

BADANIE ELEKTROENCEFALOGRAFICZNE WYBRANYCH REAKCJI OŚRODKÓW MÓZGOWYCH SPOWODOWANYCH EFEKTEM OTWARCIA OCZU

ELECTROENCEPHALOGRAPHIC RESEARCH OF SELECTED REACTION CENTERS OF THE BRAIN CAUSED BY AN EYE-OPENING EFFECT

Paweł Kościuszko^{1*}, Wojciech Ciesielka¹, Andrzej Gołaś¹

¹Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii
Mechanicznej i Robotyki, Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń
Ochrony Środowiska, 30-059 Kraków, al. A. Mickiewicza 30

* e-mail: pkoscius@agh.edu.pl

STRESZCZENIE

W pracy opisano badania i analizę sygnałów elektroencefalograficznych zarejestrowanych w trakcie czynności otwierania oczu. Eksperyment rejestracji w określonych przedziałach czasowych zmian sygnału EEG, spowodowanych otwieraniem oczu przez badanego. W eksperymencie wykorzystano metodę 10-20 rozmieszczenia elektrod oraz wykorzystano 19 elektrod do rejestracji aktywności bioelektrycznej mózgu na czterech częściach kresomózgowia (czołowej, ciemieniowej, potylicznej oraz skroniowych). Zaproponowano algorytm procesu określenia wektora symptomów. Do określenia elementów niniejszego wektora wykorzystano wartości: maksymalne, minimalne oraz ich przyrost, przeprowadzono analizę za pomocą krótkoczasowej transformaty, analizę za pomocą ciągłej i dyskretnej transformacji falkowej. Badania wykazały możliwość wyodrębnienia pewnych sygnałów, w których wartości poszczególnych parametrów są do siebie zbliżone i znacząco się różnią od innych parametrów sygnałów. Uzyskane wyniki badań mają charakter poznawczy i stanowią podstawę do przeprowadzania kolejnych eksperymentów.

Słowa kluczowe: EEG, elektroencefalografia, mózg, otwarcie oczu

ABSTRACT

The paper presents an analysis of electrophysiological signals recorded in the course of eye-opening. The EEG signals are registered at certain intervals and changes caused by opening eyes are monitored. In the experiment the method 10-20 for electrodes placement (19 electrodes) was exploited for recording bioelectric activity of the brain in four parts of the forebrain (frontal, parietal, occipital and temporal lobes). An algorithm for determining the symptom's vector was proposed. To determine the elements of this vector the following values were used: maximum, minimum, and increase. For the analysis, short-time Fourier transform and continuous and discrete wavelet transform were used. Studies have shown the ability to isolate certain signals, in which the values of individual parameters are similar and differ significantly from the other signal parameters. The results described in the article are purely cognitive and provide the basis for conducting further experiments.

Keywords: EEG electroencephalography, brain, eye-opening

1. Wprowadzenie

Badanie elektroencefalograficzne (EEG) polega na odpowiednim rozmieszczeniu na powierzchni głowy elektrod, które rejestrują zmiany potencjału lub różnice potencjału różnych części mózgu. Zarejestrowane sygnały po odpowiednim wzmocnieniu tworzą elektroencefalogram, który zapisywany jest w postaci analogowej lub cyfrowej [1].

Przez ostatnie 20 lat prowadzone są badania nad interfejsami mózg-komputer – BCI (ang. *brain-computer interface*). Interfejs mózg-komputer to system bezpośredniej komunikacji pomiędzy człowiekiem a maszyną, sterowany w sposób świadomy falami mózgowymi. Głównym celem badań nad BCI jest umożliwienie w przyszłości komunikacji z otoczeniem pacjentom cierpiącym na ciężkie schorzenia nerwowo-mięśniowe, prowadzące do kompletnego paraliżu i braku możliwości kontaktowania się ze światem zewnętrznym. BCI znajduje również wiele innych zastosowań: wspomaganie procesu nauki i koncentracji oraz sterowanie gramami komputerowymi za pomocą myśli. Istnieje możliwość poprawy bezpieczeństwa za pomocą urządzeń BCI bazujących na EEG, jak i zbudowania układów sterujących z wykorzystaniem sygnałów EEG. Podstawowym warunkiem wykonania takich projektów jest wykrycie i wybranie odpowiednich sygnałów, które będą miały znaczący wpływ na zmiany stanów urządzeń działających z wykorzystaniem BCI [2].

W niniejszej pracy opisano parametry sygnałów uzyskanych w wyniku analizy danych eksperymentalnych podczas czynności otwierania oczu. Sygnały związane z otwieraniem oczu mogą posłużyć jako sygnały aktywujące lub dezaktywujące urządzenie. W przypadku ludzi ze schorzeniami nerwowo-mięśniowymi, kilka elektrod podłączonych do EEG, może rejestrować sygnał pochodzący od użytkownika. Przetworzony sygnał i podany na wejście sterownika w miejscu zamieszkania badanego może umożliwiać np. wyłączanie i włączanie oświetlenia, urządzeń RTV, regulację temperatury i wilgotności. Takie systemy sterujące mają na celu podwyższyć komfort i jakość życia ludzi zdrowych lub cierpiących z powodu schorzeniem nerwowo-mięśniowych, w taki sposób, aby mogli oni samodzielnie funkcjonować.

