

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Szabat

Wrocław 2024-11-17

Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

Wydział Elektryczny, Politechnika Wroclawska

ul Smoluchowskiego 19

50-372 Wrocław

Biuro Dziekana

wpłynęło dnia 18.11.2024  
RD 711e 1248/511/2024  
nr ..... zat. ....

## RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Roczka

pt. **The method of press drive system diagnosis with use of electric parameters**

Opracowana na podstawie zlecenia dr hab. inż. Alicji Piaseckiej-Belkhat, prof. uczelni  
Przewodniczącej Rady Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej

**1. CHARAKTERYSTYKA DZIEDZINY I OCENA TEMATU ROZPRAWY**

Przemysłu można zauważyć ciągły trend zwiększania produktywności linii technologicznych. Dąży się do zwiększenia ilości wytwarzanych produktów przy zachowaniu założonej jakości. Cel ten można osiągnąć stosując różne metody. Jednym ze sposobów jest zwiększenie szybkości procesu. W tym celu stosuje się wyspecjalizowane układy wykonawcze charakteryzujące się dużą dynamiką; w ich roli zwykle występują różnego typu maszyny elektryczne. Kolejnym elementem jest zastosowanie jednej z zaawansowanych metod sterowania odnoszącej się zarówno do jednostkowych napędów jak i całego procesu, przykładowo hierarchicznego sterowania rozmytego czy predykcyjnego. Następny sposób polega na odpowiednio zaplanowanej logistyce, prawidłowego przepływu materiałów jak i wytworzonych towarów. Kolejnym sposobem wpływającym na produktywność jest zastosowanie metod diagnostyki i bieżącego monitorowania poszczególnych elementów jak i całości linii technologicznej. Bieżąca ocena stanu technicznego urządzeń umożliwia wykrywanie nieprawidłowości, zaplanowanie postoju i remontu jak i wcześniejszy zakup niezbędnych części.

W literaturze istnieje szereg prac dotyczących diagnostyki i monitoringu maszyn elektrycznych. W zdecydowanej większości bazują one na analizie drgań mechanicznych. Takie podejście wymaga zastosowania dodatkowych czujników drgań wraz z odpowiednim okablowaniem. Zainstalowanie czujników wymaga znalezienia odpowiedniego, odizolowanego miejsca na układzie napędowym. Innym podejściem jest oparcie monitoringu maszyn na sygnałach elektrycznych – zwykle prądach i napięciach. W tym przypadku

uzyskuje się szereg istotnych zalet. Sygnały te są łatwo mierzalne i zwykle dostępne w nowoczesnych układach napędowych. W takim przypadku wykorzystanie ich w diagnostyce sprowadza się do obróbki sygnałów – żadne dodatkowe przetworniki nie są konieczne. Obniża to koszt systemu diagnostycznego. W nowoczesnych układach napędowych powszechnie stosuje się przekształtniki energoelektroniczne. Umożliwiają one swobodne kształtowanie charakterystyk mechanicznych układu napędowego. Wprowadzają jednak do sygnałów elektrycznych dodatkowe zakłócenia wynikające z nieliniowego charakteru układów zasilających (przełączanie tranzystorów w falowniku). W tym przypadku diagnostyka oparta o sygnały elektryczne jest utrudniona.

W rozprawie doktorskiej przedstawiono zagadnienia związane z wybranymi metodami diagnostyki stanu technicznego prasy pneumatycznej w której jako element napędowy zastosowano silnik indukcyjny dużej mocy zasilany z przekształtnika energoelektronicznego. Rozważane algorytmy monitorowania wykrywają stany pracy badanego napędu na podstawie analizy prądu. Tym samym opiniowana rozprawa doktorska nawiązuje do istotnych, nowoczesnych i cieszących się dużym zainteresowaniem zagadnień z różnych dyscyplin w tym Inżynierii Mechanicznej oraz Automatyki, Elektroniki, Elektrotechniki i Technologii Kosmicznych badanych przez szereg ośrodków naukowych i przemysłowych.

## 2. CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Przedstawiona do zaopiniowania rozprawa doktorska składa się z dwunastu rozdziałów podstawowych, spisu treści, bibliografii i załącznika. Całość pracy zawarta jest na 132 stronach. Autor odnosi się do 252 pozycji literatury. Zawiera ona zarówno pozycje klasyczne jak i opublikowane w ostatnich latach.

