

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Klimkowskiego
pt. „*Analiza układów napędowych z silnikami indukcyjnymi odpornych na uszkodzenia
czujników pomiarowych*”

Opracowana na podstawie zlecenia Dziekana Wydziału Elektrycznego
Politechniki Wrocławskiej z dnia 10.07.2017

1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ZAKRESU TEMATYCZNEGO ROZPRAWY

Rozprawa poświęcona jest aktualnym zagadnieniom uszkodzeń czujników pomiarowych wielkości elektrycznych i mechanicznych oraz ich kompensacji w układach napędowych z silnikami indukcyjnymi, a sam temat jest obecnie bardzo popularny i szeroko rozwijany w wielu ośrodkach naukowych i przemysłowych. W celu zapewnienia bezpiecznego i sprawnego funkcjonowania każdego procesu przemysłowego, konieczne jest prowadzenie ciągłego monitorowania stanu jego pracy za pomocą specjalnych układów pomiarowych. Coraz bardziej zaostrzane przepisy bezpieczeństwa i silna konkurencja na rynku przemysłowym powoduje, że wzrasta zapotrzebowanie na coraz bardziej niezawodne układy. W konsekwencji wymaga to wdrożenia skutecznych metod, między innymi takich jak: detekcji i identyfikacji niesprawności aparatury, wykrywania i diagnostyki awarii oraz sterowania odpornego na uszkodzenia. W większości aplikacji przemysłowych coraz większą uwagę poświęca się badaniom diagnostycznym i profilaktyczno-diagnostycznym, wśród których kluczową rolę stanowi zagadnienie utrzymania ciągłej funkcjonalności całego systemu, nawet w przypadku wystąpienia usterki, tak aby dokończyć rozpoczęty już proces technologiczny. Pomimo rozwoju wielu metod identyfikacji i detekcji uszkodzeń,

diagnostyka awarii w systemach sterowania o podwyższonym stopniu bezpieczeństwa w dalszym ciągu jest zagadnieniem trudnym i problematycznym, którym zajmuje się wiele ośrodków naukowo-badawczych.

Dlatego zakres tematyczny recenzowanej rozprawy uważam za aktualny i ważny z naukowego punktu widzenia. Opracowane przez jej autora detektory uszkodzeń czujnika prędkości kątowej oraz prądu stojana, wykorzystujące reguły logiki, teorię sztucznych sieci neuronowych i obserwatorów zmiennych stanu, które zapewniają stabilną pracę napędu elektrycznego z silnikiem indukcyjnym, pomimo wystąpienia awarii dowolnego czujnika pomiarowego, za wartościowe i nadające się do praktycznego wykorzystania.

2. CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Recenzowana rozprawa liczy łącznie 249 stron i obejmuje: wykaz ważniejszych oznaczeń, zasadniczą treść podzielona została na 10 rozdziałów (w sumie 224 strony), wykaz literatury zawierający 217 pozycji, opis stanowiska laboratoryjnego i 3 załączniki.

W rozdziale pierwszym, stanowiącym wprowadzenie do rozprawy, autor zawarł swój komentarz na podstawie przeglądu literatury i odniósł się do aktualnego stanu wiedzy dotyczącej podstawowych problemów badawczych dotyczących diagnostyki uszkodzeń napędów elektrycznych z silnikami indukcyjnymi klatkowymi oraz sformułował cel, zakres i tezę pracy rozwiniętą do dwóch podpunktów.

Początkowa część rozprawy, obejmująca rozdziały od drugiego do szóstego poświęcona została omówieniu przekształtnikowym układom napędowym, metodami ich sterowania, wyznaczania dostępnych i niedostępnych zmiennych stanu układu napędowego oraz analizy wpływu uszkodzeń czujników pomiarowych na jego pracę. W drugim rozdziale autor przedstawił zagadnienia dotyczące modelowania przekształtnikowych układów napędowych oraz metody sterowania układami energoelektronicznymi. W kolejnym rozdziale autor scharakteryzował częstotliwościowe metody sterowania silnikami indukcyjnymi. W rozdziale czwartym zaprezentowano metody estymacji niedostępnych zmiennych stanu silnika indukcyjnego, w tym strumienia stojana i wirnika oraz prędkości kątowej. W rozdziale piątym zaprezentowane zostały podstawowe metody pomiaru wielkości mechanicznych i elektrycznych wykorzystywanych w układach napędowych z silnikami indukcyjnymi. Opisano techniki pomiaru położenia i prędkości wirnika maszyny oraz prądu i napięcia stojana.

