

Wpłynęło dnia ...2. 04. 2025...

Zarejestrowano pod nr ...510-1-12/24...

Podpis ... Gdańsk, 27.03.2025 dm

Profesor dr hab. inż. Zdzisław Kowalczuk
Katedra Systemów Decyzyjnych i Robotyki
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Politechniki Gdańskiej

O C E N A
dorobku naukowego i działalności naukowej
dr inż. Krzysztofa Lalika

w postępowaniu dotyczącym przyznania stopnia
doktora habilitowanego nauk inżynierijno-technicznych w dyscyplinie
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne
AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZEJ W KRAKOWIE
prowadzonym przez
Radę Dyscypliny AEETK AGH

Opinię przygotowałem na podstawie załączonej szczegółowej dokumentacji przewodu habilitacyjnego w języku polskim, zawierającej – oprócz danych wnioskodawcy (załącznik 1) i kopii dyplomu doktora (zał. 2) – autoreferat (zał. 3) zawierający informację o stopniach naukowych i zatrudnieniu oraz omówienie osiągnięcia naukowo-badawczego w formie jednotematycznego cyklu publikacji i osiągnięć projektowych pod wspólną nazwą: „*Inteligentne systemy diagnostyczne i sterowania wspomagane sztucznymi sieciami neuronowymi*”, który stanowi obszernie omówienie w języku polskim problematyki badawczej (na tle dziesięciu załączonych publikacji naukowych i dwu wybranych projektów) z podkreśleniem oryginalności i merytorycznego wkładu habilitanta. Autor przedstawia też argumenty dotyczące istotnej aktywności naukowej, osiągnięć dydaktycznych, organizacyjnych, popularyzujących naukę i innych. Załącznik nr 4 daje wykaz osiągnięć naukowych z wkładem do dziedziny oraz danymi bibliograficznymi. Prezentację osiągnięcia zamyka lista oświadczeń współautorów (zał. 5) oraz zestaw publikacji stanowiących główną, naukową część osiągnięcia (zał. 6). Dostarczony obszerny opis wraz z oryginalnymi pracami jasno prezentuje konsekwentną drogę autora do finalnych wyników (choć podsumowanie w postaci monografii, nawet z zachowaniem chronologii osiągnięć, byłoby pewno lepszym życiowym zwieńczeniem wysiłku badawczego naukowca).

I. Ogólna naukowa sylwetka habilitanta

Dr Krzysztof Lalik uzyskał w roku 2009 dyplom magistra inżyniera na kierunku Automatyka i Metrologia Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, na podstawie pracy pt. „*Samowzbudny akustyczny system do pomiaru zmian naprężeń*” u promotora prof. dr hab. inż. Janusza Kwaśniewskiego (07 VII 2009). Stopień doktora nauk technicznych został mu nadany w roku 2014 w dyscyplinie Mechanika i Budowa Maszyn przez tenże Wydział na podstawie rozprawy doktorskiej pt. „*Zintegrowany system autodynowy w pomiarze przyrostu naprężeń*” również pod opieką profesora Janusza Kwaśniewskiego (30 X 2014). Aplikant posiada stabilne zatrudnienie w Katedrze Automatyzacji Procesów Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, gdzie pracował najpierw jako pracownik naukowy (X 2009 – XII 2012) i asystent (XII 2012 – XI 2014), a następnie jako adiunkt naukowo-dydaktyczny (począwszy od XII 2014 roku).

Habilitant posiada pokaźny dorobek w zakresie współpracy z instytucjami naukowymi oraz przemysłowymi. Jego badania dotyczyły wielu aspektów naukowych oraz problemów techniki i technologii na różnych poziomach szczegółowości, związanych głównie z tematyką inteligentnych systemów automatyzacji i diagnostyki opartych na koncepcji uczących się sztucznych sieci neuronowych. Wyniki prac badawczych znalazły się w dziesięciu artykułach opublikowanych w prestiżowych czasopismach: *Mechanical Systems and Signal Processing* (2016/IF=7.9), *Measurement* (2017/IF=5.2), *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control* (2021/IF=2.3), *Neural Computing & Applications* (2024/IF=4.7), *Energy* (2024/IF=9.0) oraz (autorskie) *IEEE Access* (2024/IF=3.7), jak również *Energies* (2021, 2021/IF=3.0), *Materials* (2021/IF=3.4) i *Sensors* (2023/IF=3.7) wydawnictwa MDPI.

Wiele osiągniętych wyników naukowych znalazło też swoje zastosowanie praktyczne, które habilitant zawarł w swoim wniosku w postaci osiągnięcia projektowego: (1) w zakresie modelowania i analizy danych dla optymalizacji według wybranych wskaźników oceny technologicznego procesu mielenia kamienia wapiennego oraz (2) w postaci rozwiązanego zadania opracowania systemu robotów usługowych z wykorzystaniem koncepcji uczenia maszynowego i cyfrowego bliźniaka.

Habilitant dysponuje dużym doświadczeniem praktycznym oraz wykazuje bogaty zbiór różnorodnych przejawów współpracy przemysłowej w postaci formalnych projektów naukowo-badawczych w obszarze efektywnego wykorzystania metod sztucznej inteligencji.

Po uzyskaniu stopnia doktora Krzysztof Lalik opublikował 57 prac naukowych (23 artykuły w czasopismach, w tym 21 na liście JCR i 11 w MDPI), w tym także 34 współautorskie prace konferencyjne. Ponadto w kategoriach nauko-metrycznych może pochwalić się, według uznanych baz danych, wysoką liczbą cytowań 221-482 oraz indeksem Hirscha 10-12 i całkowitym współczynnikiem wpływu IF około 80.

II. Ocena dorobku naukowego

Ocena dorobku naukowego obejmuje ogólną charakterystykę obszaru badawczego, dorobek naukowy i warsztatowy, charakterystykę dorobku i zawartość naukową ocenianej serii publikacji (w tym uwagi krytyczne) oraz konkluzję dotyczącą dorobku i wskazanie wkładu autora w rozwój dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

Kandydat występuje o uznanie jego dorobku naukowego jako podstawy ubiegania się o stopień doktora habilitowanego, na podstawie przedstawionego cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych i oryginalnego dorobku wdrożeniowego pod wspólnym tytułem „*Inteligentne systemy diagnostyczne i sterowania wspomagane sztucznymi sieciami neuronowymi*”.

1. Ogólna charakterystyka obszaru badawczego

Od najwcześniejszych etapów rozwoju nauki optymalizacja i modelowanie stanowią centralne i fundamentalne zagadnienia, wokół których rozwijają się nauki techniczne. Obecnie – w pewnym uproszczeniu i korzystając z powszechnego postrzegania spraw – jesteśmy świadkami i uczestnikami szczególnej ‘rywalizacji’ między podejściem matematyczno-fizycznym MF (akademickim, teoretycznym, abstrakcyjnym, logicznym, kontekstowym, jawnym, modelowym, ilościowym, szczegółowym) a sztuczną inteligencją AI (przemysłową, praktyczną, cybernetyczną, technologiczną, narzędziową, niejawną, bezmodelową, jakościową, masową).

W ten sposób już wiele nierozwiązywalnych problemów znalazło swoje rozwiązanie. Najprawdopodobniej w tej chwili powinniśmy raczej myśleć tylko o dostosowaniu się do tej sytuacji (przetłumieniu luki między podejściami MF i AI) i eksploracji potencjału w świetle ich możliwości integracyjnych i komplementarności. Na marginesie, przy tej okazji pojawił się kolejny problem, który wiąże się z pokonaniem problemu doboru zbiorów danych do zadań opartych na wytrenowanych (głębokich) sieciach neuronowych (ANN/DNN), gdzie istnieje silna zależność efektywności metod (głębokiego) uczenia od danych treningowych (związana m.in. z dokładnością adnotacji, jakością danych/obrazów, a także rozmiarem, różnorodnością i równowagą stosowanych zbiorów danych).

Dr Krzysztof Lalik przedstawia przykład solidnej standardowej i stacjonarnej kariery naukowej. W ramach swojej działalności naukowej prowadził intensywne badania naukowe i rozwojowe, w ramach których systematycznie powiększa zasoby wiedzy i zakres jej wykorzystania, rozwiązuje dostrzeżone problemy techniczne i tworzy nowe efektywne wdrożenia wyników naukowych.

Kandydat występuje o uznanie jego dorobku naukowego jako podstawy ubiegania się o stopień doktora habilitowanego, na podstawie przedstawionego cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych i oryginalnego dorobku wdrożeniowego pod wspólnym tytułem „Inteligentne systemy diagnostyczne i sterowania wspomagane sztucznymi sieciami neuronowymi”.

2. Motywacja, warsztat naukowy i dorobek

Oceniany dorobek naukowy doktora Krzysztofa Lalika jest wynikiem jego silnego skupienia na wybranych aspektach naukowych związanych z projektowaniem zaawansowanych systemów monitoringu i diagnostyki konstrukcji mechanicznych w oparciu o teorię sterowania oraz metody sztucznej inteligencji, rozwijając też nowe podejścia do sterowania adaptacyjnego/rekonfiguracyjnego wykorzystywane w celach diagnostycznych (wg aksjomatu sterowania tolerującego usterki, FTC).

W ostatnich latach rozwiązania wspierane przez sieci neuronowe umożliwiły wprowadzenie wielu innowacyjnych metod, które umożliwiają bardzo wysoką precyzję modelowania, poprawiając tym samym wydajność systemów nadzoru, monitorowania, diagnostyki i sterowania. W tym zamierzeniu kandydat rozważa nowoczesne, zaawansowane metody monitorowania naprężeń mechanicznych, diagnostyki usterek lub uszkodzeń i sterowania procesami przemysłowymi, które są wdrażane w zintegrowanych systemach, które cechują się coraz większą multidyscyplinarnością.

Operacje wykrywania naprężeń opierają się na odpowiednich technikach tensometrycznych (ekstensometrii, mierzenia odkształceń), gdzie cienkie metalowe paski zwykle są przyklejone do badanej powierzchni (w celu elektrycznego pomiaru zmiany ich długości).

