

RECENZJA

osiągnięcia naukowego przedstawionego przez dra inż. Krzysztofa Wiktorowicza,
pt. „*Wybrane metody uczenia systemów rozmytych*”
oraz ocena aktywności naukowej w związku z wnioskiem o przeprowadzenie postępowania
habilitacyjnego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie informatyka
techniczna i teleinformatyka.

Przedmiotem recenzji jest osiągnięcie naukowe pt.: „*Wybrane metody uczenia systemów rozmytych*”, które Kandydat udokumentował zbiorem następujących sześciu publikacji w czasopismach JCR:

- [1]. Wiktorowicz, K., Output Feedback Direct Adaptive Fuzzy Controller Based on Frequency-Domain Methods, **IEEE TRANSACTIONS ON FUZZY SYSTEMS**, vol. 24, no. 3, pp. 622-634, 2016; (IF=7.671),
- [2]. Wiktorowicz, K., Design of State Feedback Adaptive Fuzzy Controllers for Second-Order Systems Using a Frequency Stability Criterion, **IEEE TRANSACTIONS ON FUZZY SYSTEMS**, Vol. 25, No. 3, pp. 499-510, 2017; (IF=8.415),
- [3]. Wiktorowicz, K., Krzeszowski, T., Training High-Order Takagi-Sugeno Fuzzy Systems Using Batch Least Squares and Particle Swarm Optimization, **INTERNATIONAL JOURNAL OF FUZZY SYSTEMS**, vol. 22, No. 1, pp. 22-34, 2020; (IF=4.406, 60% udział Kandydata),
- [4]. Wiktorowicz, K., Krzeszowski, T., Przednowek, K., Sparse regressions and particle swarm optimization in training high-order Takagi-Sugeno fuzzy systems, **NEURAL COMPUTING & APPLICATIONS**, Doi: 10.1007/s00521-020-05133-w, 2020; (IF=4.774, 55% udział Kandydata),
- [5]. Wiktorowicz, K., Krzeszowski, T., Approximation of two-variable functions using high-order Takagi-Sugeno fuzzy systems, sparse regressions, and metaheuristic optimization, **SOFT COMPUTING**, Vol.24, No. 20, pp.15113-15127, 2020; (IF=3.050, 50% udział Kandydata),

[6]. Przednowek, K., Wiktorowicz, K., Krzeszowski, T., Iskra, J., A web-oriented expert system for planning hurdles race training programmes, **NEURAL COMPUTING & APPLICATIONS**, Vol. 31, No. 11, pp. 7227-7243, 2019; (IF=4.774, 30% udział Kandydata),

a także aktywność naukowa Kandydata, oceniana w związku z Jego przewodem habilitacyjnym, prowadzonym przed Radą Naukową Instytutu Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk. Recenzja wykonywana jest na podstawie zlecenia z dnia 17 września 2021 r. Przewodniczącego Rady Naukowej Instytutu Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk (pismo BA3-0005-3/21LP), realizującego decyzję Rady Doskonałości Naukowej z dnia 1 marca 2021 r.

I. Podstawowe dane o Kandydacie

Dr inż. Krzysztof Wiktorowicz tytuł zawodowy magistra inżyniera uzyskał na kierunku *Elektrotechniki*, specjalność *Automatyka i Metrologia* w Wydziale *Elektrotechniki*, Politechniki Rzeszowskiej, w 1993 roku. Stopień naukowy doktora nauk technicznych w dyscyplinie Informatyka, uzyskał w *Instytucie Cybernetyki Technicznej*, Politechniki Wrocławskiej, na podstawie rozprawy pt.: „*Jakość regulacji rozmytej*” w 2001 r. Promotorem rozprawy, która uzyskała wyróżnienie, był prof. dr hab. inż. Jacek Kluska.

Kandydat w latach 1993-2019 pracował na stanowisku asystenta, a następnie adiunkta w Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej. Od 2019 r. jest zatrudniony na stanowisku profesora uczelni w Politechnice Rzeszowskiej.

