

Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica  
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki  
Katedra Automatykacji Procesów

### Załącznik nr 3

Do wniosku o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego

---

## Autoreferat

---

Dr inż. Krzysztof Lalik

Kraków 2024



## Spis treści

|  |    |
|--|----|
| 1. Dane osobowe.....   | 2  |
| 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe .....  | 2  |
| 3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.....   | 2  |
| 4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).....                     | 2  |
| 4.1. Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych:.....  | 3  |
| 4.2. Oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne, technologiczne:.....  | 3  |
| 4.3. Wprowadzenie .....  | 5  |
| 4.4. Główne osiągnięcia naukowe.....   | 9  |
| 4.5. Oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne, technologiczne.....   | 20 |
| 4.6. Merytoryczne ujęcie przedstawionych osiągnięć .....   | 24 |
| 5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej. .... | 37 |
| 6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę. ....  | 39 |
| 6.1. Działalność dydaktyczna.....  | 39 |
| 6.2. Działalność organizacyjna .....   | 40 |
| 6.3. Działalność popularyzująca naukę: .....   | 40 |
| 6.4. Inne.....   | 40 |

## 1. Dane osobowe

Imię i nazwisko                      Krzysztof Lalik

## 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

|            |   |
|------------|---|
| 30.10.2014 | Stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie Mechanika i Budowa Maszyn, Kraków, Polska, <i>Zintegrowany system autodynamiczny w pomiarze przyrostu naprężeń</i> , Promotor: prof. dr hab. inż. Janusz Kwaśniewski  |
| 07.07.2009 | Dyplom magistra inżyniera na kierunku Automatyka i Metrologia, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, Polska, <i>Samowzbudny Akustyczny System do pomiaru zmian naprężeń</i> , Promotor: prof. dr hab. inż. Janusz Kwaśniewski |

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

|                  |  |
|------------------|--|
| 12.2014- obecnie | Adiunkt naukowo-dydaktyczny, Katedra Automatykacji Procesów, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, Polska  |
| 12.2012- 11.2014 | Asystent naukowo-dydaktyczny, Katedra Automatykacji Procesów, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, Polska |
| 10.2009- 11.2012 | Pracownik naukowy, Katedra Automatykacji Procesów, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, Polska            |

## 4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).

Osiągnięciem naukowym będącym podstawą ubiegania się o nadanie stopnia doktora habilitowanego jest:

- cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych pt.:

**Inteligentne systemy diagnostyczne i sterowania wspomagane sztucznymi sieciami neuronowymi**

- 2 zrealizowane oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne, technologiczne lub artystyczne, pt.:

**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**

**Opracowanie zaawansowanego systemu wdrożenia i utrzymania autonomicznego przemysłowego robota serwisowego wykorzystującego innowacyjne algorytmy machine learning i rozwiązania cyfrowego bliźniaka**

4.1. Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych:

[H1] Influence of acoustoelastic coefficient on wave time of flight in stress measurement in piezoelectric self-excited system / Janusz KWAŚNIEWSKI, Ireneusz DOMINIK, Krzysztof LALIK, Karolina HOLEWA // Mechanical Systems and Signal Processing ; ISSN 0888-3270. — 2016 vol. 78, **IF=7.9**

[H2] Integrated stress measurement system in tower crane mast / Krzysztof LALIK, Ireneusz DOMINIK, Paweł CWIĄKAŁA, Janusz KWAŚNIEWSKI // Measurement ; ISSN 0263-2241. — 102, **IF=5.2**

[H3] Modeling of self-excited stress measurement system / Ireneusz DOMINIK, Krzysztof LALIK, Stanisław FLAGA // Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control ; ISSN 1461-3484. — 2021 vol. 40 iss. 2, **IF=2.3**

[H4] Non-destructive acoustical rock bolt testing system with intelligent filtering in Salt Mine 'Wieliczka' / Krzysztof LALIK, Ireneusz DOMINIK, Paweł Gut, Krzysztof SKRZYPKOWSKI, Waldemar KORZENIOWSKI, Krzysztof ZAGÓRSKI // Energies; ISSN 1996-1073. — 2021 vol. 14 iss. 17 art. no. 5522, 1–16., **IF=3.0**

[H5] Autonomous machine learning algorithm for stress monitoring in concrete using elastoacoustical effect / Krzysztof LALIK, Mateusz KOZEK, Ireneusz DOMINIK // Materials [Dokument elektroniczny]. — Czasopismo elektroniczne ; ISSN 1996-1944. — 2021 vol. 14 iss. 15 art. no. 4116, s. 1–14., **IF=3.4**

[H6] Boosted convolutional neural network algorithm for the classification of the bearing fault form 1-D raw sensor data / Paweł Knap, Krzysztof LALIK, Patryk BAŁAZY // Sensors; ISSN 1424-8220. — 2023 vol. 23 iss. 9 art. no. 4295, s. 1–22., **IF=3.7**

[H7] Predictive maintenance neural control algorithm for defect detection of the power plants rotating machines using augmented reality goggles / Krzysztof LALIK, Filip WĄTOREK; // Energies ISSN 1996-1073. — 2021 vol. 14 iss. 22 art. no. 7632, s. 1–18., **IF=3.0**

[H8] Application of ANN control algorithm for optimizing performance of a hybrid ORC power plant / Szymon PODLASEK, Marcin JANKOWSKI, Patryk BAŁAZY, Krzysztof LALIK, Rafał FIGAJ // Energy ; ISSN 0360-5442. — 2024 — vol. 306 art. no. 132082, s. 1-19. — Bibliogr. s. 18-19., **IF=9.0**

[H9] Neural algorithm for optimization a multidimensional object controller parameters / Patryk BAŁAZY, Krzysztof LALIK, Paweł KNAP // Neural Computing & Applications ; ISSN 0941-0643. — 2024, **IF=4.7**

[H10] Neural nonparametric stability indicator for self-excited dynamical systems / Krzysztof LALIK // IEEE Access [Dokument elektroniczny]. — Czasopismo elektroniczne ; ISSN 2169-3536. — 2024 — vol. 12, s. 96126–96137., **IF=3.7**

4.2. Oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne, technologiczne:

- W ramach prac zrealizowano projekt modelowania i optymalizacji przemysłowego procesu przeróbki wapienia z wykorzystaniem opracowanych wskaźników oceny o charakterze technologiczno-ekonomicznym. Podstawą realizacji projektu było

przeprowadzenie badań przemysłowych w zakładzie przeróbczym Kopalni Wapienia "Czatkowice" sp. z o.o. Informacje dostarczane przez system kontroli były podstawą do optymalizacji pracy układu przeróbki surowca i posłużyły do opracowania modeli neuronowych tych procesów. Efektywne modele wskaźników zostały wykorzystane do sformułowania zadania optymalizacyjnego, w którym funkcja celu wyrażała określone kryterium jakości (np. koszt, wydajność, energochłonność). Optymalizacja polegała m.in. na minimalizacji kosztów przerobu i maksymalizacji wydajności zakładu przy ograniczeniu zużycia energii i mediów. Przedstawiono również szacunkowe efekty ekonomiczne możliwe do osiągnięcia po wprowadzeniu wyznaczonych optymalnych wartości sterowań do systemu optymalizacji procesem przeróbki wapienia. Prace realizowane we współpracy z „Fundacja Nauka i Tradycje Górnicze” w ramach zlecenia: „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”

- W ramach prac pt „Opracowanie zaawansowanego systemu wdrożenia i utrzymania autonomicznego przemysłowego robota serwisowego wykorzystującego innowacyjne algorytmy machine learning i rozwiązania cyfrowego bliźniaka” utworzono, zwalidowano i zaimplementowano kompletny system neuronowy na mobilnym robocie czyszczącym. Prace wykonane w ramach projektu POIR.01.01.01-00-0124/22 pod tym samym tytułem. Podmiot finansujący: NCBiR. Rola w projekcie: Kierownik prac B+R. Wartość projektu: 8 765 665,63 PLN. Podmiot realizujący: GREENTECH ROBOTICS SPÓŁKA Z OGRANICZONĄ ODPOWIEDZIALNOŚCIĄ.



### 4.3. Wprowadzenie

Sieci neuronowe odgrywają coraz bardziej znaczącą rolę we współczesnej inżynierii. W dobie cyfryzacji i szybkiego rozwoju technologii, nowoczesne metody monitorowania naprężeń, diagnozowania uszkodzeń oraz sterowania w różnorodnych systemach inżynierskich stają się coraz bardziej zaawansowane, zintegrowane i multidyscyplinarne. W ciągu ostatnich lat rozwiązania wspomagane sieciami neuronowymi wprowadziły szereg innowacyjnych metod, które umożliwiają osiągnięcie niespotykanej dotychczas precyzji i efektywności w sterowaniu i diagnostyce.

Wykrywanie naprężeń tradycyjnie opiera się na takich technikach jak ekstensometria, znana również jako metoda tensometryczna [A1]. Ekstensometry to cienkie paski metalu przyklejane do badanej powierzchni, które reagują na zmiany długości poprzez zmianę swojego oporu elektrycznego, co pozwala na dokładne monitorowanie naprężeń powierzchniowych w czasie rzeczywistym. Niemniej jednak instalacja tensometrów jest czasochłonna i ogranicza szybkość oraz masowość pomiarów. Inną metodą jest dyfrakcja rentgenowska, polegająca na analizie wzorca dyfrakcyjnego wytworzonego przez strukturę krystaliczną materiału pod wpływem promieni X [A2], co wymaga zaawansowanej aparatury rentgenowskiej i ogranicza jej zastosowanie do warunków laboratoryjnych.

Spektroskopia akustyczna, wykorzystująca dźwięki lub fale ultradźwiękowe przemieszczające się przez materiał i zmieniające swoją prędkość w zależności od naprężeń wewnętrznych, również znajduje zastosowanie w monitorowaniu naprężeń. Analiza tych zmian pozwala na określenie naprężeń w badanym obiekcie, choć wymaga zastosowania megahercowych częstotliwości pomiaru [A3]. Metody optyczne, takie jak interferometria, polegają na analizie wzorców interferencyjnych światła przechodzącego przez materiał pod naprężeniem, co również jest skomplikowane w warunkach poza laboratoryjnych [A4].

Metody akustyczne, takie jak Akustyczna Emisja (AE), są szczególnie przydatne w nieniszczącym monitorowaniu stanu konstrukcji. Technika AE wykrywa fale akustyczne generowane przez procesy wewnętrzne w materiale, takie jak pęknięcia, tarcie czy korozja [A5]. Detektory AE lokalizują źródło emisji, umożliwiając dokładną lokalizację potencjalnych problemów.

Nowym rozwiązaniem w dziedzinie defektoskopii i oceny stanu naprężeń jest Samowzbudny Akustyczny System SAS [A6-A8]. Badania podstawowe dotyczące tego systemu były przeprowadzane przeze mnie już w przed uzyskaniem tytułu doktora. Dotyczyły one głównie potwierdzenia przydatności tego efektu w pomiarze naprężeń i analizie wpływu kluczowych parametrów na uzyskane wyniki. Co do zasady system ten bazuje na efekcie samowzbudzenia, gdzie dzięki zastosowaniu pętli dodatniego sprzężenia zwrotnego układ drgający wzbudza się do swojego cyklu granicznego o określonej częstotliwości. Wraz z obecnością defektów lub zmianą naprężenia częstotliwość ta może się zmieniać. Mierząc tę częstotliwość można zatem w sposób pośredni określić stan badanej konstrukcji. Niemniej jednak istniały już wtedy dalej nierozwiązane problemy z zakresu identyfikacji i sterowania. Z jednej strony nie było możliwości bezpośredniej oceny, czy zmiana częstotliwości cyklu granicznego wynikała z istnienia defektu, czy też ze zmiany naprężeń w badanym materiale. Z drugiej strony system SAS miał tendencję do przełączania się pomiędzy cyklami granicznymi. Ten negatywny efekt starano się ograniczać za pomocą klasycznych układów filtrujących i regulatorów, ale efekty takiego podejścia były w dużej mierze niezadawalające. W tamtym momencie skierowałem swoje zainteresowania w kierunku

wspomagania systemu SAS za pomocą sieci neuronowych w zakresie zarówno identyfikacji, jak i regulacji.

Współczesne zaawansowane systemy diagnostyczne integrują technologie akustyczne, algorytmy uczenia maszynowego, układy FPGA oraz Rzeczywistość Rozszerzoną (AR). Tradycyjne metody diagnostyczne wymagają przygotowania infrastruktury sensorycznej oraz zaawansowanej wiedzy eksperckiej do przetwarzania i interpretacji danych sensorycznych. Współczesna diagnostyka opiera się na zaawansowanej analizie danych, wykorzystując algorytmy uczenia maszynowego, takie jak sieci neuronowe, które umożliwiają przetwarzanie surowych danych z sensorów w czasie rzeczywistym. To zwiększa skuteczność detekcji uszkodzeń i przyspiesza proces diagnostyczny.

Systemy samowzбудne z sieciami neuronowymi mogą dokładniej określać naprężenia i lokalizację defektów. Natomiast Predictive Maintenance z sieciami neuronowymi pozwala na wykrywanie wzorców niewidocznych dla ekspertów oraz sterowanie złożonymi układami dzięki zdolności sieci neuronowych do reprezentowania dowolnie złożonej funkcji ciągłej.

Sterowanie adaptacyjne z sieciami neuronowymi jest jedną z najbardziej rozwiniętych metod, umożliwiającą dostosowanie parametrów sterowania w czasie rzeczywistym do zmieniających się warunków pracy systemu. Klasyczne podejścia adaptacyjne często nie radzą sobie w przypadku nieliniowych systemów, gdzie sieci neuronowe mogą znacznie poprawić efektywność. Na przykład, w pracy [A9], przedstawiono adaptacyjne sterowanie z wykorzystaniem sieci neuronowych w systemach lotniczych, gdzie sieci neuronowe modelują nieliniowości dynamiki lotu, poprawiając stabilność i osiągi.

Sterowanie predykcyjne z modelami opartymi na sieciach neuronowych (NMPC – Neural Model Predictive Control) polega na użyciu sieci neuronowych do przewidywania przyszłych stanów systemu i optymalizacji trajektorii sterowania. W [A10] opisano zastosowanie NMPC w procesach przemysłowych, gdzie dokładność przewidywań sieci neuronowych pozwala na optymalizację wydajności procesów produkcyjnych.

Sieci neuronowe znalazły zastosowanie w sterowaniu odpornościowym, gdzie kluczowe jest utrzymanie stabilności i wydajności systemu w obecności zakłóceń i niepewności. Przykładem może być praca [A11], która demonstruje wykorzystanie sieci neuronowych w sterowaniu robotami mobilnymi, poprawiając odporność na zmienne warunki terenowe i zakłócenia.

Połączenie sterowania adaptacyjnego i metod uczenia maszynowego, w tym głębokiego uczenia (Deep Learning), prowadzi do rozwoju sterowania adaptacyjno-uczącego się. W pracy [A12] omówiono zastosowanie głębokich sieci neuronowych do sterowania autonomicznych pojazdów, gdzie sieci te uczą się z doświadczeń w rzeczywistym środowisku, co prowadzi do ciągłej poprawy strategii sterowania.

Sterowanie optymalne z sieciami neuronowymi polega na znajdowaniu optymalnych strategii sterowania dla danego systemu poprzez uczenie wzmacniające (Reinforcement Learning). Praca [A13] przedstawia architekturę, w której sieci neuronowe są wykorzystywane do sterowania systemami wielowymiarowymi (jak zaawansowane układy robotyczne i zarządzania energią), gdzie sieci uczą się optymalnych polityk sterowania na podstawie interakcji z otoczeniem.

Metody hybrydowe łączą sieci neuronowe z tradycyjnymi metodami sterowania, takimi jak sterowanie PID (Proportional-Integral-Derivative), w celu poprawy osiągnięć systemu. W [A14]



opisano wykorzystanie sieci neuronowych do dostrajania parametrów PID w systemach sterowania ruchem, co prowadzi do lepszej reakcji na zakłócenia i zmiany obciążenia.

Natomiast sterowanie bezpośrednio z sieciami neuronowymi polega na bezpośrednim generowaniu sygnałów sterujących na podstawie aktualnych danych wejściowych. W pracy [A15] sieci neuronowe są używane do bezpośredniego sterowania procesami nieliniowymi, co eliminuje potrzebę modelowania matematycznego systemu i pozwala na szybsze dostosowanie do zmieniających się warunków.

Systemy wspomagane sieciami neuronowymi w ciągu kilku minionych lat stały się kluczowymi rozwiązaniami w wielu dziedzinach techniki, stąd stały się naturalną motywacją do zastosowania ich w systemach diagnostycznych i sterowania. Kluczowym osiągnięciem przedstawionym w tym referacie jest zaproponowanie, utworzenie i weryfikacja eksperymentalna zestawu przetworników pomiarowych z neuronowymi algorytmami sterowania systemami samowzbudnymi, przetwarzania danych i wsparcia użytkownika w ocenie stanu badanych obiektów. Innowacyjne systemy działające w zamkniętej pętli z dodatnim sprzężeniem zwrotnym umożliwiają bardziej precyzyjne monitorowanie stanu obiektów w czasie rzeczywistym.

W niniejszym autoreferacie omówione zostaną najnowsze osiągnięcia w dziedzinie wspomagania sieciami neuronowymi procesów sterowania, monitorowania naprężeń i diagnozowania uszkodzeń, skupiając się na modelowaniu, projektowaniu i badaniach eksperymentalnych tych metod. Analiza przedstawia kompleksowy obraz wpływu algorytmów i metod na poprawę skuteczności diagnostyki z wykorzystaniem Samowzbudnego Systemu Akustycznego (SAS), a także w Predictive Maintenance.

Zagadnienia związane z systemem SAS oraz wspomaganie sieciami neuronowymi są przedmiotem opublikowanych przeze mnie 96 publikacji, rozdziałów w monografiach i książkach, których jestem współautorem. Rozwiązań związanych z systemem SAS dotyczą również niektóre wnioski patentowe i uzyskane patenty, których jestem współautorem.

#### **Literatura do wstępu:**

[A1]. dos Santos, D. A., de Souza Soares, A. M., & Tupinambá, W. L. M. (2022). Development of a portable data acquisition system for extensometry. *Experimental Techniques*, 1-8.

[A2]. Hassani, S., & Dackermann, U. (2023). A systematic review of advanced sensor technologies for non-destructive testing and structural health monitoring. *Sensors*, 23(4), 2204.

[A3]. Andreani, P., de Moraes, J. O., Murta, B. H., Link, J. V., Tribuzi, G., Laurindo, J. B., ... & Carciofi, B. A. (2020). Spectrum crispness sensory scale correlation with instrumental acoustic high-sampling rate and mechanical analyses. *Food Research International*, 129, 108886.

