

Autoreferat

1. Imię i nazwisko

Rafał Osypiuk (ORCID: 0000-0002-8566-4871)

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

1999 tytuł magistra inżyniera automatyki i robotyki; absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Szczecińskiej; praca pt. „Zastosowanie metod logiki rozmytej w sterowaniu procesami elektrotermicznymi”, promotor prof. dr hab. inż. Stanisław Skoczowski.

2004 doktor nauk technicznych w dyscyplinie automatyka i robotyka, Wydział Elektryczny Politechniki Szczecińskiej; praca pt. „*Wielopętłowy odporny układ regulacji n-MFC (Model-Following Control) w zastosowaniu do sterowania manipulatorem szeregowym*”; promotor: prof. dr hab. inż. Stanisław Skoczowski, recenzenci: dr hab. inż. Andrzej Królikowski, Wydział Elektryczny, Politechnika Poznańska, dr hab. inż. Stanisław Bańka, Wydział Elektryczny, Politechnika Szczecińska.

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

1999–2004 asystent w Zakładzie Automatyki, Instytutu Automatyki Przemysłowej, Politechniki Szczecińskiej.

2004–2010 adiunkt w Zakładzie Automatyki, Instytutu Automatyki Przemysłowej, Politechniki Szczecińskiej.

od 2010 adiunkt w Katedrze Automatyki i Robotyki, Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.

a) Tytuł osiągnięcia naukowego:

Odporne układy i systemy sterowania momentem i siłą w robotyce przemysłowej

b) Osiągnięcie naukowe – cykl publikacji:

- [1] **Osypiuk R.**, Finkemeyer B., Skoczowski S.: *A Simple Two Degree of Freedom Structures and their Properties*, Robotica, Cambridge University Press, vol. 24, no. 3, pp. 365-372, 2006, doi: 10.1017/S0263574705002286.

(IF²⁰⁰⁶ = 0.483, w roku publikacji lista A – 25 pkt., w aktualnym wykazie czasopism naukowych – 70 pkt.)

Mój wkład polegał na szczegółowym sformułowaniu problemu, przygotowaniu analizy teoretycznej i porównawczej dla proponowanych rozwiązań sterowania dwupętowego, implementacji i weryfikacji algorytmów sterowania na rzeczywistym systemie, analizie otrzymanych wyników oraz przygotowaniu treści artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 70%.

- [2] **Osypiuk R.**, Finkemeyer B.: *Hybrid Model Based Force-Position Control: Theory and Experimental Verification*, Robotica, Cambridge University Press, vol. 24, no. 6, pp. 775-783, 2006, doi: 10.1017/S0263574706002967.

(IF²⁰⁰⁶ = 0.483, w roku publikacji lista A – 25 pkt., w aktualnym wykazie czasopism naukowych – 70 pkt.)

Mój wkład polegał na zaproponowaniu modyfikacji układu bazującego na modelu oraz jego fuzji z układem sterowania siłą, przygotowaniu analizy teoretycznej i porównawczej dla proponowanych rozwiązań sterowania dwupętowego, implementacji i weryfikacji algorytmów sterowania na rzeczywistym systemie, analizie otrzymanych wyników oraz przygotowaniu treści artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 80%.

- [3] Skoczowski S., **Osypiuk R.**, Pietruszewicz K.: *Odporna regulacja PID o dwóch stopniach swobody*, Wydawnictwo Naukowe PWN, MIKOM, ISBN 13 978-83-01-14717-4, 360 stron, 2006.

Bazą dla powstania monografii były indywidualne osiągnięcia autorów, prezentowane w recenzowanych publikacjach naukowych, rozszerzone o dodatkowe wyniki symulacyjno-eksperymentalne. Mój wkład polegał na przygotowaniu rozdziałów 3.4, 3.7 i 6.1. Mój udział procentowy szacuję na 35%.

- [4] **Osypiuk R.:** *Hexa Platform as Active Environment System, Robot Motion and Control*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp381-390, 2009, doi: 10.1007/978-1-84882-985-5_35.

(publikacja indeksowana w bazie Scopus i Web of Science)

- [5] **Osypiuk R., Kröger T:** *A Three-Loop Model-Following Control Structure: Theory and Implementation*, International Journal of Control, vol. 83, no. 1, pp. 97-104, 2009, doi: 10.1080/00207170903100230.

(IF²⁰⁰⁹ = 1.124, w roku publikacji lista A – 25 pkt., w aktualnym wykazie czasopism naukowych – 100 pkt.)

Mój wkład polegał na szczegółowym sformułowaniu problemu, implementacji hybrydowego sterowania siłą z modyfikowanym regulatorem, opracowaniu przebiegu testów eksperymentalnych, weryfikacji algorytmów na rzeczywistym systemie oraz znacznym udziale w redakcji artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 75%.

- [6] **Osypiuk R.:** *Simple Robust Control Structures Based on the Model-Following Concept - A Theoretical Analysis*, International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 20, no. 17, pp. 1920-1929, 2010, doi: 10.1002/rnc.1556.

(IF²⁰¹⁰ = 1.495, w roku publikacji lista A – 35 pkt., w aktualnym wykazie czasopism naukowych – 140 pkt.)

- [7] **Osypiuk R., Kröger T.:** *Parallel Stiffness Actuators with Six Degrees of Freedom for Efficient Force/Torque Control Applications*, Springer Tracts in Advanced Robotics, pp. 275-291, 2010, doi: 10.1007/978-3-642-16785-0_16.

(publikacja indeksowana w bazie Scopus i Web of Science)

Mój wkład polegał na zaproponowaniu wykorzystania aktywnej podatności w sterowaniu siłą w robotyce, zaprojektowaniu i wykonaniu dwóch aktuatorów podatnych o 6-ciu stopniach swobody (po stronie manipulatora i po stronie otoczenia), opracowaniu przebiegu testów eksperymentalnych, weryfikacji algorytmów na rzeczywistym systemie oraz znacznym udziale w redakcji artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 75%.

- [8] **Osypiuk R., Piskorowski J., Kubus D.:** *A method of improving the dynamic response of 3D force/torque sensors*, Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 68, pp. 366–377, 2016, doi: 10.1016/j.ymsp.2015.07.007.

(IF²⁰¹⁶ = 4.116, w roku publikacji lista A – 40 pkt., w aktualnym wykazie czasopism naukowych – 200 pkt.)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na sformułowaniu problemu, opracowaniu przebiegu testów eksperymentalnych, analizie i prezentacji otrzymanych wyników oraz znacznym udziale w redakcji artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 45%.

- [9] Okoniewski P., **Osypiuk R.**, Piskorowski J.: *Short-transient discrete time-variant filter dedicated for correction of the dynamic response of force/torque sensors*, Electronics, 9, 2020, doi: 10.3390/electronics9081291.

(IF²⁰²⁰ = 2.397, w roku publikacji lista A – 100 pkt., w aktualnym wykazie czasopism naukowych – 140 pkt.)

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na sformułowaniu problemu, przygotowaniu danych eksperymentalnych, analizie i weryfikacji otrzymanych wyników oraz udziale w redakcji artykułu. Mój udział procentowy szacuję na 33%.

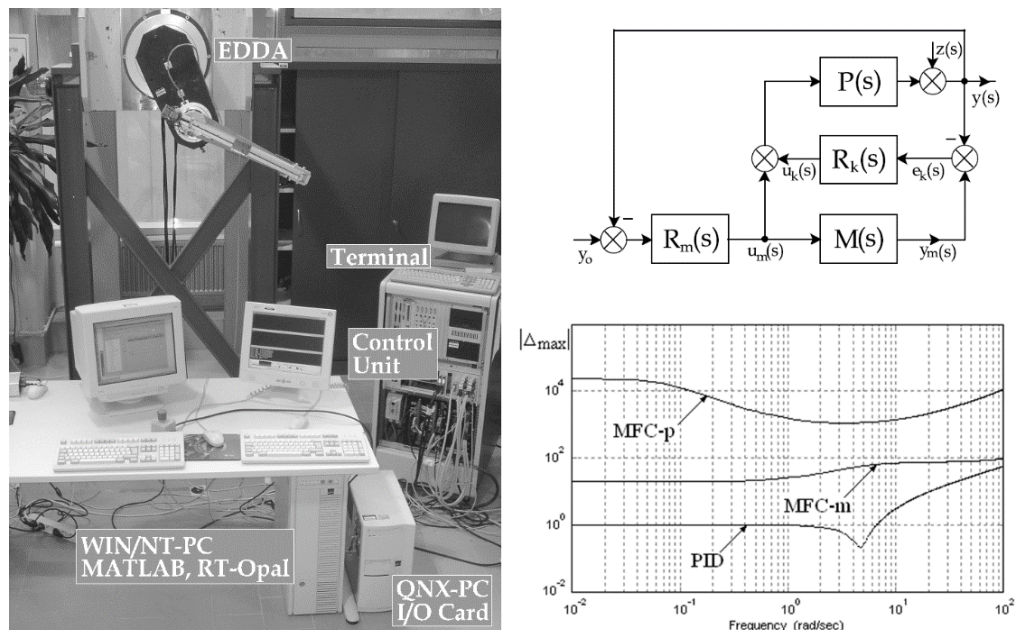
- [10] **Osypiuk R.**: *A new approach to compensator design based on multi-loop technique and scalable forward model complexity*, Electronics, 10, 2021, doi: 10.3390/electronics10243049.

(IF²⁰²¹ = 2.690, w roku publikacji lista A – 100 pkt., w aktualnym wykazie czasopism naukowych – 140 pkt.)

c) Omówienie osiągnięcia naukowego:

Przeznaczenie robotów przemysłowych obejmuje głównie zadania związane z wyręceniem człowieka od czynności powtarzalnych, wymagających wysokiej precyzji/powtarzalności, czy też polegających na manipulacji znacznymi masami. Szczególnie w ostatnich dwóch dekadach manipulator przemysłowy postrzegany jest często jako w pełni autonomiczna jednostka o zaawansowanych zdolnościach interakcji z otoczeniem. Mowa jest wręcz o oczekiwanej inteligencji, która rozumiana jest jako poprawna reakcja robota na niedeterministyczne zdarzenia. Zmianie zaczyna nawet ulegać definicja samego robota, która ewoluowała do postaci: *inteligentne połączenie pomiędzy percepcją i akcją*. Tym inteligentnym połączeniem jest system decyzyjny, natomiast percepcja to zaawansowana sensoryka podobna do zmysłów w jakie wyposażony jest człowiek. W szczególności jest to zmysł dotyku (wraz z czujnikami momentów i sił 6DOF), czy zmysł wzroku (systemy wizyjne). To właśnie *odporne układy i systemy sterowania momentem i siłą w robotyce przemysłowej* są tematem niniejszego cyklu publikacji.

