

Kraków 06 11 2023 r.

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Oprzędkiewicz,
AGH, Wydział EAIiB
Katedra Automatyki i Robotyki

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

wpłynęło dnia 09.11.2023

nr zał.

Recenzja

Rozprawy doktorskiej

Mgr inż. Łukasza Głodka

Tytuł rozprawy:

„Zastosowanie systemów rozmytych do oceny jakości modeli na potrzeby wirtualnego rozruchu systemów automatyki przemysłowej”

Dziedzina: nauki inżynierijno-techniczne

Dyscyplina: Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne

Recenzowana praca powstała pod kierunkiem naukowym dra hab. inż. Witolda Noconia, prof. PŚI i dr inż. Anety Szyda (promotor pomocniczy). Recenzję przygotowano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny AEEiTK Politechniki Śląskiej z dnia 26 09 2023r. Prace nad rozprawą odbywały się w ramach programu „Doktorat Wdrożeniowy”, co implikuje, że uzyskane wyniki muszą wpisywać się w aktualne potrzeby współpracującej firmy ProPoint S.A.

1. Zakres i cel rozprawy

Obecnie w warunkach przemysłowych obserwuje się coraz większe zapotrzebowanie na opracowanie nowych metod i technik symulacji cyfrowej, pozwalających na konstrukcję systemów tzw. „wirtualnego rozruchu”, które pozwalają na znaczne przyspieszenie projektowania i weryfikacji nowych systemów sterowania oraz ułatwiają i obniżają koszty szkolenia obsługi linii technologicznych. Wirtualny rozruch pozwala na weryfikację konfiguracji sprzętowo-programowej systemu produkcyjnego i umożliwia eliminację znacznej części błędów konfiguracyjnych jeszcze przed rzeczywistymi testami, które w warunkach przemysłowych zawsze wiążą się ze stratami czasu, energii i surowców.

W przypadku wirtualnego rozruchu jednym z najważniejszych zagadnień jest weryfikacja modelu uruchamianego obiektu. Model powinien z zadaną dokładnością odzwierciedlać działanie rzeczywistego systemu i jego reakcję na sygnały z otoczenia, zarówno sterujące jak i zakłócające. Z tego względu bardzo istotnym elementem oceny każdego modelu jest wybór odpowiedniego wskaźnika jakości, który pozwala w jednoznaczny sposób ocenić przydatność modelu w systemie wirtualnego rozruchu.

Różne wskaźniki jakości modeli są znane i stosowane od wielu lat, natomiast ich zastosowanie w systemach wirtualnego rozruchu napotyka często na trudności związane choćby z różnymi zakresami wartości zwracanymi przez różne wskaźniki, co powoduje, że wyniki nie są porównywalne. Dodatkowo, w wielu sytuacjach wymaga się, żeby wskaźnik jakości był w stanie uwzględnić również wiedzę ekspercką z zakresu inżynierii modelowanego procesu i systemów wirtualnego rozruchu. Analiza „state of the art” z zakresu pracy wskazuje, że obecnie problem określenia jakości modelu i poprawności odwzorowania pierwowzoru nie został jeszcze w pełni zbadany.

Podsumowując, **cel naukowy pracy**, (podany jako „cel badawczy” na s. 15) może być uznany za trafny i istotny z punktu widzenia zarówno naukowego, jak i aplikacyjnego w przemyśle. Brzmi on następująco:

Celem badawczym jest wdrożenie nowej metody do oceny jakości modeli na potrzeby wirtualnego uruchomienia systemów automatyki przemysłowej z użyciem systemów wnioskowania rozmytego. Metoda ta pozwala na efektywną ocenę modelu na podstawie danych pomiarowych zebranych z systemu automatyki przemysłowej (linii produkcyjnej).

W celu realizacji powyższego celu pracy zaproponowano i rozwiązano następujące główne zagadnienia badawcze:

- Konstrukcja systemu wnioskowania rozmytego VCMF (ang. Virtual Commissioning-Model-Fuzzy Coefficient) w celu oceny jakości modelu,
- Zastosowanie wiedzy eksperckiej z zakresu wirtualnego uruchomienia do stworzenia bazy wiedzy systemu rozmytego.

2. Przegląd treści rozprawy

Tekst rozprawy liczy 143 strony i został podzielony na 6 rozdziałów, bibliografię, wykaz skrótów, spis rysunków i spis tabel. Przegląd treści rozprawy jest omówiony poniżej.