2. Badania sygnałów EEG

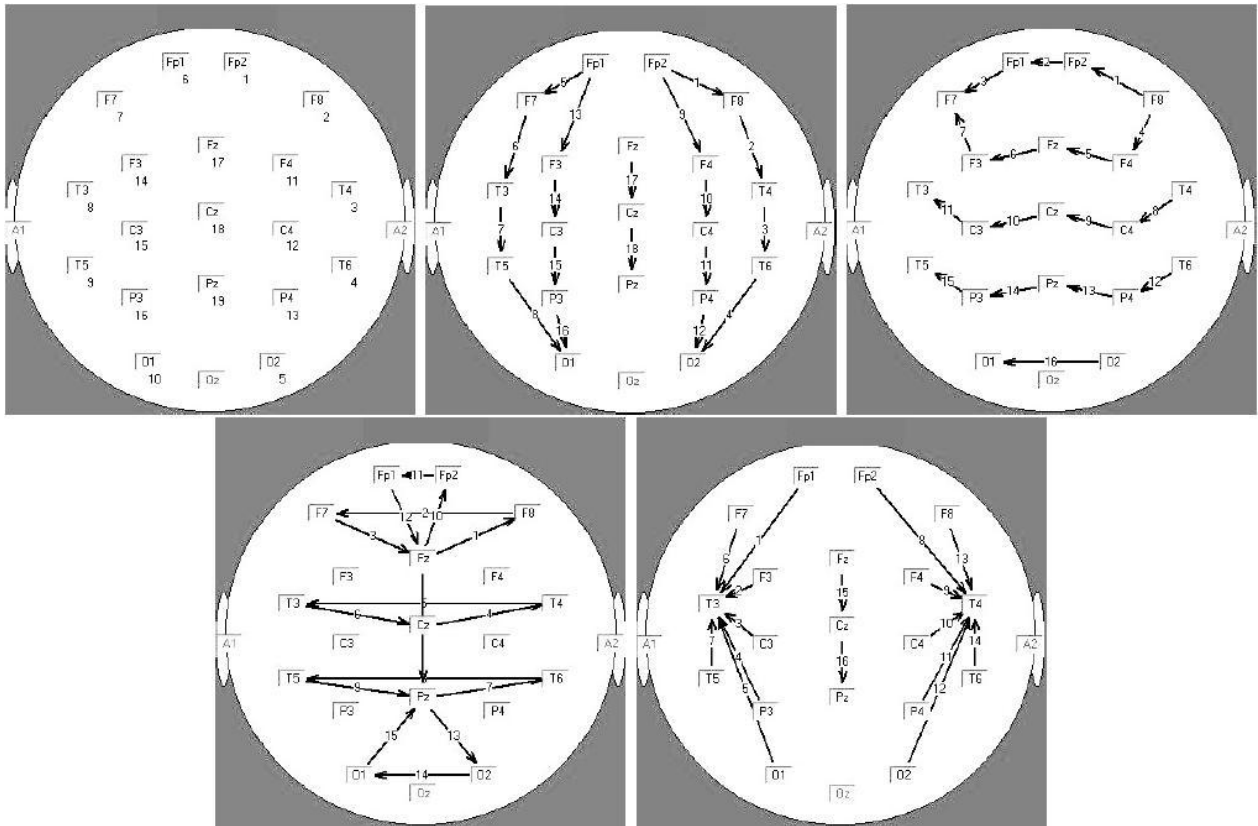
Przeprowadzenie badania elektroencefalograficznego miało na celu ustalenie zmian potencjałów zachodzących w różnych obszarach mózgu w zależności od wykonywanych czynności. Badanie trwało 15 minut, aby badany mógł prawidłowo wykonać określone działania w zadanych przedziałach czasowych. Między wykonywanymi czynnościami podczas badania następowały 10-sekundowe przerwy w celu wyciszenia osoby po kolejnych czynnościach. Wybrano te przedziały czasowe, w których zadaniem badanego było otwarcie oczu. Zaobserwowane różnice na elektroencefalogramach. Uzyskano odpowiedzi dotyczące analizy czynność-potencjał, co oznacza że określono, która elektroda (lub para elektrod) odpowiada za daną wykonywaną czynność.

Pracownie EEG mają własne schematy połączeń bipolarnych. Podczas jednego badania zwykle wykonywany jest zapis według kilku ustalonych schematów. Zmiana schematu połączeń odbywa się na zasadzie zmian połączeń wewnątrz aparatu EEG i nie wymaga zmiany położenia elektrod na głowie pacjenta. Obserwując schemat połączeń elektrod, można łatwo stwierdzić między którymi polami pomiarowymi dany kanał zarejestruje różnicę potencjału [3].

Na rysunku 1 zaprezentowano zastosowany w eksperymencie układ 10-20 rozmieszczenia elektrod na głowie człowieka [4]. Zapis potencjałów odbywał się według konfiguracji zaprezentowanych na schemacie. Otwarcie oczu odbywało się w 10-sekundowych przedziałach czasowych w trakcie 15-minutowego badania:

- 00:10–00:20 – I przedział – otwarcie oczu,
- 00:50–01:00 – II przedział – otwarcie oczu i wykonanie ruchu gałkami ocznymi w górę, dół, prawo, lewo,
- 12:10–12:20 – III przedział – otwarcie oczu.

W czasie przeprowadzania 15-minutowego eksperymentu wykonywane były inne czynności, takie jak próba wzbudzenia emocji, wypowiedanie słów oraz wykonywanie ruchów.



Rys. 1. Rozmieszczenie elektrod i konfiguracja rejestracji sygnałów EEG

Przed opracowaniem eksperymentu czynnego, przeprowadzono eksperyment bierny według procedur medycznych (standardowe badanie EEG). Celem wykonania eksperymentu biernego był dobór odpowiednich narzędzi do przeprowadzania dalszej analizy po przeprowadzeniu eksperymentu czynnego. Eksperyment bierny i czynny zostały przeprowadzone na elektroencefalografie, który wykonywał odczyt z częstotliwością próbkowania 250 Hz. Do dalszej analizy wybrano następujące aplikacje i środowiska oprogramowania:

- EDF2ASCII – aplikacja umożliwiająca konwersję sygnału elektroencefalograficznego z formatu EDF do kodu ASCII w formacie TXT,
- MATLAB/Simulink – środowisko obliczeniowe, do którego importowano pliki tekstowe po konwersji a następnie przeprowadzono analizy sygnałów.

3. Analiza sygnałów EEG

Akwizycji sygnałów dokonano za pomocą zestawu elektrod podłączonych do 32-kanalowej głowicy wzmacniaczy biologicznych firmy Braintronic. Następnie sygnał elektroencefalograficzny został zapisany w formacie European Data Format (EDF). Za pomocą programu EDF2ASCII wykonano konwersje do kodu ASCII. Zapisane w kodzie ASCII wyniki w postaci wektorów: czasu oraz wartości napięcia potencjału bioelektrycznego w przypadku kolejnych elektrod lub par elektrod zaimplementowano do środowiska MATLAB/Simulink. Wstępne przetworzenie sygnałów polegało na uporządkowaniu wektorów w odpowiedniej kolejności i przypisaniu im nazw odpowiednich elektrod oraz par elektrod. Po wstępnej analizie okazało się, że sygnały są zakłócone częstotliwością 50 Hz, która pochodzi z sieci elektrycznej. Zastosowano zatem filtr Butterwortha pasmowo-zaporowy 49–51 Hz, ponieważ nie ma on zafalowań w paśmie przepustowym i zaporowym oraz ma najmniej strome zbocza pasm przejściowych. W przypadku tego eksperymentu jest to filtr wystarczający i spełnia wymagania eksperymentu. Przefiltrowane sygnały poddano szczegółowej analizie.