Podstawowym celem pracy jest zaprojektowanie układu monitorującego na podstawie sygnałów elektrycznych prasę dużej mocy z silnikiem indukcyjnym zasilanym z przekształtnika częstotliwości i przebadanie jego skuteczności w przypadku różnego rodzaju awarii.

Bazując na przedstawionym celu pracy w rozprawie zaproponowano następujące tezy naukowe:

- *Vector park hodographs can be used for monitoring and diagnostics of the condition of three-phase AC induction motors powered by frequency inverters.*
- *It is possible to classify the technical condition of a three-phase induction motor based on Park's space vector hodographs using image processing, analysis and pattern recognition methods.*

• *It is possible to use the hodographs of Park's Vector to diagnose 3-phase induction motors supplied by an frequency inverter.*

• *It is possible to apply image analysis methods to analysis of Park's vector hodograph for classification of induction motor condition purposes, and the acquired features can be a source of diagnostic information.*

• *Features of Park's hodographs images can be used in the classification of the technical condition of the press drive system using ANN.*

Cząstkowych tez naukowych jest w rozprawie za dużo, zwłaszcza że część z nich jest oczywista i wynika z przeglądu literatury (np. teza pierwsza). Moim zdaniem połączenie pięciu tez w dwie wydaje się możliwe i zasadne.

Treść pracy jest następująca. We wstępie uzasadniono wybór tematyki rozprawy. Zwrócono uwagę na istotność diagnostyki i monitoringu procesów przemysłowych w tym pras dużej mocy. Podkreślono oryginalność podejścia bazującego na analizie sygnałów elektrycznych silnika indukcyjnego zasilanego z przekształtnika energoelektronicznego. W rozdziale drugim opisano obiekt badań. W sposób skrótowy przedstawiono budowę różnego rodzaju pras. Kolejno przedstawiono podstawowe informacje na temat budowy i zasady działania silnika indukcyjnego, wybranych przekształtników energoelektronicznych. Zwrócono uwagę wpływu częstotliwości przełączania na poziom generowanych zakłóceń. W rozdziale trzecim omówiono najczęściej występujące uszkodzenia układu napędowego, w tym stojana i rotora silnika indukcyjnego oraz przekształtnika zasilającego. Uszkodzenia podzielono na dwie grupy: elektryczne i mechaniczne, co jest zgodne z ogólnie przyjętą klasyfikacją. W kolejnej części pracy omówiono metody stosowane w diagnostyce silników indukcyjnych (testy *off-line* i *on-line*). W szczególności przedstawiono metody bazujące na analizie prądów stojana (bazujące na szybkiej transformacie Fouriera). Zamieszczono wzory określające częstotliwości charakterystyczne poszczególnych typów uszkodzeń (ekscentryczność, uszkodzenia prętów klatki, zwarcie międzyzwojowych, łożyska). Kolejno przedstawiono transformaty Parka i Clarka oraz definicję wektora przestrzennego. Wprowadzono pojęcie hodografu i pokazano różnicę pomiędzy zasilaniem sieciowym a falownikowym. Opisano również wektor Parka i jego zastosowanie w diagnostyce i monitoringu maszyn elektrycznych. Wspomniano również o możliwości detekcji uszkodzeń tranzystorów bazując na hodografach. W rozdziale 5 uzasadniono wybór tematyki rozprawy. Zwrócono uwagę na niewielką liczbę prac dotyczących diagnostyki prasy dużej mocy zasilanej z przemiennika częstotliwości. Kolejno w rozdziale 6 zamieszczono tezy rozprawy.