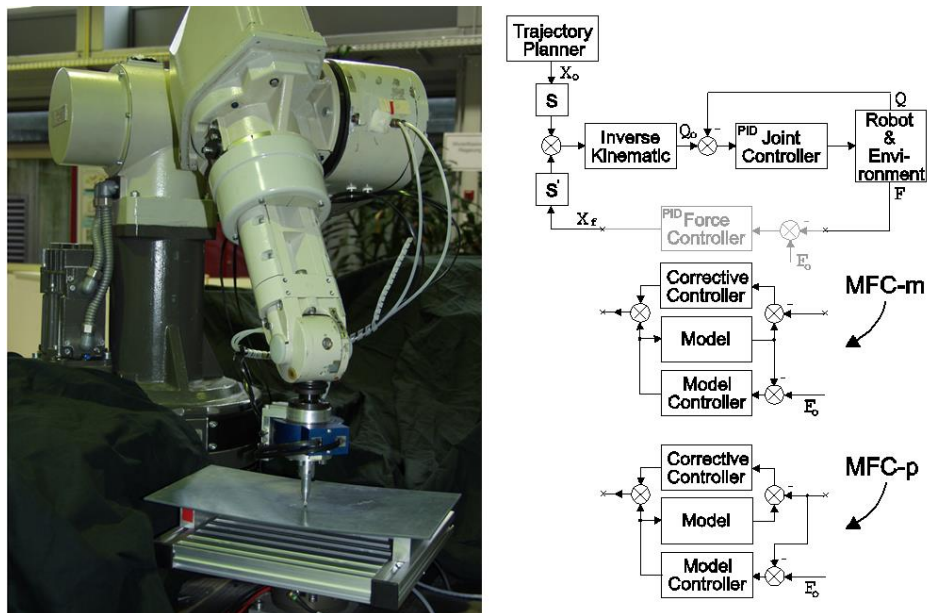
Manipulator przemysłowy to łańcuch kinematyczny o kilku stopniach swobody. Jest to obiekt MIMO (Multiple Input Multiple Output), charakteryzujący się sprzężeniami dynamicznymi oraz silną nieliniowością. Dzięki swojej naturze jest to również system wybitnie niestacjonarny. Patrząc z punktu widzenia syntezy układu sterowania położeniem robota, proces ten jest niezwykle złożony. Sytuacja komplikuje się jeszcze bardziej, gdy z operowania w wolnej przestrzeni, następuje przejście do kontaktu robota z otoczeniem. Mowa jest o niestacjonarności otoczenia tj. jego zmiennej w czasie sztywności. Ta sztywność może fluktuować nawet 500-krotnie, a faktor ten bezpośrednio określa zmianę wzmocnienia w pętli sterowania siłą, co ma dramatyczny wpływ na czas regulacji, przy stosowaniu klasycznych metod sterowania PID. Krótco po obronie rozprawy doktorskiej rozpocząłem prace nad modyfikacjami systemów rodziny MFC (Model-Following Control) i ich zastosowaniu w robotyce. Wcześniejsze badania eksperymentalne wykazały trudności w wykorzystaniu klasycznego układu MFC, z uwagi na obecność niezależnej pętli modelu i skłoniły do poszukiwań rozwiązań alternatywnych. Modyfikacja sprzężenia zwrotnego w pętli modelu klasycznego systemu MFC doprowadziła do powstania struktury MFC-p (plant feedback) o nowych interesujących własnościach. W pracy [1] dokonano teoretycznego, symulacyjnego i eksperymentalnego porównania proponowanych układów na przykładzie sterowania pozycją dwuczłonowego robota EDDA (Experimental Direct Drive Arm).



Rys. 1 Stanowisko eksperymentalne do badania modyfikowanej struktury MFC-p wraz z porównawczym wykresem odporności dla układu pierwotnego MFC-m oraz PID.

Źródło: Własne.

Obiekt ten, z uwagi na napęd bezpośredni charakteryzował się silną nieliniowością i okazał się idealnym wyborem do badań odporności układów sterowania. Nowa struktura wykazywała większą odporność na zmienność parametrów procesu oraz istotną poprawę tłumienia zakłóceń. Był to okres, w którym intensywnie współpracowałem z Institut für Robotik und Prozessinformatik na TU Braunschweig w ramach uzyskanych stypendiów DAAD. Jednostka ta należała wówczas do światowej czołówki i niewielkiego grona uczelni, zdolnych do prowadzenia badań nad siłową interakcją robota z otoczeniem. Ta zdolność wynikała z opracowania otwartej architektury sterowania MiRPA (Middleware for Robotic and Process Control Applications), którą w początkowej fazie sprzęgnięto z manipulatorem Manutec r2 firmy Siemens. Autorem architektury MiRPA był Bernd Finkemeyer (dyrektor badań i rozwoju firmy KUKA Laboratories GmbH w latach 2005-2012). To modułowe oprogramowanie, działając pod systemem operacyjnym czasu rzeczywistego QNX, gwarantowało dostęp do zmiennych procesowych i umożliwiało integrację złożonych układów sensorycznych w strukturę sterowania robota. Po zapoznaniu się z obsługą środowiska eksperymentalnego, dokonałem implementacji układów bazujących na modelu [2], rozszerzając je o pętlę sterownia siłą. Hybrydowe sterowanie wykorzystywało czujnik momentów i sił JR3 oraz macierz selekcji S do przełączania układów sterowania pozycja/siła (rys. 2).



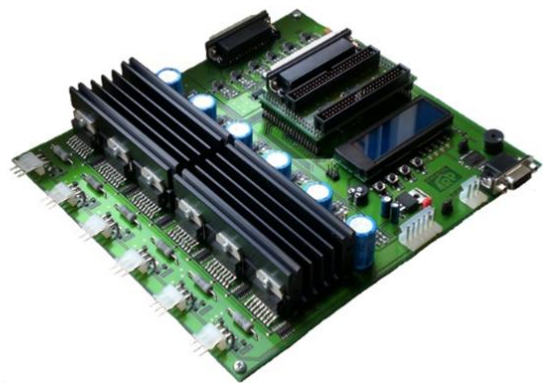
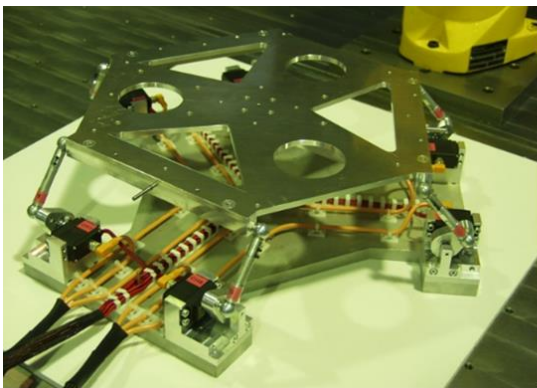
Rys. 2 Próby eksperymentalne z robotem Manutec r2 oraz struktury sterowania siłą.

Źródło: Własne.

Zdefiniowano kilka scenariuszy kontaktu robota z otoczeniem, co miało bezpośredni wpływ na fluktuację sztywności. W eksperymencie porównywano zmodyfikowany układ MFC z klasyczną regulacją jednopętlową. Wykazano przy tym znaczną poprawę podążania za wartością zadaną oraz istotne polepszenie sterowania siłą podczas ruchu robota pozostającego w kontakcie z otoczeniem. Klasyczny jednopętlowy układ sterowania charakteryzuje się tzw. komplementarnością, polegającą na braku możliwości odprężnięcia właściwości podążania za wartością zadaną od tłumienia zakłóceń systemowych. Kontynuując współpracę z naukowcami z jednostki macierzystej uczestniczyłem w redagowaniu książki [3], która jest interesującym źródłem informacji o układach sterowania z dwoma stopniami swobody. Proponowane systemy pozbawione są wad układu jednopętlowego, oferując zwiększoną odporność na perturbacje procesu. Wyniki badań zawarte w książce są kompilacją recenzowanych prac naukowych, rozszerzonych o dodatkowe wyniki symulacyjno-eksperymentalne.

Znaczny postęp w technologii mechanicznej przełożył się na większe sztywności członów, co w nieograniczonej przestrzeni (bez więzów) jest niewątpliwą zaletą i przekłada się wprost na poprawę dokładności pozycjonowania. Problem pojawia się jednak, gdy robot zostaje wyposażony w czujnik momentów i sił dla celów kontrolowanego oddziaływania z otoczeniem np. w zadaniach autonomicznego montażu. W takich sytuacjach wysoka sztywność otoczenia z jaką dochodzi do kontaktu jest powodem generowania wysokich sił impulsowych, które propagują przez łańcuch kinematyczny robota. Zjawisko to ma negatywny wpływ na jego strukturę mechaniczną i żywotność, a w skrajnych przypadkach prowadzi do deformacji członów i/lub uszkodzenia przekładni. Pomocna okazuje się redukcja prędkości robota, krótko przed momentem nawiązania kontaktu (jeśli taka informacja istnieje). To podejście ma jednak istotną wadę, która polega na wydłużeniu czasów cyklu w zrobotyzowanym procesie. W związku z powyższym pomiędzy sztywnym manipulatorem i najczęściej również sztywnym otoczeniem wprowadza się systemy pasywnej lub aktywnej podatności. W metodach pasywnych stosowane są układy mechaniczne RCC (Remote Center Compliance), bazujące na elementach sprężystych lub pneumatycznych. W takich rozwiązaniach nie ma interakcji pomiędzy architekturą sterowania manipulatora, a podatnością. Tutaj pojawia się jedna z najważniejszych wad tych rozwiązań tj. brak informacji o dokładnym położeniu chwytaka w przestrzeni. Ponieważ dokładność

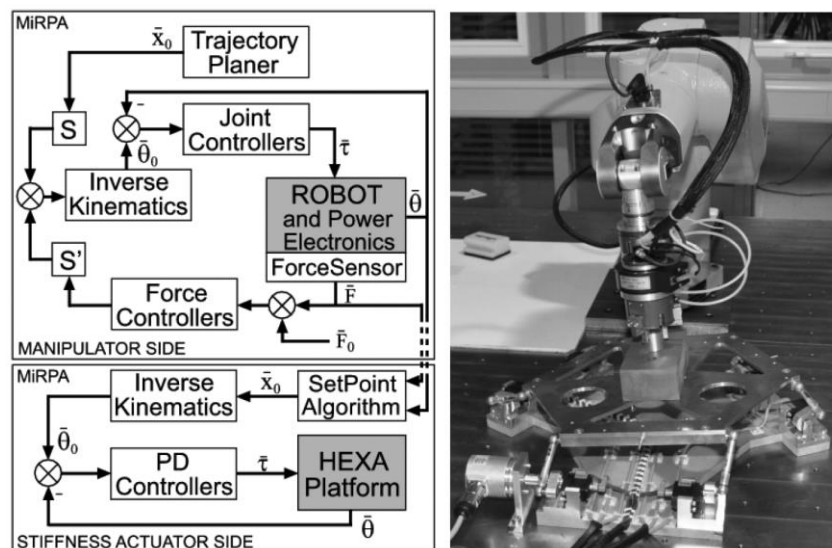
pozycjonowania w większości przypadków aplikacji jest sprawą nadrzędną, istotną rolę odgrywają systemy aktywnej podatności, które są wyposażone w czujniki sprzęgnięte z systemem sterowania robota. Jednym z przykładów komercyjnych może być manipulator DLR lightweight (produkowany obecnie na licencji przez firmę KUKA). Jest on wyposażony w czujnik momentu w każdym członie, ochronę przed kolizją oraz układ bezpiecznego reagowania. Chociaż systemy aktywnej podatności, bazujące najczęściej na hybrydowym sterowaniu pozycja/siła są dużo bardziej atrakcyjne od rozwiązań pasywnych wykorzystujących sterowanie impedancją, to z uwagi na problemy zachowania stabilności stanowią duże wyzwanie projektowe. Manipulator DLR to próba zastosowania aktywnej podatności w przestrzeni zmiennych konfiguracyjnych. Rozwiązanie to obok wysokich kosztów produkcyjnych (ok. 100tys. Euro) posiada bardzo ważną wadę tj. sztywność robota w układzie kartezjańskim jest zmienna i wynika z aktualnej konfiguracji ramienia. Ponadto znaczne masy członów nadal nie rozwiązują kluczowego problemu nawiązania kontaktu robota ze sztywnym otoczeniem. W związku z powyższym i dzięki doświadczeniu zdobytemu podczas prowadzonych badań nad sterowaniem siłą, zaproponowałem pomysł polegający na zmianie wypadkowej podatności „odczuwanej” przez sztywny manipulator, poprzez zastosowanie po stronie otoczenia specjalnego aktuatora, który z założenia pracuje w przestrzeni kartezjańskiej. Koncepcja ta uzyskała poparcie MNiSW, która przyznała finansowanie dla projektu pt.: *Efektywne systemy sterowania siłą i momentem dla manipulatorów przemysłowych o 6-ciu stopniach swobody* w ramach programu „Wsparcie międzynarodowej mobilności naukowców”. W ten sposób w okresie 2008-2010 prowadziłem nieprzerwanie prace projektowe i badawcze w Institut für Robotik und Prozessinformatik w Braunschweig.



Rys. 3 Platforma Hexa wraz z zaprojektowanym sterownikiem ruchu.

Źródło: Własne.

W ramach tych działań powstał złożony system mechatroniczny z autorską koncepcją sterowania, będący komponentem stanowiska eksperymentalnego (rys. 3). Zaprojektowałem i zbudowałem równoległą platformę o 6-ciu stopniach swobody, wyposażoną w wysokiej jakości serwonapędy z przekładniami tytanowymi, z których usunięto komercyjne sterowniki ruchu. Działanie to podyktowane było koniecznością zastosowania własnych układów sterujących, które projektowałem razem z działem elektroniki jednostki goszczącej. Nowy hardware został przygotowany w taki sposób, aby umożliwić jego połączenie z kartą I/O firmy Advantech oraz systemem RTOpal, wspierającym technologię Hardware-In-The-Loop, firmy MATLAB. Opracowałem i zaimplementowałem algorytmy sterujące, które wymagały wyznaczenia zadania odwrotnej kinematyki, generatora trajektorii oraz syntezy regulatorów położenia. W pracy [4] przedstawiłem pierwsze opracowania koncepcyjne, które skierowane były głównie na rozwiązania sprzętowe.

