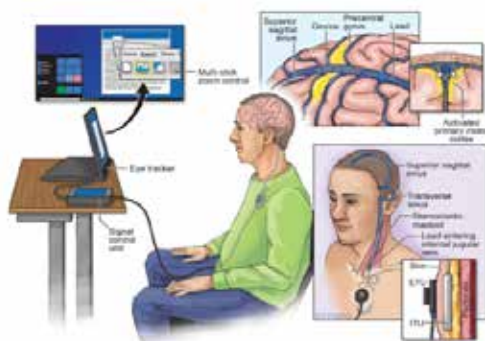




Rysunek 22. Prezentacja eksperymentu, w którym małpka porusza kursorem za mocą myśli, materiały prasowe Neuralink [19].



Rysunek 23. Stentrode czyli stent z mikroelektrodami, materiały prasowe Uniwersytet Melbourne[21].



Rysunek 24. Rysunek opisujący eksperyment użycia stentu Stentrode do kontroli pracy komputera PC [22].

prawdopodobieństwem przyjąć, że ta technologia w niedalekiej przyszłości wejdzie do powszechnego użytku.

#### ■ STENT JAKO NOŚNIK ELEKTROD

Inne podejście do wykradania informacji z naszego mózgu przyjęli badacze z australijskiego Laboratorium Bioniki Naczyniowej na Uniwersytecie w Melbourne. Naukowcy opracowali rozwiązanie mniej inwazyjne niż zostało zaproponowane przez Neuralink, w którym nie jest wymagana trepanacja czaszki. W tym rozwiązaniu elektrody zostały umieszczone na zewnętrznej powierzchni stenta (Rys.23), który po wprowadzeniu cewnikiem i rozprężeniu się przy-

lega elektrodami do ścian naczyń krwionośnych np. w obszarze kory ruchowej. To rozwiązanie jest przykładem elektrokortykografii (ECoG). Pierwsze eksperymenty odczytywania aktywności mózgu za pomocą Stentrode (stent-elektrody) przeprowadzone były na owcach i sfinansowane przez amerykańską Agencję Zaawansowanych Projektów Badawczych w Dziedzinie Obronności (DARPA).

Następnie, w roku 2016 powstaje firma Synchron, założona przez głównego twórcę rozwiązania, neurologa Thomasa Oxleya. W latach 2019-2020 przeprowadzony został eksperyment [22], w którym brały udział dwie osoby chore na stwardnienie zanikowe boczne (ALS). Umieszczono im implant Stentrode w zatoce strzałkowej górnej, sąsiadującej z korą ruchową. Przewody z elektrod zostały wyprowadzone z żyły szyjnej i podskórnie poprowadzone do podskórnej części interfejsu z komputerem. Na zewnątrz ciała pacjenta, pod obojczykiem, umieszczono zewnętrzny element interfejsu. W omawianym rozwiązaniu, zewnętrzny element interfejsu indukuje pole magnetyczne, które zasila implant. Sygnał z mózgu odczytywany za pomocą elektrod próbkiwany był z częstotliwością 2kHz i transmitowany cyfrowo przez skórę, w postaci impulsów światła podczerwonego, do części zewnętrznej interfejsu. Część zewnętrzna mocowana była do skóry za pomocą kleju medycznego. Implant umożliwiał komunikację dwukierunkową, czyli można nim było badać zarówno aktywność mózgu jak i stymulować mózg do odczuwania reakcji zwrotnej np. dotyku, co może być pomocne w przyszłości do pełniej kontroli pracy protezy bionicznej. Następnie uczestnicy przeszli wielodniowy trening, umożliwiający kontrolowanie implantu do generowania akcji w postaci klikania myszką na różne sposoby. System komputerowy, będący interfejsem użytkownika, był wyposażony w urządzenie śledzące wzrok do nawigacji kursorem (Rys.24). Uczestnicy eksperymentu, po przejściu treningu, byli w stanie obsługiwać komputer PC z systemem operacyjnym Windows 10.