Metody dyfrakcji rentgenowskiej (z analizą wzoru ugięcia takiej fali w materiale) są złożone. Spektroskopia akustyczna oparta na analizie fal ultradźwiękowych wymaga wysokich/megahercowych częstotliwości. Zaś interferometria, opierająca się na analizie interferencyjnych wzorców światła przechodzącego przez materiał, jest odpowiednia w warunkach laboratoryjnych.

Metody emisji akustycznej, które wykrywają fale akustyczne generowane testowanym materiałem wskutek zjawisk wewnętrznych (pęknięć, tarcia, korozji), są szczególnie przydatne w nieniszczącym monitorowaniu stanu struktur oraz w wykrywaniu i zlokalizowaniu źródła takich emisji.

Nowe rozwiązanie w dziedzinie defektoskopii i oceny naprężenia pod nazwą Samowzbudny System Akustyczny SAS (*self-excited acoustic system*) pojawiło się w roku 2011 i było przedmiotem intensywnych badań rozwijanych przez kandydata w trakcie pracy nad doktoratem (2014). Dotyczyły one głównie potwierdzenia przydatności tego efektu w pomiarze naprężenia mechanicznego oraz analizy wpływu kluczowych parametrów na uzyskane wyniki. System ten opierający się na efekcie samowzbudzenia, gdzie dzięki zastosowaniu pętli sprzężenia zwrotnego dodatniego drgający układ wzbudzany jest do cyklu granicznego o częstotliwości zależnej od przyłożonego nacisku. Zależność tę można odwrócić i w ten sposób stan badanej konstrukcji może być wyznaczony na podstawie tej częstotliwości. Nie dało się jednak rozróżnić skutków defektów od zmian naprężenia. System SAS charakteryzował się efektem przełączania między cyklami granicznymi, a zastosowane metody filtracji nie dawały zadowalających rezultatów.

Złożoność praktycznych problemów diagnostycznych często prowadzi do konieczności uwzględnienia i/lub skorzystania z jednocześnie wielu narzędzi i technologii (akustycznych, układów FPGA, sztucznej inteligencji, algorytmów uczenia maszynowego, czy tzw. rzeczywistości rozszerzonej – AR). Tradycyjne metody diagnostyczne wymagają pieczołowitego przygotowania infrastruktury sensorycznej i zaawansowanej wiedzy eksperckiej przy przetwarzaniu i interpretowaniu danych sensorycznych. Diagnostyka w nowoczesnym wydaniu opiera się na zaawansowanej analizie takich danych przy użyciu uczenia maszynowego i modeli sieciowych (neuronowych).

Samowzbudne systemy wsparte sieciami neuronowymi mogą diagnozować naprężenia i defekty bardzo precyzyjnie. Podejście predykcyjne (*predictive maintenance*) oparte na sieciach neuronowych pozwala również na wykrywanie wzorców, które nie są nawet widoczne dla eksperta, oraz sterowanie złożonymi systemami dzięki zdolności sieci neuronowych do modelowania dowolnie złożonych, nieliniowych funkcji ciągłych.

Sterowanie adaptacyjne z użyciem modeli neuronowych jest już dobrze rozwiniętą metodą, która umożliwia adaptację parametrów sterowania w czasie rzeczywistym do zmieniających się warunków pracy. Kiedy klasyczne podejścia adaptacyjne zawodzą, przy dzisiejszym stanie wiedzy, bardzo szybko sięga się do sieci neuronowych w celu uzyskania wyższej efektywności systemów. Przykładem jest też sterowanie predykcyjne (ustalone lub adaptacyjne) z modelem neuronowym NMPC (*neural model predictive control*), które polega na stosowaniu tego specyficznego modelu do zwykłego przewidywania przyszłych stanów systemu i predykcyjnej optymalizacji trajektorii obiektu.

Sieci neuronowe znalazły również zastosowanie w sterowaniu odpornym (*robust control*), gdzie kluczowe jest utrzymanie stabilności i jakości systemu w niepewnych warunkach, na przykład w sterowaniu robotami mobilnymi, gdzie wymagana jest odporność na wiedzę (zmienne warunki terenowe) oraz niewrażliwość na zakłócenia.

Szczególnie atrakcyjna jest fuzja koncepcji sterowania adaptacyjnego i metod uczenia maszynowego (*deep learning*), skutkująca nową formalną postacią sterowania adaptacyjnego, która pozwala na ciągłą korektę sterowania w celu utrzymania wysokiej jakości sterowania.

Sterowanie w oparciu o modele sztucznych sieci neuronowych może również dotyczyć znajdowania optymalnych strategii sterowania (*samostrójenia*) poprzez uczenie ze wzmocnieniem (*reinforcement learning*), kiedy sieci uczą się optymalnych zasad sterowania na podstawie bieżącej interakcji z otoczeniem, na przykład w systemach zaawansowanego wielowymiarowego sterowania obiektami przemysłowymi, urządzeniami energetycznymi, czy robotami.

Jak wspomniano we wstępie (p. 1), przyszłość należy prawdopodobnie do metod hybrydowych, łączących klasyczne metody sterowania z modelami neuronowymi, jak w przypadku dostrajania parametrów tradycyjnego PID, stosowanego w cyfrowych układach sterowania bezpośredniego (*direct digital control*), przy pożądanym efekcie poprawy reakcji na zakłócenia i zmiany obciążenia.

Tego rodzaju bezpośrednie sterowanie (również z wykorzystaniem modeli ANN) polega na bezpośrednim generowaniu sygnałów sterujących (nieliniowym) procesem na podstawie bieżących danych wejściowych. Przypomina to znaną od dawna (bez)pośrednią metodę adaptacji (akomodacji) do zmieniających się warunków, w której pomija się fazę odrębnego modelowania matematycznego i bieżącej identyfikacji nadzorowanego procesu.

W ciągu ostatnich kilku lat systemy wspomagane sieciami neuronowymi stały się kluczowym narzędziem w wielu dziedzinach techniki, w tym w projektowaniu systemów diagnostyki i sterowania. Kluczowym osiągnięciem kandydata jest propozycja, konstrukcja i walidacja zestawu przetworników pomiarowych wyposażonych w neuronowy algorytm sterowania samowzbudnym układem SAS, przetwarzania danych i wsparcia użytkownika w ocenie stanu badanych obiektów. Habilitant wykazał, że innowacyjny system działający w zamkniętej pętli z dodatnim sprzężeniem zwrotnym umożliwia efektywne monitorowanie stanu obiektu w czasie rzeczywistym.

W autoreferacie autor omawia swoje najważniejsze osiągnięcia polegające na wsparciu się na koncepcji sieci neuronowych w procesach sterowania, monitorowania naprężenia i diagnostyki uszkodzeń, skupiając się przy tym na modelowaniu, projektowaniu i badaniach eksperymentalnych. Dostarczona analiza prezentuje złożony obraz wpływu rozważanych algorytmów i metod na poprawę skuteczności diagnostyki z wykorzystaniem samowzbudnego akustycznego systemu (SAS), a także w zagadnieniu proaktywnej konserwacji PdM (*predictive maintenance*), która w czasie rzeczywistym opiera się na zasobach, danych historycznych o wydajności i odpowiedniej analizie, aby prognozować, kiedy nastąpi usterka lub awaria – przewidując zaś stan procesu/installacji w eksploatacji (np. wg MTBF czy RUL), można dokładnie oszacować, kiedy należy wykonać operacje serwisowe.

Powyższe kwestie (głównie SAS+ANN) są przedmiotem około stu współautorskich publikacji, w tym rozdziałów książkowych. Ponadto, proponowane rozwiązania były również przedmiotem wniosków patentowych i zatwierdzonych patentów. Natomiast cykl prac wchodzących w skład analizowanego osiągnięcia naukowego dra Krzysztofa Lalika stanowi solidnie udokumentowany krok w kierunku rozwiązania wielu zauważonych przez habilitanta problemów projektowych.

Wynikiem rzetelnej standardowo 10-letniej aktywności i współpracy naukowej dr K. Lalika po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych w roku 2014 jest imponująca 10-pozycyjna lista wybranego dorobku publikacyjnego.

Osiągnięciem stanowiącym podstawę jego wniosku habilitacyjnego (określonym 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 późniejszymi zm.) jest jednotematyczny cykl powiązanych tematycznie prac naukowo-wdrożeniowych pod wspólnym tytułem „*Inteligentne systemy diagnostyczne i sterowania wspomagane sztucznymi sieciami neuronowymi*”, obejmujący:

- [H1] J. KWAŚNIEWSKI, I. DOMINIK, K. LALIK, K. HOLEWA: Influence of acoustoelastic coefficient on wave time of flight in stress measurement in piezoelectric self-excited system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, vol. 78, pp. 143-155, IF=7.9
- [H2] K. LALIK, I. DOMINIK, P. CWIĄKAŁA, Janusz KWAŚNIEWSKI: Integrated stress measurement system in tower crane mast. *Measurement*, 2017, vol. 102, pp. 47-56, IF=5.2
- [H3] I. DOMINIK, K. LALIK, S. FLAGA: Modeling of self-excited stress measurement system. *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control* (SAGE), 2021, vol. 40, no. 2, pp. 1-15, IF=2.3
- [H4] K. LALIK, I. DOMINIK, P. GUT, K. SKRZYPKOWSKI, W. KORZENIOWSKI, K. ZAGORSKI: Non-destructive acoustical rock bolt testing system with intelligent filtering in Salt Mine 'Wieliczka'. *Energies* (MDPI), 2021, vol. 14, no. 17, art. 5522, pp. 1-16, IF=3.0
- [H5] K. LALIK, M. KOZEK, I. DOMINIK: Autonomous machine learning algorithm for stress monitoring in concrete using elastoacoustical effect. *Materials* (MDPI), 2021 vol. 14. no. 15, art. 4116, pp. 1-14, IF=3.4
- [H6] P. KNAP, K. LALIK, P. BAŁAZY: Boosted convolutional neural network algorithm for the classification of the bearing fault form 1-D raw sensor data. *Sensors* (MDPI), 2023, vol. 23 no. 9, art. 4295, pp. 1-22, IF=3.7
- [H7] K. LALIK, F. WĄTOREK: Predictive maintenance neural control algorithm for defect detection of the power plants rotating machines using augmented reality goggles. *Energies* (MDPI), 2021, vol. 14, no. 22, art. 7632, pp. 1-18, IF=3.0
- [H8] Sz. PODLASEK, M. JANKOWSKI, P. BAŁAZY, K. LALIK, R. FIGAJ: Application of ANN control algorithm for optimizing performance of a hybrid ORC power plant. *Energy* 2024, vol. 306 art. no. 132082, pp. 1-19, IF=9.0
- [H9] P. BAŁAZY, K. LALIK, P. KNAP: Neural algorithm for optimization of a multidimensional object controller parameters. *Neural Computing & Applications*, 2024, vol. 36, pp. 15907–15924, IF=4.7
- [H10] K. LALIK: Neural nonparametric stability indicator for self-excited dynamical systems. *IEEE Access*, 2024, vol. 12, pp. 96126-96137, IF=3.7