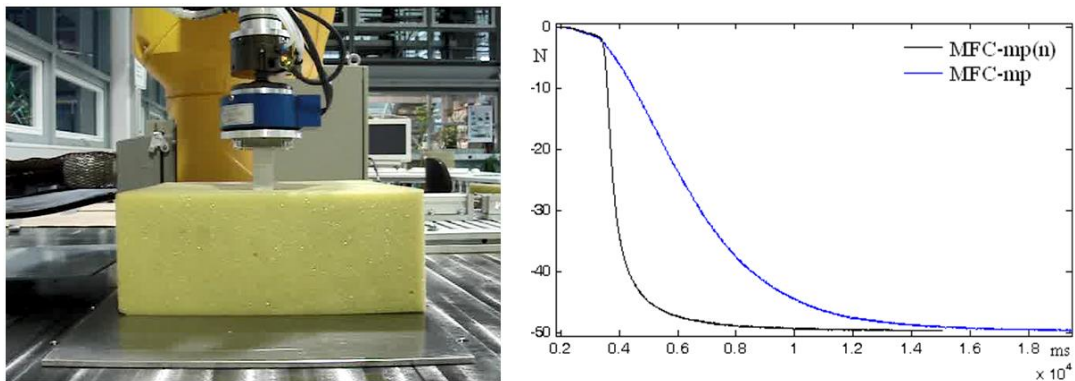


Rys. 4 Platforma Hexa wraz z zaprojektowanym sterownikiem ruchu.

Źródło: Własne.

Działania nad aktuatorem podatnym były jeszcze na wczesnym etapie i przechodziły z hardware-u do prac nad oprogramowaniem sterującym. W publikacji przedstawiono proponowane układy regulacji oraz sposób integracji aktuatora ze sterownikiem robota. Tym razem był to już robot Staubli TX60, wraz z dopasowaniem sprzętowym, który pozwolił na uruchomienie architektury MiRPA. Ponadto w pracy zwrócono uwagę na znany problem robotyki i tzw. zadanie *peg-in-hole*. Proponowana podatność po stronie otoczenia miała znacznie ułatwić realizację tego procesu.

Równolegle prowadziłem prace nad układami sterowania bazującymi na modelu w celu poprawienia ich strukturalnej odporności na zmiany parametrów [5]. Zaproponowałem modyfikację systemu MFC, polegającą na zastosowaniu podwójnego sprzężenia zwrotnego MFC-mp (model/plant feedback). Uproszczona analiza teoretyczna i symulacyjna wykazała jego podwyższoną odporność oraz poprawę warunków stabilności w odniesieniu do pozostałych układów MFC. Wyniki były tak interesujące, że podjąłem złożony proces implementacji tego rozwiązania w celu przeprowadzenia walidacji eksperymentalnej.

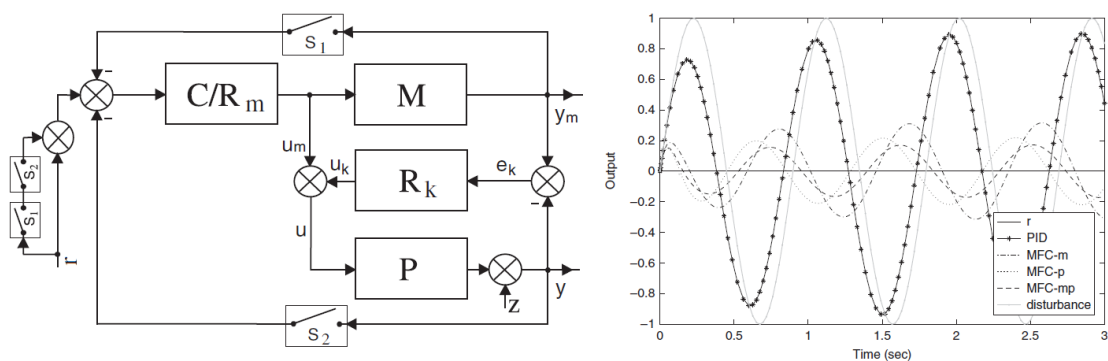


Rys. 5 Test ukazujący działanie nieliniowego regulatora.

Źródło: Własne.

Korzystając ze środowiska szybkiego prototypowania RTOpal oraz systemu MiRPA uruchomiłem hybrydowe sterowanie pozycja/siła, bazujące na strukturze MFC-mp. Zdefiniowane zostały trzy różne scenariusze jednopunktowego kontaktu robota z otoczeniem, które oferowały różną sztywność otoczenia. Przejście z kontaktu wysokiej sztywności (aluminium) do kontaktu wysokiej podatności (gąbka) pokazało dobitnie możliwości i ograniczenia porównywanych systemów. Mierzono wówczas zmianę wzmocnienia w pętli na poziomie 500-krotnym, co destrukcyjnie wpływało na czasy regulacji. Chociaż struktura MFC-mp wykazywała najlepszą odporność na perturbacje, dokonano dodatkowej próby poprawy jakości, poprzez zastosowanie nieliniowego regulatora. Pożądane jest aby wzmocnienie regulatora było małe w przypadku wysokiej sztywności otoczenia, natomiast bardzo duże w przypadku odwrotnym. Zaproponowano regulator kwadratowy, w efekcie czego ruchy translacyjne robota były silnie zależne od poziomu błędu regulacji. Zabieg ten z jednej strony zapewnił zachowanie stabilności w kontakcie robota z wysoką sztywnością otoczenia, z drugiej strony ekstremalnie skrócił czas regulacji w kontakcie z dużą podatnością. Dokonano również eksperymentu przemieszczenia robota będącego w kontakcie

z otoczeniem, gdzie na dystansie kilkunastu centymetrów dochodziło do gwałtownej zmiany sztywności. Tutaj klasyczna regulacja PID okazała się niestabilna, natomiast rezultaty dla MFC-mp były zadowalające. W pracy [5] środek ciężkości przeniesiony był na stronę eksperymentalną. Pojawił się więc pomysł aby nową strukturę MFC-mp pokazać na tle poprzednich rozwiązań, przede wszystkim w sensie teoretycznym. W pracy [6] przedstawiono trzy odmiany systemu MFC (rys. 6), poruszając m.in. takie aspekty jak odporność czy stabilność. Za punkt odniesienia w analizie teoretycznej i symulacyjnej zastosowano klasyczny system jednopętlowy, pokazując jednocześnie własności układów MFC-n, MFC-p oraz MFC-mp. Ten ostatni okazał się zdecydowanym faworytem.

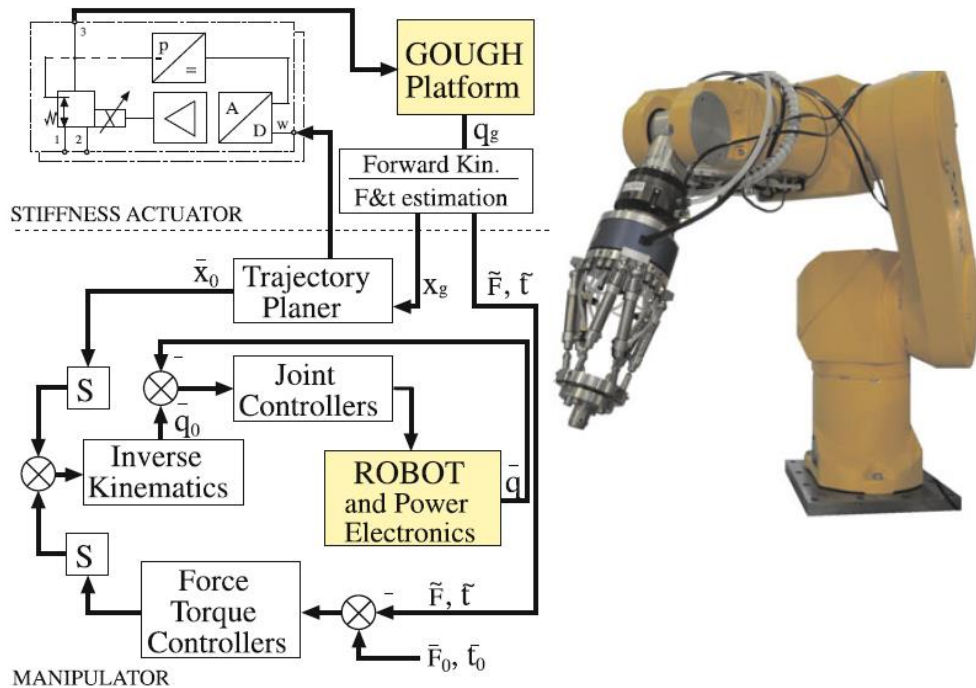


Rys. 6 Trzy systemy MFC predefiniowane przez s_1 i s_2 oraz przykład porównawczego tłumienia zakłóceń.

Źródło: Własne.

Kontynuowałem prace projektowe nad aktuatorami, które głównie dotyczyły przygotowania oprogramowania sterującego oraz otoczenia do przeprowadzenia badań eksperymentalnych. Zaprojektowałem mechaniczną strukturę pneumatycznego aktuatora, instalowanego po stronie manipulatora, który bazował na znanej kinematyce Gough. Eksperymenty pokazały gwałtowny wzrost siły w funkcji prędkości manipulatora, w krytycznym momencie nawiązania kontaktu sztywnego robota ze sztywnym otoczeniem. Zjawisko to zostało znacznie zredukowane poprzez instalację aktuatora podatnego (rys. 7), generując znacznie mniejsze siły kontaktowe w funkcji prędkości. Podobne efekty uzyskano podczas prób eksperymentalnych z aktuatorem instalowanym po stronie otoczenia. Zaimplementowano system decyzyjny, który bazując na pomiarach sił i momentów wprowadza trzpień do otworu (*peg-in-hole*). Testowano przypadek bez aktuatora i z aktuatorem aby pokazać pozytywny efekt wprowadzenia podatności w przestrzeń kartezyjską otoczenia robota. Uzyskano w ten

sposób kilkukrotną redukcję czasu w realizacji tego procesu. W publikacji [7] znajduje się podsumowanie prac nad aktuatorami podatnymi. Stanowi ona rozdział monografii,



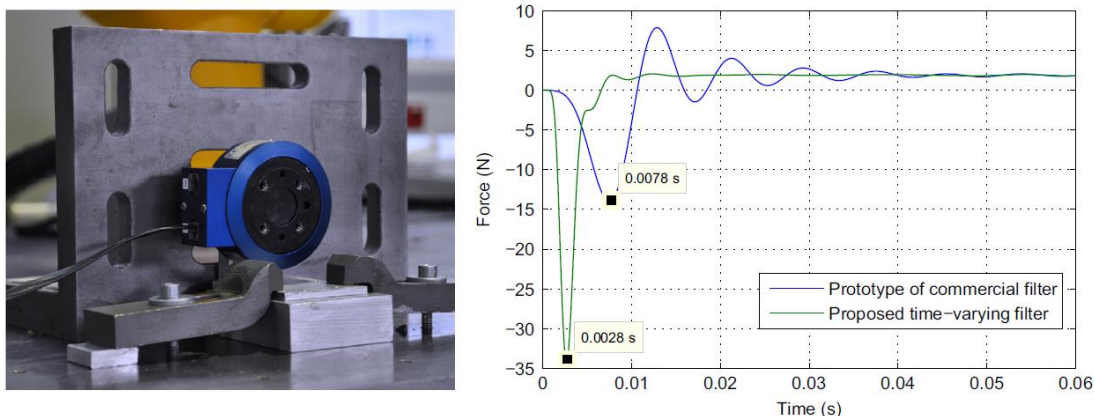
Rys. 7 Propozycja układu regulacji wraz mechaniczną strukturą podatną, instalowaną po stronie manipulatora.

Źródło: Własne.

będącej zestawieniem najważniejszych osiągnięć uzyskanych podczas 10-cio letnich badań i współpracy kilkunastu niemieckich instytutów w programie SFB562 *Robotic Systems for Handling and Assembly*, finansowanym przez grant DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft). Monografię recenzował m.in. prof. Bruno Siciliano oraz prof. Oussama Khatib, uznane autorytety w dziedzinie sterowania siłą w robotyce.