Na początku zamieszczono spisy tabel i rysunków oraz wykaz skrótów.

Rozdziały 1 i 2 stanowią wprowadzenie w tematykę rozprawy.

We Wstępie podano cel badawczy pracy oraz sformułowano tematy zadań niezbędnych do jego realizacji. Uzasadniono też celowość stosowania wirtualnego rozruchu w przemyśle.

W Rozdziale 2 zaprezentowano obszerny przegląd „state of the art” z zakresu rozważanego problemu badawczego.

Na początku omówiono techniki wizualizacji i symulacji, wprowadzono pojęcia „cyfrowego bliźniaka”, „cyfrowego cienia” i wirtualnego uruchomienia instalacji. Omówiono też analizę rynkową istniejących rozwiązań wraz ze wskazaniem ich obecnych ograniczeń i perspektyw na rozwój.

W drugiej części tego rozdziału omówiono znane obecnie metody oceny jakości modeli stosowanych w wirtualnym rozruchu. W oparciu o literaturę zaprezentowano 16 wskaźników jakości modeli stosowanych przy wirtualnym rozruchu. Zaprezentowano też obszerną dyskusję zalet i wad poszczególnych wskaźników i szczegółowo uzasadniono sens podjęcia rozważanej w pracy tematyki badawczej.

Ostatnia część tego rozdziału wprowadza w tematykę logiki rozmytej w ujęciu niezbędnym do prezentacji głównych rezultatów rozprawy. Omówiono tu także heurystyczne metody optymalizacji stosowane do parametryzacji funkcji przynależności: algorytm genetyczny, optymalizację rojem cząstek, algorytm wyszukiwania wzorca i symulowane wyżarzanie.

Główne osiągnięcia rozprawy są omówione w rozdziałach 3, 4 i 5.

Rozdział 3 na początku opisuje obiekty doświadczalne i zbiory danych z nich pozyskane. Do eksperymentów wykorzystano: laboratoryjną kaskadę dwóch zbiorników liniowych, wahadło i przenośnik paskowy. Dane pomiarowe dla zbiorników i wahadła uzyskano z benchmarka firmy Mathworks, przenośnik paskowy jest autorskim stanowiskiem badawczym dostępnym w firmie.

W dalszej części tego rozdziału (3.2) zaproponowano algorytm wstępnej analizy danych wykorzystującej podejście statystyczne oraz analizę szeregów czasowych. Do wizualizacji danych wykorzystano wykresy pudełkowe. Cechy rozkładów szacowano za pomocą testu Shapiro-Wilka (sprawdzenie, czy dane są opisane rozkładem normalnym), następnie wyznaczono współczynniki korelacji Spearmana i Pearsona. Stacjonarność została sprawdzona z wykorzystaniem testu Dickeya-Fullera. Podano także metodę szacowania sezonowości danych oraz zaprezentowano najpopularniejsze modele szeregów czasowych: AR, MA, ARIMA, NARMAX, AR(p), MA(q), ARMA(p,q). W tym podrozdziale również udowodniono na podstawie rozważanych danych, że użycie pojedynczego wskaźnika jakości nie zawsze pozwala na prawidłowe wykrycie niepoprawnych danych.

W kolejnym podrozdziale (3.3) zaprezentowano opracowany przez Autora nowy algorytm weryfikacji jakości modelu VCMF (Virtual Commissioning-Model-Fuzzy coefficient). Bazuje on na logice rozmytej (podejście Takagi-Sugeno-Kanga) i wykorzystuje cztery powszechnie stosowane metody oceny jakości modelu: NRMSE, ME, MAE oraz MIA. Reguły warunkowe logiki rozmytej pozwalają na uwzględnienie wiedzy eksperckiej z zakresu wirtualnego rozruchu i systemów automatyki przemysłowej a także pozwalają opisać uwarunkowania biznesowe. W typowej sytuacji tego typu warunki są nieprecyzyjne i mogą być opisane wartościami liczbowymi jedynie w nielicznych przypadkach (np. maksymalna dopuszczalna wartość określonego błędu).

W rozważanym wypadku na podstawie wiedzy eksperta dobrano kształt funkcji przynależności oraz określono progowe wartości błędów.

