

Technologia CyberOko do diagnozy, rehabilitacji i komunikowania się z pacjentami niewykazującymi oznak przytomności

CyberEye technology for diagnosis, rehabilitation and communication
with unconscious patients



CyberOko jest rozwiązaniem opracowanym w Politechnice Gdańskiej, które umożliwia nawiązanie kontaktu i pracę z osobami głęboko upośledzonymi komunikacyjnie. W sposób inteligentny śledzi ruch gałek ocznych, dzięki czemu umożliwia rehabilitację i ocenę stanu świadomości pacjenta nawet w stanie całkowitego porażenia. Rozwiązanie obejmuje także analizę fal EEG, obiektywne badanie słuchu i badanie sygnałów z macierzy elektrod wszczepianych w głąb ludzkiego mózgu. Wspomaga komunikację z pacjentami niewykazującymi oznak przytomności i ich dalszą rehabilitację sposobami umożliwiającymi pokonanie istotnych ograniczeń, jakie mają metody i technologie będące w powszechnym użyciu, tzn. subiektywne skale ocen pacjentów (np. ocena w skali GCS – Glasgow Conciousness Scale), badanie procesów pamięciowych wewnątrz mózgu ludzkiego. Wdrożone urządzenie jest często jedyną szansą dla osoby chorej (np. w stanach podobnych do śpiączki, w przetrwałym stanie wegetatywnym, osoby sparaliżowanej, bez możliwości mówienia), aby mogła ona wyrazić swoje potrzeby.



Słowa kluczowe: komunikowanie się, ocena stanu świadomości, ruchy gałek ocznych, stan zamknięcia, elektroencefalografia, badanie słuchu, elektrody wewnątrzmożgowe

CyberOko (CyberEye) is a pioneering solution developed at the Gdansk University of Technology enabling contact and work with people with profound communication disabilities. It intelligently tracks eye movements, allowing for rehabilitation and assessment of the patient's state of consciousness even in a state of profound paralysis or locked-in syndrome. The technology engineered also includes the analysis of EEG waves, objective hearing testing, and examination of signals from an array of electrodes implanted deep into the human brain. It supports communication with unconscious patients and their further rehabilitation by means that overcome significant limitations of the methods and technologies in common use, i.e. subjective patient rating scales such as, e.g. Glasgow Conciousness Scale (GCS), study of memory processes inside the human brain. The device implemented is often the only chance for the sick person (e.g. in coma-like states, in a persistent vegetative state, paralyzed, unable to speak) to express their needs.

Key words: communication, assessment of consciousness, eye movements, gaze tracking, locked-in syndrome, electroencephalography, hearing test, intracerebral electrodes

DOI: 10.15199/59.2021.3.1

W raporcie Światowej Organizacji Zdrowia – WHO ocenia się, że 1 na 8 pacjentów z ciężkim urazem mózgu zapadnie w długotrwałą śpiączkę lub stan wegetatywny. Według US Multi-Society Task Force on Persistent Vegetative State Guidelines przetrwały stan wegetatywny rozwinię u 1 do 14% osób w przedłużającej się śpiączce pourazowej i u 12% pacjentów w śpiączce niespowodowanej urazem. Najliczniejszą grupę wśród osób z urazami mózgu stanowią młodzi mężczyźni w wieku 15–30 lat, a następnie dzieci poniżej 15 roku życia, zwłaszcza poniżej 5 roku życia. Raport WHO dołącza do tego także osoby starsze, wskazując również na 2-3-krotnie częstsze występowania urazów mózgu u mężczyzn niż u kobiet.

W kontekście wybudzenia można mówić o odzyskaniu świadomości lub odzyskaniu sprawności. O powrocie do przytomności można mówić, gdy u pacjenta zaobserwuje się realne dowody na istnienie świadomości własnej osoby i otoczenia, trwałej obecności odruchów na bodziec wizualny i dźwiękowy oraz interakcji z innymi (ocena w skali GCS – Glasgow Conciousness Scale). Powrót do sprawności wiąże się natomiast z mobilnością, zdolnością komunikowania się i uczenia, umiejętnościami adaptacyjnymi oraz samoopieką, a także uczestnictwem w życiu społecznym.

Już wiele lat temu, w badaniu Tagliaferri (cytowanym w raporcie WHO pt. *Neurological Disorders. Public Health Chal-*

lenges, 2006), obejmującym 12 krajów europejskich, stwierdzono, iż współczynnik występowania urazów mózgu w Europie kształtuje się w przedziale od 150 do 300 przypadków na 100 tys. osób, ze średnią europejską na poziomie 235 przypadków na 100 tys. osób. Biorąc pod uwagę liczebność populacji europejskiej (739 mln), problem ten dotyczy w Europie średnio około 1,7 mln nowych przypadków rocznie.

Wyzwaniem pozostaje ocena stopnia świadomości pacjentów, którzy się nie komunikują, a w tej grupie liczbę fałszywych diagnoz szacuje się na ponad 40%. Pacjent w stanie wegetatywnym (stan apaliczny) może zatem znajdować się w stanie minimalnej świadomości, ograniczonej świadomości lub nawet świadomości pełnej – w tym ostatnim przypadku stan takiej osoby określa się jako syndrom zamknięcia (świadome osoby są zamknięte we własnym, nieruchomym ciele). W sytuacji powiększającej się liczby pacjentów, diagnozowanych jako osoby w utrwalonym stanie wegetatywnym, ze względu na ich zróżnicowany stan świadomości, niezwykle potrzebna stała się obiektywizacja diagnozy. Do tego celu mogą być wykorzystywane nowoczesne technologie komunikowania się ludzi z komputerami. Ich zastosowanie ma istotne znaczenie dla poprawy trafności diagnozy, która jest pierwszoplanowym elementem poprzedzającym właściwą terapię i opiekę nad pacjentami.

* Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki Politechniki Gdańskiej, Katedra Systemów Multimedialnych,
e-mail: andczyze@pg.edu.pl,

Wcześniej, pomimo licznych prób stosowania do tego celu urządzeń elektronicznych, nigdzie nie opracowano i nie wdrożono zintegrowanej metody diagnozowania stopnia świadomości pacjentów apalicznych. Angażowanie uwagi pacjentów, uświadomienie im, że mają szansę na porozumiewanie się przyczyniają się do poprawy jakości życia i, jak pokazują uzyskane rezultaty wdrażania technologii opracowanej do tego celu w Politechnice Gdańskiej, przyczyniają się do wzrostu liczby wybudzeń.

Głównym zastosowaniem zintegrowanego systemu CyberOko jest obiektywizacja procesu diagnozy stanu świadomości oraz prowadzenie terapii pacjentów zdiagnozowanych jako osoby w stanie wegetatywnym. Stosowanie CyberOka jest możliwe w zakładach opiekuńczo-leczniczych, w domach opieki, a także w domach prywatnych, gdzie przebywają osoby doświadczone urazem lub udarem mózgu. Terapia i neurorehabilitacja pacjenta z wykorzystaniem CyberOka polega na pobudzaniu funkcji poznawczych oraz na stymulowaniu zmysłów, w szczególności wzroku i słuchu. Dodatkową funkcją CyberOka jest możliwość komunikowania się pacjenta z otoczeniem przez wybór gotowych poleceń wyświetlanych na ekranie bądź obsługę wirtualnej klawiatury. Ze względu na stosunkowo niski koszt systemu, CyberOko szybko upowszechniło się w tym obszarze zastosowań. Istotnym efektem pracy z systemem jest możliwość nawiązywania przez pacjenta bezpośredniego kontaktu z terapeutą i członkami rodziny. Warto zauważyć, że stosowanie CyberOka może mieć pośrednio pozytywny wpływ na całe społeczeństwo. Najczęstszą przyczyną urazów mózgu na świecie są wypadki komunikacyjne. W Europie stanowią one przyczynę 40% wszystkich przypadków urazu mózgu. Takim urazom ulegają bowiem najczęściej osoby młode, w wieku produkcyjnym. Wyłączenie, zwłaszcza tak licznej ich grupy, z produktywnego życia jest związane z ponoszeniem wysokich kosztów społecznych i również ekonomicznych. Poddanie takich osób terapii i rehabilitacji wspartej pracą z systemem CyberOko może potencjalnie przywrócić przynajmniej część z nich do aktywnego funkcjonowania w społeczeństwie lub ułatwić opiekującym się nimi członkom rodzin lepsze funkcjonowanie w dziedzinie zawodowej. Potencjalne korzyści z zastosowania opracowanego rozwiązania mają zatem wymiar zarówno społeczny, jak i ekonomiczny.