Poniżej zaprezentowano wykorzystane zależności matematyczne:

a) parametry sygnałów w dziedzinie amplitud:

- wartość maksymalna

$$x_{max} \quad (1)$$

- wartość minimalna

$$x_{min} \quad (2)$$

- przyrost wartości

$$dx = x_{max} - x_{min} \quad (3)$$

b) analiza sygnału za pomocą krótkoczasowej transformacji Fouriera

$$STFT(n,k) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} x(m) \gamma^*(n-m) e^{-i\left(\frac{2\pi}{N}k\right)m}, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots, N-1 \quad (4)$$

gdzie:

$x(m)$ – sygnał analizowany, $\gamma^*(n-m)$ – okno czasowe, $e^{-i\left(\frac{2\pi}{N}k\right)m}$ – sygnał harmoniczny

c) analiza sygnału za pomocą transformacji falkowych

- ciągłej

$$CWT_x^T(t,a) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) \gamma^*\left(\frac{\tau-t}{a}\right) d\tau \quad (5)$$

gdzie:

a – parametr skali, t – parametr przesunięcia, $x(\tau)$ – analizowany sygnał, $\gamma^*(t)$ – falka analizująca.

- dyskretnej

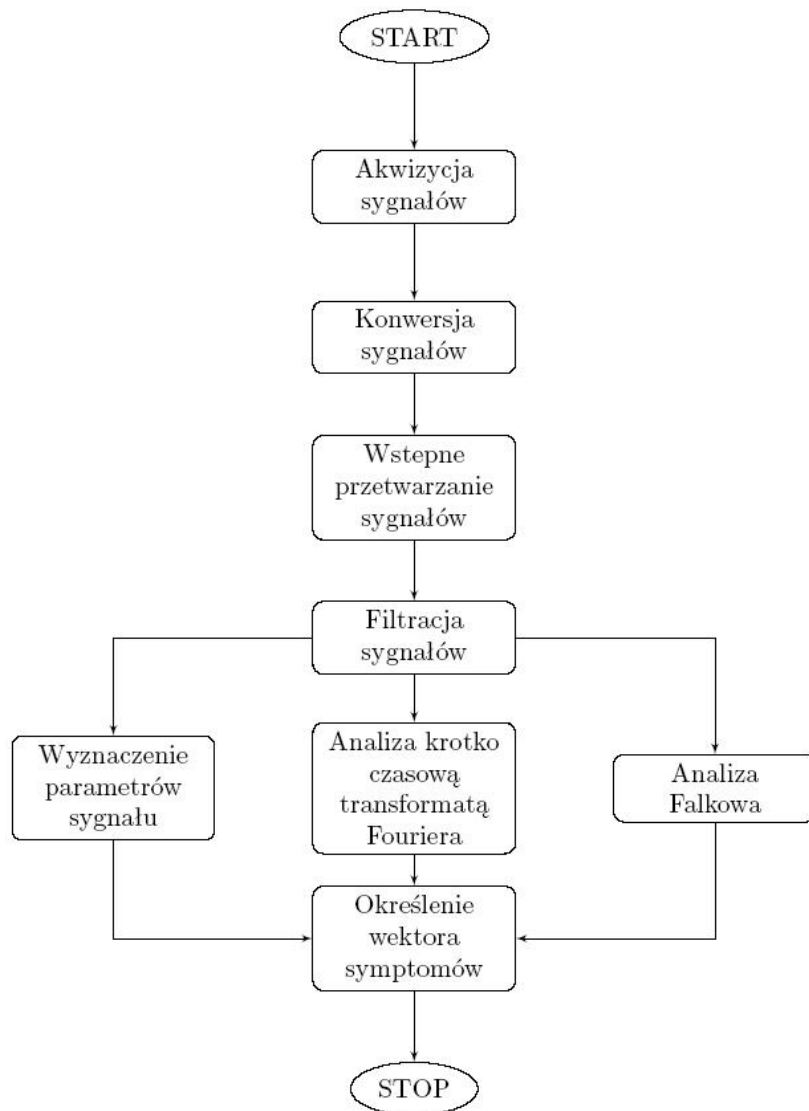
$$DWT_x^T(t) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} d_{m,n} g_{m,n}(t), \quad d_{m,n} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \gamma^{m,n}(t) dt, \quad g_{m,n}(t) = 2^{m/2} g(2^m t - n) \quad (6)$$

gdzie:

$x(t)$ – sygnał analizowany, $\gamma^{m,n}(t) = 2^{m/2} \gamma^*(2^m t - n)$ – sygnał analizujący,

$d_{m,n} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \gamma^{m,n}(t) dt$, $g_{m,n}(t) = 2^{m/2} g(2^m t - n)$ – funkcja dualna do sygnału analizującego.

Na podstawie trzech metod określono wektor symptomów charakterystycznych w przypadku wykonywanej czynności – otwieranie oczu. Na rysunku 2 przedstawiono algorytm, według którego postępowano wyznaczano parametry wektora symptomów. Przefiltrowane sygnały poddano następnie szczegółowym analizom w dziedzinie amplitud, czasu i częstotliwości.