- [P1] „Analiza danych w celu optymalizacji wg wskaźników oceny proces u mielenia wapienia”. Szczegółowy temat umowy: „Analiza danych procesowych w zakresie rozwiązania zadania optymalizacji statycznej z ograniczeniami dla wskaźników technologicznych oceny procesu mielenia wapienia z wykorzystaniem różnych modeli procesu i uczenia głębokiego”. K. LALIK: Wykonawca w pracy realizowanej we współpracy z „Fundacją Nauka i Tradycje Górnicze”, 2023.
- [P2] „System robota serwisowego wykorzystującego koncepcje ML i cyfrowego bliźniaka”. Pełny temat: „Opracowanie zaawansowanego systemu wdrożenia i utrzymania autonomicznego przemysłowego robota serwisowego wykorzystującego innowacyjne algorytmy *machine learning* i rozwiązania cyfrowego bliźniaka”. NCBiR: POIR.01.01.01-00-0124/22. K. LALIK: Kierownik prac B+R. Wartość projektu: 8 765 665,63 PLN. Podmiot realizujący: GREENTECH ROBOTICS s. z o.o.

Ogólnie (po uzyskaniu stopnia doktora) kandydat opublikował 57 prac naukowych (23 artykuły w czasopismach, 21 na liście JCR), w tym także 34 współautorskie prace konferencyjne. Ponadto, według uznanych baz danych, jego badania osiągnęły 221-482 cytowań, IH=10-12 oraz TIF= 80.

Główne wyniki prac badawczych dr Krzysztof Lalik zawarł w recenzowanym cyklu dziesięciu artykułów opublikowanych w prestiżowych czasopismach JCR: *Mechanical Systems and Signal Processing* (2016/IF=7.9), *Measurement* (2017/IF=5.2), *Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control* (2021/IF=2.3), *Neural Computing & Applications* (2024/IF=4.7), *Energy* (2024/IF=9.0) oraz (autorskie) *IEEE Access* (2024/IF=3.7), jak również *Energies* (2021, 2021/IF=3.0), *Materials* (2021/IF=3.4) i *Sensors* (2023/IF=3.7) wydawnictwa MDPI.

W ocenianym cyklu prac [H1-H10] habilitant należycie przedstawia swój dorobek naukowy, na który składają się metody, algorytmy i narzędzia, a także wnioski istotne z perspektywy przemysłowej i inżynierskiej dotyczące możliwości praktycznego wykorzystania opracowanych technik, które znalazły również zastosowanie praktyczne projektach [P1-P2] włączonych do cyklu.

Osiągnięcia habilitanta w dziedzinie modelowania oraz projektowania systemów diagnostyki i monitorowania z wykorzystaniem teorii sterowania i sztucznej inteligencji, a także wdrożenia i badania eksperymentalne, znalazły zastosowanie w budowie przemysłowych systemów monitorowania naprężeń i diagnostyki uszkodzeń.

Cechą charakterystyczną dorobku naukowego habilitanta, zarówno w zakresie publikacji, jak i wdrożeń (głównie związanych z udziałem w krajowych projektach badawczych), jest jego umiejętność odważnego i trafnego definiowania zadań, innowacyjność i dbałość o matematyczne i teoretyczno-systemowe oraz technologiczne podstawy rozwiązywanych problemów, a także umiejętne stosowanie opracowanych algorytmów w praktyce. Po dziesięciu latach intensywnej pracy naukowej od czasu doktoratu Krzysztof Lalik posiada pożądane cechy samodzielnego naukowca o znacznej wiedzy i dorobku naukowym, które pozwalają mu skutecznie rozwiązywać problemy naukowo-techniczne, wykorzystując wiedzę teoretyczną, aparaturę matematyczną i współczesne osiągnięcia techniki.

W opinii recenzenta monografia stanowi najlepszą, jednolitą i uporządkowaną prezentację wyników badań habilitanta oraz wyczerpującą prezentację jego szczegółowej wiedzy dziedzinowej. Niemniej jednak tematyczny zbiór prac badawczych i wdrożeniowych dra Krzysztofa Lalika od strony merytorycznej w bardzo dużym stopniu odpowiada monografii, a co ważne – jest wartościowym cyklem doniesień naukowych, uznawanym przez Ministerstwo w kontekście habilitacji, opracowanym bardzo starannie oraz (oryginalnie) w poprawnej angielszczyźnie.

3. Charakterystyka dorobku i zawartość naukowa ocenianego cyklu publikacji

Rosnące wymagania dotyczące niezawodności i jakości systemów inżynierskich pociągają za sobą konieczność poszukiwania i rozwijania zaawansowanych metod automatyki i diagnostyki. Ze względu na znaczne ograniczenia klasycznych podejść, takich jak ekstensometria czy dyfrakcja rentgenowska, wydaje się zasadne poszerzenie warsztatu naukowego o modele neuronowych, które dzięki swoim cechom zwiększają możliwości efektywnej realizacji monitorowania naprężeń i wykrywania defektów oraz adaptacyjnego sterowania nieliniowymi procesami. Prezentowane publikacje dra Krzysztofa Lalika kandydata wnoszą szczególny wkład w rozwój tej dziedziny nowoczesnej inżynierii systemów.

Publikując cykl powiązanych artykułów naukowych habilitant pokazał umiejętność interdyscyplinarnego podejścia do zadań diagnostyki i automatyki w oparciu o modele neuronowe na przykładzie zagadnienia projektowania systemów samowzbudnych. Pierwsze publikacje [H1-H3] opisując innowacyjną architekturę systemu wraz z teoretyczną syntezą funkcji wiążących naprężenia z częstotliwością cyklu granicznego, dały solidną podstawę do wdrażania kolejnych innowacji w tym zakresie. Istotność tych prac leży także w zakresie identyfikacji źródeł zaburzeń w działaniu systemu SAS (przypisywanych do rodzaju badanego materiału, interpretacji wyników, niejednoznaczności związanych ze współistnieniem zmian naprężenia i defektów materiału, oraz samoistnym przełączaniem się systemu pomiędzy cyklami granicznymi).

Do najważniejszych wczesnych osiągnięć naukowych kandydata należy zaliczyć stworzenie modelu charakteryzującego teoretyczną zależność (mierzonej) częstotliwości cyklu granicznego SAS od rzeczywistych naprężeń w materiale. Syntezy takiej dokonano dzięki integracji opisów: elastoakustycznego modelu Dahla dla głowicy nadawczej, modelu transmitancyjnego dla głowicy odbiorczej, oraz regulatorowego modelu układu z opóźnieniem i dodatnim sprzężeniem zwrotnym. Sądząc po prestiżowym miejscu publikacji [H1], osiągnięcie to może stanowić znaczący postęp w dziedzinie monitorowania naprężeń. W opracowaniu tym, wykorzystuje się efekt elastoakustyczny (że naprężenia wpływają na właściwości sprężyste materiału, w tym na prędkość fali akustycznej) oraz analizuje wpływ parametrów fali akustycznej (w materiale względem kierunku naprężenia) na prędkość propagacji. Wykazano, że zmiana prędkości fali akustycznej jest proporcjonalna do zmian naprężenia, a współczynnik elastoakustyczny zależy od rodzaju fali (podłużnej/poprzecznej) i jej polaryzacji względem kierunku naprężenia. Aby precyzyjnie opisać zależność między częstotliwością drgań SAS a naprężeniem, opracowano kompleksowy model teoretyczny, który łączy wszystkie podstawowe czynniki: (i) efekt elastoakustyczny, odnoszący się do opisu wpływu naprężenia na prędkość fali akustycznej; (ii) przetwornik/nadajnik, modelowany piezoelektrycznymi równaniami Dahla; (iii) odbiornik, też opisywany jako piezoelektryczna głowica (częstotliwościowo); (iv) układ pomiarowy z opóźnieniem propagacyjnym oraz dodatnim sprzężeniem zwrotnym.

Opracowany model został zweryfikowany w eksperymentach, w których badano belkę stalową (z głowicami nadawczo-odbiorczymi) poddaną ścisłaniu osiowemu. Próbkę charakterystyki „zmiana naprężenia – częstotliwość drgań samowzbudnych” wykazały zgodność z przewidywaniami. Sprawdzono wpływ kierunku propagacji fali względem kierunku naprężenia na instrumentalną zmianę częstotliwości. Zidentyfikowano zjawiska szkodliwie wpływające na dokładność i niezawodność systemu SAS, do których należy przeskok częstotliwości cyklu granicznego.

W podsumowaniu, należy uznać, że opracowane teoretyczne podstawy działania systemu SAS wykorzystującego efekt samowzbudzenia stanowią znaczący wkład w dziedzinę monitorowania stanu konstrukcji mechanicznych i automatycznego sterowania (jako inżynierska metoda rozwiązywania praktycznych problemów inteligentnej diagnostyki mechanicznej w czasie rzeczywistym).

