

dr hab. inż. Rafał Stanisławski, prof. uczelni
Katedra Informatyki
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Politechnika Opolska
e-mail: r.stanislawski@po.edu.pl

Opole, 2022-09-30

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Rada Dyscypliny
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika
wpłynęło dnia 10.10.2022
nr 32 zat.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy:

Efektywność energetyczna jako kryterium walidacji modelowania systemów napędów elektrycznych dla potrzeb wirtualnego rozruchu systemów automatyki przemysłowej

Autor rozprawy: mgr inż. Szymon Bysko

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Jacek Czczot

Promotor pomocniczy: dr inż. Aneta Szyda

Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącej Rady Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Śląskiej, dr hab. inż. Moniki Kwoki, prof. PŚ, z lipca 2022 roku.

1. Zawartość pracy i ocena formalna

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska zawiera łącznie 151 stron podzielonych na dziesięć rozdziałów, literatury liczącej 129 pozycji, wykazu współautorskich publikacji, zestawienia projektów badawczo-rozwojowych współrealizowanych przez Doktoranta, oraz spisu rysunków i tabel. Dysertacja została napisana w języku polskim.

W Rozdziale pierwszym przedstawiono krótkie wprowadzenie do zagadnień poruszanych w pracy. Scharakteryzowano w nim kontekst pracy, omówiono motywacje do podjęcia przeprowadzonych badań oraz zaprezentowano cele i tezy dysertacji. Ponadto w Rozdziale pierwszym krótko scharakteryzowano strukturę pracy.

W Rozdziale drugim zawarto wprowadzenie do koncepcji tzw. Przemysłu 4.0. W szczególności skoncentrowano się na zagadnieniach inżynierii wirtualnej oraz wirtualnego rozruchu jako efektywnych narzędzi optymalizacji czasu i kosztów w procesie rozruchu. Rozdział ma charakter wprowadzający i w ujęciu technicznym uzasadnia cel dysertacji.

Rozdział trzeci omawia pojęcie efektywności energetycznej. W pierwszej kolejności Kandydat zaprezentował światowe trendy redukcji emisji gazów cieplarnianych, które wprowadzają potrzebę zwiększenia efektywności energetycznej zakładów przemysłowych. Następnie zostały zestawione wyniki emisji gazów cieplarnianych i poboru energii elektrycznej na przykładzie zakładów produkcji samochodów. Podobnie jak Rozdział drugi, Rozdział trzeci ma charakter wprowadzający i uzasadnia cele dysertacji.

Rozdział czwarty wprowadza do zagadnień związanych z napędami elektrycznymi i opisuje poszczególne komponenty układów napędowych tj. silniki elektryczne, falowniki oraz przekładnie zębate. Rozdział ten ma charakter techniczny.

Właściwe wprowadzenie do stosowanych w pracy metod badawczych zaprezentowano w Rozdziale piątym. Omówiono w nim stanowiska badawcze z systemami napędów elektrycznych obejmujące bardzo popularne w przemyśle przenośniki taśmowe i paskowe. Zaprezentowano również zastosowane w pracy narzędzia akwizycji danych, przedstawiono środowisko badań symulacyjnych i stanowisko rozruchu wirtualnego.

W Rozdziale szóstym zostały przedstawione modele poszczególnych komponentów układu napędowego, które zostały opracowane i zaimplementowane przy budowie środowiska wirtualnego rozruchu. Przedstawiono modele matematyczne poszczególnych elementów układu obejmujących generator profilu, falownik pracujący w różnych trybach, silnik elektryczny, wał silnika, przekładnie, łożyska, urządzenie wykonawcze i enkoder. Rozdział ten, stanowiący istotny wkład Kandydata, ma charakter teoretyczno-praktyczny i implementuje narzędzia matematyczne/algorytmiczne wykorzystywane w kolejnych częściach pracy.