II. Ocena osiągnięcia naukowego, pt.: „Wybrane metody uczenia systemów rozmytych”.

Tematyka prac wchodzących w skład przedstawionego przez Kandydata osiągnięcia naukowego dotyczy wprowadzenia nowych metod uczenia rozmytych systemów regulowych stosowanych jako regulatory rozmyte, a w szczególności specjalizowanych metod uczenia systemów rozmytych pracujących w trybie *on-line* pracujących ze sprzężeniem zwrotnym oraz w trybie *off-line* aproksymując zależność wyjście-wejście na podstawie przykładów, tzw. danych uczących.

Na zgłoszone osiągnięcie składa się sześć prac opublikowanych w czasopismach z tzw. listy filadelfijskiej: *IEEE Trans. On Fuzzy Systems*, *International Journal of Fuzzy Systems*, *Neural Computing and Applications* oraz *Soft Computing*. Czynnikiem wpływu (ang. Impact Factor, IF) tych czasopism waha się od 3.050 do 8.415, a sumarycznie wynosi 33.09, czyli średnio ponad 5.5 na artykuł, co w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja jest wynikiem bardzo dobrym. Według najnowszej listy Ministerstwa powyższe prace posiadają sumaryczną punktację równą 740. Każda praca z osiągnięcia posiada wyraźnie określony ilościowy i jakościowy udział Kandydata. Należy podkreślić, że prace opublikowane w najwyższej

punktowanym i oczywiście najważniejszym czasopiśmie dotyczącym tematyki zbiorów i systemów rozmytych, tj. *IEEE Trans. on Fuzzy Systems* są jednoautorskie.

Opiniowane zgłoszenie osiągnięcia naukowego, jak wskazuje jego tytuł, dotyczy nowych metod uczenia systemów rozmytych stosowanych jako regulatory rozmyte. W pracach rozważa się uczenie w trybach nadążnym i nie nadążnym. Skoncentrowano się na zastosowaniu systemu rozmytego Takagi-Sugeno-Kanga (w literaturze nazywanego także Takagi-Sugeno bądź Sugeno), uwzględniając systemy o jedno bądź wielowymiarowym wejściu i jednym wyjściu. W pracach przedstawiono nowe metody uczenia wspomnianych systemów dotyczące przesłanek i konkluzji reguł warunkowych, a także liczby tych reguł.

Od lat autorzy pochodzący z czołowych ośrodków światowych zajmujących się modelowaniem matematycznym proponują metody wyodrębniania łatwo interpretowalnych dla człowieka rozmytych reguł warunkowych tworzących bazę wiedzy systemu rozmytego, aproksymującego modelowaną rzeczywistość, minimalizując zadany wskaźnik jakości. Takie systemy rozmyte mogą być stosowane np. jako klasyfikatory danych, korektory charakterystyki kanału telekomunikacyjnego czy regulatory. Właśnie uczeniem systemów rozmytych stosowanych jako regulatory zajęto się w opiniowanym osiągnięciu. Pojawiające się w literaturze przedmiotu nowe metody uczenia systemów rozmytych świadczą o wciąż niedostatecznym rozwiązaniu tego problemu. Autor przedstawionego osiągnięcia bierze aktywny udział we współtworzeniu takich rozwiązań dokumentując wyniki swoich badań naukowych w tym zakresie w czołowych światowych czasopismach naukowych z tej dziedziny. Powyższe świadczy o doskonałym doborze tematyki badawczej przez Kandydata. Zaproponowane w ramach osiągnięcia metody przyczyniają się do zwiększenia możliwości zastosowania uczenia maszynowego do projektowania regulatorów rozmytych o łatwo interpretowalnej dla człowieka bazie wiedzy. Jednocześnie należy podkreślić, że osiągnięcia Autora mogą być łatwo przeniesione do innych ważnych zastosowań systemów rozmytych.

