dr inż. Paweł Dworak
Katedra Automatyki Przemysłowej i Robotyki
Wydział Elektryczny
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Szczecin, dnia 14.10.2015r.

AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko: **Paweł Dworak**

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

   1999 – tytuł magistra inżyniera automatyki i robotyki; absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Szczecińskiej; praca pt. „Nieostre samonastrajanie regulatora PID", promotor dr inż. Bogdan Broel-Plater.

   2005 – stopień naukowy doktora nauk technicznych w dyscyplinie automatyka i robotyka, Wydział Elektryczny Politechniki Szczecińskiej; praca pt. „Dynamiczne odsprzęganie wielowymiarowych obiektów o jednakowej i niejednakowej liczbie wejść i wyjść, w ujęciu wielomianowym"; promotor: dr hab. inż. Stanisław Bańka, recenzenci: dr hab. inż. Andrzej Dzieliński, Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska, dr hab. inż. Zbigniew Emirsajłow, Wydział Elektryczny, Politechnika Szczecińska.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych

   1998–1999 – asystent stażysta w Zakładzie Automatyki Instytutu Automatyki Przemysłowej Politechniki Szczecińskiej (IAP PS)

   1999–2006 – asystent w Zakładzie Automatyki Instytutu Automatyki Przemysłowej Politechniki Szczecińskiej

   od 2006 – adiunkt w Zakładzie Automatyki IAP PS (aktualnie Katedra Automatyki Przemysłowej i Robotyki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie – KAPiR ZUT)

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust 2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65, poz. 595 ze zm.)

   A) tytuł osiągnięcia naukowego
   Algorytmy syntezy i implementacji układów sterowania liniowymi i nieliniowymi obiektami dynamicznymi o wielu wejściach i wielu wyjściach

   B) osiągnięcie naukowe – monografia oraz jednotematyczny cykl publikacji naukowych

   Monografia:

   1. **Paweł Dworak**: *Wybrane problemy syntezy układów sterowania obiektami dynamicznymi o wielu wejściach i wielu wyjściach*, Wydawnictwo Uczelniane ZUT w Szczecinie, 2015

Cykl publikacji:

2. Stanisław Bańka, **Paweł Dworak**, Krzysztof Jaroszewski: *Design of a multivariable neural-controller for control of a nonlinear MIMO plant*, International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, vol. 24, no. 2, 357-369, 2014. // **czasopismo z bazy JCR, IF = 1,227, lista A MNiSW – 25 pkt., artykuł indeksowany w bazach: *Web of Science*, *SCOPUS***

   *Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na sformułowaniu problemu, dyskusji koncepcji pracy, udziale w analizie teoretycznej opisywanych zagadnień, przygotowaniu stanowiska laboratoryjnego przeprowadzeniu eksperymentów oraz udziale w sformułowaniu wniosków. Mój udział procentowy szacuję na **50%**.*

3. **Paweł Dworak**: *A type of fuzzy T-S controller for a nonlinear MIMO dynamic plant*, Elektronika Ir Elektrotechnika, vol. 20, no. 5, 8-14, 2014. // **czasopismo z bazy JCR, IF = 0,561, lista A MNiSW – 15 pkt., artykuł indeksowany w bazach: *Web of Science*, *SCOPUS***

4. **Paweł Dworak**: *Squaring down plant model and I/O grouping strategies for a dynamic decoupling of left-invertible MIMO plants*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, vol. 62, no. 3, 471-479, 2014. // **czasopismo z bazy JCR, IF = 0,980, lista A MNiSW – 25 pkt., artykuł indeksowany w bazach: *Web of Science*, *SCOPUS***

5. **Paweł Dworak**, Michał Brasel: *Improving quality of regulation of a nonlinear MIMO dynamic plant*, Elektronika Ir Elektrotechnika, vol. 19, no. 7, 3-6, 2013. // **czasopismo z bazy JCR, IF = 0,445, lista A MNiSW – 15 pkt., artykuł indeksowany w bazach: *Web of Science*, *SCOPUS***

   *Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na sformułowaniu problemu, dyskusji koncepcji pracy, udziale w analizie teoretycznej opisywanych zagadnień, syntezie badanych regulatorów, przygotowaniu i przeprowadzeniu symulacji, udziale w sformułowaniu wniosków. Mój udział procentowy szacuję na **70%**.*

6. Stanisław Bańka, **Paweł Dworak**, Krzysztof Jaroszewski: *Linear adaptive structure for control of a nonlinear MIMO dynamic plant*, International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, vol. 23, no. 1, 47-63, 2013. // **czasopismo z bazy JCR, IF = 1,390, lista A MNiSW – 25 pkt., artykuł indeksowany w bazach: *Web of Science*, *SCOPUS***

   *Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na sformułowaniu problemu, dyskusji koncepcji pracy, udziale w analizie teoretycznej opisywanych zagadnień, syntezie badanych regulatorów, przygotowaniu i przeprowadzeniu symulacji, udziale w sformułowaniu wniosków. Mój udział procentowy szacuję na **55%**.*

7. **Paweł Dworak**: *Dynamic decoupling of left-invertible MIMO LTI plants*, Archives of Control Sciences, vol. 21, no. 4, 443-459, 2011. // **artykuł indeksowany w bazie *SCOPUS*, lista MNiSW – 9 pkt.**

C) omówienie celu naukowego wyżej wymienionych prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Przedstawiony do oceny dorobek podsumowuje główny nurt badań z obszaru automatyki i robotyki, prowadzonych przeze mnie po obronie doktoratu, dotyczących w szczególności zagadnień związanych z syntezą regulatorów dla nieliniowych obiektów dynamicznych o wielu wejściach i wyjściach (MIMO).