[A4]. Wen, B. J., & Lee, C. Y. (2024). Measurement of stress characteristics in flexible multi-thin-film substrates using tomography common optical path interferometry. *Measurement*, 115244.

[A5]. Calabrese, Luigi, and Edoardo Proverbio. "A review on the applications of acoustic emission technique in the study of stress corrosion cracking." *Corrosion and Materials Degradation* 2.1 (2020): 1-30.

[A6]. Chatterjee, S. (2011). Self-excited oscillation under nonlinear feedback with time-delay. *Journal of Sound and Vibration*, 330(9), 1860-1876.

- [A7]. Kwaśniewski, J., Dominik, I., & Lalik, K. (2012). A self-excited acoustical system for stress measurement in a cement plant. *Mechanics and Control*, 31(1), 29-29.
- [A8]. Kwasniewski, J., Kravtsov, Y., Dominik, I., Dorobczynski, L., & Lalik, K. (2013). Self-excited acoustical system for stress measurement in mass rocks. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 32(1-2), 133-144.
- [A9]. Wu, Z., Pan, S., Chen, F., Long, G., Zhang, C., & Philip, S. Y. (2020). A comprehensive survey on graph neural networks. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*, 32(1), 4-24.
- [A10]. Schwenzer, M., Ay, M., Bergs, T., & Abel, D. (2021). Review on model predictive control: An engineering perspective. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117(5), 1327-1349.
- [A11]. Perrusquía, A., & Yu, W. (2021). Identification and optimal control of nonlinear systems using recurrent neural networks and reinforcement learning: An overview. *Neurocomputing*, 438, 145-154.
- [A12]. Dargan, S., Kumar, M., Ayyagari, M. R., & Kumar, G. (2020). A survey of deep learning and its applications: a new paradigm to machine learning. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27, 1071-1092.
- [A13]. Sutton, R. S., & Barto, A. G. (2018). *Reinforcement learning: An introduction*. MIT press.
- [A14]. Mao, W. L., Suprpto, & Hung, C. W. (2016). Adaptive neural network-based synchronized control of dual-axis linear actuators. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(7), 1687814016654603..
- [A15]. Liang, H., Liu, G., Zhang, H., & Huang, T. (2020). Neural-network-based event-triggered adaptive control of nonaffine nonlinear multiagent systems with dynamic uncertainties. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 32(5), 2239-2250.

#### 4.4. Główne osiągnięcia naukowe

##### **Cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych**

W obliczu rosnących wymagań dotyczących niezawodności i efektywności systemów inżynierskich, istnieje pilna potrzeba rozwijania zaawansowanych metod diagnostyki i sterowania. Tradycyjne techniki, takie jak ekstensometria czy dyfrakcja rentgenowska, mają swoje ograniczenia pod względem precyzji, szybkości i kosztów. Wprowadzenie wspomaganie sieciami neuronowymi do systemów diagnostycznych i sterowania otworzyło nowe możliwości w zakresie monitorowania naprężeń, detekcji defektów oraz adaptacyjnego sterowania układami nieliniowymi. Przedstawione publikacje stanowią istotny wkład w rozwój tych metod i algorytmów.

W przypadku cyklu powiązanych ze sobą artykułów naukowych Autor zaprezentował interdyscyplinarne zagadnienia związane z diagnostyką i sterowaniem wspomaganym przez sieci neuronowe ze szczególnym uwzględnieniem systemów samowzbudnych. Publikacje [H1-H3] stanowią bazę do dalszych prac. Pokazują one, stworzoną przez Autora, podstawową architekturę systemu wraz z teoretycznym wyprowadzeniem podstawowych formuł i równań wiążących naprężenia i częstotliwości cyklu granicznego. Te prace miały także fundamentalny charakter w zakresie zidentyfikowania źródeł zaburzeń pracy systemu jak: problemy w interpretacji uzyskanych wyników, wpływu rodzaju badanego materiału na działanie systemu SAS, niejednoznaczności rezultatów przy współistnieniu zmian naprężeń i defektów materiału, samoistnego przełączania się systemu pomiędzy swoimi cyklami granicznymi.

Jednym z kluczowych osiągnięć było wyprowadzenie teoretycznej zależności między częstotliwością cyklu granicznego systemu SAS a naprężeniami w badanym materiale. Poprzez integrację modeli efektu elastoakustycznego, modelu Dahla dla głowicy nadawczej, modelu transmitacyjnego dla głowicy odbiorczej oraz modelu układu z opóźnieniem i dodatnim sprzężeniem zwrotnym, udało mi się stworzyć funkcję łączącą mierzone parametry z rzeczywistymi naprężeniami. To stanowiło istotny postęp w dziedzinie monitorowania naprężeń i zostało szczegółowo omówione w publikacji [H1].

W mojej pracy szczegółowo przeanalizowałem wpływ rodzaju fali akustycznej oraz kierunku jej propagacji względem kierunku naprężeń na prędkość rozchodzenia się fali w materiale. Zjawisko to jest związane z efektem elastoakustycznym, gdzie naprężenia wpływają na właściwości sprężyste materiału, a tym samym na prędkość fali akustycznej. Wykazałem, że zmiana prędkości fali akustycznej jest proporcjonalna do zmian naprężeń, a współczynnik proporcjonalności, zwany współczynnikiem elastoakustycznym ( $\beta$ ), zależy od rodzaju fali (podłużna lub poprzeczna) oraz jej polaryzacji względem kierunku naprężeń. Aby precyzyjnie opisać zależność między mierzoną częstotliwością drgań systemu SAS a naprężeniami w badanym materiale, opracowałem kompleksowy model teoretyczny. Model ten integruje kilka kluczowych elementów:

- Model efektu elastoakustycznego: Opisuje wpływ naprężeń na prędkość rozchodzenia się fali akustycznej w materiale, uwzględniając różne rodzaje fal i ich polaryzację. Pozwoliło to na zrozumienie, jak zmiany naprężeń wpływają na czas przelotu fali akustycznej między głowicami pomiarowymi.
- Model przetwornika piezoelektrycznego (nadajnika): Zastosowałem model oparty na równaniach Dahla, który uwzględnia histerezę i nieliniowe właściwości materiału piezoelektrycznego. Dzięki temu możliwe było dokładne odwzorowanie zachowania głowicy nadawczej w różnych warunkach eksploatacyjnych.

- Model odbiornika piezoelektrycznego: Opisałem zachowanie głowicy odbiorczej, uwzględniając jej charakterystyki częstotliwościowe oraz odpowiedź na sygnały o różnych amplitudach i częstotliwościach. Pozwoliło to na precyzyjne modelowanie sygnału odbieranego przez system.
- Model układu z opóźnieniem i dodatnim sprzężeniem zwrotnym: Uwzględniłem opóźnienie sygnału wynikające z czasu propagacji fali przez materiał oraz dodatnie sprzężenie zwrotne, które jest kluczowe dla powstania efektu samowzbudzenia. Model ten pozwolił na analizę wpływu różnych czynników na stabilność i częstotliwość drgań układu.

Integracja tych modeli umożliwiła wyprowadzenie funkcji matematycznej, która bezpośrednio łączy mierzoną częstotliwość drgań z naprężeniami w materiale. To istotne osiągnięcie pozwala na dokładne, nieniszczące pomiary naprężeń w czasie rzeczywistym, bez konieczności stosowania skomplikowanej aparatury czy długotrwałego przygotowania powierzchni badanej.

Przeprowadziłem również weryfikację eksperymentalną opracowanego modelu. W eksperymentach wykorzystano belkę stalową poddaną ścisłaniu osiowemu, na której zamontowano głowice nadawczą i odbiorczą. Pomiar częstotliwości drgań samowzbudnych pozwolił na określenie zmian naprężeń, a uzyskane wyniki wykazały wysoką zgodność z przewidywaniami modelu teoretycznego. Szczególnie istotne było potwierdzenie wpływu kierunku propagacji fali akustycznej względem kierunku naprężeń na zmianę częstotliwości cyklu granicznego.

Podczas badań zidentyfikowałem również kluczowe wyzwania wpływające na dokładność i niezawodność systemu SAS. Jednym z nich było niekorzystne zjawisko przeskoków częstotliwości cyklu granicznego, które mogło prowadzić do błędnej interpretacji wyników. Wprowadziłem zaawansowane metody filtracji oraz stabilizacji układu, które pozwoliły na zminimalizowanie tego efektu i zwiększenie precyzji pomiarów. Metoda ta jest również korzystna z punktu widzenia ekonomicznego i operacyjnego. Opracowany przeze mnie system SAS nie wymaga skomplikowanej aparatury pomiarowej ani specjalistycznego przygotowania powierzchni, jak w przypadku tradycyjnych metod tensometrycznych. Głowice pomiarowe mogą być łatwo zamontowane na badanym obiekcie za pomocą magnesów lub kleju, co upraszcza instalację i redukuje koszty.

Opracowanie teoretycznych podstaw działania systemu SAS z wykorzystaniem efektu samowzbudzenia stanowi istotny wkład w dziedzinę monitorowania stanu konstrukcji oraz teorii sterowania. Zaproponowana metodyka może być również adaptowana do innych zastosowań, w których istotne jest monitorowanie naprężeń lub innych parametrów mechanicznych, otwierając nowe kierunki badań w inżynierii i naukach pokrewnych. Ponadto, wyniki moich badań mogą przyczynić się do rozwoju inteligentnych systemów diagnostycznych, integrujących techniki akustyczne z algorytmami uczenia maszynowego. Takie podejście pozwala na jeszcze bardziej precyzyjną analizę danych i podejmowanie decyzji w czasie rzeczywistym.

W publikacji [H2] przedstawiam opracowany przeze mnie nowy model fizyczny systemu SAS, oparty na analogii z rezonatorem kwarcowym. Model ten pozwolił na wyznaczenie zastępczych wartości pojemności i rezystancji, ułatwiając interpretację wyników pomiarowych. Praktyczne zastosowanie modelu zostało zweryfikowane na rzeczywistym obiekcie — masztowym dźwigu budowlanym. Kluczowym wkładem w rozwoju inteligentnych systemów zaprezentowanym w tym artykule było zaproponowanie nowego modelu fizycznego systemu SAS, opartego na analogii funkcjonalnej z rezonatorem kwarcowym. W tradycyjnych rezonatorach kwarcowych stabilizacja częstotliwości rezonansowej jest osiągana dzięki drganiom mechanicznym kryształu kwarcu. W moim modelu, zastąpiłem kryształ kwarcu przetwornikiem piezoelektrycznym, a propagację fali akustycznej w

materiale między głowicami nadawczą i odbiorczą przedstawiłem jako zmienną pojemność obciążenia. Zaproponowana, nowa reprezentacja systemu pozwoliła na wyprowadzenie nowych zależności matematycznych łączących częstotliwość rezonansową systemu z naprężeniami w badanym materiale. Opracowałem szczegółowe równania matematyczne, które uwzględniają efekt elastoakustyczny – zmianę prędkości propagacji fali akustycznej w materiale pod wpływem naprężeń. Wykazałem, że czas propagacji fali akustycznej, a co za tym idzie częstotliwość rezonansowa systemu SAS, zależy bezpośrednio od naprężeń w konstrukcji. Ta nowa wiedza umożliwiła stworzenie metody pomiarowej, która nie tylko mierzy zmiany naprężeń, ale również pozwala na określenie ich wartości absolutnej. Istotnym osiągnięciem było porównanie wyników uzyskanych za pomocą systemu SAS z wynikami z tradycyjnych metod pomiarowych, takich jak tachimetria automatyczna. Wykazałem, że system SAS dostarcza porównywalne, a często bardziej precyzyjne dane dotyczące zmian naprężeń, przy znacznie niższych kosztach i prostszej obsłudze. Ponadto, system SAS umożliwia ciągłe monitorowanie stanu konstrukcji w czasie rzeczywistym, co jest kluczowe dla zapewnienia bezpieczeństwa i niezawodności takich obiektów jak żurawie wieżowe.

W trakcie badań napotkałem na problem dużej ilości danych generowanych przez system SAS, co utrudniało ich przetwarzanie i analizę. Aby temu zaradzić, opracowałem dedykowane algorytmy i oprogramowanie do przetwarzania sygnałów w czasie rzeczywistym, które umożliwiły efektywne wyodrębnianie istotnych informacji z dużych zbiorów danych. Ta innowacja przyczyniła się do zwiększenia użyteczności systemu w praktycznych zastosowaniach przemysłowych.

Moje badania poszerzyły wiedzę w dziedzinie nieniszczących metod diagnostycznych, rozwijając nową technikę pomiarową opartą na efekcie samowzbudzenia i elastoakustycznym. Opracowany model teoretyczny i potwierdzony eksperymentalnie system SAS stanowią znaczący wkład w rozwój metod monitorowania stanu konstrukcji inżynierskich. Dzięki nim możliwe jest wcześniejsze wykrywanie potencjalnych uszkodzeń, co ma bezpośredni wpływ na poprawę bezpieczeństwa eksploatacji takich obiektów.

W toku dalszych prac opracowałem kolejne modele teoretyczne systemu, przedstawione w publikacji [H3]. W celu dokładniejszego opisu zachowania systemu SAS, opracowałem dwa modele systemu wykonawczego oraz model obciążonej belki poddanej ścisłaniu osiowemu. Połączenie tych modeli umożliwiło określenie zależności między pulsacją systemu samowzbudnego a naprężeniami w materiale. Stworzone modele umożliwiają przewidywanie zachowania systemu w różnych warunkach obciążenia. Zgodność modeli z wynikami eksperymentalnymi potwierdziła ich poprawność i użyteczność w praktycznych zastosowaniach.

W wyniku przeprowadzonych badań uzyskałem nową wiedzę na temat zachowania układów samowzbudnych w kontekście pomiarów akustycznych oraz wpływu naprężeń na częstotliwość drgań takich układów. Zidentyfikowałem kluczowe czynniki wpływające na dokładność pomiarów, takie jak wpływ formy drgań belki czy nieliniowości elementów piezoelektrycznych, oraz opracowałem metody ich uwzględnienia w modelach. Zarówno model prosty, jak i odwrotny wskazują, że w systemie może dochodzić do niekorzystnego zjawiska przejścia pomiędzy cyklami granicznymi. W ten sposób zidentyfikowałem konieczność stosowania aktywnych układów sterowania i filtracji w pętli dodatniego sprzężenia zwrotnego. Ze względu na nieliniowości systemu rozpocząłem prace związane z adaptacyjnymi układami sterowania układów nieliniowych w podejściu klasycznym, jak i z wykorzystaniem regulatorów neuronowych.

W celu realizacji takich algorytmów niezbędne było opracowanie platformy sprzętowej, która mogłaby obsługiwać takie regulatory. W artykule [H4] opisałem opracowaną architekturę FPGA do redukcji

zjawiska przełączania się pomiędzy cyklami granicznymi. Przedstawiony układ inteligentnej filtracji pozwolił na zadowalające, lecz nieidealne rozwiązanie tego problemu, które było możliwe dopiero po opracowaniu aktywnych, neuronowych regulatorów sprzężenia zwrotnego. W ramach moich badań nad nieliniowymi układami dynamicznymi oraz ich zastosowaniem w diagnostyce, skupiłem się na opracowaniu regulatora systemu SAS. Artykuł [H4] stanowi także potwierdzenie skuteczności systemu w kontekście nieniszczących badań materiałów kompozytowych w postaci kotew górniczych. Kotwy kompozytowe stanowią kluczowy element bezpieczeństwa w górnictwie, jednak ze względu na ich złożoną strukturę materiałową, istniejące metody pomiaru naprężeń są niewystarczające lub nieadekwatne. Według przeprowadzonej analizy otoczenia technologicznego, nie istnieją systemy umożliwiające bezpośredni pomiar naprężeń w takich materiałach w warunkach przemysłowych.

Kluczowym osiągnięciem przedstawionym w artykule [H4] było opracowanie aktywnego, adaptacyjnego układu sterowania systemem SAS, który pozwolił na znaczną redukcję występowania przeskoków częstotliwości, charakterystycznych dla samowzbudnych układów nieliniowych. Jak już wskazano wcześniej, dzięki publikacjom [H1-H3] przeskoki częstotliwości, wynikające z przejść systemu między różnymi cyklami granicznymi, stanowią istotne utrudnienie w interpretacji wyników pomiarów i ograniczają dokładność diagnostyczną systemu SAS. Sterowanie nieliniowymi układami dynamicznymi jest zadaniem niezwykle wymagającym ze względu na ich złożone zachowanie, wrażliwość na warunki początkowe oraz obecność wielu stabilnych i niestabilnych cykli granicznych. W celu skutecznego zarządzania dynamiką systemu, opracowałem zaawansowany algorytm sterowania adaptacyjnego, który na bieżąco dostosowuje parametry systemu w odpowiedzi na jego aktualny stan. Algorytm ten został zaimplementowany w platformie FPGA, co pozwoliło na szybką i efektywną realizację zadań sterowania w czasie rzeczywistym.

W przeprowadzonych eksperymentach, zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i rzeczywistych, wykazałem, że opracowany układ sterowania znacząco redukuje częstotliwość występowania przeskoków częstotliwości. Chociaż nie udało się całkowicie wyeliminować tego zjawiska, osiągnięta redukcja była na tyle istotna, że pozwoliła na poprawę rezyliencji i wiarygodności pomiarów wykonywanych za pomocą systemu SAS. Testy przeprowadzone na kompozytowych kotwach górniczych potwierdziły skuteczność opracowanego rozwiązania. Dzięki zastosowaniu aktywnego sterowania, możliwe stało się uzyskanie bardziej stabilnej pracy systemu (w znaczeniu: z mniejszą ilością przejść pomiędzy cyklami granicznymi), co jest szczególnie istotne w przypadku materiałów kompozytowych o złożonej strukturze wewnętrznej. Opracowany system pozwala na monitorowanie stanu naprężeń w kotwach kompozytowych, co dotychczas było trudne lub wręcz niemożliwe do osiągnięcia za pomocą istniejących metod. Osiągnięcia te mają istotne znaczenie dla nauki i praktyki inżynierskiej. Po pierwsze, wykazałem, że możliwe jest efektywne sterowanie nieliniowym układem samowzbudnym poprzez aktywne, adaptacyjne sterowanie, co otwiera nowe możliwości w dziedzinie automatyki i teorii sterowania. Po drugie, udowodniłem, że system SAS może być skutecznie zastosowany także do nieniszczących badań materiałów kompozytowych, co jest istotnym wkładem w dziedzinę diagnostyki.