Walidacja modeli matematycznych poszczególnych podsystemów, jak również całego systemu napędu elektrycznego została przeprowadzona w Rozdziale siódmym. Również w tym miejscu dokonano oceny wpływu nastaw generatora profilu, nastaw pozycjonera oraz parametrów algorytmu sterowania skalarnego falownika na pobór energii elektrycznej. Walidacja została przeprowadzona w oparciu o rzeczywiste dane pomiarowe. Ten rozdział stanowi znaczący wkład praktyczny Doktoranta i istotnie podnosi walory ocenianej dysertacji.

W Rozdziale ósmym przedstawiono dobór komponentów systemu napędu elektrycznego w różnych scenariuszach pracy układu. Badania pokazują, że opracowany system pozwala na ocenę jakościową i ilościową zużycia energii elektrycznej i efektywności energetycznej, przy różnej konfiguracji sprzętowej systemu. Ocenie poddano przykładowe konfiguracje przenośnika taśmowego, przenośnika paskowego i mieszalnika. Rozdział ten ma charakter praktyczny i pokazuje skuteczność opracowanej metodologii przy doborze komponentów systemu.

Rozdział dziewiąty prezentuje autorską procedurę autonomicznego doboru nastaw systemu napędowego. Zastosowano w tym celu genetyczny algorytm optymalizacyjny. W rozdziale pokazano dobór parametrów optymalizatora i wpływ otrzymanych wyników na właściwości systemu napędowego. Optymalizację przeprowadzono dla dwóch przykładowych systemów obejmujących przenośnik taśmowy i paskowy dla następujących parametrów a) zużycia pobieranej energii elektrycznej, b) efektywności energetycznej i c) strat energii elektrycznej. Rozdział dziewiąty łączy wszystkie rozważania teoretyczne i praktyczne dokonane w poprzednich częściach pracy i stanowi w pewnym sensie zwięźczenie przedmiotowej dysertacji.

W rozdziale dziesiątym zostało zawarte podsumowanie i wnioski z przeprowadzonych badań, wraz z odniesieniem do postawionych tez dysertacji. W Rozdziale przedstawiono również kierunki potencjalnych przyszłych prac Doktoranta.

Układ pracy jest poprawny. Treści dysertacji zostały logicznie podzielone na poszczególne rozdziały pracy. Układ i zakres poszczególnych rozdziałów, podrozdziałów i sekcji nie budzi żadnych wątpliwości recenzenta. Jedyne wątpliwość dotyczy braku streszczeń dysertacji w języku polskim i angielskim.

Warta szczególnego podkreślenia jest bardzo dobra strona edycyjna pracy. Rozdziały, podroz-

działy, sekcje, nagłówki, stopki itp. utrzymane są tej samej konwencji, przez co praca bardzo dobrze wygląda. Rysunki są bardzo starannie przygotowane z dbałością o estetyczne i precyzyjne przedstawienie graficzne zastosowanych algorytmów i wyników badań. Język użyty w pracy jest czytelny i precyzyjny, przez co pracę czyta się dobrze. Należy ponadto zaznaczyć, że rozprawa jest bardzo dobrze przygotowana redakcyjnie. Występujące nieliczne błędy typograficzne zostały wypunktowane w dalszej części recenzji.

