

Zastosowanie BCI do sterowania robotem mobilnym

Szczepan Paszkiel*, Andrzej Błachowicz**

* Instytut Automatyki i Informatyki, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechnika Opolska

** Instytut Elektroenergetyki, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechnika Opolska

Streszczenie: Artykuł omawia kwestię praktycznego zastosowania interfejsu mózg-komputer w procesie sterowania wielozadaniowym robotem mobilnym własnej konstrukcji. W trakcie badań laboratoryjnych wykorzystywane jest urządzenie Emotiv EPOC Neuroheadset. Akwizycja sygnału odbywa się poprzez zamocowane na skórze osoby badanej elektrody aktywne wedle standaryzacji 10-20. Następnie sygnał jest przetwarzany i wykorzystywany do sterowania robotem mobilnym.

Słowa kluczowe: sterowanie, Brain Computer Interfaces, robot mobilny

1. Wprowadzenie

Aktualnie w świecie nowoczesnych technologii, opracowywanych jest wiele rozwiązań, mających na celu ułatwienie metod komunikacji pomiędzy człowiekiem a urządzeniami. Między innymi prowadzone są prace nad udoskonaleniem metod sterowania komputerem. Implikuje to jednocześnie unowocześnienie rozwiązań mających na celu sterowanie różnymi urządzeniami przemysłowymi, jak także domowego użytku. Niezaprzeczalnie jednym z takich rozwiązań jest możliwość sterowania oparta o wykorzystanie fal mózgowych, określana w skrócie BCI (ang. *Brain Computer Interfaces*) lub BMI (ang. *Brain Machine Interfaces*) [1]. Najbardziej popularna metoda opiera się na akwizycji oraz analizie fal elektroencefalograficznych poprzez wykorzystanie urządzenia jakim jest elektroencefalograf.

Wraz z rozwojem metod komunikacji, rozwija się także branża związana z projektowaniem robotów mobilnych, które mogą być stosowane do wykonywania wielu zadań. Roboty na stałe wpisały się do zastosowań przemysłowych. Obecnie jednak, patrząc na wyniki badań demografów, społeczeństwa krajów europejskich, w tym także i Polski, bardzo szybko się starzeją. W przyszłości rynek zastosowań robotów do pomocy osobom starszym bądź nie w pełni sprawnych ruchowo, będzie się niewątpliwie dynamicznie rozwijał. Dlatego też istotne są badania naukowe mające na celu optymalizację interfejsów człowiek-maszyna, człowiek-komputer.

2. Brain Computer Interface

Interfejsy mózg-komputer na stałe wpisały się w rozwój nauki i problemów sterowania [4]. Duża grupa z nich opiera swoje działanie na przetwarzaniu sygnału EEG. Badanie EEG umożliwia uzyskanie wysokiej rozdzielczości

czasowej, która nie występuje w przypadku badania pacjenta rezonansem magnetycznym MRI (ang. *Magnetic Resonance Imaging*).

Możliwe są dwie metody akwizycji sygnału elektroencefalograficznego, metoda nieinwazyjna oraz inwazyjna. Ze względu na praktyczną złożoność metody inwazyjnej pomiaru, jest ona w praktyce rzadko stosowana [2]. Wymaga bowiem ingerencji w strukturę człowieka. W związku z powyższym powszechnie wykorzystywaną podczas pomiarów aktywności poszczególnych neuronów w korze mózgowej jest metoda nieinwazyjna. Opiera się ona na użyciu elektroencefalografu oraz elektrod aktywnych, które umieszcza się na skórze głowy osoby badanej. Nie jest wymagana tym samym konieczność ingerencji bezpośrednio w strukturę człowieka. Upraszcza to w związku z powyższym złożoność konstruowania interfejsów BCI. Ma to też jednak swoje wady spowodowane zakłóceniami, jakie pojawiają się przy próbach odczytu impulsów elektrycznych płynących z mózgu, poprzez czaszkę, skórę, włosy, etc.

Podczas konstruowania rozwiązań w zakresie sterowania w oparciu o interfejsy mózg-komputer, należy także zwrócić uwagę na kwestię artefaktów, jakie płyną bezpośrednio z ciała człowieka, które w różnych chwilach czasu, może cechować się innymi parametrami fizjologicznymi. Ponadto istotnym problemem jest także grupa artefaktów technicznych zewnętrznych, do których to zaliczyć należy między innymi sieć elektryczną znajdującą się w pobliżu osoby poddawanej badaniu oraz wiele innych czynników powodujących zakłócenia odczytywanego sygnału.