Rys. 2. Algorytm wyznaczania parametrów wektora symptomów

4. Dyskusja wyników

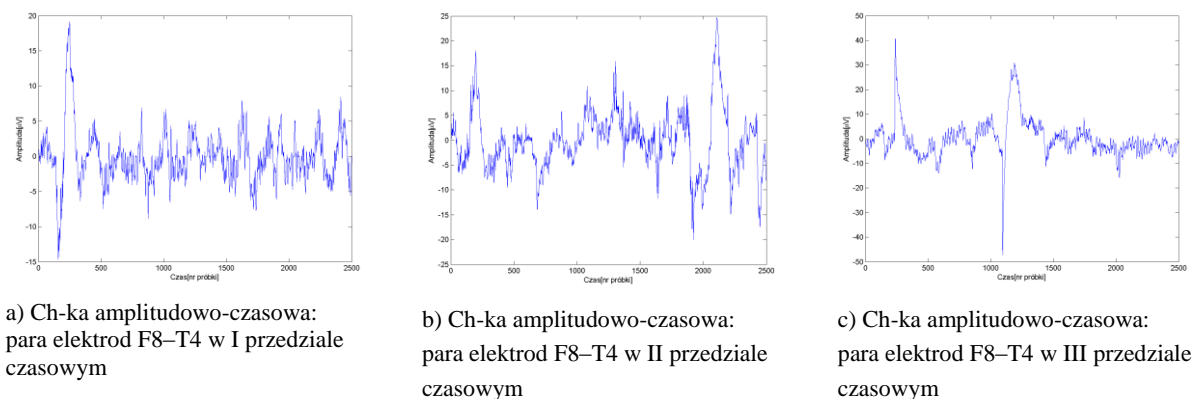
W każdym przedziale czasowym odpowiadającym wykonywanej czynności, przeanalizowano sygnały z odpowiednich elektrod lub par elektrod, badając następujące parametry:

- czas trwania impulsu charakterystycznego dla wykonywanej czynności,
- wartości minimalne,
- wartości maksymalne,
- przyrost wartości,
- częstotliwość analizowanego sygnału.

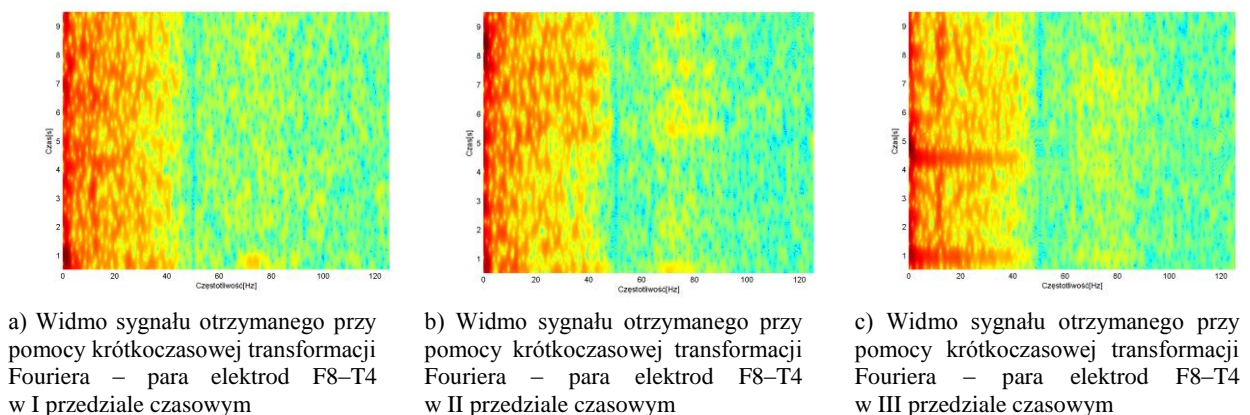
Wybór elektrod określono na podstawie literatury oraz porównania uzyskanych wyników z wynikami otrzymanymi w innych przedziałach czasowych.

Proces analizy sygnałów podzielono na zasadnicze części: analizę wstępną i szczegółową. W ramach pierwszej zaobserwowano duże zmiany amplitud w sygnałach EEG wywołanych czynnością otwierania oczu w przedziałach mniejszych niż 2 sekundy (p. rys. 3 i rys. 8). W wyniku wstępnej analizy potencjałów bioelektrycznych, do szczegółowych analiz wybrano również sygnały pochodzące z par elektrod T4–T6, F8–T4. Wyniki szczegółowych analiz w przypadku pary elektrod F8–T4 zaprezentowano na rysunkach 3–7. Natomiast w przypadku pary elektrod T4–T6 na rysunkach 8–12. Wybrano pary elektrod: T4–T6, F8–T4 na podstawie porównania z wszystkimi

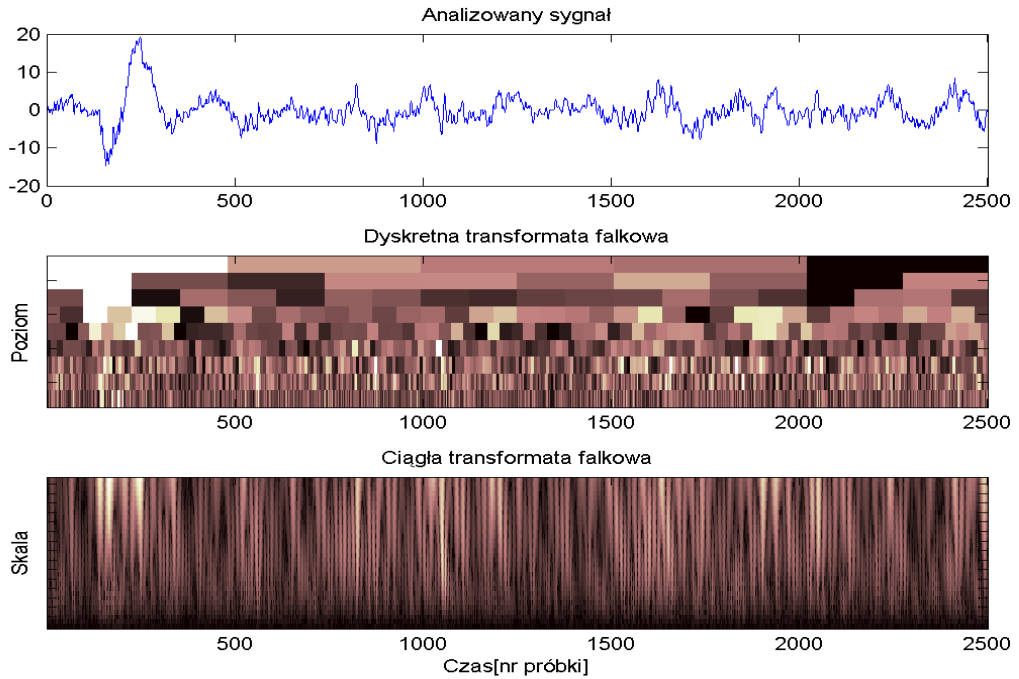
innymi elektrodami (parami elektrod). Charakterystyki amplitudowo-czasowe w przypadku pary elektrod F8–T4 w analizowanych przedziałach czasowych przedstawiono na rysunku 3, natomiast w przypadku pary elektrod T4–T6 przedstawiono na rysunku 8. Wyniki analizy sygnału za pomocą krótkoczasowej transformacji Fouriera w celu określenia zakresu częstotliwości fal mózgowych oraz odpowiedniego rytmu fal mózgowych przedstawiono na rysunkach 4 oraz 9. Na rysunku 4 zaprezentowano widma sygnałów uzyskanych za pomocą krótkoczasowej transformacji Fouriera w przypadku pary elektrod F8–T4. Rysunek 4a oraz 4c wykazuje pojawienie się rytmu beta w czasie od 2. do 4. sekundy oraz powyżej 6. sekundy. We wszystkich przedziałach czasowych w przypadku tych elektrod zaobserwowano również wyższe wartości energii sygnału w zakresie częstotliwości od 0,5 Hz do 2 Hz. Podobna sytuacja wystąpiła również we wszystkich analizowanych przedziałach w przypadku pary elektrod T4–T6, co obrazuje rysunek 9. W wyniku obserwacji widm sygnałów uzyskanych przy pomocy krótkoczasowej transformacji Fouriera w przypadku par elektrod T4–T6, F8–T4 zaobserwowano charakterystyczne składowe harmoniczne rytmu beta. W procesie analizy sygnału EEG obserwowano również pojawienie się rytmu alfa w przedziałach czasowych, gdy oczy były zamknięte [5]. Na rysunkach 5–7 i 10–12 zaprezentowano wyniki analizy falkowej, w której wykorzystano falkę „symlet” (jest to falka Daubechies o podwyższonej symetrii) [6]. Analizy prowadzono dla 9 poziomów dekompozycji we wszystkich przedziałach czasowych. W każdym z podanych przypadków na 6 poziomie dekompozycji (2–4 Hz) występuje wyższa wartość energii sygnału. Szczegółowe wyniki dla każdego przedziału czasowego par elektrod T4–T6 i F8–T4 w przypadku czynności otwierania oczu zaprezentowano w tabeli 1.