Czujnik momentów i sił stanowi integralną część układu sterowania siłą robota przemysłowego i poprzez swoje własności wpływa na wypadkową dynamikę całego systemu. Wpływ ten byłby pomijalny, gdyby dynamika czujnika znacznie przewyższała dynamikę manipulatora przemysłowego. Okazuje się jednak, że tak nie jest. Przeprowadzone badania eksperymentalne pokazały skalę tego problemu i zainicjowały prace badawcze w kierunku poprawy własności dynamicznych czujników momentów i sił. Obiektem badań stał się czujnik firmy JR3, który jak większość tego typu konstrukcji ma monolityczną strukturę z odpowiednio rozmieszczonymi tensometrami foliowymi (drukowanymi). Realizacja fizyczna takich czujników nie jest prosta i wymaga procesu odsprężania, który realizowany jest podczas fabrycznej kalibracji

czujnika. Dodatkowo w jego strukturze implementowana jest zaawansowana elektronika ze sprzętowymi filtrami dolnoprzepustowymi, predefiniowanymi przez użytkownika. Obecność filtrów w procesie sterowania siłą w robotyce jest nieodzowna i wynika z wysokiego poziomu zakłóceń, których źródłem są m.in. ruch samego robota oraz szumy z przetworników pomiarowych. Producent czujnika nie podzielił się informacją o rodzaju zastosowanych filtrów, jednak opublikował jego charakterystyki częstotliwościowe. Poprzez wsteczną inżynierię udało się odtworzyć jego typ oraz parametry i uzyskać 100% pokrycia przebiegów. Okazał się nim filtr eliptyczny VI rzędu, a znajomość jego parametrów otworzyła drogę do rozpoczęcia badań symulacyjnych i przygotowania propozycji dla zastosowania nowej klasy filtrów parametrycznych. W literaturze widoczny jest wyraźny brak rozwiązań filtrów, które poza właściwościami widmowymi uwzględniają również dobre własności w dziedzinie czasu, w sensie możliwie krótkich stanów przejściowych. Dzieje się tak ponieważ, w klasycznych filtrach stacjonarnych selektywna charakterystyka amplitudowa oraz krótkie czasy trwania stanów przejściowych, to wymagania sprzeczne ze sobą. Wynika to z ogólnej zależności pomiędzy dziedziną częstotliwości i czasu, która nazywana jest zasadą nieoznaczoności. Jednym z interesujących kompromisów jest zastosowanie uzmienniania parametrów filtru. Z głębszej analizy wynika, że wzrost pulsacji drgań własnych, prowadzi do skrócenia czasu trwania stanów przejściowych, natomiast wzrost współczynnika tłumienia redukcją przeregulowania. Idąc tym tropem, i stosując funkcję uzmienniania parametrów filtru można poprawić jego własności w dziedzinie czasu, w przedziale trwania tego uzmienniania. Proces uzmienniania startuje w momencie wygenerowania skoku jednostkowego i kończy się w chwili osiągnięcia wartości parametrów obowiązujących dla filtru stacjonarnego. Po tym procesie nasz filtr zachowuje się w sposób klasyczny. Tym samym jest to bardzo interesujące rozwiązanie dla krytycznego momentu nawiązania kontaktu robota z otoczeniem. Gdzie w jego fazie początkowej wymaga się szczególnie krótkich okresów przejściowych filtru, co nie jest wymagane tuż po nawiązaniu kontaktu. Kontynuując współpracę z Institut für Robotik und Prozessinformatik w Braunschweig, w ramach programu LLP-Erasmus (Staff Mobility), przygotowano specjalne stanowisko eksperymentalne, które pozwoliło na przeprowadzenie prób praktycznych. Wymagało ono instalacji czujnika na niezwykle sztywnym bloku stalowym oraz przygotowania oprogramowania pod system operacyjny QNX do parametryzacji czujnika i akwizycji danych kompatybilnych ze



Rys. 8 Stanowisko eksperymentalne z czujnikiem JR3 oraz różnica w działaniu proponowanego i komercyjnego filtru.

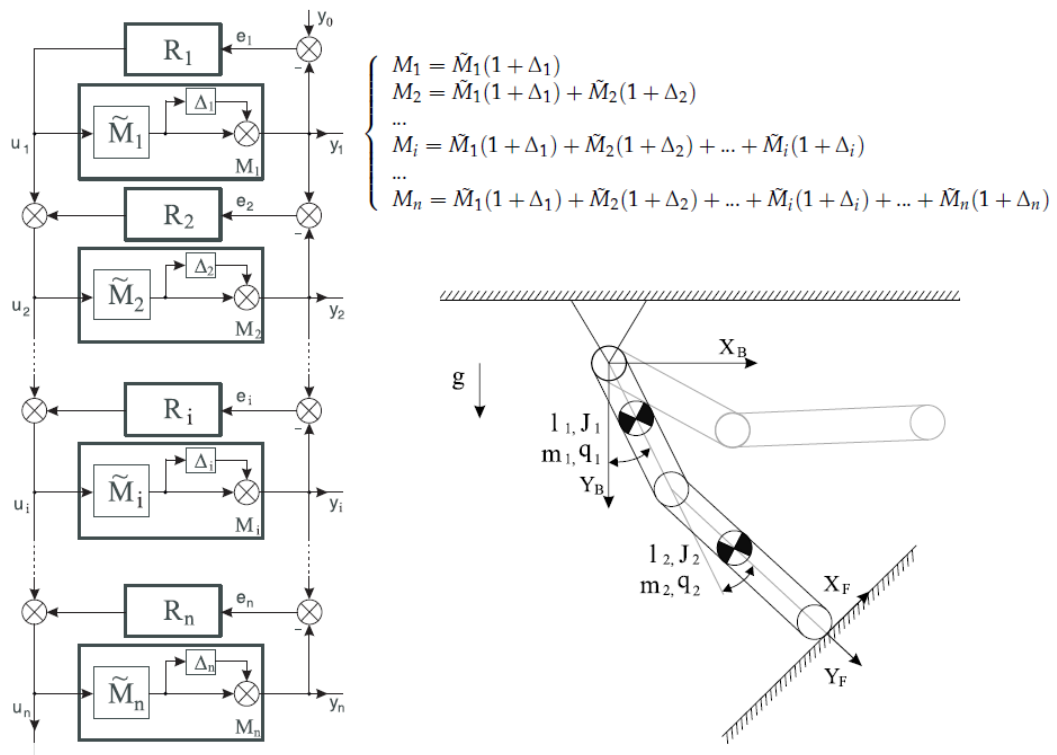
Źródło: Własne.

środowiskiem Matlab/Simulink. Osiągnięcie wysokiej jakości odpowiedzi skokowych i impulsowych, wymagało wygenerowania sił o okresie trwania krótszym niż pojedyncza próbka pomiaru czujnika ($<125\mu\text{s}$). Dla skoku jednostkowego zastosowano specjalnie dobrany piezoaktuator, natomiast impuls wygenerowano za pomocą broni CO_2 . Uzyskane rezultaty opublikowane w pracy [8] dobitnie pokazały różnice między klasyczną filtracją, stosowaną obecnie w komercyjnych czujnikach siły, a ich niestacjonarnym odpowiednikiem. Podejście to oferuje co najmniej dwukrotne zwiększenie dynamiki czujnika (rys. 8) w najbardziej krytycznym momencie jego pracy, tj. chwili nawiązania kontaktu robota z otoczeniem. Własność ta bezpośrednio przekłada się, na zwiększenie prędkości robota, umożliwiając znaczne skrócenie czasu cyklu na autonomicznych stanowiskach montażu. Synteza filtrów parametrycznych jest zagadnieniem bardzo złożonym. Dobór odpowiednich funkcji uzmienniających oraz optymalizacja szybkości uzmienniania parametrów nie wynika z narzuconych warunków stabilności filtru. Tej tematyce poświęca się odrębne publikacje i obok, wykładniczych funkcji uzmienniających (optymalnych z punktu widzenia łatwości ich realizacji w technice analogowej) można spotkać funkcje trygonometryczne, czy też prostokątne. Innym zagadnieniem jest przedział czasu uzmienniania parametrów, który też nie jest bez znaczenia i powinien być równy czasowi ustalania oryginalnego filtru stacjonarnego. Tej tematyce poświęcono uwagę w pracy [9]. W szczególności przeprowadzono dyskretyzację filtru parametrycznego oraz zaproponowano nową procedurę optymalizacji uzmienniania jego parametrów. Proponowana procedura składa się z dwóch etapów. W pierwszym z nich parametry zmieniają się liniowo przez

zadany horyzont czasu. Wartość początkowa zmiany liniowej jest wybierana losowo, a celem jest skrócenie czasu ustalania się systemu zmiennego w czasie. Okazuje się, że wprowadzanie niewielkich nieliniowych zmian parametrów często dodatkowo zmniejsza czas ustalania się całej struktury zmiennej w czasie. Zaproponowano więc w drugim etapie metodę modulowania parametrów za pomocą krzywych Béziera. Podejście to charakteryzuje się dużą swobodą w kształtowaniu dynamiki zestawów parametrów, pozwalając skrócić czasy przejściowe filtru o dodatkowe 10%. Zaproponowane w artykule rozwiązania mają charakter dyskretny i otwierają drogę do implementacji filtrów parametrycznych na rzeczywistym systemie cyfrowym.

Obecnie ponad 90% aplikacji przemysłowych, wykorzystujących regulację automatyczną, bazuje na jednopętlowym systemie PID. Swoją popularność zawdzięcza on pewnej naturalnej odporności na perturbacje procesu, a przede wszystkim łatwości w implementacji i parametryzacji. Próby automatyzacji coraz bardziej złożonych procesów wymuszają poszukiwanie nowych rozwiązań, zdolnych do zagwarantowania wysokiej jakości regulacji w otoczeniu silnych zmian parametrów obiektu zarówno w funkcji czasu (niestacjonarność), jak i punktu pracy (nieliniowość). W literaturze można znaleźć wiele technik sterowania procesami nieliniowymi, tutaj poruszone zostaną zagadnienia dotyczące układów MBC (Model-Based Control). Użycie kompensatora w strukturze jest jednym z najprostszych sposobów na osiągnięcie skutecznej regulacji dla nieliniowego procesu. Niestety, modelowanie odwrotnych własności dynamicznych procesu nie jest zadaniem trywialnym. Poza pewnymi szczególnymi przypadkami, znacznie łatwiej jest wyznaczyć model właściwy procesowi, niż jego model odwrotny. Z tego powodu interesujące byłoby zaproponowanie alternatywnego rozwiązania dla dobrze znanej metody sterowania feedforward. Pierwszym krokiem w tą stronę były dwupętlowe układy MFC, którym poświęciłem sporo uwagi. Miały one jednak istotną wadę, która dotyczyła odporności pętli modelu, co ograniczało ich spektrum zastosowań. Jeszcze w mojej pracy doktorskiej zaproponowałem ideę sterowania wielopętlowego, która niwelowała powyższą wadę. Koncepcja ta była wówczas przebadana wyłącznie eksperymentalnie, dlatego wróciłem do niej, proponując nowe podejście do budowy kompensatora. Główna idea opiera się na naturalnej (ale ograniczonej) odporności oferowanej przez pojedynczą pętlę PID i możliwości skalowania złożoności modelu procesu. Proponowana struktura zwielokrotnia pojedynczą pętlę PID, poprzez zastosowanie modeli o rosnącej złożoności (rys. 9),

w celu obliczenia wynikowej, nieliniowej wartości sterowania. To nowe podejście zapewnia porównywalną wydajność do metody feedforward ale nie wymaga dostępu do odwrotnych właściwości procesu. W pracy [10] dokonano wnikliwej analizy teoretycznej kompensatora, ze szczególnym naciskiem na stabilność i odporność na zmiany parametrów procesu. Ponadto przeprowadzono badanie symulacyjne z wykorzystaniem dwóch sprzężonych procesów nieliniowych, tj. sterowania położeniem manipulatora, będącego w kontakcie z otoczeniem (interakcja siłowa). Wybór tego procesu nie był przypadkowy. Z jednej strony jest on niezwykle złożony, a z drugiej strony daje możliwość wyznaczenia zarówno modelu właściwego, jak i odwrotnego. Ta zdolność była bardzo pomocna w przeprowadzeniu skutecznego porównania proponowanego rozwiązania ze znaną strukturą feedforward.