2. Ocena merytoryczna pracy

Problematyka związana z optymalizacją zużycia energii, a przez to z redukcją gazów cieplarnianych, jest obecnie jednym z podstawowych wyzwań społeczeństw współczesnego świata. Ponadto gwałtowny wzrost kosztów energii wykorzystywanej w przemyśle, jest w ostatnich dwóch latach istotnym determinantem wzrostu kosztów produkcji we wszystkich obszarach przemysłu. Dlatego ostatnio szczególnie popularne stały się zagadnienia związane z optymalizacją zużycia energii elektrycznej w zakładach przemysłowych. Również pojawienie się nowych możliwości pozyskiwania energii z odnawialnych źródeł energii jest przyczyną dużego zainteresowania nauki i techniki zagadnieniami związanymi z magazynowaniem i bilansowaniem energii pozyskiwanych z różnych źródeł. Należy jednak pokreślić, że problematyka związana z optymalizacją procesów w różnych aspektach jest obszarem dojrzałym, który jest dobrze zgłębiany w literaturze światowej, zarówno w ujęciu teoretycznym jak również praktycznym. W odniesieniu do zagadnień automatyki, podstawy teoretyczne optymalnej regulacji procesami powstały już w latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku i prace w tym obszarze stanowią w dalszym ciągu istotną część obszaru teorii i praktyki sterowania, również w kontekście regulacji minimalnoenergetycznej. Z drugiej strony modelowanie układów napędowych jest również zagadnieniem dobrze zgłębianym w literaturze. W tym bardzo różnorodnym obszarze badań, przeważają prace dotyczące modelowania silników za pomocą modeli o parametrach rozłożonych, których implementacja wymaga dużych nakładów obliczeniowych. Jednak w tym miejscu również dużą popularnością cieszą się prace z modelowania silników za pomocą uproszczonych modeli o niskiej złożoności obliczeniowej. Istotną zaletą drugiego podejścia jest możliwość łatwej implementacji modeli na komputerach o stosunkowo niskiej mocy obliczeniowej oraz możliwość ich użycia zarówno do zadania sterowania w czasie rzeczywistym, jak również do doboru nastaw parametrów układów regulacji. Recenzowana dysertacja lawiruje między dwoma w/w obszarami badań i próbuje połączyć elementy uproszczonego modelowania układów napędowych w celu doboru komponentów i optymalizacji energetycznej układu. Ponadto Autor dokonuje próby implementacji opracowanych narzędzi do środowiska wirtualnego rozruchu, które jest jednym ze standardów we współczesnej praktyce przemysłowej.

W związku z powyższym Autor podejmuje pracę w ważnym i aktualnym obszarze badań, który ma swoje podstawy w światowej literaturze naukowej, jak również daje możliwości osiągnięcia nowych, istotnych wyników szczególnie w ujęciu praktycznym. Ponadto recenzent jednoznacznie umiejscawia przedmiotową dysertację w dyscyplinie *Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika* w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych.

Doktorant postawił sobie ambitny i ważny cel opracowania modelu napędu elektrycznego jako systemu łączącego poszczególne jego elementy z zastosowaniem prostych obliczeniowo modeli, które

są łatwo implemmentowalne w środowiskach przemysłowych. Zbudowane modele mają być zastosowane do opracowania narzędzi wirtualnego rozruchu oraz doboru komponentów i nastaw układu w celu optymalizacji energetycznej. Autor przedstawił trzy tezy rozprawy:

- Możliwe jest stworzenie środowiska symulacyjnego umożliwiającego zastosowanie procedury wirtualnego rozruchu do badań efektywności energetycznej systemów napędów elektrycznych stosowanych w automatyce przemysłowej.
- Możliwe jest opracowanie uniwersalnej metody modelowania i symulacji systemów napędów elektrycznych, których głównym kryterium walidacji są ich własności energetyczne.
- Możliwe jest stosowanie procedury wirtualnego rozruchu w celu oceny poprawności doboru oraz weryfikacji nastaw systemów napędów elektrycznych pracujących ze stałym obciążeniem pod kątem ich efektywności energetycznej.

Zwartość rozprawy, opisana w poprzednim punkcie recenzji, wynika bezpośrednio z postawionych celów pracy i prowadzi do dowiedzenia w/w tez. Ostatecznie, do podstawowych osiągnięć dysertacji można zaliczyć:

- Opracowanie modelu systemu napędu elektrycznego jako układu łączącego jego poszczególne elementy tj. falownik, silnik indukcyjny, wał silnika, przekładnia, łożyska toczne i urządzenie wykonawcze.
- Implementacja modeli w postaci biblioteki wdrożonej w środowisku przemysłowym, którą można zastosować dla szerokiej gamy produktów różnych producentów, w oparciu o dane katalogowe.
- Przeprowadzenie obszernych badań w celu weryfikacji zaproponowanych modeli w oparciu o sygnały rzeczywiste.
- Zastosowanie modeli do doboru komponentów systemu napędowego.
- Zastosowanie genetycznego algorytmu optymalizacyjnego do doboru nastaw systemu napędowego, w celu optymalizacji efektywności energetycznej układu.
- Implementacja algorytmów w środowisku rozruchu wirtualnego RF::ViPer, co umożliwi optymalizację efektywności energetycznej układu napędowego w środowisku rozruchu wirtualnego.