Problematyką regulacji dynamicznymi obiektami MIMO zajmowałem się już w ramach rozprawy doktorskiej. Prace te dotyczyły wówczas dynamicznego odsprzęgania dla obiektów o jednakowej oraz większej liczbie wejść niż wyjść. Opracowane tam algorytmy dotyczyły obiektów liniowych co w praktyce inżynierskiej może okazać się niewystarczające do uzyskania skutecznej, i o wysokiej jakości, regulacji. Dlatego też badania rozpoczęte po obronie rozprawy doktorskiej skupiłem na poszukiwaniu sposobów podniesienia efektywności regulacji, syntezie regulatorów dla nieliniowych obiektów dynamicznych o wielu wejściach i wyjściach. Równocześnie kontynuowałem prace związane z rozwijaniem i analizą zagadnień dynamicznego odsprzęgania, w szczególności dla obiektów lewostronnie odwracalnych – o liczbie wyjść większej niż liczba wejść.

Prowadzone badania, poszukiwane sposoby syntezy regulatorów czy struktury układów regulacji nakierowałem od początku na prostotę realizacji, tj. syntezy regulatorów i układów regulacji oraz możliwość ich łatwej implementacji w przemysłowych urządzeniach automatyki. Wszystkie badane sposoby regulacji zostały docelowo przetestowane w pracy w reżimie czasu rzeczywistego bądź do sterowania parametrami pracy rzeczywistego urządzenia, bądź podczas eksperymentów typu „hardware-in-the-loop" z zastosowaniem narzędzi szybkiego prototypowania układów sterowania oraz przemysłowych, programowalnych urządzeń automatyki.

Pomimo rozwiązania w pracy doktorskiej problemu dynamicznego odsprzęgania dla obiektów dynamicznych o jednakowej liczbie wejść i wyjść oraz liczbie wejść większej od liczby wyjść obiektu kontynuowałem prace nad rozszerzeniem możliwości wykorzystania stworzonych tam algorytmów do odsprzęgania obiektów o liczbie wyjść większej niż liczbie wejść (lewostronnie odwracalnych). Opracowane algorytmy pozwalają, z jednej strony, na bezpośrednie wykorzystanie do sterowania tego typu obiektem, z drugiej zaś, dają możliwość rekonfiguracji układu sterowania, niezbędnej np. po uszkodzeniu obiektu sterowania i/lub urządzeń wykonawczych. Przykładowo, uszkodzenie urządzenia wykonawczego w układzie z regulatorem i obiektem o takiej samej liczbie wejść i wyjść powoduje nagłą utratę możliwości precyzyjnego sterowania każdym z wyjść obiektu.

Problemy te opisałem w pracach [1, 4, 7]. W pracy [7] przedstawiłem warunki odsprzęgnięcia obiektów lewostronnie odwracalnych oraz zaproponowałem odpowiedni algorytm odsprzęgania. Pozwala on na dynamiczne odsprzęganie liniowych obiektów dynamicznych, sterowalnych, o dowolnej liczbie wejść i wyjść, w ogólności niestabilnych i nieminimalnofazowych. W pracy [4] przedstawiłem możliwe konsekwencje różnego grupowania (parowania) wejść i wyjść takich obiektów. Są to przede wszystkim rzędy poszczególnych elementów układu sterowania (dynamicznego prekompensatora, regulatora) oraz stopień złożoności niezbędnych obliczeń numerycznych. Wykazałem możliwość wprowadzenia do układu, nazwanych przeze mnie, wirtualnych skrośnych zer transmisyjnych, zer nie związanych z budową układu a jedynie wynikających z operacji matematycznych wykonywanych podczas obliczeń układu odsprzęgającego. Warunki te mogą okazać się przydatne w syntezie wszystkich, bardzo popularnych, układów sterowania wykorzystujących sprzężenie zwrotne od stanu obiektu, w tym powinny być uwzględniane w zalgorytmizowanej syntezie on-line regulatorów w układach adaptacyjnych i rekonfigurowalnych, np. dla nieliniowych obiektów MIMO.

W pracy [1] podsumowałem wszystkie te rozważania, zilustrowałem je stosownymi przykładami oraz przedstawiłem ujednolicony algorytm dynamicznego odsprzęgania dla liniowych, sterowalnych obiektów dynamicznych – w ogólności niestabilnych i nieminimalnofazowych – posiadających dowolną liczbę wejść i wyjść.

W rozdziale 3.8 pracy [1] przedstawiłem wyniki analizy możliwości dynamicznego odsprzęgania dla obiektów niecałkowitego rzędu. Omówiłem warunki stosowania różnych algorytmów odsprzęgania wykorzystywanych dla układów całkowitego rzędu. Przedstawiłem jednocześnie dodatkowe ograniczenia, typowe dla układów niecałkowitego rzędu, które utrudniają praktyczną realizację zadań dynamicznego odsprzęgania. Jednocześnie pokazałem możliwość wykorzystania metod wielomianowych do syntezy układów odsprzęgających obiektów dynamicznych MIMO niecałkowitego rzędu. Wykazałem poprawność stosowania opracowanego i przedstawionego w pracach [1, 7] algorytmu dynamicznego odsprzęgania dla układów całkowitego rzędu do syntezy dynamicznych prekompensatorów niecałkowitego rzędu. Opisałem ograniczenia stosowalności powyższej metody, wynikające tu przede wszystkim z wymogu jednakowego rzędu dla wszystkich stanów odsprzęganego obiektu. Jednocześnie na wybranych przykładach pokazałem wpływ sposobu realizacji pochodnej ułamkowego rzędu na możliwość odsprzęgnięcia układu oraz konieczność weryfikacji poszczególnych metod i teorii dynamicznego odsprzęgania – dotyczących zwłaszcza pokrywających się zer i biegunów modeli obiektu.