CyberOko opiera się m. in. na autorskiej technologii śledzenia punktu fiksacji wzroku na monitorze komputerowym, opracowanej na Wydziale ETI PG dla potrzeb sparaliżowanych pacjentów, niekomunikujących się w normalny sposób. Po nawiązaniu kontaktu z ośrodkami opieki nad pacjentami z porażeniami mózgowo-rdzeniowymi, a następnie we współpracy z Mayo Clinic (Rochester, USA), rozwinięto badania w kierunku monitorowania sygnałów EEG otrzymywanych najpierw z elektrod zewnętrznych, a następnie z elektrod wszczepianych w mózg pacjentów. Istotą wynalazku wdrożonego do badań i w postaci produktu stało się wyposażenie rozwiązania w oprogramowanie do diagnozy, stymulacji i komunikowania się z pacjentami po urazach mózgu. Opracowanie było wspomagane projektami realizowanymi w PG (projekt *TYPOSZEREK* POIG NCBR, grant *HCIBRAIN* NCN, projekt *NEUROSTIM* FNP oraz projekt *AURUM* finansowany ze środków PG jako uczelni badawczej).

Opracowany system przeszedł formalne badania kliniczne w kilku ośrodkach opieki hospicyjnej i paliatywnej. W 2017 r. uzyskano zgodę Komisji Bioetycznej Collegium Medicum, w wyniku czego do współpracy włączono 6 ośrodków, w których przebywały osoby z porażeniami. Celem badań klinicznych była ocena poziomu świadomości za pomocą obiektywnych

miar śledzenia wzroku podczas sesji angażujących badane osoby do wykonywania ćwiczeń komputerowych. Wyniki uzyskane po zastosowaniu metody powstałej w trakcie tworzenia systemu zostały porównane z wynikami standardowego badania neurologicznego. Opracowana metoda, w przeciwieństwie do stosowanych do tej pory subiektywnych skal neurologicznych, umożliwiła odwzorowanie stanu świadomości pacjentów na skali liczb rzeczywistych, a więc w sposób zobiektywizowany [4,5].

W artykule zaprezentowano w sposób skrótowy rozwijane metody oraz wskazano i krótko omówiono wybrane pozycje bibliograficzne, w których zawarty jest szerszy opis badań oraz uzyskanych wyników.

TECHNOLOGIA CyberOko

CyberOko jest systemem, wykorzystującym opracowane przez zespół technologie śledzenia wzroku i badania aktywności elektrycznej mózgu. System ten stanowi zatem innowacyjne rozwiązanie w zakresie integracji trzech różnych technologii: śledzenia wzroku. Należy zaznaczyć, że innowacyjny aspekt systemu CyberOko stanowi również jego przeznaczenie. Jest on wykorzystywany zarówno w procesie diagnozy, jak i terapii (stymulacji) pacjentów uważanych za osoby w śpiączce lub w stanie wegetatywnym.

Oprogramowanie opracowanego systemu przeznaczone dla pacjentów zdiagnozowanych jako osoby znajdujące się w stanie wegetatywnym składa się z pięciu programów komputerowych:

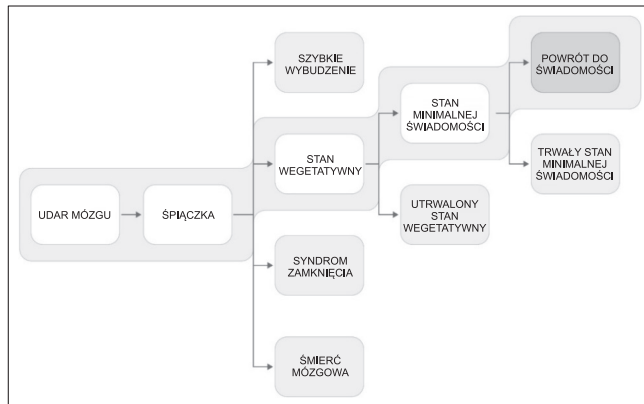
- trening multimedialny – narzędzie do wstępnego nawiązywania kontaktu pacjenta z otoczeniem;
- test do badania świadomości – zestaw 12 zadań, zawierający jedno ćwiczenie badające pole widzenia i ogólną sprawność wzroku oraz 11 zadań, badających funkcje poznawcze pacjenta, takie jak rozumienie, zapamiętywanie, przypomnianie i logiczne myślenie;
- *agrafia i aleksja* – program do diagnozowania zdolności pisania i czytania pacjentów, składający się z 19 zadań dotyczących czytania, rozumienia i pisania;
- *piktogramy* – program umożliwiający wybieranie wzrokiem lub za pomocą intencji ruchu odczytywanej z fal mózgowych EEG: zwrotów, sformułowań lub zdań, które pacjent może mieć zamiar wypowiedzieć; program umożliwia pacjentom w stanie minimalnej świadomości szybką interakcję z otoczeniem;
- *wirtualna klawiatura* – program umożliwiający pisanie tekstu za pomocą wzroku; ponadto umożliwia odczytywanie wprowadzonych w polu edycji tekstów dzięki zastosowanemu syntetyzatorowi mowy.

Pierwszą innowacyjną funkcją CyberOka jest wsparcie procesu diagnozy pacjenta oraz jego rehabilitacji neurologicznej przez stymulowanie odpowiednich funkcji poznawczych. Drugą funkcją jest możliwość nawiązania przez pacjenta bezpośredniego kontaktu z terapeutą i członkami rodziny.

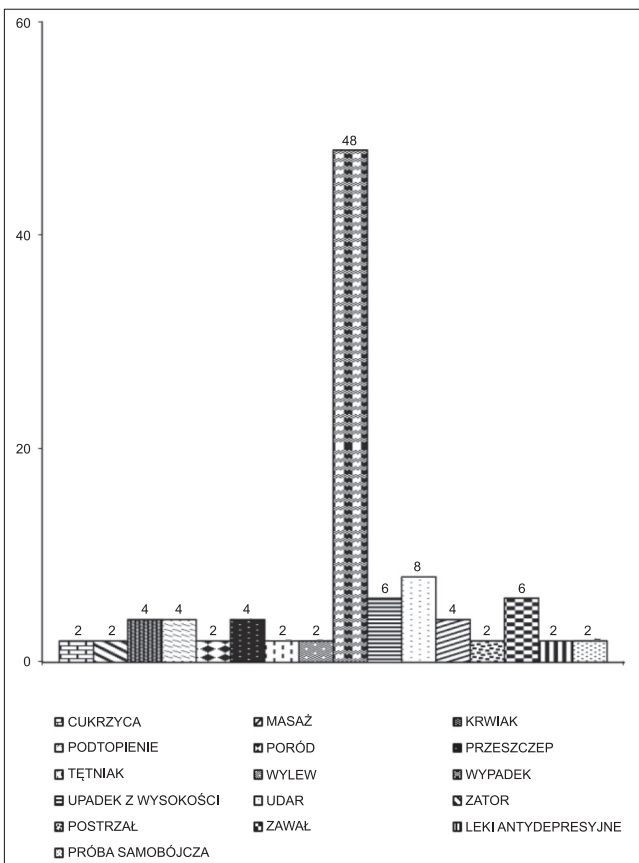
Opracowana technologia śledzenia miejsca patrzenia na monitorze komputerowym, która została zastosowana w rozwiązaniu o nazwie CyberOko, umożliwia wyznaczenie punktu na ekranie monitora, na który patrzy użytkownik komputera, na podstawie analizy informacji zawartej w obrazie oczu użytkownika, nawet kiedy śledzony jest obraz tylko jednej gałki ocznej. Dzięki śledzeniu wzroku i przed wszystkim specjalnemu oprogramowaniu, którego zasada działania jest owocem kilkuletnich badań z udziałem pacjentów, prowadzonych w sześciu ośrodkach opiekuńczo-leczniczych, opracowany system umożliwia nawiązywanie kontaktu z otoczeniem przez osoby unieru-

chomione i niezdolne do komunikacji werbalnej lub gestowej. Zastosowanie systemu śledzenia punktu fiksacji wzroku w określaniu stopnia świadomości stanowi innowacyjne podejście na tle badań prowadzonych w tej dziedzinie w różnych ośrodkach naukowo-badawczych.

