



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI
I AUTOMATYKI

WPŁYNEŁO

dn.....2024-01-03.....

Prof. dr hab. inż. Roman Śmierzchalski
tel. (+58) 348 63 27
email: roman.smierzchalski@pg.edu.pl

Gdańsk, 20 grudnia 2023 r.

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY DYSCYPLINY
AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA, ELEKTROTECHNIKA I TECHNOLOGIE KOSMICZNE
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

Tytuł rozprawy: **Root cause analysis in complex multi-loop control systems**

Autor rozprawy: **mgr inż. Michał Falkowski**

1. Jakie zagadnienie naukowe/badawczy jest rozpatrzone w pracy /cel rozprawy/ i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora?

Rozwój technik komputerowych spowodował w okresie ostatnich lat powstanie nowych metod obliczeniowych, programów oraz technologii, zwłaszcza dotyczących sterowania i nadzoru nad rozproszonymi procesami przemysłowymi, gdzie obiektami sterowania są w większości obiekty nieliniowe. Warunkiem prawidłowego sterowania i nadzoru nad procesami przemysłowymi jest uzyskanie miarodajnych danych procesowych. Jednak w większości przypadków uzyskiwane dane są zwykle niekompletne oraz zniekształcone przez nieidentyfikowane szумы, błędy pomiarowe czy usterki. Istotnym jest wczesne wykrywanie i filtrowanie błędów danych procesowych, co jest możliwe dzięki analizie przyczynowo-skutkowej. Istnieje szereg metod i prac dotyczących rozwiązania tego typu problemów. Ogólnie metody te mogą być podzielone na te, które wymagają modelu badanego obiektu i metody bez uwzględniania modelu. Jednak obecnie w praktyce, przy analizie przyczynowości najczęściej stosowane są metody oparte na dynamice procesu, przy dużym poziomie dostępności danych i określonych zakłóceniach. W większości dotyczy to warunkowych rozwiązań, takich jak analiza krzyżowej korelacji, przyczynowość Grangera, metody częstotliwościowe i sieci bayesowskie. Jednak takie podejścia są w znacznym stopniu ograniczone i niewydajne w procesach przemysłowych, w których występują różnego rodzaju usterki. W związku z tym, aby utrzymać wysoką wydajność i efektywność procesów przemysłowych, konieczne jest opracowanie szybkich, dokładnych i skutecznych narzędzi do wykrywania i diagnozowania błędów procesu lub uszkodzeń urządzeń, które mogą pogorszyć wydajność całego systemu.

W pracy doktorskiej zaproponowano rozwiązanie zagadnienia analizy przyczynowości z zastosowaniem metody Transfer Entropy. Metoda była stosowana głównie w aplikacjach symulacyjnych. Jednak jak dotąd badania nie oparto o rzeczywiste dane z procesy przemysłowe, co jest właśnie podstawą badawczą pracy. Praca doktorska mgr. inż. Michała Falkowskiego obejmuje zastosowanie analizy przyczynowości i podejścia Transfer Entropy w kontekście inżynierii, szczególnie w aspekcie błędów regulacji. Ma to na celu identyfikację związków przyczynowo-skutkowych pomiędzy sygnałami i błędami przy użyciu danych i/lub informacji procesowych. Analiza przyczynowości pozwala na podstawie danych tworzenie modeli układów przemysłowych, uwzględniających wiele pętli sterowania. Istotne w tym zagadnieniu jest znalezienie odpowiednich relacji między sygnałami składowymi systemu. Przy czym należy wskazać, że istniejące metody w większości oparte na założeniach o liniowości modeli mogą być niewystarczające w przypadku nieliniowych procesów przemysłowych. W istocie rzeczywiste procesy przemysłowe są nieliniowe, co utrudnia korzystanie z metod zakładających zależności liniowe. Autor opracował kompleksową metodologię przyczynowo-skutkową, zweryfikowaną zarówno przy użyciu symulacyjnych, jak i rzeczywistych danych procesowych. W celu zwiększenia wiarygodności badań w analizie zrezygnowano z podejścia opartego na modelu, aby uniezależnić rezultaty od ewentualnych błędów modelu.

