

dr hab. inż. Paweł Wachel, prof. ucz.
Katedra Automatyki, Mechatroniki i Systemów Sterowania
Wydział Informatyki i Telekomunikacji
Politechnika Wrocławska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

Wrocław 11.12.2023r.

WPLYNĘŁO
2023 -12- 14
dn.....

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Michała Falkowskiego

pt.: "Root cause analysis in complex multi-loop control systems"

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Falkowskiego przygotowana została w związku ze zleceniem Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Warszawskiej, wyrażonym w piśmie z dnia 24.10.2023 r.

1. Problem badawczy i jego znaczenie

Przedłożona do recenzji rozprawa dotyczy problematyki badania zależności przyczynowo–skutkowych w złożonych systemach sterowania, w tym w wielopętlowych procesach przemysłowych. W systemach tych często występuje szereg trudności analitycznych oraz interpretacyjnych, których źródłem jest m.in. brak dostatecznej wiedzy o wzajemnych relacjach przyczynowo–skutkowych pomiędzy mierzonymi sygnałami. W tym kontekście jednym z problemów badawczych pracy jest próba odpowiedzi na pytanie, które z dostępnych narzędzi formalnych (statystycznych) pozwalają na efektywną analizę przyczynowości w zadaniach sterowania. Tak sformułowany problem jest niewątpliwie istotny zarówno ze względów poznawczych jak i zastosowań praktycznych. Co ważne, jest on aktualny na tle wyników prezentowanych w literaturze, na co wskazują m.in. przytoczone w pracy pozycje bibliograficzne.

Powyzszy cel realizowany jest m.in. poprzez przeglądową dyskusję własności wybranych metod, w tym podejścia korelacyjnego, analizy koherencyjnej, czy tzw. przyczynowości Grangera. Przedstawiona w pracy dyskusja wskazuje przy tym na kluczowe ograniczenia związane z ww. technikami (np. poprzez

wymaganie liniowości) i stanowi wstępne uzasadnienie dla omówienia tzw. współczynnika *Transfer Entropy* (TE), który uznać należy za trzon technik diskutowanych w rozprawie. Głównym celem pracy jest bowiem zastosowanie i analiza potencjału współczynnika TE w badaniu przyczynowo-skutkowej propagacji błędów regulacji występujących w układach sterowania. Cel ten należy uznać za aktualny, interesujący i ważny na gruncie poznawczym, bowiem prowadzi do ujęcia problemów z obszaru teorii sterowania za pomocą nowych technik z dziedziny teorii informacji. W ramach powyższego, w pracy zaproponowano modyfikacje współczynnika *Transfer Entropy* istotne z punktu widzenia zastosowań w układach sterowania oraz skonstruowano kompleksową metodologię prowadzenia badań w ww. zakresie. Dokonano także symulacyjnej i eksperymentalnej analizy opracowanego podejścia.

2. Ocena struktury i zawartości pracy

Recenzowana rozprawa liczy 189 stron i napisana została w języku angielskim. Jej treść podzielono na jedenaście rozdziałów, poprzedzonych streszczeniem w języku polskim i angielskim. Praca zawiera spis rysunków, tabel, wykorzystywanych skrótów, oznaczeń fizycznych/chemicznych i symboli oraz odniesień bibliograficznych.

Rozdział pierwszy stanowi krótkie wprowadzenie w tematykę badania przyczynowości i przedstawia ogólną strukturę pracy. Zasadniczym celem rozdziału drugiego jest sformułowanie kontekstu naukowego prowadzonych badań w odniesieniu do aktualnych wyników naukowych prezentowanych w literaturze. W rozdziale trzecim przedstawiono problem badania przyczynowości w systemach sterowania ze sprzężeniem zwrotnym oraz dokonano obszernego przeglądu narzędzi statystycznych, istotnych z punktu widzenia omawianej tematyki. W szczególności przedstawiono koncepcję metod autokorelacyjnych, podejście Grangera oraz jedną z technik częstotliwościowych, tj. *Partial Directed Coherence*. Szczególnym elementem rozdziału jest omówienie koncepcji badania przyczynowości w oparciu o współczynnik *Transfer Entropy* (TS). Rozdział ten zawiera także omówienie wybranych koncepcji z zakresu modelowania parametrycznego i nieparametrycznego, w tym omówienie własności wybranych funkcji gęstości prawdopodobieństwa. W rozdziale czwartym przedstawiono model symulacyjny skonstruowany na potrzeby prowadzonych badań oraz przedstawiono rzeczywisty proces przemysłowy, wykorzystywany w produkcji związków chemicznych. Dwa kolejne rozdziały skupiają się na zastosowaniach współczynnika TE w ujęciu klasycznym (rozdział 5) i zmodyfikowanym (rozdział 6), w którym wykorzystano inne niż gaussowskie funkcje gęstości

prawdopodobieństwa. Rozdziały siódmy, ósmy i dziewiąty zawierają z kolei rezultaty badań współczynnika *Transfer Entropy* w kontekście – odpowiednio – wpływu wielkości znacząco odstających (tzw. *outliers*), sygnałów losowych oraz sygnałów oscylacyjnych. W oparciu o uzyskane wyniki w rozdziale dziesiątym przedstawiono pogłębioną dyskusję własności badanego podejścia oraz przedstawiono konstrukcję autorskiej procedury oceny przyczynowości i rezultaty jej zastosowania w przykładowym procesie przemysłowym. Rozdział jedenasty stanowi końcową część pracy i zawiera podsumowanie rezultatów.