Rozdział szósty rozpoczyna najbardziej oryginalną część opiniowanej pracy poświęconej analizie wpływu uszkodzeń czujników pomiarowych na pracę układów napędowych sterowanych metodami wektorowymi DRFOC i DTC-SVM. W tym rozdziale autor skupił się na przedstawieniu szczegółowej analizy wpływu uszkodzeń enkodera inkrementalnego i uszkodzeń przetwornika prądu stojana na pracę układu napędowego z silnikiem indukcyjnym sterowanym wektorowo metodą DRFOC i DTC-SVM. W pierwszej części tego rozdziału, autor pracy wprowadzając współczynnik pomocniczy charakteryzujący wielkość uszkodzenia, opisał w nim szereg często spotykanych w praktyce inżynierskiej uszkodzeń cyfrowego czujnika prędkości obrotowej na pracę napędu elektrycznego, takich jak: całkowite przerwanie pętli pomiarowej z enkodera, częściowego uszkodzeniu elementów elektronicznych, przewodów zasilających lub otworów tarczy czujnika. W drugiej części rozdziału doktorant rozważa analizę wpływu uszkodzeń przetwornika prądu stojana na pracę elektrycznego zespołu napędowego. Zostały przeanalizowane najczęściej spotykane uszkodzenia (zaburzenia) hallotronowego przetwornika prądu. Na podstawie tych badań, autor słusznie zdecydował się w dalszej części pracy podczas projektowania detektorów uszkodzenia rozważać tylko takie uszkodzenia, które mają największy wpływ na pracę napędu elektrycznego, czyli: całkowite uszkodzenie przetwornika, wystąpienie szumu pomiarowego i zmiana wzmocnienia sygnału pomiarowego.

W rozdziale siódmym autor recenzowanej pracy wykonał badania symulacyjne i eksperymentalne dotyczące detekcji i kompensacji uszkodzeń czujników pomiarowych z wykorzystaniem metod analitycznych dla rozpatrywanych struktur sterowania. Autor rozprawy słusznie zaproponował skuteczny sposób projektowania detektora uszkodzeń czujnika pomiarowego z wykorzystaniem co najmniej dwóch par zmiennych stanu, niezależnie od rodzaju uszkodzonego przetwornika i sterowania. Przeprowadzono liczne badania symulacyjne i laboratoryjne, zarówno dla detekcji uszkodzeń enkodera inkrementalnego, przetworników prądu stojana z wykorzystaniem zmiennych stanu w oparciu o mierzone wartości prądów fazowych. W podsumowaniu każdego podrozdziału punktu siódmego przedstawiono wady i zalety każdego z analizowanych detektorów w odniesieniu do rozpatrywanych przypadków uszkodzeń.

W rozdziale ósmym doktorant wykonał badania symulacyjne i eksperymentalne dotyczące detekcji i kompensacji uszkodzeń czujników pomiarowych z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych. We wstępie tego rozdziału przedstawiono wady i zalety detektorów analitycznych, zwracając uwagę na zalety detektorów opartych na sieciach neuronowych. W rozdziale tym autor zaproponował metodykę uczenia i testowania

neuronowych detektorów uszkodzeń dla rozważanych w rozprawie awarii. Przeprowadzono również przegląd różnych algorytmów uczenia sztucznej sieci neuronowej opartych na metodach optymalizacji nieliniowej funkcji celu oraz typu heurystycznego. W recenzowanej pracy wybór odpowiedniej struktury sztucznej sieci neuronowej i jej weryfikacja w zależności od rodzaju awarii czujnika pomiarowego słusznie została wykonana doświadczalnie, ze względu na brak ściśle określonych kryteriów i reguł wyznaczania optymalnej konfiguracji sieci. Do oceny skuteczności zaprojektowanych sieci neuronowych wykorzystano dwa kryteria całkowite ITSE i ITAE, oraz czas detekcji danej awarii. Dla każdego rodzaju sterowania i uszkodzenia czujnika pomiarowego dokonano weryfikacji eksperymentalnej, analogicznie jak w rozdziale siódmym. W podsumowaniu każdego podrozdziału punktu ósmego przedstawiono wady i zalety każdego z analizowanych detektorów w odniesieniu do rozpatrywanych przypadków uszkodzeń.