Streszczona powyżej część pracy zawiera wstępne informacje dotyczące obiektu badań jak i użytych metod diagnostycznych. Dla Recenzenta reprezentującego dyscyplinę AEEiTK jest ona bardzo podstawowa, jednakże biorąc pod uwagę dyscyplinę Kandydata (IM) zamieszczona treść jest zasadna. Najbardziej wartościowa część pracy zaczyna się od rozdziału 7. Na jego wstępie opisano prasę będącą obiektem badań. Zamieszczono jej podstawowe parametry z uwzględnieniem przekształtnika częstotliwości. Następnie przedstawiono ogólną strukturę zaprojektowanego systemu diagnostycznego. Bardziej szczegółowe rozwiązania rozważanego układu opisano w kolejnym rozdziale. Zamieszczono szereg zdjęć ilustrujących wykorzystane komponenty. Zamieszczono schematy cząstkowe programu jak i główny widok panelu użytkownika wykonane w środowisku *LabView*. W rozdziale dziesiątym opisano zakres pozyskiwania danych oraz wymieniono rodzaje uszkodzeń występujące w analizowanym okresie. Należy podkreślić dwa fakty z tym związane. Po pierwsze pochodzenie danym z obiektu rzeczywistego pracującego w warunkach przemysłowych. Po drugie rejestracja danych w długim okresie czasu co umożliwia analizę rozwoju poszczególnych uszkodzeń i ich wpływ na inne zmienne. Autor opisuje następujące uszkodzenia dotyczące: łożysk, sprzęgła, wentylatora, zacisków przyłączeniowych. Opisuje sposób przygotowania danych wykorzystanych w kolejnych częściach pracy. W rozdziale jedenastym opisano wyniki otrzymane na podstawie bezpośredniej analizy prądów. Przedstawiono stosowne przebiegi ilustrujące tą metodę. Następnie przedstawiono możliwości zastosowania wektora Parka do analizy stanu maszyny napędowej. Omówiono sposób przetwarzania hodografów, uwzględniając zarejestrowanie obrazu, detekcję jego położenia, filtrację i uzyskanie obrazu końcowego. Zaprezentowano szereg wskaźników możliwych do zastosowania w analizie otrzymanego obrazu. W celu wyłonienia wskaźników użytecznych wykorzystano metodę *PCC* zarówno dla zewnętrznego jak i wewnętrznego konturu. Metodę projektowania klasyfikatora opartego na sieciach neuronowych zaprezentowano w rozdziale dwunastym. Omówiono sposób przygotowania danych dzieląc algorytmy na: bazujące na zewnętrznych lub wewnętrznych cechach obrazu (przekształconego hodografu) oraz na prądach w dziedzinie czasu. Kolejno omówiono analizowane klasy uszkodzeń. Przedstawiono formułę na dobór neuronów w warstwie ukrytej. Zaprezentowano parametry stworzonych sieci neuronowych. Kolejno zawarto dokładną analizę rozpatrywanych przypadków klasyfikacji stanów w poszczególnych przypadkach. Praca kończy się podsumowaniem uzyskanych wyników.

### 3. OCENA PRACY

W rozprawie przedstawiono zagadnienia związane z diagnostyką i monitoringiem maszyn indukcyjnych dużej mocy zasilanych z przemiennika częstotliwości. Jako sygnał diagnostyczny wybrano sygnały prądowe – jest to zaletą pracy ponieważ informacja ta jest dostępna w standardowym falowniku napięcia. Tematyka rozprawy jest istotna poruszana przez szereg ośrodków naukowych i przemysłowych. Czynnikiem wyróżniającym rozprawę jest wykonanie badań w oparciu o sygnały uzyskane z rzeczywistej prasy pracującej w przemyśle. Tym samym w sposób naturalny zakłócenia występujące w przemyśle a często pomijane w badaniach laboratoryjnych zostały uwzględnione.

Pewną wadą pracy jest analiza tylko wybranych uszkodzeń – tych które pojawiły się w trakcie badań. Wynika to ze skończonego czasu badania rzeczywistego układu w będącego ruchu. Badania zamieszczone w pracy mogłyby być rozszerzone o eksperymenty symulacyjne i laboratoryjne. Pomocną mogłaby być metoda ‘*transfer learning*’ umożliwiająca przeniesienie wyników z układów małej mocy na dużą. Opis pracy jest również w wielu miejscach skrótowy, jego rozszerzenie zwiększyło by czytelność pracy.

Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć rozprawy należy zaliczyć:

- Zapoznaniem się z charakterystyką pracy prasy dużej mocy pracującej w przemyśle. Dużym wyzwaniem tutaj było bez wątpienia poprawny pomiar sygnałów i filtracja powszechnie występujących zakłóceń.
- Opracowanie układu diagnostyczno-monitorującego prasę w oparciu o sygnały prądowe.
- Zastosowanie metod przetwarzania obrazów do obróbki uzyskanych hodografów.
- Zaprojektowanie sieci neuronowych wskazujących na wystąpienie danego uszkodzenia.
- Przeprowadzenie analizy porównawczej trzech metod detekcji uszkodzeń.