W przypadku obiektów silnie nieliniowych, lokalny model liniowy obiektu służący do syntezy układu odsprzęgającego może nie zapewniać odpowiedniej jakości regulacji, czy nawet stabilności, w całym zakresie zmian parametrów pracy obiektu. Jedną z możliwości bezpośredniego rozwiązania problemu sterowania obiektem nieliniowym jest synteza nieliniowego regulatora, który realizowałby wyznaczone cele sterowania w całym obszarze roboczym układu sterowania. Niestety jest to zadanie trudne do realizacji w praktyce ze względu na brak uniwersalnych metod syntezy układów sterowania z nieliniowymi regulatorami. Bardzo obiecującą i w ostatnich latach intensywnie rozwijaną metodą jest wykorzystanie regulatorów MPC, w tym tych zawierających nieliniowe modele obiektów, NMPC. Niestety w przypadku nieliniowych obiektów MIMO takie nieliniowe algorytmy sterowania są najczęściej zbyt skomplikowane aby były możliwe do zastosowania w sterowaniu on-line. Dlatego w kolejnych pracach skupiłem się na poszukiwaniu sposobów syntezy układów sterowania zawierających grupy, przełączanych w czasie pracy, liniowych regulatorów i/lub modeli oraz budowy liniowego regulatora o zmiennych parametrach. Parametry takiego regulatora mogą być przyjmowane na podstawie wartości wybranych wielkości pomocniczych (gain-scheduling). Nieliniowym obiektem steruje wówczas liniowy sterownik o parametrach systematycznie dostosowywanych do bieżącego punktu pracy. Rozwiązanie to oprócz prostoty realizacji cechuje też możliwość łatwej implementacji w przemysłowych urządzeniach automatyki.

We wszystkich przełączalnych strukturach układów z wieloma regulatorami, w których w danym momencie nie wszystkie regulatory znajdą się w zamkniętym obwodzie sterowania, wszystkie projektowane regulatory muszą być stabilne. Zatem struktury te muszą spełniać tzw. warunki stabilności w sensie mocnym (ang. *strong stability conditions*), gdzie stabilne są nie tylko poszczególne obwody układu sterowania, ale także wszystkie używane w tych strukturach regulatory. W strukturach z pojedynczym, adaptacyjnym (strojonym) regulatorem, regulatory projektowane dla poszczególnych punktów pracy statku mogą, ale nie muszą, być stabilne. W monografii [1] proponuję procedurę weryfikacji stabilności układu zamkniętego z adaptacyjnym regulatorem MIMO, typu gain-scheduling, nieliniowego obiektu dynamicznego MIMO. Opracowane warunki stabilności nie wymagają stabilności pojedynczych regulatorów liniowych wykorzystywanych w regulatorze adaptacyjnym.

Jednym z podstawowych problemów w syntezie układu regulacji dla obiektu MIMO jest niejednoznaczność otrzymywanych w niej wyników co może stanowić duży problem podczas przełączeń pomiędzy liniowymi regulatorami lub zmian wartości parametrów regulatora gain-scheduling czy np. przy rekonfiguracji układu sterowania, niezbędnej np. po uszkodzeniu obiektu sterowania i/lub urządzeń wykonawczych. Natura układów MIMO może powodować konieczność zmiany struktury całego układu regulacji. Problemy te analizowano w ramach grantu [II.J.4] i opisano w pracach [1, 6, II.E.10], gdzie opisuje się wpływ stosowanego sposobu i/lub zastosowanej procedury numerycznej lokowania biegunów w zamkniętym układzie regulacji na ostateczną formę i – z punktu widzenia praktycznego zastosowania – jakość otrzymywanych regulatorów. Z badań tych wynika niezbicie, że w praktycznej realizacji synteza – on-line przy bieżącej

identyfikacji parametrów nieliniowego obiektu bądź synteza off-line po lokalnej linearyzacji modelu takiego obiektu – może dać w wyniku regulatory o skokowo zmieniających się wartościach parametrów czy nawet zmiennej strukturze. W przypadku opisywanych regulatorów modalnych może to spowodować różne przypisanie biegunów układu zamkniętego do poszczególnych wejść i wyjść obiektu MIMO. W takim przypadku, o jakości uzyskiwanych wyników decydują inne czynniki, takie jak, uzyskiwane przebiegi przejściowe i minimalne wzmocnienia w układzie, wzmocnienia statyczne układu ze sprzężeniem zwrotnym, odsprzęgnięcia poszczególnych wejść i wyjść układu czy wreszcie numeryczne uwarunkowania przyjętej metody syntezy regulatorów. Ten ostatni problem jest kluczowy w syntezie adaptacyjnego regulatora modalnego typu gain-scheduling z punktu widzenia zapewnienia stabilności układu sterowania.

Jak pokazałem w pracach [1, 6] różne metody syntezy wielowymiarowego regulatora modalnego, przy tych samych wartościach biegunów układu zamkniętego, dają całkowicie odmienne wyniki działania układu regulacji. Pokazałem przy tym, że numeryczne uwarunkowania wybranych metod syntezy regulatora modalnego są przyczyną dużych nieciągłości wartości parametrów regulatora wraz ze zmiana punktu pracy układu. Praktycznie eliminuje je to z możliwości wykorzystania w regulacji adaptacyjnej z syntezą regulatora on-line, a także off-line przy budowie regulatora typu gain-scheduling.

