

Dr hab. inż. Paweł Skruch, prof. AGH

Katedra Automatyki i Robotyki

Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie

Al. Mickiewicza 30/B1, 30-059 Kraków

E-mail: pawel.skruch@agh.edu.pl

Kraków, dn. 29 stycznia 2024r.

Recenzja

osiągnięcia naukowego pt.

„Odporne układy i systemy sterowania momentem i siłą w robotyce przemysłowej”

oraz istotnej aktywności naukowej

dra inż. Rafała Osypiuka

1. Podstawa prawna

Recenzja została przygotowana na wniosek Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, która uchwałą nr 33 z dnia 14 grudnia 2023 r. powołała komisję habilitacyjną w celu przeprowadzenia postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne dr. inż. Rafałowi Osypiukowi. Wniosek o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego został złożony przez dr. inż. Rafała Osypiuka 13 września 2023 r.

2. Wymagania ustawowe konieczne do uzyskania stopnia doktora habilitowanego

Na podstawie art. 219 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, stopień doktora habilitowanego nadaje się osobie, która:

- 1) posiada stopień doktora;
- 2) posiada w dorobku osiągnięcia naukowe lub artystyczne, stanowiące znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny;
- 3) wykazuje się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

Pierwsze wymaganie ustawowe jest spełnione, ponieważ dr inż. Rafał Osypiuk uzyskał stopień naukowy doktora nauk technicznych. Stopień ten został nadany uchwałą Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Szczecińskiej z dnia 9 grudnia 2004 r. na podstawie przedstawionej rozprawy doktorskiej pt. „Wielopętłowy odporny układ regulacji n-MFC (Model-following control) w zastosowaniu do sterowania manipulatorem szeregowym”.



3. Ocena osiągnięcia naukowego

Jako osiągnięcie naukowe będące podstawą ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego Habilitant wskazuje cykl dziesięciu powiązanych tematycznie publikacji naukowych pod tytułem „Odporne układy i systemy sterowania momentem i siłą w robotyce przemysłowej”. Cykl zawiera 10 pozycji, wśród których znajduje się 7 prac opublikowanych w czasopiśmie (2 w *Robotica*, 2 w *Electronics*, 1 w *International Journal of Control*, 1 w *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 1 w *Mechanical Systems and Signal Processing*), 2 rozdziały w recenzowanych monografiach i 1 współautorska monografia. Wszystkie prace zostały opublikowane po uzyskaniu stopnia doktora w latach 2006 – 2021, co oznacza, że obejmują one dorobek naukowy Habilitanta z okresu 16 lat. **Wskazane osiągnięcie naukowe jest zgodne z art. 219 ust. 1 pkt 2 lit. b Ustawy z dnia 20 lipca 2108 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.**

3.1. Ocena bibliometryczna publikacji

Z przedstawionego przez Habilitanta cyklu dziesięciu publikacji naukowych, siedem z nich ukazało się w czasopiśmie o randze międzynarodowej i posiadających tzw. *Impact Factor*, czyli współczynnik wpływu będący miarą oceny jakości naukowej czasopisma. Warto zaznaczyć, że *Impact Factor*, podobnie jak każda inna miara, ma swoje ograniczenia i nie powinien być jedynym kryterium oceny wartości czasopism. Niemniej jednak, ten wskaźnik może być używany jako narzędzie do ilościowej oceny znaczenia i wpływu wyników prezentowanych w danym artykule na istniejący stan wiedzy. Zgodnie z wymaganiami ustawowymi osiągnięcie naukowe powinno stanowić znaczny wkład w rozwój dyscypliny, więc pośrednio wartości współczynnika *Impact Factor* mogą reprezentować stopień tego wkładu. W przypadku siedmiu wspomnianych artykułów, współczynniki wpływu kształtują się w zakresie od 0.483 do 4.116. Są to wartości, które można uznać za zadowalające i dobre.