Część zaproponowanej metodologii związana z rehabilitacją stanowi jej istotny element. Głównym celem rehabilitacji jest stymulowanie ośrodków odpowiedzialnych za procesy poznawcze z wykorzystaniem systemu śledzenia wzroku oraz stymulacja polisensoryczna, w szczególności stymulacja wzrokowo-słuchowa z wykorzystaniem komputera multimedialnego. W przypadkach niektórych pacjentów stosowana jest także analiza przebiegów elektroencefalograficznych z użyciem opracowanego oprogramowania kasku EEG. Od 2021 r. zakres



■ Rys. 1. Możliwe warianty dotyczące stanu świadomości pacjentów po ciężkich urazach mózgu [5]



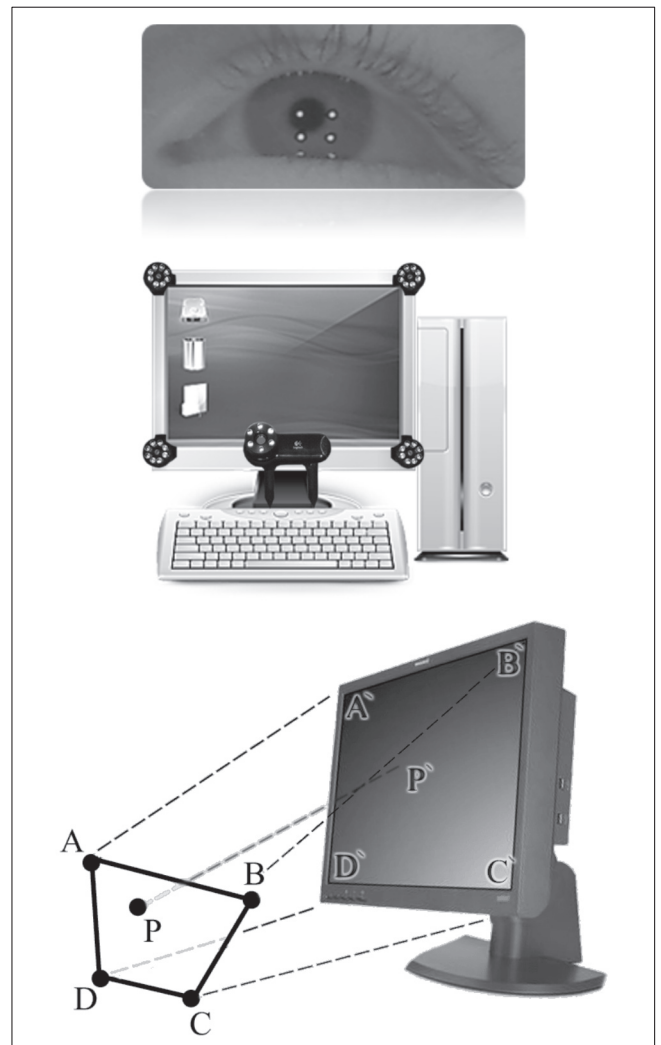
■ Rys. 2. Rozkład rodzajów zdarzenia, będącego przyczyną ciężkiego porażenia neurologicznego u badanych pacjentów

badań został powiększony o możliwości wynikające z elektrod wszczepianych w głębi mózgu. Zakres stosowania opracowanej technologii zobrazowano na rys. 1.

Liczbę i podział przypadków pacjentów badanych przed wdrożeniem urządzenia, pod względem przyczyny utraty świadomości, obrazuje rys. 2.

Zasadniczą część zestawu CyberOko obejmuje skonstruowany system śledzenia wzroku, zilustrowany na rys. 3. Opracowana w Politechnice Gdańskiej technologia śledzenia położenia wzroku, zastosowana w rozwiązaniu, umożliwia wyznaczenie punktu na ekranie monitora, na który patrzy użytkownik komputera, na podstawie analizy informacji zawartej w obrazie oczu użytkownika, nawet kiedy śledzony jest obraz tylko jednej gałki ocznej. Inną ważną częścią zestawu jest kask elektroencefalograficzny (rys. 4). Przebiegi fal mózgowych otrzymywane z elektrod podlegają analizie w celu wykrywania intencji ruchu oraz intencji mowy pacjenta, zaś punkt patrzenia na monitor komputerowy jest śledzony za pomocą urządzenia *gaze tracker* (EGZ) – rys. 5.

CyberOko rozszerzono ponadto o metodę obiektywnego badania słuchu pacjentów z objawami braku przytomności. W tym celu w PG pracownicy dyscypliny ITT skonstruowali oryginalne urządzenie elektroniczne, które rozszerza funkcjonalności znanych wcześniej aparatów ABR (rys. 6), stosowanych



■ Rys. 3. Komputerowe urządzenie do śledzenia wzroku i zasada tego śledzenia przez monitorowanie w podczerwieni tzw. odbić Purkiniego w rogówce



■ Rys 4. Pacjent badany za pomocą kasku elektroencefalograficznego



■ Rys 5. Sposób korzystania przez pacjentkę z urządzenia EGZ

do badania reakcji pnia mózgu na bodźce słuchowe. Opracowane w PG rozszerzenie tej metody umożliwia badanie funkcjonowania wyższych pięter kory słuchowej, tzn. słuchu fonematycznego. Zastosowania tej metody wybiegają poza zakres jej zastosowań w urządzeniu CyberOko, stanowiąc przyczynek do rozwoju uniwersalnych obiektywnych metod badania słuchu.

Uzyskano certyfikaty potwierdzające zgodność rozwiązania z normami dla medycznych urządzeń elektrycznych. Umożliwia to zakwalifikowanie produktu jako wyrobu medycznego klasy I:

- BW/56/2014 – badania w zakresie wymagań ogólnych dotyczących bezpieczeństwa podstawowego i funkcjonowania zasadniczego (zgodnie z PN-EN 60601-1);
- BW/55/2014/ – badania w zakresie kompatybilności elektromagnetycznej (zgodnie z PN-EN 60601-1-2).

CELE BADAWCZE I PRZYKŁADOWE WYNIKI

Zasadniczym celem badawczym projektów związanych z technologią CyberOko było opracowanie koncepcji i metodyki przetwarzania danych otrzymywanych z interfejsów człowiek-komputer **HCI** (*Human-Computer Interface*), umożliwiających ocenę funkcji poznawczych pacjentów po urazach mózgu. Wyniki uzyskane z zastosowaniem metody opracowanej w trakcie tworzenia systemu zostały porównane z wynikami standardowego badania neurologicznego pacjentów. Zależnie od kontekstu w badaniach tych uczestniczyła zróżnicowana liczba osób, tzn. od kilkorga do pięćdziesięciu osób. Okazało się, że sześciu spośród pierwszej grupy dziesięciu pacjentów po ciężkich urazach mózgowych przejawiało oznaki świadomego

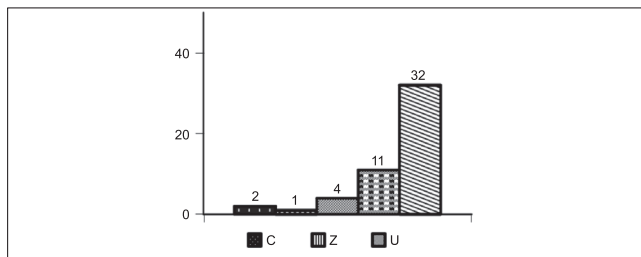
wykonywania co najmniej jednego z pięciu zadań wykorzystanych w badaniu. Tymczasem, przykładowo według pierwszej i kolejnych diagnoz stawianych w toku standardowego badania neurologicznego, jeden z tych pacjentów powinien pozostawać w stanie wegetatywnym, a inny w stanie śpiączki. Opracowana metoda, w przeciwieństwie do stosowanych obecnie subiektywnych skal neurologicznych, umożliwia odwzorowanie stanu świadomości pacjentów na skali liczb rzeczywistych, a więc w sposób obiektywizowany.

Jednym z licznych celów badawczych, których w całości nie sposób w pełni omówić w niniejszej publikacji, było zbadanie umiejętności czytania ze zrozumieniem u pacjentów wybudzonych ze śpiączki, ale pozostających w stanie obniżonej świadomości. Do realizacji tego celu zastosowano również technologię śledzenia wzroku. W toku opracowywania potrzebnego oprogramowania przygotowane zostały różne zadania sprawdzające umiejętność czytania ze zrozumieniem sylab, słów i zdań. Uzyskane wyniki wykazały, że osoby wybudzone ze śpiączki, pozostające w stanie obniżonej świadomości, w większości przypadków w dużym stopniu zachowały umiejętność czytania ze zrozumieniem, ale miały trudności z rozpoznawaniem błędów w tekście pisanym. Uzyskane wyniki umożliwiły sformułowanie zaleceń, dotyczących rozwoju interfejsów człowiek-komputer, opartych na śledzeniu wzroku, przeznaczonych dla osób z deficytami świadomości.

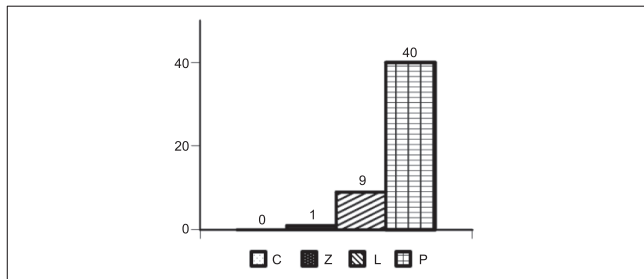
Wyniki analizy zawarto w tabelach 1 i 2, w których przedstawiono liczebność i procent. Obliczono również średnią wraz z odchyleniem standardowym. Graficzną interpretację danych zaprezentowano w postaci wykresów słupkowych pionowych (rys. 7–9). Współzależność pomiędzy dwiema zmiennymi obliczono za pomocą współczynnika korelacji R Spearmana. Ponadto zastosowano: nieparametryczny test U Manna-Whitneya, nieparametryczny test rang Kruskala-Wallisa oraz test Friedmana. Podjęto próbę sprawdzenia funkcji czytania wśród badanych według punktacji opisanej w monografii [5]. W niniejszym artykule zostaną przytoczone jedynie wybrane wyniki



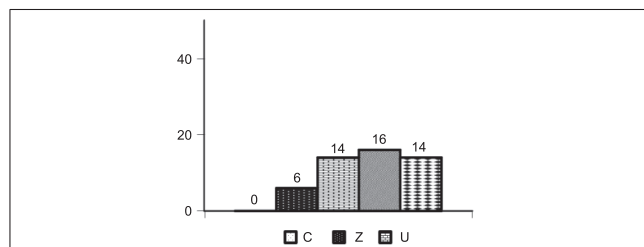
■ Rys 6. Zestaw CyberOko rozszerzony o opracowane urządzenie analizy odpowiedzi z pnia mózgu (ABR), w którym jako pobudzenie stosuje się sylaby



■ Rys 7. Rozkład wyników umiejętności czytania wyrazów jedno- i dwusylabowych



■ Rys. 8. Rozkład wyników kojarzenia wzorców słowno-słuchowych



■ Rys. 9. Rozkład wyników ruchów sakkadowych i fiksacji wzroku

badania funkcji czytania u osób apalicznych. Uzyskane parametry statystyczne dla 50 pacjentów przedstawiono w tabeli 1.