Pomimo pewnych (w większości drobnych) uwag recenzenta do niektórych wyników prezentowanych w dysertacji, które zawarto w części czwartej niniejszej recenzji, należy jednoznacznie stwierdzić, że wszystkie wyżej wymienione osiągnięcia są znaczące i stanowią istotny wkład Kandydata w rozwój dyscypliny *Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika* oraz finalnie doprowadziły do osiągnięcia celów pracy. Ponadto otrzymane w dysertacji wyniki jednoznacznie udowadniają postawione tezy.

Generalnie praca ma charakter praktyczny. Główny wkład Kandydata stanowią Rozdziały szósty, siódmy, ósmy i dziewiąty. Rozdziały szósty i dziewiąty zawierają elementy teoretyczne i mają charakter teoretyczno-praktyczny, natomiast Rozdziały siódmy, ósmy mają charakter praktyczny.

3. Analiza źródeł, pozycja rozprawy, znaczenie wyników Autora, umiejętność przedstawiania wyników

Motywacja dla podjęcia tematu rozprawy wniknęła z dobrze przeprowadzonej przez Autora analizy literatury przedmiotu, liczącej 129 pozycji. Dzięki szerokiej analizie literaturowej został poprawnie odzwierciedlony aktualny stan wiedzy na temat wszystkich zagadnień podejmowanych w pracy. Pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy reprezentowanej w literaturze światowej jest bardzo dobra. Doktorant jest współautorem czternastu publikacji naukowych w większości obejmujących zakres recenzowanej dysertacji. Dwie prace to artykuły opublikowane w indeksowanych na liście JCR renomowanych czasopismach *Computers & Industrial Engineering* (IF: 5.431, 140 pkt.) i *Archives of Control Sciences* (IF: 1.443, 100 pkt.), trzy prace stanowią artykuły w czasopismach uwzględnionych na listach MEiN, tj. *Pomiary, Automatyka i Roboryka* (70 pkt.), *Journal of Physics: Conference Series* (40pkt.), *Mechanik* (11 pkt.), pięć prac to referaty na międzynarodowych konferencjach naukowych, tj. *International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*; *International Conference on Control, Automation and Robotics*; *Global Congress on Manufacturing and Management*; *International Conference on Robotics and Automation Engineering*; *International Symposium on Electrical, Electronics and Information Engineering*, cztery publikacje publikacje są referatami konferencyjnymi opublikowanymi w formie rozdziałów w monografiach pt. *Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance*; *Towards Industry of the Future*; *Recent Achievements in Automatics, Robotics and Measurement Techniques*; *Advances on Automation, Robotics and Measurement Techniques* wydawnictwa Springer. O znaczącej pozycji naukowej Autora świadczą również cytowania jego prac. Wg. bazy *Web of Science* Doktorant zgromadził 39 cytowań, a jego index Hirscha wnosi 4.

Autor posiadał umiejętność poprawnego, przekonującego i precyzyjnego przedstawiania uzyskanych przez siebie wyników. Zarówno część merytoryczną rozprawy, jak również artykuły cechuje zwięzłość, jasność języka oraz precyzja.

4. Wady rozprawy, słabe strony, uwagi i pytania

Należy podkreślić, że poziom merytoryczny ocenianej dysertacji jest wysoki i recenzent nie dostrzegł w niej istotnych wad i niedostatków. Jednak warto również w nich wskazać na pewne, w większości drobne uchybienia oraz niejasności. Uwagi zostały wypunktowane i podzielone na dwie grupy, a) uwagi dyskusyjne i pytania oraz b) drobne uchybienia typograficzne i stylistyczne.