Istotnym spostrzeżeniem w kierunku eliminacji artefaktów powinna być obiektywna ocena wpływu każdego źródła zakłóceń na zapis sygnału EEG. Eliminacja artefaktów może odbyć się na drodze zlikwidowania źródła zakłóceń, z którego pochodzą. Im dokładniej można scharakteryzować źródło zakłóceń, tym lepiej można je eliminować z pomiaru. Jeżeli niemożliwe jest odizolowanie źródła zakłóceń ani odcięcie kanału przenoszenia zakłóceń, pozostaje obróbka zarejestrowanego przebiegu celem odzyskania czystego zapisu EEG. Najprostszą, powszechnie stosowaną metodą eliminacji zakłóceń jest filtracja pasmowo-przepustowa. Filtracja ta polega na wytłumieniu wszystkich częstotliwości poza pasmem sygnału użytecznego. Problemy stwarzają zakłócenia o paśmie częstotliwości pokrywającym się z pasmem fal mózgowych. Przykładem może być pole elektromagnetyczne wytwarzane przez przewody sieci energetycznej 50 Hz. Powszechnie stosowany filtr wąskopasmowy wycina z zapisu składową

o częstotliwości 50 Hz, ale wytłumiony zostaje zarówno sygnał sieci, jak i sygnał generowany przez mózg. W sytuacji, gdy niemożliwe jest odfiltrowanie zakłóceń i uzyskanie czystego zapisu fal mózgowych konieczne jest wykluczenie z badania wszystkich fragmentów zapisu, w których podejrzewa się wystąpienie artefaktów.

3. Emotiv EPOC Neuroheadset

Najbardziej znane na świecie komercyjne rozwiązanie bazujące na zastosowaniu interfejsu mózg-komputer w praktyce, to urządzenie Emotiv EPOC Neuroheadset (rys. 1.) firmy Emotiv Inc. Urządzenie poprzez zaimplementowaną technologię połączenia bezprzewodowego, przesyła dane pobierane z elektrod przymocowanych do skóry głowy na stację roboczą, wyposażoną w odbiornik sygnału.



Rys. 1. Emotiv EPOC Neuroheadset

Fig. 1. Emotiv EPOC Neuroheadset

Sygnał elektroencefalograficzny po odpowiednim przetworzeniu może pełnić rolę źródła informacji w procesie sterowania robotem mobilnym opisanym w punkcie 4 niniejszego artykułu.

Połączenia wejściowe i wyjściowe neuronu kodują informację o przestrzennej lokalizacji bodźca. Wynika to przeważnie z aktywności dużego zespołu komórek, w takim przypadku mamy do czynienia z kodowaniem populacyjnym [9]. Częstość przesyłania potencjałów czynnościowych pozwala zebrać informacje o intensywności bodźca oraz o czasie jego trwania. Binarność potencjałów czynnościowych umożliwia zdecydowanie efektywniejszą reprezentację informacji, mniej podatną na błędy oraz zniekształcenia. Istotna jest także modulacja częstości generowania potencjałów czynnościowych. Pojawienie się dodatkowego potencjału czynnościowego, bądź też jego brak w danej chwili czasu, nie wpływa w istotny sposób na częstość serii. Podczas reprezentacji informacji poprzez populację komórek mamy także do czynienia z jej redundancją. Błędna aktywność kilku komórek neuronalnych, która może pojawić się w sygnale, jest kompensowana przez pozostałe, których liczba jest zdecydowanie większa.

4. Robot mobilny

Konstrukcja korpusu jednostki mobilnej wykonana została ze stopu lekkiego [3]. Spore wymiary robota przyczyniają się do zachowania stabilności w trudnych warunkach (rys. 2.), ale jednocześnie generują pewien rodzaj proble-

mów ujawniający się w obszarach zamkniętych, gdzie konieczne jest swobodne przemieszczanie się pomiędzy licznymi przeszkodami architektonicznymi. Waga jednostki nie przekracza 12 kg. Dodatkowo robot może zostać wyposażony w sprzęt o wadze około 4 kg.



