

## Protokół

**z przebiegu publicznej obrony rozprawy doktorskiej w dyscyplinie naukowej: inżynieria mechaniczna pt. „Pozycjonowanie 6-osiowego robota przemysłowego za pomocą hybrydowego interfejsu bazującego na sygnałach bioelektrycznych z mózgu (EEG)” mgr. inż. Arkadiusz Kubackiego w Poznaniu, w dniu 3 lutego 2023 roku**

Posiedzenie otworzył przewodniczący dr hab. inż. **Andrzej Gessner**, który powitał recenzentów: dr hab. inż. **Ryszarda Jasińskiego**, prof. Politechniki Gdańskiej i dr hab. inż. **Piotra Wosia**, prof. Politechniki Świętokrzyskiej, członków Komisji Wydziałowej w przewodzie doktorskim: prof. dr hab. **Ewę Stachowską**, prof. dr hab. inż. **Michała Wieczorowskiego**, dr hab. inż. **Krzysztofa Talaśkę**, prof. PP, dr hab. inż. **Bartosza Gapińskiego**, prof. PP, prof. dr hab. inż. **Adama Hamrola**, promotora pracy prof. dr hab. inż. **Andrzeja Mileckiego**, sekretarza mgr inż. **Arkadiusza Jakubowskiego**, doktoranta **mgr inż. Arkadiusza Kubackiego**, dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej dr hab. inż. **Olafa Ciszaka**, prof. PP oraz wszystkich zgromadzonych gości.

Dr hab. inż. **Andrzej Gessner** zaznaczył, że otwarcie przewodu doktorskiego mgr. inż. Arkadiusza Kubackiego nastąpiło na posiedzeniu Rada Wydziału Budowy Maszyn i Zarządzania w dniu 25.05.2018 roku, podczas której zatwierdzono tytuł rozprawy doktorskiej „Pozycjonowanie 6-osiowego robota przemysłowego za pomocą hybrydowego interfejsu bazującego na sygnałach bioelektrycznych z mózgu (EEG)”. Praca przez komisję została przyjęta 12.01.2023 roku. Dr hab. inż. **Andrzej Gessner** nadmienił, że doktorant zdał egzaminy wymagane przez ustawę tj. z dyscypliny podstawowej egzamin z tematu Roboty przemysłowe – budowa i zastosowanie, a także z dyscypliny dodatkowej – Podstawy ekonomii, a także z języka nowożytnego jakim był j. angielski.

Następnie mgr inż. Arkadiusz Jakubowski przedstawił sylwetkę mgr inż. Arkadiusza Kubackiego. W ramach działalności naukowej mgr inż. Arkadiusz Kubacki zajmował się od 7 lat tematem pozyskiwania, przetwarzania i analizowania sygnałów bioelektrycznych. Wyniki jego prac z tego zakresu były publikowane w latach 2015-2021 w punktowanych czasopismach takich jak Sensors czy Technical Transactions. Mgr inż. Arkadiusz Kubacki opublikował łącznie 31 prac, z których 16 związanych było z tematem rozprawy doktorskiej. Publikacje te były cytowane łącznie 89 razy. Aktualnie posiada indeks h równy 5. Uczestniczył dotychczas w pracach badawczych w ramach 10 projektów naukowo-badawczych, prowadzonych w Zakładzie Urządzeń Mechatronicznych. Mgr inż. Arkadiusz Kubacki jest również współautorem dwóch patentów oraz brał udział w dwunastu międzynarodowych konferencjach.

W dalszej części posiedzenia przewodniczący udzielił głosu doktorantowi, prosząc go o zaprezentowanie głównych tez rozprawy doktorskiej.

Po wysłuchaniu wystąpienia doktoranta, przewodniczący udzielił głosu promotorowi prof. dr hab. inż. **Andrzejowi Mileckiemu**. Zdaniem promotora, opracowana przez mgra inż. Arkadiusza Kubackiego rozprawa spełnia warunki stawiane pracom doktorskim, ponieważ:

- zawiera wyczerpujący przegląd literatury (około 100 pozycji) dotyczącej postawionego problemu,
- jest samodzielnym rozwiązaniem problemu naukowego, jakim było opracowanie interfejsu mózg-komputer pozwalającego na pozycjonowanie robota przemysłowego z dokładnością  $\pm 15\text{mm}$ ,
- osiągnął cele pracy takie jak:
  - budowa systemu pozwalającego na sterowanie robotem za pomocą sygnałów pochodzących z mózgu, w którym zastosowano metody SSVEP i EOG,
  - opracowanie algorytmu wykrywającego polecenia pochodzące z sygnału EEG oraz wzrokowego sprzężenia zwrotnego, do sterowania urządzeniem, tj. robotem przemysłowym,
  - badania algorytmów służących do klasyfikacji i rozpoznawania artefaktów,
  - budowa hybrydowego interfejsu mózg-komputer ze sprzężeniem zwrotnym, wykorzystującym siłowe sprzężenie zwrotne typu „haptic” do wspomagania sterowania, w tym pozycjonowania 6-osioowego; interfejs ten jest własną modyfikacją wprowadzoną przez Doktoranta i stanowi Jego istotne osiągnięcie naukowe.