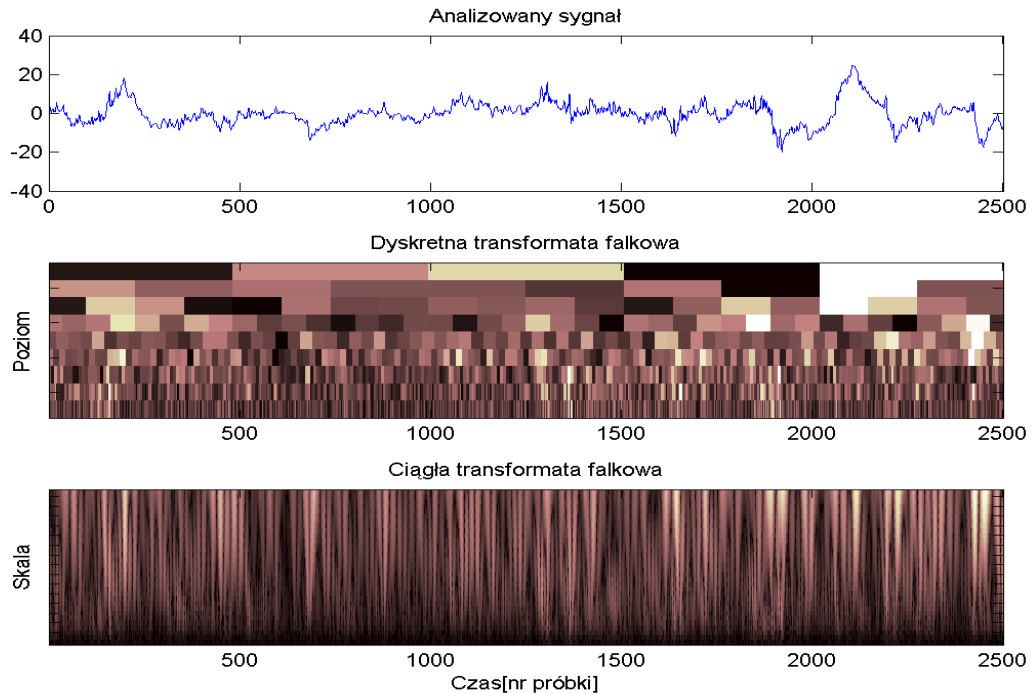
Rys. 3. Charakterystyki amplitudowo-czasowe sygnału EEG – para elektrod F8–T4



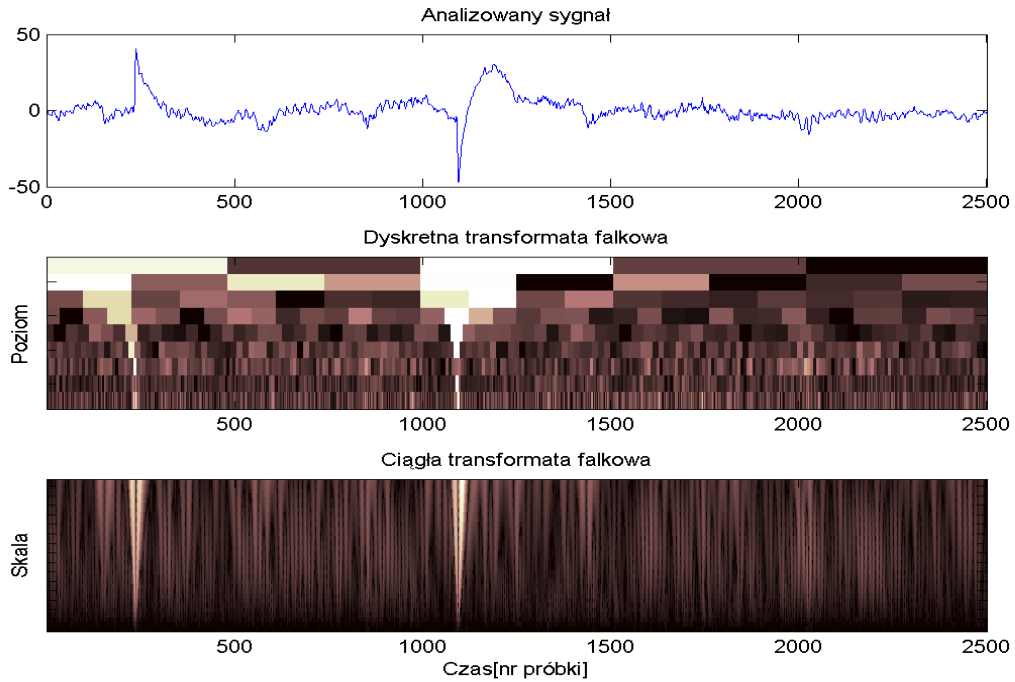
Rys. 4. Widma sygnału otrzymane przy pomocy krótkoczasowej transformacji Fouriera – para elektrod F8–T4