Rys. 2. Robot bez problemu pokonuje ewentualne przeszkody na drodze

Fig. 2. The robot confronts with possible obstacles with any problems

W celu łatwiejszego pokonywania przeszkód przez jednostkę mobilną, wyposażono robota (rys. 3.) w szereg technologii. Zaimplementowano najnowsze rozwiązania sprzętowe takie jak m.in. czujniki dystansu ultradźwiękowe, czujniki akcelerometryczne typu MEMS (ang. Microelectronic and Microelectromechanical Systems), rozmieszczone na kończynach robota oraz w centralnej części korpusu, kamery cyfrowe oraz skaner laserowy. Komunikacja operatora z robotem odbywa się bezprzewodowo z wykorzystaniem standaryzowanej technologii IEEE 802.11 (ang. Wireless Fidelity – WiFi) [7]. Poszczególne moduły platformy komunikują się między sobą za pośrednictwem lokalnej sieci Ethernet (wewnątrz korpusu robota), której poszczególne elementy zamontowano na jednostce mobilnej. Komunikacja zewnętrzna, z aplikacją na stacji roboczej, odbywa się bezprzewodowo z wykorzystaniem standardu WiFi [8].



Rys. 3. Widok ogólny robota wraz z manipulatorem

Fig. 3. A general view of the robot with a manipulator

Robot mobilny [11] składa się z kilku elementów funkcjonalnych:

- obudowa ze stopu lekkiego,
- aktywne zawieszenie sterowane elektrycznie,
- system zasilania pochodzący z zestawu akumulatorów umożliwiających kilkugodzinną pracę bez doładowania (system zaprojektowano tak by oszczędzał energię),
- sterownik umożliwiający komunikację z systemem poleceń i przetwarzający funkcje na sygnały docierające do poszczególnych silników i serwo mechanizmów (rys. 4.),

- sterownik umożliwiający monitorowanie parametrów środowiskowych panujących wewnątrz obudowy robota oraz w jego otoczeniu, zapewnia komunikację z czujnikami akcelerometrycznymi (rys. 4.),
- sterownik umożliwiający komunikację bezprzewodową (rys. 4.),
- system kamer wideo.



Rys. 4. Moduły elektroniczne sterujące robotem
Fig. 4. Electronic modules that control the robot

Operator przy wykorzystaniu autorskiej aplikacji z zaimplementowaną analizą sygnału elektroencefalograficznego jest w stanie prowadzić robota w przestrzeni architektonicznej domu, mieszkania, pracy. Jednakże z uwagi na sporą złożoność i mogące wystąpić duże zaszumienie, sygnału pochodzącego z elektroencefalografu rozpoznanie potencjałów wywołanych sztucznie i zdekodowanie ich przy pomocy algorytmów autorskiej aplikacji jest procesem złożonym. Oprogramowanie sterowników robota zostało tak przygotowane, by w przypadku nadejścia błędnie zdekodowanego polecenia zostało ono odrzucone.



Rys. 5. Przykład praktycznego zastosowania robota, podnoszącego różne przedmioty

Fig. 5. The example of a practical use of the robot that lift different objects

Robota wyposażono w manipulator, którego kilkanaście stopni swobody umożliwia wykonywanie, na obecnym etapie konstrukcyjnym prostych funkcji, zastępując niedowład osoby kierującej jednostką. Rysunek 5 przedstawia koncepcję wykorzystania możliwości maszyny w pomocy osobom potrzebującym.

5. System sterowania robotem

Źródłem sterowania w prezentowanym systemie jest sygnał EEG. Odzwierciedleniem aktywności ośrodków neuronalnych w mózgu jest rozkład potencjałów na powierzchni czaszki oraz występującego wokół niej pola magnetycznego. Gęstość połączeń pomiędzy poszczególnymi neuronami w mózgu jest nie zwykle duża, dowolny neuron znajduje się nie dalej niż dwa lub trzy połączenia synaptyczne od innego neuronu korowego znajdującego się w mózgu człowieka [5,6]. Poprzez podłączenie do stacji roboczej urządzenia do akwizycji sygnału elektroencefalograficznego jakim jest Emotiv EPOC Neuroheadset, możliwe jest identyfikowanie poszczególnych stanów myślowych, w celu ich dalszego przetworzenia i wykorzystania w procesie sterowania. Na sygnał wyjściowy pobierany przez elektroencefalograf ma wpływ odpowiednia synchronizacja aktywności poszczególnych neuronów. Na proces synchronizacji neuronów bezpośrednio oddziałuje struktura połączeń pomiędzy poszczególnymi elementami sieci oraz procesy synaptyczne tworzące obwody lokalne. Czynniki, które bezpośrednio wpływają na synchroniczne oscylacje są między innymi: własności błony neuronowej, wpływ neurotransmiterów, struktura połączeń pomiędzy poszczególnymi elementami sieci oraz procesy synaptyczne.