W pracy [1] Kandydat wprowadza po raz pierwszy w literaturze przedmiotu zastosowanie metod częstotliwościowych do uczenia rozmytych regulatorów ze sprzężeniem od wyjścia obiektu. Badanie takich regulatorów jest przeprowadzane za pomocą kryteriów stabilności absolutnej. Zastosowanie metod częstotliwościowych powoduje możliwość zastosowania do obiektów opisanych niewymierną transmitancją oraz zastosowanie systemu rozmytego powoduje łatwą interpretowalność dla inżyniera procesu. W przesłankach reguł warunkowych zastosowano zbiory rozmyte o trójkątnych funkcjach przynależności. Zmianę konkluzji reguł rozmytych uzyskano dla kwadratowej funkcji kosztu stosując metodę gradientową. Przedstawiono procedurę projektowania uczącego się regulatora rozmytego dla układu z niestabilnym obiektem z nieznanym biegunem transmitancji w lewej półpłaszczyźnie zmiennej zespolonej. Zaprezentowano eksperyment numeryczny dla sinusoidalnego sygnału

wymuszenia dowodzący, że w trakcie uczenia system rozmyty pozostaje w bezpiecznym ze względu na stabilność układu sektorze. Powyższa tematyka została udokumentowana jednoautorską pracą w czasopiśmie z listy JCR, o czynniku wpływu 7.671.

W pracy [2] zaproponowano metodę uczenia systemu rozmytego pracującego jako regulator ze sprzężeniem od stanu obiektu. Zastosowano system rozmyty o dwóch wejściach pochodzących od stanu oraz przesłankach reguł ze zbiorami rozmytymi o trójkątnych funkcjach przynależności, iloczynem algebraicznym jako t-normą w przesłankach reguł oraz konkluzjami reguł zmienianymi za pomocą metody gradientowej, tak aby były spełnione warunki stabilności w pętli zamkniętej. Sformułowano warunki wymuszające, aby charakterystyka wyjście-wejście regulatora rozmytego spełniała warunek wielowymiarowego sektora. Przedstawiono procedurę projektowania uczącego się regulatora rozmytego dla układu z niestabilnym obiektem z nieznanym biegunem transmitancji w prawej półpłaszczyźnie zmiennej zespolonej. Zaprezentowano eksperyment numeryczny dla sinusoidalnego sygnału wymuszenia dowodzący, że w trakcie uczenia system rozmyty pozostaje w bezpiecznym ze względu na stabilność układu sektorze. Powyższa tematyka została udokumentowana jednoautorską pracą w czasopiśmie z listy JCR, o czynniku wpływu 8.415.

Druga grupa prac Kandydata dotyczy metod uczenia regulatorów rozmytych nie działających w trybie nadążnym. W tym przypadku system rozmyty jest dobierany na podstawie zbioru uczącego, składającego się z zbioru uporządkowanych par wejście/wejście-wyjście modelowanego obiektu. Uczenie w przypadku systemu opartego na zbiorze rozmytych reguł warunkowych polega na identyfikacji struktury modelu, tj. liczby reguł oraz na estymacji parametrów zbiorów rozmytych w przesłankach i funkcji w konkluzji reguł. W pracy [3] zaproponowano zastosowanie w tym celu metody hybrydowej, gdzie wartości parametrów funkcji w konkluzjach reguł uzyskiwane są za pomocą regularyzowanej metody najmniejszych kwadratów, natomiast wartości parametrów funkcji przynależności zbiorów rozmytych w przesłankach reguł estymowane są za pomocą optymalizacji rojem cząstek wirtualnych. Zastosowano zarówno trójkątne jak i gaussowskie funkcje przynależności. Funkcje w konkluzjach reguł, które zazwyczaj są wybierane jako liniowe, w tym przypadku były wielomianami wyższego rzędu. Stąd aby ustrzec się zjawiska tzw. przeuczenia systemu zastosowano, zgodnie z teoretyczną teorią uczenia prof. Vapnika, kontrolę nad złożonością modelu, za pomocą dołączenia do minimalizowanego kryterium normy kwadratowej wektora parametrów, co sprowadza się w przypadku metody najmniejszych kwadratów do jej regularyzowanej wersji. Liczbę reguł oraz wartość parametru regularyzacyjnego dobierano stosując metodę walidacji wzajemnej (zwaną metodą rotacji). Dla małej liczebności zbioru uczącego metoda zastępowana jest podejściem „odrzuć jeden”. Zastosowanie tej metody pozwala uzyskać maksymalizację zdolności uogólniania uczonego systemu. W części

eksperymentalnej artykule wykazano konkurencyjność proponowanego podejścia do wielu metodologii uczenia systemów rozmytych znanych z literatury. Tematyka została udokumentowana artykułem z JCR o czynniku wpływu 4.406. Udział procentowy Kandydata w tej pracy wynosi 60%.

