

# AUTOREFERAT

do wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego w oparciu o objęte wspólnymi badaniami i dokonanymi opracowaniami na temat:

NOWOCZESNE METODY BADANIA STABILNOŚCI I STEROWANIA LINIOWYMI PROCESAMI  
POWTARZALNYMI I ICH ZASTOSOWANIE W PROJEKTOWANIU SCHEMATÓW  
ITERACYJNEGO STEROWANIA Z UCZENIEM

## 1. Imię i nazwisko: Wojciech Paszke

## 2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

2005 - doktor nauk technicznych w dyscyplinie informatyka (z wyróżnieniem), specjalność: metody numeryczne - Wydział Elektrotechniki, Informatyki i Telekomunikacji Uniwersytetu Zielonogórskiego, Zielona Góra; rozprawa doktorska pt.: *Analysis and synthesis of multidimensional system classes using linear matrix inequality methods*; promotor pracy: prof. dr hab. inż. Krzysztof Gałkowski; recenzenci: dr hab. inż. Andrzej Dzieliński, prof. Politechniki Warszawskiej oraz prof. dr hab. inż. Dariusz Uciński.

2000 - magister inżynier elektrotechniki, specjalność: inżynieria systemów informatycznych - Wydział Elektryczny Politechniki Zielonogórskiej, Zielona Góra.

## 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

od 9/2005            Adiunkt na Wydziale Elektrotechniki, Informatyki i Telekomunikacji, Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra.

2/2008 – 1/2010 Post-doctoral Research Assistant w *Control System Technology Group*, Wydział Mechaniczny Uniwersytetu Technicznego w Eindhoven, Holandia.

9/2000 – 8/2005 Asystent na Wydziale Elektrotechniki, Informatyki i Telekomunikacji, Uniwersytet Zielonogórski, Zielona Góra.

9/1999 – 8/2000 Pracownik techniczny Instytutu Robotyki i Inżynierii Oprogramowania, Politechnika Zielonogórska (aktualnie: Instytut Sterowania i Systemów Informatycznych Uniwersytetu Zielonogórskiego).

## Przebieg pracy zawodowej

Habilitant jest absolwentem kierunku elektrotechnika ze specjalnością inżynieria systemów informatycznych w Instytucie Robotyki i Inżynierii Oprogramowania Politechniki Zielonogórskiej (2000 r.). Pracę magisterską pt.: *"Metody synchronizacji w systemach rozproszonych"* napisał pod kierunkiem dr. inż. Pawła Majdzika. Po uzyskaniu stopnia mgr. inż., Habilitant rozpoczął pracę na stanowisku asystenta, a tematyka jego pracy dotyczyła sprowadzania problemów stabilności i stabilizacji wybranych klas układów wielowymiarowych do postaci pozwalającej

na zastosowanie efektywnych i znanych procedur numerycznych. Udało się to uzyskać poprzez zastosowanie podejścia polegającego na sformułowaniu rozważanych zagadnień jako problemów optymalizacji wypukłej z ograniczeniami w postaci liniowych nierówności macierzowych. Wyniki tych prac zostały ujęte w pracy doktorskiej pt.: *"Analysis and synthesis of multidimensional system classes using linear matrix inequality methods"*, przygotowanej pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Krzysztofa Gałkowskiego i obronionej z wyróżnieniem na Wydziale Elektrotechniki, Informatyki i Telekomunikacji Uniwersytetu Zielonogórskiego dnia 20 kwietnia 2005 r. Zagadnienia zawarte w pracy doktorskiej zostały opublikowane w postaci 5 artykułów w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citations Reports (JCR - tzw. *lista filadelfijska*) oraz 15 artykułach w materiałach konferencji krajowych i międzynarodowych oraz monografii z serii *Lecture Notes in Control and Computer Science* wydawnictwa uczelnianego Uniwersytetu Zielonogórskiego. Najważniejszym osiągnięciem obronionej pracy doktorskiej było udowodnienie, że możliwe jest sprowadzenie wielu problemów analizy i syntezy wybranych klas układów wielowymiarowych, w szczególności kiedy występują niepewności, zakłócenia i opóźnienia, do postaci problemu optymalizacji wypukłej i rozwiązanie go z użyciem znanych środowisk do obliczeń inżynierskich. Na szczególną uwagę zasługuje przede wszystkim praca pt.: *"Robust stability and stabilisation of 2D discrete state-delayed systems"* opublikowana w prestiżowym czasopiśmie *Systems & Control Letters* (vol. 51, no 3-4, pp. 277-291, 2004), gdyż należy ona do grona najczęściej cytowanych prac pracowników Uniwersytetu Zielonogórskiego. W pracy tej po raz pierwszy sformułowano warunki stabilności i stabilizacji układów dwuwymiarowych z opóźnieniami i dlatego większość prac publikowanych na świecie dotyczących tej klasy układów odnosi się do tych wyników.

Po uzyskaniu stopnia doktora, Habilitant przeniósł główny ośrodek swoich zainteresowań na problemy analizy procesów powtarzalnych i ich wykorzystanie do syntezy schematów iteracyjnego sterowania z uczeniem, choć równocześnie kontynuował jeszcze niektóre wątki prac związanych z analizą układów dwuwymiarowych z/bez opóźnień. Wyniki tych wszystkich prac zostały opublikowane w 12-stu artykułach w czasopismach naukowych (wszystkie znajdują się w bazie Journal Citations Reports), 27 artykułach w materiałach konferencji międzynarodowych (większość to materiały indeksowane w bazie ISI Web of Science) i jednego w materiałach konferencji krajowych.

