

Politechnika Krakowska
im. Tadeusza Kościuszki w Krakowie
Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej
Katedra Automatyki i Technik Informatycznych

dr hab. inż. Janusz Goldasz

Kraków, 2018-11-18

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Tomczyka
pt.

“WYKRYWANIE I IDENTYFIKACJA USZKODZEŃ ZŁOŻONEGO UKŁADU
ELEKTROMECHANICZNEGO W ICH POCZĄTKOWEJ FAZIE POWSTAWANIA METODAMI
FALKOWO-NEURONOWYMI”

Promotor pracy: dr hab. inż. MIECZYŚLAW ZAJĄC, prof. PK

Podstawa prawna oceny:

Pismo dziekana Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej prof. dr. hab. inż. Adama Jagiełły z dnia 29 września 2018 r.

1. CEL I ZAKRES ROZPRAWY

We wstępie rozprawy (Rozdział 1.2) Doktorant sformułował jedną główną tezę pracy.

- Teza główna: Istnieje możliwość efektywnej diagnostyki uszkodzeń złożonego, nieliniowego układu elektromechanicznego za pomocą uzyskanych wyników badań identyfikacyjnych przeprowadzonych w oparciu o algorytmy falkowo-neuronowe oraz metody eksploracji danych stosowane do analizy obrazów skalogramów falkowych.

Przedmiotem pracy było opracowanie własnych struktur falkowo-neuronowych umożliwiających opracowanie algorytmu diagnostycznego złożonego nieliniowego układu elektromechanicznego.

Istota problemu badawczego podjętego przez Doktoranta dotyczy, m.in. tematyki modelowania uszkodzeń we wczesnej fazie ich powstawania oraz opracowania koncepcji systemu wspomagania decyzji diagnostycznych w oparciu o metody czasowo-częstotliwościowe oparte na dekompozycji falkowej oraz metody sztucznej inteligencji (sieci neuronowe). Zakres pracy związany jest z detekcją i identyfikacją uszkodzeń w układach niestacjonarnych, w których prawidłowe decyzje diagnostyczne nie mogą być podejmowane tylko i wyłącznie w oparciu o informacje w dziedzinie czasowej. Problem badawczy jest interesujący, ważny i obfitujący w szereg wyzwań natury obliczeniowej i koncepcyjnej zwłaszcza w kontekście potencjalnych zastosowań.

Przeprowadzone przez Doktoranta badania należy uznać za autorskie.

2. ANALIZA ZAWARTOŚCI ROZPRAWY I SPOSÓB JEJ MERYTORYCZNEGO PRZEDSTAWIENIA

Wyniki badań Doktoranta zostały udokumentowane na 194 stronach rozprawy zawierającej: streszczenia w j. polskim i angielskim, wykaz ważniejszych oznaczeń i symboli, 9 rozdziałów wraz ze spisem literatury zawierającym 118 pozycji oraz spisy tabel i rysunków. W spisie literatury



znalazło się 6 prac Autora, w tym 4 prace konferencyjne oraz 2 opublikowane w czasopiśmie z listy B MNiSW z 2016 r.