Opracowane i przetestowane w ramach prac [1, 6] algorytmy syntezy adaptacyjnego regulatora typu gain-scheduling do regulacji nieliniowymi obiektami MIMO mogą zostać również wykorzystane do budowy układów regulacji z dynamicznym odsprzęganiem. Choć istnieje duża liczba prac dotyczących dynamicznego odsprzęgania, to niemal wszystkie one dotyczą jedynie obiektów liniowych, a problem odsprzęgania nieliniowych obiektów MIMO jest ciągle otwarty. Pełne odsprzęgnięcie obiektu nieliniowego wymaga globalnej linearyzacji. Alternatywę stanowić może użycie nieliniowych regulatorów predykcyjnych. Niestety, w dalszym ciągu metody te są najczęściej bardzo skomplikowane, bądź nierealizowalne obliczeniowo on-line. Dlatego w wielu praktycznych realizacjach układów sterowania nieliniowymi obiektami MIMO wzajemny wpływ wejść i wyjść obiektu jest jedynie ograniczany i dopuszcza się jego niepełne odsprzęgnięcie. Jednym z takich rozwiązań jest przedstawiony w pracach [1, 3] układ sterowania z przełączanymi parametrami regulatora odsprzęgającego. W pracy [1] przeanalizowałem szczegółowo i pokazałem sposób syntezy regulatora do celów dynamicznego odsprzęgania, który – tak samo jak w przypadku regulatorów modalnych – można wykorzystać do budowy adaptacyjnego regulatora odsprzęgającego z przełączalnymi parametrami. Tak skonstruowany układ regulacji nieliniowym obiektem MIMO nie wyeliminuje całkowicie interakcji pomiędzy wejściami i wyjściami obiektu, powinien je jednak wydatnie zmniejszyć w porównaniu np. do układów regulacji modalnej. Układ taki cechuje się przy tym dużą prostotą syntezy i implementacji w dowolnym programowalnym sterowniku automatyki.

Od strony praktycznej, w syntezie i implementacji regulatorów MIMO typu gain-scheduling, poważnym utrudnieniem może być bardzo duża liczba punktów pracy, dla których konieczna jest synteza regulatora. Zależy ona bezpośrednio od ilości parametrów pomocniczych regulatora oraz przyjętej rozdzielczości podziału zakresu ich zmienności. W pracy [1] analizowałem zatem metody redukcji siatek, czyli redukcji liczby regulatorów wykorzystanych do budowy adaptacyjnego regulatora modalnego, która pozwala ograniczyć wielkość niezbędnej pamięci operacyjnej programowalnych urządzeń automatyki i mocy obliczeniowej ich jednostek centralnych. Zaproponowana dwustopniowa procedura syntezy regulatora – generacja gęstej siatki regulatorów lokalnych i redukcja ich ilości – daje dodatkowy stopień swobody projektowania, który może zostać wykorzystany do wyważenia wielkości regulatora i jakości sterowania.

Niestety, jak pokazała przedstawiona analiza, uzyskiwane wyniki redukcji nie są jednoznaczne i dla rozpatrywanych siatek regulatorów zależą choćby od sposobu (kierunku) ich „przeszukiwania" – kolejności weryfikacji warunków łączenia obszarów działania dla nowych regulatorów lokalnych. Ilustruje to po raz kolejny trudności w doborze i syntezie właściwego układu sterowania dla nieliniowego obiektu MIMO. Innym problemem tego rozwiązania jest możliwe pogorszenie jakości sygnałów sterujących polegające na dużych skokowych zmianach wartości tych sygnałów. Może to utrudnić, bądź nawet uniemożliwić, ich praktyczną realizację przez fizyczne urządzenia wykonawcze i/lub znacznie pogorszyć warunki ich eksploatacji.

Jednym z problemów jaki pojawia się w strukturach z przełączeniami jest bezuderzeniowe przełączanie regulatorów (czy pętli regulacji dla układów MFC z przełączanymi pętlami modelu). Wymaga to stosowania albo specjalnych procedur przełączeń albo innych technik m.in. wykorzystujących metody logiki rozmytej. Stąd w pracach [1, 3] analizowałem sposoby syntezy, praktycznej implementacji i stosowania struktur układów sterowania na bazie regulatorów rozmytych typu Takagi-Sugeno (T-S). Te dość dobrze znane struktury regulatorów w dalszym ciągu poddawane są jednak licznym badaniom teoretycznym i weryfikowane są w praktycznej implementacji. Typowym, ciągle otwartym, problemem teoretycznym jest określenie warunków wystarczających stabilności układów z regulatorami T-S.

Teoretyczne rozważania nad stabilnością układów z regulatorami rozmytymi typu T-S przedstawiłem w pracy [3] oraz szczegółowo w monografii [1]. Ich rezultatem było zaproponowanie struktury regulatora nazwanego rozmytym regulatorem grupowym typu T-S, w której w danej chwili próbkowania wykorzystywana jest jedynie ściśle określona grupa reguł, grupa regulatorów – regulator odpowiedni do punktu pracy i jego bezpośredni „sąsiedzi" w modelu T-S. Takie rozwiązanie pozwala z jednej strony na złagodzenie warunków stabilności i syntezy regulatorów lokalnych, z drugiej strony, na ograniczenia ilości jednocześnie pracujących regulatorów co ułatwia (a w niektórych przypadkach może w ogóle umożliwić) implementację w przemysłowym, programowalnym urządzeniu automatyki. Jak pokazałem w pracach [1, 3] w przykładzie układu sterowania pozycją statku wiertniczego z grupy 3650 regulatorów wybiera się jedynie 9 do bieżącej pracy i wyznaczenia sygnału sterującego. Z punktu widzenia syntezy układu pozwala to np. na akceptowanie w procesie projektowania lokalnych regulatorów jako niestabilnych układów dynamicznych. Taki niestabilny regulator w strukturze regulatora grupowego będzie pracował jedynie w bezpośredniej bliskości punktu pracy układu przez co nie spowoduje niestabilności całego systemu. Pozwala to na znaczne złagodzenie warunków stabilności układu. W pracach [1, 3] pokazałem, że do sprawdzenia stabilności układu do sterowania modelem statku wiertniczego wystarczy rozwiązać 3650 razy układ 9 nierówności macierzowych zamiast – typowego – jednokrotnego rozwiązywania (prawdopodobnie nierozwiązywalnego od strony teoretycznej i praktycznej) układu 3650 nierówności macierzowych.