W lutym 2008 Habilitant rozpoczął pracę na pozycji post-doc w *Control System Technology Group*, której kierownikiem jest prof. Maarten Steinbuch (Wydział Mechaniczny Uniwersytetu Technicznego w Eindhoven, Holandia). Główny kierunek badań został w tym czasie skierowany na zastosowanie metod częstotliwościowych w syntezie schematów iteracyjnego sterowania z uczeniem. Zainteresowanie metodami częstotliwościowymi było przede wszystkim spowodowane koniecznością ujęcia wielu praktycznych wymagań jakościowych regulacji, które w praktyce inżynierskiej są właśnie formułowane jako ograniczenia w wybranych zakresach częstotliwości. W szczególności, poświęcono się problemowi poprawy jakości sterowania położenia próbki w transmisyjnym mikroskopie elektronowym. Ponieważ priorytetem była automatyzacja całego procesu skanowania próbek, udało się zastosować sterowanie oparte na schematach iteracyjnego sterowania z uczeniem. Największą trudnością w tej pracy było to, że wymagana przez partnera przemysłowego dokładność pozycjonowania musiała być w zakresie pojedynczych nanometrów, pomimo występowania wielu zakłóceń i niepewności.

Po zakończeniu stażu naukowo-badawczego w Holandii, Habilitant powrócił do pracy na Uniwersytecie Zielonogórskim w lutym 2010 roku i kontynuował prace nad projektowaniem schematów iteracyjnego sterowania z uczeniem z wykorzystaniem teorii procesów powtarzalnych i układów dwuwymiarowych. W odróżnieniu jednak do wcześniejszych prac, głównym przedmiotem zainteresowania stało się zastosowanie metod częstotliwościowych tak, aby uzyskane wyniki mogły być wykorzystane w praktycznych problemach sterowania, gdzie większość wymagań jakościowych sterowania jest definiowana w dziedzinie częstotliwości. W szczególności, ostatnie opublikowane prace Habilitanta pokazują, że nietrywialnie problemy sterowania wynikające z przyjęcia metod częstotliwościowych jako podstawowego sposobu ich analizy, mogą być rozwiązane poprzez sprowadzenie ich do postaci problemu optymalizacji wypukłej z użyciem lematu Kalmana-Yakubovicha-Popova. Znaczenie i efektywność tego

podejścia w praktycznych zadaniach sterowania zostały już potwierdzone eksperymentalnie z użyciem przemysłowych systemów robotycznych.

Należy bardzo mocno podkreślić, że większość prac naukowych Habilitanta, została wykonana w ramach: pięciu krajowych projektów badawczych (finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz Narodowe Centrum Nauki) oraz pięciu międzynarodowych realizowanych ze środków zagranicznych i polskich. Wszystkie swoje obecne prace badawcze Habilitant realizuje również we współpracy międzynarodowej z ośrodkami naukowymi z wielu krajów na świecie, takich jak: University of Southampton, University of Sheffield (Wielka Brytania), Eindhoven University of Technology (Holandia), University of Poitiers (Francja), University of Rostock, University of Wuppertal (Niemcy), University of Hong Kong i Harbin Institute of Technology (Chiny). Co więcej, Habilitant wielokrotnie uczestniczył i wygłaszał referaty w serii najważniejszych konferencji międzynarodowych obejmujących swoją tematyką szeroki wachlarz zagadnień z zakresu automatyki i sterowania (np.: *IEEE Conference on Decision and Control* lub *American Control Conference*). Dzięki tym wszystkim działaniom dorobek naukowo-badawczy Habilitanta został dostrzeżony na arenie międzynarodowej. Zaowocowało to w styczniu 2012 r. powołaniem go do grona członków komitetu edytorskiego (stanowisko *Associate Editor*) w międzynarodowym czasopiśmie naukowym MULTIDIMENSIONAL SYSTEMS AND SIGNAL PROCESSING wydawanego przez znane i cenione wydawnictwo SPRINGER. Dodatkowo, jako wielkie wyróżnienie należy potraktować pełnienie funkcji wiceprzewodniczącego komitetu programowego symposium *IEEE International Symposium on Intelligent Control*, które odbyło się w ramach *IEEE Multi-Conference on Systems and Control* (MSC 2012), 3–5 października 2012 roku w Dubrowniku (Chorwacja).

Oprócz pracy naukowej, Habilitant wykonuje również pracę dydaktyczną, prowadzi lub prowadził następujące wykłady i ćwiczenia laboratoryjne: Techniki Regulacji Automatycznej, Teoria Sterowania, Sterowanie Procesami Ciągłymi, Sterowanie Robotów oraz Podstawy Robotyki.

#### 4. Wskazanie osiągnięcia naukowego

Osiągnięciem stanowiącym podstawę wniosku habilitacyjnego określonym w art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 18 marca 2011 r. o zmianie ustawy - *Prawo o szkolnictwie wyższym, ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz zmianie niektórych innych ustaw* (Dz. U. nr 84, poz. 55) jest jednotematyczny cykl publikacji pt.:

*"Nowoczesne metody badania stabilności i sterowania liniowymi procesami powtarzalnymi i ich zastosowanie w projektowaniu schematów iteracyjnego sterowania z uczeniem"*.

Stanowi go 17 poniższych prac, które prezentują najważniejsze osiągnięcia naukowe Habilitanta. Zamieszczono w nich szczegółowe omówienie problematyki badania stabilności liniowych procesów powtarzalnych, formułowania odpowiednich warunków stabilności i istnienia sterowników stabilizujących z użyciem metod optymalizacji wypukłej oraz zastosowania tych wyników do formułowania procedur projektowania schematów iteracyjnego sterowania z uczeniem.

1. **W. Paszke**, E. Rogers, K. Galkowski: *KYP lemma based stability and control law design for differential linear repetitive processes with applications*. *Systems & Control Letters*, vol. 62, no 7, pp. 560–566, 2013. (IF=1.667, 30 pkt. według listy MNiSW, udział 80%)
2. **W. Paszke**, E. Rogers, K. Galkowski, Z. Cai: *Robust finite frequency range iterative learning control design and experimental verification*. *Control Engineering Practice*. 2013, artykuł w trakcie publikacji, przyznano identyfikator cyfrowy dokumentu doi: 10.1016/j.conengprac.2013.05.011. (IF=1.669, 30 pkt. według listy MNiSW, udział 70%)