W szczególności, **Rozdział 1** zawiera przegląd literatury oraz tezy i cele pracy, a także dyskusję dot. zastosowania transformacji falkowej. Doktorant przedstawia w tym rozdziale problematykę rozprawy i prezentuje stan wiedzy w zakresie wykorzystania metod falkowych i sztucznej inteligencji (ze szczególnym uwzględnieniem sieci neuronowych) w szeroko pojętym obszarze wiedzy diagnostyki technicznej. Następnie, w **Rozdziale 2** Autor prezentuje koncepcję budowy modelu układu elektromechanicznego o zmiennych parametrach. W rozdziale tym Doktorant omawia zastosowane modele tłumienia (nie)liniowego oraz przedstawia koncepcje i założenia metodologii identyfikacji parametrów modelu układu silnika indukcyjnego w tym a) identyfikacji skokowych zmian rezystancji stojana i szerokości strefy luzu dla układu elektromechanicznego z tłumieniem nieliniowym z tarciami wiskotycznym, b) identyfikacji szerokości strefy luzu dla przypadku tarcia wiskotycznego zarówno zawierającym szumy jak i przy zmianach momentu bezwładności mas zredukowanych i związanych sztywno z wirnikiem silnika, c) identyfikacji szerokości strefy luzu w zaszumionym układzie elektromechanicznym z tłumieniem nieliniowym dla przypadku tarcia lepkiego przy skokowych zmianach momentu bezwładności mas zredukowanych i sztywno związanych z wirnikiem silnika, d) identyfikacji wartości momentu bezwładności mas zredukowanych i sztywno związanych z wirnikiem silnika przy zmianach szerokości strefy luzu w układzie elektromechanicznym zawierającym tłumienie nieliniowe z tarciami lepkiem. Rozdział 2 posłużył Doktorantowi także do omówienia koncepcji metodologii doboru rzędu i poziomu dekompozycji falki dla dyskretnego przekształcenia falkowego. **Rozdział 3** poświęcony jest z kolei analizie wrażliwości w/w układu elektromechanicznego na skokowe zmiany rezystancji stojana silnika indukcyjnego na podstawie obserwacji przebiegów przyspieszenia liniowego na obwodzie koła pędowego wirnika silnika, prądu stojana oraz prędkości kątowej wirnika silnika. Analiza wrażliwości została przeprowadzona przez Autora w oparciu o modele matematyczne silnika indukcyjnego, połączeń mechanicznych i maszyny roboczej. Doktorant rozpoczyna rozdział od omówienia przygotowanych danych wejściowych dla algorytmu falkowo-neuronowego. W badaniach Autor analizuje, m.in. charakter detali, ich energie dla wybranych falek w/w wielkości fizycznych, opisuje procedurę treningu jednowarstwowej sieci neuronowej pod nadzorem oraz sieci neuronowej bez uczenia nadzorowanego, przedstawia wskaźniki wykorzystane w procedurze identyfikacji w/w uszkodzenia. Następnie, **Rozdział 4** Autor poświęca prezentacji algorytmu identyfikacji strefy luzu w połączeniach mechanicznych badanego modelu układu. Doktorant przedstawia tu wyniki badań identyfikacyjnych szerokości strefy luzu przy wykorzystaniu skalogramów falkowych wybranych zmiennych stanu. Rodzaj falki i jej rząd został obrany przez Autora tak, aby kształt falki podstawowej w pewnym przybliżeniu odpowiadał charakterowi przebiegu przejściowego badanej wielkości fizycznej uzyskanego w wyniku symulacji dla przypadku najmniejszej wartości luzu. Rozmiary strefy luzu były identyfikowane w ich początkowych fazach powstawania z wykorzystaniem technik analizy obrazu celem wyznaczenia statystycznych własności skalogramów. **Rozdział 5** zawiera materiał dotyczący problematyki identyfikacji szerokości strefy luzu w połączeniach mechanicznych w/w układu w obecności zakłóceń o charakterze addytywnym z użyciem metody falkowej oraz 2-warstwowej sieci neuronowej przetwarzanej bez uczenia nadzorowanego. Przedstawione wyniki pozwalają w określonych warunkach na detekcję uszkodzenia we wczesnym etapie jego powstawania. Na podstawie przeprowadzonych badań Autor wnioskuje, iż czynnikami wpływającymi na wynik procedury identyfikacji „uszkodzenia” w jego początkowej fazie powstawania są niestacjonarność analizowanych sygnałów w stanach nieustalonych oraz nieliniowość ch-tyki tłumienia elementów układu i nieodpowiedni dobór kształtu falki podstawowej do charakteru analizowanego szeregu czasowego. Używając tej samej metodologii, w **Rozdziale 6** Doktorant przedstawia wyniki analizy wrażliwości w/w układu na skokowe zmiany momentu bezwładności wirujących mas związanych z silnikiem. Badania identyfikacyjne przeprowadzono w domenie czasowo-częstotliwościowej poprzez przeanalizowanie rozwinięć falkowych przebiegów wybranych wielkości fizycznych. Autor wykazuje, m.in. iż proces skokowych zmian wartości momentu bezwładności nie powodował

MM

trudności w identyfikacji wartości szerokości strefy luzu. Problem identyfikacji wartości momentu bezwładności przy zmianach szerokości strefy luzu w układzie elektromechanicznym zawierającym tarcie lepkie Autor przedstawia w **Rozdziale 7**. Zaproponowany w rozdziale system detekcji uszkodzeń zawiera sieć neuronową uczoną za pomocą algorytmu Levenberga-Marquardta z zastosowaniem metody wstecznej propagacji błędów oraz algorytmu diagnostycznego stosującego techniki analizy obrazu. **Rozdział 8** zawiera podsumowanie przeprowadzonych badań, wnioski oraz przemyślenia dotyczące dalszych kierunków działań. Autor warunkuje skuteczność algorytmu przedstawionego w Rozdziale 3 od m.in. ustalenia selektywnych wartości wskaźników M_{se1} , M_{se2} oraz M_{ae1} . Ponadto, skuteczność działania metody omówionej w Rozdziale 4 uzależniona jest od wyniku ustalenia wartości macierzy wzorcowych obliczonych za pomocą liniowej dyskryminanty Fishera. Następnie, poprawność działania metody detekcji uszkodzeń przedstawionej w Rozdziale 5 zależna jest, w świetle przedstawionych wyników, od liczby epok przetwarzania sieci neuronowej i współczynników uczenia sieci w każdej z warstw sieci neuronowej, a także od wyboru rodzaju falki i jej rzędu. Z kolei, skuteczność badań omówionych w Rozdziałach 6 i 7 jest uwarunkowana m.in. zwiększaniem współczynnika uczenia sieci neuronowej oraz wyborem odpowiedniego rodzaju falki, jej rzędu. Zdaniem Autora, zaprezentowane metody w tej pracy mogą ułatwić projektowanie testów diagnostycznych w układach rzeczywistych.

