



## SZKOŁA GŁÓWNA GOSPODARSTWA WIEJSKIEGO W WARSZAWIE

Dr hab. inż. Robert Sałat  
Katedra Podstaw Inżynierii,  
Wydział Inżynierii Produkcji,  
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie  
ul. Nowoursynowska 164, 02-787 Warszawa

Warszawa, 20.08.2017

### Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jose Gregorio Ferreiry nt.:

#### MULTICRITERIA DIAGNOSIS OF SYNCHRONOUS MACHINES

wykonanej na Wydziale Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej

##### **1. Podstawa formalna opracowania recenzji:**

Recenzja została opracowana na zlecenia Dziekana Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej, prof. dr. hab. inż. Adama St. Jagiełło, na podstawie uchwały Rady Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej.

##### **2. Tematyka rozprawy i uzasadnienie podjęcia tematu**

Diagnostyka oraz monitoring maszyn elektrycznych nie jest tematem nowym. Jak ważny jest to problem, świadczyć może liczba artykułów na ten temat, która tylko w bazach IEEE przekracza 17000 pozycji. Niezmiennym kierunkiem od samego początku jest poszukiwanie coraz skuteczniejszych metod identyfikacji uszkodzeń w maszynach elektrycznych oraz rozwiązywania problemów z nimi związanych. Ulepszanie tych metod minimalizuje liczbę niepożądanych wyłączeń, jak również zwiększa wykrywalność uszkodzeń na wczesnym etapie. Dlatego zasadne jest rozwijanie nowoczesnych metod, które będą informować na bieżąco o stanie maszyny, co pozwoli je efektywniej eksploatować. Różne podejścia do powyższych zagadnień można zaobserwować w literaturze, niektóre oparte są na modelach matematycznych, które pozwalają na modelowanie różnych typów uszkodzeń uzwojeń opartych na pomiarach prądów stojana. Inne wykorzystują metody statystyczne lub metody tzw. sztucznej inteligencji, gdzie dostęp jest jedynie do sygnałów z pomiarów, a model tworzy się w sposób niejawny, przy pomocy metody tzw. czarnej skrzynki. Do tej grupy metod można zaliczyć metodę diagnostyki wielokryterialnej opartej o metody statystyczne,

której celem jest porównanie różnych cech wydobytych z sygnałów zainstalowanych przetworników na maszynie zgodnie z różnymi kryteriami. W niniejszej rozprawie metoda ta została szczegółowo przedstawiona przez Doktoranta z głównym nastawieniem na ekstrakcję cech. Problemem jaki się przy tym pojawia jest właściwy dobór wektora cech (ang. feature selection), czyli liczby i rodzaju sygnałów podawanych na wejście klasyfikatora. Problem ten jest bardzo istotny z uwagi na fakt, iż nie zawsze wszystkie cechy niosą istotną informację. Część z nich może być nieistotna dla rozwiązywanego zadania; część może być szumem; a jeszcze inne mogą być skorelowane lub bez znaczenia dla procesu. Wybór optymalnego wektora cech sprowadza się zatem do znalezienie takiego ich zestawu, który jest istotny dla danego zadania. Większość metod selekcji cech polega na tzw. procedurach przeszukania, które dokonują eksploracji na całym zestawie danych. Ogólnie metody selekcji cech można podzielić na dwie grupy: pierwsza to metody niezależne, do których możemy zaliczyć metody wykorzystane w pracy Doktoranta, gdzie selekcji cech dokonuje się niezależnie od uczenia sieci. Często wykorzystywane są tu analizy głównych składowych (PCA), ich rozszerzenie o nieliniowość (KPCA), liniowe analizy dyskryminacyjne (LDA), analiza składowych niezależnych (ICA) i wiele innych, których ideą jest przekształcenie oryginalnego zestawu cech w nowy, nieskorelowany zestaw o znacznie mniejszym wymiarze. Do selekcji cech, szczególnie w identyfikacji, używa się również metod statystycznych, np. analizy wariancji (ANOVA), metody skurczania i selekcji (LASSO), itp. Wadą tego typu metod może być utrata informacji podczas dwuetapowej procedury selekcji.