W pracy [4] zaproponowano dalsze ulepszenie proponowanych przez Kandydata metod uczenia systemów rozmytych polegające na zastosowaniu do estymacji parametrów wielomianów w konkluzjach reguł metod estymacji rzadkiej, tj. takich, które prowadzą do jedynie pewnej liczby parametrów różnych od zera. Podejście takie powoduje uzyskanie czytelnych modeli z małą liczbą reguł, co przyczynia się także do zwiększenia ich zdolności uogólniania. Jako metody estymacji rzadkiej zastosowano, m.in. algorytm najmniejszych kątów, metody LASSO oraz regresję elastyczną siecią. Minimalizowany wskaźnik jakości uwzględniał zarówno błędy modelu jak i jego skomplikowanie. Dzięki temu możliwe było uzyskanie kompromisu pomiędzy skomplikowaniem modelu, a jego dokładnością. Tematyka została udokumentowana artykułem z JCR o czynniku wpływu 4.774. Udział procentowy Kandydata w tej pracy wynosi 55%.

W następnej pracy [5], poprzednio przedstawiona metoda uczenia systemów rozmytych, została rozszerzona na przypadek złożonych przesłanek reguł warunkowych. Dodatkowo estymacja parametrów funkcji przynależności zbiorów w przesłankach reguł była przeprowadzana za pomocą algorytmu genetycznego, symulowanego wyżarzania oraz tak jak poprzednio za pomocą optymalizacji rojem cząstek wirtualnych. W eksperymentach numerycznych stosowano wskaźnik jakości oceniający stosunek błędu średniokwadratowego metody w stosunku do zastosowania tradycyjnej metody najmniejszych kwadratów oraz składnik oceniający gęstość uzyskanego rozwiązania (przeciwieństwo jego rzadkości). Tematyka została udokumentowana artykułem z JCR o czynniku wpływu 3.05. Udział procentowy Kandydata w tej pracy wynosi 50%.

W pracy [6] zastosowano uczenie systemu rozmytego do wspomagania treningu dla biegaczy przez płotki. Stosowano dwa podejścia, tj. niezależnego systemu rozmytego oraz systemu rozmytego jako korektora modelu liniowego. Budowano modele matematyczne o wielu wejściach i wielu wyjściach. W eksperymentach numerycznych porównano połączenie metod regresji liniowej: tradycyjnej metody najmniejszych kwadratów, jej wersji regularyzowanej, metody LASSO oraz elastycznej sieci, z modelami nieliniowymi: siecią o radialnych funkcjach bazowych oraz systemami rozmytymi. Całość oprogramowania jest dostępna jako aplikacja sieciowa (co może być rozumiane jako osiągnięcie konstrukcyjne/projektowe). Tematyka została udokumentowana artykułem z JCR o czynniku wpływu 4.774. Udział procentowy Kandydata w tej pracy wynosi 30%.

Do oryginalnych elementów przedstawionych w ramach ocenianego *osiągnięcia*

naukowego, a tym samym wkład Kandydata w rozwój dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja, należy zaliczyć:

- ◆ Wprowadzenie po raz pierwszy w literaturze przedmiotu zastosowania metod częstotliwościowych do uczenia rozmytych regulatorów typu Takagi-Sugeno-Kanga ze sprzężeniem od wyjścia obiektu.
- ◆ Zaproponowanie metody uczenia systemu rozmytego Takagi-Sugeno-Kanga pracującego jako regulator ze sprzężeniem od stanu obiektu. Zastosowanie systemu rozmytego o dwóch wejściach pochodzących od stanu oraz przesłankach reguł ze zbiorami rozmytymi o trójkątnych funkcjach przynależności, iloczynem algebraicznym jako t-normą w przesłankach reguł oraz konkluzjami reguł zmienianymi za pomocą metody gradientowej, tak aby były spełnione warunki stabilności w pętli zamkniętej.
- ◆ Wprowadzenie do uczenia regulatorów rozmytych metody hybrydowej, gdzie wartości parametrów funkcji (wielomianów wysokiego rzędu) w konkluzjach reguł uzyskiwane są za pomocą regularyzowanej metody najmniejszych kwadratów, natomiast wartości parametrów funkcji przynależności zbiorów rozmytych w przesłankach reguł (trójkątnych lub gaussowskich) estymowane są za pomocą optymalizacji rojem cząstek wirtualnych.
- ◆ Zaproponowanie zastosowania do estymacji parametrów wielomianów w konkluzjach reguł metod estymacji rzadkiej. Podejście takie powoduje uzyskanie czytelnych modeli z małą liczbą reguł, co przyczynia się do zwiększenia ich zdolności uogólniania. Jako metody estymacji rzadkiej zastosowano, m.in. algorytm najmniejszych kątów, metodę LASSO oraz regresję elastyczną siecią. Zastosowano minimalizowany wskaźnik jakości uwzględniający zarówno błędy modelu jak i jego skomplikowanie.
- ◆ Wprowadzenie metody uczenia systemów rozmytych w przypadku złożonych przesłanek reguł warunkowych. Estymacja parametrów funkcji przynależności zbiorów w przesłankach reguł była przeprowadzana za pomocą algorytmu genetycznego, symulowanego wyżarzania oraz za pomocą optymalizacji rojem cząstek wirtualnych.
- ◆ Zaproponowanie metody uczenia systemu rozmytego do wspomagania treningu dla biegaczy przez płotki. Wprowadzono dwa podejścia, tj. niezależnego systemu rozmytego oraz systemu rozmytego jako korektora modelu liniowego. Budowano modele matematyczne o wielu wejściach i wielu wyjściach.

Całość przedstawionego w *osiągnięciu* materiału może być oceniana zarówno jako rozwiązanie konkretnych problemów zaawansowanych metod uczenia systemów rozmytych stosowanych jako regulatory rozmyte, jak też w kategoriach studium prezentującego podsumowanie oryginalnego wkładu Kandydata do dyscypliny informatyka techniczna i telekomunikacja. Moim zdaniem w obu wymienionych aspektach *osiągnięcie* zasługuje na pozytywną ocenę, co potwierdza publikowanie wyników prac naukowych Kandydata w czołowych światowych czasopismach z tego zakresu.

Oceniając przedstawione *osiągnięcie naukowe* całościowo, stwierdzam, że zawiera ono sformułowanie i rozwiązanie istotnych problemów, które wynikają z potrzeb teorii i praktyki nowoczesnych systemów regulacji stosujących podejście regulowe.

Biorąc pod uwagę przytoczone argumenty uważam, że opiniowane *osiągnięcie naukowe* spełnia kryteria i wymagania przewidziane w ustawie „Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” oraz ustawie „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” i wnioskuję o pozytywne przyjęcie *osiągnięcia*, jako podstawy do ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego.

III. Ocena istotnej aktywności naukowej Kandydata

Działalność naukowa dra inż. Krzysztofa Wiktorowicza jest związana z dyscypliną naukową informatyka techniczna i telekomunikacja. Dorobek publikacyjny Kandydata po uzyskaniu stopnia naukowego doktora obejmuje (wyluczając prace przedstawione w *osiągnięciu*):

- 3 artykuły w czasopismach naukowych umieszczonych na tzw. liście filadelfijskiej,
- 10 prac w innych czasopismach, oraz
- 14 prac opublikowanych w materiałach konferencyjnych (w tym indeksowanych przez Filadelfijski Instytut Informacji Naukowej).