3. **W. Paszke**, O. Bachelier: *Robust control with finite frequency specification for uncertain discrete linear repetitive processes*. Multidimensional Systems and Signal Processing. Dostępny on-line od dnia 14-12-2012, doi: 10.1007/s11045-012-0212-5. (IF=0.857, 20 pkt. według listy MNiSW, udział 90%)
4. **W. Paszke**, E. Rogers, K. Galkowski:  *$\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$  output information based disturbance attenuation for differential linear repetitive processes*. International Journal of Robust and Nonlinear Control, vol. 21, no 17, pp. 1981–1993, 2011. (IF=1.554, 35 pkt. według listy MNiSW, udział 80%)
5. L. Wu, J. Lam, **W. Paszke**, K. Galkowski, E. Rogers, A. Kummert: *Control and filtering for discrete linear repetitive processes with  $\mathcal{H}_\infty$  and  $l_2$ - $l_\infty$  performance*. Multidimensional Systems and Signal Processing, vol. 20, no 3, pp. 235–264, 2009. (IF=0.524, 27 pkt. według listy MNiSW, udział 20%)
6. O. Bachelier, **W. Paszke**, D. Mehdi: *On the KYP lemma and the multidimensional models*. Multidimensional Systems and Signal Processing, vol. 19, no 3–4, pp. 425–447, 2008. (IF=0.486, 27 pkt. według listy MNiSW, udział 45%)
7. **W. Paszke**, K. Galkowski, E. Rogers, J. Lam:  *$\mathcal{H}_2$  and mixed  $\mathcal{H}_2/\mathcal{H}_\infty$  stabilization and disturbance attenuation for differential linear repetitive processes*. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol. 55, no 9, pp. 2813–2826, 2008. (IF=2.043, 32 pkt. według listy MNiSW, udział 70%)
8. L. Wu, J. Lam, **W. Paszke**, K. Galkowski, E. Rogers: *Robust  $\mathcal{H}_\infty$  filtering for uncertain differential linear repetitive processes*. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, vol. 22, no 3, pp. 243–265, 2008. (IF=1.403, 27 pkt. według listy MNiSW, udział 20%)
9. **W. Paszke**, K. Galkowski, E. Rogers, D.H. Owens:  *$\mathcal{H}_\infty$  and guaranteed cost control of discrete linear repetitive processes*. Linear algebra and its applications, vol. 412, no 2, pp. 93–131, 2006. (IF=0.585, 27 pkt. według listy MNiSW, udział 70%)
10. **W. Paszke**, K. Galkowski, E. Rogers, D.H. Owens:  *$\mathcal{H}_\infty$  control of differential linear repetitive processes*. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 53, no 1, pp. 39–44, 2006. (IF=0.922, 27 pkt. według listy MNiSW, udział 70%)
11. **W. Paszke**, E. Rogers, K. Galkowski: *LMI-based design of robust iterative learning control schemes with finite frequency range tracking specifications*. Proceedings of the 2013 American Control Conference - ACC 2013, Waszyngton, USA, 2013, pp. 6724–6729. (udział 70%)
12. **W. Paszke**, E. Rogers, K. Galkowski: *Finite frequency domain design of dynamic controllers for differential linear repetitive processes*. Proceedings of the 2013 American Control Conference - ACC 2013, Waszyngton, USA, 2013, pp. 3189–3194. (udział 70%)
13. **W. Paszke**, K. Galkowski, E. Rogers: *Repetitive process based iterative learning control design using frequency domain analysis*. Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications - CCA 2012. Dubrownik, Chorwacja, 2012, pp. 1479–1484. (udział 80%)
14. **W. Paszke**, E. Rogers, K. Galkowski: *Finite frequency range control law synthesis for differential linear repetitive processes*. Proceedings of the 50<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control and the European Control Conference 2011. Orlando, USA, 2011, pp. 6037–6042. (udział 70%)
15. **W. Paszke**, E. Rogers, K. Galkowski: *On the design of ILC schemes for finite frequency range tracking specifications*. Proceedings of the 49<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control. Atlanta, USA, 2010, pp. 6979–6984. (udział 70%)

16. W. Paszke, O. Bachelier: *New robust stability and stabilization conditions for linear repetitive processes*. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Workshop on Multidimensional (nD) Systems. Saloniki, Grecja, 2009, pp. 101–106. (udział 80%)
17. W. Paszke: *Recent developments in linear repetitive processes theory and applications*. Proceedings of the 5th International Workshop on Multidimensional (nD) Systems - nDS 2007. Aveiro, Portugalia, 2007. (udział 100%)

W powyższym zestawieniu publikacji, wartość współczynnika Impact Factor (IF) danego czasopisma jest określona na podstawie listy Journal Citation Reports i jest zgodna z rokiem opublikowania. Liczba punktów przyznawanych przez MNiSW została określona na podstawie ujednoliconego wykazu czasopism naukowych opublikowanego na stronie <http://www.nauka.gov.pl/>.

Udział Habilitanta został określony na podstawie oświadczeń złożonych przez współautorów.

## Omówienie wyników stanowiących osiągnięcie naukowe

Jednym z najczęściej spotykanych w praktyce problemów regulacji automatycznej jest dobranie takiego sygnału sterowania obiektem, aby jego sygnał wyjściowy dokładnie śledził zadany sygnał odniesienia, gdzie miara dokładności śledzenia jest definiowana z użyciem odpowiedniej normy lub innej miary optymalności. Choć teoria sterowania dostarcza nam szerokiego wachlarza metod pozwalających na rozwiązanie tego problemu, to jednak w większości praktycznych przypadków wskaźniki jakościowe regulacji uzyskanego rozwiązania nie są równoważne początkowym założeniom projektowym. Sytuacja ta spowodowana jest najczęściej brakiem lub niemożliwością dokładnego modelowania rzeczywistej dynamiki układu lub występowaniem niepewności jego parametrów.