Parametry funkcji przynależności dobrano dwiema metodami: statystyczną oraz z wykorzystaniem biologicznych algorytmów optymalizacyjnych (GA, PSO, SA, GP, GPS). Działanie tych metod przetestowano na danych doświadczalnych.

W Rozdziale 4 zaprezentowano weryfikację działania proponowanego algorytmu VCMF z wykorzystaniem danych doświadczalnych.

Na początku rozważono system zbiorników. Jako sygnał sterujący rozważono sterowanie pompą, jako wyjście rozważono poziom cieczy w dolnym zbiorniku. Wynik testów stacjonarności i sezonowości jest oczywisty – system jest stacjonarny. W dalszej kolejności sprawdzono liniowość modelu. Na tej podstawie wybrano model MAX(10). Zgodność jego odpowiedzi z danymi doświadczalnymi sprawdzono przy pomocy wskaźnika jakości VCMF. Jego wartość równa 81.4% pozwala stwierdzić, że proponowany model MAX(10) dobrze opisuje rozważany rzeczywisty system zbiorników.

Następnie rozważono model wahadła, sterowanego warunkiem początkowym. W tym wypadku również sprawdzono stacjonarność modelu. Dalsza analiza danych pozwoliła na zaproponowanie modelu ARMA(21,9). Wartość wskaźnika jakości modelu w tym wypadku była równa 65.5%. Jest to wartość powyżej progu odcięcia modelu, ale znacznie mniejsza, niż w poprzednim testowanym wypadku.

Na końcu dokonano analizy danych i zaproponowano modele dla przenośnika paskowego. Analiza wykazała, że należy zaproponować dwa modele i pierwszy z nich powinien opisać pobór prądu w funkcji prędkości, a drugi – moment obrotowy w funkcji prędkości. Wykazano także, że przebiegi czasowe prądu są stacjonarne, a przebiegi prędkości i momentu obrotowego są niestacjonarne. Dalsza analiza statystyczna pozwoliła na zaproponowanie modelu NAR(5)MA(10)X do opisu prądu, a do opisu momentu modelu AR(3)X.

Rozdział 5 stanowi szczegółową dyskusję zalet i ograniczeń proponowanego w rozprawie podejścia. W tym rozdziale dokonano porównania działania proponowanego wskaźnika jakości VCMF z innymi, wcześniej znanymi z literatury. W tym celu podjęto próbę odróżnienia modelu poprawnego od niepoprawnego z wykorzystaniem wskaźnika VCMF oraz innych miar jakości wzmiankowanych w pracy dla modeli przenośnika paskowego. W pierwszej kolejności wyznaczono wartości wszystkich wskaźników, następnie każda miara została przetestowana z wykorzystaniem testu Wilcoxon'a i wykresów pudełkowych.

W Rozdziale 6 podsumowano główne rezultaty pracy i podano przykładowe kierunki innych zastosowania opracowanego algorytmu VCMF. Wskazano tu bardzo istotny i interesujący obszar, jakim jest automatyczna detekcja i predykcja stanów awaryjnych maszyn i urządzeń na podstawie porównania sygnałów na bieżąco mierzonych z sygnałami wzorcowymi otrzymanymi z modelu.

Na końcu pracy znajduje się Bibliografia. Liczy ona 121 pozycji i jest dobrana w sposób trafny i w pełni potwierdza dobre osadzenie problematyki pracy w aktualnym stanie badań z obszaru metod modelowania i wirtualnego rozruchu. Na podkreślenie zasługuje bardzo dokładne omówienie tej literatury w rozdziale 2 rozprawy.

3.Osiągnięcia rozprawy

Na podstawie analizy treści rozprawy można wskazać następujące główne osiągnięcia rozprawy:

(O1) Przygotowanie wnikliwej i obszernej analizy stanu obecnego i perspektyw rozwoju „Cyfrowego Bliźniaka” (ang. Digital Twin) oraz Wirtualnego Rozruchu. Analiza ta obejmuje aspekty zarówno czysto techniczne, jak też rynkowo-ekonomiczne. Omówione są także powiązania tych podejść z przemysłem 4.0.

(O2) Opracowanie metody wstępnej obróbki danych pomiarowych i wyboru modelu procesu na podstawie zachowania się tych danych. Metoda ta bazuje na analizie szeregów czasowych i znanych narzędziach statystycznych (m. in. wykres pudełkowy, test Shapiro-Wilka, test Dickeya-Fullera), jednakże może być uznana za nowe podejście w tym obszarze.