Praca [H2] publikuje nowy fizyczny model systemu SAS, oparty na analogii z rezonatorem kwarcowym, z propagacją fali akustycznej w materiale między głowicami N/O i zastosowaniem przetwornika piezoelektrycznego. Model ten pozwala określić zastępcze wartości elektryczne (RC), które pozwalają na pojemnościową interpretację zjawiska propagacji fali.

Na podstawie tej reprezentacji i opisu matematycznego wiążącego częstotliwość rezonansową SAS i czas propagacji fali z naprężeniem (ww. efekt elastoakustyczny) opracowano metodę, która pozwala na określenie zarówno zmiany, jak i wartości bezwzględnych analizowanego naprężenia. Koncepcja została zweryfikowana w praktyce na konstrukcji dźwigu budynku dźwigu masztowego. Ważne naukowo są również porównawcze badania systemu SAS z tradycyjnymi metodami pomiarowymi (jak tachimetria geodezyjna), w których wykazano, że system SAS zapewnia porównywalne wyniki zmian naprężenia, przy niższych kosztach i prostszej obsłudze, oraz możliwości monitorowania konstrukcji w czasie rzeczywistym.

Podsumowując, opisane badania poszerzyły wiedzę w zakresie nieniszczących metod diagnostycznych, w szczególności w zakresie opracowywania metod monitorowania stanu konstrukcji inżynierskich, poprzez opracowanie i walidację nowej techniki pomiarowej (+SAS+), która opiera się na zjawiskach elastoakustyki i samowzbudzenia. Osiągnięcie to pozwala na wczesne wykrywanie ewoluujących uszkodzeń i poprawę warunków eksploatacji takich obiektów.

Kolejne teoretyczne modele układu SAS przedstawiono w publikacji [H3]. Innowacja polegała na opracowaniu dwóch modeli układu wykonawczego oraz modelu belki ściskanej osiowo. Zastosowane podejście integracyjne pozwoliło na sprecyzowanie zależności pomiędzy pulsacją układu samowzbudnego a naprężeniem w kontekście różnych układów eksperymentu obciążeniowego. Tu również wykazano wiarygodność opracowanych modeli w świetle wyników eksperymentalnych.

Praca ta rozszerzyła doświadczenie kandydat w obszarze układów samowzbudnych (w kontekście częstotliwościowo-akustyczno-naprężeniowym). Zidentyfikowano podstawowe czynniki wpływające na dokładność pomiarów, takie jak postać drgań belki czy nieliniowość elementów piezoelektrycznych, oraz opracowano metodę ich uwzględniania.

W podsumowaniu, opracowane modele (prosty i odwrotny) uzasadniają występowanie niekorzystnego zjawiska przejścia pomiędzy cyklami granicznymi, co stało się podstawą do wprowadzenia układu sterowania aktywnego i filtracji ze sprzężeniem zwrotnym dodatnim, a także sterowania adaptacyjnego w wersji klasycznej i neuronowej.

W artykule [H4] opisano architekturę FPGA opracowaną w celu ograniczenia zjawiska przełączania się między cyklami granicznymi. Inteligentna filtracja pozwoliła na częściowe rozwiązanie tego problemu i poprawę poprzez wprowadzenie aktywnych, neuronowych regulatorów sprzężenia zwrotnego. Habilitant w ramach swoich badań diagnostycznych skupił się na opracowaniu regulatora systemu SAS. Praca ta stanowi kolejne potwierdzenie skuteczności systemu w kontekście nieniszczących badań materiałów kompozytowych w postaci kotew górniczych, które są kluczowym elementem bezpieczeństwa w górnictwie (dotychczasowe metody uznano za niewystarczające).

Wiadomo, że sterowanie nieliniowymi układami dynamicznymi jest zadaniem niezwykle trudnym ze względu na ich złożone zachowania, wrażliwość na warunki początkowe oraz obecność licznych stabilnych i niestabilnych cykli granicznych, itp. Aby skutecznie zrealizować to zadanie, autor opracował zaawansowany algorytm adaptacyjnego sterowania (według stanu systemu) oraz jego implementację w czasie rzeczywistym na FPGA.

Reasumując, w diagnostycznych eksperymentach laboratoryjnych i terenowych habilitant wykazał, że opracowany układ sterowania redukuje częstość przeskoków częstotliwości i pozwala na poprawę rezyliencji i wiarygodności pomiarów SAS, co jest szczególnie istotne w przypadku kotew górniczych. Znaczenie dla nauki i praktyki wynika z innowacyjności sterowania nieliniowym układem samowzbudnym przez sterowanie adaptacyjne oraz diagnostycznej skuteczności układu SAS w nieniszczących badaniach materiałów kompozytowych o złożonej strukturze wewnętrznej.

W artykule [H5] opisano metodę wspierania interpretacji charakterystyk częstotliwościowych z wykorzystaniem uczenia maszynowego, które (zastosowane w warunkach laboratoryjnych) pozwoliło na bezpośrednią identyfikację naprężeń w warunkach przemysłowych. Głównym osiągnięciem jest tu projekt i wdrożenie algorytmu uczenia maszynowego ML, który umożliwia bieżącą analizę widma częstotliwości sygnałów SAS. Taką procedurę zastosowano do identyfikacji stanu naprężeń w konstrukcjach betonowych bez wiedzy o współczynniku elastoakustycznym, co stanowi znaczne uproszczenie procesu diagnostycznego. Pokazano tu adaptację i udoskonalenie metodologii SAS, która generalnie opiera się na tym współczynniku (zmiennym dla różnych konstrukcji). Kosztowny i czasochłonny proces szacowania jego wartości (przy wysokich częstotliwościach próbkowania) został wyeliminowany dzięki zastosowaniu uczenia ML, które umożliwia bieżącą analizę widm sygnałów SAS i na tej podstawie bezpośrednie szacowanie aktualnego obciążenia.

Kluczowym elementem jest tu projekt architektury systemu uczącego się, który w fazie treningu zasilany jest danymi z próbek znanego materiału i znanego stanu naprężenia, uzyskanymi z innego systemu pomiarowego. Wykorzystując zaawansowany algorytm uczenia maszynowego oparty na drzewach decyzyjnych typu „fine tree”, system uczy się zależności pomiędzy widmem częstotliwości a naprężeniem w celu późniejszego przewidywania/pomiaru naprężenia z wielką precyzją. W trakcie badań eksperymentalnych przeprowadzono walidację systemu na próbkach betonu o różnej gęstości i składzie, co potwierdziło uniwersalność i skuteczność opracowanego podejścia. Wyniki pokazały wysoką korelację przewidywanych i rzeczywistych wartościami naprężeń oraz niskie błędy (MSE). Do osiągnięcia wliczyć też można metodologię przygotowania danych treningowych i optymalizacji hiperparametrów algorytmu ML. Zastosowanie odpowiednich miar jakości, takich jak funkcja kosztu regresji czy wskaźnik Giniego, pozwoliło na opracowanie modelu o wysokiej zdolności uogólniającej, bez efektu nadmiernego dopasowania.

W podsumowaniu, osiągnięcie stanowi opracowana architektura, która zapewnia autonomiczne działanie diagnostyczno-pomiarowe, wykorzystując paradygmat ML do uczenia się relacji między widmem częstotliwościowym a stanem naprężenia w materiale. Co więcej, wyeliminowanie analitycznego współczynnika elastoakustycznego rozszerza zakres analizowanych obiektów, omijając potrzebę indywidualnej kalibracji ręcznej, co jest szczególnie ważne w praktyce inżynierskiej.

Nowa względem powyższego [H5] architektura sieci spłotowej CNN umożliwiła dalszy rozwój wysokowydajnych i odpornych algorytmów filtracji. Jej konsekwencją jest metoda identyfikacji widma częstotliwości w PM (*predictive maintenance*) przedstawiona w [H6], gdzie architektura CNN ułatwia interpretację danych pomiarowych (z systemów z lub bez sprzężenia zwrotnego) i umożliwia autonomiczną identyfikację defektów w badanych strukturach materiałowych.

Tradycyjne metody diagnostyczne wspomagane siecią neuronową opierają się na analizie obrazów uzyskanych z przetwarzania sygnału w dziedzinie czasu, częstotliwości lub czasu i częstotliwości, co wiąże się z koniecznością przeprowadzania złożonych i kosztownych obliczeniowo operacji wstępnego przetwarzania danych. Proponowane podejście eliminuje tę konieczność poprzez bezpośrednią analizę surowych danych pomiarowych z czujników drgań, przy użyciu zmodyfikowanej architektury CNN. Rozwiązanie to zastosowano do wykrywania uszkodzeń łożysk w kontekście predykcyjnej konserwacji maszyn wirujących.

Kluczowym osiągnięciem jest opracowana i wdrożona sieć CNN, która analizuje dane wejściowe (1D) bez konieczności wcześniejszej transformacji ich na obrazy lub widma czasowe, częstotliwościowe lub mieszane. Wprowadzając dodatkowy blok spłotowy do sieci standardowej, udało się zwiększyć jej zdolność do ekstrakcji ważnych cech z sygnału wibracyjnego przy minimalnym narzucie obliczeniowym. Ta modyfikacja pozwoliła na skuteczne filtrowanie szumów i zakłóceń obecnych w sygnale pomiarowym, co jest ważne praktycznie. Eksperymenty wykazały, że opracowany model 1D CNN przewyższa tradycyjne metody oparte na analizie spektrogramów pod

względem dokładności klasyfikacji, szybkości wnioskowania i odporności na szумы. W porównaniu z klasycznym perceptronem wielowarstwowym (MLP) opracowany model osiągnął znacznie lepsze wyniki (przy prostszej strukturze), pełniąc jednocześnie rolę ekstraktora cech i preprocesora.