■ Tabela 1. Wyniki badania funkcji czytania (N=50 pacjentów) wyrażone przez miary statystyczne

Średnia	SD	Ufność -95%	Ufność +95%	Min.	Maks.	Q25	Med.	Q75
33,94	7,70	31,75	36,13	16	45	30z	35,5	40

Średni wynik punktowy funkcji czytania w badanej grupie wyniósł 33,94. Jest to wynik lekkiego zaburzenia funkcji czytania – na granicy zaburzenia umiarkowanego. Odchylenie standardowe stanowi 22,7% wartości średniej, co świadczy o znacznym zróżnicowaniu wyników punktowych. Wynik minimalny wyniósł 16 punktów, maksymalny 45 punktów (tabela 2).

■ Tabela 2 Wyniki klasyfikacji funkcji czytania

Odpowiedź	Liczba	%
CZFCZ (całkowicie zniesiona funkcja czytania)	0	0
ZZFCZ (znaczne zaburzenie funkcji czytania)	4	8
UZFCZ (umiarkowane zaburzenie funkcji czytania)	9	18
LZFCZ (lekkie zaburzenie funkcji czytania)	23	46
ZFCZ (zachowana funkcja czytania)	14	28
Razem	50	100

Najliczniejszą grupę stanowili badani z lekko zaburzoną funkcją czytania – 23 osoby (46%) oraz z zachowaną funkcją czytania – 14 osób (28%). Najmniej liczna – badani ze znacznym zaburzeniem funkcji czytania, tj. 4 osoby (8%).

Zaobserwowano, że osoby badane bardzo chętnie wykonywały zadania związane z funkcją czytania. Niejednokrotnie denerwowały się (wzrastała spastyka, pojawiała się wydzielina z rurki tracheotomijnej) w momencie zakończenia jednej sesji trwającej 30 minut. Zaznaczały na urządzeniu CyberOko, że chcą dalej rozwiązywać zadania. Warto wspomnieć, że po zakończeniu sesji, często były znacznie aktywniejsze, bardziej skoncentrowane na otoczeniu i mniej senne. Przeprowadzono

szczegółową analizę każdego z zadań wykonanego w ramach oceny funkcji czytania. W związku z brakiem wcześniejszych badań w tym obszarze zaprezentowano zarówno analizę ilościową, jak i jakościową otrzymanych wyników w każdym z zadań.

Wyniki badań analizowano ponadto w kontekście umiejętności czytania wyrazów jedno- i dwusylabowych. Zadaniem osoby badanej było wskazanie wzrokiem trzech wyrazów wypowiedzianych przez osobę prowadzącą badanie (rys. 7). Słowa wyświetlane na ekranie były zawsze takie same. Oceniano według skali:

- C – całkowicie zniesiona umiejętność;
- Z – znacznie zaburzona umiejętność;
- U – umiarkowanie zaburzona umiejętność;
- L – lekko zaburzona umiejętność;
- P – zachowana umiejętność.

Wśród badanych najwięcej było osób z zachowaną umiejętnością czytania wyrazów jedno- i dwusylabowych – 32 osoby (64%) lub z lekko zaburzoną umiejętnością – 11 osób (22%). Najmniej badanych to osoby ze znacznie zaburzoną umiejętnością czytania wyrazów jedno- i dwusylabowych – 1 osoba (2%).

Kolejnym zadaniem było kojarzenie wzorców słowno-słuchowych (rys. 8). Zadaniem osoby badanej było wskazanie dwóch zdań czytanych kolejno przez osobę prowadzącą. Na ekranie wyświetlane były cztery zdania. Oceniano według skali:

- C – całkowicie zniesiona umiejętność;
- Z – znacznie zaburzona umiejętność;
- L – lekko zaburzona umiejętność;
- P – zachowana umiejętność.

Najwięcej badanych to osoby o zachowanej umiejętności kojarzenia wzorców słowno-słuchowych – 40 osób (80%). Najmniej badanych to osoby ze znacznie zaburzoną umiejętnością kojarzenia wzorców słowno-słuchowych – 1 osoba (2%).

Ponadto badano ruchy sakkadowe i fiksację wzroku (rys. 9). Zadaniem osoby badanej było przeczytanie bezgłośnie tekstu wyświetlanego na ekranie monitora systemu CyberOko. Tekst zawierał pięć wersów. Oceniano według skali:

- C – całkowicie zniesiona umiejętność;
- Z – znacznie zaburzona umiejętność;
- U – umiarkowanie zaburzona umiejętność;
- L – lekko zaburzona umiejętność;
- P – zachowana umiejętność.

Wyniki skali GCS nie pozostawały w istotnej statystycznie korelacji z wynikami aspektów funkcji czytania ($p>0,05$).

Podobnym badaniom poddano układanie zdań, budowanie złożonych wypowiedzi, umiejętność rozpoznawania błędów w tekście pisanym (słuch fonematyczny), a także liczne umiejętności związane z pisaniem, przez wzrokową obsługę wirtualnej klawiatury wyświetlanej na ekranie [5].

Podsumowując, osoby z obniżoną świadomością w zdecydowanej większości uzyskały wyniki wskazujące na zachowaną bądź lekko zaburzoną funkcję czytania. Chętnie wykonywały one zadanie, co może wskazywać na chęć komunikacji ich z otoczeniem. Potwierdza to, że nawet po ciężkich uszkodzeniach mózgu mogą być zachowane funkcje językowe. W omawianym badaniu nie zidentyfikowano żadnej osoby mającej całkowicie zniesioną funkcję czytania.

Wykazano, że 86% osób z obniżoną świadomością ma całkowicie zachowaną lub lekko zaburzoną umiejętność czytania wyrazów jedno- i dwusylabowych. Można to tłumaczyć wspomnianym przez badaczy obszarem wizualnym form słów. Obserwacja wskazywała, że osoby szybko poprawnie wykonywały to

zadanie, czyli mogły domyślać się słów na podstawie samego kontekstu. Wykazano także wysoką poprawność wykonania zadań oceniających kojarzenie wzorców słowno-ruchowych (80% poprawnie wykonało zadanie), uzupełnienie rzeczowników w zdaniach (40% całkowicie zachowana umiejętność i 32% lekko zaburzona) oraz umiejętność czytania ze zrozumieniem (74% poprawnych rozwiązań). Wyniki tych badań dostarczają cennej informacji dotyczącej możliwości komunikowania się i ocen funkcji poznawczych przez wykorzystanie globalnego czytania. Sprawdzone korelację z zachowanymi ruchami sakkadowymi i fiksacją wzroku, ale nie wykazano istotności statystycznej. Zauważono natomiast korelację o średniej sile pomiędzy pamięcią wzrokową wyrazu a umiejętnością rozpoznawania błędów w tekście pisanym, czyli wraz ze wzrostem wyników pamięci wzrokowej wyrazu wzrastała umiejętność rozpoznawania błędów w tekście pisanym (38% wykonało prawidłowo, a 22% wykazało lekkie zaburzenia). Zauważono również istotny wpływ ruchów sakkadowych i fiksacji wzroku na prawidłowe wykonanie tego zadania. Najwyższy wynik umiejętności rozpoznawania błędów w tekście pisanym odnotowano w grupie osób o prawidłowych i lekko zaburzonych ruchach sakkadowych i fiksacji wzroku.

Czytanie jest to złożony proces i wymaga sprawności językowej, ale także myślenia pojęciowego i procesów pamięci. Na podstawie prawidłowo wykonanych zadań oceniających umiejętność opracowania rzeczowników w kontekście (40% prawidłowo, a 32% lekkie zaburzenia) czy czytania ze zrozumieniem (74% prawidłowo wykonało zadanie) można stwierdzić, że osoby mogą mieć w pewnym stopniu zachowane również inne funkcje poznawcze. Częściowo potwierdziło się, że osoby po urazach mózgu czy niedotlenieniu mają zaburzenia syntaktyczne. Całkowity rozpad gramatyki nastąpił u 34% badanych, ale 32% wśród wszystkich badanych miało całkowicie zachowaną umiejętność budowania złożonych wypowiedzi.