(O3) Opracowanie autorskiego algorytmu oceny jakości modelu VCMF (ang. Virtual Commissioning-Model-Fuzzy Coefficient) bazującego na logice rozmytej i wcześniej znanych wskaźnikach jakości. Proponowana metoda uwzględnia wiedzę ekspercką i może być wykorzystana zarówno do weryfikacji modeli stosowanych w systemach wirtualnego rozruchu jak też do sprawdzania poprawności pracy rzeczywistego systemu technicznego na podstawie porównania danych pomiarowych z systemu z sygnałami wzorcowymi.

(O4) Opracowanie metody doboru i parametryzacji funkcji przynależności stosowanej w funkcji VCMF. Metoda ta wykorzystuje inspirowane biologicznie algorytmy optymalizacji.

(O5) Porównanie różnych wskaźników jakości pod kątem ich przydatności do weryfikacji poprawności „cyfrowych bliźniaków” stosowanych w systemach wirtualnego rozruchu i układach monitorowania poprawności pracy urządzeń.

(O6) Wykorzystanie prezentowanych w pracy wyników w projekcie NCBiR realizowanym przez firmę PROPOINT S.A. pt. „Opracowanie innowacyjnej usługi przewidywania i wczesnego ostrzegania o możliwych awariach linii produkcyjnych”.

4. Uwagi dyskusyjne

Podczas lektury recenzowanej rozprawy nasunęły się również pewne uwagi o charakterze dyskusyjnym. Część z nich ma naturę bardziej ogólną, pozostałe są szczegółowe. Są one podane poniżej.

4.1. Uwagi ogólne

(UO1) W pracy rozważono modelowanie typowych i dość prostych systemów dynamicznych: systemu zbiorników liniowych, wahadła i przenośnika paskowego. Dla każdego z tych systemów znany jest jego dokładny model w postaci równania stanu (liniowego lub nieliniowego). Dlaczego w żadnym z rozważanych przypadków nie zastosowano takiego dokładnego modelu do weryfikacji wybranych modeli lub jako źródła sygnałów doświadczalnych?

(UO2) Dwa spośród trzech modelowanych systemów (system zbiorników i wahadło) są stosunkowo prostymi obiektami laboratoryjnymi i zebrane z nich pomiary są raczej słabym przykładem pomiarów przemysłowych. Jaki był sens ich stosowania?

(UO3) Podczas zapoznania się z wykazem literatury zdziwienie budzi fakt, że została w nim wykazana tylko jedna publikacja Doktoranta, choć tematyka poruszana w pracy jest stosunkowo nowa i niezwykle istotna z punktu widzenia zarówno naukowego i aplikacyjnego.

(UO4) W przypadku zastosowania rozważanego algorytmu VCMF do wykrywania i predykcji uszkodzeń wymagana byłaby jego praca w „twardym” czasie rzeczywistym. Czy ten problem był rozważany?

4.2. Uwagi szczegółowe

(US1) s. 26, pod rys 2.8 pojawia się stwierdzenie, że „cyfrowy bliźniak” modeluje tylko zachowanie się obiektu w stanie ustalonym. Nie do końca można się z tym zgodzić, gdyż dynamika systemu jest równie ważna (a w niektórych sytuacjach nawet

ważniejsza) w jego modelowaniu, jak własności statyczne. Dodatkowo – modele szeregów czasowych opisują dynamikę.

(US2) s. 63¹⁴- tu chodzi chyba o metody „wyostrzania”? Dodatkowo – przydałyby się tu proste rysunki ilustrujące ideę działania poszczególnych prezentowanych metod.

(US3) s. 64₇ – Tu warto dodać, że dynamika w układzie rozmytym może być też uwzględniona w taki sposób, że np. wyjście z elementu dynamicznego jest poddane fuzyfikacji i później uwzględniane podczas wnioskowania (zasada konstrukcji rozmytego regulatora PID).

(US5) s. 71 – jakie są podstawowe założenia przy budowie modelu klasy „gray box”?

(US6) s. 95 1 zdanie – co oznacza „znormalizowane napięcie pompy”? Czy jest to zakres ciągły 0 – 10 [V] podawany na falownik, czy sygnał PWM z zakresu 0-100%?