Uwagi dyskusyjne i pytania:

- 1) Strona 38, równanie 4.3 i strona 39 równanie 4.4. Autor używa oznaczenia U jako napięcia zasilającego silnik. O jakie napięcie chodzi? W dalszej części pracy Autor używa oznaczenia U_s w odniesieniu do napięcia skutecznego.
- 2) Strona 49 rysunek 6.1. Autor przedstawia podział systemu napędowego na poszczególne podsystemy. Rysunek ma charakter poglądowy i nie opisuje szczegółów połączeń między podsystemami. Znacznie bardziej interesujący byłby szczegółowy schemat systemowy opisujący również sygnały oddziałujące na poszczególne podsystemy. Szczególnie, że po rysunku można

R8h

wnioskować, że w rozpatrywanym układzie występuje sprzężenie zwrotne. Systemowe spojrzenie na ten proces pozwoliłoby na analizę układu jako systemu o złożonej strukturze.

- 3) Strona 51 rysunek 6.4. W przebiegach czasowych przyspieszenia kątownego dla rampy wygładzonej zauważyć można oscylacje. Czy Autor jest w stanie określić źródło ich występowania?
- 4) Strona 55 równanie (6.6). Na jakiej podstawie określono wartości w mianownikach?
- 5) Doktorant w kilku zależnościach prezentowanych w pracy (np. (6.7), (6.10)) używa operatora supremum \vee . Zastosowanie tego operatora i jego znaczenie powinno być wyjaśnione.
- 6) Rozdział 6. Wg. Autora Rozdział opisuje modelowanie systemów napędów elektrycznych. Jednak z punktu widzenia recenzenta w większym stopniu opisana została implementacja numeryczna zbudowanych modeli, niż sam ich opis. Wydaje się, że w tym zadaniu można by z powodzeniem zastosować metody oparte na modelach dynamicznych o parametrach skupionych zdefiniowanych w czasie dyskretnym. Pozwoliłoby to na bardziej formalną reprezentację opracowanych narzędzi, co istotnie zwiększyłoby walory dysertacji.
- 7) Rozdział 6. Zaprezentowane algorytmy, a w szczególności ten dotyczący profilu zmiany prędkości obrotowej napędu, są dość zawiłe. Dodanie rysunków zawierających algorytmy w postaci schematów blokowych lub pseudo-kodu istotnie zwiększyłoby czytelność pracy w tym zakresie. Uwaga ta dotyczy zarówno poszczególnych podsystemów, jak również całego systemu.
- 8) Rozdział 7. Autor dokonuje walidacji otrzymanych modeli i prezentuje szczegółowo wyniki badań. Jednak zdaniem Recenzenta, pomimo obszernych badań Autor dość skromnie komentuje otrzymane rezultaty. Ponadto wprowadza błąd względny modeli tylko dla oceny dokładności pobieranej energii elektrycznej, a byłby to interesujący wynik również dla innych badanych wielkości (np. prędkości obrotowej). Dlatego w tym kontekście recenzentowi nasuwa się kilka uwag:
 - a) Bardzo interesujące wyniki Autor otrzymuje w kontekście zestawienia między błędem średnim $ME_{n/u}$, a średnim błędem bezwzględnym $MAE_{n/u}$, szczególnie dla rampy prostokątnej i trójkątnej. Można tam zauważyć dość niewielką różnicę między w/w błędami, co jest nie do końca zgodne ze spodziewanymi rezultatami. Należy zauważyć, że przy wyznaczaniu nieznanymi parametrów modeli jedną z najbardziej powszechnych metod estymacji, tj. metoda najmniejszych kwadratów, z definicji otrzymujemy $ME = 0$ w serii uczącej, co w seriach testowych prowadzić powinno do spełnienia warunku $ME \ll MAE$. W rozpatrywanych w pracy przypadkach tak jest wyłącznie dla rampy wygładzonej. Recenzent prosi o komentarz w tej sprawie.
 - b) Na rysunkach 7.11 i 7.12 można zauważyć, że system pobiera większą energię, niż jest szacowana przez model. Może to wynikać z nieuwzględnienia wszystkich strat w układzie. Czy Doktorant ma przypuszczenie czym może być spowodowana ta różnica?
 - c) Autor na stronie 86 stwierdza "... Dokładność zmierzonego modelu zużycia energii elektrycznej dla różnych nastaw pozycjonera jest zadowalająca, ale widoczne jest zwiększenie wartości błędu pomiaru wraz ze wzrostem wartości czasów przyspieszenia i hamowania...". Uwaga: w tym przypadku nie mamy raczej do czynienia z błędem pomiaru, tylko błędem modelu. Pytanie: czy Autor potrafi skomentować z czego wynika opisane w cytacie zjawisko?