Przechodząc do oceny doboru źródeł literaturowych, na które powołuje się autor, należy podkreślić ich aktualność i odpowiednie dopasowanie merytoryczne. Wymienione pozycje bibliograficzne to m.in. monografie z zakresu wnioskowania statystycznego, teorii i techniki sterowania oraz inne artykuły z czasopism naukowych o tematyce wyraźnie powiązanej z treścią rozprawy. Autor przywołuje również własne prace konferencyjne oraz artykuły opublikowane w czasopismach o zasięgu międzynarodowym. Podsumowując, dobór źródeł można uznać za prawidłowy, umożliwiający umiejscowienie wyników doktoranta w szerszym kontekście prac naukowych poświęconych rozważanej tematyce.

Ogólny poziom językowy i edycyjny rozprawy oceniam bardzo wysoko. Podział treści na poszczególne rozdziały ma charakter przemyślany i spójny, a sprawną orientację w tekście ułatwiają spisy symboli i oznaczeń. Drobną niedogodnością jest być może zbyt mała czcionka zastosowana w kilku grafikach, co jednak można tłumaczyć względnym skomplikowaniem prezentowanych treści.

3. Ocena wkładu oryginalnego i zastosowanych metod badawczych

Oryginalny wkład pracy w rozwój dyscypliny można ocenić na kilku płaszczyznach, a jednym z jego elementów jest sam fakt zastosowania współczynnika TE w omawianej problematyce sterowania – zarówno w sformułowaniu podstawowym, jak i zmodyfikowanym, które proponuje autor. Istotny jest tu również szerszy kontekst zagadnień probabilistycznych i statystycznych, które doktorant przedstawia w rozdziale trzecim, w szczególności techniki omówione w sekcji 3.3 (m.in. algorytm Darbellaya-Vajdy), sekcji 3.4 (identyfikacja trendu), sekcji 3.5 (detekcja wartości odstających) oraz sekcji 3.6 dot. dekompozycji sekwencji za pomocą procedur EEMD i MEEMD. Pewnego wyjaśnienia wymaga natomiast sekcja 3.2, w której scharakteryzowano wybrane rozkłady prawdopodobieństwa. W szczególności, w p. 3.2.1, doktorant prezentuje własności rozkładu normalnego ze średnią μ i odchyleniem standardowym σ (wzór (3.15)), po czym stwierdza w równaniach (3.16) oraz (3.17), że wielkości te są równe swoim estymatorom.

Za oryginalny wkład autora należy uznać opracowanie praktycznej procedury badania przyczynowości w wielopętlowych systemach sterowania, opartej na współczynniku Transfer Entropy, której finalną strukturę w postaci schematu blokowego przedstawiono na rysunku 10.1. Oryginalnym elementem pracy jest numeryczna analiza proponowanego podejścia wykonana w oparciu o model symulacyjny (opisany w podrozdziale 4.1) oraz rzeczywisty, przemysłowy proces produkcji amoniaku (podrozdział 4.2, rozdz. 10). Uzyskane rezultaty, w przypadku zastosowania niemodyfikowanego współczynnika TE (rozdz. 5.) zawierają m.in. wyniki otrzymane przy założeniu, że zakłócenia pochodzą z rozkładu Cauchy'ego. Z jednej strony ma to uzasadnienie praktyczne (przemysłowe), a z drugiej, daje głębszy wgląd w naturę rozpatrywanej metody poprzez nawiązanie do potencjalnych trudności teoretycznych przy wnioskowaniu w oparciu o rozkłady nieposiadające momentów zwykłych i centralnych.

Analiza symulacyjna wykonana w oparciu o model skonstruowany w środowisku MATLAB/Simulink skupia się na określeniu zależności przyczynowych między uchybami regulacji $\epsilon_1, \dots, \epsilon_5$, a jej rezultaty uzasadniają zaproponowane przez doktoranta modyfikacje współczynnika TE, polegające na rozszerzeniu rozważań na rozkłady inne niż rozkład normalny. Argumentem na rzecz podejścia zmodyfikowanego są między innymi wnioski płynące z wykresów 5.6. oraz 5.7, które charakteryzują wielkości, odpowiednio, ϵ_1 oraz ϵ_2 w kontekście dopasowania rozkładu Gaussa.

