

**Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza**

Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

Katedra Mechaniki Stosowanej i Robotyki

**Załącznik nr 3**

do wniosku o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego

---

**Autoreferat**

---

dr inż. Magdalena Muszyńska

**Rzeszów 2023**

### **1. Imię i nazwisko.**

Magdalena Muszyńska

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

- **Stopień doktora**

Dziedzina: nauki techniczne

Dyscyplina: Mechanika

Data uzyskania stopnia: 16.05.2012 r.

Tytuł pracy doktorskiej: Neuronowo - rozmyte systemy sterowania mobilnym robotem kołowym.

Podmiot nadający: Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

Promotor: **prof. dr hab. inż. Zenon Hendzel**

Recenzenci: **prof. dr hab. inż. Józef Giergiel dr h. c. mult.**

**prof. dr hab. inż. Janusz Kwaśniewski**

- **Studia doktoranckie**

Dziedzina: nauki techniczne

Dyscyplina: Budowa i eksploatacja maszyn

Okres odbywania studiów: 2005 - 2009

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza

Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

- **Studia magisterskie**

Kierunek studiów: mechanika i budowa maszyn

Specjalność: mechatronika

Okres odbywania studiów: 2000 - 2005

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza

Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

Promotor pracy magisterskiej: **prof. dr hab. inż. Józef Giergiel dr h. c. mult.**

- **Studium pedagogiczne**

Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Wydział Zarządzania i Marketingu, Zakład Edukacji Ustawicznej

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

- 2012 r. - do chwili obecnej, **Adiunkt** w Katedrze Mechaniki Stosowanej i Robotyki Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza
- 2006 - 2012 r., **Asystent** w Katedrze Mechaniki Stosowanej i Robotyki Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza

### 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.).

Osiągnięciami naukowymi, stanowiącymi znaczny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna, o których mowa w art. 219 ust. 1. pkt 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018r., są:

- **monografia naukowa**, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2a ustawy oraz
- **cykl powiązanych tematycznie 7 artykułów naukowych**, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b ustawy oraz
- **oryginalne osiągnięcie konstrukcyjne**, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2c ustawy.

---

#### *Wykaz prac stanowiących osiągnięcie naukowe*

---

##### **Monografia naukowa**

Muszyńska, M., (2023). Zastosowanie algorytmów neuronowo – rozmytych w automatyzacji wybranych procesów przemysłowych. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej*. ISBN: 978-83-7934-667-7

##### **Recenzenci:**

Prof. dr hab. Victor A. Eremeyev, Università degli Studi di Cagliari (UNICA) (Włochy)

dr hab. inż. Piotr Małka, Akademia Górniczo - Hutnicza im. S. Staszica, Kraków

##### **Cykl powiązanych tematycznie 8 artykułów naukowych**

- 1) Kurc, K., Burghardt, A., Gierlak, P., Muszyńska, M., Szybicki, D., Ornat, A., & Uliasz, M. (2022). Application of a 3D Scanner in Robotic Measurement of Aviation Components. *Electronics*, 11(19), 3216. **IF=2,69**
- 2) Burghardt, A., Szybicki, D., Gierlak, P., Kurc, K., Muszyńska, M., Ornat, A., & Uliasz, M. (2022). TCP Parameters Monitoring of Robotic Stations. *Electronics*, 11(20), 3415. **IF=2,69**

- 3) Burghardt, A., Szybicki, D., Kurc, K., & Muszyńska, M. (2022). Robotic grinding process of turboprop engine compressor blades with active selection of contact force. *Tehnički vjesnik*, 29(1), 15-22. **IF=0,9**
- 4) Burghardt, A., Szybicki, D., Kurc, K., Obal, P., & Muszyńska, M. (2018). Dobór parametrów systemu zrobotyzowanego z układem kontroli siły. *Modelowanie Inżynierskie*, 37
- 5) Burghardt, A., Szybicki, D., Kurc, K., Muszyńska, M., & Mucha, J. (2017). Experimental study of Inconel 718 surface treatment by edge robotic deburring with force control. *Strength of Materials*, 49, 594-604. **IF=0,443**
- 6) Burghardt, A., Kurc, K., Szybicki, D., Muszyńska, M., & Nawrocki, J. (2017). Robot-operated quality control station based on the UTT method. *Open Engineering*, 7(1), 37-42. **IF=1,7**
- 7) Burghardt, A., Szybicki, D., Kurc, K., & Muszyńska, M. (2016). Optimization of process parameters of edge robotic deburring with force control. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, 21(4), 987-995
- 8) Burghardt, A., Kurc, K., Muszyńska, M., & Szybicki, D. (2014). Zrobotyzowane stanowisko z kontrolą siły. *Modelowanie inżynierskie*, 22(53), 30-36

### Oryginalne osiągnięcie konstrukcyjne

Wykonanie autorskiego projektu wraz z dokumentacją techniczną stacji zrobotyzowanej. Zlecenie od firmy 3D Robot w ramach realizacji przez nią projektu POIR.01.02.00-00-0016/15, pt. „Zaawansowane technologie wytwarzania łopatek turbin metodami obróbki skrawaniem, zautomatyzowanym polerowaniem oraz drukowaniem 3D”. Wewnętrzne numery zleceń NR-651-93-U-20084-20, RM-U-20084.

Tematyka badawcza będąca w obszarze moich zainteresowań koncentruje się wokół implementacji algorytmów wykorzystujących elementy sztucznej inteligencji w sterowaniu robotów. Podjęta tematyka dotyczyła najpierw syntezy algorytmów neuronowo – rozmytych do sterowania mobilnym robotem kołowym.

### *Algorytmy neuronowo-rozmyte w metodach planowania i realizacji ruchu mobilnych robotów kołowych*

---

Celem prac badawczych było zbadanie możliwości zastosowania algorytmów neuronowo-rozmytych w sterowaniu w czasie rzeczywistym ruchem nadążnym mobilnego robota kołowego w obecności zmiennych warunków pracy oraz ich ocena dotycząca jakości sterowania.

Tematyka została rozwiązana przez zastosowanie inteligentnego układu sterowania, rozumianego jako układ sterowania hybrydowego łączący układy z logiką rozmytą i sztuczne sieci neuronowe. Zaletą tych systemów jest możliwość interpretacji wiedzy zgromadzonej w wagach połączeń neuronowych. W przeciwieństwie do „klasycznych” sieci neuronowych, w których jedynie wiemy, że wiedza jest zawarta w wagach połączeń, w systemach neuronowo-rozmytych możemy łatwo na podstawie tych połączeń zapisać zbiór reguł rozmytych.

W ramach układu sterowania ruchem mobilnych robotów kołowych zostało rozwiązane zadanie syntezy algorytmu sterowania ruchem nadążnym. Uwzględniona została teoria układów adaptacyjnych i odpornych. Do opisu dynamiki mobilnego robota kołowego zostały wykorzystane równania Maggiego. Problemy stabilności projektowanego układu sterowania analizowane były z uwzględnieniem teorii stabilności Lapunowa. Takie ujęcie syntezy ruchu umożliwia uzyskanie zbieżności błędów nadążania do zbioru ograniczonego, który można uznać za praktyczne kryterium dokładności proponowanego algorytmu sterowania. W celu zbudowania innowacyjnych neuronowo-rozmytych algorytmów sterowania mobilnym robotem kołowym zastosowany został model rozmyty w postaci bazy reguł:

$$\text{If } (x_1 = A_{j1}) \text{ and } \dots \text{ and } (x_n = A_{jn}) \text{ then } (\bar{y} = \bar{y}^k) \quad (1)$$

gdzie  $A_{ji}$  jest zbiorem rozmytym  $j = 1, 2, \dots, N$  to liczba reguł. W rozważaniach została wybrana funkcja przynależności w postaci krzywych gaussowskich, które są wyrażone wzorem:

$$\mu_{A_{ji}}(x_i) = e^{-r_{ji}^2(x_i - c_{ji})^2} \quad (2)$$

gdzie  $r_{ji}$  jest parametrem określającym szerokość krzywej gaussowskiej a  $c_{ji}$  jest jej środkiem. Do aproksymacji zależności funkcyjnych występujących w konkluzjach bazy reguł modelu Takagi-Sugeno została zastosowana sieć neuronowa. Prawo uczenia wag konkluzji bazy reguł układu neuronowo-rozmytego wyznaczono stosując teorie stabilności Lapunowa. Algorytm adaptacji wag sieci wyglądał następująco:

$$W = \Gamma \delta s^T - \kappa \Gamma \|s\| \hat{W} \quad (3)$$

Pierwsze podejście polegało na uczeniu w tym układzie parametrów konkluzji bazy reguł modelu Takagi-Sugeno, przy założonych stałych parametrach funkcji przynależności wejścia (założono równomierne rozmieszczenie funkcji przynależności w przestrzeni rozważań).

Jako kolejny został przedstawiony bardziej zaawansowany algorytm adaptacji konkluzji i przesłanki bazy reguł, w którym główny nacisk położono na uczenie parametrów występujących zarówno w konkluzjach (wagi konkluzji) jak i przesłankach (środki i szerokości funkcji Gaussa) bazy reguł modelu Takagi-Sugeno. Prawo adaptacji parametrów przyjęto w postaci następujących równań:

- algorytm uczenia wag konkluzji bazy reguł

$$\dot{\hat{W}}_{nr} = F_w \hat{\Phi}_{nr} s^T - F_w (A^T \hat{r}_{ji} + B^T \hat{c}_{ji}) s^T - F_w \|s\| \hat{W}_{nr} \quad (4)$$

- algorytm uczenia wag przesłanki bazy reguł (odpowiednio szerokości i środków zbiorów rozmytych postaci krzywych gaussa)

$$\dot{\hat{r}}_{ji}^k = F_r A \hat{W}_{nr} s - F_r \|s\| \hat{r}_{ji} \quad (5)$$

$$\dot{\hat{c}}_{ji}^k = F_c B \hat{W}_{nr} s - F_c \|s\| \hat{c}_{ji} \quad (6)$$

Problem ten był stosunkowo trudny do rozwiązania z przyczyny braku liniowej formy równań ze względu na estymowane parametry. W proponowanych algorytmach sterowania biorąc pod uwagę niedokładności modelowania i niedokładności wynikające z rozpisania w szereg funkcji nieliniowej i inne sygnały zakłócające do sygnału sterowania wprowadzony został również człon związany ze sterowaniem odpornym, którego celem było zapewnienie niewrażliwości proponowanego układu sterowania na niedokładności modelowania i zakłócenia.

