

14. 07. 2020 r.

Prof. dr hab. inż. Danuta Rutkowska  
Instytut Technologii Informatycznych  
Społeczna Akademia Nauk w Łodzi

### **Recenzja**

**zawierająca ocenę osiągnięcia naukowego oraz istotnej aktywności naukowej  
dr Krzysztofa Józefa Wiktorowicza  
w związku z wszczętym w dniu 25 listopada 2020 r. postępowaniem w sprawie  
nadania stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk inżynieryjno-  
technicznych w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.**

W dniu 1 marca 2021 roku Rada Naukowa Instytutu Badań Systemowych PAN podjęła uchwałę o wyrażeniu zgody na przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego dr Krzysztofa Wiktorowicza, zatrudnionego na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej, w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

W dniu 21 maja 2021 roku Rada Naukowa Instytutu Badań Systemowych PAN podjęła uchwałę o powołaniu mojej osoby na recenzenta w postępowaniu habilitacyjnym dr Krzysztofa Wiktorowicza. Niniejsza recenzja została przygotowana w odpowiedzi na tę uchwałę.

### **Ogólna sylwetka Habilitanta – posiadane stopnie naukowe i zatrudnienie**

Dr Krzysztof Wiktorowicz jest zatrudniony na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej od czasu ukończenia studiów, najpierw jako asystent (1993 – 2001), potem jako adiunkt (2001 – 2019), a od 2019 jako profesor uczelni.

Stopień naukowy doktora nauk technicznych Habilitant uzyskał w 2001 roku, nadany uchwałą Rady Instytutu Cybernetyki Technicznej Politechniki Wrocławskiej. Studia magisterskie ukończył jako mgr inż. na Wydziale Elektrotechniki Politechniki Rzeszowskiej w roku 1993.

## I. OSIĄGNIĘCIE NAUKOWE

### 1. Osiągnięcie naukowe Habilitanta – ogólne przedstawienie

Dr Krzysztof Wiktorowicz jako osiągnięcie naukowe, stanowiące podstawę postępowania habilitacyjnego, przedstawił cykl sześciu tematycznie powiązanych publikacji, pod wspólnym tytułem: „**Wybrane metody uczenia systemów rozmytych**”. Na ten zbiór publikacji składają się niżej wymienione prace, oznaczone w Autoreferacie symbolami A1, ..., A6. Dla każdej z nich podano Impact Factor (IF) oraz punktację według Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (MNiSW). Sumaryczny Impact Factor Habilitant podaje **IF=33.09**, a sumaryczną liczbę punktów według MNiSW równą **440 pkt.** Dla każdej publikacji osobno Habilitant podaje IF oraz punktację zgodnie z rokiem opublikowania artykułu, na podstawie wykazów czasopism na stronie MNiSW. Ponadto dla publikacji współautorskich Habilitant podaje procentowy udział współautorów w opracowanie danego artykułu. W poniższym wykazie przedstawiono też wyszczególniony wkład Habilitanta w odniesieniu do publikacji współautorskich, zawarty w Autoreferacie.

[A1] **Wiktorowicz K.** (100%), *Output feedback direct adaptive fuzzy controller based on frequency-domain methods*, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 24, no. 3, pp. 622-634, 2016.

IF2016: **7.671**, MNiSW2016: **50 pkt.** (obecnie 200 pkt.)

[A2] **Wiktorowicz K.** (100%), *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.

IF2017: **8.415**, MNiSW2017: **50 pkt.** (obecnie 200 pkt.)

[A3] **Wiktorowicz K.** (60%), **Krzeszowski T.** (40%), *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.

IF2019: **4.406**, MNiSW2019: **70 pkt.**

Zadanie habilitanta polegało na: a) opracowaniu idei systemów rozmytych Takagi-Sugeno wysokiego rzędu przedstawionej w rozdziale 2, b) zastosowaniu wsadowej regresji najmniejszych kwadratów do uczenia następników reguł (rozdział 3.1), c) zaproponowaniu metody budowy regresji segmentowej za pomocą systemu Takagi-Sugeno zerowego rzędu (rozdział 3.2), d) współdziałanie przy opracowaniu funkcji celu dla uczenia poprzedników reguł za pomocą optymalizacji rojem cząstek (rozdział 3.4), e) opracowaniu procedury projektowania systemów z regresją wsadową (rozdział 4.1), f) współdziałanie w opracowaniu eksperymentów (rozdział 5), g) współdziałanie w przygotowaniu tekstu artykułu.