W artykule [H5] przedstawiono nowy sposób wspomagania interpretacji charakterystyk częstotliwościowych z użyciem Uczenia Maszynowego. Dzięki Uczeniu sieci w warunkach laboratoryjnych możliwa stała się bezpośrednia identyfikacja naprężeń w warunkach przemysłowych.

Głównym osiągnięciem przedstawionym w artykule było zaprojektowanie i implementacja autonomicznego algorytmu uczenia maszynowego, który umożliwia analizę widma częstotliwościowego sygnałów z Samowzbudnego Systemu Akustycznego (SAS) w czasie

rzeczywistym. Dzięki temu opracowałem system zdolny do identyfikacji stanu naprężenia w konstrukcjach betonowych bez konieczności znajomości wartości współczynnika elastoakustycznego, co stanowi istotne uproszczenie i usprawnienie procesu diagnostycznego. Artykuł ten przedstawia udoskonalenie metodyki dla systemu SAS. W przypadku metody wykorzystującej efekt elastoakustyczny do pomiaru naprężeń w betonie konieczne jest każdorazowo dokładne wyznaczenie współczynnika elastoakustycznego dla konkretnego rodzaju betonu. Proces ten jest czasochłonny i wymaga precyzyjnych pomiarów przy wysokich częstotliwościach próbkowania. Moje badania pozwoliły na wyeliminowanie tej bariery poprzez zastosowanie algorytmów uczenia maszynowego, które analizują widmo częstotliwościowe generowane przez system SAS i na tej podstawie estymują aktualne obciążenie próbki.

Kluczowym elementem mojego rozwiązania było zaprojektowanie architektury systemu uczącego się, który w fazie treningowej jest zasilany danymi z próbek o znanym materiale i znanym stanie naprężenia, uzyskanymi z zewnętrznego systemu pomiarowego. Następnie, za pomocą zaawansowanego algorytmu uczenia maszynowego opartego na drzewach decyzyjnych typu fine tree, system uczy się zależności pomiędzy widmem częstotliwościowym, a naprężeniem w materiale. W fazie operacyjnej system jest w stanie analizować widmo częstotliwościowe w czasie rzeczywistym i przewidywać naprężenia w materiałach, dla których nie dysponujemy bezpośrednimi pomiarami odniesienia. Zastosowanie algorytmu typu fine tree pozwoliło na uzyskanie wysokiej precyzji w predykcji naprężeń, dzięki zdolności do modelowania złożonych nieliniowych zależności pomiędzy cechami widma, a wartością naprężenia. W trakcie badań eksperymentalnych przeprowadziłem szeroką walidację systemu na próbkach betonowych o różnych gęstościach i składach, co potwierdziło uniwersalność i skuteczność opracowanego podejścia. Wyniki wskazują na wysoką korelację pomiędzy przewidywanymi a rzeczywistymi wartościami naprężeń, przy niskich wartościach błędu średniokwadratowego.

Jednym z istotnych osiągnięć było również opracowanie metodyki przygotowania danych treningowych oraz optymalizacji hiperparametrów algorytmu uczenia maszynowego. Wykorzystanie odpowiednich miar jakości, takich jak funkcja kosztu regresji czy indeks Giniego, pozwoliło na skonstruowanie modelu o wysokiej zdolności generalizacji, unikając problemu przeuczenia.

Opracowana przeze mnie architektura pozwala systemowi na autonomiczne działanie w estymowaniu naprężeń, wykorzystując algorytmy uczenia maszynowego do samodzielnego uczenia się zależności między widmem częstotliwościowym, a stanem naprężenia w materiale. Eliminacja konieczności znajomości współczynnika elastoakustycznego pozwala na zastosowanie metody w szerokim zakresie materiałów bez potrzeby ich indywidualnej kalibracji, co jest szczególnie istotne w praktyce inżynierskiej.

Opracowanie nowej architektury sieci konwolucyjnej pozwoliło na dalszy rozwój wysokowydajnych i odpornych algorytmów przetwarzania sygnałów. Pewnym rozszerzeniem tej koncepcji była, zaproponowana w [H6] nowa metoda identyfikacji widma częstotliwościowego w Predictive Maintenance, będąca zaproponowanej przeze mnie w [H5] architektury sieci neuronowej. W tym wypadku zaproponowana architektura sieci typu konwolucyjnego pozwala na interpretację danych zarówno z systemu SAS, jak i widma z systemu bez sprzężenia zwrotnego pozwalając na autonomiczną identyfikację defektu w badanej strukturze.

W [H6] przedstawiłem innowacyjne podejście do detekcji uszkodzeń łożysk w kontekście utrzymania predykcyjnego maszyn wirujących. Tradycyjne metody diagnostyki wspomaganie sieciami neuronowymi opierają się na analizie obrazów uzyskanych z przetwarzania sygnałów w dziedzinie



czasu, częstotliwości lub czasu-częstotliwości, co wiąże się z koniecznością przeprowadzania złożonych i kosztownych obliczeniowo operacji wstępnego przetwarzania danych. Zaproponowane przeze mnie rozwiązanie eliminuje tę konieczność poprzez bezpośrednią analizę surowych danych pomiarowych z czujników wibracji, wykorzystując zmodyfikowaną architekturę konwolucyjnych sieci neuronowych (CNN). Kluczowym osiągnięciem zaprezentowanym w tym artykule było opracowanie i wdrożenie nowego algorytmu CNN, który analizuje jednowymiarowe dane wejściowe bez potrzeby wcześniejszego przekształcania ich w obrazy czy spektra czasowe, częstotliwościowe lub mieszane. Poprzez dodanie dodatkowego bloku konwolucyjnego do standardowej architektury sieci, udało mi się zwiększyć zdolność sieci do ekstrakcji istotnych cech z sygnału wibracyjnego przy minimalnym narzucie obliczeniowym. Ta modyfikacja pozwoliła na skuteczne filtrowanie szumów i zakłóceń obecnych w sygnale pomiarowym, co jest szczególnie istotne w warunkach przemysłowych, gdzie dane są często obciążone różnymi źródłami zakłóceń. Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że opracowany model 1D CNN przewyższa tradycyjne metody oparte na analizie spektrogramów pod względem dokładności klasyfikacji, szybkości wnioskowania oraz odporności na zakłócenia. W porównaniu z klasycznym wielowarstwowym perceptronem (MLP), nasz model osiągnął znacznie lepsze wyniki, szczególnie w obecności szumu w danych wejściowych. Pełni on jednocześnie rolę ekstraktora cech i procesora wstępnego, co upraszcza architekturę systemu i redukuje wymagania obliczeniowe.

Kluczowym wkładem badawczym było opracowanie nowej modyfikacji architektury konwolucyjnej sieci neuronowej poprzez dodanie dodatkowej warstwy konwolucyjnej. Ta modyfikacja pozwoliła na zwiększenie zdolności sieci do ekstrakcji istotnych cech z surowych danych jednowymiarowych, co z kolei poprawiło dokładność i niezawodność klasyfikacji defektu. Dodatkowa warstwa konwolucyjna pełni rolę zaawansowanego filtra, który redukuje wpływ szumów i zakłóceń w sygnale wejściowym oraz uwypukla istotne wzorce charakterystyczne dla różnych defektów. Dzięki temu sieć neuronowa działa zarówno jako ekstraktor cech, jak i procesor wstępny, co upraszcza architekturę systemu i zwiększa jego efektywność obliczeniową.

Istotnym aspektem badań było zastosowanie surowych danych jednowymiarowych jako wejścia do sieci neuronowej. Dzięki temu wyeliminowano konieczność stosowania złożonych metod przetwarzania sygnału, takich jak transformacje Fouriera czy falkowe, które są nie tylko obciążające obliczeniowo, ale również wymagają specjalistycznej wiedzy eksperckiej do interpretacji wyników. Zaproponowane podejście upraszcza cały proces diagnostyczny, co jest kluczowe dla implementacji w systemach czasu rzeczywistego oraz w urządzeniach o ograniczonej mocy obliczeniowej, takich jak minikomputery czy rozwiązania typu "edge AI". Opracowany algorytm został przetestowany na rzeczywistych danych zebranych z maszyn wirujących. Wykazałem, że model jest w stanie skutecznie klasyfikować stany łożysk — zdrowe, uszkodzenie bieżni wewnętrznej oraz uszkodzenie bieżni zewnętrznej — z wysoką precyzją i pewnością. Ponadto, model okazał się być odporny na zmienność prędkości obrotowej wału, co stanowi istotne wyzwanie w diagnostyce maszynowej i często prowadzi do obniżenia skuteczności tradycyjnych algorytmów.

Wspomagana sieciami neuronowymi detekcja defektów jest także zagadnieniem przedstawionym w artykule [H7]. W tym wypadku zaproponowano nowe źródło danych, jakim są okulary Rozszerzonej Rzeczywistości. Utworzony algorytm neuronowy pozwolił na dostarczenie danych do sieci oraz bezpośrednio wyświetlanie wyników jej działania użytkownikowi na inteligentnym interfejsie holograficznym.

Głównym osiągnięciem przedstawionym w tym artykule było opracowanie i implementacja innowacyjnej platformy pomiarowej, która integruje technologię rzeczywistości rozszerzonej (AR) z

zaawansowanymi algorytmami uczenia maszynowego. Proponowany system umożliwia bezkontaktowe pozyskiwanie danych o stanie technicznym maszyn oraz ich analizę w czasie rzeczywistym, co stanowi istotne uproszczenie i usprawnienie procesu diagnostycznego w porównaniu z tradycyjnymi metodami. Kluczowym elementem opracowanego systemu są gogle AR użyte jako interfejsu zarówno do akwizycji danych, jak i prezentacji wyników analizy. Gogle AR były wyposażone w kamerę oraz szereg czujników umożliwiających precyzyjne mapowanie otoczenia i śledzenie markerów umieszczonych na badanej maszynie. Dane zbierane przez gogle były przesyłane bezprzewodowo do zewnętrznej infrastruktury obliczeniowej, gdzie opracowane algorytmy sieci neuronowych analizowały ruchy markerów w celu wykrycia ewentualnych anomalii i klasyfikacji stanu technicznego maszyny.

W ramach badań eksperymentalnych przeprowadziłem testy na modelu turbiny wiatrowej, symulując różne stany pracy, w tym nieźródnoważenie masy wirnika, niewspółosiowość wałów oraz uszkodzenia łożysk. Wykorzystując metodę analizy obrazu markerów oraz odpowiednio zaprojektowane sieci neuronowe, udało się skutecznie klasyfikować stan techniczny turbiny z wysoką dokładnością. Opracowane sieci neuronowe zostały przeszkolone na zbiorach danych zawierających próbki dla różnych stanów pracy, co umożliwiło ich efektywne wykorzystanie w procesie diagnostycznym.

Istotnym osiągnięciem było wykazanie, że proponowany system pozwala na uproszczenie procesu diagnostyki poprzez eliminację konieczności fizycznego dostępu do krytycznych elementów maszyny. Dzięki zastosowaniu technologii AR oraz bezkontaktowej metody akwizycji danych, możliwe jest monitorowanie stanu technicznego maszyn z bezpiecznej odległości, co ma szczególne znaczenie w przypadku dużych turbin wiatrowych czy innych urządzeń, gdzie dostęp może być utrudniony lub niebezpieczny. Ponadto, integracja technologii AR z algorytmami uczenia maszynowego pozwala na prezentację wyników analizy bezpośrednio w polu widzenia operatora, co znacząco zwiększa efektywność procesu diagnostycznego. Operator wyposażony w gogle AR otrzymuje natychmiastową informację o stanie technicznym maszyny, co umożliwia szybką reakcję na potencjalne problemy i planowanie działań serwisowych.

Opracowany system charakteryzuje się również skalowalnością i możliwością adaptacji do różnych typów maszyn wirujących. Metoda oparta na analizie ruchu markerów może być zastosowana w innych aplikacjach, gdzie konieczne jest monitorowanie drgań i oscylacji elementów konstrukcyjnych. Dodatkowo, wykorzystanie chmury obliczeniowej do analizy danych umożliwia przetwarzanie dużych ilości informacji oraz implementację zaawansowanych algorytmów uczenia maszynowego bez obciążania urządzeń końcowych.

Ważnym aspektem badań było także przeprowadzenie szczegółowej analizy efektywności opracowanych algorytmów sieci neuronowych. Uzyskane wyniki wskazują na wysoką skuteczność klasyfikacji różnych stanów pracy turbiny, z efektywnością na poziomie 98,3% dla wykrywania uszkodzeń oraz 93,3% dla klasyfikacji rodzaju uszkodzenia. Analiza wyników pozwoliła również na identyfikację obszarów wymagających dalszych badań, takich jak rozszerzenie zbioru danych treningowych o próbki uzyskane z maszyn wirujących o większych prędkościach obrotowych.

Podsumowując, moje badania przyczyniły się do rozwoju nowoczesnych metod diagnostyki predykcyjnej maszyn wirujących poprzez opracowanie innowacyjnego systemu integrującego technologię rzeczywistości rozszerzonej z algorytmami uczenia maszynowego. Osiągnięte wyniki potwierdzają praktyczną użyteczność proponowanego podejścia oraz otwierają nowe możliwości w dziedzinie monitorowania stanu technicznego maszyn i urządzeń.

Zaproponowane do tej pory rozwiązania stanowiły złożoną i istotną nowość w zakresie monitorowania stanu oraz naprężeń maszyn i konstrukcji z wykorzystaniem wspomaganie sieciami neuronowymi. Niemniej jednak, zwłaszcza w zakresie monitorowania naprężeń, zidentyfikowałem nie w pełni rozwiązane trudności w zakresie niestabilnego zachowania systemu SAS. Chociaż zjawisko przeskoku pomiędzy cyklami granicznymi było znacząco zredukowane poprzez zaimplementowane rozwiązania (przedstawione w poprzednich publikacjach), to w dalszym ciągu mogło sporadycznie występować. W celu jego eliminacji zaproponowałem w artykułach [H8, H9] metody i algorytmy dotyczące wspomaganých neuronowo systemów sterowania i optymalizacji dynamicznych układów nieliniowych. Opracowane metody pozwoliły na ich implementację w systemie SAS, co pozwoliło na eliminację efektu przeskoku systemu pomiędzy swoimi cyklami granicznymi.

W artykule [H8] przedstawiłem osiągnięcia związane z opracowaniem zaawansowanych algorytmów sterowania opartych na sztucznych sieciach neuronowych do optymalizacji systemów energetycznych. Głównym celem badań było opracowanie i implementacja nowatorskiego algorytmu sterowania, w szczególności algorytmu Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG), do optymalizacji rocznej pracy hybrydowej elektrowni opartej na cyklu organicznym Rankine'a (ORC), zasilanej energią słoneczną i geotermalną. Artykuł ten, choć wstępnie może wydawać się niezwiązany z wcześniejszym cyklem publikacji, odegrał kluczową rolę w opracowaniu nowych metod sterowania nieliniowymi układami dynamicznymi, które następnie zostały zaimplementowane w Samowzbudnym Systemie Akustycznym. Opracowane w tym artykule algorytmy sterowania, oparte na sztucznych sieciach neuronowych i zasadach uczenia ze wzmocnieniem, zostały pierwotnie zastosowane do optymalizacji pracy hybrydowej elektrowni opartej na cyklu organicznym Rankine'a (ORC). Jednak ze względu na swoją uniwersalność i zdolność do efektywnego radzenia sobie z nieliniowościami oraz złożonymi sprzężeniami w systemach typu MIMO (Multiple Input Multiple Output), algorytmy te okazały się niezwykle wartościowe również w kontekście sterowania SAS.

W systemie SAS występują złożone interakcje między komponentami mechanicznymi, akustycznymi i elektronicznymi, prowadzące do powstawania nieliniowych zjawisk samowzbudnych drgań. Tradycyjne metody sterowania często są niewystarczające w obliczu takiej złożoności, ze względu na trudności w precyzyjnym modelowaniu matematycznym i przewidywaniu zachowań systemu. Opracowane w artykule algorytmy, wykorzystujące algorytm Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG), umożliwiły tworzenie adaptacyjnych strategii sterowania bez konieczności posiadania pełnego modelu systemu. W ten sposób, artykuł ten, choć pierwotnie skupiony na sterowaniu i optymalizacji systemu hybrydowego, przyczynił się do rozwoju nowych metod sterowania nieliniowymi układami dynamicznymi. Opracowane algorytmy znalazły bezpośrednie zastosowanie w Samowzbudnym Systemie Akustycznym, umożliwiając skuteczne rozwiązanie problemów związanych z jego złożonością i nieliniowością. Tym samym, badania te otworzyły nowe perspektywy w dziedzinie sterowania zaawansowanymi systemami autorezonansowymi, podkreślając znaczenie interdyscyplinarnego podejścia i transferu wiedzy między różnymi obszarami nauki i techniki.

Jednym z kluczowych osiągnięć opisanych w artykule jest skuteczna integracja algorytmu DDPG do sterowania nieliniowym, wielowymiarowym systemem energetycznym bez konieczności znajomości jego dokładnego modelu matematycznego. Opracowany przeze mnie algorytm umożliwił dynamiczne dostosowywanie parametrów operacyjnych elektrowni do zmieniających się warunków środowiskowych, takich jak fluktuacje nasłonecznienia i temperatury otoczenia. Dzięki temu system osiągnął wyższą efektywność energetyczną i wydajność w skali rocznej w porównaniu z tradycyjnymi metodami optymalizacji, takimi jak sekwencyjne programowanie kwadratowe (SQP).

Implementacja algorytmu DDPG w Samowzbudnym Systemie Akustycznym (SAS) pozwoliła na uczenie się optymalnych strategii sterowania, co skutecznie umożliwiło kontrolowanie amplitudy i częstotliwości drgań akustycznych. W praktyce, SAS był narażony na wpływ czynników zewnętrznych, takich jak zmiany temperatury lub obecność defektów w badanym materiale. Algorytm DDPG dynamicznie dostosowywał strategię sterowania w odpowiedzi na te zmiany, zapewniając optymalną wydajność systemu w różnych warunkach. Dzięki temu osiągnięto zwiększenie stabilności operacyjnej.

Opracowana przeze mnie metoda stanowi istotne osiągnięcie naukowe w dziedzinie sterowania nieliniowymi układami dynamicznymi. Wykazałem, że algorytmy oparte na uczeniu ze wzmocnieniem mogą być skutecznie stosowane w złożonych systemach, takich jak SAS, przynosząc korzyści w postaci lepszej wydajności, adaptacyjności i uproszczenia procesu sterowania.