W rozdziale dziewiątym autor przeprowadził badania związane z kompensacją uszkodzeń przetworników prądu stojana i enkodera inkrementalnego dla analizowanych struktur sterowania wektorowego silnikiem indukcyjnym, charakteryzującego się zwiększonym stopniem bezpieczeństwa. Jak zauważył to słusznie autor rozprawy w przypadku wystąpienia uszkodzenia kilku czujników konieczna jest zmiana topologii sterowania na taką, która nie wykorzystuje tych komponentów i jednocześnie pozwala na utrzymanie możliwie najlepszego poziomu wydajności i zdolności regulacji. Doktorant zaproponował możliwe do wystąpienia główne scenariusze uszkodzeń czujników pomiarowych w napędach elektrycznych z silnikami indukcyjnymi sterowanymi metodami wektorowymi. W zależności od rodzaju uszkodzeń, autor pracy zaproponował zmianę topologii sterowania napędu, gdzie w najgorszym przypadku konieczne jest przejście na strukturę skalarną $U/f=\text{const}$, bez sprzężenia zwrotnego od prędkości kątowej. Przeprowadzono testy diagnostyczne uszkodzeń czujników pomiarowych opartych na sztucznych sieciach neuronowych, które umożliwiły szybką i pewną detekcję awarii poszczególnych układów pomiarowych w jednym cyklu pracy napędu. Poprawna identyfikacja i lokalizacja uszkodzonych komponentów napędu pozwoliła na zmianę topologii sterowania silnikiem indukcyjnym i tym samym jego dalszą stabilną pracę z możliwością dokończenia procesu technologicznego.

Rozdział dziesiąty zawiera podsumowanie prac badawczych przeprowadzonych przez autora w trakcie przygotowywania rozprawy, jego ocenę praktycznej możliwości implementacji omawianych detektorów uszkodzeń oraz uwagi dotyczące kierunków dalszego rozwoju.

3. OCENA PRACY

W recenzowanej rozprawie przedstawione zostały zagadnienia uszkodzeń czujników pomiarowych wielkości elektrycznych i mechanicznych oraz ich kompensacji dotyczące układów napędowych z silnikiem indukcyjnym odpornym na uszkodzenia wybranych czujników pomiarowych. Należy zaznaczyć, że autor ocenianej pracy opracował systemy diagnostyczne, dla napędów sterowanych metodami wektorowymi: DTC-SVM i DRFOC, które oparte są na prostych zależnościach logicznych, arytmetycznych, obserwatorach zmiennych stanu i ogólnodostępnych sygnałach sterujących, jak i bardziej zaawansowanych metodach wykorzystujących teorię sztucznych sieci neuronowych. Podjęta tematyka i prezentowane wyniki stanowią oryginalne rozwiązania zagadnień przedstawionych w opiniowanej pracy na arenie krajowej, jak i również częściowo na światowej. Układ ocenianej rozprawy i jej redakcja są poprawne. Praca zawiera właściwie sformułowane tezy, których słuszność w pełni została wykazana, zarówno od strony teoretycznej i praktycznej licznymi badaniami symulacyjnymi oraz eksperymentalnymi.

Doktorant przygotowując swoją rozprawę wykazał się znaczną wiedzą teoretyczną oraz umiejętnością prowadzenia samodzielnych badań naukowych. Zaimplementowanie zaproponowanych rozwiązań układów diagnostycznych na stanowisku laboratoryjnym, a w szczególności opracowanie oprogramowania na kartę DS1202, realizującego sterowanie wektorowe silnikiem indukcyjnym metodami DTC-SVM i DRFOC zawierającego wybrane estymatory strumienia, momentu i prędkości kątowej należy uznać za istotne osiągnięcie.

Autor rozprawy dążąc do wykazania słuszności sformułowanych tez w doktoracie, uzyskał kilka oryginalnych wyników naukowych, do których chciałbym zaliczyć:

- przeprowadzenie wnikliwej analizy literatury z zakresu badania mniej znaczących uszkodzeń czujników pomiarowych;
- opracowanie analitycznych układów diagnostycznych opartych na teorii obserwatorów zmiennych stanu wykrywających uszkodzenia czujników pomiarowych w strukturach sterowania wektorowego z silnikiem indukcyjnym;
- opracowanie metod diagnostycznych wykorzystujących teorię sztucznych sieci neuronowych do wykrywania uszkodzeń czujników pomiarowych;
- opracowanie metod kompensacji awarii czujników pomiarowych wykorzystujące sterowanie bezczujnikowe, redundancję sprzętową i analityczną oraz zmianę topologii układu sterowania;

- opracowanie kompletnego systemu diagnostycznego umożliwiającego wykrycie i kompensację awarii wszystkich analizowanych czujników.