W pracy badawczej zostały przeprowadzone liczne testy numeryczne dotyczące symulacji zaproponowanych rozwiązań zarówno innowacyjnego rozwiązania jakim były algorytmy neuronowo-rozmyte jak też sterowania rozmytego i konwencjonalnego z regulatorem PD. W badaniach tych uwzględniono również występujące liczne zakłócenia np. podczas zmiany masy w momencie kiedy mobilny robot porusza się po łuku oraz dodatkowego zakłócenia w postaci zwiększonych oporów ruchu podczas całej realizacji ruchu.

Przeanalizowano również wpływ ilości reguł na model neuronowo-rozmyty oraz rodzaj zbiorów rozmytych. Stosowanie większej liczby reguł w tym przypadku nie gwarantuje lepszego rozwiązania, a znacząco wydłuża czas obliczeń. Rozbudowuje również model neuronowo-rozmyty. Z kolei przyjęcie mniejszej liczby reguł nie gwarantują otrzymania satysfakcjonujących wyników badań. Przeprowadzono również testy numeryczne dla przypadku kiedy podział przestrzeni rozważań przez zbiory rozmyte nie był równomierny.

Przeprowadzone zostały ponadto liczne badania weryfikacyjne zaproponowanych neuronowo-rozmytych algorytmów sterowania na obiekcie rzeczywistym. Weryfikacji dokonano metodą szybkiego prototypowania, która stanowi nowoczesne narzędzie wspomaganego komputerowo projektowania. Weryfikowane były algorytmy z zastosowaniem regulatora PD oraz klasycznego sterowania rozmytego w celu porównania tego typu sterowania z zaproponowanymi w pracy algorytmami neuronowo-rozmytymi. Badano algorytmy neuronowo-rozmyte podczas uczenia konkluzji bazy reguł oraz algorytmy, gdzie uczone były parametry zarówno przesłanki jak i konkluzji bazy reguł. W pierwszej kolejności zweryfikowano wspomniane algorytmy sterowania przyjmując ruch mobilnego robota bez zakłóceń. Następnie przebadano

algorytmy sterowania w przypadku wprowadzenia zakłócenia w postaci dodatkowej masy przewożonej przez mobilnego robota. Kolejne badania dotyczyły przypadku kiedy podczas ruchu mobilnego robota wprowadzono zakłócenie w postaci dodatkowej masy oraz zmianie uległy opory ruchu, na skutek zmiany powierzchni po której poruszał się robot.

Uzyskane rezultaty przeprowadzonych badań wykazały, że zastosowanie inteligentnego regulatora neuronowo-rozmytego w zadaniu nadążania jest bardziej korzystne niż stosowanie do tego celu regulatorów konwencjonalnych i rozmytych. W sterowaniu neuronowo-rozmytym wartości parametrów modelu neuronowo-rozmytego są uaktualniane na bieżąco, według przyjętego prawa estymacji. Z przebiegów błędu nadążania i błędu prędkości nadążania wynika że skokowa zmiana obciążenia minimalnie zmienia wartość błędu, który jest zbieżny do zera. Na podstawie uzyskanych rezultatów zarówno symulacji komputerowej, ale również przede wszystkim weryfikacji na obiekcie rzeczywistym udowodniono, że zaproponowane neuronowo-rozmyte algorytmy sterowania umożliwiają uzyskanie dużej dokładności sterowania ruchem nadążnym mobilnego robota kołowego, pomimo występowania zmiennych warunków pracy. Zaproponowane algorytmy pracują on-line, bez znajomości modelu sterowanego obiektu, nie wymagają również uczenia wstępnego sieci.

W celu ilościowej oceny zaproponowanego neuronowo-rozmytego algorytmu sterowania, wprowadzono wskaźniki jakości w postaci pierwiastka błędu średniokwadratowego oraz maksymalnego błędu bezwzględnego.

Badania te stanowiły próbę zastosowania w robotyce nowoczesnych technologii informatycznych rozumianych jako:

- sterowanie w czasie rzeczywistym, uwzględniające parametryczne i nieparametryczne niedokładności modelowania nieliniowego obiektu jakim jest mobilny robot kołowy,
- zastosowanie metod adaptacyjnych w syntezy neuronowo-rozmytych algorytmów sterowania ruchem nadążnym mobilnego robota kołowego.

Zwieńczeniem tych prac była **dysertacja doktorska pt. „Neuronowo – rozmyte systemy sterowania mobilnym robotem kołowym”**, obroniona w roku 2012. Z tego okresu pochodzi 10 publikacji oraz współautorska **monografia: Hendzel, Z., Muszyńska, M., Jagielowicz – Ryznar, C. (2014). Rozmyte systemy sterowania mobilnych robotów kołowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. ISBN 978-83-7199-965-8**

Zauważone zalety oraz możliwości algorytmów neuronowo – rozmytych zaowocowały dalszymi badaniami w tym obszarze. Ze względu na to iż algorytmy te dają możliwość uzyskania prostych, ale odpornych rozwiązań oraz perspektywę uporania się z niedokładnościami modelowania, jak i z dużymi zakłóceniami przy szerokim zakresie zmian parametrów obiektu.

tu, stwierdzono, że układy te stanowią mocny argument mogący przyspieszyć szersze wprowadzenie zaproponowanych rozwiązań do praktyki przemysłowej.

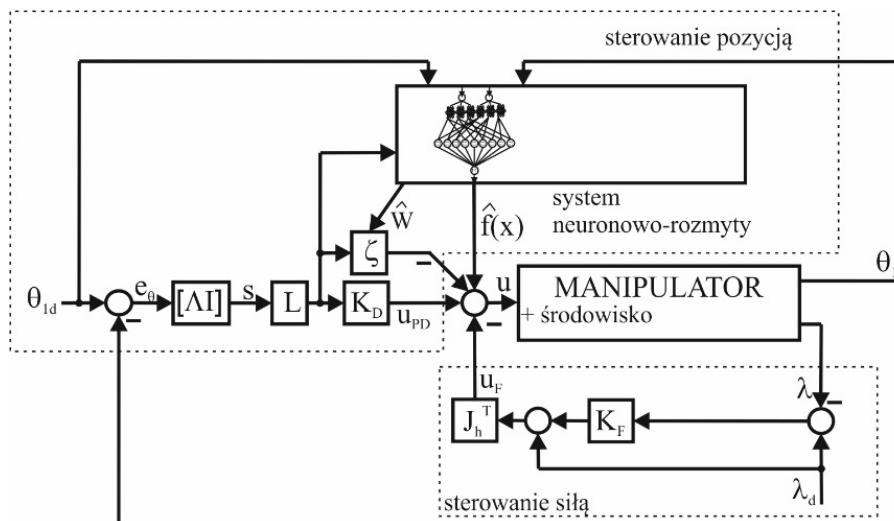
### *Elementy sztucznej inteligencji w sterowaniu manipulatorem przemysłowym*

W celu poszerzenia możliwości aplikacyjnych podjęto pracę nad syntezą algorytmów wykorzystujących elementy sztucznej inteligencji do sterowania manipulatorem przemysłowym. Szczegóły zawarto w pierwszej części **autorskiej monografii pt. „Zastosowanie algorytmów neuronowo – rozmytych w automatyzacji wybranych procesów przemysłowych”**. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej*. ISBN: 978-83-7934-667-7. Część ta dotyczy zastosowania algorytmów neuronowo – rozmytych do kompensowania nieliniowości robota przemysłowego w hybrydowym sterowaniu pozycyjno-siłowym. Celem było wykazanie możliwości praktycznego zastosowania układów neuronowo – rozmytych w sterowaniu robotem przemysłowym. W części tej przyjęto model układu robot – środowisko, w którym robot to układ brył sztywnych bez podatności złączy, a środowisko opisano jako sztywną powierzchnię. Wprowadzono model dynamiki robota manipulacyjnego. Przeprowadzono syntezę sterowania z uwzględnieniem układu neuronowo – rozmytego. Układ ten był odpowiedzialny za ruch nadążny robota manipulacyjnego, który polegał na śledzeniu trajektorii zadanej. Wynikała ona z przyjętego toru ruchu efektora w płaszczyźnie styku, z jednoczesnym śledzeniem zadanej trajektorii siłowej. Przyjęto odpowiednią strukturę sterowania, która wynikała z teorii sterowania układami nieliniowymi:

$$u = \hat{f}(x) + K_D L s - J_h^T [\lambda_d + K_F \tilde{\lambda}] - \zeta \quad (7)$$

gdzie  $K_D \in \mathbb{R}^{n \times m}$  i  $K_F \in \mathbb{R}^{m_1 \times m_1}$  to dodatnio określone macierze wzmocnienia pozycyjnego i siłowego,  $u_{PD} = K_D L s$  to forma sterowania PD,  $u_F = -J_h^T [\lambda_d + K_F \tilde{\lambda}]$  to sterowanie w pętli sprzężenia siłowego,  $\zeta$  to sterowanie odporne (zaletą sterowania odpornego jest prostota i duża pewność działania układu), natomiast  $\hat{f}(x)$  aproksymuje nieliniową funkcję zależną m.in. od parametrów manipulatora (parametry te są trudne do określenia, a ponadto mogą się zmieniać w przedziałach czasu), ten człon nazwano sterowaniem kompensacyjnym. Schemat prezentowanego układu pokazano na rysunku 1.