W artykule [H9] przedstawiłem nowe rozwiązanie dotyczące neuronowego sterowania wielowymiarowymi systemami nieliniowymi. Głównym osiągnięciem naukowym pracy jest opracowanie i skuteczna implementacja bezmodelowego algorytmu sterowania neuronowego opartego na uczeniu ze wzmocnieniem (Reinforcement Learning, RL) dla suwnicy bramowej o pięciu stopniach swobody. Podejście to rozwiązuje ograniczenia tradycyjnych metod sterowania, takich jak regulator liniowo-kwadratowy (LQR), które opierają się na linearyzacji i precyzyjnych modelach matematycznych systemu.

Kluczowym elementem opracowanego przeze mnie algorytmu jest zastosowanie uczenia ze wzmocnieniem, a konkretnie algorytmu Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) w architekturze aktor-krytyk. Algorytm ten umożliwia adaptacyjne dostosowywanie wzmocnień sprzężenia zwrotnego w czasie rzeczywistym, na podstawie obserwacji stanu systemu i wyznaczonej funkcji nagrody. W przeciwieństwie do tradycyjnych metod, algorytm ten nie wymaga znajomości modelu matematycznego obiektu sterowania, co jest szczególnie istotne w przypadku systemów o złożonej nieliniowości i trudnych do modelowania.

W proponowanym algorytmie neuronowym, zamiast (jak w przypadku klasycznego regulatora LQR) polegać na predefiniowanych macierzach  $Q$  i  $R$ , zastosowałem 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*, co przyspiesza proces uczenia i eliminuje problem zanikającego gradientu. Krytyk ocenia wartość oczekiwanej skumulowanej nagrody, co pozwala na aktualizację parametrów polityki sterowania. W ten sposób zaproponowany algorytm umożliwia agentowi uczenie się optymalnej polityki sterowania.

W wyniku przeprowadzonych symulacji wykazano, że proponowany algorytm znacznie przewyższa tradycyjny regulator LQR pod względem jakości sterowania, czasu regulacji oraz zużycia zasobów. Czas transportu ładunku został skrócony z 19 sekund (dla LQR) do 2,55 sekundy (dla NR), co świadczy o znacznym zwiększeniu dynamiki systemu. Ponadto, całka z kwadratu błędu (ISE) została zredukowana z 0,4693 (LQR) do 0,0252 (NR), co potwierdza wyższą precyzję sterowania neuronowego.

Istotnym osiągnięciem jest również adaptacyjność algorytmu do zmieniających się warunków i nieliniowości systemu. Poprzez dynamiczną aktualizację wzmocnień sprzężenia zwrotnego, algorytm utrzymuje stabilność systemu w całym zakresie działania, bez konieczności ręcznego dostrajania parametrów. Analiza stabilności wykazała, że mimo początkowych dużych wzmocnień, system szybko przechodzi do stanu stabilnego, dzięki czemu unika się długotrwałej niestabilności.

Wnioski z pracy wskazują, że zastosowanie bezmodelowych algorytmów sterowania neuronowego opartych na uczeniu ze wzmocnieniem może znacząco poprawić wydajność i efektywność sterowania systemami nieliniowymi wielowymiarowymi. Proponowane podejście otwiera nowe perspektywy w dziedzinie sterowania adaptacyjnego, szczególnie w zastosowaniach, gdzie modelowanie systemu jest trudne lub niemożliwe.

Podsumowując, opracowana przeze mnie metoda dostarcza nowej wiedzy na temat wykorzystania uczenia ze wzmocnieniem w sterowaniu wielowymiarowymi systemami nieliniowymi. Wykazałem, że algorytmy oparte na sieciach neuronowych mogą skutecznie zastąpić tradycyjne metody sterowania, oferując lepszą jakość regulacji, szybkość działania oraz oszczędność zasobów. Praca ta stanowi istotny wkład w rozwój nowoczesnych metod sterowania adaptacyjnego, a jej wyniki zostały zaimplementowane dla systemu SAS.

W artykule [H10] przedstawiłem innowacyjną metodę wykorzystującą sieci neuronowe głębokiego uczenia do estymacji funkcji Lapunowa w systemach dynamicznych, który był reprezentowany przez system SAS. Głównym osiągnięciem jest opracowanie bezmodelowej, nieliniowej metody oceny stabilności układów dynamicznych, co stanowi istotny wkład w teorię sterowania. Tradycyjne metody analizy stabilności wymagają dokładnej znajomości parametrów systemu oraz algebraicznej postaci funkcji Lapunowa, co w przypadku złożonych, nieliniowych systemów jest często niemożliwe. Proponowane przeze mnie podejście eliminuje te ograniczenia, umożliwiając estymację funkcji Lapunowa bez potrzeby posiadania parametrycznego modelu systemu.

Kluczowym elementem metody jest wykorzystanie sieci neuronowych do modelowania dynamiki systemu oraz estymacji funkcji Lapunowa na podstawie danych eksperymentalnych. W pierwszym etapie zastosowałem sieć LSTM (Long Short-Term Memory) do stworzenia reprezentacji dynamiki systemu na podstawie danych z systemu samowzbudnego SAS. Funkcje sieci LSTM opisują następujące zależności:

$$\begin{aligned} i[n] &= \sigma(W_{ii}x[n] + b_{ii} + W_{hi}h[n-1] + b_{hi}) \\ f[n] &= \sigma(W_{if}x[n] + b_{if} + W_{hf}h[n-1] + b_{hf}) \\ \tilde{c}[n] &= \tanh(W_{ic}x[n] + b_{ic} + W_{hc}h[n-1] + b_{hc}) \\ o[n] &= \sigma(W_{io}x[n] + b_{io} + W_{ho}h[n-1] + b_{ho}) \\ c[n] &= f[n]c[n-1] + i[n]\tilde{c}[n] \\ h[n] &= o[n]\tanh(c[n]) \end{aligned}$$

gdzie  $x[n]$  to wejście,  $h[n]$  to stan ukryty,  $c[n]$  to stan komórki, a  $W, b$  to wagi i biasy.

W drugim etapie metody zastosowałem kolejną sieć neuronową do estymacji funkcji Lapunowa  $V(x)$ , spełniającej warunki:

$$\begin{aligned} \alpha_1(\|x\|) &\leq V(x) \leq \alpha_2(\|x\|) \\ \dot{V}(x) &= \nabla V(x) \cdot f(x) \leq -\mathcal{W}_3(x), \end{aligned}$$

Gdzie  $\alpha_1, \alpha_2$  to funkcje klasy  $\mathcal{K}$ , a  $\mathcal{W}_3(x)$  to ciągła, dodatnio określona funkcja. Sieć neuronowa została nauczona z wykorzystaniem specjalnie skonstruowanej funkcji kosztu:

$$L = h_1 L_1^2 + h_2 L_2^2 + h_3 L_3^2$$

gdzie  $L_1^{\square}, L_2^{\square}, L_3^{\square}$  to składniki wynikające z warunków stabilności funkcji Lapunowa, a  $h_1, h_2, h_3$  to hiperparametry regulujące wpływ poszczególnych składników.

Największa innowacja opracowanej przeze mnie metody polega na tym, że estymacja funkcji Lyapunowa jest realizowana w sposób nieparametryczny, z wykorzystaniem danych pomiarowych, bez konieczności znajomości modelu matematycznego systemu. Umożliwia to ocenę stabilności układów nieliniowych w szerszym zakresie przestrzeni stanów niż było to możliwe dotychczas. Należy zwrócić uwagę, że dla zaawansowanych regulatorów neuronowych, zwłaszcza opartych na Sieciach Głębokich lub Uczeniu Maszynowym, ocena stabilności była w zasadzie niemożliwa. Zbudowałem i zwalidowałem zatem nowe narzędzie do definitywnego określania stabilności układów nieliniowych z regulatorami neuronowymi w założonym i ograniczonym przedziale przestrzeni stanów.

Zastosowanie tej metody do systemu SAS pozwoliło na rozróżnienie między zmianami w dynamice systemu spowodowanymi naprężeniami materiału, a obecnością defektów. Dzięki analizie kształtu estymowanej funkcji Lyapunowa możliwe było zidentyfikowanie charakterystycznych cech wskazujących na obecność defektów, takich jak asymetrie w lejku potencjału funkcji Lyapunowa. Opracowana przeze mnie metoda wykorzystująca wspomaganie neuronowe w działaniu i interpretacji systemu SAS pozwoliła na opracowanie kompletnego akustycznego systemu diagnostycznego, w którym sieci neuronowe odgrywają kluczową rolę w aktywnym sterowaniu układem, filtrowaniu i analizowaniu uzyskanych rezultatów oraz zwiększeniu poziomu autonomiczności systemu.

### **Podsumowanie**

W przedstawionym cyklu publikacji zaprezentowałem istotne osiągnięcia w dziedzinie diagnostyki i sterowania układów nieliniowych, wykorzystując sztuczne sieci neuronowe. Kluczowym wkładem jest opracowanie nowatorskiej, bezmodelowej metody estymacji funkcji Lyapunowa w systemach dynamicznych ([H10]), co umożliwia ocenę stabilności układów nieliniowych w szerszym zakresie przestrzeni stanów niż dotychczas. Metoda ta pozwala na określanie stabilności układów z regulatorami neuronowymi w założonym przedziale przestrzeni stanów.

W publikacjach [H1–H3] rozwinąłem podstawową architekturę Samowzbudnego Systemu Akustycznego (SAS), integrując modele efektu elastoakustycznego, przetworników piezoelektrycznych oraz układów z opóźnieniem i dodatnim sprzężeniem zwrotnym. Wyprowadziłem teoretyczną zależność między częstotliwością cyklu granicznego systemu SAS a naprężeniami w badanym materiale, co stanowi istotny postęp w monitorowaniu naprężeń.

W dalszych pracach ([H4–H5]) zidentyfikowałem kluczowe wyzwania, takie jak niepożądane przejścia między cyklami granicznymi oraz trudności w interpretacji wyników w obecności defektów materiału. Poprzez zastosowanie algorytmów uczenia maszynowego i opracowanie aktywnych, adaptacyjnych układów sterowania, zwiększyłem precyzję i niezawodność systemu diagnostycznego. Wprowadzenie przeze mnie autonomicznych algorytmów uczenia maszynowego pozwoliło na eliminację konieczności znajomości współczynnika elastoakustycznego, upraszczając proces diagnostyczny.

W publikacjach [H6–H7] rozszerzyłem zastosowanie sieci neuronowych na diagnostykę predykcyjną maszyn wirujących oraz integrację z technologią rozszerzonej rzeczywistości. Opracowałem system umożliwiający bezkontaktowe monitorowanie stanu technicznego maszyn oraz prezentację wyników analizy w czasie rzeczywistym na interfejsie holograficznym.

istotnym osiągnięciem jest jednak opracowanie przeze mnie bezmodelowych metod sterowania nieliniowymi układami dynamicznymi z wykorzystaniem algorytmów uczenia ze wzmocnieniem ([H8–H9]). W tych pracach wykazałem, że algorytmy te mogą skutecznie zastąpić tradycyjne metody sterowania, oferując lepszą jakość regulacji i adaptacyjność bez konieczności znajomości modelu



matematycznego obiektu. Implementacja tych metod w systemie SAS pozwoliła na eliminację efektu przeskoku między cyklami granicznymi, zwiększając stabilność i wiarygodność pomiarów.

Najważniejszym osiągnięciem jest jednak opracowanie nowej metody estymacji funkcji Lapunowa dla układów nieliniowych ([H10]). Opracowałem nowe metody oparte o sieci neuronowe do modelowania dynamiki systemu oraz estymacji funkcji Lapunowa na podstawie danych eksperymentalnych z systemu SAS. Metoda ta umożliwia ocenę stabilności układów z regulatorami neuronowymi bez konieczności znajomości parametrów systemu i algebraicznej postaci funkcji Lapunowa. Zastosowanie tej metody pozwoliło na rozróżnienie między zmianami w dynamice systemu spowodowanymi naprężeniami materiału a obecnością defektów, poprzez analizę kształtu estymowanej funkcji Lapunowa. Opracowana metoda stanowi istotny wkład w teorię sterowania i otwiera nowe możliwości w monitorowaniu stanu konstrukcji z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych.

Łącznie, przedstawione prace stanowią istotny wkład w rozwój nowoczesnych metod diagnostyki i sterowania układów nieliniowych, otwierając nowe możliwości w monitorowaniu stanu konstrukcji i maszyn z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych

#### 4.5. Oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne, technologiczne.

##### 1. Ocena i optymalizacja pracy układu technologicznego przeróbki wapienia

W ramach prac przeprowadzone zostały na obiekcie technologicznym eksperymenty czynnikowe w celu pozyskania kompleksowych informacji procesowych. Informacje te wykorzystano do matematycznej identyfikacji procesów przerobczych, czyli modelowania wskaźników oceny tych procesów. Do opracowania modeli wykorzystano techniki regresyjne oraz adaptacyjne, m.in. sieci neuronowe. Efektywne modele wskaźników wykorzystano do sformułowania zadania optymalizacyjnego, w którym funkcja celu wyrażała określone kryterium jakości (np. koszt, wydajność, energochłonność). Była to optymalizacja polegająca m.in. na minimalizacji kosztów przerobu oraz maksymalizacji wydajności zakładu przy ograniczeniu zużycia mediów.

W ramach prac rozwiązano istotny dla Zakładu problem związany z optymalizacją pracy układu technologicznego przeróbki wapienia, polegający na określeniu nowego wskaźnika oceny oraz stworzeniu procedury formułowania i rozwiązywania zadania optymalizacji dla tego typu obiektów technologicznych. Pozwoliło to na określenie nowych, optymalnych parametrów pracy układu, których wprowadzenie do procesu umożliwiło osiągnięcie wymiernych korzyści związanych ze zmniejszeniem energochłonności procesu, poprawą jego efektywności czy rentowności, w zależności od zastosowanego kryterium oceny (funkcji celu).

Kamień wapienny o uziarnieniu <50mm był podawany na misę do młyna pionowego misowo-rolowego razem z gorącym powietrzem podgrzewanym gazowymi palnikami. Częstki mielone przez rolki dociskane do misy były unoszone do górnej części młyna – wewnętrznego separatora dynamicznego, gdzie były klasyfikowane. Grubsze ziarna tej klasyfikacji wracały na misę lub były wyprowadzane z młyna przenośnikiem ślimakowym, a dalej były klasyfikowane na separatorze zewnętrznym i przesiewaczach na produkty handlowe, a część wracała do młyna jako recykl. Drobne ziarna z dynamicznego klasyfikatora wewnętrznego były wyprowadzane z młyna jako gotowa mączka <0,08mm i kierowane do odzysku na filtrze.

Do badań wytypowano parametry układu mające istotny wpływ na pracę układu technologicznego (Tab.1).



Tabela 1. Lista wybranych parametrów

| L.P. | TagName                | Description                                     | Unit |
|------|------------------------|---|------|
| 1    | AI_5.01M1_PIRCSAHL.PV  | Ciśnienie przed młynem                          | mbar |
| 2    | AI_5.03E1_PIRSAHHHL.PV | Ciśnienie w układzie hydrauliki (podnoszenie)   | bar  |
| 3    | AI_3.01E1_ZIRC.PV      | Obciążenie palnika                              | %    |
| 4    | AI_8.14M1_SIRC.PV      | Obroty separatora zewnętrznego                  | rpm  |
| 5    | AI_2.05M1_SIRC.PV      | Obroty silnika separatora wewnętrznego          | rpm  |
| 6    | AI_8.24M1_SIRCAH.PV    | Obroty silnika przenośnika ślimakowego w młynie | rmp  |
| 7    | AI_2.02M1_P1.PV        | Pomiar ciśnienie przed wentylatorem 2.02M1      | mbar |
| 8    | AI_2.03M1_JIRSAHH.PV   | Pomiar mocy silnika (wentylator główny)         | kW   |
| 9    | AI_5.01M1_JIRSAHH.PV   | Pomiar mocy silnika (młyn)                      | kW   |
| 12   | AI_2.03M1_SIR.PV       | Pomiar wibracji wentylatora strona prawa        | mm/s |
| 13   | AI_2.07M1_ZIC.PV       | Pozycja przepustnicy gazów 1                    | %    |
| 14   | AI_2.08M1_ZIC.PV       | Pozycja przepustnicy gazów 2                    | %    |
| 15   | AI_2.02M1_ZIC.PV       | Pozycja żaluzji na filtrze                      | %    |
| 17   | AI_6.06E1+605_FI.PV    | Przepływ masowy kamienia na taśmie              | t/h  |
| 19   | AI_2.02M1_FIRCAL.PV    | Przepływ powietrza przed wentylatorem           | m3/h |
| 20   | AI_5.01M1_PDIRCSAHL.PV | Różnica ciśnień na młynie                       | mbar |
| 22   | AI_5.03E1_CYL_AVG.PV   | Średnia pozycja cylindrów                       | mm   |
| 23   | AI_5.01M1_TIRSAHH9.PV  | Temp. przed młynem                              | °C   |
| 24   | AI_5.01M1_TIRCSAHL.PV  | Temp. za młynem                                 | °C   |
| 25   | AI_5.01M1_SIR.PV       | Wibracje wału młyna                             | mm/s |
|      |                        | Wilgotność mączki                               | %    |

W ramach analizy opracowano 3 zagadnienia dotyczące wykorzystania sieci neuronowych w optymalizacji pracy młyna. Są to:

- Estymacja wskaźników energetycznych  $S$  oraz  $W$  dla niezbadanych parametrów pracy
- Optymalizacja punktu pracy z uwzględnieniem sygnałów niezależnych i sterowanych
- Optymalizacja punktu pracy z uwzględnieniem tylko sygnałów sterowanych.

W pierwszym przypadku z użyciem sieci neuronowych udało się odnaleźć hiperpłaszczyznę modelu, która pozwalała na określenie wskaźników jakości nawet, gdy część z sygnałów była niedostępna. Oznacza to, że można było z użyciem tego modelu neuronowego określić wartość wskaźników jakości  $S$  oraz  $W$  nawet, gdy któryś z czujników uległ awarii. Opracowany mechanizm, w przypadku dostępności wszystkich sygnałów, był w stanie bez przeprowadzania eksperymentu określić, jakie wartości przyjmą wskaźniki po zmianie parametrów pracy układu. Praktyczne zastosowanie tej metodyki może posłużyć celom porównawczym, które nie będą wymagały kosztownego eksperymentu. Operator systemu otrzyma określoną wartość wskaźników dla bieżącego stanu operacyjnego. Następnie zmieniając poszczególne parametry i procesując je poprzez zaproponowaną sieć neuronową określi, czy wskaźniki uległy poprawie. W ten sposób może określić zestaw parametrów, które następnie zaimplementuje w rzeczywistym systemie.