- [A4] **Wiktorowicz K.** (55%), Krzeszowski T. (40%), Przednowek K. (5%), *Sparse Regressions and Particle Swarm Optimization in Training High-Order Takagi-Sugeno Fuzzy Systems*, Neural Computing and Applications, 2020, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05133-w>

IF2019: **4.774**, MNiSW2020: **100 pkt.**

Zadanie habilitanta polegało na: a) opracowaniu idei zastosowania regresji rzadkich do uczenia następników reguł w systemach Takagi-Sugeno wysokiego rzędu (rozdziały 3.2.3 i 3.2.4), b) współudziale przy opracowaniu funkcji celu dla uczenia poprzedników reguł za pomocą optymalizacji rojem cząstek (rozdział 3.4), c) zaproponowaniu nowego kryterium jakości modeli opartego na kompromisie pomiędzy dokładnością modelu i jego rzadkością (rozdział 3.4), d) współudziale w opracowaniu procedury projektowania (rozdział 3.5), e) współudziale w opracowaniu eksperymentów (rozdział 4), f) współudziale w przygotowaniu tekstu artykułu.

- [A5] **Wiktorowicz K.** (50%), Krzeszowski T. (50%), *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.

IF2019: **3.050**, MNiSW2020: **70 pkt.**

Zadanie habilitanta polegało na: a) opracowaniu idei uczenia następników reguł w systemach Takagi-Sugeno wysokiego rzędu o dwóch wejściach (rozdziały 2 i 3), b) współudziale przy opracowaniu funkcji celu dla uczenia poprzedników reguł za pomocą algorytmów metaheurystycznych (rozdział 5), c) zaproponowaniu kryterium jakości modeli opartego na kompromisie pomiędzy dokładnością modelu i jego rzadkością (rozdział 5), d) współudziale w opracowaniu procedury projektowania (rozdział 6), e) współudziale w opracowaniu eksperymentów (rozdział 7), f) współudziale w przygotowaniu tekstu artykułu.

- [A6] Przednowek K. (60%), **Wiktorowicz K.** (30%), Krzeszowski T. (5%), Iskra J. (5%), *A web-oriented expert system for planning hurdles race training programmes*, Neural Computing and Applications, vol. 31, no. 11, pp. 7227–7243, 2019.

IF2019: **4.774**, MNiSW2019: **100 pkt.**

Zadanie habilitanta polegało na: a) opracowaniu modeli rozmytych (rozdział 3.3.2), b) sporządzeniu opisu liniowych i nieliniowych (w tym rozmytych) modeli matematycznych (rozdział 3), c) zaprogramowaniu w języku R modeli rozmytych do predykcji rezultatu i generowania treningu (fragmenty rozdziałów 4.1 i 4.2), d) współudziale w przygotowaniu tekstu artykułu.



## 2. Charakterystyka i ocena osiągnięcia naukowego Habilitanta

Zgodnie z podanym tytułem przedstawionego osiągnięcia naukowego - „**Wybrane metody uczenia systemów rozmytych**” – Habilitant, dr Krzysztof Wiktorowicz, określił następujący cel swojej działalności naukowej, składającej się na to osiągnięcie: „**Opracowanie i zastosowanie wybranych metod uczenia systemów rozmytych**”.

Warto podkreślić, że Habilitant w swoim dorobku naukowym może pochwalić się dwoma indywidualnymi artykułami, [A1], [A2], opublikowanymi w renomowanym czasopiśmie „IEEE Transactions on Fuzzy Systems”, w latach 2016 i 2017. Obecnie takie prace uzyskują najwyższą punktację w kategorii artykułów naukowych w zakresie informatyki (200 pkt.).

W ramach prowadzonych badań Habilitant realizował dwa tryby uczenia: on-line oraz off-line. Pierwszy tryb uczenia dotyczy syntezy systemów rozmytych pracujących w układzie ze sprzężeniem zwrotnym. W tym przypadku algorytm uczenia dokonuje zmiany nastaw parametrów systemu rozmytego pełniącego rolę regulatora w układzie zamkniętym. Tryb uczenia off-line również dotyczy syntezy systemów rozmytych, lecz zadaniem jest aproksymacja pewnej zależności pomiędzy wyjściami i wejściami systemu.

W odniesieniu do uczenia, zarówno on-line, jak też off-line, Habilitant badał rozmyte systemy Takagi-Sugeno (T-S), które rozważał również w publikacjach [A1] i [A2]. Zastosował tam algorytm gradientowy do uczenia reguł sterownika T-S (następników reguł, czyli części THEN). W artykule [A1] przedmiotem rozważań był system T-S typu SISO (single-input / single output), tzn. o jednym wejściu i jednym wyjściu. Natomiast w artykule [A2] rozważano system T-S typu MISO (multiple-input / single-output), tzn. o wielu wejściach i jednym wyjściu. W obu przypadkach Habilitant zastosował uczenie on-line.

Uczenie off-line zastosowano do systemów rozmytych T-S wysokiego rzędu, z wykorzystaniem opracowanej, przy znacznym udziale Habilitanta, hybrydowej metodzie, w której za pomocą algorytmu PSO (Particle Swarm Optimization) wyznaczano zbiory rozmyte w poprzednikach reguł (części IF). To podejście przedstawiono w artykule [A3].