W cyklu powiązanych tematycznie publikacji znajdują się trzy samodzielne publikacje Habilitanta, są to pozycje [2.4], [2.6] oraz [2.10], natomiast pozostałe pozycje są wieloautorskie, przy czym liczba współautorów nie przekracza trzech. W pozycjach współautorskich zaangażowanie Habilitanta jest duże lub bardzo duże, według szacunkowych wartości podanych w autoreferacie, kształtuje się ono na poziomie od 33% do 80%. Z przedstawionego opisu wynika, że Habilitant był odpowiedzialny za sformułowanie problemów badawczych, dobór odpowiedniej metodologii badawczej, przeprowadzenie eksperymentów i analizę uzyskanych wyników, zatem znacząco przyczynił się do wyników opublikowanych w wymienionych pracach. Ten zakres stanowi również potwierdzenie dużej samodzielności w prowadzeniu badań naukowych.

Publikacje stanowiące cykl pochodzą z okresu 16 lat, tj. od 2006 do 2021 roku. Jest to okres dosyć długi, w którym punktacja ministerialna czasopism zmieniała się kilkakrotnie, zatem jest zadaniem trudnym odniesienie ich wszystkich do jakiegoś jednego wspólnego wykazu. Wszystkie siedem artykułów wyszczególnionych w cyklu w roku publikacji znajdowały się w obowiązującym wykazie A czasopism naukowych. W bazie *Scopus* indeksowane są następujące publikacje: [2.1] (8 cytowań), [2.2] (7 cytowań), [2.4] (brak cytowań), [2.5] (16 cytowań), [2.6] (8 cytowań), [2.7] (6 cytowań), [2.8] (6 cytowań), [2.9] (brak cytowań) i [2.10] (brak cytowań). Wszystkie te publikacje są także indeksowane w bazie *Web of Science*, tj.: [2.1] (6 cytowań), [2.2] (7 cytowań), [2.4] (brak cytowań), [2.5] (15 cytowań), [2.6] (5 cytowań), [2.7] (4 cytowań), [2.8] (4 cytowań), [2.9] (brak cytowań) i [2.10] (brak cytowań). Na dzień wykonania niniejszej recenzji indeks H Habilitanta

wynosi 7 (według bazy *Scopus*) oraz 5 (według bazy *Web of Science*). **Podsumowując, wskaźniki bibliometryczne dorobku naukowego Habilitanta są na satysfakcjonującym poziomie w stosunku do wymagań stawianym kandydatom ubiegającym się o nadanie stopnia doktora habilitowanego.**

3.2. Ocena merytoryczna osiągnięcia naukowego

Osiągnięcie naukowe wskazane przez Habilitanta zostało określone jako odporne układy i systemy sterowania momentem i siłą w robotyce przemysłowej. To osiągnięcie obejmuje projektowanie zaawansowanych rozwiązań algorytmicznych, programowych i sprzętowych z zakresu sterowania, które umożliwiają precyzyjne i elastyczne operacje manipulacyjne wykonywane przez roboty w różnych warunkach i środowiskach produkcyjnych. Do kluczowych aspektów związanych z odpornymi układami sterownia momentem i siłą w robotyce przemysłowej należy przede wszystkim precyzyjna kontrola momentu i siły. Aby umożliwić precyzyjne sterowania momentem i siłą, roboty muszą być wyposażone w zaawansowane sensory, które dostarczą robotowi informacji zwrotnej umożliwiając mu dostosowanie się do zmieniających warunków i unikanie kolizji. Odporność takich układów jest także powiązana ze zdolnością robota do adaptacji do różnych warunków pracy, takich jak zmienne obciążenie, elastyczność materiałów czy nieregularne kształty przedmiotów, z którymi robot pracuje. Należy również zaznaczyć, że współczesne roboty przemysłowe muszą spełniać wysokie standardy bezpieczeństwa. Projektowanie systemów sterowania musi uwzględniać minimalizowanie ryzyka kolizji z otoczeniem, co jest istotne zwłaszcza w środowisku, gdzie roboty współpracują z ludźmi. Dodatkowo systemy te mają umożliwiać łatwe programowanie i modyfikowanie zachowania robota, co jest istotne w dynamicznym środowisku produkcyjnym, gdzie zadania mogą ulegać zmianie. Przedstawiony przez Habilitanta cykl publikacji jest pod względem tematycznym powiązany z wyżej wymienionymi zagadnieniami. Nacisk nie jest położony na jedno konkretne zagadnienie, ale kolejne publikacje stanowią kontynuację poprzednich, rozwijają lub uzupełniają wcześniej podjętą tematykę, wprowadzają nowe aspekty, dane, analizy i wnioski.