Drugi etap prac miał na celu implementację sieci neuronowych w samodzielnym szukaniu optimum pracy. Optymalny punkt pracy został określony i potwierdzony, natomiast w tym przypadku utrudniona jest implementacja takiego sterowania w praktyce, ponieważ nie wszystkimi zmiennymi procesowymi można sterować w sposób niezależny. W celu eliminacji tej niedogodności zastosowano kolejne podejście, w którym sieć mogła optymalizować tylko po sterowalnych parametrach pracy systemu.

W ramach trzeciej analizy wykorzystano dwa różne podejścia do optymalizacji funkcji typu black-box, aby zoptymalizować parametry pracy młyna w czterech różnych przypadkach: lipiec-grudzień-22r, eksperymenty-przemysłowe-23r, czerwiec-sierpień-23r oraz połączone zbiory danych. Przeprowadzone optymalizacje miały na celu znalezienie optymalnych wartości zmiennych sterowanych, które minimalizują wskaźniki energetyczne  $S$  oraz  $W$ .

Zarówno optymalizacja Bayesowska, jak i algorytmy genetyczne skutecznie znajdowały optymalne parametry pracy systemu, które prowadziły do niższego wydatku energetycznego. Wyniki pokazują, że optymalizacja Bayesowska osiągnęła lepsze rezultaty w kilku przypadkach, jednakże algorytmy

genetyczne również odnalazły wartości sterowań prowadzące do podobnych oszczędności energetycznych. Optymalizacja pozwoliła na znaczne oszczędności energetyczne, które zostały przedstawione w tabeli 2.

Tab.2. Porównanie wyników optymalizacji ze zbiorem danych

| Zbiór danych                          | Dane procesowe po filtracji z 22r |            | Dane procesowe z eksperymentu |            |
|---------------------------------------|-----------------------------------|------------|-------------------------------|------------|
|                                       | S [kWh/Mg]                        | W [kWh/Mg] | S [kWh/Mg]                    | W [kWh/Mg] |
| Wartość minimalna przed optymalizacją | 11,7                              | -          | 15,40                         | 2,30       |
| Wartość minimalna po optymalizacji    | 10,78                             | 0,98       | 9,88                          | 1,19       |
| Oszczędność                           | 8%                                | -          | 35%                           | 48%        |

## 2. Opracowanie zaawansowanego systemu wdrożenia i utrzymania autonomicznego przemysłowego robota serwisowego wykorzystującego innowacyjne algorytmy machine learning i rozwiązania cyfrowego bliźniaka

Celem projektu było opracowanie systemu automatyzującego użytkowanie robotów serwisowych, w tym wdrożenie robota w nowym środowisku produkcyjnym oraz jego utrzymanie i serwisowanie. Utworzone oprogramowanie bazowało na opracowanych w ramach projektu rozwiązaniach i algorytmach (w tym AI oraz predykcyjnych) i pozwoliło na:

- zminimalizowanie manualnych czynności serwisowych,
- ograniczenie kosztów zużycia wody i energii,
- uelastycznienie możliwości wykorzystania robota,
- wydłużenie okresu użytkowania.

W ramach projektu opracowano system umożliwiający natychmiastową detekcję anomalii nie blokujących pracy robota, ale prowadzących do nadmiernego zużycia w dłuższej perspektywie. Roboty sprzątające są autonomiczne w zakresie wykonywania swoich zadań, adaptując się do dynamicznych zmian środowiska. Jednakże, nie były one wcześniej w stanie samodzielnie identyfikować potencjalnych anomalii w działaniu podzespołów mechatronicznych.

W sytuacjach oczywistych usterek, takich jak brak zasilania czy brak sygnału kontrolnego, roboty mogły samodzielnie zidentyfikować problem. Niemniej, trudności pojawiały się w przypadku "nieoczywistych" anomalii, takich jak wplątanie sznurków w szczotki, co prowadziło do nadmiernego obciążenia silników, czy zassanie elementów ograniczających przepływ wody, co wpływało na pracę pomp. W takich przypadkach robot kontynuował pracę, co obniżało jakość procesu i przyspieszało zużycie komponentów.

Dzięki systemowi opartemu na Uczniu Maszynowym, opracowanemu w ramach projektu, możliwe stało się przewidywanie skutków tych nieoczywistych anomalii. System ten zwiększył skuteczność detekcji anomalii do poziomu 90% dla każdej z 15 klas defektów.

Został opracowany także system umożliwiający określenie stopnia zużycia komponentów oraz konieczności ich wymiany, na podstawie charakterystyki pracy indywidualnego robota. W tradycyjnej polityce serwisowej, komponenty wymieniano po określonym czasie pracy (roboczo-godziny), co nie zawsze było konieczne. Zużycie komponentów zależy od charakterystyki użytkowania, np. częste zakręty powodują większe zużycie przekładni silnika niż długie odcinki pracy jednostajnej. Analizując

historyczne dane dotyczące dynamiki pracy oraz parametrów operacyjnych, możliwe stało się wnioskowanie o stopniu zużycia serwisowanych komponentów, takich jak szczotki, przekładnie, koła, rury obiegu wody, pompy czy ssawy.

Oba opisane zagadnienia zostały rozwiązane poprzez zastosowanie Uczenia Maszynowego. Opracowany system monitorowania i wnioskowania wykorzystujący Big Data, bazował na aktualnych i historycznych danych dotyczących stanów fizycznych różnych komponentów mechatronicznych. Powstała nowa wiedza na temat algorytmów detekcyjnych oraz predykcyjnych, które umożliwiają skuteczność detekcji anomalii oraz ocenę zużycia komponentów.

W ramach projektu opracowano system diagnostyczny oparty na danych akustycznych i wibracyjnych, uzupełnionych o dane dotyczące ciśnienia, przepływu, prądu i napięcia. Wykorzystano różne metody analizy sygnału, takie jak transformata Fouriera (FFT), transformata falkowa (CWT) czy spektrogramy. Algorytmy głębokiego uczenia (DL) pozwoliły na skuteczną detekcję pracy anomalnej oraz długofalową analizę dużej ilości danych w chmurze.

Powstały stanowiska laboratoryjne umożliwiające analizę pracy poszczególnych elementów mechatronicznych. Przeprowadzono testy zmęczeniowe elementów, podczas których układ sensoryczny zbierał dane akcelerometryczne oraz szereg innych parametrów pracy, jak temperatury, natężenia prądu, napięcia, etc. Dane te posłużyły do uczenia modeli detekcyjnych oraz estymacji pozostałego czasu bezawaryjnej pracy.

Projekt zakończył się sukcesem, opracowano skuteczne systemy detekcji anomalii oraz oceny zużycia komponentów robotów sprzątających. Nowe algorytmy i metody analizy danych pozwoliły na znaczące usprawnienie działania robotów, zwiększenie ich niezawodności oraz wydłużenie żywotności poszczególnych komponentów, co przyniosło wymierne korzyści w postaci obniżenia kosztów eksploatacji i poprawy efektywności pracy urządzeń.

## 4.6. Merytoryczne ujęcie przedstawionych osiągnięć

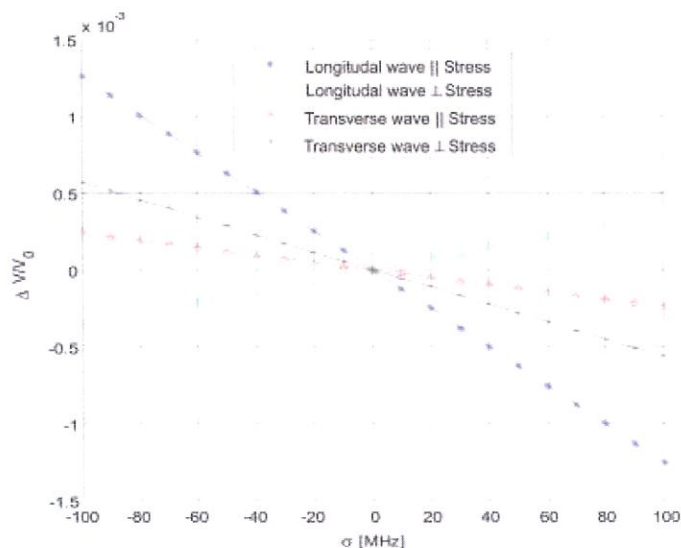
Poniżej przedstawiono opis poszczególnych publikacji przestawionych w wykazie osiągnięć:

**[H1] Influence of acoustoelastic coefficient on wave time of flight in stress measurement in piezoelectric self-excited system / Janusz KWAŚNIEWSKI, Ireneusz DOMINIK, Krzysztof LALIK, Karolina HOLEWA // Mechanical Systems and Signal Processing ; ISSN 0888-3270. — 2016 vol. 78**

W artykule został przedstawiony Samowzbudny System Akustyczny do monitorowania zmian naprężeń w konstrukcjach elastycznych. Przedstawiono dokładną zasadę działania systemów samowzbudnych. Wibracje występujące w nieliniowych autonomicznych systemach dynamicznych określane są jako wibracje samowzbudne. Systemy, które wykorzystują taki rodzaj wibracji, nazywane są systemami autorezonansowymi. Amplituda i częstotliwość wibracji w takich systemach mogą pozostawać stałe przez dłuższy czas, ponieważ nie zależą one od warunków początkowych, lecz głównie od parametrów samego systemu.

Najbardziej charakterystyczną cechą systemów samowzbudnych jest sposób, w jaki gromadzą one energię. Przepływ energii jest kontrolowany przez sam system. Pozwala to na odróżnienie autonomicznych systemów samowzbudnych od systemów nieautonomicznych. Przepływ energii w systemach nieautonomicznych zachodzi pod wpływem zewnętrznych, wyraźnie zależnych od czasu sił.

Systemy samowzbudne charakteryzują się tym, że ich wibracje wiążą się z przyrostem energii. W momencie wibracji systemu autonomicznego pojawia się przepływ energii ze źródła zewnętrznego, powodując wzrost amplitudy tych wibracji lub kompensując stratę energii, a także wspierając oscylację okresową. W pierwszym przypadku przepływ energii prowadzi do zwiększenia wibracji systemu. Inne zachowanie systemu jest skorelowane z jego trajektorią fazową. Dla systemów o stabilnym cyklu granicznym amplituda i częstotliwość wibracji jest stała (w niezmiennym stanie systemu), a charakter wibracji jest określany jako miękki. W przypadku twardego samowzbudzenia układ może posiadać dwa lub więcej cykli granicznych, z których przynajmniej jeden nie jest stabilny. Przejście z takiego cyklu do cyklu stabilnego powoduje gwałtowną zmianę amplitudy oscylacji.



Rys.1. Zmiana prędkości rozchodzenia fali akustycznej w zależności od rodzaju naprężenia i kierunku rozchodzenia się fali względem naprężenia

Dokładną zasadę działania systemów samowzbudnych przedstawiają liczne publikacje Autora wykraczające poza wymienione w 10 publikacjach cyklu. Niemniej jednak poprzednie prace Autora



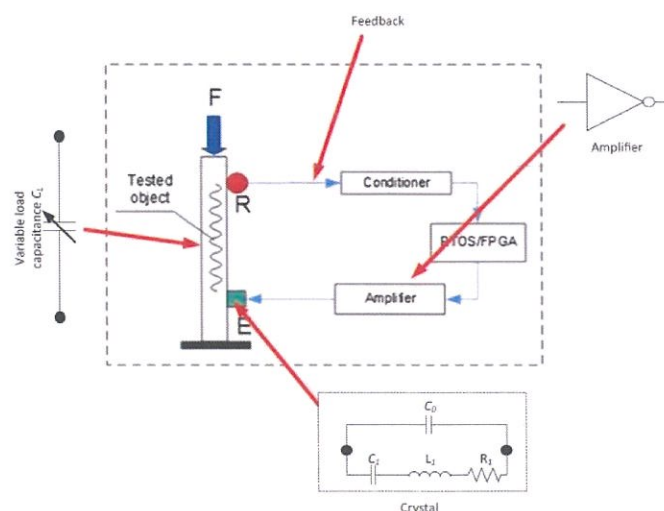
skupiały się na udowodnieniu możliwości wykorzystania systemu akustycznego w badaniu zmian naprężeń dla różnych materiałów elastycznych i kruchych. Znana była także tylko zależność pomiędzy prędkościami rozchodzenia się fali w materiale i naprężeniami, która wynikała z efektu elastoakustycznego. Nowością zaprezentowaną w pracy [H1] jest szczegółowa analiza metodyczna prowadząca do zdeterminowania zależności pomiędzy mierzoną częstotliwością systemu samowzbudnego i naprężeniami w badanym materiale. W pierwszej kolejności Autor określił wpływ typu fali akustycznej i kierunku propagacji fali względem kierunku naprężeń oraz wpływ samego rodzaju naprężeń na zmianę prędkości fali (Rys. 1.), a co za tym idzie, na kluczowe dla systemu, opóźnienie pomiędzy głowicami pomiarowymi.

Autor zaproponował sprzężenie kilku modeli w tym modelu efektu elastoakustycznego, modelu Dahla dla głowicy nadawczej, modelu transmitacyjnego dla głowicy odbiorczej oraz modelu układu z opóźnieniem i dodatnim sprzężeniem zwrotnym. Poprzez sprzężenie wszystkich tych modeli zdołano uzyskać funkcję łączącą naprężenia ze zmierzoną częstotliwością  $\sigma(f)$ .

Analiza teoretyczna została potwierdzona wynikami eksperymentalnymi poprzez wykonanie szeregu eksperymentów i porównanie ich z wynikami dla utworzonego modelu. W pracy zostały zasygnalizowane wyzwania związane z niekorzystnym zjawiskiem przeskoku częstotliwości cyklu granicznego oraz wpływem temperatury na otrzymane wyniki.

**[H2] Integrated stress measurement system in tower crane mast / Krzysztof LALIK, Ireneusz DOMINIK, Paweł ĆWIAKAŁA, Janusz KWAŚNIEWSKI // Measurement ; ISSN 0263-2241. — 102**

W artykule przedstawiono dwie metody pomiaru zmian naprężeń w smukłej konstrukcji stalowej. Pierwsza metoda polega na pomiarze nachylenia masztu wieżowego i wysięgnika za pomocą tachometru do mierzenia współrzędnych dwóch pryzmatów umieszczonych na dźwigu budowlanym. Pomiar tych odchyłek, przeprowadzone przy użyciu prostego modelu wytrzymałości, pozwoliły obliczyć naprężenia u podstawy masztu dźwigu. Obliczone naprężenia stanowiły referencję dla drugiego systemu pomiarowego, tj. Samowzbudnego Akustycznego Systemu (SAS). Największą nowością i wkładem Autora było opracowanie modelu fizycznego opartego na modelu elektrycznym zastępczego rezonatora kwarcowego (Rys.2).



Rys.2. Analogia funkcjonalna systemu SAS i rezonatora kwarcowego

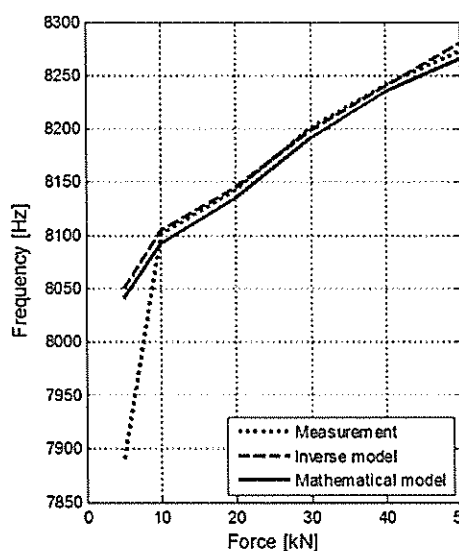
Fala akustyczna, która propaguje się w materiale między głowicą nadawczą a odbiorczą, jest reprezentowana jako zmienna pojemność obciążenia  $C_L$ . Choć pojemność obciążenia zwykle jest stałym parametrem przetwornika piezoelektrycznego, badany materiał można traktować jako

dotatkową równoległą pojemność. Wyznaczając zastępcze wartości pojemności i rezystancji możliwe jest odnalezienie zależności pomiędzy naprężeniami oraz częstotliwością rezonansową.

Zaproponowany model numeryczny został następnie zweryfikowany na bazie licznych eksperymentów przeprowadzonych z użyciem metody tachometrycznej na dźwigu znajdującym się w ciągłej eksploatacji.

**[H3] Modeling of self-excited stress measurement system / Ireneusz DOMINIK, Krzysztof LALIK, Stanisław FLAGA // Journal of Low Frequency Noise Vibration and Active Control ; ISSN 1461-3484. — 2021 vol. 40 iss. 2**

W artykule zostało zaprezentowane zastosowanie systemu SAS do pośredniego pomiaru zmian naprężeń w belce poddanej ścisaniu osiowemu. Zaproponowano dwa modele systemu wykonawczego. Pierwszy model opierał się na identyfikacji systemu czujnik–kondycjoner–wzmacniacz–nadajnik. Opracowano także nowy model opierający się na równaniach dla przetworników elektromechanicznych, czyli czujnika piezoelektrycznego i emitera drgań. Opracowano także model obciążonej belki, który określał odpowiedź w dowolnym punkcie belki na siłę przyłożoną do jakiegokolwiek innego konkretnego punktu belki. Połączenie modelu systemu wykonawczego i modelu belki pozwoliło na określenie zależności pomiędzy pulsacją systemu samowzbudnego i naprężeniami w belce. Opracowane modele zostały porównane z wynikami eksperymentów (Rys.3) i dowiodły poprawności obydwóch modeli.



Rys. 3. Porównanie danych eksperymentalnych i modelowych

W pracy wskazano kolejny raz na niekorzystne zjawisko przeskoaku częstotliwości cyklu granicznego, które może w sposób znaczący zaburzyć interpretacje otrzymanych wyników.

**[H4] Non-destructive acoustical rock bolt testing system with intelligent filtering in Salt Mine 'Wieliczka' / Krzysztof LALIK, Ireneusz DOMINIK, Paweł Gut, Krzysztof SKRZYPKOWSKI, Waldemar KORZENIOWSKI, Krzysztof ZAGÓRSKI // Energies; ISSN 1996-1073. — 2021 vol. 14 iss. 17 art. no. 5522, 1–16.**

W tym artykule zaprezentowano nowy system aktywnej filtracji zastosowany w pętli dodatniego sprzężenia zwrotnego w systemie SAS. Przeprowadzono eksperymenty zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i w warunkach kopalnianych. Autor zaproponował model 1-DOF z dodatnim sprzężeniem zwrotnym jako ekwiwalent systemu SAS. Na bazie tego modelu zostały wyprowadzone

zależności na graniczne wzmocnienie pętli sprzężenia zwrotnego oraz opóźnienia systemu. Badania laboratoryjne pozwoliły także na opracowanie algorytmu, który pozwala wykryć całkowite poluzowanie kotwy górniczej.