Podsumowując, interesującym aspektem tego podejścia badawczego jest wykorzystanie surowych jednowymiarowych danych jako danych wejściowych do sieci neuronowej. Eliminuje to potrzebę złożonych metod przetwarzania sygnałów (np. falki lub transformacji sinusoidalnej/FFT). Uzyskane uproszczenie ma ogromne znaczenie przy wdrażaniu diagnostyki w czasie rzeczywistym dla instalacji przemysłowych. Osiągnięcie zostało przetestowane na stanowisku testowym w terenie z maszyną wirującą, gdzie wykazano, że system jest w stanie skutecznie klasyfikować stany łożysk (zdrowe - uszkodzona bieżnia wewnętrzna - uszkodzona bieżnia zewnętrzna) z dużą precyzją i pewnością. Ponadto rozwiązanie to okazało się również odporne na zmiany prędkości obrotowej wału, co jest bardzo ważnym aspektem w diagnostyce maszyn.

Wykrywanie defektów wspomagane siecią neuronową jest też przedmiotem badań w [H7], gdzie wprowadzono nowy element w postaci okularów AR (*augmented reality*), który stanowi źródło danych oraz pozwala na wyświetlanie wyników analiz na jego inteligentnym interfejsie holograficznym. Głównym celem było innowacyjne opracowanie platformy pomiarowej, integrującej technologię AR z algorytmami ML. System taki umożliwiłby bezkontaktowy dostęp do danych o stanie technicznym maszyn uzyskanych w wyniku analizy diagnostycznej w czasie rzeczywistym. Kluczowy element stanowią tu gogle AR służące jako interfejs zarówno pod względem akwizycji danych, jak i prezentacji wyników analiz. Gogle AR zostały wyposażone w kamerę i czujniki umożliwiające precyzyjne mapowanie otoczenia i śledzenie markerów umieszczonych na testowanej maszynie. Dane zebrane przez gogle są przesyłane bezprzewodowo do zewnętrznej infrastruktury obliczeniowej, gdzie opracowane algorytmy sieci neuronowych analizują ruchy markerów w celu wykrycia ewentualnych anomalii i klasyfikowania stanu technicznego maszyny.

Testy przeprowadzono na modelu turbiny wiatrowej, symulując różne warunki pracy, w tym niewyważenie masy wirnika, niewspółosiowość wału i uszkodzenia łożysk. Opracowane rozwiązanie neuronowe trenowano na zestawach danych zawierających próbki dla różnych warunków pracy, co umożliwiło ich efektywne wykorzystanie w procesie diagnostycznym. Wykazano, że sieci te mogą skutecznie klasyfikować stan techniczny turbiny na podstawie analizy położenia znacznika.

Zaletą tej propozycji jest wykazanie, że proces diagnostyczny można uprościć, eliminując potrzebę fizycznego dostępu do krytycznych elementów maszyny. Technologia AR i bezkontaktowe pozyskiwanie danych umożliwiają zdalne monitoring, co jest szczególnie ważne w przypadku dużych instalacji (takich jak turbiny wiatrowe), do których dostęp jest utrudniony lub niebezpieczny. Ponadto integracja AR z ML pozwala na dogodną prezentację wyników analizy bezpośrednio w polu widzenia operatora, a także szybką reakcję i/lub planowanie czynności serwisowych, zaś opracowany system charakteryzuje się skalowalnością i możliwością adaptacji do różnych typów instalacji. Metoda oparta na analizie ruchu znaczników może być też stosowana w innych przypadkach, w których konieczne jest monitorowanie drgań i oscylacji elementów konstrukcyjnych.

Podsumowując, udokumentowane osiągnięcie badawcze, polegające na opracowaniu innowacyjnego systemu integrującego technologię AR z algorytmami ML, stanowi istotny wkład w rozwój nowoczesnych metod diagnostyki predykcyjnej maszyn wirujących. Przedstawione wyniki dowodzą praktycznej przydatności proponowanego rozwiązania, a także otwierają nowe perspektywy badawcze w zakresie monitorowania stanu technicznego obiektów przemysłowych.

Omówione dotąd rozwiązania reprezentują wysoki poziom innowacyjności w obszarze monitorowania stanu i naprężenia konstrukcji z wykorzystaniem sieci neuronowych. Jednak w obszarze monitorowania naprężeń nadal były trudności związane z niestabilną pracą systemu SAS. Aby je wyeliminować, w pracach [H8, H9] habilitant zaproponował podejście do sterowania oparte na ANN i optymalizacji dynamicznych układów nieliniowych, co pozwoliło na wyeliminowanie szkodliwych przeskoków częstotliwości.

Artykuł [H8] przedstawia osiągnięcie związane z rozwojem zaawansowanych algorytmów sterowania opartych na sztucznych sieciach neuronowych do optymalizacji systemów energetycznych. Głównym celem badań było opracowanie i wdrożenie nowego algorytmu sterowania, w szczególności

algorytmu DDPG (*deep deterministic policy gradient*), do optymalizacji rocznej pracy hybrydowej elektrowni (opartej na cyklu granicznym Rankine'a, ORC) zasilanej energią słoneczną i geotermalną.

Jednym z kluczowych rezultatów tu opisanych jest udana integracja algorytmu DDPG do sterowania nieliniowym wielowymiarowym systemem energetycznym bez znajomości jego modelu matematycznego. Opracowany system umożliwia dynamiczną regulację parametrów pracy elektrowni do zmieniających się warunków środowiskowych, takich jak wahania promieniowania słonecznego i temperatura otoczenia. System osiągnął wyższą efektywność energetyczną i roczną wydajność w porównaniu z tradycyjnymi metodami optymalizacji (jak SQP).

Podsumowując, opracowane algorytmy sterowania, oparte na sztucznych sieciach neuronowych i zasadzie uczenia się przez wzmacnianie, zostały oryginalnie zastosowane do optymalizacji pracy elektrowni hybrydowej.

Badania powyższe odegrały kluczową rolę w opracowaniu nowego podejścia do sterowania nieliniowymi systemami dynamicznymi. Ponadto ze względu na uniwersalność podejścia i jego zdolność do absorpcji nieliniowości i sprzężeń w systemach MIMO (*multiple input multiple output*), algorytmy te okazały się również cenne w kontekście przedmiotowego sterowania SAS. Ponieważ w systemie SAS zachodzą złożone interakcje między elementami mechanicznymi, akustycznymi i elektronicznymi (prowadzące do nieliniowych zjawisk drgań samowzbudnych), wobec niedoboru modeli i metod matematycznych, zastosowano tu podejście oparte na algorytmie DDPG, co pozwoliło na budowę adaptacyjnej strategii sterowania bez konieczności pełnego modelu systemu. Wdrożenie algorytmu DDPG w samowzbudnym SAS umożliwia proces uczenia się optymalnych strategii sterowania amplitudy i częstotliwości analizowanych drgań akustycznych. W ten sposób algorytm DDPG dynamicznie dostosowuje strategię sterowania w odpowiedzi na zmiany czynników zewnętrznych i defektów materiałowych, zapewniając odporną wydajność systemu.

W podsumowaniu, wyniki powyższych badań otworzyły nowe możliwości w dziedzinie sterowania układami samowzbudnymi, przyczyniając się do wzrostu interdyscyplinarności i transferu wiedzy między wieloma obszarami nauki i techniki. Podobnie, metoda oparta na uczeniu się przez wzmacnianie jest ważnym osiągnięciem naukowym w dziedzinie sterowania nieliniowymi układami dynamicznymi (takimi jak SAS) i przynosi wymierne korzyści pod względem struktury i efektywności poprzez adaptacyjność.

Praca [H9] to innowacyjne osiągnięcie z neuronowym sterowaniem nieliniowych układów MIMO, opartym na uczeniu przez wzmocnienie dla suwnicy bramowej o pięciu stopniach swobody. Takie bezmodelowe podejście stanowi alternatywę dla klasycznych metod sterowania, nawet takich jak metoda LQR, które wymagają linearyzacji i dokładnych modeli matematycznych procesu.

Centralnym pomysłem jest tu wykorzystanie uczenia przez wzmacnianie algorytmu DDPG w architekturze aktor-krytyk. Umożliwia to adaptacyjną regulację wzmocnień sprzężenia zwrotnego w czasie rzeczywistym, na podstawie obserwacji stanu układu i wyznaczonej funkcji nagrody. W przeciwieństwie do metod klasycznych nie ma potrzeby znajomości modelu matematycznego obiektu sterowanego, co jest ważne w przypadku układów trudnych do zidentyfikowania lub nieliniowych. W proponowanym podejściu zamiast polegać na predefiniowanych parametrach (macierzy Q i R w LQR), zastosowano sieć neuronową, która uczy się optymalnych wzmocnień (sprzężenia zwrotnego) na podstawie interakcji z obiektem sterowania. Architektura sieci neuronowej aktora składa się z dwóch ukrytych warstw z funkcją aktywacji leakyReLU, która przyspiesza proces uczenia i eliminuje problem zanikającego gradientu. Krytyk natomiast szacuje wartość oczekiwanej skumulowanej nagrody, co umożliwia uczenie się poprzez aktualizację parametrów polityki sterowania.

Symulacyjnie wykazano, że proponowany regulator neuronowy (NR) znacznie przewyższa tradycyjny kontroler LQR pod względem jakości sterowania, czasu kontroli i wielkości zasobów. Czas transportu ładunków został znacząco skrócony oraz kryterium ISE wielokrotnie zmniejszone, co potwierdza wysoką dokładność sterowania neuronowego. Ważną cechą tego rozwiązania jest adaptacyjność. Poprzez dynamiczną aktualizację sprzężenia zwrotnego system utrzymuje stabilność w całym zakresie roboczym, bez potrzeby specjalnego strojenia parametrów. Analiza wykazała, że po początkowym silnym wzmacnianiu system szybko przechodzi do bezpiecznego stanu stabilnego.

