

Dr hab. inż. Ryszard Leniowski, prof. PRz

Rzeszów, 23. 12. 2023 r.

Katedra Informatyki i Automatyki

Wydział Elektrotechniki i Informatyki

Politechnika Rzeszowska

POLITECHNIKA ŚLĄSKA  
Biuro Rady Dyscypliny  
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika  
i Technologie Kosmiczne

wpłynęło dnia 08.01.2023

nr ..... zał. ....

### Recenzja pracy doktorskiej

Tytuł rozprawy: *Zastosowanie systemów rozmytych do oceny jakości modeli na potrzeby wirtualnego rozruchu systemów automatyki przemysłowej.*

Autor rozprawy: mgr inż. Łukasz Glodek

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Witold Nocoń, prof. Politechniki Śląskiej

Dyscyplina: Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne

#### 1. Podstawa prawna

Recenzję wykonano na podstawie zlecenia Przewodniczącej Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Śląskiej w Gliwicach, dr hab. inż. Moniki Kwoki, prof. PŚ, z dn. 16 października 2023 r. Recenzja została wykonana zgodnie z obowiązującymi przepisami zawartymi w Ustawie z dn. 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, Dziennik Ustaw z 2018 r. poz. 1668.

#### 2. Ogólna charakterystyka pracy

Ostatnie kilkanaście lat to okres ogromnego postępu, jaki dokonał się w naukach informatycznych, obejmując zarówno aspekty teoretyczne jak i aplikacyjne. Efektem tego rozwoju była zmiana dotychczasowych metod i wypracowanych schematów postępowania w projektowaniu złożonych systemów automatyki przemysłowej. Współczesne technologie

informatyczne (sprzęt i oprogramowanie) pozwalają na wirtualne projektowanie i uruchamianie nie tylko pojedynczych maszyn czy instalacji, ale kompletnych systemów przemysłowych, zawierających setki urządzeń o indywidualnych modelach dynamicznych. Wirtualne modele zawierają zazwyczaj reprezentację geometryczną z atrybutami powierzchni (grafika), model (lub modele) fizyczny wraz z opisem dynamiki kontaktowej oraz powiązane z nimi struktury danych (często kilka modeli). Obecnie takie systemy są ściśle związane z technikami symulacji i wizualizacji. Za protoplastę współczesnej, profesjonalnej symulacji i wizualizacji uznaje się oprogramowanie symulacyjne samolotu Grumman A-10, powstałe około 1972 roku. Już wtedy, umożliwiała ono wirtualne latanie na niskich pułapach, gdzie szczegółowość wizualizacji terenu ma dla pilota pierwszorzędne znaczenie. Szczegółowość odwzorowania możemy rozpatrywać również w kategoriach jakości modelu.

Praca doktorska Pana mgr inż. Łukasza Głodka dotyczy istotnych zagadnień oceny jakości modeli układów automatyki na potrzeby różnych technik symulacji, wizualizacji i wirtualnego prototypowania. Do oszacowania parametrów oceny, Autor wykorzystuje narzędzia i metody systemów rozmytych. Jest to tematyka ważna, na każdym etapie projektowania, wykonywania i uruchamiania złożonego i najczęściej bardzo kosztownego systemu.

Dysertacja napisana jest w języku polskim, zawiera łącznie 130 stron (bez spisu literatury) i składa się z 7 rozdziałów (siódmym rozdziałem jest streszczenie pracy).

We wstępie autor uzasadnia podjęcie wybranej tematyki podkreślając celowość realizowanych badań teoretycznych i doświadczalnych. Rozdział zawiera pewną próbę usystematyzowania wiedzy dotyczącej miar stosowanych do oceny modeli, a także uzasadnienie wyboru wnioskowania rozmytego, jako metody pozwalającej na skuteczne przeprowadzenie oceny modelu. W rozdziale tym sformułowano tezę pracy, że: *„agregacja informacji niesionych przez różne miary do oceny jakości modelu, połączona z wnioskowaniem rozmytym pozwala na stworzenie współczynnika jakości uwzględniającego wiedzę ekspercką z zakresu wirtualnego uruchamiania systemów automatyki przemysłowej, modelowania oraz specyfiki różnego rodzaju obiektów przemysłowych”*.