Metodę PSO oraz regresję rzadkie (sparse regression) Habilitant zastosował we współautorskiej pracy [A4] do uczenia systemów rozmytych T-S wysokiego rzędu. To hybrydowe podejście, w aspekcie metaheurystycznej optymalizacji, zostało też przedstawione we współautorskim artykule [A5], w którym udział Habilitanta był równie znaczący. W obu pracach Habilitant opracował pomysł zastosowania regresji rzadkich do uczenia następników reguł w systemach T-S. Miał także swój wkład w opracowanie funkcji celu dla uczenia poprzedników reguł metodą PSO, a także w zaproponowaniu odpowiedniego kryterium jakości stosowanych modeli. Ponadto warto

też podkreślić udział Habilitanta w opracowanie procedur projektowania oraz opracowania eksperymentów, jak również przygotowania artykułów do publikacji.

Najmniejszy wkład Habilitanta (30%) wskazano w ostatnim (współautorskim) artykule składającym się na recenzowane osiągnięcie naukowe, przygotowanym przy udziale czterech autorów. Jest to praca [A6], w której udziałem Habilitanta było opracowanie modeli rozmytych, sporządzenie opisu modeli matematycznych oraz zaprogramowanie w języku R modeli rozmytych do predykcji wyników i generowania treningu. Praca dotyczy systemu ekspertowego do przewidywania rezultatów i generowania obciążenia treningowego (training loads) sportowców w zawodach sportowych „hurdles races” (bieg przez płotki). Habilitant miał też oczywiście swój udział w przygotowaniu tekstu artykułu do publikacji.

Ten ostatni artykuł z cyklu prac przedstawionych jako osiągnięcie naukowe dr. Krzysztofa Wiktorowicza, mimo że jest pracą wielu autorów, to wartym podkreślenia jest fakt, iż pokazuje on bardzo ważny aspekt możliwości praktycznego zastosowania badań naukowych Habilitanta. W artykule tym wykorzystano rzeczywiste dane dotyczące „hurdles races” Polskiej Reprezentacji Narodowej (Polish National Team). Jest oczywiste, że system ekspertowy może mieć zupełnie inne zastosowanie, jeśli jego wiedza dziedzinowa zostanie zastąpiona wiedzą z innej dziedziny. Rozważane przez Habilitanta systemy rozmyte pozyskują wiedzę na podstawie danych, poprzez uczenie reguł. Zatem te same algorytmy uczenia i wnioskowania mogą być wykorzystane dla innych rzeczywistych danych.

Wszystkie artykuły, [A1]–[A6], przedstawione jako osiągnięcie naukowe dr. Krzysztofa Wiktorowicza stanowią spójny tematycznie cykl ilustrujący prowadzone przez Habilitanta badania naukowe dotyczące wybranych metod uczenia systemów rozmytych. Cykl ten kończy praca wskazująca na możliwość różnych praktycznych zastosowań rezultatów tych badań, nie tylko w zakresie sterowników rozmytych.

### **Najważniejsze oryginalne rezultaty badań naukowych Habilitanta**

Jako nowatorskie elementy w swoich badaniach naukowych Habilitant wskazuje niżej wyszczególnione, w odniesieniu do poszczególnych artykułów przedstawionych jako swoje osiągnięcie naukowe. Tę listę najważniejszych rezultatów swoich badań dr Krzysztof Wiktorowicz zamieścił w swoim Autoreferacie, w kolejności odpowiadającej publikacjom [A1]–[A6]. Zatem na początku wymienione są nowe elementy, jakie pojawiły się w indywidualnych artykułach Habilitanta, opublikowanych w „IEEE Transactions on Fuzzy Systems”, a na ostatniej pozycji wskazano Jego wkład wniesiony do współautorskiej pracy, kończącej cykl spójnych publikacji osiągnięcia naukowego. Ta lista wymienionych przez Habilitanta nowatorskich elementów przedstawia się następująco:



- zastosowanie po raz pierwszy metod częstotliwościowych do syntezy i analizy uczących się rozmytych systemów typu SISO [A1] i MISO [A2],
- opracowanie metody uczenia systemów rozmytych przy zachowaniu warunków stabilności układu [A1], [A2],
- zaproponowanie algorytmu, który nie wymaga znajomości zaawansowanej matematyki, dzięki czemu może być zrozumiany i stosowany przez inżynierów automatyków [A1], [A2],
- opracowanie hybrydowej metody uczenia systemów rozmytych Takagi-Sugeno wysokiego rzędu z wykorzystaniem wsadowej metody najmniejszych kwadratów i optymalizacji rojem cząstek [A3],
- zastosowanie regularyzacji w postaci regresji grzbietowej dla modeli źle uwarunkowanych [A3],
- opracowanie metody realizacji regresji segmentowej za pomocą systemu Takagi-Sugeno zerowego rzędu [A3],
- zastosowanie po raz pierwszy regresji rzadkich do uczenia systemów rozmytych Takagi-Sugeno wysokiego rzędu z jednym wejściem [A4] i z dwoma wejściami [A5],
- zaproponowanie wskaźnika jakości modelu rozmytego, który wyraża kompromis pomiędzy jego dokładnością i rzadkością [A4], [A5],
- zaproponowanie korekcji błędu walidacyjnego dla klasycznej regresji najmniejszych kwadratów za pomocą systemu rozmytego [A6].