Cykl publikacji powiązanych tematycznie otwierają dwa artykuły [2.1] oraz [2.2] opublikowane w czasopiśmie *Robotica* w 2006 roku. Obie publikacje są wieloautorskie (pierwsza ma trzech, a druga dwóch autorów), przy czym Habilitant jest w nich głównym autorem mającym przeważający udział szacowany odpowiednio na 70 i 80%. Rezultaty przedstawione w tych pozycjach dotyczą koncepcji sterowania typu MFC (ang. *Model-Following Control*), gdzie Habilitant zaproponował modyfikacje sposobu konstrukcji sprzężenia zwrotnego uzyskując w ten sposób lepsze parametry jakościowe systemu zamkniętego w porównaniu z wykorzystaniem klasycznego układu MFC. Polepszenie jakości sterowania dotyczyło większej odporności na zmienność parametrów procesu oraz poprawę tłumienia zakłóceń. Modyfikacje mają postać nowych struktur o nazwach MFC-p (ang. *plant feedback*) oraz MFC-m (ang. *model feedback*). W przedstawionych artykułach te struktury sterowania zostały eksperymentalnie zweryfikowane oraz porównane z klasyczną regulacją PID.

Kolejna publikacja [2.3] z przedstawionego cyklu to monografia wydana przez Wydawnictwo Naukowe PWN, również w 2006 r. Habilitant w tej monografii był odpowiedzialny za powstanie rozdziałów 3.4, 3.7 i 6.1. Rozdziały należy w pewnym sensie traktować jako usystematyzowanie wiedzy z zakresu wielopętlowych układów regulacji wykorzystujących model sterowanego procesu.

Bazę do monografii stanowiły osiągnięcia Habilitanta prezentowane w recenzowanych publikacjach naukowych, które zostały następnie usystematyzowane i rozszerzone o dodatkowe wyniki symulacyjne i eksperymentalne.

Publikacja [2.4] to rozdział w książce opublikowanej w 2009 roku przez wydawnictwo Springer. Habilitant jest jedynym autorem tego rozdziału, w którym opisuje koncepcję i praktyczną realizację stanowiska umożliwiającego eksperymentalną weryfikację algorytmów kontrolowanego sterowania momentem i siłą w przypadku oddziaływania robota z otoczeniem o różnej sztywności. Przygotowana platforma eksperymentalna umożliwia szybkie prototypowanie algorytmów sterowania łącznie z wykonywaniem symulacji w czasie rzeczywistym ze sprzętową pętlą sprzężenia zwrotnego (tzw. symulacja *Hardware-in-the-Loop*).

Publikacja [2.5], która ukazała się w 2010 roku w czasopiśmie *International Journal of Control* opisuje koncepcję trójpętlowego układu regulacji ze śledzeniem modelu. Habilitant zaproponował modyfikację klasycznej koncepcji MFC poprzez zastosowanie podwójnego sprzężenia zwrotnego MFC-mp (ang. *model/plant feedback*). Przeprowadzone symulacje komputerowe oraz walidacja eksperymentalna potwierdziły skuteczności nowej koncepcji sterowania pod względem poprawy warunków stabilności i podwyższonej odporności układu na zmianę parametrów w stosunku do innych układów regulacji typu MFC.