W pracy [3] oraz w monografii [1] pokazałem ponadto znaczną poprawą jakości sygnałów sterujących (większą płynność ich zmian) w układzie z rozmytym regulatorem grupowym typu T-S w porównaniu do przełączalnych regulatorów modalnych i odsprzęgających. W przypadku praktycznej implementacji może to znacznie wydłużyć trwałość urządzeń wykonawczych układu sterowania.

Całkowite wyeliminowanie problemu bezuderzeniowego przełączania sygnałów sterujących i równoczesnej pracy grupy (wielu) regulatorów udaje się uzyskać poprzez zastosowanie do budowy regulatora sztucznych sieci neuronowych. W pracach [1, 2] zaproponowałem sposób budowy neuronowego regulatora modalnego MIMO. Sztuczne sieci neuronowe wykorzystuje się do aproksymacji zmian wartości poszczególnych parametrów macierzy opisu w przestrzeni stanu zestawu liniowych regulatorów. W przedstawionej metodzie syntezy regulatora neuronalnego każda sieć posiadała tyle wejść, ile sygnałów pomocniczych i jedno wyjście określające bieżącą wartość aproksymowanego elementu opisu regulatora. Ilość tworzonych sieci neuronowych zależy od wymiarów i struktury liniowych regulatorów modalnych (obliczanych analitycznie dla wybranych punktów pracy). Dane uczące i testujące, czyli zestawy liniowych regulatorów, niezbędne do syntezy sieci generowane są dokładnie w taki sam sposób jak dla opisywanych powyżej regulatorów adaptacyjnych z bezpośrednim przełączaniem regulatorów i T-S.

Wprowadzone w pracy sposoby klasyfikacji danych uczących pozwalają dobrać właściwą metodę syntezy regulatorów przez co zwiększa się szansę skutecznego nauczania sieci neuronowych i budowy regulatora neuronowego. Ten sposób syntezy regulatora neuronalnego jest praktycznie realizowalny z wykorzystaniem klasycznych struktur sieci neuronowych, stosunkowo łatwo implementowanych w programowalnych urządzeniach automatyki.

Odrębnym sposobem jaki wykorzystywałem do zwiększenia odporności układów regulacji dla obiektów nieliniowych bądź liniowych o nieznanych dokładnie lub perturbowanych parametrach jest stosowanie układ

sterowania ze śledzeniem modelu (ang. *Model Following Control* – MFC). Układ wykorzystany przeze mnie po raz pierwszy dla układów o jednym wejściu i jednym wyjściu [II.E.27] dość szybko zaproponowałem do stosowania dla obiektów MIMO [II.E.26]. W pracy [1, II.K.31] pokazałem, że stosowanie układu MFC może wydatnie zwiększyć jakość sterowania dynamicznymi obiektami MIMO, liniowymi o zmiennych w czasie parametrach (ang. Linear Time Variant, LTV) bądź nieliniowymi o niezmiennych parametrach (ang. Nonlinear Time Invariant, NLTI), zapewniając stabilność regulacji i poprawę jakości sterowania w szerszym niż w przypadku struktury jednopętlowej zakresie zmian parametrów. Uzyskana poprawa jakości dynamicznego odsprzęgania pozwoliła poszerzyć zakres stosowalności algorytmów dynamicznego odsprzęgania – zwyczajowo dotyczących układów liniowych – również na obiekty typu LTV i NLTI. Do syntezy pętli modelu wykorzystałem, znane mi, algorytmy syntezy regulatorów MIMO w tym algorytm dynamicznego odsprzęgania, a regulator pomocniczy stanowiła grupa niezależnych regulatorów typu PD. To samo podejście zastosowałem i potwierdziłem eksperymentalnie w pracy [II.A.8], w której metody dynamicznego odsprzęgania w strukturze MFC zastosowałem do regulacji temperatury i przepływu powietrza w laboratoryjnym modelu nagrzewnicy. W pracy [II.A.7] zaproponowałem i przebadałem eksperymentalnie możliwość rozbudowy układu MFC o mechanizm przełączania pętli modelu. Każda niezależna pętla zaprojektowana była jako stabilny układ regulacji z liniowym lokalnym modelem obiektu i regulatora. Taka sama struktura – układ MFC i zestaw przełączalnych regulatorów modalnych – wykorzystana została w pracy [5] do sterowania nieliniowym modelem 3DOF statku wiertniczego. Tu jednak zweryfikowano własności układu do niwelowania wpływu zakłóceń niemierzalnych działających na układ. W pracy był to wpływ wiatru na położenie statku.

Podstawowym kryterium przydatności analizowanych metod syntezy regulatorów i układów sterowania jaki przyjąłem w swojej pracy jest możliwość ich praktycznej implementacji. Wynika stąd potrzeba weryfikacji i ewentualnego dostosowania procedury syntezy i struktur regulatorów do sterowania nieliniowymi obiektami dynamicznymi MIMO do postaci, w której możliwe jest ich wykorzystanie w systemach szybkiego prototypowania i implementacja w przemysłowych sterownikach programowalnych. Dlatego w rozdziale piątym monografii [1] analizuję problemy implementacji badanych układów sterowania w programowalnych urządzeniach automatyki. Wykorzystując narzędzia szybkiego prototypowania oraz typowe przemysłowe sterowniki programowalne przedstawia się wyniki pracy poszczególnych regulatorów w reżimie czasu rzeczywistego (badania typu Hardware-in-the-loop).