3. OCENA MERYTORYCZNA

W świetle przedstawionych wyników symulacji komputerowych ujętych zwłaszcza w Rozdziałach 3 do 7 główne tezy pracy można uznać za potwierdzone.

Doktorant opracował poprawny i aktualny, moim zdaniem, przegląd literatury, zbudował model złożonego układu elektromechanicznego, przeprowadził jego symulacje komputerowe, opracował koncepcję hybrydowego algorytmu detekcji uszkodzeń oparciu o metody falkowe, sztucznej inteligencji oraz technik rozpoznawania obrazów, przeprowadził szereg eksperymentów weryfikujących jego skuteczność oraz zaproponował wskaźniki oceny skuteczności działania.

Istotnym mankamentem jest brak opisu matematycznego modelu układu elektromechanicznego będącego przedmiotem badań i analiz. Taki opis powinien znaleźć się w Rozdziale 2 lub w formie dodatku do pracy; Autor dostarczył w/w model do wglądu recenzentowi celem weryfikacji.

Doktorant zweryfikował skuteczność metody falkowo-neuronowej wyłącznie w oparciu o wyniki symulacji numerycznych i bez wyraźnego odniesienia do rzeczywistego układu elektromechanicznego, co nie pozwala jednoznacznie ocenić efektywności przyjętego przez Doktoranta toku postępowania.

Treść rozprawy ma jednak istotny walor poznawczy i może dostarczyć wielu wskazań oraz informacji w zakresie hybrydowych algorytmów detekcji uszkodzeń w układach elektromechanicznych.

Tezy rozprawy mogą być uznane za potwierdzone przez Doktoranta z oczekiwaną sprawnością. Na podkreślenie zasługują umiejętności Doktoranta w zakresie przeprowadzania eksperymentu badawczego, poprawnego wykorzystania pakietów do obliczeń numerycznych, identyfikacji parametrycznej i analizy wyników.

4. UWAGI

Podczas lektury pracy nasunęło mi się szereg spostrzeżeń, które podzieliłem na trzy zasadnicze grupy: uwagi natury redakcyjnej, uwagi ogólne oraz uwagi szczegółowe.

4.1. Uwagi redakcyjne

Rozprawa została zredagowana przez Doktoranta poprawnie. Na podkreślenie zasługuje choćby fakt, iż Rozdziały 3 do 7 zawierające relatywnie obszerny i złożony materiał opatrzone są cząstkowym omówieniem otrzymanych rezultatów. Ocenę redakcyjną pracy obniżają m.in. niska

rozdzielczość zamieszczonych rysunków (np. Rys. 2-1), nieproporcjonalnie przeskalowane rysunki (Rys. 6-2), stosowanie kursywy do formatowania indeksów dolnych oznaczeń liczbowych, usterki w składzie symboli i wyrażeń matematycznych – głównie brak stosowania odpowiednich odstępów np. pomiędzy wartością liczbową a jednostką oraz czcionki (kursywa) oraz skład wyrażeń matematycznych czcionką różnej wielkości, niekonsekwencja w stosowaniu znaku separatora dziesiętnego (przecinek, kropka), niekonsekwentne stosowanie myślnika i półpauzy, stosowanie zwykłej czcionki do oznaczenia zmiennych macierzowych (zamiast pogrubionej).

Ogólnie, wykresy i ilustracje są wykonane czytelnie.

4.2. Uwagi ogólne

Podczas lektury rozprawy nasunęły się wymienione niżej uwagi natury ogólnej:

- W pracy brak opisu matematycznego analizowanego modelu układu elektromechanicznego w Rozdziale 2 (będącego przedmiotem badań w całej pracy)
- Brak odsyłaczy literaturowych do analizowanego modelu układu elektromechanicznego
- Brak opisu warunków, w jakich był testowany model układu elektromechanicznego (algorytm całkowania, krok czasowy, kryteria zbieżności, etc.)
- Brak (fragmentów) listingów kodów źródłowych.
- Przedstawione w pracy badania zostały ograniczone do symulacji komputerowych (bez widocznej korelacji z rzeczywistym obiektem fizycznym). Do jakiego modelu/typu silnika indukcyjnego odnoszą się parametry układu przedstawione w Rozdziale 2.1? W jaki sposób zostały oszacowane zamieszczone tam parametry?
- Model układu zawiera masy wirujące. Czy niewyważenie mas wirujących ma/może mieć wpływ na skuteczność metody?
- Brak umotywowania wyboru stosowanych modeli tarcia. Czy zmiana modelu tarcia z plastyczno-lepkiego na np. plastyczno-lepko-sprężysty może mieć wpływ na skuteczność metody?
- Mylne stosowanie tożsamyh pojęć „tarcie lepkie” vs. „tarcie wiskotyczne”
- Ogólnie, brak uzasadnienia wyboru określonych metod. Na przykład, dlaczego do rozwiązania problemu w Rozdziale 4 wybrano liniową dyskryminantę Fishera zamiast np. maszyny wektorów wspierających SVM (Support Vector Machine)?
- Autor nie wyjaśnia w pracy, z jakich przyborników/funkcji MATLAB'a/Simulink'a korzystał.
- Czy Doktorant badał przydatność proponowanej metody w układach czasu rzeczywistego?

4.3. Uwagi szczegółowe

W rozprawie wychwycono m.in. następujące potknięcia natury szczegółowej:

- str. 18 – tarcie lepkie jest tożsamy z tarcie wiskotycznym (ang. *viscous damping*)
- str. 28 – nieproporcjonalny Rys. 1-1
- str. 32 – nieproporcjonalny Rys. 2-1 (niska rozdzielczość)
- str. 32 – nieprawidłowe sformatowanie symboli x_s , x_m , x_w .
- str. 33 – niska rozdzielczość Rys. 2-2
- str. 33 – parametr c_1 to wartość siły tarcia suchego (Coulomba)
- str. 33 – zmienna v_c to wartość chwilowa względnej prędkości liniowej
- str. 34 – x_c – przemieszczenie liniowe

ml

- str. 35 – nieproporcjonalny Rys. 2-3
- str. 39 – Rys. 2-4 przedstawia przebieg czasowy. Oś pozioma wykresu powinna być wyskalowana w jednostkach czasu
- str. 40 – brak opisu osi pionowej Rys. 2-5. Także, Rys. 2-5 przedstawia przebieg czasowy. Oś pozioma wykresu powinna być wyskalowana w jednostkach czasu
- str. 48 – użyty operator ∂ zamiast symbolu δ (Równanie 3-10)
- str. 52 – użyty operator ∂ zamiast symbolu δ
- str. 53 – Rys. 3-3 przedstawia przebieg czasowy. Oś pozioma wykresu powinna być wyskalowana w jednostkach czasu
- str. 55-57 – różna wielkość czcionki stosowanej do oznaczeń w kolumnie pierwszej tabel 3-2 do 3-4
- str. 64 – angielskojęzyczny opis skalogramów na Rys. 4-3
- str. 96 – niepoprawna czcionka w Równaniu 5-30
- str. 99 – Rys. 5-7 przedstawia przebiegi czasowe. Oś pozioma wykresu powinna być wyskalowana w jednostkach czasu
- str. 112 – Rys. 6-1 przedstawia przebiegi czasowe. Oś pozioma wykresu powinna być wyskalowana w jednostkach czasu
- str. 127 – znak „*” w Równaniu 6-47 dotyczy splotu funkcji czy operacji mnożenia?
- str. 154 – nieczytelny Rys. 7-1
- str. 169 – angielskojęzyczny opis skalogramów na Rys. 7-2

5. KONKLUZJA

Biorąc pod uwagę, omówione powyżej rezultaty rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Tomczyka stwierdzam, iż przedstawił on istotne wyniki badawcze dotyczące problematyki detekcji i identyfikacji uszkodzeń w ich początkowej fazie powstawania przy użyciu metod falkowo-neuronowych. Doktorant udowodnił postawioną we wstępie rozprawy tezę i, moim zdaniem, osiągnął postawiony przed sobą cel. Efektywnie wykorzystał pakiety numeryczne do rozwiązania w/w problemu i dokonał poprawnej analizy wyników.

Istotny własny dorobek naukowy, na który powołuje się Doktorant w rozprawie, a więc bezpośrednio związany z tematyką badań, liczy 6 pozycji.

Praca, moim zdaniem, nie zawiera istotnych uchybień merytorycznych. Wymienione przeze mnie powyżej usterki w Rozdziale 4 w/w recenzji nie podważają faktu osiągnięcia założonej przez Doktoranta na wstępie tezy.

Od strony redakcyjnej rozprawa została złożona przez Autora poprawnie.

Podsumowując, wyniki pracy mgr inż. Marcina Tomczyka ukierunkowane są na rozwój metod i technik służących detekcji uszkodzeń w układach elektromechanicznych. Przedstawione w rozprawie wyniki spełniają wymagania stawiane przez obowiązującą Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami). Upoważnia mnie to do przedłożenia Radzie Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej wniosku o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



/Janusz Goldasz/