Podsumowując, wykazano, że zastosowanie sterowania „bezmodelowego” opartego na uczeniu sieci przez wzmacnianie poprawić może skuteczność sterowania wielowymiarowymi obiektami

nieliniowymi. Otwiera to nowe perspektywy w dziedzinie sterowania adaptacyjnego, szczególnie w zastosowaniach, w których utrudnione jest podejście klasyczne. Wykazano, że algorytmy ANN mogą skutecznie wspierać projektowanie systemów sterowania, oferując poprawę jakości, szybkości i oszczędności działania. Stanowi to znaczący wkład w rozwój nowoczesnych metod sterowania adaptacyjnego, a sama metoda projektowania pozwoliła też na przededefiniowanie projektu SAS.

W swojej całkowitej autorskiej pracy [H10] habilitant przedstawia nowatorską metodę wykorzystującą głębokie sieci neuronowe (DNN) do szacowania funkcji Lyapunowa w układach dynamicznych, które są reprezentowane tu przez system SAS. Głównym osiągnięciem jest opracowanie bezmodelowej nieliniowej metody oceny stabilności układów dynamicznych, która w podejściu klasycznym wymaga modelu parametrycznego (i dokładnej znajomości jego parametrów) oraz algebraicznej postaci funkcji Lyapunowa (co jest niemożliwe w złożonych przypadkach).

Centralnym elementem tej metody jest wykorzystanie sieci neuronowych do modelowania dynamiki układu oraz szacowania funkcji Lyapunowa na podstawie danych eksperymentalnych. W pierwszym etapie sieć LSTM (*long short-term memory*), zgodnie z jej specyficzną strukturą i funkcjami, wykorzystywana jest do stworzenia reprezentacji dynamiki układu na podstawie danych z samowzbudnego układu SAS wiodącego w omawianej rozprawie habilitacyjnej. W drugim etapie inna sieć neuronowa jest wykorzystywana do szacowania funkcji Lyapunowa, z zastrzeżeniem pewnych znanych ograniczeń, która jest trenowana przy użyciu funkcji kosztu skoncentrowanej na stabilności.

W podsumowaniu, innowacją opracowanej metody jest nieparametryczna estymacja funkcji Lyapunowa bez użycia modelu matematycznego układu, co rozszerza możliwości oceny stabilności układów nieliniowych (w określonym zakresie przestrzeni stanów), w tym zaawansowanych regulatorów neuronowych (DNN/ML). Zastosowanie tej metody do układu SAS pozwoliło odróżnić zmiany dynamiki układu wywołane naprężeniami materiałowymi od obecności defektów. Z kolei analiza kształtu szacowanej funkcji Lyapunowa (asymetria w leжку potencjału tej funkcji) pozwoliła zidentyfikować charakterystyczne cechy wskazujące na obecność defektów. Generalnie rzecz biorąc, kolejno rozwijane metody projektowania układu SAS doprowadziły do opracowania kompletnego systemu diagnostyki akustycznej, w którym sieci neuronowe odgrywają centralną rolę w aktywnym sterowaniu, filtrowaniu i analizie sygnałów, przy wysokim poziomie autonomii.

Projekt [P1] modelowania i optymalizacji procesu przemysłowego przetwarzania wapienia został przeprowadzony przy użyciu własnych kryteriów o charakterze biznesowo-przemysłowym (koszt, wydajność, energochłonność) we współpracy z zakładem przetwórczym kopalni wapiennej „Czatkowice”. Opracowano modele neuronowe przedmiotowych procesów, a także wskaźniki, które legły u podstaw zadania optymalizacji. Dokładniej, optymalizacja polegała na minimalizacji kosztów przetwarzania i maksymalizacji wydajności przy jednoczesnym ograniczeniu zużycia energii i materiałów. Przedstawiono również oczekiwane skutki ekonomiczne, które można osiągnąć poprzez uwzględnienie optymalnego sterowania w zadaniu optymalizacji procesu (przetwarzania wapienia).

Reasumując, rozwiązano fundamentalne zadanie projektowania pracy technologicznej przeróbki wapienia, polegające na zdefiniowaniu kryterium oceny i rozwiązaniu zadania optymalizacyjnego dla tej technologii. Pozwoliło to na określenie optymalnych parametrów pracy, których zastosowanie dało wymierne korzyści w kategoriach energii procesu oraz wydajności (wg przyjętej funkcji). Zaś analiza skoncentrowana była na opracowaniu trzech zagadnień dotyczących wykorzystania sieci neuronowych w optymalizacji pracy młyna: oszacowania wskaźników energetycznych (S i W) dla niezbadanych parametrów pracy, optymalizacji punktu pracy, z uwzględnieniem sygnałów niezależnych i kontrolowanych, oraz z uwzględnieniem sygnałów kontrolowanych.

Celem projektu [P2] było opracowanie systemu automatyzującego użytkowanie robotów serwisowych, w tym wdrożenie robota w nowym środowisku produkcyjnym oraz jego konserwację i serwisowanie. W podjętych działaniach opracowano, zaimplementowano i zweryfikowano kompletny system neuronowy na czyszczącym robocie mobilnym. Stworzone oprogramowanie zostało oparte na własnych rozwiązaniach i algorytmach (AI i predykcyjnych), co pozwoliło na: minimalizację ręcznych czynności serwisowych, obniżenie kosztów zużycia mediów (wody i energii), elastyczność w użytkowaniu robota, oraz wydłużenie okresu użytkowania.

W szczególności opracowano system umożliwiający natychmiastowe wykrywanie anomalii nieblokujących pracy robota, ale prowadzących do nadmiernego zużycia w dłuższej perspektywie. Roboty czyszczące uzyskały autonomię w zakresie wykonywania podstawowych zadań, dostosowując się do możliwych dynamicznych zmian otoczenia. Nie były jednak w stanie zidentyfikować potencjalnych anomalii we własnych komponentach mechatronicznych. W sytuacji oczywistych usterek, takich jak brak zasilania lub brak sygnału sterującego, roboty mogą łatwo zidentyfikować problem, jednak trudności pojawiają się w przypadku innych anomalii, takich jak zaplątywanie się sznurków w szczotki lub zasysanie elementów ograniczających przepływ wody, które obniżają jakość pracy i przyspieszają zużycie podzespołów. Dzięki metodzie ML możliwe stało się przewidywanie skutków nieoczywistych anomalii, a opracowany system zwiększył skuteczność wykrywania anomalii dla 15 zdefiniowanych klas defektów.

Powiązane problemy projektowe zostały rozwiązane przy użyciu technik ML. Opracowany system monitorowania i wnioskowania wykorzystujący technologię BigData został oparty na bieżących i historycznych danych o stanach fizycznych poszczególnych komponentów. Pozyskano nową wiedzę, która ułatwia proces wykrywania anomalii i oceny/predykcji zużycia komponentów. Opracowanie to oparto na danych akustycznych i wibracyjnych, pomiarach ciśnienia, przepływu, prądu i napięcia. Zastosowano różne metody analizy: FFT, transformatę Fouriera, CWT, transformatę falkową i spektrogramy. Algorytmy głębokiego uczenia (DL) pozwoliły na skuteczne wykrywanie anomalii w działaniu i długookresową analizę danych masowych w chmurze. Zbudowano stanowiska laboratoryjne do analizy działania podzespołów. Przeprowadzono testy zmęczeniowe podzespołów, podczas których układ czujników zbierał dane akcelerometryczne oraz inne ww. parametry pracy. Dane te wykorzystano do uczenia modeli detekcyjnych i oszacowania pozostałego czasu żywotności.

W podsumowaniu, sukces projektu polega na opracowaniu efektywnych systemów wykrywania anomalii i oceny zużycia podzespołów robotów sprzątających, co pozwoliło na znaczące usprawnienia w ich działaniu, zwiększenie niezawodności i wydłużenie okresu eksploatacji, czyli namacalne korzyści w postaci obniżenia kosztów eksploatacji i poprawy wydajności tych urządzeń.

Ogólnie można zatem stwierdzić, że habilitant udokumentował fakt, że opracowane metody stanowią twórcze rozwinięcie rozwiązań istniejących w *state-of-the-art* dyscypliny AEEiTK w obszarze monitoringu i diagnostyki naprężeń w instalacjach przemysłowych. Osiągnięcia najważniejsze dla tej dyscypliny (w dziedzinie automatyki) podają w konkluzjach (p. 4).

Drobne uwagi krytyczne i dyskusyjne

Tak osiągnięcia, jak i sama prezentacja są na ponadprzeciętnym poziomie. Ogólnie autoreferat sporządzony w języku polskim jest na wysokim poziomie formalnym i merytorycznym. Ma w miarę czytelną i dość dobrze wyważoną strukturę. Jednak, aby oddać pełny obraz analizowanego osiągnięcia i autoreferatu, warto jest przedstawić przynajmniej kilka uwag krytycznych lub dyskusyjnych dotyczących niektórych aspektów i szczegółów, które nasuwają się na myśl przy dokładnej lekturze dorobku habilitacyjnego, ponieważ – najprawdopodobniej z powodu zwyczajowego pośpiechu przy tak obszernym opracowaniu – habilitant nie ustrzegł się licznych drobnych uchybień.

Bardzo dobrze, jeśli habilitacja w formie cyklu publikacji jest wyposażona w niebanalny i dobrze skrojony oraz wyważony autoreferat-przewodnik. Czasami autorzy nie biorą pod uwagę faktu, że publikacje realizują różne cele naukowe i „żyją własnym życiem”. Tymczasem, jeśli habilitant nie zdecyduje się na całkowite ujednolicenie wyników w formie odrębnej monografii, tym bardziej powinien to uczynić w odpowiednim skrócie. Z kolei osiągnięcie serwowane w obszernym autoreferacie powinno być przedstawione merytorycznie, ale bez powtórzeń i zbędnych szczegółów oraz jednoznacznie wskazywać kierunki rozwoju omawianych koncepcji projektowych, a także systematyczny postęp w zakresie poszczególnych projektów.