Teraz w tej recenzji odniosę się do tych rezultatów, wyżej wyszczególnionych przez Habilitanta.

Artykuły [A1] i [A2], jak już wcześniej wspomniano, dotyczą uczenia on-line. Habilitant w swoich badaniach rozróżnia dwa tryby uczenia: on-line i off-line. Ten pierwszy jest stosowany do adaptacyjnego systemu sterowania ze sprzężeniem zwrotnym i uczeniem w celu dostrajaniu sterownika rozmytego. Opracowanie odpowiedniej metody uczenia, przy zachowaniu (co ważne) warunków stabilności, należy docenić jako istotny rezultat w badaniach naukowych Habilitanta.

W pracach [A1] i [A2] rozważany system sterowania zawiera adaptacyjny sterownik rozmyty Takagi-Sugeno, a także nieliniowy model referencyjny (model odniesienia), którego odpowiedź jest wzorcem dla układu podlegającego uczeniu. Model referencyjny wyznacza oczekiwaną (pożądaną) wartość wyjściową, a różnica między tą wartością a wyjściem sterowanego obiektu stanowi tzw. błąd adaptacji, na podstawie którego uczony jest rozmyty sterownik. Zastosowany do uczenia algorytm gradientowy dostraja postać następników reguł rozmytych IF-THEN, czyli konkluzje reguł (część THEN) w taki sposób, że cały system (działający w układzie zamkniętym) zachowuje się tak jak model referencyjny. Wynika to z faktu, że gradientowa metoda uczenia minimalizuje funkcję błędu adaptacji. Dzięki temu system sterowania nadąża za zmianami wyjścia modelu referencyjnego.

W obu publikacjach, [A1] i [A2], Habilitant zastosował metody częstotliwościowe (jak podkreśla – po raz pierwszy) do syntezy i analizy uczących się systemów rozmytych. Metody te to znane kryterium Nyquista, od lat wykorzystywane do określania stabilności zamkniętych układów sterowania, a także jego uogólniona wersja, czyli „circle criterion”. Są to klasyczne metody teorii sterowania i teorii stabilności, jednak ich zastosowanie do uczących się układów sterowania, a zwłaszcza sterowników rozmytych jest niewątpliwie bardzo interesującym i ważnym wkładem naukowym Habilitanta.

Klasyczne podejście do sterowania wykorzystuje wiedzę ekspertów, znajomość modeli matematycznych i umiejętność odpowiedniego doboru reguł sterowania. Bardzo ważne jest zapewnienie stabilności systemu sterowania, co nie zawsze jest zagwarantowane w przypadku stosowania sterowników rozmytych. Układy adaptacyjne, w których rozmyte reguły są wyznaczane w sposób automatyczny, poprzez uczenie, nie wymagają znajomości modelu matematycznego obiektu sterowania. Metody sztucznej inteligencji, w szczególności uczenie maszynowe, pozwala na pozyskiwanie wiedzy z danych w procesie uczenia. W tym sensie można się zgodzić z Habilitantem, że zaproponowany algorytm nie wymaga znajomości zaawansowanej matematyki, dzięki czemu może być zrozumiany i stosowany przez inżynierów automatyków.

Tu jednak pojawia się **uwaga polemiczna**. Niewątpliwie zastosowanie odpowiedniej metody sztucznej inteligencji (maszynowego uczenia) do skonstruowania układu sterowania nie wymaga znajomości modelu matematycznego, czy też identyfikacji, to jednak rozumienie działania algorytmu uczenia wymaga pewnej wiedzy matematycznej. Oczywiście można wykorzystać gotowy program komputerowy, lecz rozumienie działania algorytmu pozwala efektywniej korzystać z takiego programu. Inną kwestią jest rozumienie działania systemu na podstawie automatycznie wygenerowanych rozmytych reguł, co z jednej strony daje wyjaśnialność na podstawie lingwistycznej postaci reguł typu IF-THEN (Jeżeli – to). Z drugiej jednak strony można powiedzieć, że stopień interpretowalności systemu rozmytego, jak też wyjaśnialności jego działania zależy m.in. od liczby reguł i postaci zbiorów rozmytych w tych regułach oraz liczby tych zbiorów. Zatem kwestia „zrozumienia” zaproponowanego algorytmu, co podkreśla Habilitant w liście najważniejszych rezultatów swoich badań, ma zdecydowanie szerszy kontekst. Niemniej jednak wartym podkreślenia jest zwrócenie uwagi na ten aspekt w porównaniu podejścia klasycznego i zaproponowanego przez Habilitanta. Warto też zauważyć, że w przypadku, gdy liczba reguł rozmytych jest niewielka, a ponadto zbiory rozmyte w poprzednikach reguł (części IF) nie podlegają uczeniu (jak to ma miejsce w artykułach [A1] i [A2]) i mają wyraźną interpretację semantyczną (np. mały, duży), to można przyjąć dobrą wyjaśnialność na podstawie tych reguł. Dla systemów typu SISO, czyli z jednym wejściem, czy też MISO ale np. z dwoma wejściami interpretowalność i wyjaśnialność jest oczywista, zwłaszcza, że reguły rozmyte dla systemów T-S zastosowanych w artykułach [A1] i [A2] mają prostą postać w części konkluzji, czyli w następnikach reguł.