BADANIA Z UŻYCIEM KASKÓW ENCEFALOGRAFICZNYCH

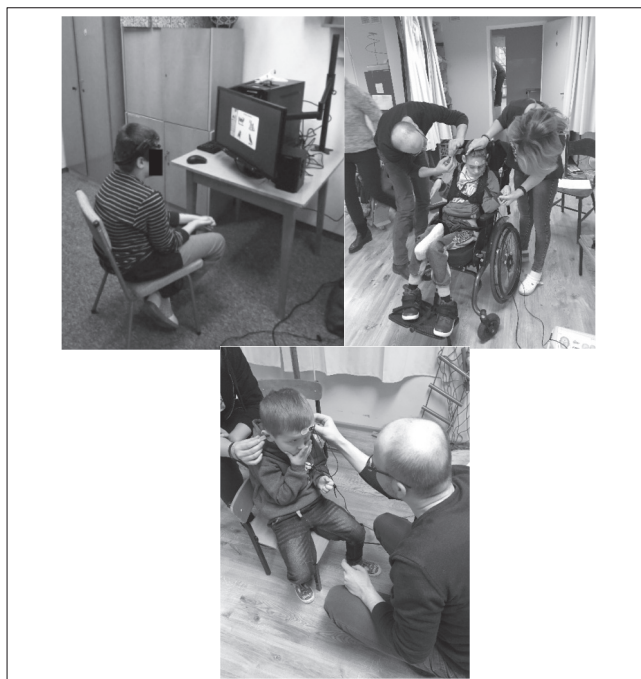
Część spośród zrealizowanych prac badawczych miała na celu określenie sposobów parametryzacji i klasyfikacji sygnałów EEG pod względem maksymalizacji skuteczności rozpoznawania intencji ruchu. Wykorzystano znane wcześniej z literatury obserwacje wykazujące zależność pomiędzy aktywnością elektryczną w różnych partiach mózgu a czynnością wykonywania rzeczywistego ruchu (np. uniesienia ręki). Ponadto analogiczna aktywność nerwowa pojawia się także w sytuacji wyobrażenia sobie ruchu przez badaną osobę. W związku z tym, jeden z celów badawczych w projekcie polegał na zaproponowaniu i przebadaniu nowych metod parametryzacji oraz klasyfikacji sygnałów EEG, które ostatecznie zaowocowały stworzeniem klasyfikatora o wysokiej skuteczności rozpoznawania ruchów rzeczywistych i wyobrażonych na podstawie rejestrowanej aktywności nerwowej. Rozpoznanie intencji ruchu jest szczególnie istotne w interfejsach człowiek-komputer, dedykowanych osobom sparaliżowanym, które przez to uzyskują możliwość m.in. sterowania położeniem kursora na ekranie i zatwierdzania wskazywanych opcji, analogicznie do sposobów obsługi aplikacji za pomocą ekranu dotykowego. W celu potwierdzenia powyższej tezy o wysokiej skuteczności proponowanego podejścia, przeprowadzono wiele eksperymentów. Ich celem było wyko-

rzystanie i porównanie różnych metod uczenia maszynowego zastosowanych do klasyfikacji wyobrazonego ruchu.

W efekcie badań udowodniono, że wyniki subiektywnej oceny stanu pacjentów stosowane w neurologii (GCS) korelują z wynikami uzyskiwanymi za pomocą opracowanych interfejsów człowiek-komputer (EGT i EEG). Dzięki temu możliwa jest obiektywizacja ocen pacjentów z porażeniami mózgowymi z użyciem nowoczesnych technologii informatycznych. Ponadto wykazano, że sieci neuronowe (autoenkodery) mogą służyć do skutecznej analizy sygnałów EEG i EGT, prowadzonej w celu ustalenia stopnia świadomości osób po ciężkich urazach mózgu. Wyniki badań przedstawiono w monografii pt.: *Komputerowe oko świadomości*, w licznych publikacjach oraz wystąpieniach informacyjno-promocyjnych.

Znaczna część prac badawczych rozwijała się na gruncie informatyki i przetwarzania sygnałów, mając na celu optymalizowanie sposobów parametryzacji i klasyfikacji sygnałów EEG pod względem maksymalizacji skuteczności rozpoznawania intencji ruchu. Jeden z celów badawczych polegał na zaproponowaniu i przebadaniu nowych metod parametryzacji oraz klasyfikacji sygnałów EEG. Zaowocowały one stworzeniem klasyfikatora o wysokiej skuteczności rozpoznawania ruchów rzeczywistych i wyobrażonych na podstawie rejestrowanej aktywności nerwowej, wykorzystującego opracowane techniki uczenia maszynowego.

W efekcie badań udowodniono, że wyniki subiektywnej oceny stanu pacjentów stosowane w neurologii (GCS) korelują z wynikami uzyskiwanymi za pomocą opracowanych interfejsów człowiek-komputer (EGT i EEG). Dzięki temu możliwa jest obiektywizacja ocen pacjentów z porażeniami mózgowymi z użyciem nowoczesnych technologii informatycznych. Ponadto wykazano, że sieci neuronowe (autoenkodery) mogą służyć do skutecznej analizy sygnałów EEG i EGT, prowadzonej w celu ustalenia stopnia świadomości osób po ciężkich urazach mózgu. Wyniki



■ Ryc. 10. Badania uwagi oraz stanów emocjonalnych i słuchu uczniów z dysfunkcjami komunikacyjnymi, prowadzone w specjalnym ośrodku szkolno-wychowawczym z użyciem interfejsu wzrokowego i kasku elektroencefalograficznego

śledzenia wzroku i rozszerzenia źrenic mogą być skutecznie wykorzystywane do śledzenia uwagi w zdrowych procesach psychicznych, do interakcji w zaburzeniach świadomości, a nawet do przewidywania wydajności pamięci w różnych chorobach mózgu [1,2].

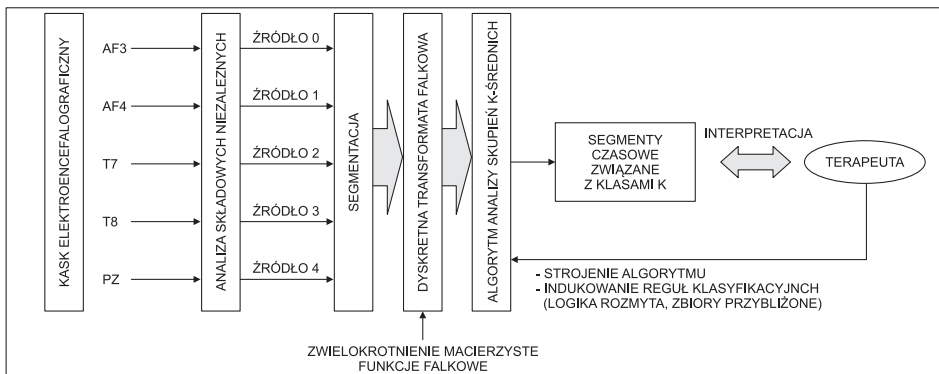
Zespół z Politechniki Gdańskiej prowadził ponadto badania dzieci szkolnych z deficytami i zaburzeniami komunikacji. W badaniach pilotażowych uczestniczyli (za zgodą Rady Pedagogicznej i opiekunów prawnych) uczniowie Specjalnego Ośrodka Szkolno-Wychowawczego w Kościerzynie (rys. 10). Wykorzystano opracowany eksperymentalny system stymulacji polisensorycznej i rejestracji reakcji. Źródłami bodźców były sygnały dźwiękowe i wizualne, a odpowiedzi i zachowanie osób rejestrowano za pomocą urządzenia śledzącego punkt fiksacji wzroku na ekranie i kasku EEG. Ruch gałek ocznych steruje kur-

sorem, służąc do wskazywania obiektów na ekranie, a sygnały elektroencefalograficzne dostarczają informacji o stanie emocjonalnym i o zaangażowaniu uczestnika testu.