Autorska publikacja Habilitanta [2.6], która ukazała się w 2010 roku w *International Journal of Robust and Nonlinear Control* dokonuje porównania klasycznego jednopętlowego układu regulacji ze śledzeniem modelu z układami wielopętlowymi typu MFC-n, MFC-p oraz MFC-mp. Porównanie dotyczyło pewnych własności związanych z odpornością i stabilnością odpowiednich układów zamkniętych dla wybranych, stosunkowo prostych, procesów, będących przedmiotem sterowania. Wybór takich prostych, pod względem matematycznym, procesów pozwolił na dogłębną analizę teoretyczną. Wyniki teoretyczne zostały dodatkowo zilustrowane symulacjami komputerowymi.

Kolejna publikacja [2.7] z cyklu to rozdział w monografii wydanej przez Springer. Ta monografia stanowi podsumowanie prac Habilitanta nad tak zwanymi aktuatorami podatnymi, które dużo lepiej sprawdzają się w krytycznych momentach nawiązania kontaktu sztywnego robota ze sztywnym otoczeniem. To stwierdzenie zostało potwierdzone eksperymentalnie. Wykorzystanie aktuatora podatnego umożliwia także zmniejszenie czasów realizacji ruchów manipulatora. W efekcie końcowym, robot przemysłowy ma większą elastyczność i zdolność do dopasowywania się do zmieniających warunków, czyli jest bardziej adaptacyjny. Oprócz samej idei wykorzystania aktywnej podatności w sterowaniu siłą w robotyce, Habilitant był odpowiedzialny za przygotowanie stanowiska laboratoryjnego, zarówno od strony mechanicznej, sprzętowej i programowej, które posłużyło do przeprowadzenia odpowiednich eksperymentów.

W 2016 roku Habilitant razem z dwoma innymi autorami opublikował pracę [2.8] w *Mechanical Systems and Signal Processing*, w której pokazano, że zastosowanie niestacjonarnego filtra w czujnikach pomiaru siły powoduje dwukrotne zwiększenie dynamiki czujnika w krytycznym momencie jego pracy, tzn. w chwili nawiązania kontaktu robota z otoczeniem. W efekcie czego uzyskuje się zwiększenie prędkości robota we wspomnianej wyżej fazie jego pracy. Wkład Habilitanta w powstanie tej pracy polegał na sformułowaniu problemu oraz przeprowadzeniu prac eksperymentalnych. Projekt niestacjonarnego filtra oraz dobór jego parametrów zostały wykonane przez pozostałych dwóch autorów pracy. Zagadnienie filtracji w czujnikach siły i momentu jest

kontynuowane w publikacji [2.9]. Wkład merytoryczny Habilitanta w powstanie tej pracy ma podobny charakter jak w pracy [2.8].

Ostatnia pozycja [2.10] z przedstawionego cyklu publikacji to praca opublikowana w czasopiśmie *Electronics* o otwartym dostępie. Jest to praca najnowsza z przedstawionej listy, została ona wydana w 2021 roku i Habilitant jest jej jedynym autorem. W pracy [2.10] Habilitant przedstawia koncepcję sterowania procesami nieliniowymi (takim procesem może być manipulator robotyczny i ten układ jest wykorzystywany w przykładzie ilustrującym skuteczność proponowanej metody) za pomocą wielopętlowego układu regulacji. W każdej kolejnej pętli jest wykorzystywany model (z reguły nieliniowy) układu o wzrastającym poziomie skomplikowania, który jest powiązany z regulatorem PID (ale w ogólności można by rozważać inne typy regulacji). Przedstawiona koncepcja jest interesująca poznawczo jak i aplikacyjnie w kontekście sterowania manipulatorami robotycznymi.