Iteracyjne sterowanie z uczeniem (ang. *Iterative Learning Control* - ILC) jest relatywnie nową metodą regulacji automatycznej pozwalającej, dla szczególnych klas problemów, na przewyższenie tradycyjnych trudności powiązanych z synteza regulatora dla uzyskania zadanych wymagań jakościowych regulacji układu zamkniętego. W szczególności, ILC jest techniką sterowania systemami wykonującymi w skończonym przedziale czasowym, powtarzalne zadania (operacje, czynności, ruch itp.). Polega ona na iteracyjnym modyfikowaniu sygnału sterującego w celu zapewnienia dążenia sygnału wyjściowego w kolejnych próbach do zadanego sygnału odniesienia. Klasycznym przykładem takich systemów jest manipulator robotyczny wykonujący punktowe spawanie elementów karoserii samochodowej znajdujących się na linii produkcyjnej. Taki manipulator może być zaprogramowany tak, aby czekał w pozycji początkowej aż kolejna karoseria znajdzie się na odpowiednim miejscu linii produkcyjnej. Gdy to nastąpi, manipulator robotyczny przesuwa element wykonawczy w odpowiednie miejsce zgodnie z zadaną trajektorią przestrzenną, wykonuje spawanie i powraca do pozycji wyjściowej, czekając na pojawienie się kolejnej karoserii. Następnie proces dojścia do pozycji pracy, spawania i powrotu do pozycji wyjściowej (początkowej) jest powtarzany dla kolejnych karoserii. Oczywiście nie jest to jedyny przykład procesu produkcyjnego, gdzie zadana trajektoria ruchu musi być powtarzana wiele razy. W omawianym przykładzie, metoda ILC może być użyta do poprawy trajektorii końcówki narzędzia manipulatora robotycznego. Motywacją jest tutaj fakt, że zastosowanie klasycznego regulatora o stałej strukturze i parametrach (np. regulator proporcjonalno-całkująco-różniczkujący, PID), w przypadku niezmiennych warunków wykonywania operacji spawania w każdym powtórzeniu, skutkuje pojawianiem się tego samego błędu śledzenia (uchybu) zadanej trajektorii. W praktyce błąd ten może być zapisany (tj. przechowany w pamięci) i użyty do wyznaczenia modyfikacji sygnału generowanego przez regulator w kolejnym powtórzeniu tej samej operacji, tak, aby uzyskać zanikanie błędu regulacji. Z tych właśnie względów, tego typu schematy regulacji są niezwykle perspektywicznym obiektem badań, znajdującym dużą liczbę zastosowań w otaczającym nas świecie, wśród których,

oprócz obszaru robotyki manipulacyjnej, należy wymienić: maszyny sterowane numerycznie, np. obrabiarki CNC, steppery do litografii półprzewodnikowej, procesy walcownia stali na zimno i chemiczne procesy wsadowe.

Specyfika metody ILC powodowała, że główne problemy badawcze z zakresu sterowania obiektami wykonującymi powtarzalne operacje koncentrowały się do tej pory wokół zagadnień związanych wyłącznie z uzyskaniem zbieżności procesu eliminacji powtarzalnego uchybu regulacji bez wglądu na dynamikę aktualnie wykonywanej operacji. Ponieważ czas wykonywania operacji przez obiekt jest zawsze ustalony i skończony, z praktycznego punktu widzenia możliwe jest więc wprowadzenie równoważnego opisu w dziedzinie jednej zmiennej niezależnej. Dzięki temu dynamika wzdułuż aktualnie wykonywanej iteracji zostanie pośrednio ukryta i dlatego w tym typie opisów możemy koncentrować się tylko nad dynamiką propagacji błędu z poprzedniej na aktualną iterację. Takie jednak postępowanie, choć bardzo popularne w dostępnej literaturze, posiada wiele wad. Główną z nich jest to, że nie uwzględniamy bezpośrednio wpływu odpowiedzi układu podczas wykonywania iteracji na zbieżność procesu uczenia. Poważnym problemem praktycznym jest też konieczność manipulowania modelami wysokiego rzędu, zależnego od czasu trwania wykonywanej czynności i czasu próbkowania. Co więcej, całość podstawowego procesu projektowania układu regulacji wykorzystującego schemat ILC składała się z co najmniej dwóch oddzielnych etapów. W pierwszym etapie projektujemy regulator w pętli sprzężenia zwrotnego (w celu uzyskania akceptowalnej odpowiedzi układu w trakcie wykonywania aktualnej iteracji). Etap drugi to synteza regulatora (filtra) uczącego, którego zadaniem jest odpowiednie modyfikowanie sygnału sterującego (na podstawie sygnału błędu z poprzedniej iteracji) tak, aby uzyskać odpowiednią zbieżność procesu uczenia (zmniejszania uchybu w kolejnych iteracjach wykonywanej operacji). Nie możemy więc uzyskać wzajemnie dopełniającego się działania obu regulatorów. Równocześnie, w takim postępowaniu niezmiernie trudno jest analizować występowanie niepewności i zakłóceń.

Analiza istniejącego stanu wiedzy i osiągalnych w literaturze rozwiązań problemu eliminacji uchybu regulacji w układach wykonujących powtarzalne operacje wskazuje wyraźnie na brak efektywnych numerycznie metod wykorzystujących fakt, że dynamika układu wykonującego powtarzalne operacje zależy od dwóch zmiennych niezależnych reprezentujących kolejno: numer czynności, która ma oczywiście charakter dyskretny oraz czas związany z wykonywaną czynnością, reprezentowaną przez zmienną o charakterze ciągłym lub dyskretnym. Cały układ jest więc układem dyskretnym lub ciągło-dyskretnym (hybrydowym). Fakt ten predysponuje użycie modeli dwuwymiarowych. Jednak ze względu na skończony czas trwania wykonywanej operacji, druga ze zmiennych posiada ograniczoną wartość i dlatego najbardziej zasadne okazuje się użycie modeli procesów powtarzalnych do analizy rozważanych problemów, tak jak to zostało dokładnie pokazane w pracach [2], [13] i [17]. Należy tutaj mocno podkreślić, że oprócz ILC, istnieje wiele innych zjawisk czy procesów przemysłowych, które mogą być modelowane przy użyciu równań o strukturze identycznej ze strukturą równań procesów powtarzalnych. Metodyka ta znalazła zastosowanie w górnictwie i hutnictwie czy też analizie tzw. procesów sieciowych (ang. *web forming processes*), takich jak produkcja papieru, tekstyliów lub naporowywanie warstw. Dzięki temu rozwój teorii procesów powtarzalnych jest niezwykle istotną gałęzią automatyki.