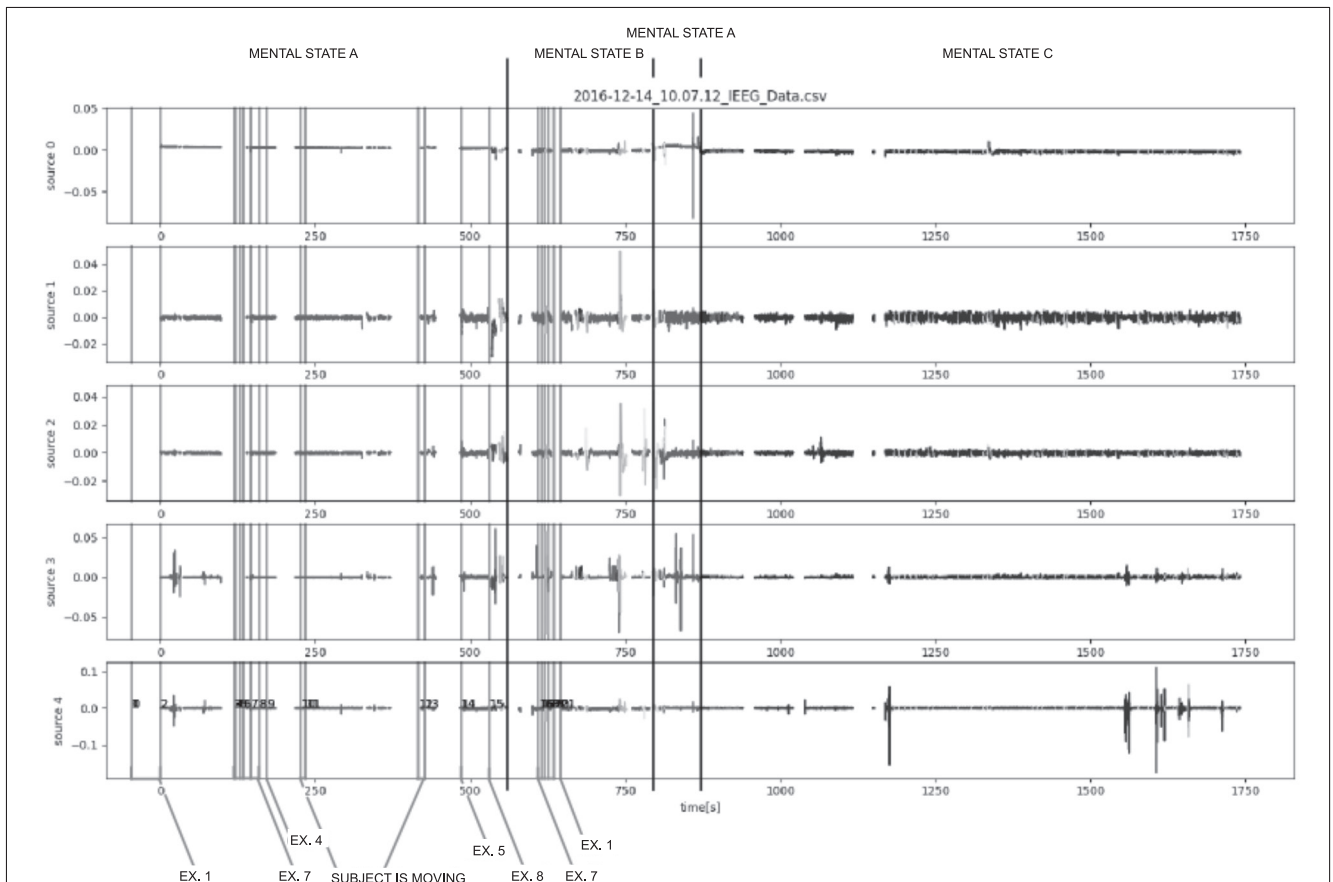
Analiza sygnału EEG wymaga obliczania dyskretnej transformaty falkowej oraz klasteryzacji wartości uzyskanych współczynników falkowych algorytmem k -średnich. Schemat blokowy wykorzystywanego algorytmu analizy sygnałów elektroencefalograficznych pokazano na rys. 11, zaś przykład uzyskanego wyniku automatycznej analizy sygnałów zamieszczono na rys. 12.

Algorytm analizy parametrów reprezentacji falkowej sygnałów dokonał automatycznego zidentyfikowania trzech skrajnie odmiennych stanów emocjonalnych *mental state* A,B,C, różniących się aktywnością monitorowanych obszarów mózgu. W aktualnych wynikach widoczna jest odmienność stanu C od A i B – przede wszystkim związany jest on z etapem odpoczynku po realizacji zadań. A i B to stany wykryte w trakcie aktywności badanego. Dalsze badania dotyczą analizy korelacji estymowanych stanów z rzeczywistymi zachowaniami zaobserwowanymi przez badającego, deklarowanymi przez badaną osobę lub zapisami efektywności realizacji zadań na ekranie z wykorzystaniem śledzenia wzroku.

Były także przeprowadzane badania z zakresu rejestracji i oceny możliwości komunika-



■ Rys. 11. Algorytm analizy sygnałów EEG



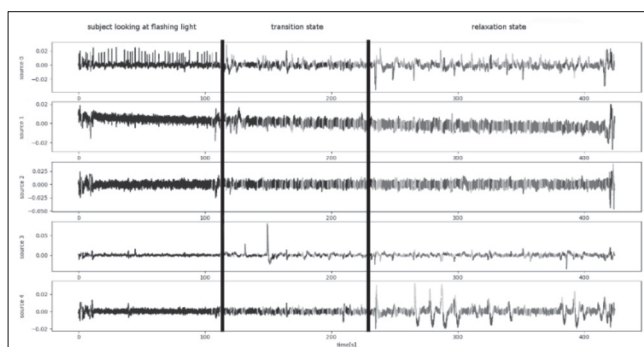
■ Rys. 12. Wyniki rejestracji i klasyfikacji sygnałów otrzymane w trakcie wykonywania zadań 1, 4, 5, 7 i 8, oznaczonych na osi poziomej pod wykresami. Ponad wykresami oznaczono zakresy czasu odpowiadające wykrytym zróżnicowanym stanom emocjonalnym (aktywności mózgowej), roboczo nazwanym *mental state* A, B, C

cyjnych i aktywności neuronalnej osób z ciężkimi urazami mózgu. Badania rozpoczęto od przesiewowego pomiaru akustycznie wywołanego potencjału pnia mózgu, znamionującego prawidłowe funkcjonowanie zmysłu słuchu i drogi słuchowej prowadzącej do wyższych partii mózgu. Badanie nie wymaga świadomego udziału osoby testowanej, odbywa się w sposób automatyczny i służy do potwierdzenia, że osoba jest w stanie świadomie odebrać i zrozumieć komunikaty głosowe prowadzącego. Następnym etapem badań są odbywane właściwe sesje z terapeutą, wykorzystujące prezentację obrazu na ekranie LCD, rejestrację aktywności EEG i śledzenie punktu skupienia wzroku na ekranie (rys. 13).



■ Rys. 13. Stanowisko do łącznego badania interakcji z komputerem z użyciem wzroku i kasku EEG, uruchomione przez widoczny na fotografii w centrum medycznym EPIMIGREN w Osielsku

W eksperymencie wzięło udział 9 osób po udarach mózgu. Otrzymane sygnały EEG przeanalizowano przy użyciu algorytmu automatycznej klasteryzacji, w celu detekcji stanów emocjonalnych, charakteryzujących się najbardziej odmiennymi, czyli dystynktywnymi wartościami parametrów otrzymanych w wyniku analizy. Pierwsza zidentyfikowana grupa to 5 osób współpracujących z terapeutą. W ich sygnałach EEG widoczne są długie stany stabilnej aktywności, a skupienie wzroku na ekranie odpowiada lokalizacji kluczowych elementów interfejsu, tj. prezentowanym napisom, zdjęciom, piktogramom. Druga grupa to 2 osoby – w ich zapisach EEG nie wykryto stanów stabilnej aktywności, jednakże analiza skupienia wzroku wykazała świadome i celowe realizowanie poleceń terapeuty. Problem z analizą EEG mógł być spowodowany niedopasowaniem urządzenia, więc zaplanowano powtórzenie testu. Trzecia grupa to 2 osoby,



■ Rys. 14. Wykryte zmiany stanów emocjonalnych i mentalnych (pionowe kreski) oraz etapy realizacji zadań (etykiety ponad wykresem: „badany patrzy na pulsujące światło”, „stan przejściowy”, „stan relaksacji”)

których zapisy EEG nie znamionują ich aktywnego udziału, nie skupiają też one wzroku na kluczowych elementach na ekranie.

U osób z pierwszej grupy zmiany stanów wykrywane w zapisach EEG następowały w chwilach rozpoczynania nowego zadania (rys. 14).

WPLYW NA SPOŁECZEŃSTWO

CyberOko zapewnia wiele możliwości pacjentom zmagającym się z różnymi zaburzeniami: wpływa na poprawę i stymulację funkcji poznawczych, takich jak pamięć, uwaga i myślenie logiczne. Umożliwia także rozwój mowy, bez względu na jej stopień zaawansowania. System zapewnia nieustanną stymulację narządu wzroku, co znacząco przekłada się na codzienność i poprawę ogólnej jakości życia chorego.

CyberOko jest urządzeniem wyjątkowym – jego rozbudowany i wszechstronny system sprawia, że może on pomóc wielu ludziom, zmagającym się każdego dnia z różnego rodzaju trudnościami. Są to pacjenci z zaburzeniami świadomości – osoby, które doświadczyły urazów mózgowo-czaszkowych (głównie wskutek wypadków komunikacyjnych), udarów mózgu, zmian w mózgu (głównie tętniaki, guzy), niedotlenienia (wskutek podtopienia, nagłego zatrzymania krążenia – NZK czy próby samobójczej). Kolejna grupa pacjentów to osoby świadome, znajdujące się w zespole zamknięcia (LIS) lub chorujące na stwardnienie rozsiane (SM) czy stwardnienie zanikowe boczne (SLA), a także liczna grupa pacjentów z dużymi niedowładami kończyn (np. mózgowo porażenie dziecięce).