Rys.1. Schemat sterowania neuronowo-rozmytego z adaptacją parametrów konkluzji bazy reguł

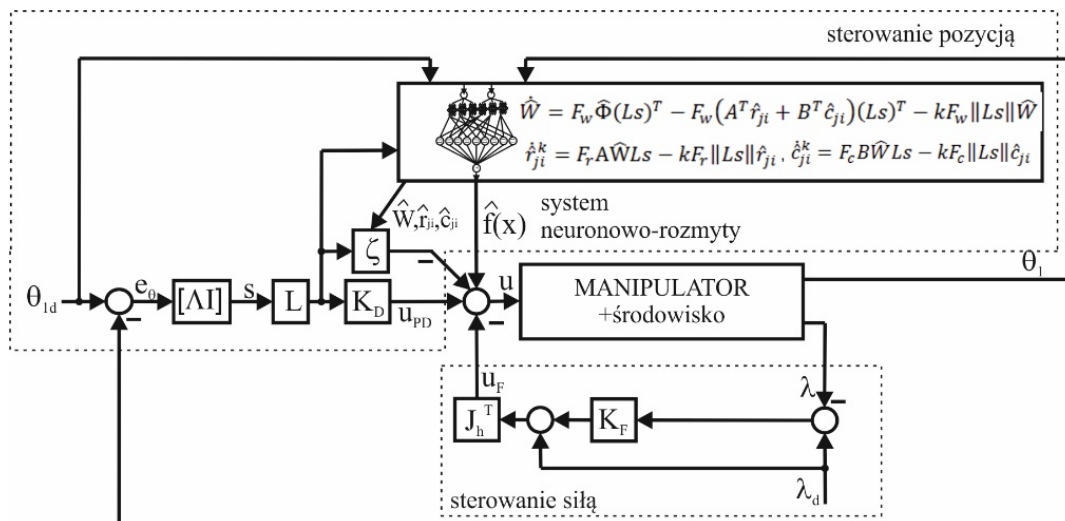
Rozważono dwa warianty sterowania. Sterowanie neuronowo – rozmyte związane z adaptacją parametrów konkluzji bazy reguł układu rozmytego kompensującego nieliniowości robota (rys.1). Przy założonych stałych parametrach funkcji przynależności wejścia. Drugi wariant dotyczył sterowania neuronowo – rozmytego, w którym przeprowadza się adaptację parametrów konkluzji i przesłanek bazy reguł (parametrów funkcji przynależności). Do adaptacji środków, szerokości funkcji Gaussa oraz konkluzji bazy reguł przyjęto prawa adaptacji wprowadzone z zastosowaniem teorii stabilności Lapunowa, mianowicie:

$$\dot{\hat{W}} = F_W \hat{\Phi}(Ls)^T - F_W (A^T \hat{r}_{ji} + B^T \hat{c}_{ji})(Ls)^T - k F_W \|Ls\| \hat{W} \quad (8)$$

$$\dot{\hat{r}}_{ji} = F_r A \hat{W} Ls - k F_r \|Ls\| \hat{r}_{ji} \quad (9)$$

$$\dot{\hat{c}}_{ji} = F_c B \hat{W} Ls - k F_c \|Ls\| \hat{c}_{ji} \quad (10)$$

gdzie  $F_W$ ,  $F_r$ ,  $F_c$  – to macierze współczynników wzmocnień adaptacji.



Rys.2. Schemat sterowania neuronowo-rozmytego z adaptacją parametrów konkluzji oraz przesłanki bazy reguł

Wykazano również stabilność układu stosując teorię stabilności Lapunowa, wyprowadzono dowód stabilności algorytmu neuronowo – rozmytego. Dla tak przeprowadzonych rozważań wykonano obszerne badania symulacyjne oraz zweryfikowano omawiane sterowania na obiekcie rzeczywistym. Użycie układu neuronowo-rozmytego do kompensacji nieliniowości manipulatora pozwoliło na uzyskanie wymaganej precyzji ruchu efektora manipulatora. Skuteczność algorytmu sterowania została potwierdzona testem eksperymentalnym. Wyniki pokazują, że zastosowanie neuronowo-rozmytej kompensacji nieliniowości manipulatora robota w zadaniu śledzenia zapewnia prawidłową pracę systemu. Dodatkowo zapewniona jest stabilność układu sterowania.

### Zrobotyzowana obróbka z kontrolą siły

Dotychczasowe doświadczenie oraz aktywność w 8 projektach nakreśliła dalsze kierunki badań. Wyciągnięte wnioski i spostrzeżenia przyczyniły się do podjęcia tematyki implementacji algorytmów neuronowo – rozmytych w obróbce zrobotyzowanej z kontrolą siły. Prace badawcze w latach 2014 – 2016 nad nowym rozwiązaniem z kontrolą siły w robotach zawarto w pracach:

- Burghardt, A., Kurc, K., Muszyńska, M., & Szybicki, D. (2014). Zrobotyzowane stanowisko z kontrolą siły. *Modelowanie inżynierskie*, 22(53), 30-36.
- Burghardt, A., Szybicki, D., Kurc, K., & Muszyńska, M. (2016). Optimization of process parameters of edge robotic deburring with force control. *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, 21(4), 987-995.

- Burghardt, A., Szybicki, D., Kurc, K., Muszyńska, M., & Mucha, J. (2017). Experimental study of Inconel 718 surface treatment by edge robotic deburring with force control. *Strength of Materials*, 49, 594-604. **IF=0,443**
- Burghardt, A., Szybicki, D., Kurc, K., Obal, P., & Muszyńska, M. (2018). Dobór parametrów systemu zrobotyzowanego z układem kontroli siły. *Modelowanie Inżynierskie*, 37.

Artykuły te dotyczyły m.in. zagadnień zastosowanie pakietu Force Control który pozwala na kontrolę siły wywieranej przez narzędzie na obrabiany przedmiot. Proponowany sposób sterowania pozwala na dostosowanie ruchów robota do informacji zwrotnych z czujników siły w czasie rzeczywistym. Wykorzystanie dodatku ForceControl wymaga określenia szeregu parametrów. W pracach przebadano wpływ zmiany wybranych parametrów na proces obróbki skrawaniem. Badania te pozwoliły na dobór suboptymalnych parametrów procesu w tym m.in. siły docisku i prędkość ruchu TCP (Tool Center Point). Zaproponowane procedury optymalizacyjne pozwoliły na wskazanie zestawu parametrów procesu zapewniających obróbkę zgodnie ze specyfikacjami procesu. Dobór kontroli siły był realizowany dla szeregu elementów silnika odrzutowego (łopatek lub dyfuzora). Odnośnie dyfuzora realizowany był process obróbki zatępienia z wykorzystaniem układu kontroli siły. W ramach prac zrealizowałam dobór parametrów pracy, przygotowanie danych pomiarowych, analizę układów z kontrolą siły docisku, przebadalam wpływ zmiany wybranych parametrów na proces obróbki skrawaniem. Ponadto dokonałam interpretacji oraz opracowania wyników związanych z parametrami doboru siły z uwzględnieniem tak jak to zostało opisane w artykule „*Experimental study of Inconel 718 surface treatment by edge robotic deburring with force control*” parametrów chropowatości.

Przydatność zdobytej wiedzy potwierdzono w pracach realizowanych w ramach grantu: **NCBiR INNOTECH-K2/IN2/66/182991/NCBR/13 pt. „Opracowanie procesu zrobotyzowanego zatępienia krawędzi elementów o zmiennym kształcie stosowanych w silnikach lotniczych z wykorzystaniem systemu automatycznej adaptacji trajektorii narzędzia.”** W ramach grantu pierwszą opracowaną i wdrożoną technologią była zrobotyzowana obróbka dyfuzora silnika V2500. Silnik typu V2500 kilka lat temu był bardzo popularną jednostką napędową. Został zaprojektowany i wyprodukowany przez International Aero Engines, globalne partnerstwo liderów branży lotniczej, w tym Pratt & Whitney, Japanese Aero Engine Corporation, Fiat Avio, Rolls-Royce i MTU Aero Engines. Silnik ten zasila rodzinę samolotów Airbus A320, McDonnell Douglas MD-90 i Embraer C-390 Millennium. Głównym motorem napędowym poszukiwania zrobotyzowanej czy automatycznej obróbki były względy ekono-

miczne. Dyfuzor to odlew z inconelu 718, wykonywany w Pratt&Whitney w Kanadzie następnie jest on transportowany do kraju, gdzie jest obrabiany na centrach obróbczych. Inconel to materiał trudnoobrabialny (zgodnie z normą PWA 1469-4 Inconel 718, posiada współczynnik obrabialności materiału ok. 14%) i w wyniku procesów obróbki powstają wypłytki na szeregu elementach np. króćcach, nabach. Są to elementy o kształcie w ograniczonym stopniu zmiennym losowo. Spowodowane jest to stosowaną technologią odlewania precyzyjnego charakteryzującą się zmienną geometrią detalu w zależności od dokładności wykonania form odlewniczych i zjawiska skurczu występującego w trakcie krzepnięcia. Determinuje to konieczność wykonania faz i promieni zaokrągleń ręcznie. Wprowadza to duże ryzyko powstania elementów brakowych związanych z występowaniem czynnika ludzkiego (błąd, zmęczenie, stres).