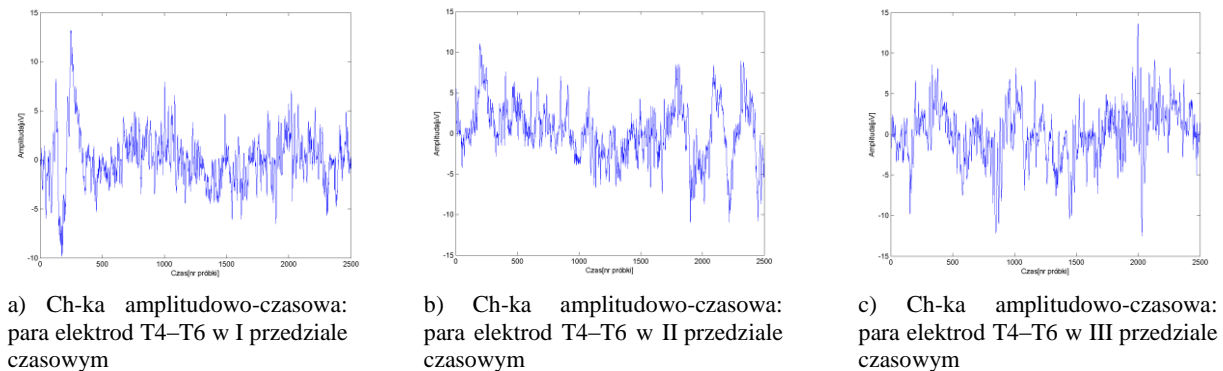
Rys. 5. Wyniki analizy przeprowadzonej za pomocą dyskretnej i ciągłej transformacji falkowej – para elektrod F8–T4 w I przedziale czasowym



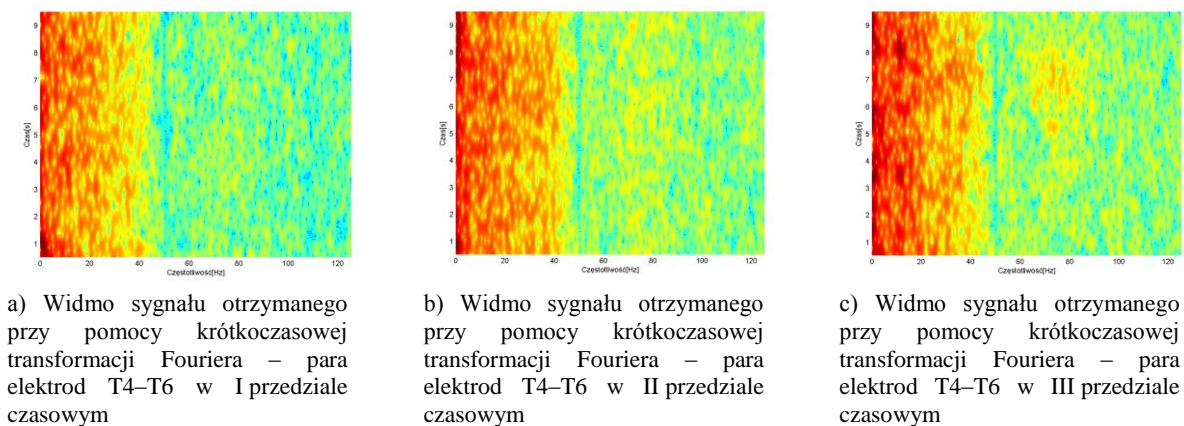
Rys. 6. Wyniki analizy przeprowadzonej za pomocą dyskretnej i ciągłej transformacji falkowej – para elektrod F8–T4 w II przedziale czasowym



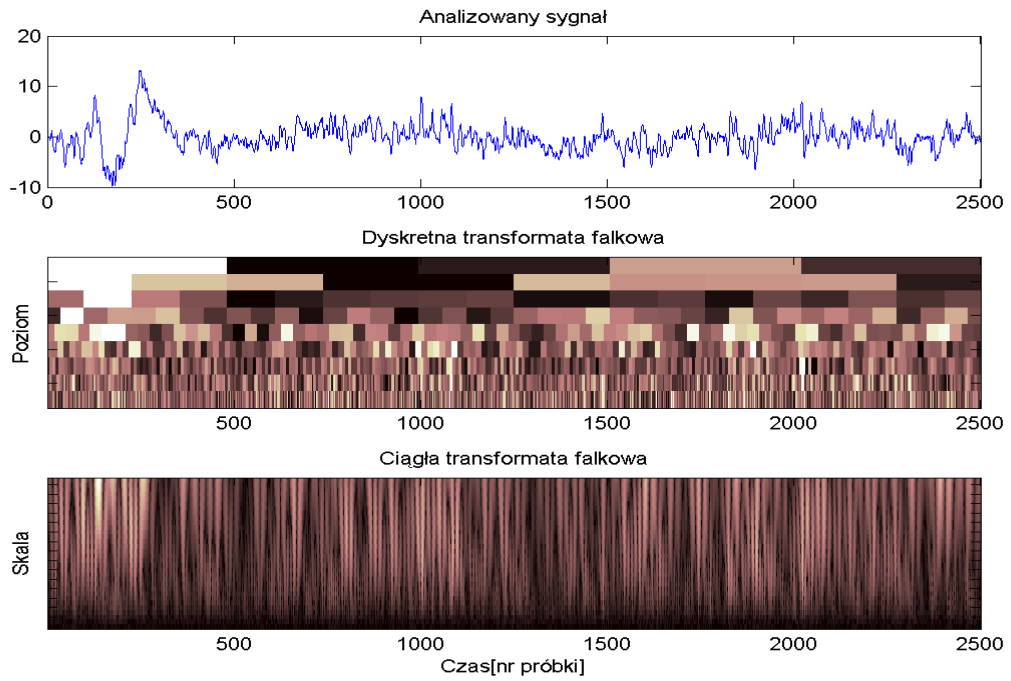
Rys. 7. Wyniki analizy przeprowadzonej za pomocą dyskretnej i ciągłej transformacji falkowej – para elektrod F8–T4 w III przedziale czasowym