Sposób rozmieszczenie elektrod na głowie osoby badanej określa układ 10-20 Międzynarodowej Federacji do spraw Neurofizjologii Klinicznej.

Elementem poddawanym procesowi sterowania jest robot mobilny, opisany w punkcie czwartym niniejszego artykułu. Na rys. 6 przedstawiony został ogólny schemat pracy systemu sterowania robotem, z uwzględnieniem metody komunikacji pomiędzy stacją roboczą, a robotem oraz pomiędzy stacją roboczą, a urządzeniem firmy Emotiv Inc. [10].



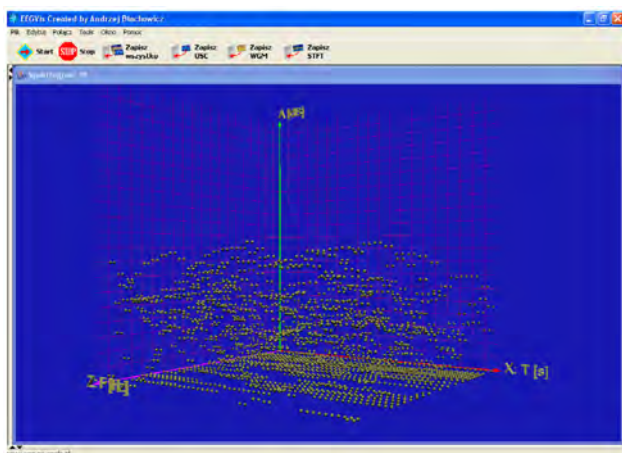
Rys. 6. Schemat pracy systemu sterowania robotem
Fig. 6. Scheme of the control system with robot

6. Realizacja konwersji sygnału EEG na sygnał sterujący robotem

W laboratorium Politechniki Opolskiej, w którym prowadzone są badania nad aktywnością mózgu jednostki ludz-

kiej na chwilę obecną nie jest możliwy bezpośredni odczyt myśli człowieka w kontekście ich wykorzystania w procesie sterowania. Dlatego też grupa badaczy skupia się na analizie zmian sygnału elektroencefalograficznego w reakcji na bodźce zewnętrzne (w przypadku osób niepełnosprawnych), bądź zmiany wywołane poprzez np. ruchy kończyn (w przypadku osób starszych, lub w częściowym stopniu niepełnosprawności). Na bazie tak zaobserwowanych sygnałów możliwa jest identyfikacja chęci wykonania danych czynności przez człowieka za pośrednictwem robota mobilnego. Poprzez połączenie urządzenia Emotiv EPOC Neuroheadset z autorską aplikacją EEGVis napisaną w języku JAVA możliwe jest odpowiednie sterowanie robotem.

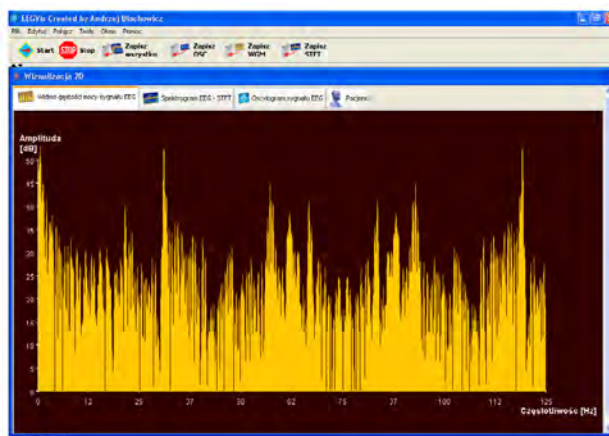
Zaprojektowana aplikacja EEGVis do akwizycji danych sygnału EEG korzysta z możliwości języka JAVA w ramach standardowych pakietów: *AWT*, *SWING*, wizualizacji 3D – *JAVA 3D API* oraz komunikacji komputera osobistego z peryferiami – *JAVA COMM API*. Okno wizualizacji 3D (rys. 7) służy do obserwacji zachowań sygnału, którego zmiany prezentowane są w trzech wymiarach. Aplikacja umożliwia wszelkie dogodne zdefiniowanie osi. Istnieje możliwość usytuowania na osi Y wartości widma gęstości mocy bądź napięcia, na osiach X i Z zamiennie czasu lub częstotliwości. Tym samym możliwe jest obserwowanie wszystkich tych wielkości jednocześnie bez konieczności przełączenia okien analizy 2D. Przy pomocy myszy układ współrzędnych można dowolnie rozmieszczać w przestrzeni 3D.