Druga grupa metod to metody połączone z uczeniem, np. sieci neuronowych, SVM, itp., gdzie dobór wektora cech jest natychmiast sprawdzany podczas uczenia i testowania. Do grupy metod tego typu można zaliczyć na przykład metodę opartą o model nieliniowej autoregresji z sygnałem zewnętrznym (NARX) oraz różne jej odmiany. Metody tego typu dają z reguły dokładniejsze rezultaty niż metody niezależne, ale ich wadą jest konieczność wykonania dużej liczby obliczeń związanych z wielokrotnym trenowaniem sieci.

Z doбором (redukcją) wektora cech należy być ostrożnym, gdyż dla problemów o dużym wymiarze wektora mogą pojawić się przypadki, gdzie wszystkie cechy są równie ważne i są tego samego typu, a redukcja ich liczby wiąże się ze znacznym pogorszeniem wyników klasyfikacji. Istnieją również przypadki, gdzie cechy, które indywidualnie uważane są za nieistotne, w połączeniu z innymi cechami, znacząco poprawiają wyniki klasyfikacji. Niekiedy nawet połączenie razem cech mało istotnych indywidualnie, powoduje, że stają się one łącznie istotne w rozwiązaniu zadania.

Problemem pojawiającym się zawsze, zarówno podczas predykcji, jak i klasyfikacji, którego również nie można zbagatelizować, jest zbieranie oraz przygotowanie danych, które także znacząco wpływa na proces klasyfikacji lub predykcji. Na przykład w układach elektrycznych ważne jest, czy dane użyte w modelowaniu zostały zebrane z eksploatacyjnej pracy urządzenia, czy są wynikiem sztucznego wymuszania sygnałów na wejściu. Konieczna jest zwykle normalizacja danych, powodująca znaczną poprawę działania sieci. Ważna i często stosowana jest również standaryzacja danych, określenie

przypadków odstających, analiza statystyczna, jak również ocena jakości danych otrzymanych z pomiarów.

Podsumowując, tego typu problemy podejmuje rozprawa doktorska mgr. inż. Jose Gregorio Ferreiry.

### **3. Charakterystyka rozprawy**

Rozprawa napisana jest w języku angielskim, składa się z 6 rozdziałów oraz spisu literatury. W pracy zamieszczono 96 pozycji literatury, w zdecydowanej większości są to pozycje w czasopismach i jedynie 2 pozycje ze stron internetowych. Całość w spisie literatury została zaprezentowana w porządku alfabetycznym. W mojej opinii, przegląd został przygotowany poprawnie, zawiera dużo aktualnych pozycji; prawie wszystkie pozycje są anglojęzyczne, z szeroko rozumianego zakresu maszyn elektrycznych, jak również metod statystycznych i sztucznej inteligencji. Wykaz literatury zredagowany został jednolicie i bez większych błędów. Sumarycznie praca zawiera 115 stron. Układ rozdziałów, rysunki i tabele stanowią logiczną całość. Brak jest natomiast wykazu oznaczeń, symboli oraz skrótów, co utrudnia czasami analizę rozprawy. Przed złożeniem rozprawy Doktorant opublikował 8 artykułów, 2 w czasopiśmie i 6 w materiałach konferencyjnych. Na podkreślenie zasługuje fakt, iż w pracach tych jest On w czterech przypadkach pierwszym autorem, co świadczy o Jego wiodącej roli w przygotowaniu i opracowaniu wyników badań do publikacji.

**Rozdział pierwszy** stanowi wprowadzenie do podjętej w pracy tematyki. Doktorant przedstawił w nim przegląd literatury dotyczącej diagnostyki uszkodzeń w maszynach elektrycznych. Scharakteryzował diagnostykę wielokryterialną oraz przedstawił wyniki jej zastosowania w literaturze światowej. Rozdział kończy się przedstawieniem oryginalnego wkładu Doktoranta w rozprawę poprzez opis metody.

W **rozdziale drugim** Doktorant opisał wszystkie komponenty platformy badawczej zainstalowanej w Laboratorium Maszyn Elektrycznych na Wydziale Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej. Opisał szczegółowo doświadczalną maszynę synchroniczną w wykonaniu specjalnym, przedstawił schematy do realizacji asymetrii reprezentujących różne typy uszkodzeń. Zaprezentował też system zbierania danych wraz z układem regulowanego obciążenia maszyny synchronicznej.