Rys. 9 Koncepcja układu wielopętlowego oraz skalowanego modelu właściwego w sterowaniu siłą.

Źródło: Własne.

Nadrzędnym celem mojej działalności naukowo-badawczej było poszukiwanie rozwiązań dla poprawy efektywności sterowania siłą w robotyce przemysłowej. Wysoka złożoność tej tematyki, objawiła się kilkoma kierunkami badań, które przewijają się w literaturze przedmiotu. Również w mojej pracy nie poświęciłem się jednej grupie zagadnień, lecz starałem się spojrzeć na problem sterowania siłą z szerszej perspektywy.

Było to naturalnym efektem prowadzonych prac badawczych i uzyskiwanych wniosków. W szczególności mój wkład obejmuje trzy kierunki działań:

- a) Odporne układy regulacji bazujące na modelu – propozycja nowych rozwiązań oraz ich analiza teoretyczna i eksperymentalna. Badania nad sterowaniem siłą z wykorzystaniem manipulatorów o 6-ciu stopniach swobody.
- b) Systemy aktywnej podatności – instalowane pomiędzy sztywną strukturą robota, a jego otoczeniem. Koncepcja, projekt, budowa i uruchomienie podatnych aktuatorów. Badania nad sterowaniem siłą z wykorzystaniem manipulatorów o 6-ciu stopniach swobody.
- c) Systemy poprawy własności dynamicznych czujników siły – propozycja zastosowania filtrów parametrycznych do komercyjnych czujników momentów i sił. Badania eksperymentalne z wykorzystaniem czujnika firmy JR3.

Moje pomysły zawsze starałem się zwalidować na drodze eksperymentalnej. Przygotowanie otoczenia testowego wymagało znacznego zaangażowania w projektowanie sprzętu i oprogramowania oraz działanie z najnowszymi technologiami. Te czasochłonne prace często stoją w cieniu wyników, prezentowanych w moich publikacjach naukowych. Przedstawiony cykl artykułów proponuje z jednej strony układy sterowania momentem i siłą, charakteryzujące się wysokim poziomem odporności na zmiany parametrów procesu, a z drugiej strony prezentuje rozwiązania dla fundamentalnego problemu nawiązania kontaktu robota z otoczeniem.

d) Omówienie dodatkowych osiągnięć mających wpływ na rozwój dyscypliny:

1. Projekt i konstrukcja automatycznego systemu pomiarowego dla narzędzi formujących tabletki

W roku 2011 nawiązałem współpracę z firmą Adamus HT (obecnie Adamus S.A.), która jest światowym liderem w produkcji narzędzi i maszyn dla przemysłu farmaceutycznego. Zapoznano mnie wówczas z globalnym problemem inspekcji narzędzi formujących tabletki oraz nierozwiązaną do tej pory automatyzacją tego procesu. Zgodnie z normą ISO 18084:2011, narzędzia formujące podlegają cyklicznym inspekcją ich krytycznych parametrów geometrycznych zarówno w fazie produkcji, jak i w okresie ich późniejszego stosowania. Proces ten przebiegał w sposób ręczny, co przy

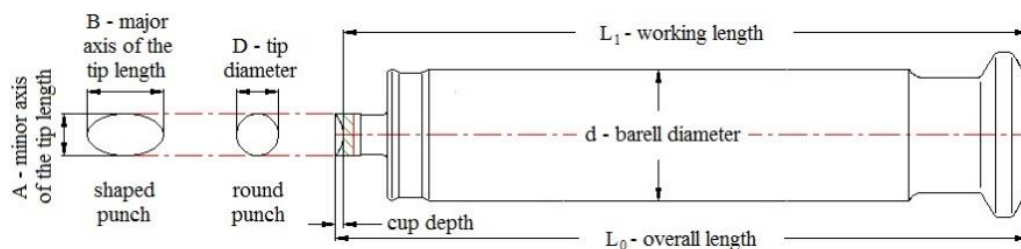
wymiarowaniu kilkuset narzędzi dziennie, stanowiło ogromne wyzwanie dla działu kontroli jakości. Przyczyn braku automatyzacji tego procesu było co najmniej kilka. Po pierwsze istnieje nieskończona ilość geometrycznych form dla czoła stempla (rys. 1.1). Ponadto występują one w wersjach z pojedynczym czołem prasującym *single-tip* lub wielokrotnym *multi-tip* (dwu-, trzy-, cztero- ... dwudziestokrotnym). Dodatkowo istnieje na świecie ponad 10 norm stempli, które definiują ich kluczową geometrię. Problemem jest również powierzchnia narzędzi, która jest nieregularna i ekstremalnie refleksyjna, co wyklucza możliwość stosowania bezdotykowych czujników triangulacyjnych opartych o światło lasera.



Rys. 1.1 Przykłady czoła stempli formujących (single-tip).

Źródło: Adamus S.A.

W opracowaniu teoretycznym pt. „Koncepcja urządzenia do bezdotykowej metody wymiarowania stempli dla stanowiska kontroli jakości” zaprezentowałem w roku 2011 podstawy teoretyczne i konstrukcyjne automatycznego urządzenia pomiarowego. Docelowy system miał być zdolny do automatycznego pomiaru wszystkich kluczowych parametrów geometrycznych stempli jednokrotnych (rys. 1.2), niezależnie od normy i postaci czoła stempla.

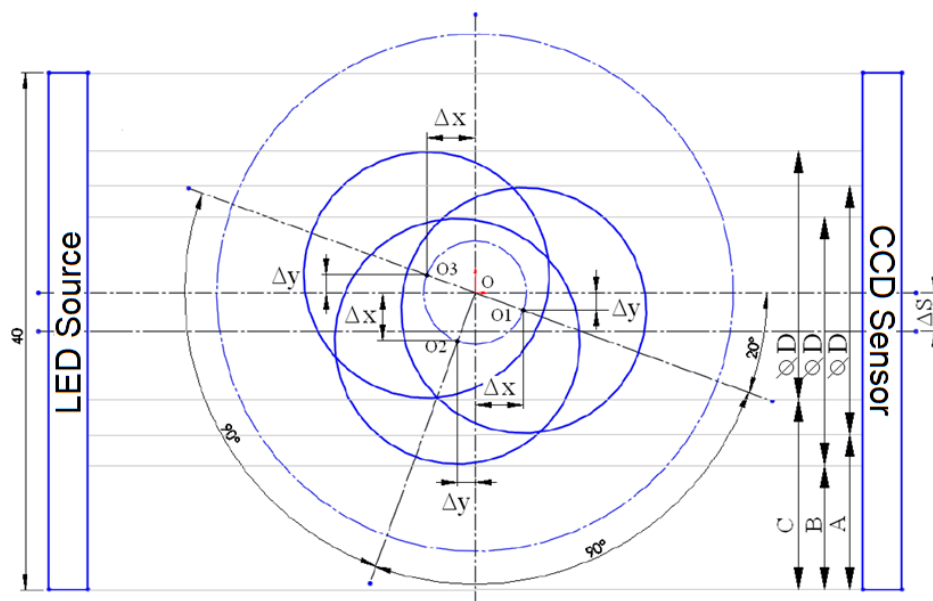


Rys. 1.2 Kluczowe parametry geometryczne stempla.

Źródło: Własne.

Podstawą do rozwiązania problemu stały się najnowsze osiągnięcia w dziedzinie bezdotykowego wymiarowania mikrometrycznego, w kombinacji z pięcioma stopniami swobody ruchu. Kluczowy był jednak sposób pomiaru minimum czoła stempla, w połączeniu z metodą jego wcześniejszego osiowania. W koncepcji zaproponowano

zastosowanie mikrometru optycznego optoCONTROL 2600 oraz czujnika konfokalnego confocalDT 2401. Obydwa czujniki były nowymi technologiami lidera na rynku pomiarów mikrometrycznych, firmy Micro-Epsilon. Mikrometr odpowiedzialny był za pomiary średnic, ale również za wyznaczanie pozycji rantów w procesach osiowania oraz poszukiwania łysinki stempla dla wyznaczenia wysokości całkowitej. Obydwa czujniki poruszane były w osi Z, dodatkowo zastosowano stół mikrometryczny z trzema stopniami swobody, pozwalający na przemieszczenia translacyjne XY oraz rotację. Po włożeniu przez operatora stempla do maszyny pomiarowej proces rozpoczyna się od jego osiowania. Zaproponowano tutaj metodę, która kompensuje wpływ braku kalibracji mikrometru optycznego (rys. 1.3). Dzięki trzem dziewięćdziesięciostopniowym ruchom z pomiarem rantu oraz dwóm równaniom matematycznych, możliwe jest wyrugowanie błędu mikrometru optycznego Δs oraz wyznaczenie przesunięć stempla Δx i Δy względem osi obrotu stołu.



Rys. 1.3 Sposób osiowania stempla za pomocą mikrometru optycznego bez konieczności jego wcześniejszej kalibracji.

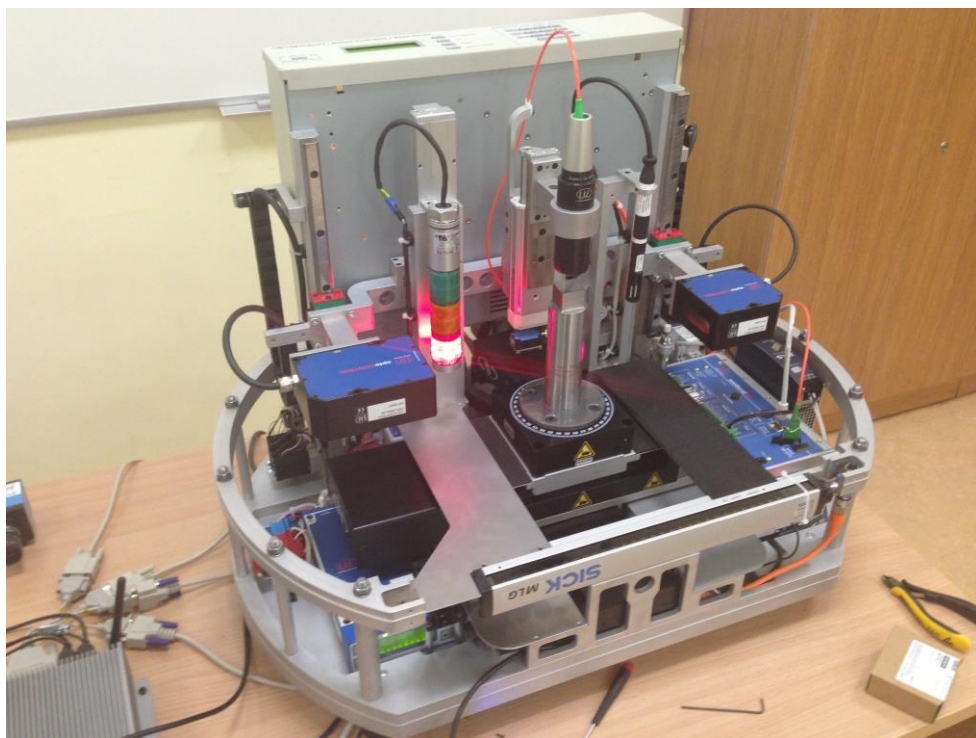
Źródło: Własne.

Również w osi obrotu stołu zainstalowany i kalibrowany był czujnik konfokalny. Czujnik ten jest spektrometrem, który wykazuje szczególną odporność na refleksy wywołane odbiciami zakrzywionych powierzchni. I tutaj pojawia się jedna z kluczowych idei wyznaczenia głębokości stempla, która zgodnie z definicją jest najniższym punktem jego czoła. Położenie tego punktu x_{min} , y_{min} od osi obrotu stempla jest technologicznie dobrze znane. Poruszając się zatem z wiązką pomiarową o średnicy

25 μ m, w interpolacji kołowej ze znanym promieniem i rejestrując kilkaset pomiarów na sekundę, możliwe jest wyodrębnienie zmierzonej wysokości minimalnej, która jest poszukiwanym parametrem. Idea to otworzyła drogę do automatyzacji wymiarowania stempli o dowolnej formie czoła i stała się podstawą patentu:

- **Osypiuk R.:** *Sposób wymiarowania oraz urządzenie do wymiarowania*, data zgłoszenia: 2013-01-09, numer zgłoszenia: 402396, urząd patentowy: UPRP, data ogłoszenia: 2016-12-30, numer prawa: 224239.