Praca jest zorganizowana w sposób logiczny co pozwala na przeanalizowanie istoty rozwiązywanego problemu. W części wstępnej Autor opisuje uzasadnienie problemu i argumentuje zasadność poszukiwania

rozwiązań dla rozważanego problemu. Następnie przedstawia wybrane metody, podnosząc kwestie analizy pierwotnej przyczynowości, opisuje system symulacyjny wykorzystywany w obliczeniach i przedstawia rzeczywisty system przemysłowy jako przykład studium przypadku. Autor prezentuje wyniki badań przeprowadzonych na danych symulacyjnych, używając metody Transfer Entropy w jej podstawowej wersji. Najważniejszą częścią pracy stanowią autorskie rozwiązania, gdzie wprowadza się rozważania na temat wrażliwości parametrów metody Transfer Entropy na przyczynowość, wpływu dopasowania funkcji gęstości prawdopodobieństwa na jakość uzyskanych wyników. Autor skupia się na naturze analizowanych danych, która wpływa na wyniki, a konkretnie na istnienie odstępstw w danych. Ponadto analizuje wpływ składników testowanych sygnałów (w tym przypadku szumów) na analizę pierwotnej przyczyny. W dalszej części badań oscylacje są wykorzystane jako kolejny składnik danych do analizy. W części końcowej Autor zaproponował procedury analityczne, uzasadniając ich stosowalność na podstawie przykładu uwzględniającego rozwiązanie przemysłowe. Podsumowując Autor prezentuje istotne wnioski oparte na podstawie przeprowadzonych badań i omawia zidentyfikowane dalsze kierunki badawcze.

Rozprawa doktorska wypełnia lukę w zakresie przyczynowości i podejmuje zagadnienie opracowania rozwiązań pozwalających na sformułowanie oryginalnej procedury jej oceny przy przeprowadzaniu analizy przy użyciu metody Transfer Entropy, wielopętlowych systemów sterowania. Wykorzystanie systemu symulacyjnego pozwala na zbadanie efektywności metody i zweryfikowanie opracowanej procedury w oparciu o scenariusze rzeczywiste. Ponadto efektywność procedury została zweryfikowana przy użyciu rzeczywistych danych pozyskanych z instalacji syntezy amoniaku w Zakładach Azotowych "Puławy" S.A.

Podsumowując, praca ma jasno sprecyzowany problem naukowy i wnosi istotny wkład w przeprowadzanie analizy przyczynowości z zastosowaniem metody Transfer Entropy. Prowadzi do opracowania naukowo uzasadnionej procedury oceny przyczynowości dla kompleksowej analizy złożonych wielopętlowych systemów sterowania. Proponowana metodologia dostosowuje się zarówno do błędnie dostrojonych, jak i prawidłowo dostrojonych systemów, uwzględniając jakość strojenia, przetwarzanie danych, analizę dystrybucji oraz zaawansowane techniki analizujące związki przyczynowe. Przedstawione w pracy wyniki podkreślają znaczenie wyboru metody Transfer Entropy podczas analizy przyczynowości.

Zdaniem recenzenta główny nacisk Autora skoncentrował się na opracowaniu analizy przyczynowości dla zakładów przemysłowych oraz implementację metody Transfer Entropy w praktycznych zastosowaniach. Autor wykazał się bardzo dużą umiejętnością w zakresie projektowania takiego typu systemów. Biorąc pod uwagę zakres pracy Autor opracował samodzielnie system, które może być wykorzystany w zastosowaniach praktycznych co stanowi istotny wkład w rozwiązywany problem zarówno od strony naukowej jak i aplikacyjnej.

Praca wpisuje się w zakres badawczy dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle, świadczący o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Autor dokonał przeglądu 173 źródeł, w tym głównie pod kątem stosowanej w rozprawie analizy przyczynowo-skutkowej w kontekście systemów wielkoskalowych. Większość pozycji obejmuje prace po roku 2000. Autor analizował, w oparciu o literaturę, wykrywanie i diagnozowanie usterek w dynamicznych procesach przemysłowych, korzystając z metody detekcji i izolacji usterek opartej na danych systemowych, przy występowaniu niepewności informacji. Autor wskazuje, że w części prac w tego typu zadaniach stosowane są modele procesów, które w większości przypadków są nieliniowe. Co powoduje, że identyfikacja odpowiednich modeli nieliniowych wymaga ich walidacji na podstawie zaobserwowanej różnicy między modelem wyznaczonym za pomocą testów a jego analitycznym odpowiednikiem. Inne wnioski z analizowanych prac potwierdzają, że system sterowania każdego procesu odgrywa podstawową rolę w osiągnięciu pożądanego celu procesu, np. optymalizacji wydajności procesu, osiągnięcia określonych celów produkcyjnych, przy czym sygnały generowane i wykorzystywane przez system sterowania nie są ograniczone do zmiennych sterujących, a uwzględniają dodatkowo zakłócenia, szumy, zmienność w czasie procesu i interakcje między różnymi zmiennymi. Niesterowalne sygnały wpływają na właściwe działanie systemu sterowania i mogą być wykorzystane jak stwierdza Autor do identyfikacji i diagnozowania różnych problemów, które mogą wystąpić w procesie, w tym przypadku również wykrywania usterek. Autor określił na podstawie literatury podstawowe problemy związane z pracą systemu sterowania. Między innymi analizował pomiar