W publikacji [A3] rozważano system rozmyty T-S wysokiego rzędu, czyli z bardziej złożoną, a mianowicie wielomianową postacią następników reguł rozmytych IF-THEN. Dla takiego systemu rozmytego opracowano hybrydową metodę uczenia, z wykorzystaniem, jak pisze Habilitant, wsadowej metody najmniejszych kwadratów i optymalizacji rojem cząstek (czyli PSO). Opracowanie tej hybrydowej metody jest wkładem Habilitanta do tej współautorskiej pracy. W odróżnieniu od publikacji [A1] i [A2] w tym artykule uczenie odbywa się w trybie off-line. Oznacza to, że nie dokonuje się adaptacji w trakcie działania systemu, lecz do uczenia wykorzystuje się wcześniej zarejestrowane wartości obserwacji par wejścia i wyjścia. Habilitant zastosował metodę PSO do uczenia parametrów zbiorów rozmytych w poprzednikach reguł, natomiast regularyzowaną metodę najmniejszych kwadratów do uczenia współczynników funkcji wielomianowej w następnikach reguł. Zastosowanie regularyzacji w postaci regresji grzbietowej oraz realizację regresji segmentowej w systemie T-S Habilitant wskazuje jako ważne rezultaty swoich badań (na wyszczególnionej wcześniej liście osiągnięć). Metoda najmniejszych kwadratów jest najczęściej stosowanym podejściem w zadaniach regresji. Zatem metoda ta w przypadku regresji liniowej wykorzystanej do wyznaczenia następników reguł dla systemu T-S zerowego rzędu nie stanowi wielkiego nowatorskiego osiągnięcia. Jest to jedna z najprostszych metod maszynowego uczenia. Metody regularyzacji, stosowane do poprawienia błędu predykcji modelu, też nie są niczym nowym. Regresja grzbietowa jest jedną z metod regularyzacji. Wkładem Habilitanta jest zastosowanie tej metody do modeli źle uwarunkowanych, na przykład wtedy gdy liczba obserwacji jest mała. Warto też podkreślić, że Habilitant zastosował to podejście do systemu T-S wysokiego rzędu, co można traktować jako nowatorskie, w odróżnieniu od uczenia systemów T-S zerowego lub pierwszego rzędu. Natomiast opracowanie metody realizacji regresji segmentowej w zastosowaniu do systemu T-S zerowego rzędu, w publikacji [A3], też stanowi nowy wkład Habilitanta do tego artykułu. Ponadto ważnym nowatorskim elementem jest wyznaczenie liczby reguł poprzez zastosowanie krosvalidacji typu „leave-one-out”.

Istotnym nowym pomysłem w odróżnieniu do wcześniejszych publikacji Habilitanta było uczenie systemu T-S wysokiego rzędu za pomocą metody PSO, w artykule [A3]. Jest to znana w sztucznej inteligencji metoda, inspirowana zachowaniem organizmów żywych, np. roju pszczół, które współdziałają w dużych grupach (inteligencja roju). W tym przypadku wkład Habilitanta polegał na współudziale, ze współautorem tego artykułu, w opracowaniu funkcji celu dla tego algorytmu oraz przeprowadzanych eksperymentach.

Kolejne artykuły Habilitanta, [A4] i [A5] to też prace współautorskie, które także dotyczą systemu rozmytego T-S wysokiego rzędu, z zastosowaniem regresji rzadkich (co jest tu nowym elementem) oraz optymalizacji metodą PSO. Opracowanie pomysłu z wykorzystaniem regresji rzadkich do uczenia następników reguł w systemach T-S wysokiego rzędu stanowi wkład Habilitanta do współautorskiej pracy [A4]. Ponadto zaproponowanie wskaźnika jakości, wyrażającego kompromis pomiędzy dokładnością a rzadkością, w odniesieniu do modelu rozmytego, jest też zasługą Habilitanta. Dotyczy to artykułu [A4], jak też [A5], który stanowi kontynuację poprzedniego. Oprócz tego Habilitant miał również udział w części tych prac związanych z zastosowaniem metody PSO.