Stwierdził również, że teza pracy czyli „Zastosowanie stymulacji wizyjnej człowieka i zestawu EEG, tworzącego interfejs mózg-komputer oraz siłowego sprzężenia zwrotnego, pozwala na sterowanie 6-cio osiowym robotem w zadaniach przemieszczania i uzyskanie dokładności pozycjonowania centralnego punktu narzędzia robota (TCP) w zakresie  $\pm 15\text{ mm}$ .” została potwierdzona wynikami badań teoretycznych, symulacyjnych i przede wszystkim doświadczalnych.

W dalszej kolejności przewodniczący poprosił dr hab. inż. **Ryszarda Jasińskiego**, prof. Politechniki Gdańskiej o odczytanie recenzji pracy. Recenzję rozprawy wykonano na zlecenie Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej, pismo nr DIM.075.457.2022 Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej dr. hab. inż. Olafa Ciszaka, prof. PP z dnia 03.11.2022 r., do którego dołączono egzemplarz rozprawy doktorskiej. Recenzowana praca,

będąca przedmiotem rozprawy, obejmuje 113 stron i składa się ze streszczenia w języku angielskim i polskim, wykazu ważniejszych oznaczeń i skrótów, 6 rozdziałów oraz bibliografii obejmującej 103 pozycje. Praca została napisana w języku polskim. Recenzent uważa, że mgr inż. Arkadiusz Kubacki, podejmując w swojej rozprawie możliwość pozycjonowania sześciosiowego robota przemysłowego za pomocą hybrydowego interfejsu bazującego na sygnałach bioelektrycznych z mózgu (EEG), znakomicie wpisuje się w potrzeby rozwijającego się rynku nowych technologii. Podjęty przez Doktoranta problem badawczy w rozprawie jest uzasadniony. Recenzent opisał również treść poszczególnych rozdziałów oraz odczytał pytania szczegółowe. Stwierdził on, że praca mgr. inż. Arkadiusza Kubackiego pt.: „Pozycjonowanie 6-osiowego robota przemysłowego za pomocą hybrydowego interfejsu bazującego na sygnałach bioelektrycznych z mózgu (EEG)” (promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Milecki) spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, w rozumieniu ustawy "O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki" z dnia 14 marca 2003 roku, a autor może być dopuszczony do jej publicznej obrony.

W dalszej kolejności przewodniczący poprosił dr hab. inż. **Piotra Wosia**, prof. Politechniki Świętokrzyskiej o odczytanie drugiej z recenzji. Recenzent stwierdził, że autor w swojej rozprawie doktorskiej bardzo dokładnie wskazał, iż celem pracy jest opracowanie hybrydowego interfejsu mózg komputer przeznaczonego do sterowania 6-osiowym robotem przemysłowym. Doktorant opracował system pozwalający na sterowanie robotem za pomocą biosygnatów pochodzących z mózgu (EEG). Biorąc pod uwagę losową naturę biosygnatów i niedoskonałość komercyjnie stosowanych interfejsów mózg-komputer BCI (ang. Brain-Computer Interface) jest to zadanie trudne, a zarazem bardzo ambitne, oraz że zarówno tematy rozprawy jak i zakres prac opisanych w rozprawie został określony właściwie. Recenzent przeanalizował pokrótce metodykę badań oraz treść poszczególnych rozdziałów pracy doktorskiej. Odczytał również uwagi i pytania do autora pracy. Po analizie przedłożonej rozprawy doktorskiej mgr inż. Arkadiusza Kubackiego stwierdza, że wnosi ona cenny wkład w poszerzenie wiedzy w zakresie zaproponowania nowych metod sterowania stosowanych w robotyce oraz spełnia wymagania stawiane przez obowiązujące w tym względzie aktualne przepisy (rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 poz. 261); ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668) i może być podstawą do nadania stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna. Jednocześnie recenzent wnosi o dopuszczenie recenzowanej rozprawy do publicznej obrony przed Radą Naukową Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Poznańskiej.