wydajności pętli sterowania na podstawie oceny wydajności sterowania, poczynawszy od prostych układów regulacji PID jak i złożonych układów sterowania. Wskazał, że ta analiza może nie tylko dotyczyć wydajności pętli regulacji, ale także nieprawidłowości działa systemu i występowania rzeczywistych przyczyn błędów. Ponadto, ocena wydajności sterowania wymaga propagacji błędu między pętlami sterowania, co prowadzi do analizy przyczynowo-skutkowej. Wykrywanie i określenie zależności przyczynowo-skutkowych w układach sterowania, między zmiennymi, zdarzeniami było podstawą pracy Autora. Analiza przyczynowo-skutkowa obejmuje takie zagadnienia, jak korelację, sekwencje czasowe sygnałów, prawdopodobieństwa wystąpienia przyczyny oraz eliminację alternatywnych przyczyn. Pod tym kontem Autor analizował szereg prac obejmujących różne dziedziny i zastosowania; ponadto sklasyfikował metody analityczne, jak i z zastosowaniem sztucznej inteligencji. Na tej podstawie Autor interpretuje ogólne pojęcie przyczynowości i wprowadza koncepcję przyczynowości do praktyki eksperymentalnej, między innymi do analiz danych obserwowanych w kolejnych momentach czasowych, obejmujących szeregi czasowe szczególnie dla układów sprzężonych. Ponadto odnosząc się do rozwiązań inżynierskich przyczynowość związana z łączeniem pętli sterowania w złożonych systemach wielopętlowych wiąże się z istnieniem niepewności i z ryzykiem wynikającym z charakteru analizowanych sygnałów. Metody analizy przyczynowości Autor generalnie podzielił na metody oparte na modelach obiektu i bez uwzględnienia modeli. Jednak przy założeniu, że podejście do analizy dużych zakładów przemysłowych powinno być jak najbardziej ogólne i uniwersalne, Autor skupia się na bez modelowej metodzie Transfer Entropy, która należy do grupy metod opartych na danych. Unikając problemów związanych z modelowaniem, Autor wskazuje, że jest możliwe ograniczenie stopni swobody i potencjalnych błędów bazowych. Dokładność diagnozy zależy nie tylko od algorytmu diagnostycznego, ale również od używanej metody identyfikacji, co czyni istotnym uwzględnienie tych czynników w analizie.

Wnioski sformułowane przez Autora na podstawie przeglądu literatury są trafne i jednoznaczne, określają, że uzasadnionym jest przeprowadzanie analizy przyczynowości dla dużych zakładów przemysłowych w oparciu o bez modelową metodę Transfer Entropy, co w dalszej części pracy uzasadnia poprzez analizę zestawów danych symulacyjnych i uzyskanych z procesów rzeczywistych. Całość rozprawy świadczy o bardzo dobrych poznawczych umiejętnościach, o szerokiej wiedzy Autora w zakresie tematyki prezentowanej w pracy w szczególności dotyczącej analizy przyczynowo-skutkowej i metod tej analizy.

Według bazy Scopus Autor rozprawy posiada w swoim dorobku 6 publikacji uwzględnionych w pracy doktorskiej. Prace te przedstawiał zarówno na znaczących konferencjach jak i w czasopiśmie (2 w *Applied Sciences*), cytowane 11 razy (h-indeks 2).