Proponowany system filtrujący znacząco ułatwił nieniszczącą diagnostykę kotew przy użyciu systemu SAS poprzez wyeliminowanie niekorzystnego zjawiska przeskoku częstotliwości. Jego zastosowanie pozwoliło na swobodną analizę widma częstotliwości sygnału. Wprowadzając filtrację w założonym paśmie, w widmie FFT widoczne są tylko częstotliwości jednego cyklu granicznego. Opracowane rozwiązanie umożliwiło wybór potencjalnie uszkodzonej kotwy, a odrębne badania niszczące potwierdziły skuteczność przeprowadzonej analizy częstotliwości.

Należy zauważyć, że w artykule baza reguł i nastaw filtracji została określona deterministycznie na podstawie wyników badań laboratoryjnych. W dorobku Wnioskodawcy znajdują się także wystąpienia na międzynarodowych konferencjach, które omawiają także zastosowanie Sztucznych Sieci Neuronowych w filtracji dla systemu SAS, są to m.in.:

- Intelligent filtering system for self-excited acoustic measurement system / Krzysztof LALIK, Mateusz KOZEK, Patryk Bałazy, Paweł Gut, Paweł Knap // W: MSM 2021 Mechatronic Systems and Materials : 16th international conference : July 1, 2021 – July 2, 2021 Vilnius
- Utilization of deep learning for wear analysis of mechanical components using self-oscillating vibroacoustic systems / Krzysztof LALIK, Filip WĄTOREK // W: ICCC 2020: proceedings of the 21st International Carpathian Control Conference : virtual conference : Košice, Slovak Republic October 27–29, 2020 / eds. Ivo Petráš, Ján Kačur.
- Innovative acoustical diagnostic system compatible with Industry 4.0 standards / Krzysztof LALIK, Matusz KOZEK // W: ICCC 2020 [Dokument elektroniczny] : proceedings of the 21st International Carpathian Control Conference : virtual conference : Košice, Slovak Republic, October 27–29, 2020 / eds. Ivo Petráš, Ján Kačur. : IEEE, cop. 2020. — ISBN: 978-1-7281-1952-6 ; e-ISBN: 978-1-7281-1951-9. — S. [1–5].
- Lalik, Krzysztof, and Mateusz Kozek. "Cubic SVM neural classification algorithm for Self-excited Acoustical System." 2020 International Conference Mechatronic Systems and Materials (MSM). IEEE, 2020.

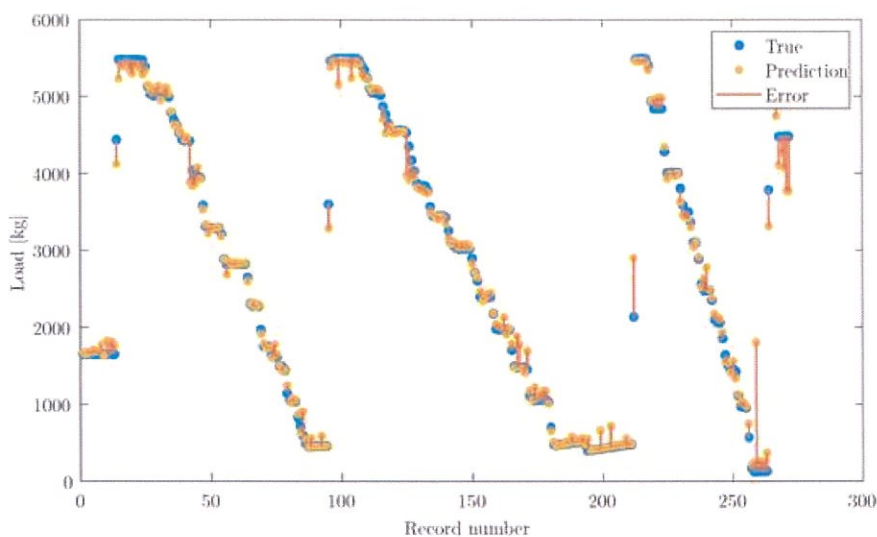
**[H5] Autonomous machine learning algorithm for stress monitoring in concrete using elastoacoustical effect / Krzysztof LALIK, Mateusz KOZEK, Ireneusz DOMINIK // Materials [Dokument elektroniczny]. — Czasopismo elektroniczne ; ISSN 1996-1944. — 2021 vol. 14 iss. 15 art. no. 4116, s. 1–14.**

W pracy przedstawiono algorytm uczenia maszynowego do analizy widma częstotliwości systemu SAS. Proponowane rozwiązanie to klasyfikator pracujący w czasie rzeczywistym, który umożliwia bieżącą analizę widma częstotliwości z systemu SAS. Dzięki temu podejściu zbudowany i opisany został autonomiczny system do identyfikacji stanu naprężenia konstrukcji betonowych.

Zaproponowana metodyka polega na testowaniu próbki wykonanej ze znanego materiału przy użyciu zewnętrznego systemu pomiarowego i systemu SAS w celu wygenerowania zestawu danych do uczenia sieci neuronowej. Zestaw uczący był następnie wykorzystywany do szkolenia sztucznej sieci neuronowej opartej na algorytmie uczenia maszynowego. Celem działania sieci była analiza widma częstotliwości i identyfikacja naprężenia w systemach, które nie mają pomiarowego systemu odniesienia.

Proponowany algorytm uczenia maszynowego to *fine tree*, które generuje małe liście o bardzo elastycznej funkcji odpowiedzi. Drzewo decyzyjne buduje modele regresji w formie struktury drzewa. To podejście rozkłada zbiór danych na coraz mniejsze podzbiory, podczas gdy jednocześnie związane z nim drzewo decyzyjne jest stopniowo rozwijane. Wyniki użycia algorytmu machine learning pokazane zostały na Rysunku 4.





Rys. 4. Wyniki uczenia algorytmu neuronowego.

Główną nowością płynącą z połączenia systemu SAS i algorytm uczenia maszynowego jest to, że eliminuje ona konieczność poznania wartości współczynnika elastoakustycznego, co znacznie upraszcza interpretację rzeczywistego naprężenia w badanym materiale. Taki system wyposażony w miernik naprężeń w laboratorium uczy się, jak wygląda widmo częstotliwości dla każdego rodzaju betonu. W kolejnym kroku, w warunkach przemysłowych, system SAS wyposażony w ML przewiduje aktualne obciążenie próbki na podstawie widma częstotliwości. Dzięki zastosowaniu ML nie ma potrzeby każdorazowego określania współczynnika elastoakustycznego, co jest czasochłonne i wymaga wysokich częstotliwości pomiarowych.

**[H6] Boosted convolutional neural network algorithm for the classification of the bearing fault form 1-D raw sensor data / Paweł Knap, Krzysztof LALIK, Patryk BAŁAZY // Sensors; ISSN 1424-8220. — 2023 vol. 23 iss. 9 art. no. 4295, s. 1–22**

Zaproponowany system SAS ma zastosowanie głównie dla nieruchomych maszyn i urządzeń i jest mniej przydatny w przypadku drobnych elementów wirujących, jak np. łożyska ślizgowe. Niemniej jednak opracowane równoległe algorytmy neuronowe mogą być wykorzystane także w przypadku tychże elementów. W artykule przedstawiono nowe podejście w Predictive Maintenance. Większość metod Maszynowego Uczenia, a zwłaszcza Uczenia Głębokiego koncentruje się na analizie obrazu. Stąd najczęstszym sposobem stosowanym w tego typu sieciach jest otrzymanie wykresów w dziedzinie czasu, częstotliwości lub użycie transformat czasowo-częstotliwościowych (falkowych, STFT, etc.). Są one traktowane następnie jako obrazy wsadowe do uczenia tego typu sieci. Taka metodyka, traktowana jako pre-processing danych, powoduje zbędne zwiększenie kosztowności obliczeniowej. W artykule zaproponowano nową metodę neuronowych klasyfikatorów bezpośrednich do wykrywania uszkodzeń. Bazowała ona na bezpośredniej analizie surowych danych tabelarycznych, co redukowało obliczenia związane z pre-processingiem danych. Dodatkowo zaproponowano dodanie bloku konwolucyjnego (Rys. 5), które pozwoliło na zwiększenie właściwości przetwarzania wstępnego algorytmu przy znikomym koszcie obliczeniowym. Wykazano również, że w przeciwieństwie do klasycznych głębokich algorytmów neuronowych (MLP), proponowany algorytm dobrze radzi sobie z danymi zawierającymi zakłócenia pomiarowe. Zaproponowany algorytm pełni rolę zarówno ekstraktora cech, jak i procesora wstępnego, co pozwoliło osiągnąć tak satysfakcjonujące wyniki klasyfikacji.

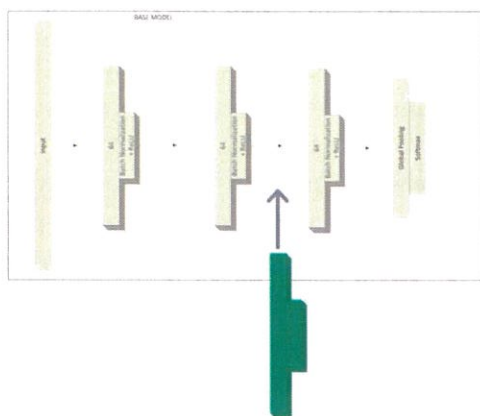
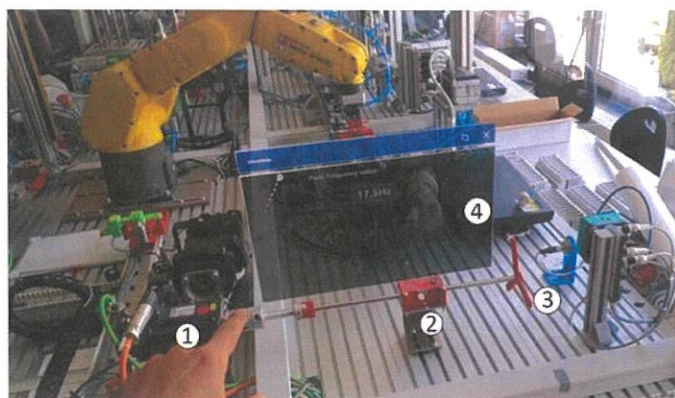


Fig.5. Modyfikacja architektury klasyfikatora neuronowego

Na podstawie wyników eksperymentalnych oraz oceny wydajności algorytmów uczenia stwierdzono, że użyty model 1D CNN przewyższał tradycyjną metodę analizy spektrogramu pod względem szybkości wnioskowania, dokładności i pewności. Stwierdzono, że zmodyfikowana struktura sieci wnioskowania jest bardziej odporna na zakłócenia w sygnale wejściowym i błędne dane wejściowe. Dodatkowa warstwa konwolucyjna w proponowanym rozwiązaniu pomaga minimalizować wpływ takich danych.

**[H7] Predictive maintenance neural control algorithm for defect detection of the power plants rotating machines using augmented reality goggles / Krzysztof LALIK, Filip WĄTOREK; ISSN 1996-1073. — 2021 vol. 14 iss. 22 art. no. 7632, s. 1–18.**

W artykule przedstawiono nową metodę bezkontaktowej oceny stanu maszyn wirujących z użyciem okularów Rozszerzonej Rzeczywistości i neuronowym algorytmem procesującym dane uzyskane z nich. Zastosowanie takich metod znacznie poprawia ogólną skuteczność i wydajność systemów przeznaczonych do analizy zużycia i wykrywania drgań, które mogą wskazywać na zmiany w strukturze fizycznej komponentów przemysłowych, takich jak łożyska, wały silników, obudowy oraz innych części biorących udział w ruchu obrotowym. Artykuł przedstawia koncepcję oraz wstępne badania innowacyjnej platformy pomiarowej, użytej do łatwej i szybkiej diagnostyki turbin wiatrowych oraz innych maszyn obrotowych. Głównym elementem opracowanego prototypu systemu jest innowacyjny interfejs rozszerzonej rzeczywistości. Zastosowanie okularów AR pozwoliło na skonstruowanie platformy, która z jednej strony umożliwia akwizycję danych wykorzystywanych w analizie elementów obrotowych, a z drugiej strony umożliwia bezpośrednią interakcję z potencjalnymi użytkownikami. Proponowany system został przetestowany na prostym modelu turbiny wiatrowej (Rys.6).



Rys. 6. Widok użytkownika w okularach Hololens 1—serwomechanizm; 2—marker; 3—model wirnika; 4—zmierzona częstotliwość dominujących drgań wyświetlona na hologramie.

Główna innowacja zaproponowanego systemu polegała na otrzymaniu informacji o drganiach z obrazów otrzymanych przez kamery, które nie znajdują się w spoczynku. W ramach prac przeprowadzono analizę skuteczności wybranych sieci neuronowych w klasyfikacji różnych typów uszkodzeń. Uzyskane algorytmy pozwoliły na zastosowanie i dalszy rozwój techniki pomiarowej, czego rezultatem była między innymi wiele wystąpień konferencyjnych, publikacji oraz otrzymanie i pozytywne zakończenie projektu komercjalizującego rozwiązanie pt. „Mobilny autonomiczny układ skanowania przestrzennego” finansowanego przez Centrum Transferu Technologii AGH.

**[H8] Application of ANN control algorithm for optimizing performance of a hybrid ORC power plant / Szymon PODLASEK, Marcin JANKOWSKI, Patryk BAŁAZY, Krzysztof LALIK, Rafał FIGAJ // Energy ; ISSN 0360-5442. — 2024 — vol. 306 art. no. 132082, s. 1-19. — Bibliogr. s. 18-19**

W tym artykule przedstawiono użycie algorytmu DDPG (Deep Deterministic Policy Gradient) w sterowaniu wielowymiarowym obiektem nieliniowym. Celem pracy była optymalizacja działania hybrydowej elektrowni ORC (Organic Rankine Cycle) zasilanej energią słoneczną i geotermalną poprzez zastosowanie algorytmu kontroli bazującego na sztucznej sieci neuronowej (ANN). Jakkolwiek artykuł nie dotyczył sterowania systemami samowzbuдными, to stanowił podstawę nowej metodologii sterowania procesami, które mają zmienne i nieokreślone warunki pracy. W tym wypadku takim parametrem była ilość dostarczanej energii z instalacji solarnej. W przypadku instalacji ORC nie jest możliwe określenie zewnętrznej zmiennej procesowej w postaci nasłonecznienia tak samo, jak nie jest możliwe a priori zdefiniowanie, jakie defekty i naprężenia występują w badanym przez system SAS materiale. Prace te zatem były zmotywowane potrzebą odnalezienia rozwiązania, które za pomocą wspomaganie neuronowego mogłyby optymalizować systemy tej klasy.

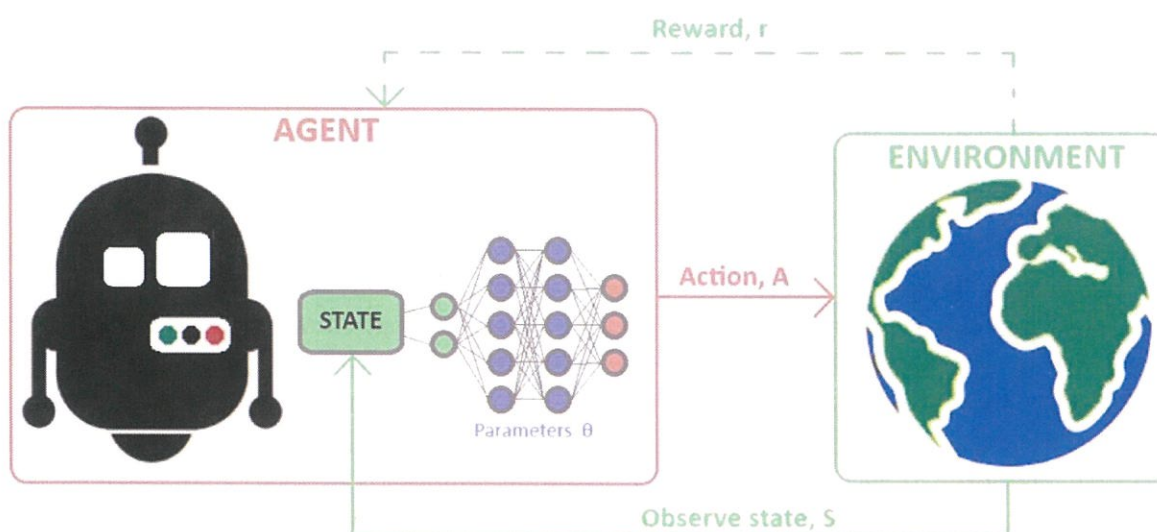
Zaproponowany algorytm jest rozwiązaniem bezmodelowym, które pozwala na optymalizację sterowania systemu energetycznego bez potrzeby określenia pełnej sieci połączeń między poszczególnymi komponentami systemu. Klasyczne algorytmy optymalizacyjne, takie jak SQP (Sequential Quadratic Programming), wymagają matematycznego opisu systemu w celu jego optymalizacji, ponieważ opierają się na lokalnych liniowych i kwadratowych przybliżeniach nieliniowej funkcji celu oraz ograniczeń. W przypadku DDPG, proces opiera się na interakcji z otoczeniem, z którego otrzymuje informacje zwrotne w postaci nagród za podjęte działania. Algorytm uczy się strategii, która maksymalizuje sumę przyszłych nagród na podstawie obserwacji stanów otoczenia i wyników podjętych działań, bez bezpośredniego angażowania matematycznych modeli systemu. To rozwiązanie jest szczególnie ważne w kontekście rosnącej potrzeby integracji odnawialnych źródeł energii z tradycyjnymi systemami. W bardziej ogólnym podejściu algorytm ten eliminuje potrzebę pełnego określenia modelu dynamicznego systemu oraz związane z nim problemy niepewności parametrycznej, błędów linearyzacji, etc. Algorytm DDPG wykazuje większą elastyczność i adaptacyjność w porównaniu z metodami gradientowymi, co jest szczególnie korzystne przy zmiennych warunkach środowiskowych.

Najlepsze roczne wyniki działania systemu uzyskano za pomocą algorytmu DDPG, który wygenerował 4993.4 MWh energii elektrycznej. Algorytm DDPG przewyższył warianty optymalizacji SQP-N i SQP-Q/N odpowiednio o 16.83% i 10.49% pod względem ilości wyprodukowanej energii.