Praca napisana jest zrozumiałym językiem. Jednakże Autor nie ustrzegł się od szeregu błędów dotyczących nomenklatury czy też języka. Częściowy wynika to z języka angielskiego w którym rozprawa została napisana. Poniżej zamieszczam uwagi szczegółowe do dwóch pierwszych rozdziałów rozprawy – tutaj miałem najwięcej uwag.

- Należało by dokładniej skorygować język angielski używany w rozprawie. Autor we wstępie wymienia zalety silnika elektrycznego. Pisze ‘*prize*’ co oznacza nagrodę a nie cenę. Silnik elektryczny wielokrotnie nazywa ‘*engine*’ zamiast jak przyjęto w elektrotechnice ‘*machine*’ lub ‘*drive*’.
- Autor w sposób skrótowy opisuje zasadę działania silnika indukcyjnego. Powoduje to powstanie typowych błędów. Przykładowo na stronie 13 w oznacza ‘*frequency*’ a nie ‘*pulsation*’; odnosząc się do wzoru 2.2.9 używa określenia ‘*rotational*’ zamiast

'synchronous'; pisze 'field causes current inducing' a powinno być 'voltage'; definiuje poślizg jako 'speed difference' a w przytoczonym wzorze 2.2.10 widać jeszcze normalizację (dzielenie przez prędkość synchroniczną).

- Kolejno na stronach 16-17 pisze '... controlling the speed in an open-loop control system...' i dalej wymienia '... scalar and vector control...' – jest to nieprecyzyjne, bo metody wektorowe działają raczej w 'closed-loop'.

- Omawiając działanie przekształtnika również wprowadza pewne niejasności. Przedstawiony na rys. 2.3.1 układ posiada 6 tranzystorów w falowniku. W zamieszczonym opisie jest 'There is a switching system in the H-bridge circuit. It consist of four semiconductor switches...'. Liczby 6 i 4 zdecydowanie nie pasują do siebie. W przemyśle wykorzystuje się zarówno falowniki jak i mostki H. Jednakże Autor nie rozróżnia jednoznacznie tych układów co może wprowadzić w błąd czytelnika.

Na stronie 19 jest zawarte stwierdzenie 'modern power transistors have maximum switching frequencies of around 10000 Hz.' Istnieją układy oparte na węglu krzemu SiC posiadające znacznie lepsze parametry.

- Opisując wpływ częstotliwości przełączania tranzystorów Autor wskazuje na 'noises' i 'increase of inverter's temperature'. Są to efekty harmonicznego prądu i strat mocy i moim zdaniem to należało podkreślić na pierwszym planie.

- Strona 21 Jest 'tie' a powinno być 'time'.

- Na stronie 23 Autor pisze: '...it is difficult to measure the low-frequency current...' Można zadać pytanie brzmi czy te prądy są trudne do zmierzenia czy też w zasadzie niemożliwe w silniku klatkowym?

Należy podkreślić, że wymienione uwagi nie wpływają na ogólną pozytywną ocenę pracy. Po lekturze pracy nasuwa się kilka uwag o charakterze dyskusyjnym o różnej wadze merytorycznej, na które proszę o odpowiedź:

1. Na rys. 3.1 Autor przedstawił podział uszkodzeń silnika elektrycznego na elektryczne i mechaniczne. Proszę o wyjaśnienie klasyfikacji 'rotor broken bar', i 'rotor faults'.
2. Diagnostyka może być oparta o sygnały (np. prądy, napięcia) ale również parametry (np. rezystancje) elektryczne? Czy znane są Autorowi metody *on-line* oparte o estymacje parametrów elektrycznych?
3. Czy materiał poddawany obróbce może wprowadzać do układu dodatkowe zakłócenia. Jeśli tak to od jakich parametrów one zależą? Alternatywne pytanie brzmi: Czy uszkodzenia maszyny roboczej są widoczne w prądach silnika?