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Praca skupia się na kompleksowej analizie pierwotnej przyczyny w wielopętlowych, złożonych systemach sterowania. Określa zastosowanie i znaczenie metody Transfer Entropy jako narzędzia do analizy przyczynowości w złożonych systemach. Podstawowym elementem tej pracy badawczej jest wybór odpowiedniego typu sygnałów do analizy przyczynowości. Istotą podejścia metody Transfer Entropy jest wybór błędu regulacji jako nośnika informacji. Zastosowanie technik przetwarzania danych w różnych zestawach danych symulacyjnych, w połączeniu z wielokrotnymi iteracjami metody Transfer Entropy, pozwala w sposób dynamiczny kształtowanie wyników przyczynowych. To podejście nie tylko ułatwia stosowanie obiektywnych metod analizy danych, ale również pozwala na zastosowanie wybranych metod analitycznych.

W istocie prezentowana praca podkreśla wszechstronność metody Transfer Entropy, demonstrując jej stosowalność w różnych dziedzinach, rozszerzając jej użyteczność na obszar dziedzin technicznych. Jednak konieczne jest uwzględnienie istotnych ograniczeń i warunków koniecznych dla zapewnienia skuteczności oraz odporności metody. Te ograniczenia można głównie podzielić na dwie kategorie: wynikające z charakterystyki systemu i uzyskanych danych oraz z właściwości proponowanej metody Transfer Entropy. Jednym z najbardziej istotnych ograniczeń metody Transfer Entropy jest brak obiektywnie ustalonego progu do ustalania relacji między błędami regulacji. W tym wypadku wymagane jest ponowne rozważenie kryterium wyboru tej relacji. Autor jednocześnie wskazał obszar dalszych badań, wprowadzając opóźnienia czasowe między błędami regulacji jako dodatkowego czynnika w określaniu relacji między zmiennymi.

Podsumowując, zagadnieniem, jakie Autor postanowił rozwiązać, było stworzenie efektywnego systemu do analizy przyczynowości dla dużych zakładów przemysłowych w oparciu o metodę Transfer Entropy. Opracowany system i metody, uwzględniając przedstawione badania, są właściwe i wpisują się w nurt współczesnych rozwiązań w złożonych wielopętlowych systemach sterowania.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Na samodzielny i oryginalny dorobek Autora pracy składają się:

- opracowanie kategoryzacji metod nadzoru procesu, diagnostyki i wykrywania usterek na podstawie danych procesowych pod kontem utrzymania pożądanej wydajności w procesach przemysłowych,
- analiza przyczynowości wielopętlowych złożonych systemów sterowania z zastosowaniem metod: korelacji krzyżowej, przyczynowości Grangera, koherencji ukierunkowanej oraz Transfer Entropy oraz ich porównanie,
- wybór i zastosowanie metody Transfer Entropy jako podstawowego narzędzia do analizy przyczynowości, określenie zalet (brak modelu interakcji między zmiennymi) i wad statycznych metody (dynamiczne właściwości analizowanego procesu nie zmieniają się w zbiorze wykorzystywanych danych),
- ocena parametrycznych i nieparametrycznych modeli statystycznych w analizie przyczynowości,
- analiza metod wykrywania nieprawidłowych wartości danych w tym odchylenia rozkładu studenta, przedziału ćwiartkowego i filtra Hampela oraz ich wpływ na badanie przyczynowości,
- stworzenie systemu symulacyjnego, obejmując modelowanie procesu i generację danych testowych jako narzędzie do badania wydajności i walidację opracowanej metody Transfer Entropy w oparciu w rzeczywiste scenariusze,
- przeprowadzenie badań oceniających analizę przyczynowości wielopętlowych systemów sterowania za pomocą metody Transfer Entropy, obejmujących podstawową wersję opartą na rozkładzie Gaussa oraz z użyciem modeli statystycznych parametrycznych i nieparametrycznych,
- badanie wpływu nieprawidłowych wartości danych i ich lokalizacji w zbiorze danych w procesie wnioskowania przyczynowego oraz efektywność metody Transfer Entropy,
- analiza i badanie wpływu sygnałów oscylacyjnych oraz związku przyczynowe na interakcje w metodzie Transfer Entropy,
- scharakteryzowanie analizy przyczynowości w procesie produkcji amoniaku w Grupie Azoty Zakłady Azotowe "Puławy" SA z wykorzystaniem metody Transfer Entropy,
- przeprowadzenie kompleksowej analizy identyfikacji związków przyczynowo-skutkowych, z zastosowaniem modelu symulacyjnego wielopętlowego o strukturze kaskadowej na przykładzie produkcji amoniaku.