Przedstawione w artykule systemy energetyczne oparte na odnawialnych źródłach energii, charakteryzujące się niestabilną dynamiką operacyjną z powodu zmieniających się warunków atmosferycznych, stanowią znaczące wyzwania w zakresie sterowania. Złożoność tych instalacji uniemożliwia zastosowanie linearyzacji systemu, która pozwoliłaby na dokładne odwzorowanie ich



operacyjnego zachowania w pełnym zakresie zmienności punktów pracy. To ograniczenie nie występuje w neuronowych algorytmach bezmodelowych. Algorytm Deep Deterministic Policy Gradient (DDPG) wyróżnia się zdolnością do adaptacji bez konieczności determinowania modelu do zmieniających się warunków operacyjnych analizowanego systemu. Ta zdolność umożliwia efektywną reakcję na zmiany w dostępności zasobów energetycznych w czasie rzeczywistym. Ponadto, algorytmy uczenia ze wzmocnieniem umożliwiają dynamiczną optymalizację bez konieczności determinowania szczegółowych danych dotyczących parametrów systemu. DDPG skutecznie określa optymalne polityki sterowania poprzez eksplorację i eksploatację, co zwiększa efektywność energetyczną sterowanego systemu wielowymiarowego.



Rys. 7. Struktura systemu Agent-Środowisko

Artykuł ten stanowił wstępną próbę realizacji bezpośredniego sterowania wspomaganego neuronowo dla nieliniowego obiektu wielowymiarowego. Utworzona nowa wiedza i metodyka pozwoliła na implementację tego rozwiązania w innych klasach układów, w tym dla systemu SAS.

**[H9] Neural algorithm for optimization a multidimensional object controller parameters / Patryk BAŁAZY, Krzysztof LALIK, Paweł KNAP // Neural Computing & Applications ; ISSN 0941-0643. — 2024**

Artykuł prezentuje nowatorski algorytm wykorzystujący uczenie przez wzmocnianie (RL) do optymalizacji parametrów regulatora suwnicy o pięciu stopniach swobody. W tym wypadku wspomaganie sieciami neuronowymi zostało zaimplementowane w kolejnej klasie układów dynamicznych, ale w porównaniu z publikacją [H8] rola neuronowego regulatora nie ograniczała się do sterowania nadrzędnego i optymalizacji pracy systemu, ale wpływała bezpośrednio na sygnały ze sprzężenia zwrotnego. Działania te miały na celu określenie przydatności wspomaganie neuronowego użytego w pętli dodatniego sprzężenia zwrotnego w układzie FPGA, który powstał na wcześniejszym etapie prac badawczych. Prace nad mniej skomplikowanym nieliniowym obiektem dynamicznym, dla którego model numeryczny i parametry zostały opracowane i zwalidowane, pozwoliły na określenie kluczowych wskaźników jakości regulacji i wskazanie przewag wynikających z zastosowania wspomaganie neuronowego.

Tradycyjne regulatory liniowo-kwadratowe (LQR) mogą być nieskuteczne w przypadku nieliniowych systemów sterowania. Niemniej jednak, po zlinearyzowaniu systemu wielowymiarowego, mogą posłużyć jako znakomity punkt odniesienia w ocenie jakości regulacji.

W artykule opisano model suwnicy z wahającym się ładunkiem w pięciu stopniach swobody. W modelu uwzględniono zmiany długości liny, co stanowiło główną nieliniowość dla systemu. Wykorzystano równania Lagrange'a do wyprowadzenia równań ruchu, które następnie przekształcono do postaci przestrzeni stanu. Tradycyjny regulator LQR został użyty jako system odniesienia, w którym macierze jakości (Q) i zasobów (R) zostały wybrane metodą heurystyczną.

W toku prac przeprowadzono symulacje dla różnych scenariuszy, porównując wydajność regulatorów LQR i neuronowego (NR). Regulator NR wykazał znacznie lepszą jakość sterowania, krótszy czas regulacji oraz mniejsze zużycie zasobów w porównaniu do regulatora LQR. Analiza stabilności wykazała, że system z regulatorem NR szybko przechodzi do stanu ustalonego, który w zadanym przedziale zakresów zmienności zmiennych stanu i sterowania może świadczyć o jego stabilności.

Metoda sterowania przedstawiona w artykule opierała się na wyborze wzmocnień sprzężenia zwrotnego za pomocą sieci neuronowej, bazując na wyuczonych odpowiedziach obiektu na inteligentnie wzmocnione sygnałów sterujących. W każdej symulacji stan początkowy obiektu był losowany, a znane były tylko wartości sygnałów wyjściowych obiektu. Zadaniem sieci neuronowej był wybór optymalnych wartości wzmocnień sprzężenia zwrotnego dla każdego losowanego, nieznanego stanu obiektu, na podstawie sygnałów wyjściowych i wartości zadanych dla obiektu dynamicznego. Taki obiekt oczywiście zmieniał swój stan w czasie, więc sieć neuronowa aktualizowała wartości wzmocnień sprzężenia zwrotnego w każdej iteracji do momentu, gdy obiekt osiągnie stan ustalony. Jakość sterowania obiektem przez sieć neuronową oceniana była w trakcie uczenia poprzez funkcję nagrody. Ocena uczenia opierała się na wskaźnikach jakości sterowania, takich jak błąd regulacji, czas dostosowania oraz całkowity błąd kwadratowy. W każdej symulacji sieć neuronowa zapamiętywała wzmocnienia sprzężenia zwrotnego, ostatecznie tworząc macierze wzmocnień sprzężenia zwrotnego dla jak największej liczby kombinacji stanów obiektu. Porównanie jakości sterowania przedstawiono na Rysunku 8.

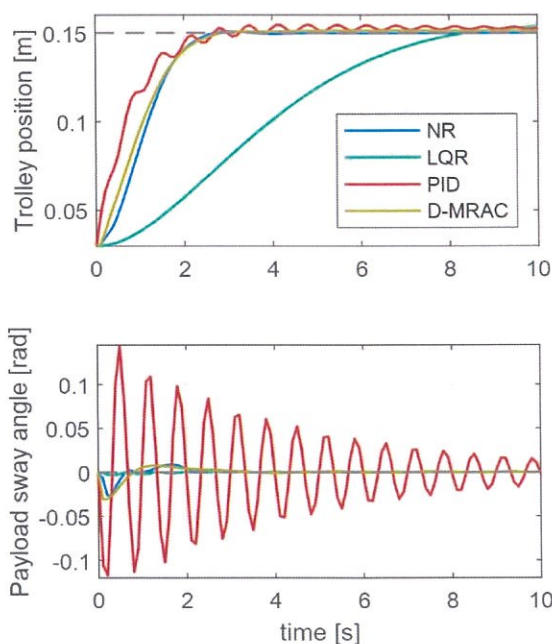


Fig. 8. Porównanie jakości różnych rodzajów regulatorów

Ten artykuł przedstawia adaptacyjny, neuronowy regulator bezpośredni nieliniowego systemu wielowymiarowego. Jego działanie prowadzi do obliczenia macierzy wzmocnień, jak w przypadku

regulatora LQR. Jednakże, w odróżnieniu od klasycznego regulatora LQR, tworzy on całą mapę macierzy wzmocnień, co pozwala na skuteczne sterowanie systemem pomimo nieliniowości sterowanego obiektu oraz osiągnięcie dobrej dynamiki regulacji. Rozbudowany opis modelu matematycznego suwnicy przedstawiony w artykule służył jedynie jako obiekt testowy. Istotą proponowanego rozwiązania z RL jest to, że nie wymaga modelu, więc nie opiera się na znajomości parametrów systemu. Neuronowy regulator bezpośredni, korzystając z polityki aktor-krytyk, uczy się reagować na zachowanie sterowanego systemu.

Działanie algorytmu neuronowego zostało porównane z działaniem regulatora LQR, w którym heurystycznie określano macierze Q oraz R. Algorytm neuronowy, oparty na sygnałach wyjściowych obiektu wielowymiarowego oraz funkcji nagrody, dobierał wzmocnienia sprzężenia zwrotnego. Utworzona sieć neuronowa precyzyjnie reagowała na zmieniającą się dynamikę obiektu poprzez zmianę wzmocnień torów sprzężeń zwrotnych. Symulacja obiektu ze sterowaniem za pomocą obu systemów wykazała znacznie lepszą jakość sterowania przy użyciu bezpośredniego regulatora neuronowego. W artykule wykazano, że system wspomagany neuronowo lepiej obejmuje nieliniowości obiektu i nie wymaga znajomości parametrów obiektu, a co najważniejsze, osiąga znacznie lepszą jakość sterowania przy niemal 18 razy mniejszym zużyciu zasobów.

Jakkolwiek dla założonych ograniczeń zmiennych stanu oraz sterowań empirycznie próbowano określić stabilność takiego neuronowego regulatora, to w otrzymanych recenzjach artykułu zwrócono uwagę, że ze względu na brak odpowiedniego wskaźnika nie można ostatecznie wyrokować o stabilności asymptotycznej, globalnej, ani tym bardziej granicznej. Stabilność graniczna jest jednak kluczowa dla systemów samowzbudnych. W ten sposób ujawniła się konieczność opracowania wskaźnika, który pozwoliłby na określenie stabilności systemu SAS w przypadku diagnostyki materiału o nieznanach lub trudnych do określenia parametrach. Kolejny raz neuronowe wspomaganie systemu SAS pozwoliło na rozwiązanie tego problemu badawczego. Neuronowy nieparametryczny indykator funkcji Lyapunova został przedstawiony w publikacji [H10]. Pozwolił on na deterministyczne określenie stabilności aperiodycznej w określonym zakresie wartości zmiennych stanu.

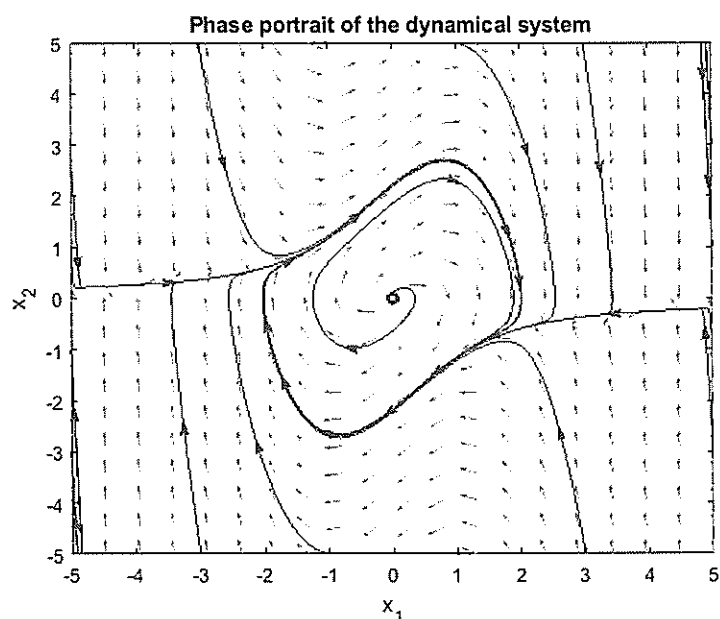
Artykuł [H9] stanowi ważny wkład w dziedzinę wspomaganego neuronowo sterowania nieliniowymi systemami wielowymiarowymi. Potwierdza on, że algorytmy oparte na RL mogą znacznie poprawić jakość i efektywność sterowania, a jednocześnie redukować zużycie zasobów przez system.

**[H10] Neural nonparametric stability indicator for self-excited dynamical systems / Krzysztof LALIK // IEEE Access [Dokument elektroniczny]. — Czasopismo elektroniczne ; ISSN 2169-3536. — 2024 — vol. 12, s. 96126–96137.**

W artykule przedstawiono nowatorską metodę wykorzystującą sieci neuronowe Głębokiego Uczenia do dokładnego oszacowania funkcji Lapunowa w nieliniowych systemach dynamicznych. W odróżnieniu od tradycyjnych podejść parametrycznych, proponowana metoda jest bezmodelowa, co pozwala na adaptację do różnych dynamik systemu bez definiowania explicite modelu systemu. Sieci wspomagały także odnalezienie reprezentacji danego systemu dynamicznego. Przedstawiona nowa strategia generowania funkcji Lapunowa ze wspomaganie sieci neuronowych dla takiej reprezentacji, pozwala na precyzyjną ocenę stabilności systemu i określenie przestrzeni stanów, na której jest ona zapewniona. Skuteczność tego podejścia została zweryfikowana poprzez analizę porównawczą dla systemu SAS stosowanym w różnych materiałach. Badania wykazały, że takie podejście może przyczynić się do możliwości rozróżniania stanów naprężeń materiałowych od obecności defektów. Podstawą do tego rozróżnienia są różnice w wymiarach lejka potencjalnego funkcji Lapunowa oraz specyficzne asymetrie wskazujące na obecność defektów.



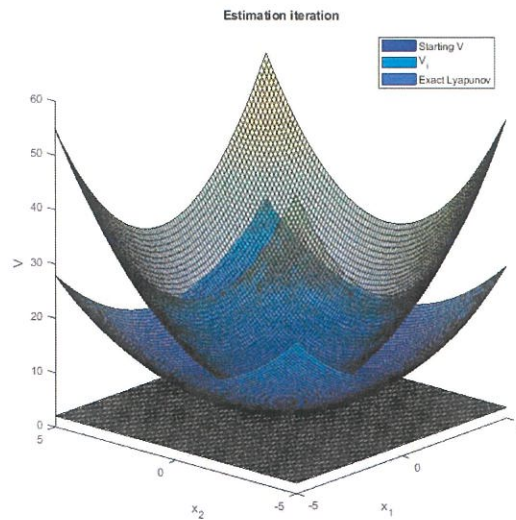
Koncepcja przedstawionej metody zawiera się w trzech kolejnych etapach. W pierwszym etapie przeprowadza się eksperyment przy użyciu systemu SAS na rzeczywistym systemie. Dane uzyskane z tego systemu, czyli przemieszczenie i prędkość wibracji ( $x, v$ ), stanowią dane treningowe dla pierwszej sieci neuronowej. Celem tej sieci jest nauczenie się, jak dynamiczny system przetwarza zmienne stanu. W związku z tym, wynikiem treningu sieci jest specyficzny filtr nieparametryczny, który ma odzwierciedlać działanie rzeczywistego systemu. Nieparametryczny charakter tego systemu polega na tym, że standardowe równania dla przestrzeni stanów go nie definiują, a właśnie struktura sieci ma odzwierciedlać działanie rzeczywistego systemu. Oczywiście, sieć będzie miała swoje parametry, takie jak wagi i biasy, jednak taka sieć jest rozpatrywana jako model "czarnej skrzynki", bez analizowania tych parametrów, ale z analizą mapowania zmiennych stanu. W ten sposób można uzyskać np. modele fazowe systemu bez determinowania równań stanu (Rys. 9).



Rys.9. Przykładowy portret fazowy dla systemu SAS

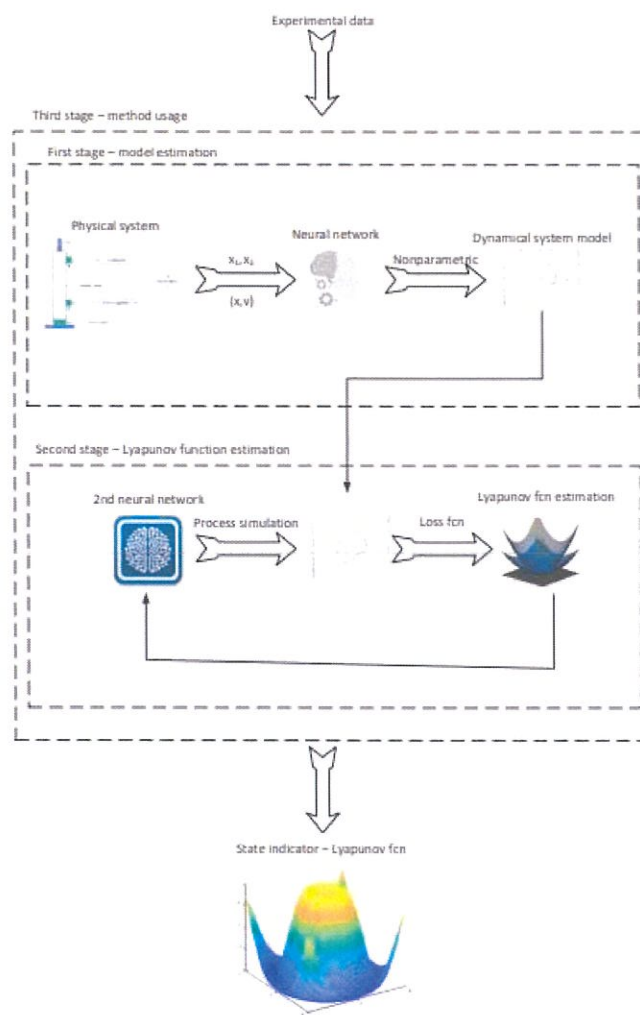
Drugim etapem utworzonego rozwiązania było wspomagane neuronowo poszukiwanie funkcji Lyapunova. Autor przeanalizował klasyczne warunki stabilności asymptotycznej, jak definitywna dodatniookreśloność funkcji, definitywna ujemność pochodnej, ale uznał, że takie podejście nie jest optymalne w kontekście kosztowności obliczeniowej dla sieci. W celu przewyższenia „Kłątwy wymiarowości” (wraz ze wzrostem liczby wymiarów przestrzeni poszukiwać rośnie wykładniczo, co oznacza, że liczba punktów potrzebnych do reprezentowania danych w tej przestrzeni rośnie wykładniczo) w pierwszej kolejności zaproponował użycie funkcji  $K_\infty$ . Jest to nowoczesne, chociaż znane w literaturze, podejście do matematycznego określenia warunków dla funkcji Lyapunova. Nowością jest to, że taka metodyka wraz z zastosowaniem Teorii Małych Wzmocnień, pozwala na takie określenie funkcji kary dla sieci neuronowej, w którym złożoność obliczeniowa uczenia sieci wzrasta wraz z liczbą zmiennych stanu w sposób wielomianowy, a nie wykładniczy. Taka metoda pozwoliła najpierw na określenie konkretnych czynników funkcji kary dla sieci, a następnie skuteczne jej odszukanie na zadanym obszarze zmiennych stanu. W artykule udowodniono, że uzyskana funkcja odwzorowuje rzeczywistą funkcję Lyapunova z dowolnie małą dokładnością  $\varepsilon$  w skończonej liczbie iteracji uczenia sieci. W każdej iteracji estymator funkcji Lyapunova jest modyfikowany w kierunku szukanej, rzeczywistej funkcji  $V(x)$ . Ideowy schemat iteracyjnego dopasowania przedstawiono na Rysunku 10.