W ramach prac opracowano technologię, wzorując się na pracy ludzkiej. Podzielono ją na trzy etapy. Najpierw duże wypłytki były odcinane za pomocą freza, następnie wykonywana była faza z użyciem pilnika obrotowego, a ostatecznie krawędź jest poddawana szlifierskiej obróbce wykańczającej. W pierwszym kroku wykonano oprogramowanie, które wykorzystując opcję kontroli siły, szuka kontaktu z obrabianą nabą. Następnie w czasie rzeczywistym generuje trajektorię robota utrzymując stałą siłę na kierunku normalnym do stycznej do obrabianej powierzchni. Pozwoliło to na pracę z większym zakresem sił w kontakcie detal narzędzie, co charakteryzuje się większą stabilnością utrzymywania wielkości zdefiniowanej siły kontaktu. Opracowanie technologii obcinania wypływek w elementach o pozycji i orientacji w ograniczonym zakresie zmiennym losowo wymagało ponadto doboru parametrów procesu takich jak: prędkość ruchów narzędzia, siły kontaktu, rodzaju narzędzia oraz parametrów układu stabilizacji siły czyli: współczynnika zmiany prędkości, procentu zadanej siły z jaką robot rozpoczyna proces, współczynnika narastania siły, tłumienie, progu filtracji. W drugim etapie opracowanej technologii w celu wykonania fazy zaproponowano narzędzie z pneumatyczną progresją siły nacisku. Jest to rodzaj sterowanej „sprężyny gazowej” dla której dobrano parametry procesu. Ponieważ powietrze jako medium jest ściśliwe dlatego rozpoczęcie procesu wykonywania fazy wiąże się z problemem utrzymania poprawnej szerokości obróbki. Ostatni trzeci etap to szlifowanie wykańczające w którym opcję kontroli siły wykorzystano do kompensacji zużycia narzędzia.

Współpraca z zakładami Doliny lotniczej w ramach grantu i prac zleconych oraz zgłaszane do rozwiązania problemy technologiczne były genezą podjęcia tematyki szlifowania łopatek kompresora silnika, realizowanej z wykorzystaniem algorytmów neuronowo – rozmytych.

## *Algorytm wykorzystujących elementy sztucznej inteligencji w sterowaniu procesem szlifowania łopatek*

---

Kolejną podjętą aktywnością potwierdzającą przydatność algorytmów neuronowo - rozmytych była ich implementacja w procesie szlifowania łopatek turbin kompresora silnika lotniczego. W pierwszym kroku w celu budowy bazy wiedzy zaistniała potrzeba zapoznania się z technikami pomiarowymi 2D i 3D co zawarto w następujących pracach:

- Kurc, K., Burghardt, A., Gierlak, P., Muszyńska, M., Szybicki, D., Ornat, A., & Uliasz, M. (2022). Application of a 3D Scanner in Robotic Measurement of Aviation Components. *Electronics*, 11(19), 3216. **IF=2,69**
- Burghardt, A., Szybicki, D., Gierlak, P., Kurc, K., Muszyńska, M., Ornat, A., & Uliasz, M. (2022). TCP Parameters Monitoring of Robotic Stations. *Electronics*, 11(20), 3415. **IF=2,69**
- Burghardt, A., Kurc, K., Szybicki, D., Muszyńska, M., & Nawrocki, J. (2017). Robot-operated quality control station based on the UTT method. *Open Engineering*, 7(1), 37-42. **IF=1,7**

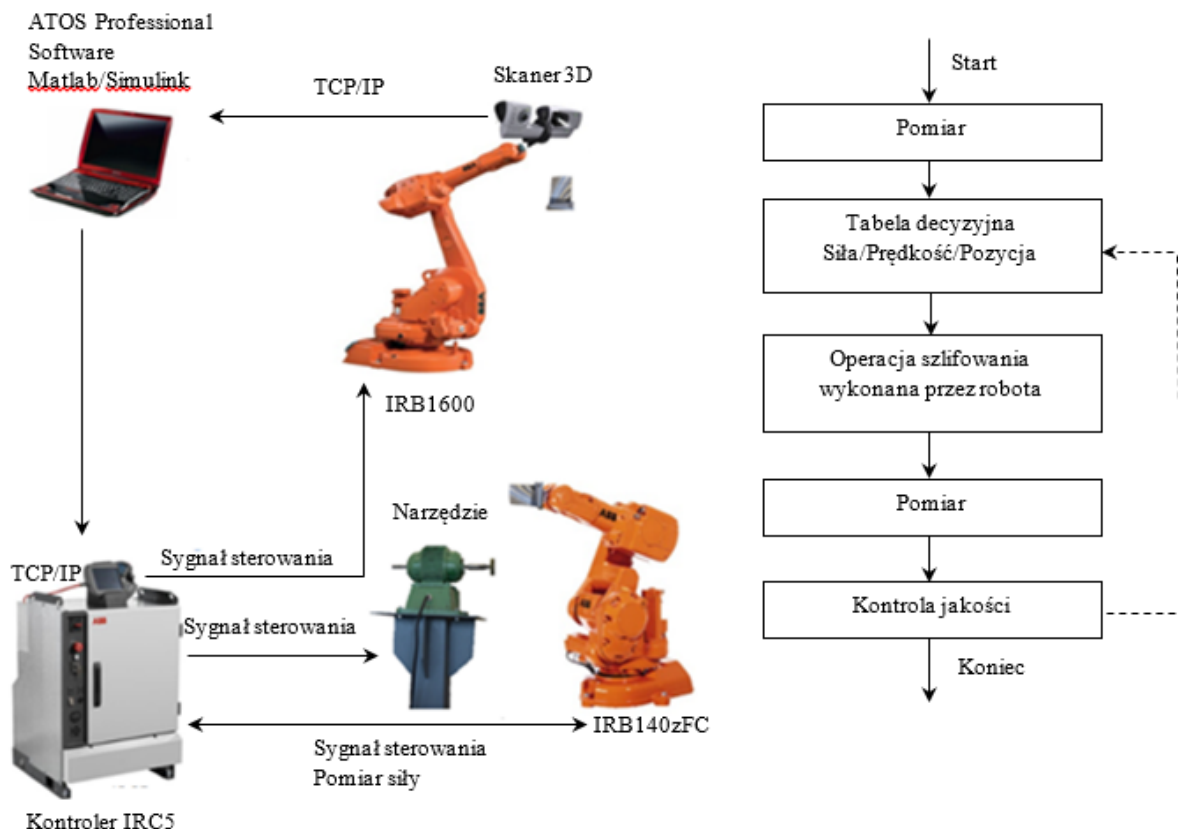
Mając dostępne dane pomiarowe w postaci parametrów kinematyki robota oraz geometrii obrabianego detalu (łopatki) zaproponowano algorytm opisany w drugiej części monografii habilitacyjnej.

Ta część badań dotyczyła implementacji algorytmów neuronowych oraz rozmytych w systemach zrobotyzowanych na poziomie zarządzania parametrami procesu.

Rozwiązanie zaimplementowano w procesie szlifowania łopatek, gdzie występuje konieczność usuwania nadmiaru, którego ilość jest zmienna. Głównym motorem napędowym tego typu prac, oprócz minimalizacji kosztów pracy ludzkiej jest poprawa warunków bezpieczeństwa i zwiększenie powtarzalności wykonania wyrobu. Przemysł lotniczy i energetyczny jest głównym odbiorcą wytwarzanych obecnie łopatek. Istnieje szereg technologii ich wytwarzania od najbardziej zaawansowanych jak proces odlewania łopatek metodą monokrystaliczną, przez wykonywanie ich na maszynach CNC, aż do metody elektrochemicznej, która stosowana jest od dziesięcioleci. Kształtowanie łopatek w wyniku obróbki elektrochemicznej jest ekonomicznie uzasadnione, jednak ta technologia jest wrażliwa na szereg czynników wpływających na zmianę parametrów procesu jak np. temperatura, wartość przepływającego prądu, szerokość szczeliny itd. Niepowtarzalność wykonania kształtu łopatek wymaga ręcznego dedykowanego dla każdej sztuki procesu szlifowania, a następnie polerowania wykańczającego.

Zaproponowane rozwiązania są propozycją automatyzacji procesu szlifowania łopatek, ponieważ proces ten jest monotony, nużący, wymagający zdolności manualnych, co predysponuje go do robotyzacji czy automatyzacji. Proponowana stacja zrobotyzowana zawierała robot IRB 140 manipulujący obrabianym detalem, narzędzie szlifujące oraz robot IRB 1600 z zainstalowaną głowicą skanującą 3D. Układ pomiarowy współpracuje z oprogramowaniem ATOS Professional i komunikuje się z kontrolerem robota (IRC5) z wykorzystaniem protokołu TCP/IP. Oprogramowanie kontrolera robota RobotWare zapewniło sterowanie dwoma robotami oraz wyposażone było dodatkowo w opcję kontroli siły.

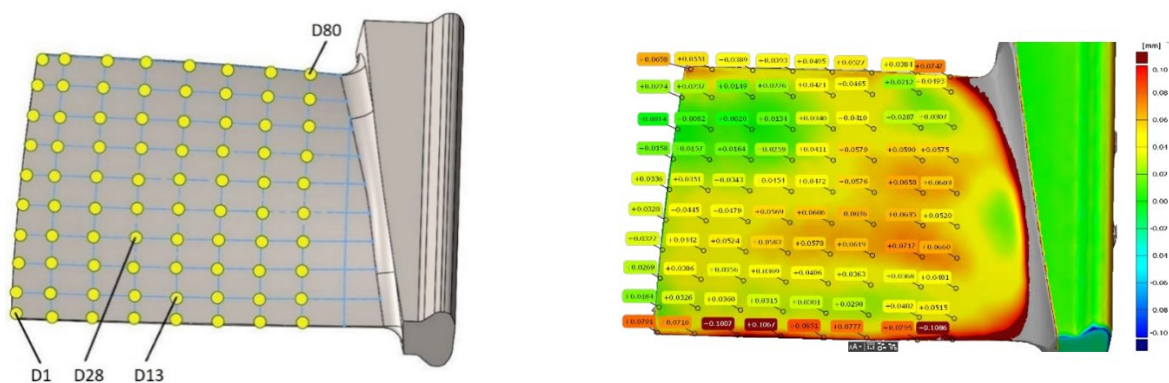
Opisana zrobotyzowana stacja (rys.3) została wykorzystana do prac badawczych związanych z tworzeniem inteligentnego systemu doboru siły obróbki w celu usunięcia odpowiedniej warstwy materiału (naddatku). Układ pomiarowy współpracował z oprogramowaniem Atos Professional i Matlab zainstalowanym na komputerze PC i komunikował się przesyłając dane do kontrolera robota IRC5 z wykorzystaniem protokołu TCP/IP. Regulacja prędkości pracy narzędzia szlifującego zapewniona była przez przemiennik częstotliwości skomunikowany z kontrolerem robota z wykorzystaniem komunikacji DeviceNet.