Rys. 7. Okno aplikacji EEGVis
Fig. 7. Window application EEGVis

Spektrogram składa się z dwóch osi, częstotliwościowej oraz czasowej. Efekt działania wizualizacji widma chwilowej gęstości mocy przedstawia rys. 8. Do uzyskania wyniku w postaci widma gęstości mocy użyto szybkiej transformaty Fouriera – FFT (Fast Fourier Transform). Gdy zostanie zaznaczona odpowiednia opcja i ustalone jest połączenie dane są magazynowane w bazie wiedzy.

W przypadku analizy EEG szeroko stosowany jest model autoregresyjny (AR). Zakłada on, że wartość sygnału w dowolnej chwili czasu t można wyznaczyć z pewnej liczby poprzednich wartości oraz z pewnej składowej czysto losowej (1):



Rys. 8. Okno FFT - Szybkiej Transformaty Fouriera
Fig. 8. Window FFT - Fast Fourier Transform

$$X(t) = \sum_{j=1}^p A_j X(t-j) + E(t) \quad (1)$$

Jak wynika z założeń teoretycznych, widmo takiego modelu ma postać pewnej liczby składowych o określonym zakresie częstotliwości na tle szumowym, co dobrze odpowiada rytmom zawartym w rzeczywistym sygnale EEG. Procedura wyznaczania widma polega na dopasowaniu współczynników modelu A_1, \dots, A_p tak, aby wariancja składowej szumowej była najmniejsza.

Podczas badań laboratoryjnych jako metodę pomocną w procesie identyfikacji zakłóceń z sygnału EEG zastosowano analizę składowych niezależnych – ICA (ang. Independent Component Analysis). Przykładem adaptacyjnego algorytmu wykorzystywanego do analizy składowych niezależnych jest *Infomax*. Występuje wówczas maksymalizacja informacji pomiędzy wejściem, a wyjściem sieci neuronowej z nieliniowanymi funkcjami aktywacji. Gdy przyjmujemy współczynnik ekscesu jako kryterium separacji, to dla konstrukcji sieci neuronowej, która będzie realizowała ten algorytm stosuje się reguły uczenia dekorrelacyjne oraz Hebba.

W celu połączenia komputera osobistego wyposażonego w aplikację EEGVis z urządzeniem Emotiv EPOC Neuroheadset, wykorzystany został wirtualny port szeregowy, do którego podłączono moduł Bluetooth. Komunikację uzyskano dzięki implementacji biblioteki *JAVA COMM API*. Sterowniki modułu Bluetooth tworzą w systemie wirtualne porty szeregowy, które widziane są przez pakiet komunikacyjny JAVA jako rzeczywiste interfejsy. Po zainstalowaniu sterowników system emuluje kilkanaście wirtualnych portów szeregowych.

W pracy nad systemem wykorzystano serwer bazodanowy firmy ORACLE DataBase 9i. Pakiet komunikacyjny JAVA przesyła polecenia języka PL/SQL w formie tekstowej. Odpowiedzi są przesyłane zwrótnie przez serwer i umieszczane w obiektach typu *ArrayList*, które są bardzo często wykorzystywane w języku JAVA listy obiektów. Następnie dane są przesyłane z list do odpowiednich obiektów aplikacji lub podczas operacji rejestrowania danych w odpowiednich tabelach bazy wiedzy.

7. Podsumowanie

Robot mobilny sterowany za pomocą fal mózgowych, może znaleźć zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Podstawowym ograniczeniem jakie może wystąpić na etapie planowania zastosowań, jest kwestia identyfikacji ilości zakłóceń, które w konkretnej implementacji mogą zaistnieć. Istotne są w takich przypadkach czynniki zewnętrzne, określane mianem artefaktów technicznych. Zaliczyć do nich możemy inne pracujące w pobliżu w danym czasie urządzenia (komputer, odbiornik telewizyjny, monitor etc.), a także bliskość linii wysokiego napięcia oraz innej aparatury technicznej. Im większa liczba urządzeń pracujących w okolicy, tym trudniej realizowany jest proces sterowania w oparciu o fale mózgowe. Konieczna jest wówczas odpowiednia kalibracja urządzenia sterującego wraz z robotem do konkretnej lokalizacji.