W pracy [1] przedstawiłem algorytmy syntezy on-line układów sterowania modalnego oraz układów sterowania z dynamicznym odsprzęganiem dla nieliniowymi obiektami MIMO. Zweryfikowałem możliwość syntezy on-line tych regulatorów oraz ich pracy w reżimie czasu rzeczywistego. Wykazałem, z jednej strony, poprawność pracy testowanych układów sterowania, z drugiej strony, że pomimo istotnego ograniczenia złożoności obliczeniowej algorytmów, w dalszym ciągu wymagane obliczenia są dość czasochłonne, co, zależnie od obiektu i przyjętego czasu próbkowania, może praktycznie uniemożliwić syntezę regulatora w każdym kroku symulacji. Tym bardziej, że prawidłowa synteza takiego układu sterowania wymaga precyzyjnej znajomości liniowego modelu sterowanego obiektu. To z kolei wymaga stosowania efektywnych metod bieżącej identyfikacji. Problem ten analizowałem w przyjętej do publikacji pracy [II.A.1], gdzie przedstawiłem algorytm identyfikacji oraz dokonałem porównania dwóch algorytmów – gradientowego i genetycznego – optymalizacji identyfikacji parametrów liniowych modeli dyskretnych w obecności niemierzalnych, normalnych zakłóceń stochastycznych typu „biały" szum gaussowski.

Obie testowane metody optymalizacji dawały poprawne, porównywalne wyniki. Biorąc jednak pod uwagę złożoność obliczeń, kłopoty natury numerycznej i uzyskiwane przez to czasy obliczeń wydaje się, że lepszym algorytmem jest tu algorytm genetyczny. W prezentowanym w pracy [II.A.1] przykładzie identyfikacji parametrów liniowego modelu statku „Wimpey Sealab", niezależnie od wyboru osobników początkowych kryterium genetyczne osiąga akceptowalną wartość po ok. 50 generacjach a uzyskiwana dokładność i czasy obliczeń pozwalają na zastosowanie algorytmu w praktyce. Ostatecznie biorąc pod uwagę wady i zalety obu metod korzystną wydaje się ich kombinacja – algorytm genetyczny wykorzystany na początku procedury

optymalizacyjnej, a następnie gradientowy w celu uzyskania najlepszego rozwiązania. Taki algorytm identyfikacji ma szansę być wykorzystywanym w praktyce a jego wyniki mogą zostać bezpośrednio użyte do syntezy regulatora MIMO – modalnego bądź z dynamicznym odsprzęganiem.

W pracy [1] przedstawiłem wyniki eksperymentów symulacyjnych weryfikujących prawidłowość działania projektowanych układów regulacji. Przeprowadziłem je w środowisku MATLAB/Simulink a także, w reżimie czasu rzeczywistego, z wykorzystaniem narzędzi szybkiego prototypowania oraz typowych przemysłowych sterowników programowalnych. Prowadzone symulacje miały charakter typu *Hardware-in-the-loop*, w których symulowane obiekty oraz stosowane regulatory pracowały na oddzielnych jednostkach w czasie rzeczywistym. Umożliwiło to przetestowanie zdolności proponowanych algorytmów do pracy systemu sterowania w trybie real-time zrealizowanego w postaci komputerowego systemu sterowania oraz możliwości syntezy algorytmów sterowania w trybie on-line. Testowano algorytmy wykorzystujące do syntezy układu adaptacji zestaw wielu liniowych regulatorów. Były to struktury z liniowymi regulatorami o parametrach zmienianych w trakcie pracy układu – regulatory modalne i neuronowe - oraz wieloregulatorowe, typu Takagi-Sugeno.

Wyniki działania obu układów – rozmytego i neuronalnego - potwierdzają skuteczność regulacji a zarazem praktyczną efektywność: proponowanych metod syntezy, implementacji regulatorów i pracy układu regulacji. Proponowane podejścia pozwalają na bezpieczną zmianę punktu pracy nieliniowego obiektu MIMO zapewniając przy tym wysoką jakość regulacji w każdym z tych punktów. Pozytywne wyniki działania proponowanych układów przemawiają za tym, że obie proponowane metody syntezy układów sterowania mogą zostać przydatnymi narzędziami do sterowania nieliniowymi i niestacjonarnymi wielowymiarowymi układami regulacji.

Szczegółowe rezultaty zgłoszonego osiągnięcia naukowego

Celem nadrzędnym prowadzonych i podsumowanych prac naukowo-badawczych było opracowanie procedur syntezy układów sterowania liniowymi i nieliniowymi obiektami dynamicznymi o wielu wejściach i wielu wyjściach. Realizacja postawionego celu została osiągnięta przez rozwiązanie wybranych składowych zadań badawczych. Do najważniejszych osiągnięć pracy zaliczyłbym:

a) opracowanie koncepcji wykorzystania struktur wieloregulatorowych i regulatorów o zmiennych parametrach do sterowania nieliniowymi obiektami dynamicznymi MIMO,
b) opracowanie metod syntezy układów sterowania nieliniowymi obiektami dynamicznymi MIMO z wykorzystaniem adaptacyjnych regulatorów modalnych,
c) analizę teoretyczną warunków stabilności układów sterowania nieliniowymi obiektami dynamicznymi MIMO z adaptacyjnymi regulatorami modalnymi,
d) opracowanie metod syntezy i analize teoretycznej warunków stabilności dla regulatorów rozmytych typu T-S,
e) analizę teoretyczną i opracowanie metod dynamicznego odsprzęgania dla liniowych obiektów dynamicznych MIMO o liczbie wyjść większej niż liczba wejść,
f) analizę teoretyczną uwarunkowań rekonfiguracji układu regulacji zdynamicznym odsprzęganiem po awariach układów wykonawczych systemu sterowania.

Uzupełnieniem analizy teoretycznej była weryfikacja możliwości praktycznej implementacji proponowanych procedur, wymagająca między innymi:

a) opracowania stanowiska do badań „hardware-in-the-loop simulation" dla badanych układów sterowania,
b) opracowania metod implementacji w programowalnych urządzeniach automatyki badanych układów regulacji,
c) przeprowadzenia badań w reżimie czasu rzeczywistego badanych układów regulacji dla nieliniowych modeli jednostek pływających oraz laboratoryjnego modelu obiektu cieplnego (nagrzewnicy).