Tuż po przedstawieniu koncepcji w dniu 31.03.2012, firma Adamus HT zdecydowała o budowie prototypu urządzenia. Plan był bardzo ambitny i zakładał prezentację działającego systemu na największych targach przemysłu farmaceutycznego w Europie,ACHEMA, 18-22 czerwiec 2012, Frankfurt Main. Byłem wówczas pomysłodawcą, projektantem sprzętu i oprogramowania, konstruktorem i wykonawcą finalnego urządzenia w jednej osobie.

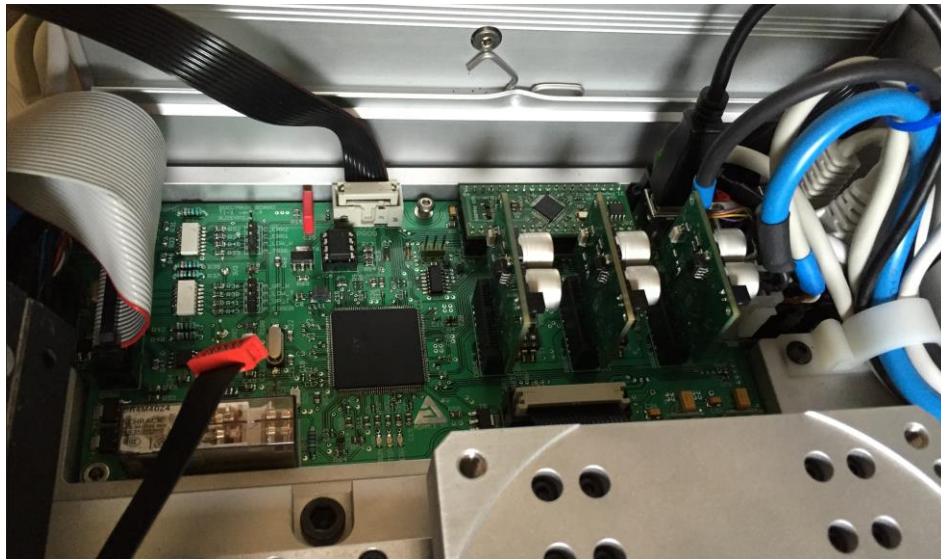


Rys. 1.4 Widok wnętrza maszyny pomiarowej Pi-1, faza budowy prototypu.

Źródło: Własne.

Prototyp urządzenia działał tak stabilnie, że już podczas pierwszej prezentacji na targachACHEMA, firma otrzymała dziewięć wstępnych zamówień. Rozpoczął się tym samym proces komercjalizacji systemu, w którym aktywnie uczestniczyłem. Pi-1 zaprezentowano również na targach: 4-5 październik 2012, INTERPHEX PUERTO RICO, San Juan, USA, oraz 23-25 kwiecień 2013, INTERPHEX, New York, USA. Za

opracowanie systemu pomiarowego otrzymałem w 2013 roku I nagrodę Prezydenta Miasta Szczecin, za najlepszą pracę naukową z zastosowaniem komercyjnym. Zamknięta architektura sterowania Pi-1 oraz niezwykle kosztowne napędy dla mikrometrycznej podstawy ruchomej o trzech stopniach swobody skłoniły do rozpoczęcia prac nad nowym systemem pomiarowym. Miał on być zdolny do wymiarowania również stempli wielokrotnych oraz matryc, wraz z możliwością ich profilowania. To wszystko przy jednoczesnym zredukowaniu kosztów budowy urządzenia. Osiągnięcie tego celu wymagało zaprojektowania dedykowanego kontrolera dla obsługi sensorów i aktuatorów (pracujących również w synchronizmie), zaprojektowania i wykonania mikrometrycznych napędów dla trzech stopni swobody (działających w pętli otwartej), dodania autorskiego systemu wizyjnego oraz opracowania metody profilowania matryc. Tak duże zmiany rzutowały na geometrię wielu wewnętrznych komponentów mechanicznych, jednak forma zewnętrzna maszyny uległa tylko niewielkiej zmianie. Przede wszystkim zrezygnowano z komputera przemysłowego, który zastąpiony został przez dedykowany sterownik, zbudowany w oparciu o 32-bitowy mikrokontroler, wraz z trzema drajwerami dla nowo powstałych napędów mikrometrycznych (rys. 1.5).

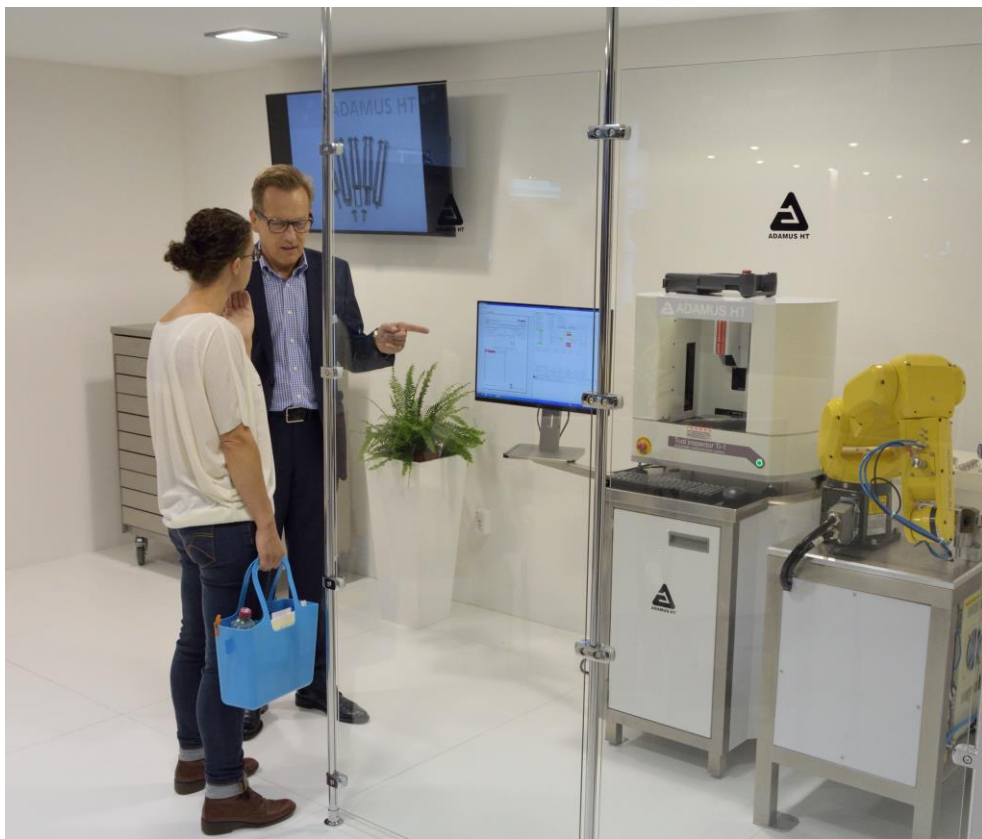


Rys. 1.5 Widok dedykowanego sterownia dla nowej maszyny Ti-1.

Źródło: Własne.

Zaprojektowany przeze mnie hardware obsługiwał ponad 10 interfejsów (USB, BiSS, RS232, RS422, RS485, itd.) niektóre z nich pracujące w czasie rzeczywistym, w synchronizmie. W jego konstrukcji pomógł mi Mateusz Spychała (wówczas student Wydziału Elektrycznego ZUT). Był on odpowiedzialny za firmware sterownika oraz za

modyfikacje oprogramowania PC. Nowa maszyna pomiarowa Ti-1 miała zostać ponownie zaprezentowana na prestiżowych targachACHEMA. Zostałem wówczas poproszony o przygotowanie działającego demonstratora, który pokazałby w pełni zrobotyzowany proces. Dokonałem wówczas sprzętowej i programowej integracji robota FANUC LR Mate 200iD z maszyną Ti-1. Było to możliwe również dzięki nowo zaprojektowanej otwartej architekturze sterowania Ti-1. Ostatecznie 15-19 czerwca 2015, podczas targówACHEMA, Frankfurt (Main), zaprezentowano nowy system z opcją robotyzacji (rys. 1.6).



Rys. 1.6ACHEMA'2015 - Prezentacja nowej maszyny Ti-1 wraz z robotem FANUC.

Źródło: Adamus HT.

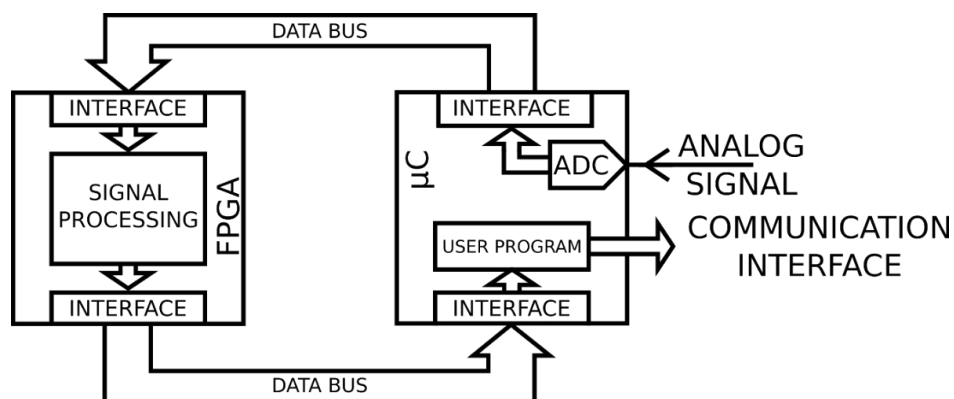
Rok później na zaproszenie Ambasady RP w Berlinie, Ti-1 reprezentował Polskę na stanowisku ARP podczas międzynarodowych targów przemysłu Hannover Messe, 25-29 kwietnia 2016. Do dzisiejszego dnia maszyna pomiarowa doczekała się dwóch nieznaczących modyfikacji, pierwsza dotyczyła oprogramowania (Ti-2), w której uczestniczyłem. Druga natomiast (Ti-3) rozszerzyła funkcjonalność maszyny o wbudowany czytnik kodów kreskowych (w tych działaniach nie brałem udziału). System prezentowany był dotychczas na ponad dwudziestu wystawach międzynarodowych i pracuje w największych firmach farmaceutycznych na całym

świecie (m.in. Polpharma – Polska, La Roche – Szwajcaria, Techni Rasch – Meksyk, Anovis – Brazylia, Abbvie – Puerto Rico, Clariant – Niemcy, Gedeon Richter – Węgry, Teva – Czechy, Lek – Słowenia, Accino, Darnica – Ukraina, itd.). Ponieważ urządzenie znajduje się nadal w ofercie firmy Adamus S.A., na stronie producenta można znaleźć wiele dodatkowych informacji ([link](#)), włącznie z prezentacją wideo ([link](#)).