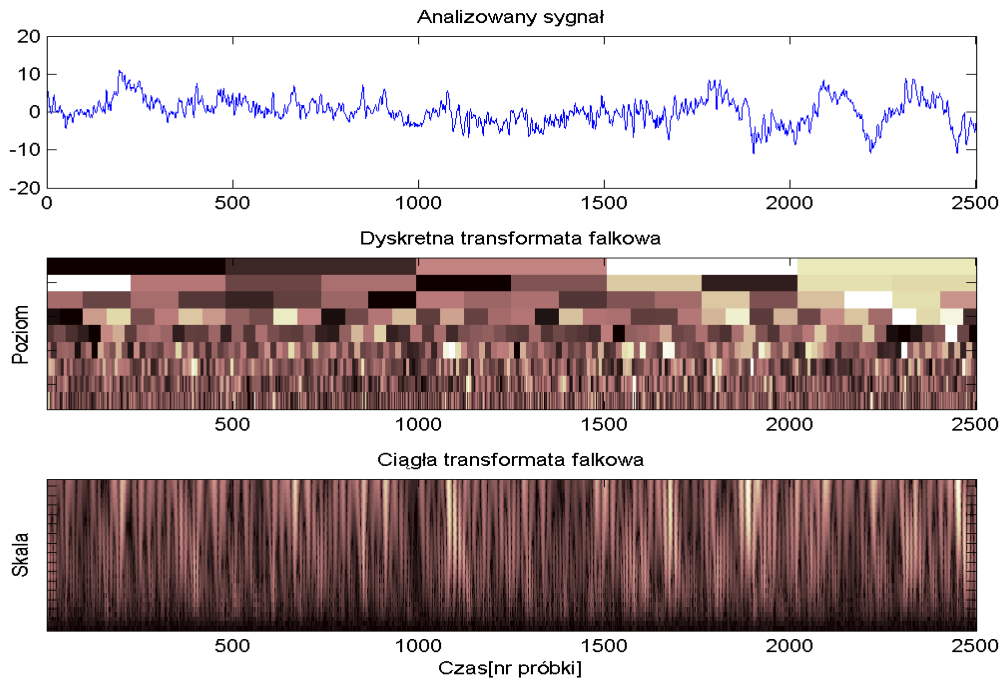
Rys. 8. Charakterystyki amplitudowo-czasowe sygnału EEG – para elektrod T4–T6



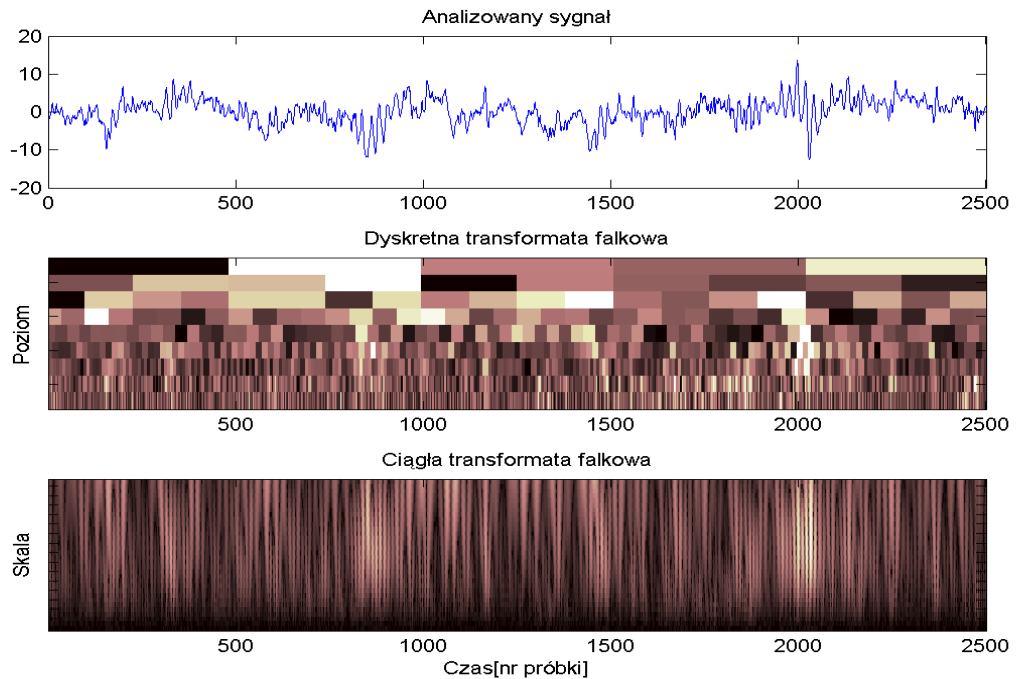
Rys. 9. Widma sygnału otrzymane przy pomocy krótkoczasowej transformacji Fouriera – para elektrod T4–T6



Rys. 10. Wyniki analizy przeprowadzonej za pomocą dyskretnej i ciągłej transformacji falkowej – para elektrod T4–T6 w I przedziale czasowym



Rys. 11. Wyniki analizy przeprowadzonej za pomocą dyskretnej i ciągłej transformacji falkowej – para elektrod T4–T6 w II przedziale czasowym



Rys. 12. Wyniki analizy przeprowadzonej za pomocą dyskretnej i ciągłej transformacji falkowej – para elektrod T4–T6 w III przedziale czasowym

