

Prof. nzw. dr hab. inż. Mirosław Pajor
Instytut Technologii Mechanicznej
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Al. Piastów 19, 70-310 Szczecin

**Recenzja pracy doktorskiej pt. ” Wykorzystanie informacji diagnostycznej
w planowaniu ruchu pojazdu autonomicznego” autorstwa mgr inż.
Przemysława Szulima.**

Recenzję opracowano na podstawie zlecenia Pana Prodziekana Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych, Politechniki Warszawskiej prof. nzw. dr hab. inż. Witolda Marowskiego z dnia 27.07.2016.

1. Przedstawienie treści pracy

Analizując kierunki współczesnego rozwoju szeroko rozumianych systemów transportowych można zauważyć wyraźny trend rozwojowy, którego głównym wyznacznikiem jest zastosowanie autonomicznych systemów sterowania do kierowania ruchem różnego typu pojazdów naziemnych, jednostek pływających czy statków powietrznych. Autonomiczne urządzenia transportowe są coraz szerzej stosowane przez służby ratownicze, policję, wojsko, w przemyśle oraz w transporcie osobowym. Rozwijana w ostatnich latach koncepcja „Przemysłu 4.0” również zakłada budowę bezzałogowych fabryk wyposażonych w autonomiczne systemy transportowe. Urządzenia transportowe tego typu to zaawansowane układy mechatroniczne wyposażone w systemy sensoryczne niezbędne w procesie kontroli i generacji trajektorii ruchu.

Obok zagadnień rozwoju systemów sterowania pojazdów autonomicznych ważnym aspektem jest diagnostyka ich stanu. Podejmowane są liczne prace w zakresie bezpieczeństwa technicznego tego typu obiektów oraz rozwoju ich zdolności radzenia sobie z uszkodzeniami. Ta problematyka jest szczególnie ważna w kontekście projektowania autonomicznych pojazdów dla potrzeb bezzałogowych misji kosmicznych na inne obiekty układu słonecznego oraz misji o charakterze militarnym. Diagnostyka

stanu technicznego układu napędowego pojazdu autonomicznego powiązana z możliwością adaptacji układu sterowania i zastosowania informacji diagnostycznych do planowania trajektorii ruchu pojazdu, to najnowsze wyzwania jakie stawiają sobie ośrodki badawcze zajmujące się tą tematyką.

Recenzowana rozprawa doktorska wpisuje się w tę bardzo interesującą tematykę badawczą. Pan mgr inż. Przemysław Szulim podejmuje się realizacji badań nad rozwiązaniem problemu uwzględnienia stanu technicznego napędu w procesie planowania misji pojazdu autonomicznego w celu optymalizacji wydatku energetycznego oraz spowolnienia rozwoju uszkodzenia.

W pracy skupiono się na napędach elektrycznych z silnikiem BLDC, co jest uzasadnione z uwagi na wzrastającą popularność tego rodzaju napędów w urządzeniach transportowych. Autor opracował model opisujący zależności pomiędzy parametrami pracy silnika i uszkodzeniami mechanicznymi a rozpraszaną energią, której źródłem jest uszkodzenie. Analizowano możliwość oddziaływania na przepływ energii w napędzie pojazdu związanej z określonym uszkodzeniem poprzez optymalizację parametrów jego ruchu. Jest to bardzo interesujący problem badawczy, a jego podjęcie jest w pełni uzasadnione.

Opiniowana praca doktorska liczy 184 strony i składa się z siedmiu rozdziałów plus spis treści, wykaz oznaczeń, streszczenie (w języku polskim i angielskim) oraz wykaz pozycji literaturowych. Spis literatury zawiera zestaw 160 cytowanych pozycji literaturowych (w tym 67 pozycji z ostatnich sześciu lat – brak cytowań prac własnych Autora). Dobór źródeł literaturowych jest prawidłowy. Poszczególne rozdziały rozprawy doktorskiej obejmują: wprowadzenie, pięć rozdziałów merytorycznych zakończonych podsumowaniem zawierającym wnioski i uwagi końcowe.