W związku z powyższym, pierwszoplanowym celem prowadzonych przez Habilitanta badań było opracowanie efektywnych metod badania stabilności i sterowania liniowymi procesami powtarzalnymi i ich zastosowanie w projektowaniu schematów iteracyjnego sterowania z uczeniem. Szczególny nacisk położono na wykorzystanie technik optymalizacji wypukłej z ograniczeniami w formie liniowych nierówności macierzowych (ang. *Linear Matrix Inequalities* - LMIs) oraz zaproponowanie rozwiązań uwzględniających pojawienie się zakłóceń oraz niepewności. Potrzeba opracowania takich metod występuje w niezwykle szerokim wachlarzu zagadnień praktycznych sterowania obiektami wykonującymi powtarzalne operacje, a wynika ze zwiększonych wymagań jakościowych w powyższych zastosowaniach.

W pierwszym etapie pracy, po uzyskaniu stopnia doktora, kontynuowano badania nad syntezą sterowników dla hybrydowych i dyskretnych procesów powtarzalnych. Wyniki tych badań zostały opublikowane w [9] i [10]. W odróżnieniu jednak do opracowań zamieszczonych w pracy doktorskiej, artykuł [10] prezentuje warunki istnienia sterowników

dynamicznych minimalizujących normę  $\mathcal{H}_\infty$  procesu zamkniętego. Wyniki te mają ogromne znaczenie praktyczne, gdyż możemy je zastosować dla przypadków, gdy aktualne wartości zmiennych stanu nie są dostępne pomiarowo. Natomiast w pracy [9], oprócz rozwiązania problemu sterowania minimalizującego pewną funkcję kosztu, opisano dokładnie możliwości wykorzystania uzyskanych wyników do projektowania schematów ILC. W szczególności pokazano, że statyczna i dynamiczna kombinacja sygnału sterującego generowanego przez regulator stabilizujący i sygnału błędu regulacji z poprzedniej iteracji może być z powodzeniem użyta w sterowaniu procesami wykonującymi powtarzalne operacje. Równocześnie wskazano potencjalne zastosowanie wyników do sterowania robotem suwnicowym (karterziańskim). Następnie w pracy [17] zaprezentowano dwuwymiarowy model schematu ILC i zademonstrowano wykorzystanie modeli procesów powtarzalnych do jego analizy. W dalszej kolejności rozważano koncepcję zastosowania filtra (obserwatora) stanu oraz jednocześnie stanu i profilu pasa procesów powtarzalnych, która zaowocowała uzyskaniem wielu interesujących wyników, szczególnie gdy pod uwagę weźmiemy ich potencjalne zastosowanie w schematach sterowania wykorzystujących metodę ILC. Należy tutaj podkreślić, że w przypadku używania modeli powtarzalnych do analizowania schematów ILC, stan i profil pasa (wyjście) procesu mają swoją interpretację fizyczną. Wyniki prac nad filtrami do estymacji stanu zostały zamieszczone w [8] oraz [5]. Co więcej, obie te prace prezentują procedury optymalizacyjne pozwalające na minimalizację błędu estymacji stanu i profilu pasa z użyciem odpowiednio norm  $\mathcal{H}_\infty$  lub  $l_2 - l_\infty$ . Równocześnie, zaprezentowano zastosowanie lematu o eliminacji zmiennej (P. Gahinet, P. Apkarian: *A Linear Matrix Inequality Approach to  $\mathcal{H}_\infty$  Control*. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 1994, vol. 4, pp. 421–448), co pozwoliło na sformułowanie bardziej efektywnych numerycznie warunków istnienia sterowników i filtrów dynamicznych minimalizujących normę  $\mathcal{H}_\infty$  dla dyskretnych i hybrydowych procesów powtarzalnych. Poprawa efektywności została uzyskana poprzez znalezienie równoważnego warunku istnienia sterowników lub filtrów wyrażonego nierównością o mniejszym rozmiarze niż te, które przedstawione są w poprzednich pracach Habilitanta.

Podobne problemy nadal rozważano w pracach [7] oraz [4]. Jednak w odróżnieniu do znanych rozwiązań tego problemu nie zastosowano lematu o eliminacji zmiennej, a jedynie zmodyfikowaną metodę podstawiania zmiennych. Dzięki temu procedura projektowania dynamicznego sterownika minimalizującego odpowiednie wskaźniki jakościowe regulacji (wyrażone przy pomocy normy  $\mathcal{H}_2$  i/lub  $\mathcal{H}_\infty$ ) nie wymaga skomplikowanego i wieloetapowego procesu wyznaczania macierzy sterownika, który był wymagany w poprzednich pracach z tego obszaru.

Równoległe, do prowadzonych badań z zakresu syntezy odpowiednich filtrów i sterowników, powrócono do analizy problemów stabilności asymptotycznej układów wielowymiarowych, a w szczególności dwuwymiarowych ze względu na potencjalne możliwości zastosowania do analizy liniowych procesów powtarzalnych i ich zastosowaniu do budowy schematów ILC. Przyczyną ponownego zainteresowania tymi problemami był burzliwy rozwój badań nad zastosowaniem lematu Kalmana-Yakubovicha-Popova (lemat KYP) w rozwiązywaniu wielu problemów z zakresu teorii sterowania. Związane to jest z faktem, że lemat KYP jest narzędziem pozwalającym na znalezienie dla odpowiednio zdefiniowanych wymagań jakościowych sterowania w dziedzinie częstotliwości (tj. spełnienie których jest zależne od częstotliwości) równoważnego opisu w formie problemu optymalizacji wypukłej z ograniczeniami w postaci LMIs. Jest to szczególnie istotne z tego względu, że problem o niekończonej wymiarowości może zostać przekształcony do skończonego wymiarowego problemu optymalizacyjnego. Pierwszą pracą Habilitanta z tego nurtu jest [6], gdzie zamieszczono wyniki ukazujące zastosowanie lematu KYP do analizy wybranych własności modeli wielowymiarowych. Wymagało to oczywiście rozszerzenia lematu KYP na przypadki dwu- i wielowymiarowe, co w wielu przypadkach było bardzo skomplikowane. Bardziej szczegółowe badania nad tymi kwestiami przeprowadzone przez Habilitanta pozwoliły na zwrócenie uwagi na jedno ze znanych kryteriów stabilności asymptotycznej układów dwuwymiarowych i jego zastosowaniu do sformułowania warunków stabilności tylko klasycznego (czyli takiego, który stosuje się dla układów jednowymiarowych) lematu KYP. Kryterium to wskazuje, że układ dwuwymiarowy jest stabilny asymptotycznie wtedy i tylko wtedy gdy spełnione są 3 warunki. Pierwsze dwa definiują ograniczenia