Na szczególne podkreślenie zasługują następujące elementy:

- poprawność studiów teoretycznych i analiz naukowo-badawczych nad rozpatrywanym problemem naukowym,
 - zaproponowany temat jest aktualny w związku z potrzebami w zakresie wykorzystania w systemach złożonych
 - precyzyjne zdefiniowanie przedmiotu badań, wynikających z rozpoznania rozważanych problemów,
 - umiejętność korzystania z literatury specjalistycznej oraz formułowania oryginalnych wniosków, co dowodzi o dojrzałości naukowej Autora,
 - przyjęcie oryginalnego programu badań symulacyjnych,
 - możliwość wykorzystania wyników rozprawy do celów praktycznych,
 - bardzo staranne i przejrzyste wykonanie pracy,
 - przedstawione osiągnięcia stanowią istotne rozwinięcie w stosunku do istniejących rozwiązań przedstawianych w literaturze.
5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników /zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy?

Praca, pod względem układu i kolejności sformułowanych problemów, jest prawidłowo skonstruowana. Redakcja została wykonana z dużą starannością, a język jest poprawny. Jednakże, należy zwrócić uwagę na cykl rysunków (od rys. 10.2 do 10.15). Zdaniem recenzenta, w niektórych przypadkach występuje ich powtarzanie. Czy celowe jest umieszczanie wielokrotnie tych samych diagramów syntezy amoniaku, które odnoszą się do określonych danych w wyznaczonych miesiącach?

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Zdaniem recenzenta, praca bardzo szczegółowo przedstawia problemy badawcze. Autor z wyjątkową starannością opisuje poszczególne zagadnienia pracy.

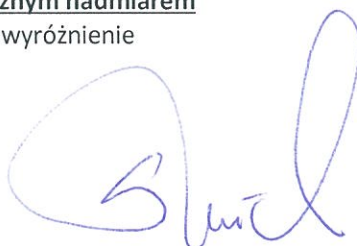
Jednakże, wydaje się, że wskazane byłoby szersze ustosunkowanie się do następujących zagadnień:

- Jedną z znaczących wad metody Entropy Transfer, spośród tych związanych bezpośrednio z samą metodą, jest brak obiektywnie określonego progu dla ustalenia zależności pomiędzy błędami sterowania. W jaki sposób ustala się próg tej zależności?
- Ważnym zagadnieniem, które Autor powinien szeroko omówić, jest strojenie metody Entropy Transfer dla przykładów danych symulacyjnych z instalacji procesów rzeczywistych. Istotne byłoby szerokie ustosunkowanie się do tego zagadnienia.
- W badaniach dąży się do uproszczenia struktury systemu sterowania. Jednak takie podejście może spowodować utratę ważnych zależności w układach sterowania. Dyskusyjne jest, na ile możliwe jest uproszczenie tej struktury.
- Zdaniem recenzenta, należałoby podjąć szerszą dyskusję na temat rozwiązań dla innych instalacji przemysłowych, co stanowiłoby poszerzenie zakresu badań.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

W recenzowanej pracy, główny nacisk został skierowany na opracowanie analizy przyczynowości metodą Transfer Entropy. Autor przedstawił nowe ujęcie zastosowania metody Transfer Entropy, gdzie efektywność metody potwierdził w oparciu o dane symulacyjne, jak i dane procesowe pozyskane z instalacji przemysłowej rzeczywistej. Autor podjął jednocześnie trudne próby strojenia metody dla specyficznych warunków. Całość pracy potwierdza duże umiejętności Autora od strony analizowanych zagadnień naukowych, jak i programistycznej. Strojenie licznych parametrów wymagało od Autora dużego nakładu czasu i doświadczenia w zakresie testowanej metody. Przedstawiona w pracy metoda i przeprowadzone symulacje mogą być wykorzystane do rozwiązywania określonej klasy zadań diagnostycznych w różnych instalacjach przemysłowych, a także mogą być wskazówkami do tworzenia nowych narzędzi rozwiązujących tego typu problemy. Praca stanowi istotny wkład w dyscyplinę naukową automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:
- a/ nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy
 - b/ wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania
 - c/ spełniająca wymagania
 - d/ spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem**
 - e/ wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie



Roman Śmierchalski