**Rozdział trzeci** przedstawia wstępne obliczenia na podstawie modeli matematycznych. Opisano w nim model obwodowo-polowy maszyny synchronicznej przy wykorzystaniu oprogramowania Magnet 2D firmy Infolytica. Następnie w skrócie przedstawiono równania matematyczne obwodowo-polowego modelu A+V z uwzględnieniem równania mechanicznego opisującego ruch wirnika. Rozdział kończy się porównaniem wyników symulacji z pomiarami prądów otrzymanymi z obiektu bez zadanych uszkodzeń wewnętrznych.

W **rozdziale czwartym** Doktorant opisuje metody przetwarzania sygnałów oraz definiuje różne klasy uszkodzeń przyjęte w późniejszej klasyfikacji. Dokładnie przedstawia wszystkie 37 zmiennych, dla których otrzymano wyniki z czujników. Omawia wstępny preprocesing w postaci filtrowania i opisuje metody ekstrakcji cech, których dokonał 5 metodami tj. w dziedzinie częstotliwości, w dziedzinie

czasu wykorzystując różne rodzaje statystyk, na podstawie obliczeń wielkości elektrycznych oraz przy wykorzystaniu przekształcenia Clarka'a oraz Parka. Rozdział kończy się skróconym opisem języka R, który został wykorzystany w uczeniu maszynowym.

**Rozdział piąty** jest jednym z kluczowych rozdziałów rozprawy. Doktorant opisuje w nim wstępny wektor cech użyty do klasyfikacji różnych typów uszkodzeń. Definiuje metryki oceny klasyfikacji, przedstawia metodę usunięcia z początkowego wektora cech danych skorelowanych, a następnie opisuje metodę Liniowej Analizy Dyskryminacyjnej (LDA) użytą do dalszej redukcji wektora cech podawanego na wejście klasyfikatorów. LDA stosuje do wszystkich metod ekstrakcji cech w celu tworzenia nowego wektora i redukuje go z 6632 do 688 cech. Następnie zostaje opisanych 10 klasyfikatorów, które zostały użyte w badaniach; przedstawione zostają wyniki dla klasyfikacji 20 klas po 10 dla dwóch różnych obciążeń maszyny synchronicznej. Wyniki klasyfikacji okazują się niezadawalające i Doktorant poszukuje przyczyny ich powstania. Zmienia podejście do klasyfikacji i dla nowo przyjętych założeń otrzymuje wyniki na poziomie 90% dokładności pomiędzy stanem normalnym a uszkodzeniem, pracując tylko na jednym zestawie cech (freq). Wyniki dla poszczególnych klas są w dalszym ciągu poniżej oczekiwań i sięgają 60%.

**W rozdziale szóstym – ostatnim**, Doktorant proponuje nową metodologię oraz dalsze kroki mające na celu poprawę klasyfikacji. Szczególną uwagę poświęca dalszej redukcji liczby cech, ostatecznie osiągając 107 cech. Ponownie przeprowadza klasyfikację za pomocą 10 klasyfikatorów, gdzie dla najlepszego z nich osiąga wyniki na poziomie 99% na zbiorze testowym. Rozdział kończy się dyskusją nad poszczególnymi klasyfikatorami i krokami, które można by wykonać w przyszłości, aby udoskonalić metodę.

#### **4. Najważniejsze osiągnięcia rozprawy**

Choć w przedstawionej do recenzji rozprawie brak jednoznacznego podsumowania osiągnięć Doktoranta w zakresie podjętego tematu, to na podstawie wnikliwej analizy pracy można stwierdzić, że najważniejsze dokonania naukowe, poznawcze i implementacyjne w ujęciu ogólnym są następujące:

- Zaprojektowanie platformy do przeprowadzania bezinwazyjnych testów i zbierania danych dla różnych typów uszkodzeń.
- Zaproponowanie nowej metodologii do identyfikacji uszkodzeń, opartej na metodach statystycznych.
- Zaproponowanie i analiza różnych metod ekstrakcji cech.
- Zaproponowanie i implementacja 10 różnych klasyfikatorów, co jest bardzo dużym wyzwaniem w kontekście zrozumienia ich działania i późniejszego użycia.
- Przedstawienie bardzo obszernego przeglądu literatury odnośnie wcześniejszych prób użycia nowych typów sygnałów do monitorowania warunków pracy maszyn elektrycznych.
- Opracowanie inteligentnej i wielokryterialnej metody zdolnej do wczesnego wykrycia uszkodzeń.

Podsumowując, za najważniejsze rozdziały z punktu naukowego i aplikacyjnego, uważam rozdziały 4, 5 oraz 6.