4. UWAGI DYSKUSYJNE I SZCZEGÓŁOWE

Redakcja pracy jest staranna, tym niemniej autor nie uniknął drobnych błędów edytorskich i stylistycznych, np.:

- str. 2, wiersz 13, jest „jego”, powinno być „jej”.
- str. 17, autor napisał: *„Zarówno układy estymatorów zmiennych stanu jak i podstawowe, analizowane w literaturze, systemy sterowania napędem elektrycznym, nie są w stanie zapewnić stabilnej pracy układu w przypadku uszkodzenia któregośkolwiek z czujników pomiarowych.”* Moim zdaniem lepsza forma mogłaby być następująca np. *Znane z literatury podstawowe systemy sterowania napędem elektrycznym oraz układy estymatorów zmiennych stanu, nie są w stanie zapewnić stabilnej pracy układu w przypadku uszkodzenia któregośkolwiek z czujników pomiarowych.*
- str. 18, wiersz 7, jest „czas”, powinno być „czasu”.
- str. 28, wiersz 7, jest „analizę”, powinno być „analizy”.
- str. 45, wiersz 2, jest: *„mogą być sterowane przy wykorzystaniu różnych metod sterowania”*. Lepszą formą mogłoby być np. *mogą być regulowane przy wykorzystaniu różnych metod sterowania*, albo *mogą być sterowane przy wykorzystaniu różnych algorytmów regulacji*.
- str. 63, wiersz 9, jest: „bodźce fizyczne”. Lepszą formą mogłoby być np. *sygnały fizyczne*.
- str. 97, wiersz przedostatni, jest „identyfikacja”, powinno być „identyfikacji”.
- str. 131, wiersz 6, jest napisane rys. 7.38b i 7.38c. Chyba powinno być 7.38c i 7.38d.
- str. 132, akapit pod rysunkiem 7.41. Np. wiersz 4 tego akapitu. Autor wspomina o uchybie prędkości, niestety trudno odnieść się to tego komentarza (cały akapit), ponieważ brak jest punktu odniesienia.
- str. 173, wiersz 6. Autor pisze: *„Zależność ta jest wymaga”*. Powinno być: *„Zależność ta wymaga”*.

Należy podkreślić, że wyżej wymienione drobne błędy nie wpływają na ogólną pozytywną ocenę pracy, oraz nie wymagają wprowadzenia zmian lub uzupełnień w przedstawionym do recenzji tekście.

Po przeanalizowaniu rozprawy, oceniającemu nasunęły się uwagi o charakterze dyskusyjnym, o różnym stopniu merytorycznym, na które autor pracy odpowiedział recenzentowi w formie pisemnej. Niektóre z uwag zostały umieszczone w niniejszej recenzji. W trakcie publicznej obrony prosiłbym doktoranta o udzielenie odpowiedzi na następujące pytania:

1. Autor często odnosi się do terminu sztuczna inteligencja np. str. 8, wiersz 15. (Str. 23, wiersz 20). Analiza literatury podaje kilka definicji sztucznej inteligencji. Jest to pojęcie bardzo szerokie, które nie obejmuje tylko logiki rozmytej, sztucznych sieci neuronowych czy też algorytmów ewolucyjnych. Proszę o komentarz, co autor rozumie poprzez pojęcie sztucznej inteligencji. Np. wg. [Luger i Stubblefield 1993] sztuczna inteligencja jest gałęzią informatyki, zajmującą się automatyzacją inteligentnego zachowania. Może warto posługiwać się inną definicją.
2. Rys. 1.9 przedstawia rodzaje uszkodzeń w układach napędowych z silnikami indukcyjnymi. Niestety w pracy autor nie odniósł się do procentowego udziału danej awarii (uszkodzenia). Dlaczego ?
3. Pytanie do tezy rozprawy naukowej pkt. 2. Autor pisze: „mogą być z powodzeniem wykorzystane w układach napędowych”. Czy w każdym układzie napędowym, z dowolnym silnikiem i maszyną roboczą ?
4. Jaka cyfrowa metoda obliczania prędkości została zastosowana w pracy. Czy zastosowano filtr pomiarowy prędkości w celu eliminacji zakłóceń związanych z szumem kwantyzacyjnym ? Jaki jest współczynnik SNR (signal to noise ratio) dla analizowanej niskiej prędkości (5%), a jaki dla znamionowej. Szum kwantyzacyjny ma istotne znaczenie (SNR wzrasta) przy niskich prędkościach. Proszę o komentarz.
5. Str. 97, autor napisał: „...możliwie najkrótszym czasie”. Co doktorant rozumie przez słowo możliwie najkrótszym, w odniesieniu do wartości liczbowej. Jakie czasy są akceptowalne, a jakie już nie w układach napędowych dotyczących wykrywania awarii.