Przy zaznaczaniu się z recenzowaną zbiorczą publikacją złożonego osiągnięcia naukowego, w autoreferacie razi mnóstwo nadmiarowości i powtórzeń oraz nie zawsze optymalnie dobrana struktura części raportu osiągnięć. Brak jest jakiegokolwiek porządku w bibliograficznym wykazie wszystkich publikacji (gdzie też do artykułów w czasopiśmie zaliczono referaty konferencyjne). Brak szczegółów formalnej umowy, dat i funkcji w przypadku pierwszego osiągnięcia projektowego.

W tym kontekście martwią też nieścisłości semantyczne (jak „nowa reprezentacja” czy „nowe zależności” – bez należytego odniesienia) oraz kwestie terminologiczne powiązane z brakiem definicji podstawowych pojęć i operacji, na przykład w zakresie diagnostycznym: „wykrywanie” – „izolacja/lokalizacja” – „identyfikacja”, „usterka” – „uszkodzenie” – „defekt”..., czy „weryfikacja” a „walidacja” (praktyczne badanie odpowiedniości); systemicznym: sterowanie „odpornościowe”, czy „odporne” albo „niewrażliwe”; oraz pomiarowym: „parametry mierzone” → „wielkości mierzone”; czy ortograficznym: „ilość przejść” → „liczba przejść”... Wady te niekorzystnie wpływają na jakość opisu osiągnięcia, pokazując niezbyt spójny i jednoznaczny jego obraz. Czasami zaś pojawia się też niejednoznaczności lub pustostowie (jak „formuł i równań”, „charakterystyka częstotliwościowa oraz odpowiedź na sygnały o różnych amplitudach i częstotliwościach”, „algorytm neuronowy pozwolił na dostarczenie danych do sieci”, „przetwarzanie i analiza”, „minimalizacja skutków ubocznych jest korzystna z punktu widzenia ekonomicznego i operacyjnego”), a czasami też mylenie faktów: (i) złożoność – nieliniowość – zmienniczość/wariantność; (ii) „sterowanie bezpośrednie z sieciami neuronowymi polega na bezpośrednim generowaniu sygnałów sterujących” (zgoda, ale tak jest też w przypadku klasycznego DDC); etc., lub niedopracowane matematycznie partie analityczne (w nielicznych wzorach autoreferatu), albo niedopracowany (przegadany, a jednocześnie niezgrabny i niejednoznaczny) opis technologicznego układu przeróbki wapienia,...

Z formalnego punktu widzenia, w przypadku prac [H1, H2] brak jest głębszego pokazania udziału autora w istotnych dla analizowanego osiągnięcia aspektach projektowych, podobnie jak w przypadku [H9] nie wiadomo, kto był odpowiedzialny za badania symulacyjne. W przypadku prac [H4-H7] uderza całkowity brak poświadczeń współautorów oraz błędy w danych bibliograficznych.

4. Konkluzja dotycząca dorobku i określenie wkładu autora w rozwój dyscypliny

Habilitation jasno pokazuje swoje umiejętności współpracy naukowej w stosunkowo dużych zespołach badawczych, w których potrafił odgrywać rolę wiodącego badacza. Pokazuje też zupełną niezależność wydając prestiżową publikację indywidualnie. W niniejszym podsumowaniu doniosłych osiągnięć dra K. Laliaka pominię osiągnięcia projektowe omówione w punkcie 2, które uważam za bardzo cenne uzupełnienie wykazanych umiejętności i wiedzy naukowej, skupiając się na publikacjach naukowych.

W omawianym cyklu publikacji habilitant przedstawił znaczące osiągnięcia w dziedzinie diagnostyki i sterowania układami nieliniowymi, wykorzystując sztuczne sieci neuronowe. Przy czym wybitnym elementem jego wkładu naukowego jest opracowanie innowacyjnej, bezmodelowej metody szacowania funkcji Lyapunowa dla systemów dynamicznych [H10], która pozwala na ocenę stabilności układów nieliniowych. Metoda ta pozwoliła rozwiązać problem stabilności układów z regulatorami neuronowymi w określonym zakresie przestrzeni stanów.

W publikacjach [H1-H3] autor opracował podstawową architekturę samowzbudnego układu akustycznego (SAS) poprzez integrację modeli efektu elastoakustycznego, przetworników piezoelektrycznych oraz układów z opóźnieniem oraz dodatnim sprzężeniem zwrotnym, w oparciu o teoretyczną zależność częstotliwości cyklu granicznego układu SAS od naprężenia w badanym materiale, co stanowi postępek w monitorowaniu naprężenia mechanicznego.

W pracach [H4-H5] zidentyfikowano kluczowe wyzwania, takie jak niepożądane przejścia między cyklami granicznymi i trudności w interpretacji wyników w obecności wad materiałowych.

Zastosowanie algorytmów uczenia maszynowego i rozwój nowych aktywnych, adaptacyjnych układów sterowania zwiększyło precyzję, prostotę i niezawodność projektowanych systemów diagnostycznych oraz pozwoliło na pominięcie zazwyczaj niedostępnej wiedzy o parametrach analizowanego procesu (w tym współczynnika elastoakustycznego).

W publikacjach [H6-H7] zastosowanie sieci neuronowych poszerzono na zadanie predykcyjnej diagnostyki maszyn wirujących z użyciem koncepcji rozszerzonej rzeczywistości. Opracowano system umożliwiający bezkontaktowy monitoring stanu technicznego maszyn, z jednoczesną prezentacją wyników analizy w czasie rzeczywistym na interfejsie holograficznym.

Doniosłym osiągnięciem jest bezmodelowa metoda sterowania nieliniowymi układami dynamicznymi z wykorzystaniem uczenia przez wzmocnianie [H8-H9], gdzie wykazano, że w ten sposób możliwe jest uzyskanie wyższej jakości sterowania i adaptacyjności bez klasycznego modelowania obiektu (wymaganego w tradycyjnych metodach sterowania). Co więcej, wdrożenie tego

podejścia w systemie SAS pozwoliło na wyeliminowanie efektu przeskoku pomiędzy cyklami granicznymi, zwiększając stabilność i niezawodność prowadzonej diagnostyki.

Bardzo ciekawą i ważną odkryciem naukowym jest metoda szacowania funkcji Lyapunowa dla układów nieliniowych [H10], oparta na modelach sieci neuronowych aproksymujących dynamikę układu i funkcję Lyapunowa (w szczególności dla danych eksperymentalnych układu SAS). W ten sposób można oceniać stabilność układów z regulatorem neuronowym, nie znając parametrów układu i postaci algebraicznej funkcji Lyapunowa. Analizując kształt tej funkcji, można skutecznie odróżniać zmiany dynamiki układu spowodowane naprężeniem od obecności defektów w testowanym materiale. Opracowana koncepcja stanowi istotny wkład do teorii sterowania i wskazuje nowe możliwości w projektowaniu układów sterowania i diagnostyki urządzeń z wykorzystaniem modeli AI.

Podsumowując, przedstawiony cykl prac stanowi cenny wkład w rozwój nowoczesnych metod diagnostyki przemysłowej i sterowania układami nieliniowymi, a w szczególności pokazuje nowe perspektywy i efektywne podejścia do realizacji trudnych zadań monitorowania stanu maszyn i konstrukcji mechanicznych z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych.

Nie mam wątpliwości, że osiągnięcia naukowe dr. Krzysztofa Lalika znacznie wzrosły od czasu uzyskania przez niego stopnia doktora nauk technicznych i zasługują na bardzo wysoką ocenę pod względem formalnych wymagań stawianych kandydatom na stopień doktora habilitowanego w dyscyplinie Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologia Kosmiczna. Osiągnięcie to spełnia również zwyczajowe wymagania większości polskich uczelni pod względem osiągnięć na światowym poziomie i udokumentowanego udziału w rozwoju dziedziny. Analizując osiągnięcia, łatwo dostrzec zdolność autora do głębokiego i konstruktywnego zaangażowania w badania naukowe, a także jego pracowitość, wytrwałość i konsekwencję oraz umiejętność współpracy w rozwijaniu nowoczesnych metod projektowania. Potrafi on również wykorzystywać zarówno metody teoretyczne, jak i nowoczesne narzędzia oraz technologie i techniki cyfrowe do rozwiązywania praktycznych problemów przemysłowych związanych ze sterowaniem komputerowym i diagnostyką przemysłową.

Jego główny wskaźnik naukometryczny wpływu jest imponujący i wynosi $IF=79.4$, liczba cytowani sięga 500 (482), zaś IH osiąga wartość 10-12 (gratuluje i życzę szybkiego, życiowego podwojenia tych wyników).

Rozwój habilitanta, z szerokim spektrum zadań badawczych, ujawnia jego autorską myśl projektową oraz systematyczne poszerzanie i pogłębianie umiejętności i doświadczenia naukowego, co pozwala mu skutecznie podejmować się rozwiązywania coraz bardziej złożonych problemów, jak również podejmować wyzwania związane z doskonaleniem poprzednich opracowań w dziedzinie.

Problematyka nie jest łatwa, więc nie dziwi fakt, że większość prac jest zespołowa. Niemniej jednak prezentowany cykl publikacji i pozostałe osiągnięcia publikacyjne wyraźnie pokazują autorski wkład habilitanta. Siłą takiej ścieżki naukowej jest intensywny przepływ wiedzy i doświadczeń w dużych projektach, natomiast słabością możliwość przeoczenia pewnych merytorycznych powiązań w rozpatrywanych zagadnieniach z innymi zagadnieniami naukowymi, a także pewne niedociągnięcia w samodzielnych raportach (publikowane prace w języku angielskim nie mają takich braków).