W pierwszym rozdziale rozprawy tj. we wprowadzeniu Autor definiuje problem, a następnie wykazuje potrzebę podjęcia badań nad opracowaniem metod diagnostyki stanu napędu umożliwiających planowanie trajektorii jego ruchu z uwzględnieniem informacji diagnostycznych o uszkodzeniach silnika. W rozdziale tym Autor wyznacza cele i zakres pracy oraz formułuje jej tezę w brzmieniu: *„Występujący efekt zmodulowania częstości obrotowych obserwowany w zewnętrznym polu magnetycznym, generowanym przez silnik, stanowi istotne źródło informacji diagnostycznej o powstawaniu i rozwoju uszkodzeń mechanicznych”*.

Tezy są stwierdzeniami należącymi do struktur teorii dedukcyjnych, a hipotezy należą wyłącznie do struktur teorii empirycznych. Prawdziwość tez jest wykazywana przez

dowodzenie, a prawdziwość hipotez jest stwierdzana w wyniku badań. Powyższe sformułowanie, do oceny jego prawdziwości, wymaga realizacji badań doświadczalnych i porównywania ich wyników. Zatem jest to hipoteza, a z jej potwierdzenia, wynikać będzie wniosek, że opracowane procedury diagnostyczne bazujące na pomiarach wybranych parametrów zewnętrznego pola magnetycznego silnika napędowego są efektywne i możliwe do zastosowania w warunkach technicznych do planowania ruchu pojazdu autonomicznego.

Ponadto zbyt ogólne wydaje się stwierdzenie zawarte w tezie „o powstawaniu i rozwoju uszkodzeń mechanicznych silnika”, które sugeruje, że mowa jest o wszystkich rodzajach uszkodzeń. Tymczasem w pracy Autor analizuje tylko wybraną grupę uszkodzeń i nic nie uprawnia go do rozszerzenia opracowanych wniosków na wszelkie możliwe uszkodzenia mechaniczne silnika. Przyjęty cel i zakres pracy oraz jej hipoteza (z drobną uwagą powyżej) nie budzą zastrzeżeń i są adekwatne do rozwiązywanych problemów naukowych.

W rozdziale drugim Autor przedstawił zrealizowany w oparciu o algorytm grafowy proces optymalizacji ruchu pojazdu autonomicznego. Na tej podstawie wykazano, że poprzez odpowiednie zaplanowanie profilu prędkości pojazdu autonomicznego możliwe jest sterowanie efektywnością wydatkowania energii, a w szczególności minimalizacja strat energii związanych z uszkodzeniem.

W kolejnym, trzecim rozdziale zamieszczono przegląd sposobów modelowania silników elektrycznych. Następnie przedstawiono model, jaki opracowany został w ramach realizowanych badań, dla celów opisu zjawisk zachodzących w przestrzeni silnika i w przestrzeni go otaczającej z uwzględnieniem oddziaływania wybranych uszkodzeń mechanicznych silnika. Analizowano wpływ trzech rodzajów uszkodzeń: niewspółosiowość, pulsowanie momentu i demagnetyzację magnesów trwałych. Przeprowadzono badania symulacyjne z zastosowaniem opracowanego modelu a wyniki porównano z wynikami symulacji metodą MES.

W rozdziale czwartym Autor wykazał, że analizując pole magnetyczne wokół silnika można zdiagnozować jego uszkodzenia. Efekty związane z uszkodzeniami, obserwowane w polu magnetycznym wokół silnika, są pierwotne w stosunku do efektów obserwowanych w prądzie i mogą być zastosowane jako potencjalny sygnał diagnostyczny.

W rozdziale piątym dokonano analizy wpływu niewspółosiowości na poziom generowanych strat w silniku. Zbudowano model analityczny opisujący wpływ

uszkodzeń na straty mocy wywołane powstaniem prądów wirowych, za pomocą którego wykazano wpływ uszkodzeń na wzrost poziomu strat mocy silnika BLDC.

Kolejny rozdział, szósty, zawiera opis zrealizowanych badań stanowiskowych, w ramach których doświadczalnie zweryfikowano wyniki badań symulacyjnych. Zestawienie wyników badań eksperymentalnych poparte szczegółową analizą modelu pozwoliło Autorowi wyjaśnić przyczyny występowania różnych efektów w sygnale z zewnętrznego pola magnetycznego.

Rozprawę zakończono podsumowaniem, w którym Autor wyciągnął wnioski z przeprowadzonych badań i ocenił poziom weryfikacji postawionej w pracy hipotezy.