Analizując dorobek naukowy dra Krzysztofa Wiktorowicza od strony jakościowej należy stwierdzić, że obejmuje on trzy prace w czasopismach z tzw. listy filadelfijskiej: *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering* (IF=1.909), *Journal of Human Kinetics* (IF=1.174) oraz *Computational Intelligence and Neuroscience* (IF=0.430), rozdziały w monografiach zagranicznych i krajowych (takich, jak: *Advances in Intelligent Systems and Computing, Congress on Sport Science Research and Technology Support*), artykuły w innych czasopismach zagranicznych i krajowych (takich, jak: *Central European Journal of Sport Science and Medicine, Pomiary, Automatyka, Kontrola, Journal of Theoretical and Applied Computer Science*) oraz prace publikowane w materiałach konferencyjnych obejmujących głównie

tematykę badań w sporcie (takie jak, *International Conference on Technology and Innovation in Sports, Congress on Sport Science Research and Technology Support, Federated Conference on Computer Science and Information Systems, International Conference on Technology and Innovation in Sports, Health and Wellbeing, International Workshop on Computational Optimization, Krajowa konferencja Automatyki*). Udział Kandydata w tych pracach nie został wyraźnie określony merytorycznie i procentowo.

Analizując dorobek naukowy dra Krzysztofa Wiktorowicza od strony merytorycznej można zauważyć, że od początku swojej działalności naukowo-badawczej zajmował się szeroko rozumianym zastosowaniem metod wnioskowania przybliżonego do regulacji oraz zastosowaniu optymalizacji za pomocą roju cząstek wirtualnych do modelowania rozmytego oraz zastosowania modelowania matematycznego we wspomaganie treningów sportowych, u biegaczy, płotkarzy i chodźców. Tematyka wspomaganie treningów sportowych prowadzona jest we współpracy z Akademią Wychowania Fizycznego w Katowicach. Dr Krzysztof Wiktorowicz to naukowiec o wyraźnie ukierunkowanym profilu zainteresowań, ciągle powiększającym swój dorobek naukowy.

Dr inż. Krzysztof Wiktorowicz jest naukowcem, którego prace uzyskały 51 cytowań (36 bez autocytowań) w *Web of Knowledge* — $H = 4$, oraz 86 cytowań (49 bez autocytowań) w serwisie *Scopus* — $H = 6$ (data sprawdzenia 24.09.2021).

Należy podkreślić, że prace i rozwiązania autorstwa bądź współautorstwa Kandydata otrzymywały liczne nagrody (*4 nagrody Rektora Politechniki Rzeszowskiej, Nagroda za najlepszy poster na konferencji Congress on Sport Science Research and Technology Support, a także nagroda indywidualna Ministra Edukacji Narodowej i Sportu*).

Ze względu na opublikowane prace Kandydat został powołany na recenzenta w tak renomowanych czasopismach jak np.: *IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Soft Computing* i *International Journal of Fuzzy Systems*.

Ponadto Kandydat uczestniczył jako wykonawca w dwóch grantach badawczych finansowanych przez Komitet Badań Naukowych oraz Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego, dotyczących sterowania rozmytego i wspomaganie procesu treningowego z zastosowaniem modelowania komputerowego.

Podsumowując uważam, że aktywność naukowa dra Krzysztofa Wiktorowicza jest średnia, a na moją pozytywną ocenę tej aktywności przeważa międzynarodowa współpraca w zakresie recenzowania publikacji naukowych w czołowych światowych czasopismach. Zatem, całość aktywności naukowej uprawnia Kandydata do ubiegania się o stopień naukowy doktora habilitowanego.

IV. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę pozytywną ocenę zgłoszonego osiągnięcia naukowego, pt.: „*Wybrane metody uczenia systemów rozmytych*” oraz pozytywną ocenę aktywności naukowej stwierdzam, że osiągnięcia dra inż. Krzysztofa Wiktorowicza spełniają kryteria i wymagania stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora habilitowanego, określone w Ustawie z dnia 3 lipca 2018 r. - Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2018 poz.1669) oraz w art. 219 w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U.2018 poz.1668). Powyższe uzasadnia wniosek o nadanie dr inż. Krzysztofowi Wiktorowiczowi stopnia naukowego doktora habilitowanego w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized, cursive letter 'K' followed by a horizontal line.