4. Na rysunku 7.1.2 zaznaczono 'elastic coupling'. Jaka jest częstotliwość rezonansowa układu mechanicznego silnik - maszyna? W jaki sposób w układzie są tłumione drgania skrętne? Czy taki algorytm jest zaimplementowany w badanym układzie?
5. Jaki wpływ ma częstotliwość falownika na skuteczność detekcji poszczególnych typów uszkodzeń?
6. W rozdziale 10 Autor opisuje uszkodzenia występujące w układzie. Pod kodem 100 (Tabela 2.10) umieszcza zarówno zużyte sprzęgło jak i nieprawidłowe połączenie jednej z faz. W ogólnym przypadku są to uszkodzenia niezależne, jakkolwiek asymetria prądów wpływa na powstanie pulsacji w momencie elektromagnetycznym a to kolejno na powstanie drgań skrętnych co prowadzi do degradacji sprzęgła. Istotnym zagadnieniem jest niezależne wykrywanie obu uszkodzeń. Czy Autor posiada dane ukazujące wpływ uszkodzeń sprzęgła przy prawidłowym zasilaniu silnika? Czy takie prace są dostępne w literaturze?
7. Na rys. 11.1.1 przedstawiono przykładowe przebiegi prądów w badanym silniku. Prosiłbym o podanie dodatkowych informacji. Czy odnoszą się one do silnika zdrowego czy też do uszkodzonego? Jaka była częstotliwość kluczowania falownika? Jaka metoda sterowania została zastosowana: U/f, FOC czy DTC? Prosiłbym również o przedstawienie analizy FFT zamieszczonego przebiegu? Rozszerzając to pytanie prosiłbym o porównanie przebiegu zarejestrowanego na zdrowym i uszkodzonym silniku.
8. Na stronie 98 Autor zamieszcza formułę umożliwiającą dobór neuronów w warstwie ukrytej. Poniżej pisze: *'In the formula given by Equation 12.2 the number of neurons depends neither on the number of outputs nor the number of learning examples and is valid for the neural network with one hidden layer.'* Prowokuje to kilka pytań. Po pierwsze o właściwy numer równania czy 12.2 a może 12.1? Kolejno czy ta liczba neuronów zależy czy też jak wskazano nie zależy ('...neither...nor...') od *'number of outputs'*? Skąd w opisie pojawił się *'learning examples'* – tego parametru nie ma w zależności? Kolejno analizując dane z Tabeli 12.2 dotyczące liczby neuronów warstwy ukrytej, można stwierdzić, że nie odpowiadają one zależności 12.1. Ale, na stronie 103 Autor powołuje się na zależność 12.1 i podaje prawidłową wartość neuronów 4. Tak więc które wartości są poprawne?
9. Na stronie 97 Autor pisze: *'Classic networks based on the backpropagation algorithm were used'*. Jest to dość ogólne stwierdzenie. Algorytm wstecznej propagacji błędów jest metodą uczenia. Nie określa on struktury sieci. Proszę o podanie parametrów badanych sieci. Czy były to klasyczne MLP, a może sieci RBF lub inne? Kolejne

pytanie jest następująca. Zaprojektowane sieci posiadają bardzo mało neuronów. Czy Autor podejmował próby ich zwiększenia?

10. Czy w zarejestrowanych danych widać rozwój uszkodzenia? Czy możliwe jest wdrożenie tutaj algorytmu *PHM*?

#### 4. WNIOSEK KOŃCOWY

W opiniowanej pracy przedstawione zastały zagadnienia związane z wykrywaniem uszkodzeń w układzie napędowym prasy dużej mocy. Silnik indukcyjny zasilany jest z przekształtnika energoelektronicznego. Diagnostyka układu napędowego oparta jest na analizie prądów co jest wskaźnikiem nowoczesności. Tematyka pracy jest aktualna, niezwykle istotna, poruszana przez wiele ośrodków naukowych i przemysłowych. Czynnikiem wyróżniającym pracę jest powiązanie zagadnień z zakresu mechaniki, elektrotechniki i informatyki. Należy podkreślić, że materiał zawarty w rozprawie był prezentowany na uznanych konferencjach jak również w czasopismach naukowych.

Reasumując, w mojej opinii recenzowana rozprawa doktorska spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez stosowną ustawę o tytule i stopniach naukowych i w związku z powyższym stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

*Włodzisław Świątek*