Moim zdaniem, przedstawione w rozprawie osiągnięcia Doktoranta wskazują na Jego kompetencje naukowe i można Go rekomendować do stopnia doktora w dziedzinie nauk technicznych.

## **5. Uwagi do rozprawy**

**Uwagi o charakterze ogólnym, które są zarówno pytaniami do Doktoranta, komentarzami, jak również uwagami, które wymagają wyjaśnienia.**

1. Większość rozpraw doktorskich pisanych w Polsce ma strukturę charakteryzującą się poprzez nakreślenie celu podjęcia badań, wskazanie tezy, przedstawienie wyników wraz ich analizą oraz dyskusją. Przeglądając nawet powierzchownie niniejszą dysertację można zauważyć brak wyraźnie sformułowanej tezy. Czym Doktorant kierował się w takim podejściu?
2. Czytając rozdział 3 otrzymujemy informację o możliwości modelowania matematycznego maszyn synchronicznych. Jednak w następnych rozdziałach nie ma żadnego powiązania tego rozdziału z dalszymi badaniami. Istnieje jedynie mała wzmianka na temat przydatności tego modelowania do symulacji uszkodzeń. W mojej opinii rozdział ten powinien być usunięty i zastąpiony innym, skupiającym się szerzej na klasyfikatorach, zwłaszcza że Doktorant stwierdza pod koniec rozdziału, że uproszczone modele nie pozwalają na dokładne porównywanie przebiegów sygnałów.
3. W pracy brak syntetycznego podsumowania i wykazania (choćby w punktach), co zostało w osiągnięte w ramach prowadzonych badań i co stanowi nowość w stosunku do istniejących już metod diagnostycznych.
4. Doktorant w końcowej fazie badań stosuje aż 10 rodzajów klasyfikatorów, co wskazuje na fakt, iż posiada On rozległą wiedzę na temat ich działania, jak i implementacji. Jednak na końcu badań zabrakło stworzenia systemu agregacji tych klasyfikatorów w jeden system w celu otrzymanie finalnego wyniku. Co było powodem, że klasyfikatorów jest aż 10, a nie np. 5? Co będzie w sytuacji jeżeli kilka klasyfikatorów da różne wyniki dla przypadku, dla którego nie znamy odpowiedzi? Który wynik wtedy należy uznać za prawidłowy?
5. Odnośnie samych klasyfikatorów to w tabelach z wynikami brakuje mi krótkiej informacji na temat ich parametrów. Na przykład, jeżeli mówimy o SVM to ważna jest wiadomość o rodzaju jądra i jego parametrach otrzymanych podczas uczenia sieci oraz liczby wektorów podtrzymujących tj. nSVM. Może się okazać, że liczba tych wektorów jest porównywalna z liczbą podanych przypadków na wejście sieci, a to świadczy o tym, że sieć nauczyła się na pamięć i nie ma żadnych właściwości generalizujących.
6. Doktorant odnośnie ekstrakcji cech i analiz statystycznych napisał, że do ich implementacji użył języka R. Brak natomiast informacji w jakim programie/języku zostały zaimplementowane modele klasyfikatorów lub jakich bibliotek użyto przy ich tworzeniu.

7. Zbyt pochopne jest zawarte w zdaniu napisanym na stronie 61 twierdzenie mówiące, że klasyfikatory nieliniowe, tj. sieci neuronowe SVM itp. nie generalizują dobrze i mają tendencję do prze dopasowania się do danych. Jest wręcz przeciwnie - dobrze nauczone sieci wygrywają większość zawodów różnego typu odnośnie klasyfikacji (ang. *challenge*) organizowanych na świecie, co potwierdza literatura.
8. Ekstrakcja cech ze względu na obciążenie, w mojej opinii, była błędnym podejściem formułowanym na początku pracy. Przyjęcie założenia, że są różne wektory cechy dla różnych obciążeń może doprowadzić do zwiększającego się w nieskończoność wektora wraz ze zwiększaniem się różnych przypadków obciążeń. Wektor cech powinien być niezależny od obciążenia, co w końcowej części pracy Doktorant trafnie zauważył.
9. Zamiast treści która jest w rozdziale 3 bardziej zasadnym byłoby przedstawienie w pracy wyników analizy wpływu poszczególnych rodzajów ekstrakcji na wynik klasyfikacji. Czy Doktorant wykonywał takie symulacje, np. podanie tylko zestawu po ekstrakcji Clarke\_sp1 na wejście klasyfikatorów w celu klasyfikacji wszystkich 20 klas, itd.?
10. Doktorant w swoich badaniach używał między innymi przetworników prądowych i napięciowych firmy LEM. Ponieważ przebiegi z przetworników zostały użyte w analizie DFT w celu wyodrębnienia częstotliwości z zakresu 50 Hz do 2.5 kHz, zasadne wydaje się pytanie o ich pasmo przenoszenia. O ile wiadomo, zarówno z praktyki, jak i z teorii, że przetworniki prądowe mają szeroki zakres pasma przenoszenia sygnałów - nawet do 200 kHz, to przy przetwornikach napięciowych, ze względu na ich budowę, nie jest to już takie oczywiste. Wyjaśnienia i potwierdzenia wymaga fakt, czy użycie przetwornika napięciowego LEM LV25-P w analizie częstotliwościowej nie jest obarczone zbyt dużym błędem ze względu na niepewność pomiarów w tym zakresie częstotliwości, zwłaszcza że nawet producent w karcie katalogowej nie podaje zakresu pasma przenoszenia.