Obecnie system jest dostępny w postaci wdrożonego na licencji produktu, posiadającego certyfikat medyczny. Sprawda się w rehabilitacji osób całkowicie porażonych, po udarach lub wypadkach, osób z różnego rodzaju zaburzeniami rozwoju i zaburzeniami mowy, a także w stanie minimalnej świadomości oraz w stanie zamknięcia.

Społeczne znaczenie projektu polega na wynalezieniu, opracowaniu i wdrożeniu do produkcji przełomowego systemu do diagnozowania, rehabilitacji i komunikowania się z osobami niekomunikującymi się w normalny sposób. Znaczenie społeczne tego osiągnięcia polega ponadto na przeniesieniu do Polski nowej amerykańskiej metodyki implantowania i stymulowania pracy mózgu przy użyciu wszczepialnych elektrod oraz na sprzężeniu tej techniki neurochirurgicznej z interfejsem mózg-komputer. Pacjenci chorzy na parkinsonizm i ciężką epilepsję odnoszą bezpośrednią korzyść zdrowotną dzięki zainicjowaniu tego typu operacji w Polsce. Ponadto przeprowadzone badania naukowe przyczyniają się do poznawania działania nieodkrytych dotychczas mechanizmów pamięci ludzkiej.

Walory społeczne technologii CyberOko zostały dostrzeżone przez kapituły licznych nagród, m. in. rozwiązanie zostało wyróżnione Pierwszą Nagrodą Prezesa Rady Ministrów, otrzymało godło promocyjne *Teraz Polska*, tytuł *Polski Wynalazek Roku* (w konkursie TVP i MNiSzW), międzynarodową prestiżową nagrodę medyczną *Prix Galien*, Nagrodę Pracodawców Pomorza i in.

ROZWÓJ BADAŃ LUDZKIEGO MÓZGU

W związku z badaniami prowadzonymi w ramach projektu Neurostim Fundacji na rzecz Nauki Polskiej, realizowanego we współpracy działającego w Katedrze Systemów Multimedialnych Laboratorium Elektrofizjologii Mózgu i Umysłu, Mayo

Clinic (Rochester, USA) i Uniwersytetu Medycznego im. Piastów Śląskich, w dniu 23 lutego 2021 r. przeprowadzono pionierską operację mózgu. Podczas niej dr Michał Kucewicz, pracownik Politechniki Gdańskiej, zarejestrował za pomocą aparatury elektrofizjologicznej, zakupionej ze środków projektu, sygnały z elektrod wszczepionych głęboko w mózg pacjenta. W trakcie operacji przytomny pacjent wykonywał zadania wymagające zaangażowania pamięci, z użyciem techniki śledzenia wzroku i oprogramowania zainspirowanego wcześniej opracowaną przez pracowników naukowych dyscypliny ITiT technologią CyberOko. Od tego czasu technologie CyberOko są stosowane razem z rejestracją sygnałów z wszczepionych specjalistycznych elektrod hybrydowych w mózgu ludzkim do śczytywania aktywności elektrofizjologicznych, takich jak fale mózgowe dla odkrycia mechanizmów pamięci i funkcji poznawczych oraz ich leczenia. Użycie elektrod hybrydowych do badań z nagraniami w mózgu ludzkim, dzięki projektowi Neurostim FNP, zostało w Polsce wprowadzone do operacji po raz pierwszy.

Pierwsze wszczepienie elektrod do ludzkiego mózgu zostało przeprowadzone 23.02.2021 r. w Uniwersyteckim Szpitalu Klinicznym im. Jana Mikulicza we Wrocławiu. Od tego czasu prowadzone są kolejne operacje tego typu. Dr Michał Kucewicz wykorzystuje CyberOko do stymulacji mózgu i badania poprawy zdolności zapamiętywania bodźców wizualnych w toku stymulacji. Dane te są analizowane w kontekście poznawania głębokich struktur mózgu i sposobów stymulacji, które mogłyby polepszyć nie tylko zdolności poruszania się pacjentów, ale także funkcje poznawcze, takie jak zapamiętywanie. Są to przełomowe badania tego typu z użyciem specjalnych elektrod i śródoperacyjnych testów pamięci ze śledzeniem wzroku w Polsce i na świecie.

ANALIZA RYTMÓW FAL MÓZGOWYCH Z ELEKTROD IMPLANTOWANYCH

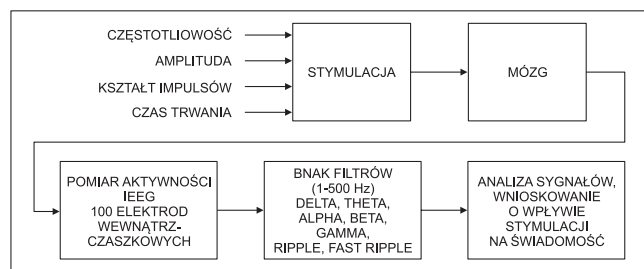
Aktualne światowe trendy w badaniach nad świadomością dotyczą detekcji i analizy aktywności w wielu partiach mózgu w zakresie bardzo wysokich częstotliwości, tj. pasmach gamma (30 – 100 Hz), wysokich gamma (50 – 125 Hz), zafalowaniach (*ripple* 125 – 250 Hz) i szybkich zafalowaniach (250 – 500 Hz). Ponieważ nie istnieje możliwość przezczaszkowej rejestracji tych częstotliwości, to stosowana jest rejestracja wewnątrzczaszkowa, z użyciem elektrod umieszczanych bezpośrednio w strukturach mózgu. Przeprowadzone badania wykazują, że świadome aktywności: percepcji, zapamiętywania i przywoływania z pamięci obrazów związane są ze wzrostem wysokoczęstotliwościowych oscylacji w regionach wzrokowym (*primary visual*), limbicznym (*limbic*) oraz wyższych rzędach korowych (*higher order cortical*), w kolejności zgodnie z kierunkiem przetwarzania bodźców wzrokowych.

Nawiązana została współpraca z Mayo Clinic, USA, w której czynny udział bierze dr Kucewicz, w celu przebadania obecności sygnałów związanych z procesami świadomości: zapamiętywania oraz przywoływania bodźców i informacji: wzrokowej, słuchowej, werbalnej (słownej). Klinika współpracuje z pacjentami z głęboko implantowanymi elektrodami w strukturach hipokampu, ciała migdałowatego oraz w pobliżu kory wzrokowej, słuchowej i ruchowej – średnio do 100 elektrod u osoby. Zakres wspólnych badań obejmuje sprawdzenie reakcji partii mózgu i obecności charakterystycznych sygnałów w wysokich częstotliwościach gamma (do 500 Hz), w zależności od podawanych

elektrycznie bodźców: sygnały o dostosowywanej amplitudzie (0,25 – 3,0 mA), czasie trwania stymulacji (500, 750, 1000 ms), częstotliwości (10, 25, 50, 100, 200 Hz) oraz odnosi się do sposobu pobudzania wybranych par elektrod sygnałem prostokątnym (przeciwnie dwubiegunowo, symetrycznie). Oczekuje się, że zweryfikowany zostanie sposób, w jaki sposób mózg ludzki odpowiada na te stymulacje, szczególnie aktywności gamma (30 – 150 Hz), świadczące o procesach poznawczych.

Dane zarejestrowane w Mayo Clinic pochodzą z 30-minutowych sesji z około 60 pacjentami, którzy mają elektrody implantowane na korze mózgu oraz głęboko w strukturach hipokampu, ciała migdałowatego i innych częściach mózgu. Celem tych eksperymentów jest znalezienie parametrów stymulacji mózgu, które wywołają zmiany w aktywności iEEG (*intracranial EEG/ ECoG/LFP*). Podczas tych 30 minut pacjent leży w łóżku, a co 3 s stymulowana jest wybrana para elektrod. W trakcie jednej sesji aplikowanych jest około 400 różnych parametrów stymulacji. Jednocześnie nagrywany jest sygnał ze wszystkich implantowanych elektrod w różnych częściach mózgu (daleko i blisko elektrod stymulujących) – średnio 100 elektrod u każdego pacjenta.

Wykazano, że niezbędne jest opracowanie metod filtrowania artefaktów stymulacji w zarejestrowanych sygnałach, obecnych nawet przez pewien czas po stymulacji. W Politechnice Gdańskiej podjęto się usuwania wspomnianych wyżej artefaktów oraz poszukiwania ukrytych współzależności pomiędzy parametrami stymulacji mózgu, zmianami w aktywności iEEG oscylacjami mózgu. Filtracja i analiza sygnałów uzupełnia zatem ogólny schemat układu, w którym prowadzone są eksperymenty pokazane na rys. 15.