Rys.3. Schemat stacji zrobotyzowanej

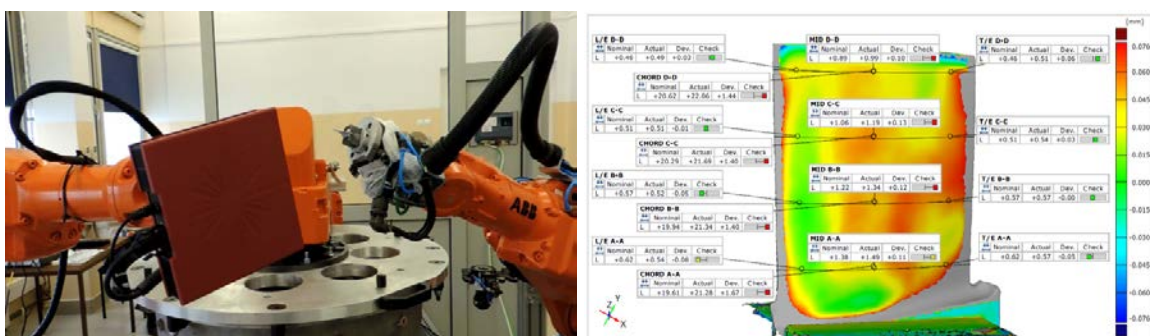
Scenariusz zrobotyzowanego procesu zawierał takie elementy jak: start, pomiar skanerem, porównanie chmury punktów z wzorcem, zapis danych z odchyłkami, przesłanie odchyłek do programu Matlab/Simulink, programowy dobór siły docisku, przesłanie otrzymanych wartości do kontrolera, automatyczną korekcję siły docisku dla zaprogramowanej ścieżki, obróbkę, pomiar kontrolny porównujący z wzorcem (Tak/Nie), stop i zmianę detalu.

Dzięki specjalnemu oprogramowaniu ATOS Professional porównano model CAD łopaty z uzyskanym podczas rzeczywistych pomiarów obrazem trójwymiarowym. Pozwoliło to na wygenerowanie raportu pomiarowego, w którym wykorzystano barwną mapę odchyłek informującą o błędach wymiarowych w zdefiniowanych punktach.



Rys. 4. Grzbiet łopaty z naniesioną siatką punktów oraz naddatek materiału w tych punktach pomiarowych

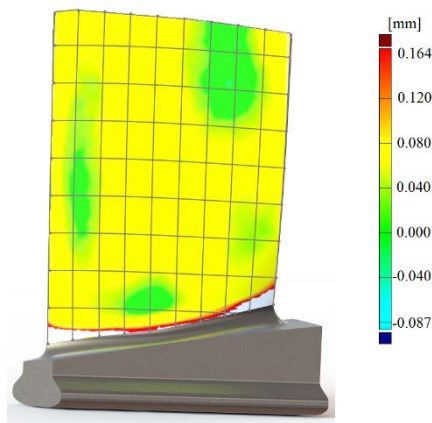
System pomiarowy pozwolił na uzyskanie w 80 punktach zależności pomiędzy siłą, a ilością usuwanego materiału (naddatku).



Rys. 5. Zdjęcie z realizacji pomiarów

Dla tak uzyskanych danych pomiarowych zaproponowano inteligentny system decyzyjny, gdzie zmienny parametr procesu (siła nacisku) wyznaczana jest przez sieć neuronową. Neuronowy sterownik procesu szlifowania łopatek został zbudowany w programie Matlab, z zastosowaniem funkcji biblioteki "Neural Network Toolbox". Do aproksymacji zależności

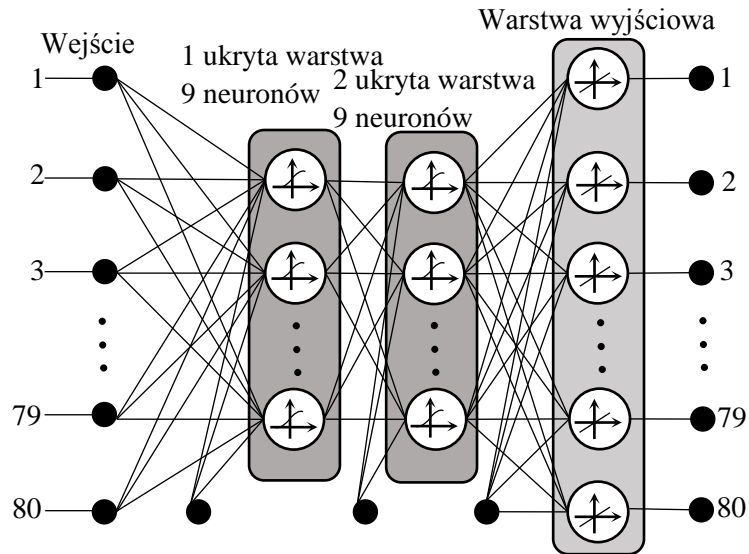
siły docisku narzędzia od naddatku materiału, wybrano sieć neuronową typu feed-forward, uczoną zgodnie z algorytmem wstecznej propagacji błędów. Na powierzchni grzbietu łopaty przyjęto 80 rozmieszczonych regularnie punktów, które są umieszczone na przecięciach linii widocznych na rysunku 6, w których wykonywano pomiary geometryczne w celu określenia wielkości naddatku materiału. Następnie przy zadanej sile docisku narzędzia wykonywano obróbkę powierzchni, po czym znów mierzono geometrię powierzchni. Dzięki temu określono eksperymentalnie zależność grubości zbieranej warstwy materiału od siły docisku narzędzia.



Rys.6. Naddatek materiału na powierzchni grzbietu łopaty

Rolą neuronowego kontrolera procesu było nauczenie się zagadnienia odwrotnego: dla każdego z osiemdziesięciu punktów pomiarowych, neuronowy kontroler procesu powinien wygenerować wartości sił docisku narzędzia, jeśli znana jest wartość naddatku w tych punktach. Wektor danych wejściowych sieci zawiera wartości naddatków materiału w 80 punktach pomiarowych, przy czym dane wejściowe są normalizowane do przedziału [0-1]. Struktura sieci neuronowej powoduje, że wartość naddatku w jednym punkcie wpływa na wartość generowanej siły w tym punkcie, a także na wartości sił docisku w pozostałych punktach.



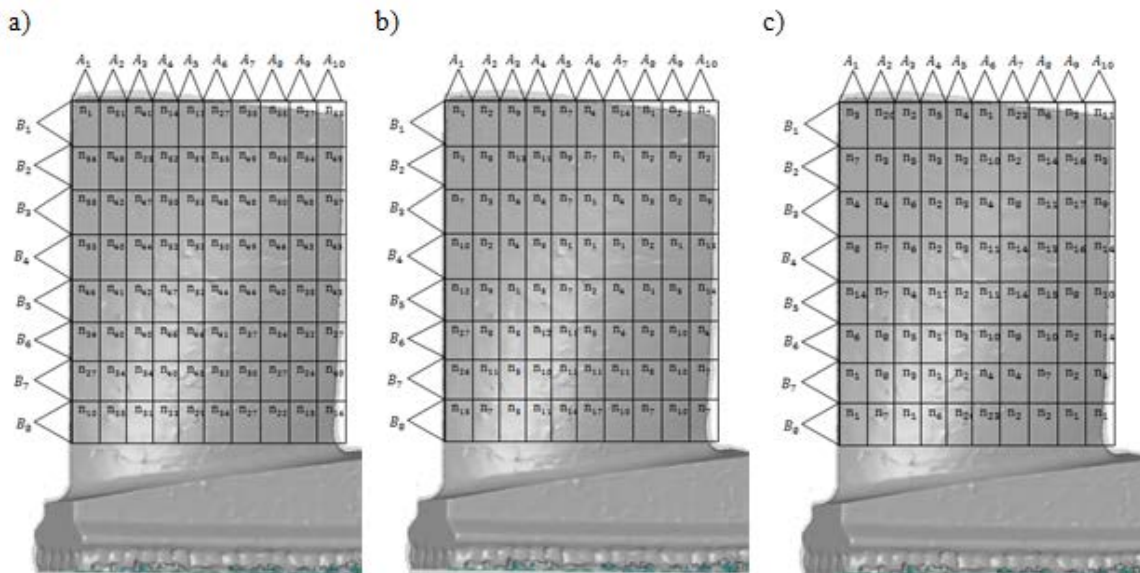


Rys.7. Struktura sieci neuronowej

Zaletą takiego rozwiązania jest to, że pomiędzy sąsiednimi punktami wygenerowana siła docisku nie będzie zmieniać się gwałtownie. Ma to znaczenie z punktu widzenia płynnej realizacji procesu obróbki mechanicznej. Dodatkowo powoduje to, że system sterowania procesem jest mniej wrażliwy na mogące wystąpić błędy pomiarowe.