Jednak w przedstawionym opisie widać, że zastosowanie technologii elektrokortykografii, której ewidentną zaletą jest mniejsza inwazyjność, ma duże ograniczenia w porównaniu do możliwości wcześniej opisanego rozwiązania firmy Neuralink. Firma Synchron, która jest twórcą stentu Stentrode, otrzymała w roku 2021 zgodę amerykańskiej Agencji ds. Żywności i Leków (FDA) na przeprowadzenie badań klinicznych z udziałem ludzi. Synchron otrzymał zgodę FDA przed swoim największym konkurentem, czyli firmą Neuralink Elona Muska [23]. W wyścigu do opracowania komercyjnego interfejsu mózg-komputer, który będzie zatwierdzony przez FDA, biorą udział głównie trzy firmy: Synchron, Neuralink i Paradromics. Firma Paradromics [24] opracowała

interfejs o nazwie Connexus, który jest podobny do rozwiązania firmy Neuralink.

## ■ PODSUMOWANIE

Przedstawione wyżej wybrane przykłady zaawansowanych projektów pokazują, że pewnie tylko kwestią krótkiego czasu jest moment, w którym standardem stanie się coś co kilka lat temu było jedynie widowiskowym rozwiązaniem technicznym z powieści lub filmu science-fiction. Z jednej strony przedstawione rozwiązania mogą budzić obawy etyczne, z drugiej jednak strony, dla wielu osób po poważnych wypadkach lub chorobach neurologicznych, mogą być nadzieją na nowe życie. Dodatkowo można zauważyć postępującą cyfryzację kontaktów międzyludzkich, przykładem może być wizja metawersu zaproponowana przez firmę Meta (dawniej Facebook), w której ludzie będą się spotykać korzystając ze swoich cyfrowych awatarów, w takim świecie trudno będzie odróżnić osobę w pełni sprawną od niepełnosprawnej, sprawne ciało w takim transhumanistycznym świecie nie będzie potrzebne. Złudzenie rzeczywistości nowego świata będzie bardzo silnie uzależnione od interfejsów jakie będą pośredniczyły pomiędzy człowiekiem a komputerem. Można sobie wyobrazić, że dzięki interfejsom podłączonym bezpośrednio do odpowiednich obszarów mózgu, będzie można wywoływać: obrazy, dźwięki, zapachy, smaki. Idąc dalej, będzie można wpływać również na stany emocjonalne. Ciekawym przykładem efektów prostej stymulacji mózgu jest scena z prawdziwej operacji na otwartym mózgu w filmie „Iluminacja” Krzysztofa Zanussiego z roku 1973. Powoli wkraczamy w nową erę, w której pojawią się nowe możliwości, ale też nowe zagrożenia, o których obecnie możemy jedynie przeczytać w powieściach, np. Neala Stephensa [25] czy Siergieja Łukjanienki [26, 27].

## ■ PODZIĘKOWANIE

Praca powstała w ramach projektu finansowanego przez Ministerstwo Edukacji i Nauki nr DWD/3/7/2019 – RJO15/SDW/001.