■ Rys. 15. Schemat metody poszukiwania parametrów stymulacji mózgu, które wywołają zmiany w aktywności iEEG (*intracranial EEG/ECoG/LFP*)

Dla sygnału z każdej elektrody realizowany jest proces analizy tego sygnału w podpasmach, związanych z typowymi rytмами fal mózgowych. Analiza ta wykorzystuje między innymi transformację Hilberta do pozyskania informacji o charakterze obwiedni i zmianach energii sygnału przed, w trakcie i po bodźcowaniu. Charakterystyczne zmiany sygnału możliwe są do zaobserwowania także w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej, tj. w widmie sygnału, pozyskiwanym w wyniku zastosowania transformacji Fouriera lub transformacji falkowej. Umożliwiają one analizę sygnału z pożądaną rozdzielczością czasową i częstotliwościową. W celu zwiększenia dokładności, stosowana jest także analiza w oknie czasowym, np. o długości 1024 próbki, przesuwany po sygnale z dużym zakładkowaniem.

Metody analizy sygnałowej uzupełniane są także metodami statystycznymi. Ma to na celu wyeliminowanie z sygnałów z elektrod składników pochodzących z aktywności elektrycznej pobliskich mięśni i przepływu krwi w naczyniach. Między innymi stosowana jest analiza składowych głównych, analiza

składowych niezależnych, analiza korelacyjna, projekcja sygnałowo-przestrzenna (*Signal-Space Projection – SSP*), polegająca na rozkładaniu sygnału na komponenty i określaniu, które z nich zawierają niepożądane artefakty. Podstawą działania tych metod jest spostrzeżenie, że sygnał aktywności mięśniowej pochodzi ze ściśle określonego miejsca, np. od żuchwy, powiek i propaguje się do wielu pobliskich elektrod i jest rejestrowany z charakterystycznymi opóźnieniami i tłumieniami, na tle właściwych sygnałów EEG. Wzorzec opóźnień i tłumień może zostać użyty do eliminacji niepożądanych artefaktów. Odpowiednio wyselekcjonowane cechy sygnałów wykorzystywane są następnie w procesie wykrywania i oceny zależności między bodźcami a reakcją kluczowych partii mózgu. W tym celu stosuje się eksperymentalnie metody inteligentne, np. klasyfikację rozmytą, modelowanie za pomocą zbiorów przybliżonych, nadzorowany i nienadzorowany trening sztucznych sieci neuronowych, klasyfikację za pomocą maszyny wektorów nośnych. W rezultacie możliwe staje się określenie, jakie bodźcowanie zastosować w celu uzyskania pożądanej, korzystnej aktywności nerwowej.

W perspektywie oczekuje się, że wyniki tego typu badań zapewnią dokładniejsze diagnozowanie poziomu świadomości oraz opracowanie metod aktywnego, nieinwazyjnego, przezczaszkowego stymulowania osób z zaburzeniami świadomości w celu poprawy aktywności odpowiednich partii mózgu i poprawy oraz zdolności komunikowania się pacjentów po udarach mózgu lub cierpiących na różnego typu zaburzenia (nasiloną epilepsję, afazję, depresję i in.).

W związku z rozwojem wymienionych wątków badawczych ukazały się liczne publikacje. Wybrane spośród nich zostaną skrótkowo omówione poniżej.

W artykule [1] przedstawiono wyniki dotyczące analizy dużego zestawu zapisów śródczaszkowych EEG (iEEG) od 45 pacjentów z elektrodami wszczepionymi zarówno podtwardówkowo na powierzchni korowej, jak i podkorowo. Badani byli stymulowani w blokach o zmiennych parametrach częstotliwości i amplitudy prądu. Do badania pamięci używano CyberOko. Wraz ze wzrostem parametrów stymulacji zaobserwowano wzmocnienie theta (4–7 Hz) i osłabienie mocy gamma w tym paśmie (29–52 Hz).

Artykuł [2] zawiera wyniki śledzenia wzroku i rozszerzenia źrenic, które mogą być skutecznie wykorzystywane do śledzenia uwagi w zdrowych procesach psychicznych, do interakcji w zaburzeniach świadomości, a nawet do przewidywania wydajności pamięci w różnych chorobach mózgu. W tym artykule omówiono zakres zastosowań systemu CyberOko, aby objąć pojawiające się zastosowania kognitywne interfejsów do śledzenia wzroku w badaniach neurologicznych, praktyce klinicznej i przemyśle biomedycznym.

W artykule [3] przedstawiono możliwość wykorzystania CyberOka do oceny umiejętności czytania ze zrozumieniem u pacjentów z minimalną świadomością, wybudzonych ze śpiączki. Wykorzystano zróżnicowany materiał sylabowy, słowny i zdaniowy, aplikacje sterowane spojrzeniem, służące do oceny umiejętności czytania ze zrozumieniem. Uzyskane wyniki wykazały, że osoby o minimalnej świadomości w większości przypadków zachowały umiejętność czytania ze zrozumieniem.

Praca [4] prezentuje interfejs do śledzenia wzroku, wdrożony w celu poprawy oceny świadomości u pacjentów z nabytymi urazami mózgu. Zgodnie z oceną ostrej fazy GCS, dziewięciu z nich uznano za nieświadomych i poniżej stanu minimalnej świadomości. Okresowe badanie neurologiczne potwierdziło

pozostawanie kilku poniżej stanu minimalnej świadomości. Opracowany interfejs człowiek-komputer (HCI) ujawnił, że kilkoro pacjentów było wystarczająco świadomych, aby wykonać przynajmniej jedno z zadań śledzenia wzroku.

Najbardziej obszerną pozycją jest monografia [5], w której przedstawiono koncepcję rozwiązania CyberOko i podsumowano wyniki prac badawczych z udziałem osób (badania przeprowadzono przy jego użyciu po uzyskaniu pierwszej zgody komisji bioetycznej). W książce zarysowano także wyzwania badawcze, które następnie były realizowane w kolejnych latach. Owocem tego są m. in. nowsze publikacje [1–4] i wiele innych artykułów. Ogółem na temat technologii związanych z rozwiązaniem CyberOko ukazało się około 20 publikacji w czasopismach naukowych, 4 rozdziały poświęcono im w zagranicznych publikacjach książkowych i 15 referatach konferencyjnych.

* * *

CyberOko – dzięki zastosowaniu wielu mechanizmów z różnych dyscyplin, m.in. informatyki, sztucznej inteligencji, neurologii i neurofizjologii – zaowocowało wieloma pozytywnymi rezultatami w rehabilitacji licznych pacjentów kilkadziesiątu placówek opiekuńczo-leczniczych. Jest ponadto dostępne na rynku medycznym. Urządzenia opracowane na podstawie pierwotnego rozwiązania CyberOko, w którym stosowane jest śledzenie wzroku, zostały wprowadzone na skalę międzynarodową przez firmę odpryskową (*spin-off*). Projekty badawcze, które wyewoluowały z pierwotnego rozwiązania o charakterze czysto praktycznym stale rozwijają się (do 2022 r. kontynuowany jest projekt NEUROSTIM Fundacji na rzecz Nauki Polskiej, zaś w 2021 r. w Katedrze Systemów Multimedialnych WETI PG pozyskano dwa nowe projekty badawcze NCN w programach OPUS-20 oraz Weave-UNISONO). Uzyskano ponadto 5 patentów krajowych i zgłoszono ochronę w Amerykańskim Urzędzie Patentowym.

LITERATURA (wybrane pozycje)

- [1] Lech M., B.M. Berry, C. Topcu, V Kremen., P. Nejedly, B. Lega, R.E. Gross., M.R. Sperling, B.C. Jobst, S.A. Sheth, K. Zaghoul, K.A. Davis., G.A. Worrell, M.T. Kucewicz, "Direct electrical stimulation of the human brain has inverse effects on the theta and gamma neural activities"; *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 68, no. 12, pp. 3701 – 3712, 5.2021, DOI: 10.1109/TBME.2021.3082320.
- [2] Lech M., A. Czyżewski, M.T. Kucewicz, "CyberEye: New Eye-Tracking Interfaces for Assessment and Modulation of Cognitive Functions beyond the Brain"; *Sensors*, No. 22, vol. 21, pp. 1 – 7, 11.2021, DOI: 10.3390/s21227605.
- [3] Kwiatkowska A., M. Lech, P. Ody, A. Czyżewski, "Post-comatose patients with minimal consciousness tend to preserve reading comprehension skills but neglect syntax and spelling"; *Scientific Reports*, No. 19929, vol. 9, pp. 1 – 12, 12.2019, DOI: 10.1038/s41598-019-56443-6.
- [4] Lech M., M.T. Kucewicz, A. Czyżewski, "Human Computer Interface for Tracking Eye Movements Improves Assessment and Diagnosis of Patients with Acquired Brain Injuries"; *Frontiers in Neurology*, No. 6, vol. 10, pp. 1 – 9, 2019, DOI: 10.3389/fneur.2019.00006.
- [5] Kwiatkowska A., A. Czyżewski., *Komputerowe oko świadomości*; Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, pp. 1 – 239, 2017.