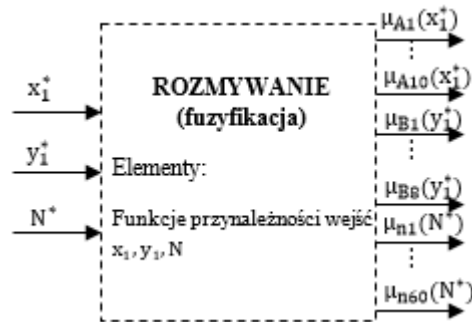
Kolejnym etapem prac badawczych był dobór odpowiednich parametrów w procesie obróbki grzbietu łopatki poprzez zaproponowane autorskie rozwiązanie bazujące na układach z logiką rozmytą. Podobnie jak dla sterownika neuronowego dzięki specjalnemu oprogramowaniu ATOS Professional porównano model CAD łopatki z uzyskanym obrazem trójwymiarowym. Dzięki temu wygenerowano raport kontrolny w postaci kolorystycznej mapy odchylek, w określonych punktach pomiarowych i dla tak uzyskanych danych zaproponowano model rozmyty, w celu określenia zależności ilości usuwanej warstwy materiału zależnej od siły docisku narzędzia. Zastosowany system akwizycji danych podobnie jak przy sterowniku neuronowym pozwolił na uzyskanie informacji na temat zależności pomiędzy siłą skrawającą, a ilością usuwanego materiału w procesie obróbki szlifowania łopatek. Informacja ta dotyczyła 80 punktów pomiarowych. Tak uzyskane dane zostały przesyłane do oprogramowania Matlab/Simulink. Na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych uzyskano pomiary określające zależność ilości zbieranego nadatku przy użyciu zdefiniowanej siły docisku w procesie obróbki szlifowania łopatek. W obróbce zostały uwzględnione następujące wartości siły docisku: 9[N], 8[N], 6[N], 5[N], 4[N], 3[N], 2[N]. Na podstawie pomiarów zaproponowano model rozmyty określający jaką siłą skrawającą należy przyłożyć, aby usunąć odpowiednią ilość nadatku w określonym punkcie pomiarowym. Spośród 8 wartości sił docisku,

dla modelu rozmytego wybrano trzy 9[N], 5[N] oraz 3[N]. Wartości zaproponowanych sił skrawających wynikają z tego iż nie używa się sił mniejszych niż 2 [N] ponieważ nie ma wówczas możliwości kontroli siły w układzie sterowania robota, a siły przekraczające wartość 8 [N] uszkadzają powierzchnie łopatki (przypalenia). Zaproponowane rozwiązanie zostało zasymulowane w programie Matlab, z zastosowaniem biblioteki "Fuzzy Logic Toolbox". Do określenia zależności siły docisku narzędzia od naddatku materiału przyjęto model rozmyty typu Mamdaniego, rozmytą implikację typu (MIN) oraz metodę wyostrzania typu (CA). Zaproponowany model rozmyty składa się z trzech sygnałów wejściowych  $x_1$ ,  $y_1$ ,  $N$  oraz z jednego sygnału na wyjściu (siły). Gdzie  $x_1$ ,  $y_1$  to współrzędne położenia punktów pomiarowych na powierzchni łopatki. Każdy sygnał wejściowy został podzielony na odpowiednią ilość zbiorów rozmytych. Założono równomierny podział przestrzeni rozważań przez zbiory rozmyte. Przyjęte zostały zbiory rozmyte w postaci zbiorów trójkątnych. Przestrzeń rozważań dla sygnału  $x_1$  podzielono na 10 zbiorów rozmytych od  $A_1$  do  $A_{10}$ . Dla sygnału  $y_1$  przyjęto 8 zbiorów rozmytych od  $B_1$  do  $B_8$ . Rozkład ten wynika z podziału łopatki na odpowiednie fragmenty. W przypadku sygnału  $N$  (usuwany materiał) przestrzeń podzielono na 60 zbiorów rozmytych w przedziale od 0 do 0.006. Wartości te związane są z ilością zbieranego naddatku przez narzędzie (zbiory od  $n_1$  do  $n_{60}$ ). Opisane wcześniej zbiory rozmyte przedstawiono na rysunku 4.15. Dla sygnału na wyjściu przyjęto 3 zbiory rozmyte. Są to zbiory trójkątne o środku 3, 5, 9 z przyjętą tolerancją 0.1mm.



Rys.8. Podział przestrzeni rozważań  $x_1$ ,  $y_1$ ,  $N$  przy sile docisku równej: a) 9[N], b) 5[N], c) 3[N]

W bloku rozmywania (rys.9) wprowadzone zostały ostre wartości  $x_1^*$ ,  $y_1^*$ ,  $N^*$ , gdzie następuje ich rozmywanie czyli obliczanie stopnia przynależności do poszczególnych zbiorów rozmytych  $A_i, B_j, N_k$ .



Rys.9. Blok fuzyfikacji modelu rozmytego zaproponowany w procesie obróbki łopatki

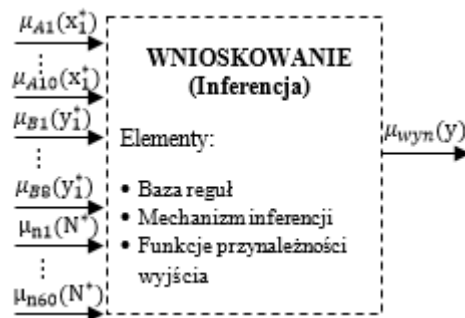
W przypadku zrealizowania rozmytego wnioskowania wymagane jest, aby dokonać oceny stopnia spełnienia poszczególnych reguł. Reguła nie zostanie zaktywizowana gdy stopień spełnienia przesłanki danej reguły będzie równy zero. Wiąże się to także z faktem, że reguła ta nie weźmie udziału w procesie wnioskowania. Im wyższy stopień spełnienia przesłanki, tym wyższa przynależność danej reguły. W zaproponowanym modelu rozmytym przesłanka składa się z trzech przesłanek prostych połączonych spójnikiem logicznym I np.

$$\text{If } (x_1 = A_1) \text{ and } (y_1 = B_2) \text{ and } (N = n_{20}) \quad (11)$$

to dla wartości sygnałów wejściowych  $x_1 = x_1^*$ ,  $y_1 = y_1^*$ ,  $N = N^*$  stopień jej prawdziwości oblicza się jako stopień przynależności do relacji R:

$$\mu_R(x_1^*, x_2^*, N^*) = \mu_{A_1 \cap B_2 \cap n_2} = (x_1^*, x_2^*, N^*) = T(\mu_{A_1}(x_1^*), \mu_{B_2}(x_2^*), \mu_{n_{20}}(N^*)) \quad (12)$$

W następnym etapie przeprowadzono wnioskowanie (rys.10) zaproponowanego modelu rozmytego.



Rys.10. Blok inferencji dla modelu rozmytego zaproponowany w procesie obróbki łopatki

Za pomocą wejściowych stopni przynależności  $\mu_{A_i}(x_1^*)$ ,  $\mu_{B_j}(x_2^*)$ ,  $\mu_{n_k}(N^*)$  obliczana jest wynikowa funkcja przynależności  $\mu_{wyn}(y)$  wyjścia modelu. W bloku tym określono bazę reguł. W tym przypadku składa się ona z 240 reguł. Związane jest to z tym iż łopatka posiada

80 punktów pomiarowych, a badania realizowane są z udziałem 3 sił. Utworzona baza reguł przedstawia się następująco:

*If  $x_1$  is  $A_1$  and  $y_1$  is  $B_1$  and  $N$  is  $n_1$  then Sila is 9[N]* (13)

Regułę interpretuje się następująco: jeżeli punkt pomiarowy jest określony zbiorem  $A_1$  oraz  $B_1$  i ilość zbieranego naddatku wynosi  $n_1$  wówczas siła docisku powinna wynosić 9[N]. Niewielki fragment bazy reguł przedstawia się następująco:

*If  $x_1$  is  $A_1$  and  $y_1$  is  $B_2$  and  $N$  is  $n_{56}$  then Sila is 9[N]*

*If  $x_1$  is  $A_1$  and  $y_1$  is  $B_3$  and  $N$  is  $n_{58}$  then Sila is 9[N]*

*If  $x_1$  is  $A_1$  and  $y_1$  is  $B_4$  and  $N$  is  $n_{53}$  then Sila is 9[N]*

*If  $x_1$  is  $A_1$  and  $y_1$  is  $B_5$  and  $N$  is  $n_{46}$  then Sila is 9[N]*

*If  $x_1$  is  $A_1$  and  $y_1$  is  $B_6$  and  $N$  is  $n_{36}$  then Sila is 9[N]*

*If  $x_1$  is  $A_1$  and  $y_1$  is  $B_7$  and  $N$  is  $n_{27}$  then Sila is 9[N]*

*If  $x_1$  is  $A_1$  and  $y_1$  is  $B_8$  and  $N$  is  $n_{10}$  then Sila is 9[N]*

*If  $x_1$  is  $A_2$  and  $y_1$  is  $B_1$  and  $N$  is  $n_{51}$  then Sila is 9[N]*

*If  $x_1$  is  $A_2$  and  $y_1$  is  $B_2$  and  $N$  is  $n_{48}$  then Sila is 9[N]*

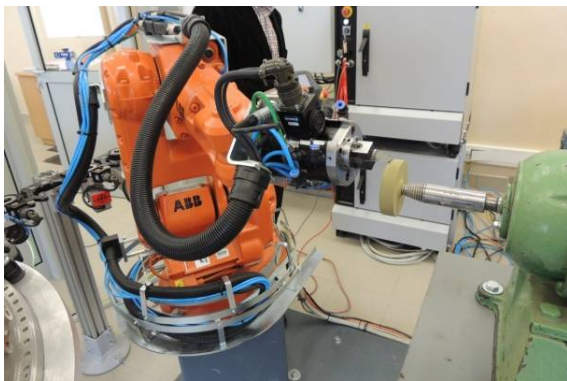
*If  $x_1$  is  $A_2$  and  $y_1$  is  $B_3$  and  $N$  is  $n_{42}$  then Sila is 9[N]*