Mgr inż. Arkadiusz Kubacki ustosunkował się do zadanych pytań przez recenzenta dr hab. inż. **Ryszarda Jasińskiego**, prof. Politechniki Gdańskiej. Pytanie: W podrozdziałach 4.5 i 5.3 Doktorant prezentuje wyniki badań interfejsu wykorzystującego elektrookulografię (EOG), system wizyjny, wzrokowe potencjały wywołane w stanie ustalonym (SSVEP) oraz system sprzężenia zwrotnego. Wskazane byłoby przedstawienie wartości sygnałów EEG w funkcji czasu. Także należałoby określić wpływ systemu sprzężenia zwrotnego na wartości sygnałów EEG. Czy podczas sterowania wirtualnym i przemysłowym robotem wartości sygnałów EEG różniły się?

Autor odpowiedział: Ze względu na długi czas trwania prób, który osiągał nawet kilka minut, przebiegi pokazujące sygnał pochodzący z EEG przez tak długi czas, nie byłyby czytelne. Dlatego w pracy pokazano tylko wybrane fragmenty zarejestrowanych przebiegów, wskazujące ważne i omawiane dalej elementy (fragmenty), na podstawie których sterowano robotem. Używane w badaniach elektrody nie znajdowały się nad obszarami mózgu odpowiedzialnymi za zmysł dotyku, dlatego wpływ sprzężenia zwrotnego pochodzącego od dotyku na sygnał EEG, nie występował. Wartości sygnału, przy którym uznawano, że następowało wybranie komendy przemieszczenia punktu TCP, były dobierane indywidualnie dla poszczególnych osób. Ze względu na odstęp czasowy między badaniami, wartości te dla tych samych osób badanych, mogły się nieznacznie różnić. Nie było to jednak tematyką badań prowadzonych w niniejszej pracy.

Recenzent zadał pytanie: Czy dokładność pozycjonowania centralnego punktu narzędzia robota w zakresie  $\pm 15$  mm przy zastosowaniu hybrydowego interfejsu mózg-komputer bazującego na SSVEP, EOG, systemie wizyjnym oraz dodatkowym sprzężeniu zwrotnym jest wystarczająca do pobrania elementu za pomocą chwytaka i przeniesienia go w inne miejsce?

Autor odpowiedział: Moim zdaniem, po zastosowaniu odpowiedniej konstrukcji chwytaka, dopasowującej się elastycznie do chwytanego elementu, dokładność pozycjonowania chwytaka rzędu  $\pm 15$  mm pozwoliłaby na pobranie różnych elementów. Konstrukcje wykorzystujące np. elektromagnes, przyssawki mogą zostać zastosowane w w/w aplikacji. Interfejs w wersji stosowanej w przeprowadzonych badaniach, z całą pewnością nie byłby wystarczający do precyzyjnego chwytania i manipulowania obiektami. Aby to poprawić należałoby dołożyć jeszcze jeden element haptyczny, załączający się dopiero w bardzo bliskiej odległości od elementu chwytanego.

W dalszej kolejności pytanie zadał recenzent hab. inż. **Piotr Woś**, prof. Politechniki Świętokrzyskiej: Autor rozprawy zastosował metody pozwalające na detekcję, filtrację i klasyfikację sygnałów generowanych przez komercyjne urządzenie BCI. Natomiast należy tutaj zwrócić uwagę, że rejestrowane sygnały bioelektryczne mają różne źródła pochodzenia i są sumą potencjałów elektrycznych generowanych w wyspecjalizowanych tkankach lub narządach.

Przedstawione rozwiązania i ich interpretacja w kontekście detekcji sygnałów nasuwa pytanie, czym jest „biosygnal” i czy wszystkie biosygnale generowane przez interfejs są wynikiem pracy mózgu (sterowanie myślą), czy są potencjałem innego pochodzenia, takiego jak napięcie mięśni szkieletowych wywołanych ruchem poszczególnych narządów?

Autor odpowiedział: Jak słusznie zauważył Pan Recenzent, sygnały pochodzące z mózgu stanowią tylko część rejestrowanych przez urządzenia EEG biosygnali. Obok sygnałów mózgowych odczytywane były również sygnały innego pochodzenia, nazywane artefaktami. Ze względu na fakt, iż artefakty towarzyszą badaniom EEG, to ich rozpoznanie i oddzielenie od sygnałów mózgowych stanowiło poważny problem od początku ich wykorzystywania. Zagadnieniom tym poświęcono w rozprawie rozdział: „2.4. Artefakty, ich wykrywanie i sposoby eliminacji oraz badania nad interfejsem numer 2”, w którym sygnały te były odczytywane za pomocą tego samego urządzenia. W rozprawie pokazano również wykorzystanie artefaktów. Zostały one zaimplementowane do hybrydowego interfejsu mózg-komputer i służyły do Sterowania robotem przemysłowym.