Z uwag krytycznych, które nasuwają się po analizę wszystkich prac z przedstawionego cyklu publikacji, należy wspomnieć o stosunkowo małej uwadze, jaką Habilitant kładzie na modele matematyczne struktur robotycznych. W proponowanych rozwiązaniach algorytmicznych model pełni kluczową rolę i jego dokładność, poziom skomplikowania może zasadniczo wpływać na jakość układu sterowania. Dodatkowo, w modelowaniu matematycznym istotnym elementem jest identyfikacja parametrów modelu za pomocą odpowiednich algorytmów. Ten aspekt jest również w małym stopniu dyskutowany we wszystkich publikacjach w cyklu.

3.3. Wniosek końcowy

Przedstawiony cykl dziesięciu publikacji pod tytułem „Odporne układy i systemy sterowania momentem i siłą w robotyce przemysłowej” koncentruje się wokół wspólnego tematu badawczego jakim jest konstrukcja układów sterowania momentem i siłą dla manipulatorów robotycznych, które mają zastosowanie w automatycznych liniach produkcyjnych. Wszystkie publikacje w przedstawionym cyklu są związane ze wspomnianym zagadnieniem badawczym. Kolejne publikacje stanowią kontynuację poprzednich, rozwijają lub uzupełniają wcześniej podjętą tematykę, wprowadzają nowe aspekty, dane, analizy i wnioski. Wszystkie prace w cyklu są zbudowane na wspólnych lub powiązanych metodach badawczych, które obejmują matematyczne modelowanie, komputerową symulację, także w czasie rzeczywistym, eksperymentalną walidację oraz ilościową i jakościową analizę uzyskanych danych. Wnioski płynące z kolejnych publikacji są powiązane i skorelowane ze sobą, tworzą one logiczną sekwencję, która potwierdza postęp Habilitanta w prowadzeniu badań i rozwiązywaniu problemów badawczych. Należy także stwierdzić, że cykl publikacji, obejmujący okres około 16 lat pracy Habilitanta, ukazuje dynamiczną ewolucję w badaniach, tzn. pokazuje jak Habilitant rozwijał swoje podejście do tematu w miarę zdobywania nowych doświadczeń i wiedzy. Wszystkie publikacje spełniają wysokie standardy naukowe o czym pośrednio świadczą dobre wskaźniki bibliometryczne. Cykl publikacji mimo że obejmuje stosunkowo długi okres czasu jak na nauki techniczne (tj. 16 lat) odzwierciedla aktualność tematu, uwzględnia nowe trendy, badania i wyzwania w danej dziedzinie. Podsumowując, uważam, że zaprezentowany cykl powiązanych tematycznie publikacji stanowi znaczny wkład w rozwój dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Tym samym drugie wymaganie ustawowe jest spełnione.



4. Ocena istotnej aktywności naukowej

Trzecim wymaganiem ustawowym do uzyskania stopnia doktora habilitowanego jest wykazanie się „istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej”. Przepis ten należy odnieść do sytuacji, w której Habilitant potwierdza swoją aktywność badawczą poprzez współpracę z różnymi uczelniami, instytucjami naukowymi czy też centrami badawczo-naukowymi, w tym także międzynarodowymi. Na podstawie przedstawionej dokumentacji, elementy istotnej aktywności Habilitanta w tym kontekście obejmują:

- Aktywne uczestnictwo Habilitanta w projektach i badaniach realizowanych na *Technische Universität Braunschweig* w Niemczech. Współpraca z tą renomowaną instytucją naukową została rozpoczęta w 2000 roku i Habilitant regularnie, do 2011 roku, w ramach staży i innych projektów badawczych finansowanych ze środków zewnętrznych, prowadził badania wspólnie z zespołami badawczymi z tejże jednostki. Należy podkreślić, że pobyty Habilitanta w *TU Braunschweig* obejmowały okresy nawet kilkumiesięczne oraz tematycznie były powiązane z głównym nurtem badawczym opisanym w przedstawionym cyklu. Rezultaty tej współpracy miały wymierny charakter, to znaczy, zostały one opublikowane w czasopiśmie o randze międzynarodowej. Niektóre z tych prac są częścią przedstawionego cyklu publikacji. Można nawet stwierdzić, że kluczowe rezultaty uzyskane przez Habilitanta wynikają bezpośrednio z tej współpracy.
- Habilitant brał udział w projektach, konferencjach, wystawach czy też innych wydarzeniach, co świadczy o jego aktywności na arenie międzynarodowej. Do kluczowych osiągnięć Habilitanta w tym obszarze należy niewątpliwie projekt i konstrukcja automatycznego systemu pomiarowego dla narzędzi formujących tabletki. Opracowane rozwiązanie technologiczne zostało opatentowane i skomercjalizowane, tzn. zostało ono sprzedane do ponad piętnastu największych firm farmaceutycznych na całym świecie. Inne osiągnięcie Habilitanta jest związane z opracowaniem technologii ADS-B (*Automatic Dependent Surveillance-Broadcast*), której celem jest poprawa bezpieczeństwa i efektywnej komunikacji i monitorowania ruchu powietrznego. To rozwiązanie było prezentowane na kilkunastu wystawach międzynarodowych, zostało opatentowane i sprzedane do ponad pięćdziesięciu krajów. Habilitant brał też udział w kilku międzynarodowych konferencjach, m.in. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* na Florydzie w 2006 roku, *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* w Taipei w 2010 roku czy też *IEEE Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)* w Międzyzdrojach w roku 2017. Nie ma informacji na temat uczestnictwa Habilitanta w konferencjach naukowo-technicznych od roku 2017.
- Aktywność Habilitanta obejmuje różnorodne obszary badań naukowych. Główny nurt to manipulatory robotyczne będące podstawą przedstawionego cyklu publikacji. Drugi obszar badawczy jest związany z projektowaniem systemów dla bezałogowych statków powietrznych, które umożliwiają bezpośrednią wymianę informacji o swoim położeniu, prędkości, kursie, wysokości i innych parametrach. W tym drugim obszarze Habilitant uzyskiwał również wartościowe rezultaty, które zostały opatentowane, skomercjalizowane oraz wdrożone do praktyki przemysłowej na poziomie międzynarodowym.



- Osiągnięcia Habilitanta mają zastosowanie praktyczne o czym świadczą wdrożenia do praktyki przemysłowej opracowanych rozwiązań technologicznych (przede wszystkich należy tutaj wymienić maszynę pomiarową do stempli i matryc dla przemysłu farmaceutycznego oraz systemy mikro-awioniki oraz urządzenia dozoru załogowego i bezzałogowego ruchu lotniczego), uzyskanie praw własności przemysłowej w postaci patentów krajowych i międzynarodowych (Habilitant jest autorem lub współautorem 4 takich patentów), współpracę z sektorem gospodarczym w postaci zakończonych z sukcesem projektów (takich projektów jest wymienionych 6) czy też ekspertyz lub innych opracowań wykonanych na zamówienie instytucji publicznych lub przedsiębiorców (na podstawie dokumentacji Habilitant wykonał 6 takich ekspertyz).
- Aktywność Habilitanta jest uznawana i doceniana przez środowisko naukowe na poziomie lokalnym, krajowym i międzynarodowym o czym świadczą przyznane stypendia i nagrody (np. stypendium naukowe DAAD w *TU Braunschweig*, nagroda Prezydenta Miasta Szczecin za najlepszą pracę naukową z zastosowaniem komercyjnym, trzy nagrody w europejskim konkursie *European Satellite Navigation Competition*), a przede wszystkim sukces wdrożeniowy i komercyjny opracowanych przez Habilitanta rozwiązań technologicznych.

Podsumowując stwierdzam, że istotna aktywność naukowa Habilitanta realizowana w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej jest bardzo duża i wymierna. Tym samym uważam, że trzecie wymaganie ustawowe warunkujące nadanie stopnia doktora habilitowanego jest spełnione w nadmiarze.

5. Podsumowanie

Przedstawiony wniosek o nadanie stopnia doktora habilitowanego dla dra inż. Rafała Osypiuka spełnia wszystkie wymagania ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r.



Paweł Skruch