W ostatnim artykule z przedstawionego cyklu, [A6], Habilitant zaproponował korektę błędu walidacyjnego dla klasycznej regresji z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów. Ten aspekt został wskazany na liście najważniejszych rezultatów badań Habilitanta. Współautorski artykuł [A6] różni tym od pozostałych prac z cyklu składającego się na osiągnięcie naukowe, będące przedmiotem tej recenzji, że dotyczy systemu ekspertowego, a więc innego zastosowania oraz innego systemu rozmytego (nie T-S). Natomiast spójność z pozostałymi publikacjami wynika z zastosowania odpowiednich metod uczenia systemu rozmytego. W tym przypadku Autorzy zastosowali metody regresji oraz system rozmyty podobny do sieci RBF (Radial Basis Functions). Różne modele testowano, stosując krosvalidację. Eksperymenty realizowano z wykorzystaniem programów komputerowych w języku R. Jest to język programowania wywodzący się z zastosowań do obliczeń statystycznych, obecnie bardzo popularny, obok języka Python, w sztucznej inteligencji, szczególnie w Data Science i uczeniu maszynowym. Praktycznym efektem tej pracy jest aplikacja, która może być używana zarówno na komputerach, jak też na urządzeniach mobilnych, choć ta ostatnia możliwość nie została jeszcze zaimplementowana w ramach tej publikacji, a tylko wspomniana jako plan przyszłych działań.

W całym cyklu artykułów przedstawionych jako osiągnięcie naukowe Habilitanta, pod wspólnym tytułem „Wybrane metody uczenia systemów rozmytych”, widać wyraźne przejście od pierwszych prac dotyczących raczej zastosowania w automatyce do publikacji typowo informatycznych, do których zdecydowanie zalicza się publikacja [A6].

Cały cykl sześciu artykułów, podlegających recenzji jako osiągnięcie naukowe Habilitanta, zawiera niewątpliwie oryginalne, nowatorskie elementy, stanowiące wkład naukowy dr Krzysztofa Wiktorowicza w dziedzinie nauk inżynierjno-technicznych, w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja. Rezultaty naukowe Habilitanta zawarte w tych publikacjach dotyczą algorytmów uczenia maszynowego i metod sztucznej inteligencji, czyli zagadnień z zakresu informatyki.

### **Uwagi szczegółowe**

W publikacji [A1] Habilitant opracował metodę uczenia, z wykorzystaniem klasycznej metody gradientowej (najszybszego spadku), przy czym uczeniu podlegają tylko następniki reguł, natomiast zbiory rozmyte w poprzednikach reguł nie ulegają zmianie. W swoim Autoreferacie wyjaśnia, że wystarczy sprawdzać jedynie następniki reguł, gdyż w algorytmie uczenia wykorzystano fakt, że funkcja systemu rozmytego jest niestacjonarnością przedziałami liniową, a ponadto podczas uczenia funkcja ta jest utrzymywana w dozwolonym sektorze. Z dalszych wyjaśnień wynika, że w trakcie przeprowadzonego eksperymentu z uczeniem funkcja systemu rozmytego pozostaje w bezpiecznym (w sensie stabilności układu) sektorze. To oczywiście bardzo dobrze, że wyznaczono sektor bezpieczny z punktu widzenia stabilności. Na rysunku 4 w Autoreferacie (Fig. 13 w [A1]) widać, że wyjście systemu sterowania nadąża za wyjściem modelu referencyjnego, błąd adaptacji dąży do zera, a funkcja systemu rozmytego nie wykracza poza wyznaczony sektor, czyli wszystko bardzo dobrze działa. Pokazany przykład dotyczy sinusoidalnego sygnału wymuszenia (podawanego na wejście modelu referencyjnego). Nasuwa się następujące pytanie: Jeżeli znamy zakres

zmienności funkcji systemu rozmytego (wyznaczone warunkami stabilności), a ponadto wiemy, że ma ona postać przedziałami liniowej niestacjonarności, to czy faktycznie uczenie jest tutaj potrzebne? Czy nie wystarczy tej postaci funkcji opisać za pomocą rozmytych reguł?

W odniesieniu do publikacji [A3] Habilitant pisze w swoim Autoreferacie (pierwsze zdania p.4.3.4), że uczenie modeli rozmytych T-S składa się z dwóch głównych zadań: identyfikacji struktury i estymacji parametrów. Potem wyjaśnia, że „identyfikacja struktury w modelach rozmytych jest głównie związana z określeniem liczby reguł rozmytych”, natomiast „estymacja parametrów dotyczy określenia parametrów zbiorów rozmytych zdefiniowanych dla wejść systemu oraz współczynników funkcji znajdujących się w następnikach reguł”. Prawdopodobnie Habilitant chciał napisać, że „identyfikacja struktury i estymacja parametrów” dotyczy ogólnie systemów sterowania, a nie sterowników rozmytych. Zatem brak jest precyzji w tych sformułowaniach. Trochę trudno zgodzić się z wyjaśnieniem, że „identyfikacja struktury w modelach rozmytych jest głównie związana z określeniem liczby reguł rozmytych”. Co prawda w systemach rozmyto-neuronowych o architekturze (strukturze) sieciowej, podobnych do sieci neuronowych, gdzie stosuje się uczenie metodą gradientową, istotnie struktura takich sieci rozmyto-neuronowych zależy m.in. od określonej liczby reguł. Jednakże ogólnie w systemach rozmytych przez strukturę (architekturę) systemu rozumiemy takie elementy, składające się na tę strukturę, jak baza reguł, blok wnioskowania, a także blok rozmywania, czy wyostrzania, choć ten ostatni nie dotyczy systemów T-S. Zatem reguły należą do bazy reguł i w tym sensie ich liczba nie ma wpływu na architekturę systemu. Natomiast „estymacja parametrów” faktycznie w rozważanym przypadku „dotyczy określenia parametrów zbiorów rozmytych zdefiniowanych dla wejść systemu oraz współczynników funkcji znajdujących się w następnikach reguł”. Te parametry, występujące zarówno w poprzednikach, jak też następnikach reguł, podlegają uczeniu. Ich wartości wyznaczone w procesie uczenia określają optymalną (nauczoną) postać reguł, czyli pozyskaną w wyniku uczenia wiedzę reprezentowaną w postaci bazy rozmytych reguł.