na wartości własne pewnych macierzy modelu stanowego. Trzeci definiuje ograniczenie na wartości własne pewnej transmitancji. Oczywiście jest, że sprawdzenie dwóch pierwszych warunków nie sprawia żadnych problemów, gdyż są to znane warunki stabilności dla klasycznych układów jednowymiarowych. Problemem natomiast jest warunek trzeci, gdyż wymaga on wykonania obliczeń dla wszystkich punktów (których jest nieskończona liczba) na kole jednostkowym (albo osi urojonej, gdy rozważamy procesy hybrydowe) lub dla wszystkich częstotliwości (jeśli rozważać będziemy rozważać interpretacje tego warunku w dziedzinie częstotliwości). Dlatego też sprawdzenie tego warunku łączy się z dużymi problemami natury obliczeniowej. Dodatkowo utrudnieniem jest analiza stabilności procesów z wieloma wejściami i wieloma wyjściami (ang. MIMO - *Multi-Input Multi-Output*). W takim przypadku sprawdzenie warunku trzeciego komplikuje się, gdyż wymaga on wyliczenia wartości własnych macierzy transmitancji, która w przypadku MIMO jest macierzą wielomianową. Z punktu widzenia prowadzonych badań, najważniejszym faktem jest to, że warunek stabilności wzdłuż pasa dla liniowych procesów powtarzalnych jest w szczególnym przypadku warunkiem stabilności asymptotycznej równoważnego układu dwuwymiarowego, co ukazane jest np. w pracy [3] lub [17]. Jest to spowodowane tym, że w praktycznym zastosowaniu modeli procesów powtarzalnych, np. do syntezy schematów ILC, wymaga się uzyskania tylko ograniczonych wartości profili pasa dla wszystkich możliwych długości pasa (czyli długości czasu trwania wykonywanej operacji, gdy rozważamy ILC), a w tym dla przypadku gdy długość pasa dąży do nieskończoności (czyli druga zmienna niezależna nie ma ograniczonej wartości - tak jak jest to w przypadku dwuwymiarowym). Atrakcyjność formułowania warunków stabilności wzdłuż pasa procesów powtarzalnych w wyżej wymieniony sposób zapoczątkowało zintensyfikowanie prac nad jego wykorzystaniem w praktycznych problemach sterowania. Historycznie pierwszą pracą wskazującą zastosowanie tak sformułowanego warunku stabilności do analizy procesów powtarzalnych jest: W. Paszke, P. Rapisarda, E. Rogers, M. Steinbuch: *Dissipative stability theory for linear repetitive processes with application in iterative learning control* opublikowana podczas specjalnego sympozjum na temat ILC, zorganizowanego podczas 48<sup>th</sup> *IEEE Conference on Decision and Control*, 2009 (Szanghaj, Chiny). Jednak ze względu na bardzo ograniczony dostęp do tej publikacji (materiały z tego sympozjum nie są umieszczone w bazie IEEE Xplore) nie została ona ujęta w wykazie osiągnięć Habilitanta. Oprócz prezentacji możliwości uzyskiwania nowych warunków stabilności wzdłuż pasa procesów powtarzalnych z użyciem lematu KYP wskazano na problem przy próbie adaptacji otrzymanych warunków do syntezy schematów ILC. Problem jest związany z trudnością w przekształceniu pewnej nierówności macierzowej do postaci LMI, umożliwiającej jego rozwiązanie przy pomocy znanych pakietów numerycznych. Dlatego w pierwszej kolejności opracowano tylko warunki pozwalające na wyznaczenie odpowiedniego filtra uczącego w schemacie ILC, co wymagało założenia, że istnieje już odpowiedni sterownik stabilizujący. Opublikowane one są w pracy [15], które później zostały rozszerzone i umieszczone w [11]. Wyniki tych prac mogą być powszechnie wykorzystane w praktyce, gdyż pokazują one jak można zmodyfikować już istniejący schemat sterowania obiektem wykonującym powtarzalne operacje tak, aby zmniejszać uchyb podczas kolejnych iteracji. Na szczególną uwagę zasługuje użycie w tych pracach uogólnionego lematu KYP (T. Iwasaki, S. Hara: *Generalized KYP lemma: unified frequency domain inequalities with design applications*. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 50, no 1, pp. 41–59, 2005). Dzięki temu mamy możliwość ograniczenia zakresów częstotliwości w których dokonywana jest analiza. W szczególności, podczas procedury syntezy schematów ILC, wymagane jest aby ograniczyć zakres częstotliwości dla których przeprowadzane jest uczenie. Z praktycznego punktu widzenia ma to duże znaczenie, gdyż sygnał odniesienia, który chcemy śledzić ma ograniczone widmo częstotliwościowe i dlatego należy ująć w procesie uczenia tylko te częstotliwości, które występują w widmie śledzonego sygnału. Co więcej, w zakresie wysokich częstotliwości (powyżej najwyższej częstotliwości występującej w widmie częstotliwościowym śledzonego sygnału) najczęściej występują różnego rodzaju zakłócenia i szumy pomiarowe. Z tego powodu częstotliwości te powinny być tłumione. Oczywiście, w praktyce inżynierskiej należy brać pod uwagę znacznie więcej wymagań, jednak większość z nich jest właśnie formułowana w odpowiednich zakresach częstotliwości odpowiedzi częstotliwościowej układu. Wszystko to przyczyniło się do tego, że uogólniony lemat KYP stał



się podstawowym narzędziem, z którego korzystał Habilitant w ostatnim okresie swojej pracy (od 2010 r.).