2. Systemy mikro-awioniki dla bezzałogowych statków powietrznych

Tuż po zakończeniu mojej intensywnej współpracy z firmą Adamus HT, wróciłem do realizacji pomysłów, którym w dorywczy sposób poświęcałem swój czas od roku 2010. W tym okresie media donosiły o coraz częstszych przypadkach niebezpiecznych zbliżeń bezzałogowych statków powietrznych (potocznie nazywanych dronami) do dużych załogowych samolotów komunikacyjnych. FAA (Federal Aviation Administration) raportuje do 150 naruszeń separacji na miesiąc (tylko w USA), co daje wskaźnik x10 względem roku 2014. Na przestrzeni ostatnich lat próbowano poradzić sobie z tym problemem w sposób czysto prawny. Niestety podejście to nie przyniosło oczekiwanych rezultatów i sięgnięto po rozwiązania systemowe. Pod tą nazwą kryją się technologie lotnicze, które gwarantują zachowanie bezpiecznej separacji w przestrzeni powietrznej. Wspomniane rozwiązania systemowe miałyby pełnić dokładnie tę samą antykolidyjną rolę tj. zapewnić bezpieczną koegzystencję załogowego i bezzałogowego lotnictwa. Szkopuł w tym, że ich bezpośrednia adaptacja do techniki bezzałogowej jest niemożliwa i wynika głównie z gabarytów, masy i poboru energii lotniczych systemów. Konieczna była pilna miniaturyzacja awioniki i to w taki sposób, aby jej obecność na dronie była prawie niezauważalna. W roku 2015 kontynuowałem współpracę z moim studentem Mateuszem Spychałą i zaciekałem go nową tematyką. Podział zadań między nami był podobny, a jego wkład obejmował głównie działania nad firmware-em. Przygotowaliśmy trzy prototypy, które na powierzchni kilku cm² integrowały lotniczy system ADS-B (Automatic Dependent Surveillance–Broadcast) oraz GNSS (Global Navigation Satellite Systems). Kiedy autorytety z przemysłu lotniczego informowały, że niemożliwe jest zminiaturyzowanie systemu ADS-B do wymaganej skali, my prezentowaliśmy pierwsze prototypy podczas międzynarodowych targów lotniczych ILA Berlin Air Show, 1-4 czerwca, 2016. Jeszcze w tym samym roku nasze rozwiązania zostają nagrodzone w Madrycie, w międzynarodowym konkursie nawigacji satelitarnych ESNC (European Satellite Navigation Competition). Zdobywamy trzy

nagrody: I miejsce Poland Challenge, II miejsce UAV Challenge, Xunta de Galicia oraz Nagrodę Specjalną Polskiej Agencji Kosmicznej. Wydarzenia te odbiły się szerokim echem w mediach, co zwróciło uwagę potencjalnych inwestorów. W dniu 22.03.2017 następuje przeniesienie praw autorskich, a miesiąc później zostaje zarejestrowana firma Aerobits Sp. z o.o., której jestem współzałożycielem i członkiem zarządu. Nasza technologia zostaje wybrana przez SciTech, (działając z ramienia MNiSW) i reprezentuje Polskę podczas międzynarodowych targów przemysłu Hannover Messe, 24-28 kwietnia 2017. Kilka miesięcy później Aerobits Sp. z o.o. staje się beneficjentem prestiżowego programu Komisji Europejskiej, SME phase I. Opracowane na Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie prototypy ADS-B nie charakteryzowały się imponującą czułością wejściową i konieczne było przełomowe rozwiązanie, które ostatecznie pozwoliłoby na komercjalizację wynalazku. Do dzisiejszego dnia systemy radiowe (łącznie z nowoczesną technologią SDR) projektowane są w konwencjonalny sposób i łączą w swojej strukturze trzy dyskretne komponenty: szybki przetwornik ADC, układ FPGA oraz mikrokontroler. Chcieliśmy pozbyć się zewnętrznego ADC, który w procesie miniaturyzacji okazał się silnym źródłem zakłóceń. Wpadłem wówczas na pomysł fuzji mikrokontrolera wyposażonego w szybki przetwornik ADC z układem FPGA. System lotniczy ADS-B dekodowany jest dwuetapowo, z czego pierwszy etap do postaci HEX wymaga szczególnie dużych zasobów obliczeniowych. Drugi etap dekodowania do postaci ASCII nie jest już tak wymagający. Zaproponowałem wówczas strukturę dwuelementową jak na rys. 2.1.



Rys. 2.1 Poglądowy schemat przepływu danych w proponowanej strukturze.

Źródło: Własne.

Główna idea polegała na zastosowaniu mikrokontrolera z wbudowanym super szybkim ADC (ok 20MS/s). Próbki z przetwornika były bezpośrednio transportowane przez bardzo wydajny interfejs QSPI (Quad Serial Peripheral Interface) i poddawane

dekodowaniu do postaci HEX. Następnie wolniejszym interfejsem SPI były one przesyłane powrotnie do mikrokontrolera, gdzie zachodził drugi etap dekodowania ramek ADS-B. Podejście to pozwoliło uzyskać nieosiągalną do tej pory skalę miniaturyzacji, przy jednoczesnym zapewnieniu niskiego tła szumów, którego redukcja bezpośrednio przełożyła się na wyśmienitą czułość odbiornika. Wynalazek stanowi rdzeń technologiczny firmy i został opatentowany w Stanach Zjednoczonych oraz krajach Unii Europejskiej:

- **Osypiuk R.**, Spychała M.: *A method for real time processing of fast analogue signals and a system for application thereof*, data zgłoszenia: 2018-04-13, numer zgłoszenia: 15953325, urząd patentowy: OECD US, numer zgłoszenia: 18167273, urząd patentowy: EPO, data ogłoszenia: 2019-03-05, numer prawa: 10224945 (US), data ogłoszenia: 2022-11-09, numer prawa: 3392767 (EPO).

Równolegle pracowaliśmy nad systemem świetlnego ostrzegania, który działa w sprzężeniu z systemem ADS-B. Załogowe statki powietrzne wyposażone są w stroboskopowe światła antykolizyjne, które pracują od momentu uruchomienia silnika. Podejście to w bezzałogowych statkach powietrznych wydawało się niewłaściwe. Zaproponowałem wówczas aby aktywowanie świetlnego ostrzegania było uzależnione od poziomu ryzyka kolizji. Przy czym źródłem danych miał być właśnie system ADS-B. Powyższa idea została również opatentowana w Stanach Zjednoczonych oraz krajach Unii Europejskiej:

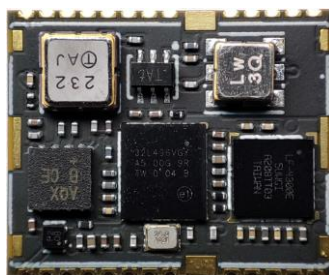
- **Osypiuk R.**, Spychała M.: *A method for controlling warning lights of an unmanned aerial vehicle and a system for application thereof*, data zgłoszenia: 2018-04-13, numer zgłoszenia: 15953325, urząd patentowy: OECD US, numer zgłoszenia: 18167280, urząd patentowy: EPO, data ogłoszenia: 2020-10-06, numer prawa: 10793287 (US), data ogłoszenia: 2019-12-11, numer prawa: 3393214 (EPO).

Aby minimalizować finansowe obciążenie młodej firmy procesem patentowania, współpracowałem w przygotowaniu wniosku w Programie Operacyjnym Inteligentny Rozwój, poddziałanie 2.3.4 – ochrona własności przemysłowej. Grant POIR.02.03.04-32-0001/17 dofinansował ten proces w 50%. Aby doświadczyć skali miniaturyzacji naszych rozwiązań warto zapoznać się z rodziną modułów OEM, które oferują obecnie różne technologie lotnicze oraz ich fuzje:

- ADS-B (Automatic Dependent Surveillance–Broadcast) - 1090MHz
- UAT (Universal Access Transceiver) - 978MHz

- FLARM - 868MHz, 915MHz
- Remote ID - 2.4GHz

Implementacje pojedynczych systemów komunikacji ADS-B/Remote-ID mają powierzchnię 208mm², która jest równa powierzchni monety 1 Eurocent. Należy tutaj podkreślić, że zastosowanie opatentowanej technologii, gwarantuje bezkompromisowe szybkości przetwarzania sygnałów, umożliwiając dekodowanie pełnego pasma tj. do 6000 obiektów/sekundę z czułością wejściową -85dBm i zasięgiem działania systemu w promieniu 300km. Na rys. 2.2 pokazane jest wnętrze przykładowego odbiornika ADS-B, zbudowanego zgodnie z opatentowaną technologią. Jest to obecnie najmniejsza implementacja na świecie, spełniająca restrykcyjne wymogi lotnicze i certyfikowana m.in. normą: ETSI EN 303 213-5-1.



Rys. 2.2 TT-SC1A – odbiornik ADS-B o wymiarach 16x13mm. Obwód 6-cio warstwowy, wykonany w technologii HDI.

Źródło: Własne.

W roku 2019 byłem pomysłodawcą projektu: *Element warstwy fizycznej technologii DAA (detekcji i unikania) dla bezpiecznej integracji BSP w niesegregowaną przestrzeń powietrzną*, NCBiR, Program Operacyjny Inteligentny Rozwój (INNOSBZ), krajowy projekt badawczo-rozwojowy (POIR.01.02.00-00-0232/17). Działalem w roli kierownika projektu i intensywnie współpracowałem nad wytworzeniem prototypów sub-systemów oraz projektowaniu finalnego produktu tj. miniaturowego interrogatora, działającego na zasadzie lotniczego radaru wtórnego. System pozwala poruszać się bezzałogowym statkom powietrznym w przestrzeni niekontrolowanej G (TMZ) i identyfikować ruch załogowy w promieniu ponad 10km. Projekt znajduje się w końcowej fazie komercjalizacji, a po raz pierwszy zaprezentowany został na międzynarodowych targach lotniczych ILA 22-26 czerwca 2022. Jest to obecnie najmniejszy na świecie interrogator i pierwsze urządzenie awioniczne, wykorzystujące technologię GaN w sekcji radiowej. Również w roku 2019 nawiązana została współpraca z firmą Droniq GmbH, będąca spółką zależną DFS (Deutsche

Flugsicherung) i Deutsche Telecom. Zgodnie z kontraktem, w przeciągu zaledwie kilku miesięcy powstał pierwszy i do dzisiaj najbardziej zaawansowany tracker lotniczy. Jest on obecnie stosowany w operacjach bezzałogowych przez różne służby niemieckie m.in. policję. Hardware opracowany przeze mnie, integrował w sobie odbiornik ADS-B, transceiver FLARM, odbiornik multi-GNSS oraz moduł szyfrowanej transmisji LTE Cat. 1.



Rys. 2.3 HOD (Hook-On-Device) zaprojektowany dla niemieckiej kontroli ruchu lotniczego DFS oraz Deutsche Telecom.

Źródło: Droniq GmbH.

Moja współpraca z DFS i technologia wytworzona przez Aerobits wpłynęła na formę standardu lotniczego EASA NPA 2021-14, którego celem jest zapewnienie wysokiego poziomu bezpieczeństwa operacji bezzałogowych i załogowych statków powietrznych w przestrzeni powietrznej U-Space. W sekcji dotyczącej tzw. widoczności elektronicznej (electronic conspicuity), zaprojektowany HOD wypełnia 90% oczekiwań nowego standardu. W roku 2021 byłem pomysłodawcą projektu: *Sub-miniaturowy system identyfikacji elektronicznej dla bezzałogowych statków powietrznych*, Regionalny Program Operacyjny Województwa Zachodniopomorskiego na lata 2014-2020, krajowy projekt badawczo-rozwojowy (RPZP.01.01.00-32-0006/21-00). W projekcie realizowanym do końca 2023 działałem w roli głównego inżyniera, projektując i rozwijając nowe, certyfikowane moduły komunikacji radiowej dla technologii ADS-B/FLARM/UAT/Remote ID/GNSS. Ponadto projektuję również hardware dla finalnego systemu, który obok wymienionych standardów wyposażony zostanie w komunikację LTE Cat. 1. System o masie 50g będzie najmniejszym na rynku, aktywnym trackerem lotniczym, do zastosowań w niewielkich bezzałogowych statkach

powietrznych, zgodnie ze standardem EUROCAE ED-282 oraz EASA NPA 2021-14. Projekt znajduje się w końcowej fazie, polegającej na procesie certyfikacji sub-modułów (ETSI/EMC/EMI/ESD) i ich łączenia w docelowy system. Aerobits Sp z o.o. ma obecnie ponad 350 klientów z 50 krajów. Od pierwszego roku istnienia jesteśmy firmą rentowną ze stałym wzrostem 30% r/r i obecnie 17-sto osobowym zespołem. W naszej ofercie znajdują się trzy grupy produktowe: moduły OEM, urządzenia typu plug&play oraz systemy infrastruktury naziemnej. Te ostatnie pozwalają na budowanie naziemnych sieci odbiorczych do dozoru załogowego i bezzałogowego ruchu lotniczego i są obecnie wdrażane w Niemczech (Droniq, DFS) i w Polsce (Polska Agencja Żeglugi Powietrznej). Każdy komercyjny produkt, dostępny na stronie www.aerobits.pl powstał z mojej inicjatywy i miał swój początek w prowadzonym przeze mnie procesie prototypowania. Rozwijane przez nas technologie nie doczekały się konkurencji w Europie. Wyjątkiem jest firma uAvionix z siedzibą w Palo Alto (USA). Powstała ona w tym samym okresie co Aerobits, jednak z finansowym wsparciem firmy Airbus.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

Moją wieloletnią współpracę zagraniczną zainicjowałem w roku 2000 dwutygodniowy staż na Technische Universität Braunschweig w ramach projektu TEMPUS. Poznałem wówczas dyrektora Institut für Robotik und Prozessinformatik Prof. Dr.-Ing Friedrich M. Wahl, jego zespół naukowców oraz zapoznałem się z infrastrukturą laboratorium robotyki. Byłem wówczas na wczesnym etapie mojej kariery zawodowej i poszukiwałem możliwości praktycznej weryfikacji układów sterowania bazujących na modelu. Otrzymałem pisemne zaproszenie od dyrektora instytutu, które było podstawą do złożenia wniosku o stypendium DAAD (German Academic Exchange Service). W latach 2001-2002 spędziłem 13 miesięcy w jednostce goszczącej, realizując implementację układów sterowania na dwuczłonowym robocie eksperymentalnym EDDA. Wyniki tych prac przedstawione zostały w publikacji:

- **Osypiuk R., Finkemeyer B., Wahl F.:** *Forward-model-based control system for robot manipulators*, Robotica, Cambridge University Press, vol. 22, no. 2, pp. 155-161, 2004, doi: 10.1017/S0263574703005459.