Cele te zostały moim zdaniem osiągnięte, stwarzając możliwości dalszego rozwoju w obszarach związanych z podnoszeniem jakości sterowania obiektami dynamicznymi o wielu wejściach i wielu wyjściach. Z zaprezentowanych w przedstawionym osiągnięciu wyników badań wyraźnie wynika, że kompleksowe podejście do zagadnienia sterowania obiektami MIMO może umożliwić stabilne, efektywne, odporne i jakościowo lepsze rezultaty regulacji. Wskazuje to na istotny postęp w obszarze badawczym i stanowi o wkładzie w dyscyplinę automatyka i robotyka (w zakresie teorii sterowania i jej zastosowań w przemyśle).

Osiągnięte dotychczas rezultaty pozwoliły jednocześnie nakreślić kierunki przyszłych badań, do których zaliczyłbym, m.in.:

a) budowę adaptacyjnych regulatorów modalnych i regulatorów z dynamicznym odsprzęganiem dla nieliniowych obiektów dynamicznych MIMO – z możliwą do realizacji na bieżąco identyfikacją i syntezą on-line regulatora,
b) dynamiczne odsprzęganie dla nieliniowych obiektów dynamicznych MIMO,
c) sterowanie nieliniowymi obiektami dynamicznymi MIMO z uwzględnieniem opóźnień i ograniczeń sygnałów sterujących,
d) opracowanie algorytmów dynamicznego odsprzęgania dla układów niecałkowitego rzędu.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Równolegle do badań opisanych wyżej, których zwarty obraz stanowią zebrane w cyklu publikacje i monografia, uczestniczyłem w innych pracach zespołów badawczych funkcjonujących na Wydziale Elektrycznym oraz Wydziale Mechanicznym (obecnie Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki) ZUT w Szczecinie. Były one prowadzone w kilku projektach badawczych MNiSW, 7 Programu Ramowego oraz w ramach badań własnych a ich wyniki opublikowano w czasopismach i przedstawiono na różnych konferencjach naukowych i naukowo-technicznych.

Od roku 2007 część swoich zainteresowań naukowych skupiłem na pracach prowadzonych przez grupę stworzoną z zespołem prof. Krzysztofa Marchelka z Instytutu Technologii Mechanicznej Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki i Wydziału Elektrycznego ZUT w ramach zespołu badawczego mechatroniki. Prowadzone prace mają na celu poprawę jakości sterowania obrabiarek numerycznych, w tym przede wszystkim budowę otwartego układu sterowania taką obrabiarką, poprawę jakości sterowania serwonapędami obrabiarek, wyposażenie otwartego systemu sterowania w rozbudowane procedury diagnostyczne oraz m.in. układy aktywnego tłumienia drgań samowzbudnych. W ciągu kilku lat uczestniczyłem jako wykonawca i główny wykonawca w szeregu grantów badawczych i rozwojowych [II.J.3–II.J.8, II.J.10]. Wykorzystałem tu też wiedzę i umiejętności zgromadzone w ramach wcześniejszych prac nad wykorzystaniem logiki rozmytej i zaawansowanych układów sterowania [II.A.2, II.A.3, II.A.6, II.A.11, II.A.12, II.E.25, II.K.9, II.K.10, II.K.16, II.K.18, II.K.21, II.K.23, II.K.25, II.K.26–II.K.28, II.K.35-II.K.37] czy wiedzy z zakresu programowania, nabytej w czasie kilkuletniej pracy jako programista (języki C, C++, Java). Stworzone w ramach tych prac produkty „O.C.E.A.N. – otwarty modułowy system sterowania obrabiarki CNC (Open modular control system of the CNC machine)" oraz „Wizjoner – układ wizyjny do automatycznego bazowania przedmiotu obrabianego na obrabiarce CNC" zostały wyróżnione Złotymi Medalami Międzynarodowych Targów Poznańskich, Innowacje-Technologie-Maszyny odpowiednio w latach 2009 i 2013.

W ramach prac prowadzonych w międzynarodowych projektach 7 Programu Ramowego [II.J.2, II.J.9] byłem członkiem zespołów konstrukcyjnych robota do inspekcji spawów podwodnych części konstrukcji platform wiertniczych oraz systemu automatycznego oczyszczania płatów wiatraków energetycznych z osadzającego się na nich lodu. W jednym i drugim przypadku prace dotyczyły zaproponowaniu rozwiązań automatyzacji pracy urządzeń w bardzo trudnych warunkach środowiskowych: zdalnie sterowane roboty pracujące głęboko pod wodą oraz urządzenia automatyki pracujące w ekstremalnie niskich temperaturach.

Zainteresowania dotyczące systemów SCADA (ang. Supervisory Control and Data Aquisition) oraz nowoczesnych technologii i systemów informatycznych zaowocowały opracowaniem zaawansowanego sposobu wizualizacji parametrów i stanu pracy procesów przemysłowych z wykorzystaniem technologii rozszerzonej rzeczywistości. Prototyp takiego systemu przedstawiony został w ramach opracowania [II.E.11] a sam pomysł stanowi przedmiot zgłoszeń patentowych [II.C.3, II.C.4].