W rozdziale drugim, doktorant skupił się na trzech zagadnieniach. Pierwszym z nich był przegląd nowych technik symulacji i wizualizacji, połączony z opisem ich wykorzystania w przemyśle. Techniki te, rozumiane jako narzędzia do testowania i walidacji modeli, umożliwiają jednocześnie prognozowanie zachowania modelu, ocenę jakości produktu, planowanie produkcji lub nawet szkolenie operatorów uruchamianego systemu. Autor zapoznaje nas z pojęciami typu „cyfrowy bliźniak”, „cyfrowy cień” oraz „wirtualne uruchomienie”, wskazując na podobieństwa i różnice pomiędzy takimi technikami. Następnie, Autor przedstawia w punktach listę metod stosowanych do oceny jakości modelu. Lista zawiera szesnaście różnych wskaźników wraz ze spisem nazw i zakresem dopuszczalnych wartości. Listę uwiarygadniają liczne odnośniki literaturowe. W ostatniej części drugiego rozdziału zapoznajemy się z podstawami logiki rozmytej oraz dwoma algorytmami: „wyszukiwania wzorca” oraz „symulowanego wyżarzania”.

Rozdział trzeci jest rozdziałem głównym. Zawiera trzy podpunkty. Pierwszy z nich poświęcony jest charakterystyce badanych obiektów, którymi są: kaskada dwóch zbiorników, wahadło fizyczne oraz przenośnik taśmowy. Obiekty rozpatrywane są jako strumień danych wyjściowych, stanowiących odpowiedzi na typowe wymuszenia. Dane te są poddane wstępnej obróbce, gdzie badane są: korelacja pomiędzy danymi, ich stacjonarność oraz sezonowość. Na wstępie przetworzonych danych tworzony jest zestaw modeli typu AR, MA, ARMA. W trzecim podpunkcie, najważniejszym, Autor wprowadza współczynnik jakości modelu oparty na logice rozmytej- VCMF (ang. Virtual Commissioning Model Fuzzy coefficient). Współczynnik ten bierze pod uwagę cztery metody oceny modelu: NRMSE, ME, MAE oraz MIA. Żadna z tych miar nie jest wystarczająca do samodzielnej oceny jakości modelu, ale ich połączenie za pomocą różnych operatorów logicznych i algebraicznych, należących do metod rozmytych, uwzględnienie korelacji, stacjonarności i sezonowości, pozwala znacząco poprawić jakość oceny modelu. Autor przedstawia kolejne kroki analizy danych, czyli: usunięcie wartości odstających, oraz badanie rozkładu normalnego danych. Następnie dokonuje statystycznej oceny modelu korzystając z algorytmu genetycznego, metody roju cząstek, algorytmu wyszukiwania wzorca oraz symulowanego wyżarzania. Eksperymentalne porównanie tych wyników prowadzi do wskazania najbardziej wiarygodnego modelu.

Testowanie proponowanej metody zostało opisane w rozdziale czwartym. W pierwszej kolejności zapoznajemy się z wartościami kilkunastu wskaźników oceny modelu, opisanymi w rozdziale drugim. Po tym etapie Autor prezentuje wyniki dla składowych metody VCMF czyli: NRMSE, ME, MAE oraz MIA, a następnie wynik VCMF. Wartość oceny uzyskanej metodą VCMF pokazuje przykład modelu działającego w stanie awaryjnym. W tym przypadku ocena VCMF może być wykorzystywana jako skuteczny identyfikator awarii.

Podsumowanie wyników przeprowadzonych analiz i badań, dyskusję i dalsze kierunki badań Autor zawarł w rozdziale szóstym kończącym merytoryczną część pracy.

Rozprawę uzupełnia streszczenie, spis literatury, który liczy 121 pozycji. Literatura przedmiotu cytowana przez Autora jest zasadniczo właściwie dobrana i w większości anglojęzyczna. Układ pracy jest poprawny. Praca zawiera wykaz używanych skrótów, listę tabel oraz listę ilustracji. Treści rozprawy zostały logicznie podzielone na rozdziały, a ich zawartość i zakres nie budzi zastrzeżeń.