⋮

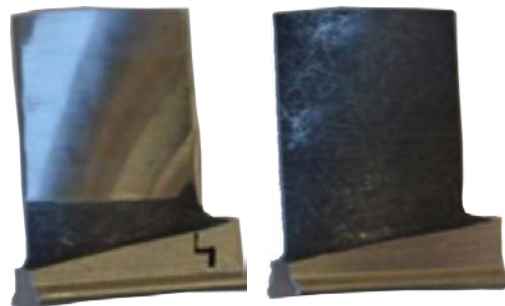
*If  $x_1$  is  $A_{10}$  and  $y_1$  is  $B_8$  and  $N$  is  $n_{16}$  then Sila is 9[N]*

Prace badawcze dotyczyły szlifowania powierzchni grzbietu łopaty. Na rysunku 11a pokazano zrobotyzowane stanowisko obróbcze. Widok łopaty przed szlifowaniem i po szlifowaniu zawarto na rysunku 11b.

a)



b)

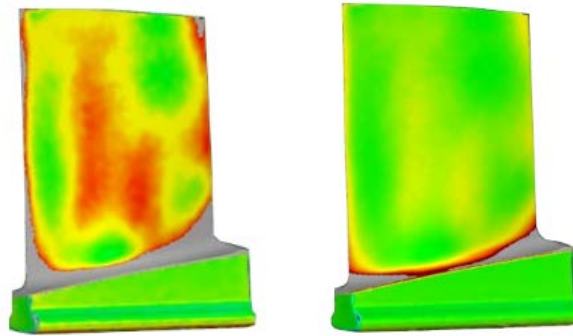


Rys.11. a) Zrobotyzowana stacja szlifowania, b) widok łopaty po i przed procesem szlifowania

Z kolei raport pomiarowy przed i po operacji szlifowania zawarto na rysunkach 12a i 12b.

a)

b)



Rys.12 Raport z pomiarów a) przed szlifowaniem, b) po szlifowaniu

Inteligentne sterowniki oparte o sieć neuronową oraz logikę rozmytą generują wartości sił docisku narzędzia w zależności od wartości występującego naddatku materiału, który pojawia się na skutek procesu technologicznego wytwarzania łopatki. Wykorzystanie własności uogólniających sztucznych sieci neuronowych oraz czytelna reprezentacja wiedzy układów z logiką rozmytą pozwoliły na wygenerowanie informacji pozwalającej na przyjęcie wartości siły kontaktu detal - narzędzie w taki sposób, aby zapewnić proces szlifowania z narzuconymi wymaganiami.

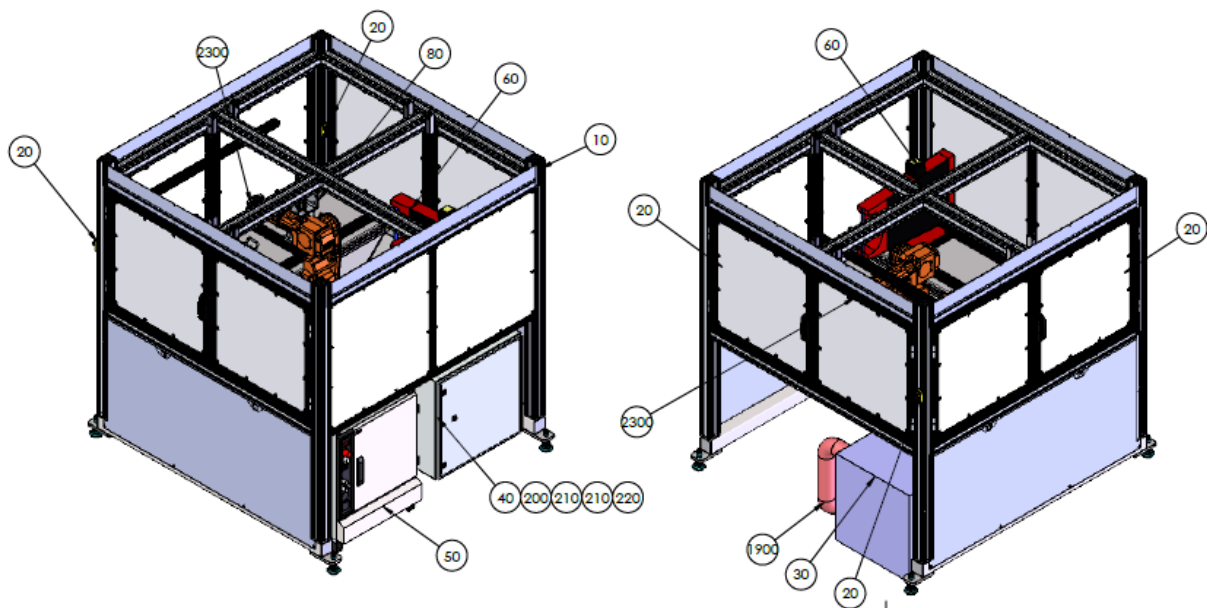
Zwieńczeniem prac badawczych była propozycja jako zadania dotyczącego obróbki łopatki prac zgłaszanych w ramach grantu 3 konsorcjantów Ultratech sp. z o.o., ResEco sp. z o.o., 3D Robot sp. z o.o. **Grant NCBiR „INNOLOT2” POIR.01.02.00-00-0016/15-01, pt. „Zaawansowane technologie wytwarzania łopatek turbin metodami obróbki skrawaniem, zautomatyzowanym polerowaniem oraz drukowaniem 3D”**. Jako kierownik i jedyny wykonawca zadań z ramienia Politechniki Rzeszowskiej w ramach grantu realizowałam 7 prac zleconych na rzecz 3DRobot.

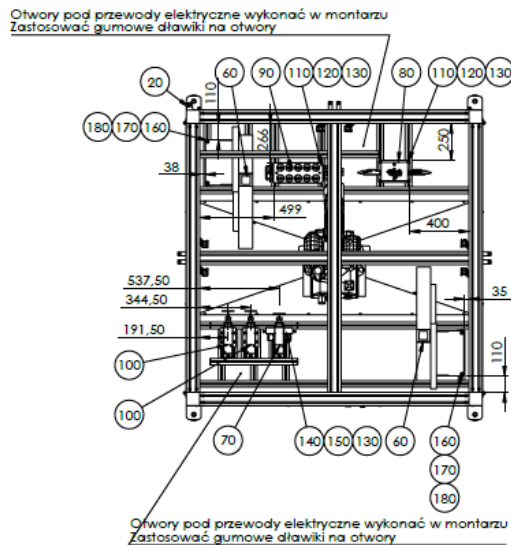
- NR-651-492-U-18393/18, RM-U-17377 3D Robot Sp. z o.o. Wykonanie testów trzech wersji oprogramowania w języku RAPID na stacji zrobotyzowanej z systemem kontroli siły wraz z dokumentacją wyników pracy w postaci pisemnego raportu
- NR-651-492-U-18393/18, RM-U-18269, 3D Robot Sp. z o.o. Testy dokładności układu polerowania łopatek
- NR-651-492-U-18393/18, RM-U-18393, 3D Robot Sp. z o.o. Testy ukierunkowane na określenie suboptymalnych parametrów pracy dla szlifowania grzbietu i koryta łopatki narzędziami wytypowanymi w poprzednim zadaniu
- NR-651-389-U-19332/19, RM-U-19332, 3D Robot Sp. z o.o. Prace projektowe konstrukcji nośnej zrobotyzowanej oraz dobór i testy narzędzi do szlifowania krawędzi spływu i krawędzi natarcia łopatki

- NR-651-492-U-18393/18, RM-U-19206, 3D Robot Sp. z o.o. Testy obróbki zrobotyzowanej z wykorzystaniem szlifierki pasowej, oprogramowania komunikacji robot czujnik Keyence.
- NR-651-482-U-19410/19, RM-U-19410, 3D Robot Sp. z o.o., Wykonanie testów określających suboptymalne parametry pracy dla szlifowania grzbietu i koryta łopatki narzędziami przekazanymi przez zleceniodawcę.
- NR-651-93-U-20084-20, RM-U-20084, 3D Robot Sp. z o.o., Wykonanie projektu autorskiego wraz z dokumentacją techniczną stacji zrobotyzowanej

### *Zrobotyzowana stacja pomiarów oraz szlifowania łopatek silników odrzutowych*

W ostatnim wymienionym zadaniu wykonano wirtualny model oraz kompletny projekt z dokumentacją wykonawczą stacji obróbki łopatek. Co stanowi moje osiągnięcie konstrukcyjne (dokumentacja rysunków w załączniku nr. 8). Zrobotyzowana stacja pomiarów oraz szlifowania łopatek silników odrzutowych została zrealizowana w ramach projektu „**INNOLOT2**” POIR.01.02.00-00-0016/15-01, pt. „*Zaawansowane technologie wytwarzania łopatek turbin metodami obróbki skrawaniem, zautomatyzowanym polerowaniem oraz drukowaniem 3D*”. Zaprojektowana stacja zrobotyzowana zawiera manipulator przemysłowy ABB IRB 140 wyposażony w chwytak do pobierania detali, magazyn detali, urządzenie do pomiaru geometrii łopatek z wykorzystaniem sond stykowych, elementy do szlifowania łopatek (szlifierki pasowe, trzy elektrowrzeciona w tym jednego na kompensatorze).