Na szczególną uwagę zasługują również badania dotyczące analizy odpornej stabilności liniowych procesów powtarzalnych, a tym samym projektowania schematów ILC ograniczających wpływ niepewności modelu sterowanego obiektu. W tym kontekście najważniejsze są wyniki zaprezentowane w pracach [16] i [3]. W obu tych pracach zaprezentowano sposoby ujęcia wpływu niepewności, gdy wartości elementów macierzy modelu obiektu nie są znane ale należą do pewnego obszaru wypukłego (simpleksu). W szczególności, pokazano jak zastosować funkcje Lapunowa zależne od parametru (ang. *parameter-dependent Lyapunov functions*) w celu uzyskania mniej konserwatywnych warunków stabilności. Praca [16] dotyczy analizy wpływu niepewności na standardowy warunek stabilności, a praca [3] definiuje warunki istnienia rozwiązania rozważanych problemów, gdy wymagania jakościowe określone są w różnych zakresach częstotliwości. Dodatkowo, w obu tych pracach (szczegółowo w [3]) pokazane jest jak można dokonać relaksacji wynikowego problemu optymalizacyjnego poprzez zastosowanie lematu o eliminacji zmiennej i dodanie nowych dodatkowych zmiennych. Prace nad wpływem niepewności kontynuowano, a ich rezultaty opublikowano m. in. w [2], gdzie przedstawiono jedno z nowych rozwiązań dotyczących ujęcia wpływu niepewności opisanych przy pomocy nieznannej funkcji, której norma jest jednak ograniczona. Ponownie zastosowano lematy o eliminacji zmiennej oraz KYP tak, aby była możliwość badania wpływu niepewności, również w różnych zakresach częstotliwości. Dodatkowo zawarto wyniki eksperymentalnej weryfikacji zaproponowanych schematów sterowania, które potwierdzają ich efektywność i odporność na wpływ niepewności modelu obiektu.

Najlepszym podsumowaniem wyników osiągniętych przez Habilitanta jest opublikowanie pracy [1] będącej znaczącym rozszerzeniem rezultatów zawartych w [14]. Praca [1] przedstawia całościowe ujęcie kwestii wykorzystania lematu KYP do analizy stabilności i projektowania sterowników dla liniowych procesów powtarzalnych w wersji hybrydowej, wskazując ILC jako praktyczne zastosowanie opracowanych wyników. W pracy tej pokazano jak znane już warunki stabilności wzdłuż pasa dla liniowych procesów powtarzalnych są ze sobą połączone poprzez lemat KYP. Dzięki temu, w relatywnie łatwy sposób możemy wykazać równoważność tych warunków stabilności lub wzajemne wynikanie jednego warunku stabilności z drugiego. Co więcej, w pracy tej pokazane jest, że pełen zakres częstotliwości możemy podzielić na dowolną liczbę podzakresów i dla każdego z nich oddzielnie możemy zastosować lemat KYP. W wyniku takiego podejścia można zwiększać liczbę podzakresów częstotliwości, a tym samym zmniejszać stopień konserwatywności wynikowego warunku stabilności. Teoretycznie poprzez zwiększenie liczby podzakresów do nieskończoności możemy otrzymać warunek konieczny i wystarczający stabilności wzdłuż pasa. Wprowadzenie tych podzakresów pozwala również na określenie w każdym z nich odpowiednich wymagań jakościowych sterowania. W szczególności ukazane jest, jak można dodać wymagania dotyczące odpowiedniego ulokowania biegunów macierzy systemowej układu zamkniętego w wybranych obszarach lewej półpłaszczyzny zespolonej, uzyskując w ten sposób możliwość kształtowania odpowiedzi układu podczas wykonywania bieżącej iteracji.

Istotną kwestią poruszaną w [13] oraz [2] jest możliwość zastosowania uzyskanych wyników w sterowaniu obiektami rzeczywistymi. Pierwsze wyniki przeprowadzonych eksperymentów z użyciem robota suwnicowego zostały zamieszczone w [2] i potwierdzają one ogromną przydatność praktyczną uzyskanych rezultatów. Praca [13] przedstawia jeden ze sposobów rozwiązania problemów natury numerycznej związanej z użyciem opracowanych procedur projektowania schematów ILC. W praktycznych przypadkach mamy właściwie tylko do czynienia z modelami transmitancyjnymi rzędu względnego równego lub większego od jeden. Wynikiem tego są określone własności modelu stanowego, gdzie dla rozważanego przypadku iloczyn pewnych macierzy modelu jest równy 0, powodując problemy numeryczne przy rozwiązywaniu LMIs. Proponowane rozwiązanie polega na zastosowaniu filtra dolnoprzepustowego z częstotliwością odcięcia znacznie większą od najwyższej częstotliwości występującej w widmie sygnału odniesienia. Dlatego filtr ten ma zanedbywalny wpływ na częstotliwości, w których następuje uczenie, a przy tym pozwala uniknąć wcześniej

wspomnianych problemów numerycznych. Eksperymentalne wyniki testów laboratoryjnych, gdzie zastosowane schematy sterowania zostały zaprojektowane z użyciem wyników pracy [13], zostaną opublikowane w najbliższym czasie.