- 9) W części równań dyskusyjne jest stosowanie operatora równości. Są miejsca, w których właściwe by było zastąpienie go operatorem podstawienia. Np. równanie (6.4) jest w ujęciu ścisłym sprzeczne.
- 10) Zdaniem recenzenta, w pracy można było dobrać bardziej powszechną notację używaną w równaniach. W szczególności uwaga dotyczy operatora mnożenia. W dyscyplinie rozprawy, a nawet ogólniej w dziedzinie nauk inżyneryjno-technicznych, operator kropki jest używany zwykle do opisu iloczynu skalarnego. Zastosowanie go jako operatora iloczynu wielkości skalarnych może być nieco mylące.
- 11) Dlaczego Doktorant, zarówno na liście referencji pracy, jak również w zestawieniu prac własnych, nie umieścił pozycji: Bysko S., Krystek J., Bysko S., Lenort R. (2019), Buffer management in solving a real sequencing problem in the automotive industry - Paint Shop 4.0 concept. *Achieves of Control Sciences* 29(3), pp. 507–527?
- 12) W pracy zabrakło streszczeń zarówno w języku polskim, jak i angielskim.

Drobne uchybienia typograficzne i stylistyczne:

- Strona 39 linia 13. Autor wprowadził zmianę akapitu w środku zdania.
- Strona 40 linia 8. Autor niezbyt trafnie nazwał podrozdział, który ma bardziej ogólny charakter niż *Przekładnie zębate*.
- Strona 43 linia 21. Drobny błąd stylistyczny w zdaniu. Jest *stanowi*, powinno być *stanowił*.
- W pracy zdarzają się niekonsekwencje w formatowaniu tekstu. Np. braki justowania w niektórych fragmentach tekstu (strony 44, 45, 50, 51).
- Strona 54 równanie (6.61). Brak konsekwencji w zastosowanej notacji.

Należy podkreślić, że przedstawione powyżej uwagi, mają w większości charakter dyskusyjny i w związku z tym nie obniżają one bardzo pozytywnej oceny pracy.

5. Podsumowanie recenzji i wnioski końcowe

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi, zdaniem recenzenta, oryginalne rozwiązanie ważnego problemu naukowego oraz wykazuje dużą ogólną wiedzę teoretyczną i aplikacyjną Kandydata w dyscyplinie naukowej *Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika*, a także Jego umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Zatem stwierdzam, że **rozprawa mgr inż. Szymona Bysko spełnia z nadmiarem** warunki określone w ustawie Ustawie o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz.U. z 2017 r. poz. 1789) oraz zgodnie z Ustawą z 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1669 z póź. zm.) w dziedzinie nauk inżyneryjno-technicznych, w dyscyplinie *Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika*.



W związku z powyższym, uwzględniając oryginalność rozwiązania problemu naukowego przedstawionego w rozprawie, specjalistyczną wiedzę Kandydata w dyscyplinie *Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika* oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej **wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Szymona Bysko do publicznej obrony.**

Rafał Stawiński