Rys.13. Wybrane rysunki autorskiego projektu stacji zrobotyzowanej

Stacja przeznaczona jest do operacji szlifowania grzbietu, koryta oraz krawędzi spływu i natarcia łopatki sprężarki silnika lotniczego. W pierwszym kroku łopatka pobierana jest z magazynu, mierzona z wykorzystaniem czujników stykowych, na podstawie analizy zmierzonych naddatków dobierany jest czas obróbki. Następnie z wykorzystaniem narzędzi podatnych, pasów szlifierskich i tarcz wykonywane jest szlifowanie. Cykl kończy ponowny pomiar geometrii łopatki. System decyzyjny dokonuje analizy poprawności procesu i decyduje czy ponowić operację szlifowania już z krótszym odpowiednio dobranym czasem, czy detal zakwalifikowany jest jako poprawny. **Opracowane rozwiązanie zrobotyzowanej obróbki łopatek oraz stacje wdrożono w Ultratech. sp. z o.o.**

Za moje najważniejsze osiągnięcia naukowe uważam:

- **Opracowanie inteligentnego regulatora neuronowo-rozmytego w zadaniu nadążania mobilnego robota kołowego w obecności zmiennych warunków pracy.** Zaproponowano dwa algorytmy sterowania neuronowo - rozmytego dotyczące adaptacji parametrów konkluzji bazy reguł układu rozmytego kompensującego nieliniowości robota oraz sterowanie neuronowo - rozmyte, w którym przeprowadza się adaptację parametrów konkluzji i przesłanek bazy reguł. Wykazano stabilność zaproponowanych algorytmów, ponadto, zaproponowane algorytmy sterowania pracują on-line, bez znajomości modelu sterowanego obiektu, nie wymagają wstępnego uczenia parametrów. Inteligentny regulator został zweryfikowany na obiekcie rzeczywistym.
- **Opracowanie algorytmów neuronowo – rozmytych w sterowaniu robotem przemysłowym.** Były one odpowiedzialne za ruch nadążny robota manipulacyjnego, który polegał

na śledzeniu trajektorii zadanej. Rozważono dwa warianty sterowania. Wykazano stabilność układu stosując teorię stabilności Lapunowa, wyprowadzono dowód stabilności algorytmu neuronowo – rozmytego. Wykonano obszerne badania symulacyjne oraz zweryfikowano omawiane sterowania na obiekcie rzeczywistym.

- **Neuronowy sterownik procesu szlifowania łopatek.** Ma on duże znaczenie z punktu widzenia płynnej realizacji procesu obróbki mechanicznej. Dodatkowo powoduje to, że system sterowania procesem jest mniej wrażliwy na mogące wystąpić błędy pomiarowe. Proponowany inteligentny sterownik został zweryfikowany.
- **Opracowanie metody doboru parametrów w procesie obróbki łopatki realizowanej z wykorzystaniem rozwiązania bazującego na układach z logiką rozmytą.** Poprawność proponowanych rozwiązań została potwierdzona rzeczywistym eksperymentem.
- **Kompletny projekt z dokumentacją wykonawczą zrobotyzowanej stacji obróbki łopatek.** Stacja została wykonana, oprogramowana oraz wdrożona w Ultratech. sp. z o.o.

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

###### **„Kształcenie dualne w kontekście wyzwań Przemysłu 4.0”**

01.03.2020 do 28.02.2022 byłam jednym z głównych wykonawców projektu pt. „Kształcenie dualne w kontekście wyzwań Przemysłu 4.0”, finansowanego z Funduszy Norweskich, Mechanizmu Finansowego EOG Komponent III PROGRAM EDUKACJA nr dokumentu: EOG/19/K3/W/0037.

Liderem projektu była Wszechnica Uniwersytetu Jagiellońskiego (WUJ), partnerem, International Development Norway (IDN) oraz Pratt&Whitney Rzeszów S. A. (PWR). Projekt zakładał promocję sektora VET poprzez opracowanie, a następnie upowszechnienie oferty szkoleniowej dotyczącej wyzwań wynikających ze zmian technologicznych Przemysłu 4.0. W ramach projektu na Politechnice Rzeszowskiej powstały produkty w postaci wirtualnych szkoleń z zakresu serwisowania stacji zrobotyzowanych. Uczestniczyłam również w wizytach studyjnych.

- **wizyta w Trontheim**



Wizyta dotyczyła poprawy wskazanych niedogodności w opracowanym produkcie, dyskusji i wyciągnięciu wniosków z badań produktów podczas wdrożeń w kontekście nabycia wiedzy i umiejętności przez kursantów.

- **wizyta w Krakowie** (organizator WUJ),

Podczas tej wizyty organizowanej przez WUJ opracowano mechanizmy monitorowania skuteczności proponowanych produktów dla firm krajowych i przedsiębiorców norweskich.

- **wizyta w Rzeszowie** (organizator PRz)

Ta wizyta pozwoliła na zapoznanie się z produktami w postaci szkoleń, możliwościami ich wdrażania i implementacji. Powstały produkt w postaci szkoleń VR w ramach projektu nr EOG/19/K3/W/0037 ma niewątpliwie charakter aplikacyjny, co potwierdzono wdrożeniami krajowymi i zagranicznymi. Szkolenia te zostały włączone do oferty partnerów oraz są dostępne jako OZE.

#### **JANUS: e-Pedagogy and Virtual Reality Based Robotic Blended Education. Nr umowy 2020-1-PL01-KA226-HE-095371**

01.03.2021 – 28.02.2023 projekt JANUS realizowany z partnerami: University of Turku (Finlandia) , University of Ioannina (Grecja), Politecnico di Torino (Włochy), SynArea Consultants s.r.l. (Włochy), Vilnius University (Litwa). W ramach projektu promowano nowe technologie i metody w środowisku edukacyjnym i akademickim. Zastosowano elementy wirtualnej rzeczywistości (VR), w środowisku Blended Learning, ze szczególnym uwzględnieniem obszaru edukacji STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics). W projekcie tym pełniłam rolę wykonawcy.

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

##### **Osiągnięcia dydaktyczne**

- **Koordynator Wydziałowy projektu „Inżynieria mechaniczna dla przemysłu lotniczego – realizacja studiów II stopnia** na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki rzeszowskiej”, Nr umowy: POWR.03.01.00-00-DU64/18-00. Projekt współfinansowany przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego w ramach Programu Operacyjnego Wiedza Edukacja Rozwój. (2018-2021). Podczas tworzenia kierunku opracowanie treści kształcenia, programu studiów oraz kierunkowych oraz modułowych efektów kształcenia. Do moich czynności na stanowisku należała: Współpraca z Kierow-

nikiem Projektu oraz wszystkimi osobami zaangażowanymi w realizację projektu w zakresie prawidłowej realizacji Projektu, udział w Komisji Rekrutacyjnej, zbieranie i przetwarzanie danych, bieżące monitorowanie liczby studentów, nadzór nad szkoleniami i kursami, nadzór i realizacja działań promocyjnych, sporządzanie sprawozdań, archiwizacja dokumentacji Projektu. Po zakończeniu projektu opracowanie materiałów na potrzeby kontroli.

- **Byłam promotorem pomocniczym w dwóch rozprawach doktorskich**

**Promotor pomocniczy rozprawy doktorskiej mgr. inż. Grzegorza Bomby**, w dziedzinie nauk inżynieryjno - technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, nt.: „System ekspercki oparty o wnioskowanie rozmyte wspierający produkcje kadłubów ADT silnika PW1000G z użyciem centr obróbczych CNC”, praca została obroniona 21.06.2023

Uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Nr 09/12/2021

**Promotor pomocniczy rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marka Uliasa**, w dziedzinie nauk inżynieryjno - technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna, nt.: „Opracowanie metodyki oceny stanu zrobotyzowanych stanowisk i ich zdolności do realizacji procesów technologicznych, przy uwzględnieniu urządzeń i czynników mających na nie wpływ”, praca została obroniona 28.06.2023.

Uchwała Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Nr 18/03/2022

- Prowadzę zajęcia na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej zarówno ze studentami studiów pierwszego i drugiego stopnia. W latach 2005-2023 prowadziłam zajęcia z takich przedmiotów jak: mechanika ogólna, mechanika analityczna, diagnostyka urządzeń mechatronicznych, obliczeniowe systemy informatyczne, mechatronika, teoria sterowania oraz metody sztucznej inteligencji.
- W trakcie mojej pracy na Politechnice Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza byłam promotorem **69** prac, w tym: **31** prac inżynierskich, **38** prac magisterskich. Ponadto, recenzowałam **29** prac oraz brałam udział w **69** komisjach egzaminów dyplomowych.
- Współpraca z firmą **Sturm Polska Sp. z o. o** (biuro konstrukcyjne) w ramach prowadzonych prac magisterskich, inżynierskich, staży oraz prowadzonych projektów inżynierskich. Organizowanie wykładów oraz zajęć praktycznych na Uczelni z udziałem pracowników tej firmy.

### **Osiągnięcia organizacyjne**

- Członek Wydziałowej Komisji ds. Zapewnienia Jakości Kształcenia w latach (2013 – 2023)
- Opiekun studentów pierwszego roku na kierunku Mechatronika w roku akademickim 2021/2022, 2022/2023
- Członek Rady Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa (2022 - obecnie)
- Członek Zespołu zadaniowego ds. przeglądu i oceny programów studiów na kierunku Mechatronika (2020 - obecnie)
- Członek Zespołu ds. weryfikacji osiągania efektów kształcenia na kierunku Mechatronika (2014 - obecnie)
- Członek Wydziałowej Komisji Rekrutacyjnej (2006 - 2016)

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

### **Nagrody krajowe:**

- Nagroda naukowa zespołowa I stopnia Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza za cykl publikacji dotyczących robotyzacji procesów przemysłowych, 20 listopada 2018 r.
- Nagroda zespołowa III stopnia Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza za cykl publikacji dotyczących nowoczesnej i aktualnej tematyki robotyki przemysłowej, 30 listopada 2017 r.
- Nagroda Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza za uzyskanie stopnia doktora nauk technicznych w dyscyplinie mechanika, 19 grudnia 2015 r.

### **Szkolenia**

EC Test Systems Sp. z o.o. Szkolenie „Diagnostyka układów mechatronicznych”, Rzeszów Polska. Marzec 2017 r.

### **Certyfikaty:**

- Certyfikat wydany przez EC Test Systems Sp. z o.o. zaświadcza o ukończeniu szkolenia „Diagnostyka układów mechatronicznych”.

.....  
(podpis wnioskodawcy)