Podsumowując, oryginalny wkład Habilitanta w obszarze badania stabilności i sterowania liniowymi procesami powtarzalnymi i ich zastosowaniu w projektowaniu schematów iteracyjnego sterowania z uczeniem obejmuje następujące kwestie:

- systematyzacja klasycznych warunków stabilności wzdłuż pasa liniowych procesów powtarzalnych w wersji dyskretnej i hybrydowej i wskazanie ich potencjalnego zastosowania w syntezie schematów ILC,
- relaksacja znanych warunków stabilności w formie liniowych nierówności macierzowych poprzez zastosowanie lematu o eliminacji zmiennej,
- opracowanie efektywnych metod analizy modeli procesów powtarzalnych z niepewnościami opisanymi nieznaną funkcją o ograniczonej normie lub otoczeniem wypukłym oraz ich zastosowanie w syntezie schematów ILC, a w szczególności:
  - wykorzystanie funkcji Lapunowa zależnych od parametru w celu zmniejszenia stopnia konserwatywności otrzymanych warunków odpornej stabilności i stabilizacji,
  - umożliwienie maksymalizacji zakresu dopuszczalnych zmian niepewnych parametrów.
- opracowanie metod projektowania schematów iteracyjnego sterowania z uczeniem dla układów ciągłych i dyskretnych z użyciem teorii stabilności liniowych procesów powtarzalnych i możliwością definiowania wymagań jakościowych w zadanych zakresach częstotliwości. W szczególności zaadresowano następujące kwestie:
  - możliwość wprowadzenia dowolnej liczby podzakresów częstotliwości i określania w nich wymagań jakościowych regulacji,
  - zastosowanie zmiennej macierzowej, która jest przedziałami stała, do relaksacji wynikowego warunku stabilności,
  - użycie lematu o eliminacji zmiennej mające na celu relaksację wynikowego warunku stabilności zapisanego w formie LMI,
  - adaptacja metody lokowania biegunów macierzy systemowej wynikowego procesu powtarzalnego i uzyskanie dzięki temu wpływu na kształtowanie dynamiki wykonywanej czynności podczas aktualnej iteracji,
  - umożliwienie minimalizacji wzmocnień układu w wybranych przedziałach częstotliwości.
- opracowanie metody pozwalającej na przezwycięzenie problemów z definiowaniem wymagań jakościowych regulacji dla układów względnego rzędu większego od 1,
- rozwiązanie problemu istnienia sterowników dynamicznych minimalizujących normę  $\mathcal{H}_\infty$  i/lub  $\mathcal{H}_2$  zamkniętego procesu powtarzalnego, a w tym:
  - opracowanie warunków z wykorzystaniem lematu o eliminacji zmiennej,
  - zastosowanie metody podstawiania i zamiany zmiennych, a przez to znaczne uproszczenie procedury syntezy sterownika.
- opracowanie metody syntezy dynamicznych filtrów wyznaczających estymatę stanu i profilu pasa dla dyskretnych i hybrydowych procesów powtarzalnych, a w tym przedstawienie procedury minimalizacji błędu estymacji stanu i profilu pasa z użyciem norm  $\mathcal{H}_\infty$  i  $l_2-l_\infty$ ,
- rozwiązanie problemu projektowania schematów ILC, gdzie zastosowano ograniczenie pasma częstotliwości tylko do zakresu częstotliwości występujących w widmie sygnału uczonego,

- sformułowanie i rozwiązanie problemu projektowania dynamicznego sterownika (filtra) uczonego na podstawie kształtowania i dopasowania odpowiedzi częstotliwościowej do odpowiedzi odwrotności procesowej funkcji czułości w pewnych zakresach częstotliwości,
- walidacja koncepcji i metod na podstawie modeli numerycznych układów elektromechanicznych posiadających wiele praktycznych aplikacji inżynierskich, m.in. układu dwóch rotujących mas połączonych sprężystym wałem, robota suwnicowego, suwnicy dźwigowej oraz układu do umieszczania towaru na półkach magazynowych.

Wybrane metody projektowania schematów ILC przetestowano eksperymentalnie i potwierdzono ich efektywność w praktycznych zadaniach sterowania. Przedstawione powyżej rezultaty prac badawczych Habilitanta pokazują, że odkrył on i opisał nowe podejście do analizy wybranych klas układów dwuwymiarowych, a w szczególności liniowych procesów powtarzalnych (w formie dyskretnej i hybrydowej) i ukazał jak te rezultaty mogą być wykorzystane w syntezie schematów ILC. Wszystko to stanowi osiągnięcie naukowe wymienione w odpowiedniej ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Uwaga: W nawiasach kwadratowych znajdują się numery prac z zestawienia prac stanowiących osiągnięcie naukowe Habilitanta.

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Istotnym nurtem działalności naukowej Habilitanta była również kontynuacja prac nad zagadnieniami omawianymi w pracy doktorskiej. Przede wszystkim należy tutaj wspomnieć o dalszym rozwijaniu teorii układów dwuwymiarowych z pojedynczymi i wielokrotnymi opóźnieniami. Wyniki tych prac można odnaleźć w trzech artykułach zamieszczonych w materiałach prestiżowych konferencji międzynarodowych, jak np. *IEEE Conference on Decision and Control* lub *International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems*. Równocześnie, prowadzono prace nad formułowaniem problemów stabilności i filtracji ciągłych układów dwuwymiarowych, czego wynikiem są dwa artykuły naukowe opublikowane w czasopismach znajdujących się w bazie Journal Citations Reports. Jednak, ze względu na poważne problemy ze znalezieniem praktycznych zastosowań opracowywanych rezultatów ten nurt badawczy był marginalizowany w kolejnych latach pracy naukowej.

Należy podkreślić, że cały dorobek publikacyjny Habilitanta ukazał się w wydawnictwach recenzowanych o szerokim zasięgu, a przez to został doceniony na arenie międzynarodowej. Wyrazem tego jest wiele cytowań prac Habilitanta przez autorów zagranicznych, co zostało przedstawione w poniższej tabeli:

	Scopus	Web of Science	Google Scholar
<b>H-index</b>	10	9	13
Liczba dokumentów w bazie	42	35	60
Liczba wszystkich cytowań	299	241	448
Liczba cytowań bez autocytowań	223	214	b.d.

Odczyt liczby cytowań prac Habilitanta wykonano dnia 2013-06-28.

Sumaryczny współczynnik IF publikacji naukowych, których autorem lub współautorem jest Habilitant, wynosi 14,176 (wyznaczony dla 12 artykułów opublikowanych po doktoracie, tj. od 2005 r. do 2013 r.), gdzie wartość współczynnika IF dla danego czasopisma jest zgodna z rokiem opublikowania (dla publikacji z lat 2012-2013, IF jest na poziomie roku 2012).

Zielona Góra, 2 lipca 2013 r.

Wojciech Paszke  