W roku 2004 prowadziłem projekt badawczy współfinansowany przez DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) oraz KBN (Komitet Badań Naukowych) w ramach grantu promotorskiego nr 3T11A00926. Mój sześciomiesięczny pobyt w Institut für Robotik und Prozessinformatik na TU Braunschweig pozwolił na kontynuację badań eksperymentalnych. Tym razem walidacji poddana została moja nowa koncepcja sterowania wielopętlowego, która stała się rdzeniem pracy doktorskiej. Efekty tych działań zaprezentowano m.in. w publikacji:

- **Osypiuk R.**, Finkemeyer B., Wahl F.: *Multi-loop Model Based Control Structure for Robot Manipulators*, Robotica, Cambridge University Press, vol. 23, no. 4, pp. 491-499, 2005, doi: 10.1017/S0263574704001043.

W roku 2006 uzyskałem ponownie stypendium DAAD i w okresie trzech miesięcy prowadziłem prace badawcze. Pracowałem wówczas nad modyfikacjami dwupętlowych struktur sterowania. Jednocześnie zapoznawałem się z zagadnieniem sterowania siłą w robotyce i wymaganiami dla otoczenia eksperymentalnego. Dokonałem wówczas pierwszych implementacji hybrydowego systemu, które łączyło w sobie odporne pętle sterowania położeniem i siłą. Prace te zaowocowały poniższymi publikacjami:

- **Osypiuk R.**, Finkemeyer B., Skoczowski S.: *A Simple Two Degree of Freedom Structures and their Properties*, Robotica, Cambridge University Press, vol. 24, no. 3, pp. 365-372, 2006, doi: 10.1017/S0263574705002286.
- **Osypiuk R.**, Finkemeyer B.: *Hybrid Model Based Force-Position Control: Theory and Experimental Verification*, Robotica, Cambridge University Press, vol. 24, no. 6, pp. 775-783, 2006, doi: 10.1017/S0263574706002967.

W roku 2008 stałem się beneficjentem grantu MNiSW *Wsparcie międzynarodowej mobilności naukowców* (nr 212/MOB/2008/0), uzyskując finansowanie na dwudziestomiesięczny pobyt w Institut für Robotik und Prozessinformatik na TU Braunschweig. Tematem projektu były: *Efektywne systemy sterowania siłą i momentem dla manipulatorów przemysłowych o 6-ciu stopniach swobody*. Kontynuowałem wówczas moje prace badawcze nad odpornymi układami sterowania. Zaproponowałem zastosowanie aktuatorów podatnych do poprawy efektywności sterowania siłowego i przeprowadziłem proces ich projektowania, budowy oraz walidacji eksperymentalnej. W wyniku tych działań powstały m.in. prace:

- **Osypiuk R.:** *Hexa Platform as Active Environment System, Robot Motion and Control*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp381-390, 2009, doi: 10.1007/978-1-84882-985-5_35.
- **Osypiuk R., Kröger T:** *A Three-Loop Model-Following Control Structure: Theory and Implementation*, International Journal of Control, vol. 83, no. 1, pp. 97-104, 2009, doi: 10.1080/00207170903100230.
- **Osypiuk R.:** *Simple Robust Control Structures Based on the Model-Following Concept - A Theoretical Analysis*, International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 20, no. 17, pp. 1920-1929, 2010, doi: 10.1002/rnc.1556.
- **Osypiuk R., Kröger T.:** *Parallel Stiffness Actuators with Six Degrees of Freedom for Efficient Force/Torque Control Applications*, Springer Tracts in Advanced Robotics, pp. 275-291, 2010, doi: 10.1007/978-3-642-16785-0_16.

W roku 2011 uzyskałem dofinansowanie z programu Staff Training Mobility, LLP Erasmus, na odbycie miesięcznego stażu w Institut für Robotik und Prozessinformatik na TU Braunschweig. Celem było przeprowadzenie badań eksperymentalnych dynamiki komercyjnych czujników momentów i sił. Stosowane w nich konwencjonalne metody filtracji pogarszały ich parametry dynamiczne. Zaproponowano wówczas zastosowanie filtrów parametrycznych, które istotnie poprawiły stany przejściowe. Wykazano w ten sposób sens stosowania proponowanych filtrów, zwłaszcza w momencie krytycznego nawiązania kontaktu robota z otoczeniem. Prace badawcze przyczyniły się do powstania publikacji:

- **Osypiuk R., Piskorowski J., Kubus D.:** *A method of improving the dynamic response of 3D force/torque sensors*, Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 68, pp. 366–377, 2016, doi: 10.1016/j.ymsp.2015.07.
- Okoniewski P., **Osypiuk R., Piskorowski J.:** *Short-transient discrete time-variant filter dedicated for correction of the dynamic response of force/torque sensors*, Electronics, 9, 2020, doi: 10.3390/electronics9081291.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

Od roku 2000 jestem odpowiedzialny za proces nauczania robotyki na kierunku *Automatyka i robotyka*. Prowadzę aktualnie sześć przedmiotów w języku polskim oraz jeden w języku angielskim (ERASMUS). Zajęcia praktyczne odbywają się na

zaprojektowanych i uruchomionych przeze mnie stanowiskach laboratoryjnych. Ich przygotowanie było wieloetapowym procesem, rozpoczynającym się od zdobycia finansowania. Projekty obejmowały szeroko rozumiane zagadnienia z mechaniki, elektrotechniki, elektroniki i programowania. W ten sposób wyposażone zostały trzy sale laboratoryjne: *Manipulatory przemysłowe*, *Roboty mobilne* oraz *Laboratorium sterowników programowalnych PLC*. Od roku 2011 jestem opiekunem koła naukowego *SARIS (Smart Autonomous Robots and Intelligent Systems)*. Prowadziłem ze studentami różne projekty interdyscyplinarne, które były wielokrotnie nagradzane i wyróżniane. Przykładowo w latach 2014-2018 *SARIS* pięciokrotnie zdobywał I miejsce w ogólnopolskich sesjach i konferencjach kół naukowych. Ponadto byłem promotorem kilkudziesięciu prac inżynierskich i magisterskich, które uzyskiwały nagrody Dziekana WE, jak i również ogólnopolskie:

- I miejsce w Ogólnopolskim Konkursie Siemens, nagroda za najlepszą pracę dyplomową, Świątek-Brzeziński P., Kosiński P.: *Integracja zaawansowanych sensorów z konstrukcją robota humanoidalnego*, 2011.
- Nagroda główna PIAP (Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów), IX Ogólnopolski Konkurs Młodzi Innowacyjni, Spychała M.: *System oraz metody bezpiecznego współdzielenia przestrzeni powietrznej między załogowymi i bezałogowymi statkami powietrznymi*, 2017.
- Nagroda główna Prezydenta Miasta Szczecin, za najlepszą pracę dyplomową Spychała M.: *System oraz metody bezpiecznego współdzielenia przestrzeni powietrznej między załogowymi i bezałogowymi statkami powietrznymi*, 2017.

Podczas mojego stażu w roku 2007 byłem odpowiedzialny za współorganizację seminarium SFB562 *Robotic Systems for Handling and Assembly* na TU Braunschweig. Aktywnie uczestniczyłem w organizowaniu konferencji MMAR, *International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*. W szczególności byłem odpowiedzialny za organizację dwóch sesji tematycznych w latach 2010 i 2016. Od roku 2011 jestem członkiem Wydziałowej Komisji Programowej. W ramach tych działań modernizowane są siatki dydaktyczne dla kierunku Automatyka i robotyka, polegające m.in. na przygotowaniu nowych treści programowych. Dodatkowo w latach 2011-2016 pełniłem funkcję opiekuna praktyk.

Od początku mojej kariery zawodowej jestem aktywnie zaangażowany w działalność popularyzującą naukę. Średnio dwa razy do roku (z wyjątkiem okresu pandemii) współorganizuję dni otwarte na Wydziale Elektrycznym ZUT. Moje działania skupiają się głównie na prezentacji wyników prac badawczo-rozwojowych w laboratoriach robotyki. Ponadto od kilku lat zaangażowany jestem w wykłady dla młodzieży szkół ponadgimnazjalnych, w ramach cyklu wykładów organizowanego przez Wydział Elektryczny ZUT w Szczecinie.

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

Staram się regularnie zwiększać swoje kompetencje przez uczestnictwo w rozmaitych szkoleniach. Większość z nich odbywa się na platformach on-line. W roku 2019 brałem jednak udział (z mojej inicjatywy) w kilkudniowym szkoleniu firmy Universal Robots w Gliwicach, uzyskując dwa certyfikaty: Certificate in Core Training, Certificate in Service and Troubleshooting Training. W roku 2022 podniosłem moje kwalifikacje z projektowania układów radiowych, w ramach kilkunastu szkoleń, na które zdobyłem dofinansowanie. Nie bez znaczenia, jest również moja licencja pilota PPL JAR-FCL, którą zrobiłem w roku 2011 w szkole latania Tollenseflug Flugschule GmbH w Neubrandenburg. Był to solidny fundament do rozpoczęcia nowego rozdziału w karierze zawodowej.

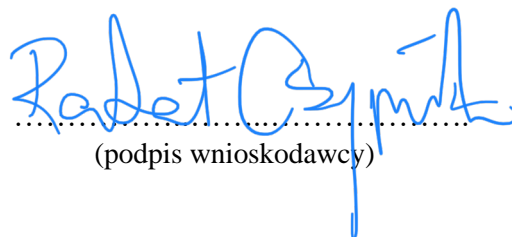
Stypendia i nagrody:

- Stypendium naukowe DAAD, 13 miesięcy, TU Braunschweig, 2001-2002
- Nagroda Rektora za osiągnięcia naukowe, I stopnia, 2005
- Stypendium naukowe DAAD, 3 miesiące, TU Braunschweig, 2006
- Nagroda Rektora za osiągnięcia naukowe, III stopnia 2007
- Nagroda Rektora za osiągnięcia naukowe, II stopnia, 2010
- Nagroda Prezydenta Miasta Szczecin za najlepszą pracę naukową z zastosowaniem komercyjnym, 2013
- Nagroda Rektora za osiągnięcia dydaktyczne, II stopnia, 2016
- Trzy nagrody w europejskim konkursie European Satellite Navigation Competition, I miejsce w konkursie Poland Challenge, II miejsce w konkursie UAV Challenge, Xunta de Galicia oraz Nagroda Specjalna Polskiej Agencji Kosmicznej, 2016

- Nagroda Rektora za osiągnięcia organizacyjne, III stopnia, 2017
- Nagroda Rektora za osiągnięcia dydaktyczne, II stopnia, 2018

Dane bibliometryczne:

Mój indeks Hirscha, wyliczony na podstawie 15 prac indeksowanych w bazie Web of Science, cytowanych łącznie 66 razy (37 bez autocytowań) wynosi obecnie 5. W przypadku bazy SCOPUS indeks ten wynosi 7 dla 17 pozycji zacytowanych łącznie 88 razy (55 bez autocytowań), natomiast w przypadku bazy Google Scholar mój indeks Hirscha, wyliczony na podstawie 31 indeksowanych artykułów, cytowanych łącznie 173 razy, wynosi 8. Mój sumaryczny Impact Factor wynosi obecnie 13.68 (w tym po złożeniu pracy doktorskiej 13.28).



.....
(podpis wnioskodawcy)