## ■ BIBLIOGRAFIA

1. <https://www.c4isrnet.com/battlefield-tech/it-networks/2020/11/25/could-soldiers-silently-communicate-using-brain-signals-in-the-future/>, 2020.11.25.
2. J.Vetulani, „Mózg: fascynacje, problemy, tajemnice”, Kraków 2014, wyd. 4, ISBN: 978-83-735-4520-5.
3. P.A.Young, P.H.Young, D.L.Tolbert, „Neuroanatomia kliniczna”, Wrocław 2016, wyd.3, ISBN: 978-83-65373-40-3.
4. I.S.Di Domenico, H.R.Achala, C.A.Ruocco „Functional Near-Infrared Spectroscopy: Proof of Concept for Its Application in Social Neuroscience” w „Neuroergonomics” 2019, s.49-53, DOI: 10.1016/c2016-0-02196-4.
5. <https://www.neuronexus.com/products/electrode-arrays>, 2021.12.02.
6. <https://www.uh.edu/news-events/stories/2015/March/0331BionicHand.php>, 2015.03.31.
7. <https://youtu.be/xXgZHQopgxM>, 2012.03.30.
8. <https://youtu.be/1V-BiqFze20>, 2019.11.21.
9. [https://psychology.wikia.org/wiki/Brain\\_fingerprinting](https://psychology.wikia.org/wiki/Brain_fingerprinting), 2020.11.25.
10. <https://www.science.org/content/article/mind-reading-algorithm-can-decode-pictures-your-head>, 2018.01.10.
11. <https://scitechdaily.com/image-reconstruction-from-human-brain-waves-in-real-time-video/>, 2019.11.14.
12. <https://youtu.be/WmxLiXAo9ko>, 2021.03.18.
13. <https://youtu.be/2Vko-Kc3vks>, 2019.09.25.
14. <https://about.fb.com/news/2021/10/creating-jobs-europe-metaverse/>, 2021.10.17.
15. K.Warwick, M.Gasson, B.Hutt, I.Goodhew, P.Kyberd, B.Andrews, P.Teddy, A.Shad, „The Application of Implant Technology for Cybernetic Systems”, Archives of Neurology, 2003 DOI: 10.1001/archneur.60.10.1369.
16. K.Warwick, „The Diminishing Human-Machine Interfaces”, Medical Robotics Reports – 2/2013, s.4-11, ISSN: 2299-7407.
17. L.R.Hochberg, M.D.Serruya, G.M.Friehs, J.A.Mukand, M.Saleh, A.H.Caplan, A.Branner, D.Chen, R.D.Penn, J.P.Donoghue, Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia, Nature 2006, DOI: 10.1038/nature04970.
18. <https://youtu.be/iOWFXqT5Mz4>, 2020.08.29.
19. <https://youtu.be/rsCul1sp4hQ>, 2021.04.09.
20. [https://www.crunchbase.com/organization/neuralink/company\\_financials](https://www.crunchbase.com/organization/neuralink/company_financials), 2022.01.19.
21. <https://www.darpa.mil/news-events/2016-02-08>
22. Oxley TJ, Yoo PE, Rind GS, et al, “Motor neuroprosthesis implanted with neurointerventional surgery improves capacity for activities of daily living tasks in severe paralysis: first in-human experience”, Journal of NeuroInterventional Surgery 2021;13:102-108. DOI:10.1136/neurintsurg-2020-016862.
23. J.J.Han “Synchron receives FDA approval to begin early feasibility study of their endovascular, brain-computer interface device”, Artificial Organs. 2021;45:1134-1135, DOI: 10.1111/aor.14049.
24. <https://www.paradromics.com>, 2022.01.08.
25. N. Stephenson, „Zamiec”, 2009, ISBN: 978-83-7418-228-7.
26. S. Łukjanienko, „Labirynt Odbić”, 2009, ISBN: 978-83-7480-144-7.
27. S. Łukjanienko, „Linia Marzeń”, 2001, ISBN: 978-83-241-1460-3.

## KOMENTARZ RECENZENTA...

### Prof. Ryszard Tadeusiewicz

Artykuł podejmuje problematykę, która perspektywicznie może mieć bardzo duże znaczenie. Na obecnym etapie rozwoju metody BCI (Brain-Computer Interface) są traktowane jako badania przyszłościowe, których korzenie i historyczne dokonania zostały w artykule bardzo dobrze przedstawione. Artykuł nie wnosi nowych informacji naukowych lub technicznych, bo oparty jest na analizach literatury, często zresztą raczej reklamowej, a nie naukowej. Niemniej jako wprowadzenie do tematu BCI artykuł może być bardzo przydatny dla czytelników i z tego powodu został pozytywnie zaopiniowany do druku.