6. Uwagi do zależności (7.1) i (7.2) oraz sposobu określania współczynników wagowych W_1 i W_2 w oparciu o błędy ε . Mam następujące pytanie: czy uwzględnienie progów granicznych błędu (7.2) tylko od wartości bezwzględnej prędkości i współczynników γ jest wystarczające (w późniejszych testach wykrywania awarii wiele z nich nie zostało zidentyfikowanych – czy przeanalizowano dlaczego nie zostało to wykryte). Na stronie 108, autor wyjaśnił, że przeprowadzono testy również dla niskich prędkości obrotowych, ale bez momentu obciążenia. Czy to jest słuszne podejście, uzależnienie tego progu błędu tylko od prędkości z pominięciem informacji o obciążeniu. Co będzie jeśli zmieni się czas narastania sygnału zadanego prędkości lub zmieni się trajektorię ruchu i jej częstotliwość. Proszę o komentarz.
7. Str. 125, uwaga dotyczy nie samych liczbowych wyników, ale sposobu przedstawienia tych wyników, tak aby były one komunikatywne, bez znacznego skupiania się na samych liczbach. Tego brakuje w pracy. Np. czy uzyskane czasy wykrycia awarii są powtarzalne, jak te czasy zmieniają się od prędkości (zostały wykonane testy tylko dla trzech różnych prędkości obrotowych (5%, 100%, 125% prędkości znamionowej)), obciążenia (tylko obciążenie znamionowe), rodzaju trajektorii zadanej i jej częstotliwości, czasu narastania prędkości zadanej itd. Czy istnieje jakaś zależność (charakterystyka) za pomocą której można to przedstawić?
8. Czy autor może skomentować, odnosząc się do swojej rozprawy, o ocenę wartości diagnostycznej wykonanych testów (tzw. jakości metod klasyfikacji) na podstawie otrzymanych wyników, czyli odnieść się do czułości, swoistości i krzywych ROC (Receiver Operating Characteristics) – czyli na wyznaczeniu optymalnego punktu odcięcia. Ponadto, dzięki tym krzywym można ocenić również moc diagnostyczną testu i porównać dokładność kilku testów. Proszę o komentarz.
9. Str. 127, akapit 1. Autor pisze, że układ diagnostyczny po stwierdzeniu awarii przetwornika prądu aktywuje sygnał logiczny, co skutkuje rekonfiguracją układu pomiarowego. Proszę o komentarz, czy należy to zrozumieć tak, że są trzy przetworniki prądu, ale aktywne są zawsze dwa i po awarii jednego z nich zostaje włączony ten nieaktywny? Jeśli tak, to jaki jest czas aktywacji czujnika prądu (chociażby czas włączenia zasilania tego czujnika).
10. Czy podczas uczenia i testowania neuronowych detektorów uszkodzeń, oprócz podziału danych na wektory uczące i testujące w celu oceny jakości klasyfikacji zaproponowano jakąś znaną metodę walidacji? Czy zmierzono jakość segregacji

znany z literatury wskaźnikami oceny klasyfikacji (specyficzność, czułość, średnia geometryczna czułości i specyficzności). Proszę o komentarz.

11. Czy podczas wyboru struktury sieci neuronowej kierowano się np. twierdzeniem Kołmogorowa dotyczącej aproksymacji dowolnej funkcji? Czy optymalizowano strukturę sieci neuronowej? W jaki sposób wybrano strukturę sieci neuronowej?
12. Str. 209. Moim zdaniem brakuje całościowego porównania detektorów analitycznych i neuronowych. Sądzę, że brak odniesienia do podstawowych wskaźników miary jakości klasyfikacji może być tego przyczyną. Proszę o komentarz.

5. WNIOSEK KOŃCOWY

W podsumowaniu pragnę podkreślić, że recenzowana rozprawa doktorska mgra inż. Kamila Klimkowskiego:

- dotyczy naukowego opracowania trudnego problemu technicznego o znaczeniu praktycznym,
- dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy badawczej,
- wykazuje, że autor posiada rozległą wiedzę z dziedziny elektrotechniki, teorii sterowania i napędu elektrycznego,
- zawiera oryginalne elementy, związane z samodzielnym opracowaniem i badanem algorytmów sterowania weryfikowanych na drodze symulacyjnej i laboratoryjnej,
- jest poprawnie opracowana od strony redakcyjnej.

Stwierdzam więc, że rozprawa przedstawiona przez mgra inż. Kamila Klimkowskiego, w pełni odpowiada wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim w art. 13 ust.1 „Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” z dnia 14.03.2003r. (Dz. U. Nr 65 poz. 595, z późniejszymi zmianami) i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Poznań, 23.08.2017