W dalszej kolejności pytanie zadała prof. dr hab. **Ewa Stachowska**: Czy niekontrolowane mruganie powiekami przez człowieka podczas sterowania robotem jest uwzględnione jako artefakt sygnałowy?

Autor odpowiedział: Tak, pojedyncze mrugnięcia były uwzględniane jako artefakt w sygnale i filtrowane. Podwójne zamknięcie oczu było traktowane jako komendę w badaniach.

Prof. dr hab. **Ewa Stachowska** zadała kolejne pytanie: Jakie czynniki zewnętrzne mogą zakłócić komunikację człowieka z robotem w prezentowanych rozwiązaniach?

Autor odpowiedział: Sygnały pochodzące z mięśni, mimiki twarzy czy ruch elektrod może zakłócać sterowanie robotem. Dodatkowo wyładowania elektromagnetyczne, zakłócenie na w paśmie odpowiadającym Wifi może zakłócić połączenie czepka z komputerem jednocześnie przeszkadzając w sterowaniu ramieniem robota.

Pytanie od przewodniczącego dr hab. inż. **Andrzeja Gessnera** brzmiało: Czy mógłby Pan powiedzieć coś na temat bezpieczeństwa takiego sterowania?

Autor odpowiedział: Praca nie była ukierunkowana na badania dotyczące bezpieczeństwa. W samych badaniach ramię robota miało zmniejszoną maksymalną prędkość, a osoby badane znajdowały się poza polem roboczym robota.

W dalszej kolejności pytanie zadał dr hab. inż. **Olaf Ciszak**, prof. PP: Na jakiej podstawie przyjęto, że dokładność pozycjonowania punktu TCP robota przemysłowego ma wynosić  $\pm 15\text{mm}$ ?

Autor odpowiedział: Wartość ta ewoluowała w trakcie prowadzenia badań. Wynikała ona z badań wstępnych.

W dalszej kolejności pytania zadał mgr inż. **Roman Regulski**: Czy określono lub badano przepustowość interfejsu człowiek-maszyna?

Autor opowiedział: Przepustowość ograniczała maksymalna wartość szybkości transmisji czepka i wynosiła ona 256 SPS.

Kolejnym pytaniem od mgr inż. **Romana Regulskiego** było: Czy rozważano zastosowanie sygnałów EEG wstępnie wyfiltrowanych przez ludzkie ciało, zwłaszcza sygnałów pochodzących z mięśni, strun głosowych tzw. Sygnały SUBVocal?

Autor opowiedział: Nie, takie badania nie były podejmowane. Skupiono się głównie na artefaktach i metodzie SSVEP.

W dalszej kolejności pytania zadał Pan **Patryk Zych**: Czy elektrody rozmieszczane na czepkach są w sposób ustandaryzowany czy w sposób losowy lub dowolny?

Autor opowiedział: Tak, w sposób ustandaryzowany. Najpopularniejsze ustawienie elektrod to system 10-20. Wartości te wskazują na procentową wartość odległości między elementami czaszki.

Kolejne pytanie od Pana **Patryka Zycha** brzmiało: Czy mógłbym prosić o przybliżenie tematu aktywnych metod w interfejsach mózg-komputer?

Autor opowiedział: Osoba badana musi nauczyć się wytwarzać pewne reakcje w mózgu. Wyobrażenie o podniesieniu ręki lub nogi może dać bardzo zbliżoną reakcję mózgu jak wykonanie takiego ruchu. Niestety nauka taka jest dość długa. Literatura mówi o nawet trzech miesiącach nauki.

Po udzieleniu odpowiedzi na wszystkie pytania przewodniczący komisji zamknął dyskusję i zarządził niejawną część posiedzenia.