W ramach działalności naukowej przygotowałem ponadto recenzje kilkunastu prac zgłoszonych do publikacji w krajowych i zagranicznych czasopismach naukowych oraz międzynarodowych konferencji. Uczestnicząc czynnie w konferencjach międzynarodowych przewodniczyłem również siedmiu sesjom tematycznym [II.N.2-II.N.8]. W latach 2000 – 2008 brałem czynny udział w przygotowaniu i prowadzeniu organizowanej niemal rokrocznie przez Wydział Elektryczny ZUT w Szczecinie, międzynarodowej konferencji naukowej *Methods and Model in Automation and Robotics*. Od roku 2009 jestem członkiem komitetu organizacyjnego konferencji. Konferencje te, gromadząc każdego roku od 100 do 200 badaczy z całego świata, należą do największych regionalnych imprez naukowych w Europie. Prowadzone są regularnie pod patronatem Komitetu Automatyki oraz Komitetu Metrologii i Aparatury Naukowej Polskiej Akademii Nauk, IEEE Robotics and Automation Society i IEEE Control System Society oraz w wybranych latach pod naukowym patronatem Międzynarodowej Federacji Automatyki IFAC. W bieżącym roku byłem członkiem komitetu organizacyjnego konferencji *7th Conference on Non-Integer Order Calculus and Its Applications*, która odbyła się w dniach 28-29 sierpnia 2015 w Szczecinie. Konferencja prowadzona była pod patronatem Komitetu Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk. Jej tematyka koncentruje się na analizie, syntezie i implementacji systemów dynamicznych opisanych równaniami różniczkowymi (lub różnicowymi) niecałkowitego rzędu. Jednym z głównych rezultatów prowadzonych tu przeze mnie prac jest edycja monografii *Theoretical Developments and Applications of Non-Integer Order Systems* wydanej w ramach serii *Lecture Notes in Electrical Engineering* przez wydawnictwo Springer.

Ponadto niezależnie od prowadzonej działalności naukowo-badawczej i dydaktycznej jako pracownik Wydziału Elektrycznego prowadziłem prace na zlecenie firm prywatnych i instytucji państwowych. W najważniejszych z nich w roku 2008 byłem głównym wykonawcą w projekcie na podstawie umowy pomiędzy PS a firmą CIAT Sp. z o.o., w którym wykonałem i zaimplementowałem program komputerowy GRYFITplug, którego zadaniem była zespolenie wykorzystywanych w firmie aplikacji z wdrażanym systemem ERP SAP. W roku 2009 na zlecenie Sądu Rejonowego Szczecin-Centrum w Szczecinie – XI Wydział Gospodarczy przygotowałem opinię dotyczącą faktycznych możliwości funkcjonalnych i parametrów technicznych stołu do automatycznego rozkroju szkła (Sygn. akt XI GC 88/09; 20.10.2009). Opinia obejmowała ocenę konstrukcji urządzenia, zastosowanych serwonapędów i układu jezdnego oraz oprogramowania stołu. W 2010 na zlecenie PGE Zespół Elektrowni Dolna Odra S.A. wykonałem opracowanie „Ocena pożądanych kierunków rozwoju i zmian automatyki w El. Szczecin w związku z zabudową nowego kotła na biomasę". Opracowanie stanowiło podstawę przyjęcia strategii modernizacji układu sterowania turbiny i generatora w elektrowni.

Od stycznia 2000 roku, równolegle do pracy w Uczelni podjąłem pracę w Biurze Badawczo Rozwojowym RTS. Najpierw jako pracownik a od sierpnia 2000 roku, po założeniu własnej działalności gospodarczej, świadczyłem usługi w zakresie oprogramowania (języki C/C++/Java). Prowadzone prace wykonywane były na zlecenie firmy Siemens i dotyczyły oprogramowania systemów zarządzania i sterowania pracą elementów sieci telekomunikacyjnych. W ramach wykonywanych badań odbywałem wiele podróży służbowych do siedzib firmy Siemens w Greisfaldzie i Monachium, gdzie prowadziłem testy rozwijanych urządzeń telekomunikacyjnych i ich oprogramowania. Pracę dla RTS zakończyłem w styczniu 2005 roku.

W lutym 2006 roku ponownie podjąłem współpracę z biurem badawczo rozwojowym RTS, które na skutek dynamicznego rozwoju i niezbędnych modernizacji zmieniło nazwę na RTS Networks Ltd a po przejęciu przez międzynarodowy koncern Tieto nosiło nazwę TietoEnator. W firmie tej pełniłem funkcję Recriutment Managera, a do moich zadań należała promocja firmy, koordynacja współpracy z uczelniami oraz obsługa całego procesu rekrutacji pracowników firmy. Firma w tym czasie rozwijała się bardzo dynamicznie i liczyła już kilkuset pracowników. Współpracę z TietoEnator w roli jego pracownika zakończyłem w kwietniu 2008 roku.

W dalszym ciągu koordynuję jednak kontakty firmy z Wydziałem Elektrycznym ZUT jako przedstawiciel Dziekana WE ZUT w Szczecinie.

Jestem współautorem **dwóch książek**, podręczników [II.E.10, II.E.23] z których pierwszy jest pierwszą na polskim rynku pozycją, która w kompleksowy sposób przedstawia zagadnienia związane z zastosowaniem i działaniem nowych programowalnych urządzeń sterujących czasu rzeczywistego (ang. *Programmable Automation Controllers*) i jest do dziś popularną wśród studentów i inżynierów z przemysłu pozycją literaturową.

Łącznie po obronie doktoratu opublikowałem w czasopismach i przedstawiłem podczas konferencji naukowych **84 prace**, z czego **21 jest indeksowanych w bazie WoS**. Jestem autorem bądź współautorem **4 zgłoszeń patentowych**, brałem udział – jako wykonawca, główny wykonawca i kierownik – w realizacji **10 projektów badawczych i badawczo rozwojowych**, w tym **2 międzynarodowych**. Wykonałem **8** ekspertyz i opracowań na zamówienie.

Indeks Hirscha, wyznaczony dla **21** prac, cytowanych łącznie **29** razy (w tym **12** bez autocytowań), według bazy ***Web of Science*** wynosi **3**.

Podobnie mój indeks Hirscha wynosi **4** według bazy *SCOPUS*, na podstawie **30** prac łącznie zacytowanych **54** razy, natomiast według Google Scholar **61** moich prac cytowanych było łącznie **120** razy, co w rezultacie daje h-index równy **6**.

Sumaryczny **IF** moich prac według roku publikowania wynosi aktualnie **6,787**.