### **3. Merytoryczna ocena pracy**

Ocena jakości modelu dynamicznego jest jednym z istotniejszych zagadnień włączanych w szeroko rozumiany proces prototypowania nowych instalacji przemysłowych, a także wykorzystywanych na etapie ich dalszej eksploatacji. Autor omawia nowe techniki symulacji i wizualizacji przemysłowych systemów automatyki, opartych na modelach dynamicznych, ograniczając się jednak do informacji popularno-naukowych i statystycznych, pokazujących rozwój tych metod (rozdział drugi). Brakuje tam istotnych informacji dotyczących np. struktur danych, pozwalających przechowywać jakościowo odmienne informacje opisujące geometrię, topologię, cechy fizyczne i graficzne, identyfikację kontaktu i synchronizację wymiany danych w czasie. Ponadto, w tak złożonych systemach istotną rolę pełnią konwertery danych, pozwalające łączyć różne technologie informatyczne w jedną, działającą całość. Dotyczy to szczególnie symulatorów działających w sieci na komputerach (maszynach) o różnej architekturze (Intel, ARM, procesory graficzne, specjalizowane układy FPGA). Warto byłoby wspomnieć o tych rozwiązaniach, zwłaszcza z takiego powodu, że nie pochodzą one z „przemysłu”.

W tabeli 2.1, w pozycji „cecha”, podano, że wirtualny model jest kopią rzeczywistego obiektu. Zazwyczaj jest odwrotnie. W nowoczesnych metodach projektowania przemysłowego opracowuje się serię wirtualnych maszyn (układów) i bada symulacyjnie. Dopiero po uzyskaniu satysfakcjonujących rezultatów technicznych i ocenie kosztów prototypu przechodzi się do jego realizacji technicznej. W ten sposób obniża się znacznie koszty badań i koszty produkcji.

Aby wyjaśnić istotę pomysłu, czyli wyznaczenia współczynnika jakości modelu opartego na logice rozmytej - VCMF, Autor pracy przedstawia bogato ilustrowane wprowadzenie w logikę rozmytą. Zdaniem recenzenta, można byłoby je nieco zredukować na korzyść prezentacji metod alternatywnych, np. opartych na konwersji informacji i kategoryzacji.

Badanie skuteczności wyznaczania współczynnika jakości modelu jest testowane na trzech bardzo prostych obiektach: kaskadzie dwóch zbiorników, wahadle matematycznym i przenośniku taśmowym. W przypadku dwóch pierwszych modeli Autor pracy ograniczył się do poinformowania, że ciągi czasowe pochodzą z firmy Mathworks, co domyślnie powinno gwarantować ich jakość. Jest to ryzykowne założenie, zwłaszcza po obejrzeniu rysunku 4.1. Widać na nim nieznaczne fluktuacje przebiegu. Pytanie, co jest ich przyczyną? Nie szum układów pomiarowych jak sądzi większość studentów, ale błąd technologiczny, polegający na tym, że woda do obu zbiorników wlewa się wprost z zaworu i rury, spadając z pluskiem na powierzchnię (instalacje dydaktyczne). W instalacjach przemysłowych woda kierowana jest na ścianę zbiornika. Nie generuje to „szumu” pomiarowego spowodowanego falowaniem wody. Opisany powyżej przypadek i podobne powinny być uwzględniane w eksperckiej analizie wyników, do której dąży (i o niej mówi) doktorant. W przypadku wahadła, podane na str. 70 dane wskazują, że badane jest wahadło matematyczne (małe wychylenia, model liniowy). Tymczasem rys. 4.14 wskazuje, że dane dotyczą wahadła fizycznego (duże wychylenia, około  $3/4$  radiana), gdzie model dynamiki jest nieliniowy. Najbardziej interesujący jest model trzeci, na który składa się: dynamika falownika (modulator PWM+ regulator prądu), dynamika napędu (silnik) oraz dynamika przenośnika taśmowego z najciekawszym składnikiem modelu, czyli tarciami. Analiza przebiegów czasowych przedstawiona na stronach 106-114 pokazuje, że taki układ ma charakter nieliniowy i może być przybliżanym modelem NARMAX z wielomianami stosunkowo wysokich rzędów, odpowiednio NAR- 5 rzędu oraz MAX – 10 rzędu. Nie jest to szczególnie dziwne z uwagi na bezpośredni związek momentu napędowego z momentem tarcia (charakter dyssypacyjny).