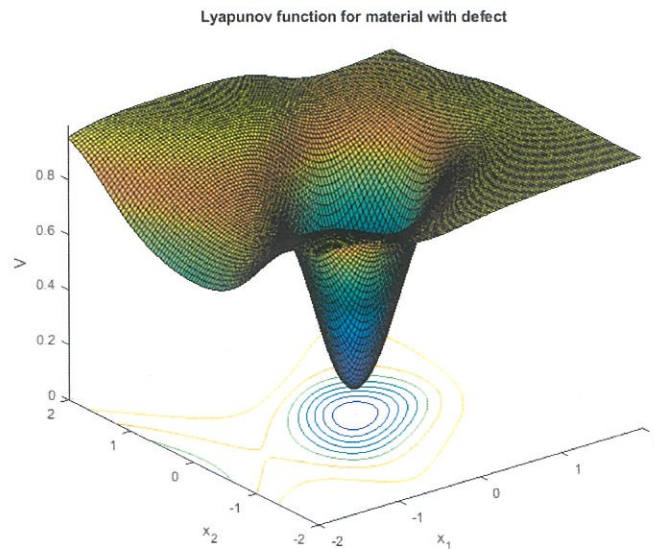
Rys. 10. Kolejne estymacje funkcji Lyapunova

Tak utworzone i wyuczone sieci służą następnie do przetwarzania na bieżąco danych z systemu SAS według schematu z Rysunku 11.



Rys.11. Framework zaproponowanej metody

Idea zaproponowanej metody polega na porównaniu otrzymanych estymat funkcji Lyapunova dla systemu SAS. Zarówno kształt „lejka”, jak i obszary zmiennych stanu, w których funkcja spełnia warunki swojej dodatniookreśloności i ujemności pochodnej mogą posłużyć do rozróżnienia obecności defektu od zmiany naprężeń. Przykładową estymatę takiej funkcji przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 12. Estymata funkcji Lyapunova dla materiału z defektem badanego z użyciem systemu SAS

Podsumowując, prezentowane badania demonstrują zdolność sieci neuronowych głębokiego uczenia do dokładnego oszacowania funkcji Lyapunova dla systemów dynamicznych. Porównując oszacowania tej funkcji dla systemu SAS stosowanego w różnych materiałach, potwierdzono, że proponowana metoda pozwala na rozpoznanie stanu materiału zarówno pod kątem naprężeń, jak i obecności defektów. Nowa metodologia umożliwi precyzyjne określenie stabilności systemów samowzbudnych, co jest kluczowe dla wielu aplikacji inżynierskich, w tym monitoringu stanu strukturalnego i w teorii sterowania. Wprowadzenie metod uczenia głębokiego do analizy stabilności systemów dynamicznych otwiera nowe możliwości w zakresie badań i projektowania stabilnych systemów samowzbudnych.

Przedstawiony artykuł jest kluczowym osiągnięciem podsumowującym cykl publikacji. Integruje on dziedziny jak mechanika, automatyka, teoria sterowania i analiza sygnałów. Przedstawia on finalne rozwiązania problemów dostrzeżonych już w pierwszych publikacjach autora [H1-H3].

Dodatkowo należy zauważyć, że otwiera on całkiem nowe horyzonty w zakresie teorii sterowania. W toku dalszych prac, które będą integrowały dodatkowo prawo sterowania, możliwe będzie utworzenie miarodajnego wskaźnika do oceny stabilności i jakości sterowania regulatorów neuronowych. Jest to bowiem niebagatelny problem przy projektowaniu każdej nowej neuronowej architektury sterowania i neuronowego regulatora. Zważywszy, że struktury takie sterują coraz bardziej złożonymi systemami dynamicznymi, to klasyczne metody określania stabilności wymagają zdeterminowania modelu systemu, co często jest zbyt czasochłonne lub odznacza się dużymi niepewnościami. Zaproponowana metoda pozwala na przezwycięzenie tych niedogodności, przez brak konieczności definicji modelu. Ta cecha metody jest niewątpliwie dodatkowym wkładem w rozwój automatyki i robotyki. Zastosowanie takiego podejścia nie ogranicza się tylko do diagnostycznego systemu SAS, ale może być rozszerzone do nowoczesnych systemów robotycznych, dronowych, autonomii pojazdów i wielu innych.



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

1. *Zatrudnienie na stanowisku starszy specjalista w projekcie ARTIQU pt. „Integracja wnioskowania, uczenia się, optymalizacji i interpretacji w celu przyspieszonej komercjalizacji inteligentnych systemów oprogramowania nowej generacji” Kraków 01.04.24- 31.12.24*

ARTIQU to Centrum Doskonałości w Dziedzinie Sztucznej Inteligencji, które sprzyja rozwojowi ogólnokrajowo rozpoznanego ekosystemu AI, skoncentrowanego wokół Uniwersytetu AGH.

Celem Centrum jest stworzenie renomowanego, najnowocześniejszego ośrodka wyposażonego w możliwości tworzenia innowacyjnych rozwiązań AI w najbardziej aktualnych obszarach, w tym medycynie, rzeczywistości wirtualnej, analizie języka naturalnego, pojazdach autonomicznych i robotyce. To służy rozwojowi oprogramowania i sprzętu AI, mentoringowi oraz zdobywaniu umiejętności zawodowych i tworzeniu miejsc pracy. Ponadto ułatwia postępy w etyce i politykach społecznie odpowiedzialnych dotyczących AI. Wraz z rozwojem technologii takich jak AI, mają one wielki wpływ na jakość życia.

W Centrum Doskonałości w Dziedzinie Sztucznej Inteligencji realizuje się zaawansowane projekty integracji AI, przeprowadza specjalistyczne kursy i szkolenia. W ramach stosunku pracy jestem odpowiedzialny za opracowanie, budowę, integrację i walidację neuronowego sterowania do robota produkcyjnego.

2. *Staż w IFJ PAN w Krakowie w ramach projektu CTA (Macierzy teleskopów Cherenkova), Miejsce Kraków i Zurich, Termin: styczeń-wrzesień 2016*

Konsorcjum CTA skupia 1 500 członków z ponad 150 instytutów naukowych w 25 krajach. Zajmuje się rozwojem i wdrożeniem projektu nowego typu obserwatorium składającego się z teleskopów typu Cherenkova. Celem tego obserwatorium jest badanie kosmicznych promieni gamma, które są jednymi z najbardziej energetycznych cząstek we wszechświecie. Projekt CTA ma na celu znaczące poszerzenie wiedzy o Wszechświecie na ultra-wysokich energiach i poprawę zdolności do badania źródeł takich promieni, w tym czarnych dziur, supernowych, pulsarów i innych ekstremalnie energetycznych obiektów kosmicznych.

W ramach stażu byłem odpowiedzialny za budowę architektury komunikacyjnej pomiędzy poszczególnymi teleskopami, ich integrację w pionowej i poziomej hierarchii sterowania, projektem sterowaniem pracą serwonapędów oraz zaawansowanych układów kontroli kamer promieniowania Cherenkova. W ramach przeprowadzonych prac uczestniczyłem w 2 konferencjach naukowych oraz powstało 5 prac obecnych w bazie Web of Science, w których jestem współautorem oraz dodatkowo 12 innych publikacji indeksowanych w innych bazach. Publikacje indeksowane w WoS to:

- An innovative silicon photomultiplier digitizing camera for gamma-ray astronomy / M. Heller, [et al.], P. RAJDA, [et al.], W. Bilnik, [et al.], J. KASPEREK, K. LALIK, [et al.], M. Więcek, [et al.] // The European Physical Journal. C, Particles and Fields ; ISSN 1434-6044. — 2017 vol. 77 iss. 1 art. no. 47, s. 1–31. **[IF =5.331]**
- Prospects for Cherenkov Telescope Array observations of the young supernova remnant RX J1713.7-3946 / F. Acero, [et al.], T. GRABARCZYK, [et al.], J. KOCOT, [et al.], K. Lalik, [et al.], H. SIEJKOWSKI, [et al.]

- al.), T. SZEPIENIEC, [et al.], P. WÓJCIK, [et al.] // *Astrophysical Journal*; ISSN 0004-637X. — 2017 vol. 840 no. 2 art. no. 74, s. 1–14. [IF = 5.515]
- Characterization and commissioning of the SST-1M camera for the Cherenkov Telescope Array / J.A. Aguilar, W. Bilnik, [et al.], J. KASPEREK, K. LALIK, [et al.], P. RAJDA, [et al.], P. Więcek, [et al.] // *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section A, Accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment*; ISSN 0168-9002. — 2017 vol. 845, s. 350–354. [IF = 1.216]
  - Front-end and slow control electronics for large area SiPMs used for the single mirror Small Size Telescope (SST-1M) of the Cherenkov Telescope Array (CTA) / J.A. Aguilar, W. Bilnik, [et al.], J. KASPEREK, [et al.], P. RAJDA, [et al.], K. LALIK, [et al.], M. Więcek, [et al.] // *Proceedings of SPIE / The International Society for Optical Engineering*; ISSN 0277-786X; vol. 9915). — ISBN: 978-1-5106-0209-0; e-ISBN: 978-1-5106-0210-6. — S. [1–8] art. no. 99152T. [IF = 0.918]
  - The front-end electronics and slow control of large area SiPM for the SST-1M camera developed for the CTA experiment / J.A. Aguilar, W. Bilnik, [et al.], J. KASPEREK, [et al.], P. RAJDA, [et al.], K. LALIK, [et al.], M. Więcek, [et al.] // *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. Section A, Accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment*; ISSN 0168-9002. — 2016 vol. 830, s. 219-232. — Bibliogr. s. 231–232, [IF = 1.216]
3. *Staż w Centrum Rozwoju i Kompetencji Przemysłu 4.0, Wydział Mechaniczny Politechnika Krakowska, Miejsce: Kraków, Termin: sierpień-wrzesień 2024*

Moja rola polega na opracowywaniu i trenowaniu modeli uczenia maszynowego do zastosowań przemysłowych, implementacji systemów do rozpoznawania wzorców w danych produkcyjnych oraz wdrażaniu rozwiązań AI do automatyzacji procesów decyzyjnych w przemyśle.

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

### 6.1. Działalność dydaktyczna

Moja działalność dydaktyczna w Akademii Górniczo-Hutniczej jest wykonywana od 2009. W znacznej mierze polega ona na prowadzeniu zajęć specjalistycznych dla studentów późniejszych lat studiów na kierunkach Automatyka i Robotyka, Automatyka Przemysłowa i Robotyka na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Inżynierii Biomedycznej na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Energetyki i Energetyki Odnawialnej na Wydziale Energetyki i Paliw, takich jak:

- Zaawansowane Systemy Sterowania – Koordynator przedmiotu, Wykłady autorskie i ćwiczenia laboratoryjne
- Przemysłowe Systemy Sterowania – ćwiczenia laboratoryjne
- Przemysłowe Układy Sterowania Strukturami Inteligentnymi – Koordynator przedmiotu, Wykłady autorskie i ćwiczenia laboratoryjne
- Systemy Sterowania w Energetyce – Koordynator przedmiotu, Wykłady autorskie i ćwiczenia laboratoryjne, zajęcia projektowe
- Automatyka w Energetyce – Wykłady autorskie i ćwiczenia laboratoryjne, zajęcia projektowe
- Systemy sterowania przemysłowego i automatyki budynkowej – Koordynator przedmiotu, Wykłady autorskie i ćwiczenia laboratoryjne, zajęcia projektowe
- Control Systems in Bioengineering – Koordynator przedmiotu, Wykłady autorskie i ćwiczenia laboratoryjne w języku angielskim

Członek komisji dyplomowych przeprowadzających egzaminy dyplomowe na studiach inżynierskich i magisterskich na kierunkach Automatyka Przemysłowa i Robotyka, Automatyka i Robotyka na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH, Inżynierii Biomedycznej na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej AGH, Energetyki na Wydziale Energetyki i Paliw AGH.

#### Promotor prac dyplomowych:

- Prace inżynierskie – 79
- Prace magisterskie – 87
- Prace doktorskie – 5 (promotor pomocniczy, trwające)
- Obronione prace doktorskie – 1 (promotor pomocniczy)

#### Prowadzenie zajęć na studiach podyplomowych:

- **Przemysłowe Systemy Sterowania** – 12 edycji, przedmioty autorskie: Podstawy programowania PLC, Zaawansowane programowanie sterowników przemysłowych PLC, Serwonapędy i sterowanie ruchem, Systemy sterowania nadrzędnego (SCADA) , Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH
- **Mechatronika w edukacji** -3 edycje, przedmioty autorskie: Podstawy programowania układów sterowania, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH
- **Transport i eksploatacja instalacji lądowych LNG** – 2 edycje, przedmiot autorski: Automatyka Przemysłowa, Wydział Nafty i Gazu AGH



## 6.2. Działalność organizacyjna

### Członek komitetów technicznych i rad:

- Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie; Rady Dyscyplin Naukowych; Rada Dyscypliny - Inżynieria Mechaniczna
- W latach 2012-2018 członek Wydziałowych Komisji Rekrutacyjnych na studia pierwszego i drugiego stopnia

## 6.3. Działalność popularyzująca naukę:

- Małopolska Noc Naukowców – 2017-2022, przygotowanie i prowadzenie laboratorium i zajęć dla uczestników wydarzenia.
- Małopolska Noc Muzeów - 2023, przygotowanie i prowadzenie laboratorium i zajęć dla uczestników wydarzenia.
- XII Mielecki Festiwal Nauki i Techniki – wygłoszenie seminarium pt. „Rozszerzona rzeczywistość i inne nowoczesne metody wspierania produkcji”
- Dyżury w Laboratorium Industry 4.0 podczas Dni Otwartych AGH, Wydziałowych Dni Otwartych oraz Spotkań z Uczelnią

## 6.4. Inne

1. Utworzenie pierwszego w Polsce Laboratorium Industry 4.0 we współpracy z firmami jak: teamtechnik, Siemens Polska, Fanuc Polska, Valeo, Bosch-Rexroth Polska, Adient Polska. Zajmowałem się nawiązaniem kontaktu i koordynacją działań tego projektu. Prowadziłem prace nad architekturą systemu zrealizowanego w tym laboratorium. W projekcie byłem główną osobą odpowiedzialną za koncepcję i wkład merytoryczny. W aspekcie technologicznym jest to pierwsze w kraju laboratorium dydaktyczne, które pozwala na integrację najnowszych trendów automatyki przemysłowej. Realizuje ono bowiem w pełni założenia standardu Czwartej Rewolucji Przemysłowej (Industry 4.0) z wykorzystaniem Przemysłowego Internetu Rzeczy (IIoT), Cyfrowego Bliźniaka, Rozszerzonej Rzeczywistości oraz szerokiego spectrum zastosowań metod Głębokiego Uczenia w zakresie od diagnostyki urządzeń, przez zarządzanie logistyką i produkcją, po wzmocnione wsparcie użytkownika (Reinforcement User Guide). Laboratorium stanowi nowoczesny ekosystem dostępny dla badaczy i studentów, który w pełni odwzorowuje linie technologiczne stosowane obecnie w Inteligentnych Fabrykach (Smart Factories).
2. 2020-obecnie Opiekun Studenckiego Koła Naukowego SENSOR na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki. W wyniku aktywizacji studentów, członkowie Koła Naukowego uczestniczyli w kilkunastu konferencjach międzynarodowych prezentując wyniki swoich prac badawczych i byli wielokrotnie wyróżniani. Studenci Koła Naukowego biorą aktywny udział w tworzeniu publikacji w czasopiśmie z Listy Ministerialnej. Zdobywają liczne nagrody i wyróżnienia, w tym Stypendia Prezesa Rady Ministrów, Studencki Nobel Banku Santander, główną nagrodę w konkursie „Poleć z nami do Dubaju” - konkursie dotyczącym Przemysłu 4.0 organizowanym przez APAGroup sp. z o.o.
3. 05. 2023 – Przeprowadzenie cyklu szkoleń pt. „Zastosowanie AI w przemyśle 4.0” w ramach AGH AI Days. Był to dwudniowy cykl prelekcji, szkoleń i workshopów dla studentów i doktorantów z zagadnień sztucznej inteligencji oraz wykorzystania zaawansowanych rozwiązań w przemyśle. Podczas warsztatów uczestnicy zdobywali wiedzę o najważniejszych aspektach AI, tj. predykcijnym utrzymaniu ruchu, optymalizacji procesów produkcyjnych, monitorowaniu jakości produktów, optymalizacji logistyki oraz wsparciu użytkownika. Warsztaty skupiały się na zaprezentowaniu najnowszych trendów w dziedzinie sztucznej inteligencji w Przemysle 4.0.

Głównym celem wydarzenia jest kształtowanie kompetencji z zakresu sztucznej inteligencji, zainteresowanie i poszerzenie wiedzy z obszaru nowych technologii oraz zaprezentowanie aktualnych rozwiązań w obszarze SI.

4. Przygotowanie merytoryczne wniosków aparaturowych; specyfikacji przedmiotu zamówienia dla aparatury badawczej oraz członków komisji przetargowych, Katedra Automatykacji Procesów

#### **Nagrody i wyróżnienia**

- Nagroda Rektora AGH za indywidualne osiągnięcia naukowe, 2011
- Nagroda Rektora AGH za zespołowe osiągnięcia naukowe, 2014
- Nagroda Rektora AGH za indywidualne osiągnięcia naukowe, 2017
- Nagroda Rektora AGH za indywidualne osiągnięcia naukowe, 2018
- Nagroda Rektora AGH za indywidualne osiągnięcia organizacyjne, 2018
- Nagroda Rektora AGH za indywidualne osiągnięcia dydaktyczne, 2019
- Nagroda Rektora AGH za zespołowe osiągnięcia organizacyjne, 2020
- Nagroda Rektora AGH za indywidualne osiągnięcia naukowe, 2021
- Nagroda Rektora dla najlepiej publikującego Naukowca Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, 2021
- Rektorska Nagroda Naukowa w Akademii Górniczo-Hutniczej, I filar, 2022
- Rektorska Nagroda Naukowa w Akademii Górniczo-Hutniczej, I filar, 2023
- Srebrny medal IX Międzynarodowej Wystawy Wynalazków IWIS 2015
- Nagroda od firmy Siemens GmbH w kategorii "Scientifical Partner", 2019
- Medal honorowy „Zasłużony dla Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki”, AGH, 2019
- Nagroda Rektora AGH za wyjątkowe zaangażowanie i pracę na rzecz studenckiego ruchu naukowego, 2023
- Medal Komisji Edukacji Narodowej za szczególne zasługi dla oświaty i wychowania, 2023



(podpis wnioskodawcy)