### **Uwaga ogólna**

W przedstawionym do recenzji cyklu publikacji, pt. „Wybrane metody uczenia systemów rozmytych”, Habilitant stosował wybrane metody uczenia systemów rozmytych, głównie różnych wariantów systemu T-S, lecz także innych. W jednej z publikacji znajduje się wyjaśnienie, że dla sterownika rozmytego T-S czas przetwarzania jest krótszy niż dla systemu Mamdaniego, gdyż nie ma tu operacji wyostrzania. To uzasadnia wybór systemu rozmytego T-S w pracach Habilitanta zamiast klasycznego systemu Mamdaniego, w którym zbiory rozmyte występują też w następnikach reguł. W ostatniej publikacji z prezentowanego cyklu sześciu artykułów nie stosowano systemu T-S, co z pewnością wynika z innego zastosowania niż sterowanie. Może warto byłoby dokonać jakiegoś podsumowania, wynikającego z przeprowadzonych badań Habilitanta, opublikowanych w przedstawionym jako osiągnięcie naukowe cyklu sześciu artykułów. Szkoda, że nie zostało to zrobione w Autoreferacie. Publikacje te faktycznie stanowią spójną całość i na ich podstawie można



wyciągnąć ważne wnioski dotyczące różnych systemów rozmytych i metod ich uczenia w zależności od zastosowań oraz typu przetwarzanych danych.

### **Ogólna ocena osiągnięcia naukowego Habilitanta**

Uwzględniając wszystkie przedstawione wyżej uwagi polemiczne, ogólne i szczegółowe, pozytywnie oceniam wkład Habilitanta w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja, udokumentowany cyklem publikacji stanowiących Jego osiągnięcie naukowe.

## **II. ISTOTNA AKTYWNOŚĆ NAUKOWA**

### **1. Ocena osiągnięć naukowo-badawczych Habilitanta**

Sumaryczny Impact Factor publikacji dr Krzysztofa Wiktorowicza, składających się na Jego osiągnięcie naukowe, wynosi **IF=33.090**. Natomiast sumaryczny Impact Factor dla publikacji, które nie wchodzą w skład tego osiągnięcia naukowego, wynosi **IF=3.513**. Zatem łączny Impact Factor to **IF=36.603**.

**Indeks Hirscha** wynosi **3** według bazy Web of Science, **5** według bazy Scopus, **7** według bazy Google Scholar.

**Liczba cytowań** (bez autocytowań) wynosi **23** według bazy Web of Science, **29** według bazy Scopus, **62** według bazy Google Scholar.

Liczba cytowań (z autocytowaniami) wynosi **42** według bazy Web of Science, **76** według bazy Scopus, **124** według bazy Google Scholar.

Habilitant pragnie zwrócić uwagę na fakt, że w zakresie osiągnięcia naukowego (prace z lat 2015-2021) wskaźnik cytowań wykazuje mocny trend rosnący, co przedstawia wykres zamieszczony w serwisie Scopus.

Dr Krzysztof Wiktorowicz, po uzyskaniu stopnia doktora, brał udział w następujących projektach badawczych:

1. Grant KBN nr 7 T11A 018 21: *Projektowanie i analiza wybranych układów sterowania rozmytego*; w latach 2001-2003.
2. Grant MNiSW nr N RSA4 00554 w ramach projektu *Rozwój sportu akademickiego: Wspomaganie procesu treningowego w biegach przez płotki z wykorzystaniem modelowania komputerowego*; w latach 2016-2019.

Oprócz publikacji wchodzących w skład przedstawionego osiągnięcia naukowego, dr Krzysztof Wiktorowicz, po uzyskaniu stopnia doktora, zgromadził dorobek naukowy w postaci 28 publikacji indywidualnych oraz współautorskich, w większości w języku angielskim, w czasopiśmie oraz konferencjach naukowych, jak też w wydaniach monograficznych. Niektóre z nich są dość wysoko punktowane. Według starej punktacji MNiSW publikacje te dają 224 pkt. oraz **IF=3.513**.

Przed uzyskaniem stopnia doktora liczba publikacji Habilitanta wynosiła 9, w większości były to prace konferencji krajowych, lecz także artykuły w czasopiśmie naukowych, zarówno w języku polskim, jak też angielskim.