Na wszystkich charakterystykach amplitudowo-czasowych przedstawionych na rysunkach 3 i 8 w czasie od 1. sekundy do 2. sekundy (od 250 próbki do 500 próbki) występuje charakterystyczny pik (np. w przypadku pary elektrod T4–T6 w I przedziale czasowym wartości potencjału zawierają się w przedziale od -14 do $19 \mu\text{V}$). Powodem pojawienia się piku jest czynność otwarcia oczu, która nastąpiła dokładnie w tym czasie. W II przedziale czasowym (p. rys. 3b), między 8. a 10. sekundą występują wahania amplitudy, podobnie jak w przypadku otwarcia oczu. Są one spowodowane ruchem gałki ocznej wykonywanym w górę, w dół oraz w prawo i lewo. Wartości charakterystyczne w tym przedziale czasowym spełniają założenia przyjęte w przypadku otwarcia oczu. Zatem należy rozpatrywać wartości sygnałów z dwóch par elektrod jako symptom. Widma krótkoczasowej transformaty Fouriera par elektrod T4–T6 oraz F8–T4 (p. rys. 4 i rys. 9) ujawniają pojawienie się składowej harmonicznej w przedziale 0,5 Hz do 3 Hz w czasie około 1 sekundy (czynność otwarcia oczu). Na rysunkach 4a i 4c dodatkowo pojawia się składowa harmoniczna charakterystyczna dla rytmu beta. Widma na rysunkach 4 oraz 9 wykazują wyższą energię sygnału w zakresie 0–2 Hz w czasie około 1 sekundy (próbka 250), co stanowi symptom związany z otwieraniem oczu. Należy zwrócić uwagę, że nie we wszystkich przypadkach występuje jednoznaczność tych poziomów dekompozycji. W każdym z podanych przypadków analizy falkowej, na 6 poziomie dekompozycji (2–4 Hz) występuje charakterystyczna wartość energii sygnału, która jest wyższa w porównaniu do reszty przedziału czasowego. Szczegółowe wyniki z każdego przedziału czasowego z dwóch par elektrod, przedstawiono w tabeli 1. Następnie parametry sygnału (p. tab. 2) poddano ocenie obiektywnej oraz wybrano stałe wartości sygnału na podstawie eksperymentu czynnego.

Tabela 1. Wykaz symptomów w przypadku czynności związanych z otwieraniem oczu

Wykonywana czynność	Otwieranie oczu					
	00:10–00:20 s		00:50–01:00 s		12:10–12:20 s	
Przedział czasowy						
Nazwa pary elektrod	F8–T4	T4–T6	F8–T4	T4–T6	F8–T4	T4–T6
Analizowany zakres czasowy	0–2 s	0–2 s	0–2 s	0–2 s	0–2 s	0–2 s
Wartość maksymalna	19 μ V	13 μ V	18 μ V	11 μ V	40 μ V	7 μ V
Wartość minimalna	-14 μ V	-10 μ V	-8 μ V	-4 μ V	-9 μ V	-9 μ V
Przyrost wartości	33 μ V	23 μ V	26 μ V	15 μ V	54 μ V	16 μ V

Tabela 2. Parametry określające wektor symptomów

Wykonywana czynność	Otwieranie oczu	
	Nazwa pary elektrod	F8–T4
Analizowany zakres czasowy	0–2 s	0–2 s
Wartość maksymalna	>18 μ V	>7 μ V
Wartość minimalna	<-8 μ V	<-4 μ V
Przyrost wartości	>26 μ V	>15 μ V

5. Podsumowanie i wnioski

Celem niniejszej pracy było przeprowadzenie analizy sygnałów EEG i określenie wektora symptomów który został wykorzystany w zaprojektowaniu układu sterującego. Przeprowadzone badania dotyczyły efektywnego badania sygnałów elektroencefalograficznych w symulowanym systemie sterującym, w środowisku MATLAB/Simulink. Oryginalnym wkładem autorów jest: przygotowanie algorytmu postępowania służącego do realizacji badań w celu wyznaczenia wektora symptomów sygnałów elektroencefalograficznych, przetworzenie sygnałów EEG do stanu, w którym mogły zostać poddane dalszej analizie, analiza sygnałów EEG w zakresach: amplitudowo-czasowym, analiza widma sygnału uzyskanego za pomocą krótkoczasowej transformacji Fouriera, ciągłej i dyskretnej transformacji falkowej oraz parametrów całego sygnału oraz określenie wektora symptomów dla wykonywanych czynności.

W pracy przedstawiono badania i analizy sygnału EEG zarejestrowane w trakcie czynności otwierania oczu. Przeprowadzono serię eksperymentów, w których wykorzystano 19 elektrod do akwizycji czynności bioelektrycznej aktywności mózgu. Kolejnym etapem po zarejestrowaniu sygnałów była ich konwersja oraz wstępne przetwarzanie obejmujące również filtrację. Autorzy opracowywali algorytm wyznaczania parametrów wektora symptomów i przeprowadzili szereg analiz w dziedzinie amplitud, czasu i częstotliwości. Zaprezentowane wyniki badań pozwoliły na określenie wektora symptomów zbudowanego z parametrów wyznaczonych z dwóch par elektrod T4–T6, F8–T4. Reasumując, w artykule zaprezentowano oryginalne badania i analizy sygnałów EEG oraz określono wektor symptomów który może zostać zaprojektowany do systemu analizująco-sterującego opisanego w pracy [5]. Przeprowadzone eksperymenty stanowią wstęp do badań nad opracowaniem prototypu systemu analizująco-sterującego, wykorzystującego wybrane sygnały EEG.

LITERATURA

- [1] Z. Damijan, C. Kasprzak, T. Zyss: *Elektroencefalografia*, W: *Inżynieria Biomedyczna. Księga współczesnej wiedzy tajemnej w wersji przystępnej i przyjemnej*, R. Tadeusiewicz (red.), Wydawnictwo AGH, Kraków 2008.
- [2] A. Broniec, J. Chodak: *Sterowanie prostym urządzeniem elektrycznym za pomocą sygnału EEG*, *Automatyka*, vol. 13(3), 2009, s. 1059–1067.
- [3] Serwis edukacyjno-informacyjny *TECHNIKA W MEDYCYNIE*. Dostępny (odwiedzono 28.02.2013). <http://astrophysics.fic.uni.lodz.pl/medtech/start.html>
- [4] T. Zyss: *Zastosowanie układu 10-20 w rozmieszczaniu elektrod do EEG*, Wydawnictwo Biblioteka ELMIKO, Warszawa 2007.

- [5] P. Kościuszko: *Praca dyplomowa pt. Projekt systemu analizująco-sterującego z wykorzystaniem sygnałów EEG*, promotor: dr inż. Wojciech Ciesielka, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2013.
- [6] T. Zieliński: *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań*, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2005.

otrzymano / submitted: 28.09.2014
wersja poprawiona / revised version: 01.10.2014
zaakceptowano / accepted: 05.10.2014