2. Oryginalne osiągnięcia pracy

Bardzo dużym atutem pracy doktorskiej Pana Przemysława Szulima jest możliwość bezpośredniego wykorzystania jej efektów w praktyce przemysłowej w zakresie diagnostyki napędów elektrycznych oraz sterowania pojazdami autonomicznymi. Autor posiada dużą biegłość w posługiwaniu się nowoczesnymi narzędziami w zakresie komputerowego modelowania złożonych systemów mechatronicznych. Ponadto Autora nie stronił od prac eksperymentalnych. W celu praktycznego potwierdzenia funkcjonalności opracowywanych metod diagnostycznych Autor przeprowadził szereg badań doświadczalnych wykazując przy tym wysokie umiejętności realizacji tego typu badań. Eksperyment praktyczny potwierdził poprawność działań opracowanych algorytmów i umożliwił wyjaśnienie efektów obserwowanych w rejestrowanych sygnałach diagnostycznych. Zastosowane w pracy procedury badawcze są nowoczesne i adekwatne do rozważanej problematyki. Wszystkie zaplanowane zadania Autor zrealizował konsekwentnie a uzyskane rezultaty poddał stosownej analizie.

Do największych oryginalnych osiągnięć tej pracy zaliczyć można:

1. Opracowanie oryginalnego modelu opisującego zjawiska elektromagnetyczno-mechaniczne zachodzące w silniku elektrycznym BLDC z uwzględnieniem obecności uszkodzeń typu niewspółosiowość, pulsowanie momentu oraz demagnetyzacja magnesów trwałych.
2. Wykazanie, że analiza zewnętrznego pola magnetycznego wokół silnika umożliwia obserwacje symptomów powiązanych z analizowanymi uszkodzeniami silnika. Sygnał ten może być dobrym sygnałem

diagnostycznym, konkurencyjnym w odniesieniu do sygnały prądowego, gdzie obserwowane efekty mają charakter wtórny.

3. Zaprojektowane i zrealizowane badania doświadczalne, potwierdzające skuteczność działania opracowanych modeli i procedur diagnostycznych. Analiza wyników badań i porównanie z wynikami symulacji umożliwiają wyjaśnienie wielu efektów obserwowanych w sygnale diagnostycznym.

Wyniki pracy wskazują na dobrą znajomość, przez Autora problematyki modelowania i analizy zaawansowanych modeli złożonych systemów mechatronicznych. Autor ma również dużą wiedzę w zakresie planowania i realizacji badań eksperymentalnych.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Do uwag dyskusyjnych i krytycznych zaliczyłbym:

1. Nie mogę zgodzić się ze stwierdzeniem Autora zawartym na str. 16, że „Im więcej źródeł nawet niepewnych informacji, tym wypadkowa oszacowania dokładniejsza”. Oznaczałoby to, że można wykonać kilkaset pomiarów suwmiarką i możliwe jest uzyskanie dokładności na poziomie np. nanometrów. Dokładność oszacowania w dużym stopniu zależy od poziomu niepewności źródła.
2. Zamieszczone na str.23 rys.2.2 ma charakter ikonograficzny i bez stosownych wyjaśnień w tekście nie niesie żadnych informacji. Brak jest nawet odwołania do tego rysunku. Z uwagi na istotność prezentowanych na nim informacji, z punktu widzenia celu pracy, winien być szerzej skomentowany.
3. Brakuje mi w pracy dyskusji na temat zestawienia poziomu poszczególnych strat jakie mogą wystąpić w autonomicznym pojeździe i ich porównania. Istnieje wiele przyczyn zwiększonego zużycia energii czy wzrostu strat energii, np. pokonywanie wzniesień, opory toczenia, skończona rezystancja uzwojeń, awaria kluczy elektronicznego komutatora, i wiele innych uszkodzeń. W jakiej relacji do nich są strat z tytułu niewspółosiowości, wahań momentu i demagnetyzacji magnesów. Taka analiza pokazałaby czy warto uwzględniać w modelu tego typu błędy i na jaki uzysk energetyczny możemy liczyć.
4. W pracy zaprezentowano bardzo obszernie część opisującą proces modelowania napędu dla potrzeb analizy możliwości jego diagnostyki. Prezentowane w tej części wyniki są interesujące i ważne w odniesieniu do postawionej hipotezy.