W przyszłości zastosowania oparte o wykorzystanie robotów mobilnych mogą znaleźć praktyczne odzwierciedlenie w rozwiązywaniu problemów osób starszych w kwestii ich niepełnosprawności ruchowej. Z badań demografów, przytoczonych we wprowadzeniu do niniejszego artykułu, wynika że problem starzejącej się populacji na Ziemi będzie coraz bardziej znaczący. Możliwość wykorzystania fal mózgowych do sterowania robotami mobilnymi dla osób niepełnosprawnych w zakresie niedowładu kończyn górnych bądź dolnych jest jednak zdecydowanie prostsza niż w przypadku osób starszych. W takiej implementacji pojawia się bowiem konieczność udoskonalenia procesów akwizycji, w tym zapewnienia odpowiedniego wzmocnienia sygnału elektroencefalograficznego wykorzystywanego w procesie sterowania. Jak dowodzą badania naukowe z zakresu medycyny, liczba aktywnych neuronów maleje z wiekiem, przez co akwizycja sygnału EEG u osób starszych jest zdecydowanie trudniejsza.

Bibliografia

1. Ibrahim T., Venin J. M., Garcia G.: *Brain Computer Interface in Multimedia Communication*, „IEEE Signal Processing Magazine”, vol. 20, no. 1, 2003.
2. Zmarzły D.: *Pomiary elektrycznych wielkości medycznych*, Politechnika Opolska, Opole 2004.
3. Siegart R., Nourbaksh I. R.: *Introduction to autonomous mobile robots*, Massachusetts Institute of Technology, 2004.
4. Dudek Z. T.: *Interfejs BCI – próba przełamania bariery pomiędzy człowiekiem a komputerem*, „Przeгляд Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne”, nr: 7/2003.
5. Wolański N.: *Rozwój biologiczny człowieka. Podstawy auksologii, gerontologii i promocji zdrowia*, Warszawa 2005, 374.
6. Tortella F., Rose J., Robles L., Moreton J., Hughes J., Hunter J.: *EEG Spectra Analysis of the Neuroprotective Kappa Opioids Enadoline*, Maryland 1997.
7. Venter H.S., Eloff J.H.P.: *Network Security: Important Issues*, Department of Computer Science, Rand Afrikaans University, 1992, 147-154.
8. Larrieu N., Owezarski P.: *Towards a Measurement Based Networking approach for Internet QoS improvement*, „Computer Communications”, vol. 28, 2005, 259-273.
9. Georgopoulos A. P., Langheim F. J., Leuthold A.C., Merkle A. N.: *Magnetoencephalographic signals predict movement trajectory in space*, „Exp. Brain Res.”, vol. 25, 2005, 132-135.
10. White T., Pagurek B., Bieszczad A.: *Network Modeling for Management Applications Using Intelligent Mobile Agents*, „Journal of Network and Systems Management”, vol. 7, no. 3, 1999.
11. Boczar T., Błachowicz A.: *Mobilny system pomiarowy do badania zjawiska wyładowań niepełnych metodą emisji akustycznej*, „Pomiary Automatyka Kontrola” (PAK), ISSN 0032-4140, nr 1/2009, 27-28. ■

The use of BCI for controlling the mobile robot

Abstract: The article presents the practical use of brain-computer interface in the process of controlling a multi-role mobile robot constructed on one's own. Emotiv EPOC Neuroheadset is used during the laboratory research. The acquisition of the signal occurs by placing active electrodes on the head of a subject. Then the signal is processed and used for controlling the mobile robot.

Keywords: controlling, Brain Computer Interfaces, the mobile robot

dr inż. Szczepan Paszkiel

Szczepan Paszkiel jest doktorem w Instytucie Automatyki i Robotyki Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Absolwent kierunku Informatyka oraz Zarządzanie i inżynieria produkcji na Politechnice Opolskiej. Stypendysta oraz laureat wielu konkursów dla młodych naukowców. Prowadzi badania naukowe w zakresie przetwarzania sygnału EEG. Autor oraz współautor wielu publikacji naukowych.

e-mail: s.paszkiel@po.opole.pl



mgr inż. Andrzej Błachowicz

Andrzej Błachowicz jest doktorantem na Politechnice Opolskiej w Instytucie Elektroenergetyki. Absolwent Politechniki Opolskiej na kierunku Informatyka oraz Elektronika i Telekomunikacja. Praca badawcza doktora jest z wyładowaniami niepełnymi, występującymi w izolatorach kondensatorów elektroenergetycznych.

e-mail: andrew_blachowicz@poczta.fm