Bardzo wartościowa część pracy dotyczy badania skuteczności metody VCMF. Szczególnie interesujące jest przemieszczanie „pudełka” dopasowania modelu w obrębie grupy „DOBRYCH” i „ZŁYCH” modeli, w kierunku rozwiązania najmocniej różnicującego wyniki pomiędzy tymi grupami. Jest to istotna wartość dodana metody, która musi być jednak sprawdzona na wielu innych obiektach (stanowiskach). Natomiast niezwykle użyteczne byłoby dodanie animacji tego procesu do oprogramowania testującego, zwłaszcza w kontekście wykorzystania metody VCMF do detekcji stanów awaryjnych.

Pewnym niedostatkiem pracy jest brak opisu użytego oprogramowania (technologia, standardy, biblioteki, pakiety,...) z zaznaczeniem co jest samodzielnym osiągnięciem Autora. Zaprezentowane obiekty i testy nie obejmują wprawdzie wielu ważnych grup systemów automatyki przemysłowej, warto jednak zauważyć, że są one dość reprezentatywne dla szerokiej grupy problemów (kaskady obiektów inercyjnych, obiekty oscylacyjne, obiekty z opóźnieniem transportowym). Dla wszystkich opisanych przykładów proponowana metoda działa, skutecznie wyznaczając wiarygodny model. Wartość pracy jest widoczna również w tym, że Doktorant szczegółowo analizuje dane obiektowe, korzystając z nowoczesnych metod opartych na logice rozmytej. Wymienione osiągnięcia mogą stanowić podstawę do dalszych badań i wnoszą wkład Doktoranta w rozwój dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika.

#### **4. Edytorska ocena pracy i uwagi dyskusyjne**

Praca jest zredagowana starannie, zawiera dużą liczbę ilustracji (w większości kolorowych), co bardzo ułatwia analizę otrzymanych rezultatów pochodzących z badań laboratoryjnych. Ten proces wspomagają również tabele, które pozwalają na wnikanie w szczegóły wyników. Wydaje się, że praca nie zawiera błędów edytorskich. Jest to prawdopodobnie wynikiem uważnej korekty autorskiej tekstu. Poniżej wymieniam kilka uwag krytycznych lub dyskusyjnych, które nasunęły mi się po przeczytaniu pracy:

1. Praca nie jest zbyt dobrze zbalansowana. Można byłoby zredukować opis nowych technik symulacyjnych z licznymi informacjami popularyzującymi. Zamiast tego można byłoby włączyć informacje o budowie symulatorów, wykorzystywanych strukturach danych, synchronizacji procesów działających z różnymi okresami cyklu, interpretacji graficznej wyników (fascynujący temat).



2. Brakuje opisu matematycznego badanych modeli. Chodzi o modele wykorzystywane w technikach symulacyjnych, czyli formy implementacyjne. Czy Autor korzystał z takich modeli?
3. Aby pokazać siłę i wartość metody VCMF należałoby uruchomić model o odpowiednim stopniu złożoności i silnymi interakcjami wewnętrznymi (system nieliniowy, z co najmniej stu ciągłymi zmiennymi stanu i kilkudziesięcioma stanami binarnymi). Czy takie próby były podejmowane?
4. Rys. 4.26 powinien zawierać fragmenty powiększające istotne składowe przebiegów czasowych (zoom), bo są one nieczytelne.

## 5. Podsumowanie

Zaproponowaną metodę wyznaczania współczynnika jakości modelu opartego na logice rozmytej - VCMF, można uznać za oryginalny wkład Doktoranta do dyscypliny naukowej *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne*. Rozwiązane zagadnienia mogą zostać wykorzystane szeroko praktycznie, co potwierdza jedno z przeprowadzonych badań.

Doktorant wykazał się umiejętnością poprawnego wyboru i sformułowania naukowego celu pracy, do którego konsekwentnie zdążył i cel ten osiągnął. Jest to dowód na to, że doktorant ma zdolność do prowadzenia samodzielnej pracy naukowej.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Łukasza Głodka spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone w artykule 187 ust. 1 i ust. 2 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. z 2018 poz. 1668 z późn. zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Ryszard Leniowski