Ważnym elementem pracy jest wykorzystanie współczynnika Transfer Entropy w analizie przyczynowości rzeczywistego procesu przemysłowego. W tym aspekcie należy docenić interdyscyplinarny charakter pracy, bowiem doktorant nie stroni od opisu szczegółów technologicznych badanego procesu, tj. m.in. przeprowadzanych reakcji chemicznych (wzory (4.4)), wyjaśniając kolejno ich znaczenie.

Dobór zastosowanych metod badawczych należy uznać za prawidłowy i przemyślany. Należy stwierdzić, że autor rozwiązał postawiony w pracy problem, a uzyskane rezultaty są oryginalne i dobrze umotywowane. Drobnym niedosyt pozostawia jedynie brak bardziej teoretycznego ujęcia niektórych aspektów omawianego zagadnienia. Przykładowo, opisana w p. 3.3.3 technika jądrowej estymacji gęstości prawdopodobieństwa posiada szereg udowodnionych własności formalnych, w tym m.in. dowody słabych i mocnych zbieżności probabilistycznych. Rodzi się zatem pytanie w jaki sposób ta dodatkowa, pogłębiona, informacja o własnościach teoretycznych mogłaby się przełożyć na własności omawianego w pracy podejścia.

Przechodząc do ogólnej oceny prezentacji uzyskanych wyników można

stwierdzić, że przeprowadzone badania i obserwacje umożliwiły doktorantowi wyciągnięcie poprawnych i przekonywujących wniosków dot. proponowanego podejścia (rozdz. 10). Co ważne, w dyskusji autor zawarł istotne uwagi krytyczne. W szczególności zauważył, że współczynnik TE pozwala na wykrywanie zależności w systemach z zamkniętą pętlą sterowania, jednak faktyczne określenie przyczynowości na jego podstawie może być problematyczne w praktyce, co wiąże się m.in. z doбором właściwego progu, przy którym uznaje się występowanie zależności między badanymi wielkościami.

4. Dalsze uwagi

Ogólną jednoznacznie pozytywną ocenę rozprawy chciałbym uzupełnić następującymi (drobnymi) uwagami krytycznymi oraz pytaniami do doktoranta:

- Pewnym mankamentem edytorskim pracy jest zbyt mała czcionka zastosowana w części schematów. Problem ten można było rozwiązać np. poprzez uzupełnienie schematów blokowych opisem algorytmów w postaci pseudokodów.
- Nieco bardziej pogłębionej dyskusji można było oczekiwać w kontekście systematyki metod przedstawionych w Tabeli 2.1. Przykładowo, pierwsza kolumna odnosi się do *systemów dynamicznych*, lecz nie jest jasne czy chodzi tu jedynie o systemy liniowe, czy również nieliniowe, bowiem wymienione w niej podejście DNN jest nieliniowe, a nie występuje w kolumnie drugiej, zatytułowanej *systemy nieliniowe*.
- Zamieszczone przez doktoranta odniesienia literaturowe są miejscami niekompletne (dotyczy to m.in. pierwszej pozycji bibliografii).
- Kluczową motywacją prowadzonych badań jest m.in. fakt występowania nieliniowości w rzeczywistych systemach sterowania. Ważnym rozszerzeniem badań w tym zakresie mogłaby być pogłębiona dyskusja wpływu określonych klas nieliniowości na skuteczność analizy przyczynowości za pomocą opracowanego podejścia. Przykładowo, nasuwa się pytanie jaki jest wpływ występowania w układzie nieliniowości z nieciągłościami, a także czy dodatkowa wiedza wstępna odnośnie charakteru nieliniowości mogłaby poprawić efektywność procedury wnioskowania o zależnościach przyczynowo-skutkowych?
- W ramach dyskusji technik alternatywnych do zaproponowanej, autor wymienia m.in. podejścia oparte na estymacji współczynnika korelacji. Zauważa przy tym słusznie, że metody te skupiają się na wykrywaniu zależności liniowych. W literaturze można z kolei znaleźć względnie nowe

rozszerzenie pojęcia korelacji na przypadki nieliniowe, tzw. współczynnik *Distance correlation*. Czy – zdaniem doktoranta – tego rodzaju statystyka (lub podobne) mogłyby przyczynić się do opracowania konkurencyjnych metod analizy przyczynowości w systemach sterowania?

5. Konkluzja końcowa

Uważam, że rozprawa stanowi uzasadnione merytorycznie, oryginalne rozwiązanie rozważanego problemu naukowego, a zagadnienia badawcze, z którymi zmierzył się mgr inż. Michał Falkowski, są aktualne i istotne dla postępu w dziedzinie badania wielopętlowych systemów sterowania. Ponadto uważam, że rozprawa dobrze charakteryzuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie a także wskazuje na umiejętność samodzielnego prowadzenia badań.

W związku z powyższym stwierdzam, że rozprawa spełnia wymagania Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, art. 187 ust. 1 i ust. 2 i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Michała Falkowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



dr hab. inż. Paweł Wachel, prof. ucz.