Dr Krzysztof Wiktorowicz, po uzyskaniu stopnia doktora, otrzymał następujące nagrody za działalność naukową:

1. Nagroda Indywidualna Ministra Edukacji Narodowej i Sportu – za pracę doktorską pt. „Jakość regulacji rozmytej” – w roku 2002.
2. Nagroda za najlepszy poster pt. „A Fuzzy-based Software Tool Used to Predict 110m Hurdles Results During the Annual Training Cycle” – na konferencji “International Conference on Sport Sciences Research and Technology Support (icSPORTS 2016), Porto, Portugalia – w roku 2016.
3. Nagroda Rektora Politechniki Rzeszowskiej, zespołowa III stopnia – za przygotowanie cyklu publikacji naukowych dotyczących zastosowania metod wizji komputerowej i uczenia maszynowego do wspomagania treningu sportowego – w roku 2017.
4. Nagroda Rektora Politechniki Rzeszowskiej – za współautorstwo publikacji z grupy A (MNiSW), pt. „Planning training loads for the 400m hurdles in three-month mesocycles using artificial neural networks – w roku 2018.
5. Nagroda Rektora Politechniki Rzeszowskiej, indywidualna III stopnia – za cykl publikacji naukowych dotyczących adaptacyjnych regulatorów rozmytych oraz zastosowania wizji komputerowej i uczenia maszynowego do wspomagania treningu sportowego – w roku 2018.
6. Nagroda Rektora Politechniki Rzeszowskiej, zespołowa III stopnia – za opracowanie cyklu publikacji naukowych dotyczących zastosowań wizji komputerowej i uczenia maszynowego – w roku 2020.

## **2. Ocena dorobku dydaktycznego i popularyzatorskiego oraz współpracy międzynarodowej Habilitanta**

Działalność dydaktyczna dr Krzysztofa Wiktorowicza jest związana z Jego pracą naukowo-badawczą. Od czasu uzyskania stopnia doktora Habilitant prowadził lub prowadzi różne formy zajęć z następujących przedmiotów:

- Logika i teoria mnogości
- Logiczne układy sterowania
- Automatyka i sterowanie
- Roboty mobilne
- Programowanie systemów ekspertowych

Warto podkreślić, że od wielu lat Habilitant jest odpowiedzialny za prowadzenie wykładu i laboratorium z przedmiotu „Logika i teoria mnogości” dla studiów stacjonarnych i niestacjonarnych na kierunku Informatyka. Dla tego przedmiotu przygotował materiały pomocnicze, opublikowane p.t. „Logika i teoria mnogości,



Materiały pomocnicze” w Oficynie Wydawniczej Politechniki Rzeszowskiej, w 2013 r. W latach 2015 i 2018 pojawiały się wznowienia w postaci II i III wydania tej publikacji.

Istotne znaczenie ma tu fakt, że przedmiot „Logika i teoria mnogości” jest bardzo ważny w połączeniu z działalnością naukową Habilitanta, gdyż wiedza z tego zakresu ma ogromne zastosowanie w teorii zbiorów rozmytych i systemów rozmytych.

W ramach działalności dydaktycznej Habilitant pełnił też funkcje promotora prac inżynierskich i magisterskich na różnych kierunkach studiów ale przede wszystkim na Informatyce, gdzie był promotorem 42 prac. Ponadto 18 prac na kierunku Automatyka i robotyka oraz 17 prac na kierunku Elektrotechnika było prowadzonych przez Habilitanta w roli promotora, w okresie po uzyskaniu stopnia doktora.

W latach 2011-2019 Habilitant brał udział w pracach badawczych, współpracując z pracownikami Uniwersytetu Rzeszowskiego i Akademii Wychowania Fizycznego w Katowicach. Efektem tej współpracy były wspólne publikacje, realizowane także w ramach projektu badawczego. Wśród tych publikacji, oprócz artykułów w czasopismach naukowych, jest też współautorska monografia oraz referaty konferencyjne.

### **3. Ocena istotnej aktywności naukowej Habilitanta - podsumowanie**

Biorąc pod uwagę wskaźniki osiągnięć naukowych Habilitanta oraz Jego działalność dydaktyczną, związaną z pracą naukową, udział w projektach badawczych, współpracę z innymi ośrodkami naukowymi, a także uzyskane nagrody za wyniki pracy naukowej, zdecydowanie pozytywnie oceniam również ten aspekt aktywności Habilitanta.

## **PODSUMOWANIE I OCENA KOŃCOWA**

**W konkluzji niniejszej recenzji stwierdzam, że przedstawione osiągnięcie naukowe stanowi znaczący wkład Habilitanta w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja. Biorąc również pod uwagę Jego działalność ocenianą w ramach istotnej aktywności naukowej, wyrażam przekonanie, iż dr Krzysztof Wiktorowicz spełnia wymagania stawiane przez Ustawodawcę kandydatom w postępowaniu habilitacyjnym i wyrażam swoją zdecydowanie pozytywną ocenę.**