W niejawnej części posiedzenia udział wzięli:

dr hab. inż. **Andrzej Gessner**,

dr hab. inż. **Ryszard Jasiński**, prof. Politechniki Gdańskiej,

dr hab. inż. **Piotr Woś**, prof. Politechniki Świętokrzyskiej,

prof. dr hab. inż. **Andrzej Milecki**,

prof. dr hab. **Ewa Stachowska**,

prof. dr hab. inż. **Michał Wieczorowski**,

dr hab. inż. **Krzysztof Talaśka**, prof. PP,

dr hab. inż. **Bartosz Gapiński**, prof. PP,

prof. dr hab. inż. **Adam Hamrol**

Pierwszy głos zabrał dr hab. inż. **Piotr Woś**, prof. Politechniki Świętokrzyskiej. Nadmienił, że rozwój systemu w pracy jest duży, a praca napisana poprawnie. Recenzent miał

drobne uwagi dotyczące układu pomiarowego oraz faktu, że duża liczba prób nie zakończyła się sukcesem. Zauważył on jednak, że wynikało to przede wszystkim z niedoskonałości czepków do EEG i samego pozyskiwania informacji z mózgu w sposób nieinwazyjny. Podkreślił, że doktorant wykonał bardzo dużo pracy i wiele się nauczył.

Jako kolejny wypowiedział się dr hab. inż. **Ryszard Jasiński**, prof. Politechniki Gdańskiej. Stwierdził on, że praca jest ona bardzo dobra i wykracza poza jeden doktorat. Liczba prób w badaniach była ponadprzeciętna.

Prof. dr hab. **Ewa Stachowska** zauważyła, że doktorant zrobił wszystko co mógł, przy środkach jakie posiadał. Dalszy rozwój jest możliwy ale nakład finansowy może być nie współmierny do wyników. Pani profesor zauważyła również, że dla osób niepełnosprawnych system taki mimo swoich wad ma duży potencjał.

Prof. dr hab. inż. **Adam Hamrol** stwierdził, że praca jest pionierska mimo trudnego tematu i jest w pełni za przyjęciem pracy.

Prof. dr hab. inż. **Michałowi Wieczorowskiemu** bardzo podobała się praca, którą określił jako interdyscyplinarną. Zwrócił uwagę na progres jaki był widoczny w pracy.

Dr hab. inż. **Bartosz Gapiński**, prof. PP zwrócił uwagę, że doktorat był prowadzony w jeszcze dobrze nierozpoznanym obszarze badań i normalnym jest wystąpienie wielu problemów. Nadmienił jednak, że doktorantowi udało się te problemy rozwiązać. Był za przyjęciem pracy.

Dr hab. inż. **Krzysztof Talaśka** prof. PP stwierdził, że praca zasługuje na uznanie ze względu na zaproponowane rozwiązania. Uznał, że sam doktorant sposobem prezentacji oraz odpowiedzią na wszystkie pytania jednoznacznie udowodnił, że obrona powinna zakończyć się pozytywnie.

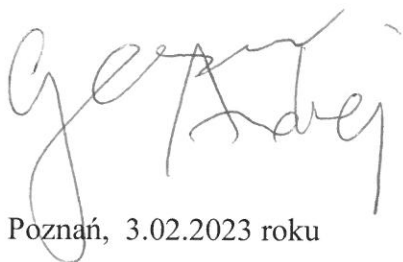
Prof. dr hab. inż. **Andrzej Milecki** odniósł się do prezentacji i do postępu jaki był widoczny między filmami z pierwszych i ostatnich badań, który określił jako znaczący. Zauważył, że wyniki jeszcze nie pokazują gotowości systemu do zastosowań przemysłowych. Widział on sposób w jaki doktorant rozbudowywał system od prostego algorytmu do przedstawionego skomplikowanego systemu. Zwrócił uwagę na fakt, że liczba błędnie rozpoznanych komend w znaczący sposób malała z każdym kolejnym badaniem. Zaopiniował on pozytywnie pracę przed komisją.

Przewodniczący dr hab. inż. **Andrzej Gessner** stwierdził, że praca wybiega w przyszłość i przeciera szlaki w tej tematyce. Zwrócił uwagę na liczbę publikacji i wskaźniki doktoranta.

Następnie odbyło się tajne głosowanie nad przyjęciem i zgłoszeniem wniosku do Rady Dyscypliny o nadanie kandydatowi stopnia naukowego doktora. Wszystkie z 9 obecnych osób poparły wniosek. Przewodniczący zamknął część niejawną obrony pracy doktorskiej.

Po zakończeniu tej części obrony przewodniczący dr hab. inż. **Andrzej Gessner** publicznie ogłosił wyniki niejawnego posiedzenia Komisji i złożył gratulacje mgr. inż. Arkadiuszowi Kubackiemu.

Doktorant podziękował wszystkim za przybycie. Zadeedykował on swoją pracę rodzicom, żonie oraz synowi. Na tym posiedzenie zostało zamknięte.



Poznań, 3.02.2023 roku

Protokołował mgr inż. Arkadiusz Jakubowski