#### **Uwagi redakcyjne**

**Pragnę zaznaczyć, że poniższe uwagi redakcyjne nie mają istotnego wpływu na ocenę merytoryczną pracy i nie komplikują jej odbioru.**

1. Praca napisana jest bardzo poprawnym językiem angielskim, jedynie w kilku miejscach pojawiają się pojedyncze błędy literowe.
2. W pracy brak konsekwencji w odwoływaniu się do tabel i rysunków. Raz opis tabeli jest przywoływany poprzez numer, innym razem poprzez stwierdzenie poniżej/powyżej. Prowadzi to do dziwnej sytuacji (jak np. na str. 98), gdzie w ostatnim zdaniu na stronie napisano, że przykład z zestawu STATS można zobaczyć poniżej, a tabela 6-3 jest na samej górze na następnej stronie.
3. W niektórych miejscach w pracy opis do tabel i rysunków znajduje się w dalszej części za tabelą/rysunkiem, co zdecydowanie utrudnia zrozumienie tego fragmentu pracy.
4. Brak opisu do rysunku 3-6.

5. W pozycji nr 5 literatury brak roku wydania.
6. Z opisu tabeli 6-7 wynika, że klasyfikator rozpoznał poprawnie klasy C00, C11, C21 i C31, a z tabeli wynika, że klasa C22 również została poprawnie rozpoznana.
7. Niekonsekwencja w przedstawianiu metod ekstrakcji cech na stronie 47. W opisie algorytmu jest inna kolejność niż w późniejszym dokładnym opisie.
8. We wszystkich tabelach z wynikami klasyfikatorów w mojej opinii powinna być informacja o wynikach zarówno dla zbioru uczącego, jak i testowego.

## **6. Ogólna ocena rozprawy**

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Jose Gregorio Ferreiry dotyczy bardzo aktualnego zagadania naukowego jakim jest wielokryterialna diagnostyka maszyn synchronicznych o wyraźnym charakterze implementacyjnym. Wiąże się to z możliwością zastosowania uzyskanych wyników w wykrywaniu uszkodzeń maszyn elektrycznych na wczesnym etapie. Cele założone na wstępie były konsekwentnie realizowane i w mojej ocenie zostały osiągnięte. Doświadczenie Doktoranta w stosowaniu różnych metod z zakresu teorii przetwarzania sygnałów, w szczególności różnych metod ekstrakcji cech, uczenia maszynowego, doboru klasyfikatorów, wskazują jednoznacznie na jego zaawansowaną wiedzę na te tematy, które przedstawił i rozwiązał. Na podkreślenie zasługuje fakt, że Doktorant samodzielnie zaprojektował nowy system zbierania danych, system do zmian obciążenia oparty o PWM i przedstawił zaawansowaną metodę przetwarzania sygnałów, która może być wykorzystana do wczesnej diagnostyki stanu pracy maszyn elektrycznych. Rozprawa wnosi wkład naukowy w problematykę diagnostyki maszyn synchronicznych, a Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych i ich późniejszej analizy.

Podsumowując, uważam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Jose Gregorio Ferreiry spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65 poz. 595, z późn. zm.). Dlatego stawiam wniosek o przyjęcie i dopuszczenie przez Radę Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej pracy doktorskiej mgr. inż. Jose Gregorio Ferreiry do publicznej obrony.