(US7) s. 99 – jakie inne modele były rozważane oprócz ostatecznie wybranego modelu MAX? Jakie były wartości wskaźnika VCMF dla nich, które decydowały o ich odrzuceniu?

(US9) s. 105 – wartość VCMF dla najlepszego wybranego modelu wahadła jest znacznie niższa, niż dla modelu zbiorników, tuż ponad progiem odcięcia, równym 64.6%. Warto to skomentować, bo najbardziej oczywisty wniosek jest taki, że nawet ten najlepszy model nie jest zbyt dobrej jakości. Może tu warto rozważyć jeszcze model dokładny w postaci równania stanu?

(US10) s. 105 – przed rys. 4.15 – jaki konkretnie punkt pracy rozważono?

(US11) s. 114 - na czym polegało to "błędne" przypisanie? Ponadto - dlaczego w tym wypadku nie podano % wartości VCMF dla każdego z modeli, analogicznie, jak wcześniej? Wartości VCMF można znaleźć dopiero w tabeli 5.1 w rozdziale 5, ale nie wiadomo, do którego z dwóch modeli się odnoszą?

(US12) s. 115 – należy rozumieć, że wykres 5.1 odnosi się do przenośnika?

5. Strona formalna

Od strony formalnej tekst rozprawy nie budzi większych zastrzeżeń, językowo jest generalnie poprawny i „łatwy w czytaniu”. Można sformułować następujące uwagi redakcyjne:

(R1) Dyskusyjna może być lokalizacja sekcji 6 podrozdziału 3.2 (s. 79 i dalej), gdyż w mojej opinii powinna ona się być znaleźć w rozdziale 2, w całości poświęconym omówieniu podstaw teoretycznych pracy.

(R2) Lepszy tytuł rozdziału 5 w mojej opinii byłby np. „Dyskusja wyników”.

Poza tym od strony edytorskiej praca jest przygotowana starannie, w trakcie czytania dostrzeżono nieliczne „literówki”, błędy językowe i interpunkcyjne, przykładowo:

(L1) s. 3 - Rozdział „Wstęp” ma zaraz poniżej podrozdział „wstęp i opis problemu”

(L2) s. 14₈ – „...obiekty badawcze..” powinny być w liczbie mnogiej, bo rozważono trzy, a nie jeden.

(L3) s. 15¹²- lepiej : „...rozbudowę modelu..”

(L4) s. 30³ – lepiej: „...budowa modelu maszyny..” (liczba pojedyncza).

(L5) s. 43₃ – lepiej: „...w przemyśle..”

(L6) s. 63¹² – zamiast „wartości numerycznej” lepiej np. tak: „pojedynczej, „ostrej” wartości liczbowej..”

(L7) s. 69₆ – literówka

(L8) s. 104 – podpis pod rysunkiem 4.14 powinien być raczej: "porównanie odpowiedzi wahadła i modelu".

6.Podsumowanie

Na podstawie przeglądu treści rozprawy stwierdzam, że jej Autor posiada głęboką wiedzę teoretyczną z zakresu analizy szeregów czasowych, statystycznych metod identyfikacji, wnioskowania rozmytego i inspirowanych biologicznie metod optymalizacji oraz zastosowania tych narzędzi w konstrukcji „cyfrowego bliźniaka” i systemów wirtualnego rozruchu systemów technicznych. Wykazał się także kreatywnością, umiejętnością krytycznej analizy zarówno istniejących, jak i własnych rozwiązań, co wskazuje na umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Rozprawa prezentuje oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego, którym jest opracowanie nowej metody oceny jakości modeli stosowanych w systemach wirtualnego rozruchu. W ramach postawionego zadania należało też opracować system wstępnej obróbki i analizy danych pomiarowych oraz dokonać weryfikacji działania opracowanej metody. Na podkreślenie zasługuje też fakt, że opracowany algorytm VCMF został już praktycznie wykorzystany w projekcie NCBiR.

Jednocześnie zdecydowanie stwierdzam, że uwagi dyskusyjne podane w punktach 4 i 5 nie umniejszają wartości ocenianej rozprawy.

Podsumowując, stwierdzam, że przedłożona do zaopiniowania rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Łukasza Głodka spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określonym 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.). Wnioskuje zatem do Wysokiej Komisji powołanej przez Radę Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej w Gliwicach o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej Autora, mgr inż. Łukasza Głodka do publicznej obrony.