Natomiast części opisująca zagadnienia planowania trajektorii, bezpośrednio powiązana z tytułem rozprawy, została znacznie ograniczona. Zaprezentowano w niej wyniki optymalizacji prędkości ruchu pojazdu autonomicznego dla a priori założonej topografii pokonywanej trasy. Prezentowane wyniki symulacji zaprojektowanych algorytmów w formie przebiegów prędkości ruchu nie dają pełnej informacji o efektywności energetycznej. Dopiero prezentacja sygnałów sterujących pojazdem oraz zestawienie zysków energetycznych w odniesieniu do poszczególnych, przyjmowanych w symulacjach funkcji kryterialnych, może dać czytelnikowi pełniejszy obraz skuteczności działania opracowanych procedur planowania trajektorii ruchu pojazdu autonomicznego oraz wyjaśnić również kwestie poruszane w uwadze nr 3.

5. Na str. 163 w podsumowaniu wyników badań eksperymentalnych Autor stwierdza, że w badaniach eksperymentalnych nie udało się potwierdzić wpływu analizowanych uszkodzeń na sprawność silnika co może być wywołane ich małym wpływem. Stoi to w sprzeczności z wynikami symulacji omawianymi w rozdziale piątym gdzie stwierdzono ich istotny wpływ. Ten stan rzeczy Autor potwierdza w podsumowaniu na str. 167. W pracy nie znalazłem odpowiedzi, czy celowa jest zatem diagnostyka tego rodzaju uszkodzeń w zagadnieniach planowania trajektorii? Kwestia ta jest bezpośrednio powiązana z bilansem zysków energetycznych, o którym mowa w uwadze nr 3 i 4.

Tekst pracy został napisany starannie, część edytorska pracy jest na wysokim poziomie. W trakcie czytania pracy natrafiłem na nieliczne błędy redakcyjne:

- Str.18, ostatni akapit – użyto określeń „dokładna analiza” i „bardziej dokładna analiza” – takie stopniowanie poziomów zaawansowania prowadzonych analiz niesie niewiele informacji dla czytającego rozprawę.
- Str. 25, pierwszy akapit w rozdz. 2.1 – niefortunne zdanie „Zdecydowana większość prac naukowych dotyczy zagadnień optymalizacji zużycia energii” jest nieprawdziwe.
- Str.30, zależność 2.1 i 2.1 – użyto „i” do oznaczenia zredukowanego przełożenia i natężenia prądu.
- Str. 32, koniec pierwszego akapitu – błędne odwołanie do rysunku, jest „rys.2.8”, powinno być „rys. 2.9”.
- Str. 37, drugi akapit – „nieminionym poziomem” – nie wiadomo co Autor miał na myśli.

- Str. 41, rys. 2.16 – błędna etykieta wykresu, jest „6.8, 6.9, 6.10”, powinno być „2.8, 2.9, 2.10”.
- Str. 50, rys.3.2 – praca jest w języku polskim, zatem opisy winny być przetłumaczone.
- Str. 51, rys.3.3 i opis pod nim – brak na rysunku odnośnika nr 5, który jest użyty w jego opisie.
- Str.58, rys.3.5 – w lewej części rysunku pojawiają się liczby 8 i 12, nie wiadome jest ich znaczenie.
- Str. 77, rys. 3.9 – błąd w opisie na rysunku, jest „Stoian”, powinno być „Stojan”.
- Str. 116, w środku drugiego akapitu – jest „juz”, powinno być „już”.
- Str. 165, pierwszy akapit rozdz. 7.2 – brakuje wyrazu „rozprawie” lub „pracy”.
- W spisie literatury pozycje [70], [118], [136] i [156] są niekompletne.

4. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę powyższą ocenę treści rozprawy stwierdzam, że w pełni spełnia ona wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę o stopniach i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 r. (z późniejszymi zmianami) oraz Rozporządzeniu Ministra Edukacji Narodowej i Sportu z dnia 15 stycznia 2004 r. (z późniejszymi zmianami). Zrealizowana przez mgr. inż. Przemysława Szulima praca ma duży potencjał merytoryczny i praktyczny. Praca ta stanowi oryginalne rozwiązanie sformułowanego problemu naukowego oraz wskazuje na duży poziom wiedzy teoretycznej i praktycznej jej Autora. **Reasumując stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska może być dopuszczona do publicznej obrony.**