III. Ocena działalności dydaktyczno-organizacyjnej i popularyzatorskiej, współpracy z otoczeniem gospodarczym oraz współpracy międzynarodowej

Głównymi objawami **aktywności naukowej i krajowej współpracy naukowej** z otoczeniem gospodarczym dra Krzysztofa Lalika są trzy fakty: (1) Funkcja starszego specjalisty w projekcie ARTIQU/AGH, Centrum Doskonałości w dziedzinie AI, w zakresie „Integracji wnioskowania, uczenia się, optymalizacji i interpretacji w celu przyspieszonej komercjalizacji inteligentnych systemów oprogramowania nowej generacji” Kraków (1 IV–31 XII 2024), gdzie habilitant odpowiadał za opracowanie i wdrożenie sterowania neuronowego dla robota produkcyjnego; (2) Staż w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie w ramach konsorcjum CTA (*macierzy teleskopów Cherenkova*), CTAO, Kraków...Zurich, (I – IX 2016), obejmującego 150 instytutów naukowych z 25 krajów i powołanemu do badania kosmicznych promieni gamma (oraz energetycznych obiektów kosmicznych, takich jak pulsary, czarne dziury czy supernowe), gdzie kandydat był odpowiedzialny za budowę architektury komunikacyjnej między teleskopami i integracji w ramach hierarchicznego sterowania

oraz sterowanie serwonapędami i kamerami promieniowania Cherenkova (udokumentowane też kilkoma naukowymi referatami konferencyjnymi oraz publikacjami w prestiżowych czasopismach: *The European Physical Journal. C, Particles and Fields*; *Astrophysical Journal*; *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*); oraz (3) Staż w Centrum Rozwoju i Kompetencji Przemysłu 4.0 na Wydziale Mechanicznym Politechniki Krakowskiej (VIII – IX 2024), gdzie habilitant zajmował się uczeniem maszynowym w systemach przemysłowych, rozpoznawaniem wzorców w produkcyjnych danych oraz wdrażaniem rozwiązań AI w przemysłowych procesach automatyzacji decyzji.

Habilitant raportuje też szeroką **działalność konferencyjną** (z aktywnym uczestnictwem w kilkunastu **zjazdach międzynarodowych**) oraz projektowo-przemysłową (z licznymi dowodami dorobku technologicznego i biznesowo-gospodarczego oraz ponad 10 polskimi opublikowanymi wnioskami patentowymi), a także udział jako wykonawca w **pięciu zespołach badawczych realizujących konkursowe projekty ministerialne i NCBiR. Współpracował z Instytutem Fizyki Jądrowej PAN oraz CTAO**. Ponadto wykonał 3 ekspertyzy dla instytucji publicznych (firm) oraz zrecenzował 20 artykułów dla międzynarodowych czasopism naukowych i dla jednej konferencji w Bułgarii (2023). Pewien niedosyt może budzić brak ważniejszych przejawów zarządzania nauką i współpracą naukową, gdyż habilitant niestety nie piastował żadnych *stanowisk kierowniczych* w realizowanych projektach konkursowych ministerialnych, ani nie odbył *faktycznego stażu naukowego za granicą*. Moim zdaniem wystarczającą rekompensatę w tym zakresie należy upatrywać w licznych krajowych projektach przemysłowych oraz **stażu naukowym**, jaki kandydat odbył w CTAO - IFJ PAN, który wiązał się z faktyczną merytoryczną współpracą międzynarodową, popartą prestiżowymi międzynarodowymi publikacjami.

Działalność dydaktyczna Krzysztofa Lalika w Akademii Górniczo-Hutniczej, prowadzona od 2009 r., obejmuje m.in. prowadzenie zajęć specjalistycznych (najczęściej w charakterze koordynatora lub wykładowcy) dla studentów studiów na kierunkach *Automatyka i Robotyka* oraz *Automatyka Przemysłowa i Robotyka* na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki; *Inżynieria Biomedyczna* na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej; oraz *Energetyka i Energia Odnawialna* na Wydziale Energetyki i Paliw. Prowadzone przedmioty obejmowały: *Zaawansowane Systemy Sterowania*, *Przemysłowe Systemy Sterowania*, *Przemysłowe Układy Sterowania Strukturami Inteligentnymi*, *Systemy Sterowania w Energetyce*, *Automatyka w Energetyce*, *Systemy Sterowania Przemysłowego i Automatyki Budynków*, oraz *Control Systems in Bioengineering* (ang.). Habilitant uczestniczył też w komisjach dyplomowych inżynierskich i magisterskich na kierunkach *Automatyka Przemysłowa i Robotyka* oraz *Automatyka i Robotyka* (WIMR), jak również na *Inżynierii Biomedycznej* (WEAIB/AGH) oraz *Energetyki* (WEP/AGH). Zaś W ramach zaangażowania promotorskiego zrealizował 79 prac inżynierskich, 87 magisterskich, oraz pełni funkcję promotora pomocniczego w 5 przewodach.

Do **działalności organizacyjnej** habilitanta należy zaliczyć uczestnictwo w gremiach doradczych, takich jak Radzie Dyscypliny Naukowej – Inżynieria Mechaniczna oraz w Wydziałowych Komisjach Rekrutacyjnych na studia pierwszego i drugiego stopnia.

W ramach aktywności **popularyzującej naukę** dr K. Lalik organizował imprezy akademickie:

1. *Małopolska Noc Naukowców* (laboratoria; lata 2017-2022),
2. *Małopolska Noc Muzeów* (laboratoria; 2023),
3. *XII Mielecki Festiwal Nauki i Techniki* (wykład nt. "Nowoczesne metody wspierania produkcji"),
4. Dyżury w Laboratorium "Industy 4.0" podczas *Dni Otwartych*.

Krzysztof Lalik sprawozdaje też bogatą **działalność uzupełniającą** opisaną jako:

1. Udział w organizacji Laboratorium „Industy 4.0” (integracja systemów automatyki przemysłowej z użyciem koncepcji IoT, AR, DNN, RL, DT/Digital Twin oraz SF/Smart Factories, stosowanych w diagnostyce, logistyce i produkcji) we współpracy z Teamtechnik, Siemens Polska, Fanuc Polska, Valeo, Bosch-Rexroth Polska, oraz Adient Polska w zakresie kontaktu i koordynacji, prac koncepcyjnych i technicznych nad architekturą instalacji laboratoryjnej.
2. Opieka nad Studenckim Kołem Naukowym SENSOR na WIMR AGH od 2020 r., która skutkowałą uczestnictwem w kilkunastu konferencjach międzynarodowych z (wyróżnianymi) prezentacjami prac badawczych, jak również publikacjami JCR. Spośród wyróżnień warto wspomnieć o Stypendiach Prezesa Rady Ministrów, Studenckim „Noblu” Banku Santander, czy głównej nagrodzie w konkursie „Poleć z nami do Dubaju” („Przemysł 4.0” z inicjatywy APAGroup).

3. Przeprowadzenie dwudniowego cyklu szkoleń i warsztatów dla studentów i doktorantów pt. „Zastosowanie AI w Przemśle 4.0” w ramach AGH AI Days (2023), skupionych na optymalizacji procesów produkcyjnych i logistycznych, konserwacji predykcyjnej, jak również monitorowaniu jakości produktów i wsparciu użytkownika.

4. Przyrządzenie merytorycznych wniosków na zakup aparatury i specyfikacja zamówienia na sprzęt badawczy oraz udział w komisjach przetargowych Katedry Automatyzacji Procesów.

Na koniec zaś warto wykazać ważniejsze **nagrody i wyróżnienia** kandydata:

1. Nagrody Rektora AGH za indywidualne osiągnięcia naukowe: 2011, 2017, 2018, 2019 i 2021,
2. Nagrody Rektora AGH za zespołowe osiągnięcia naukowe: 2014 i 2020,
3. Nagroda Rektora dla najlepiej publikującego Naukowca WIMR, 2021,
4. Rektorskie Nagrody Naukowe AGH, I filar: 2022 i 2023,
5. Srebrny medal IX Międzynarodowej Wystawy Wynalazków IWIS 2015,
6. Nagroda firmy Siemens GmbH w kategorii "Scientifical Partner", 2019,
7. Medal honorowy „Zasłużony dla WIMR-AGH”, 2019,
8. Nagroda Rektora AGH za zaangażowanie i pracę na rzecz studenckiego ruchu naukowego, 2023,
9. Medal Komisji Edukacji Narodowej za szczególne zasługi dla oświaty i wychowania, 2023.

IV. Wniosek końcowy

Na podstawie powyższej szczegółowej oceny autorskiego osiągnięcia naukowo-badawczego w postaci monotematycznego cyklu prac pt. „*Inteligentne systemy diagnostyczne i sterowania wspomagane sztucznymi sieciami neuronowymi*”, obejmującego 10 artykułów JCR i 2 projekty przemysłowe, a także udostępnionej dokumentacji przewodu habilitacyjnego w postaci publikacji oraz autoreferatu habilitanta opisującego osiągnięcia naukowo-badawcze i inne wymagane (organizacyjne i dydaktyczne) elementy dorobku, stwierdzam, że dorobek naukowy doktora Krzysztofa Lalika osiągnięty po uzyskaniu stopnia doktora NT jednoznacznie świadczy o wzroście naukowym kandydata oraz znaczącym i udokumentowanym jego wkładzie w dziedzinę nauk technicznych i może stanowić podstawę do rozpatrzenia wniosku o nadanie mu stopnia doktora habilitowanego.

Jednocześnie stwierdzam, że cykl publikacji obejmuje powiązane tematycznie artykuły naukowe wydane w czasopismach naukowych, które w roku opublikowania w ostatecznej formie były ujęte w wykazie ministerialnym sporządzonym zgodnie obowiązującymi przepisami. Kandydat wykazuje się też istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej instytucji naukowej.

W ten sposób konkluduję, iż dorobek Pana Krzysztofa Lalika spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia doktora habilitowanego nauk technicznych, określone ustawą o tytule naukowym i stopniach naukowych z dnia 10 lipca 2018 (Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce w postępowaniach habilitacyjnych; Dz.U.2023.742, w tym art. 219). W związku z tym wnoszę o dopuszczenie do dalszego postępowania habilitacyjnego nad wnioskiem doktora Krzysztofa Lalika z dnia 25 października 2025 roku. Jestem również za nadaniem mu stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie *Nauk Inżynieryjno-Technicznych*, w dyscyplinie *Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne*.



Zdzisław Kowalczyk