

Kraków 16 08 2022 r.

Dr hab. inż. Krzysztof Oprzedkiewicz, prof. AGH
AGH, Wydział EAIiB
Katedra Automatyki i Robotyki

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Rada Dyscypliny
Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika

wolnego dnia

nr z dnia

Recenzja

Rozprawy doktorskiej

Mgr inż. Szymona Bysko

Tytuł rozprawy:

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

Dziedzina: nauki inżyniersko-techniczne

Dyscyplina: Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika

Recenzowana praca powstała pod kierunkiem naukowym prof. dra hab. inż. Jacka Cieczota i dr inż. Anety Szyda (promotor pomocniczy). Recenzję przygotowano na podstawie uchwały Rady Dyscypliny AEE Politechniki Śląskiej nr 34/2022 z dnia 21 06 2022r. Prace nad rozprawą odbywały się w ramach I edycji programu „Doktorat Wdrożeniowy”, co implikuje, że uzyskane wyniki muszą wpisywać się w aktualne potrzeby współpracującej firmy ProPoint S.A.

1. Zakres i cel rozprawy

W obecnej chwili zagadnienia efektywności energetycznej są jednymi z najważniejszych i najczęściej rozważanych nie tylko w świecie polityki i biznesu, ale również wśród naukowców i inżynierów. Wynika to z coraz bardziej restrykcyjnych wymagań prawnych, związanych z koniecznością redukcji emisji gazów cieplarnianych. Największy potencjał w kwestii optymalizacji zużycia energii kryje się (obok transportu i budownictwa) w przemyśle.

Optymalizacja zużycia energii przez urządzenie przemysłowe zawierające napęd elektryczny powinna być uwzględniona już na etapie jego projektu. Następnym etapem są testy zużycia energii wykonywane podczas wirtualnego rozruchu, który jest jednym z istotnych etapów uruchamiania instalacji produkcyjnej zgodnie z podejściem zalecanym w ramach przemysłu 4.0. Wirtualny rozruch pozwala na weryfikację konfiguracji sprzętowo-programowej urządzenia i eliminację znacznej części błędów konfiguracyjnych jeszcze przed rzeczywistymi testami, które zawsze wiążą się ze stratami czasu, energii lub surowców.

Dodatkowo należy też zauważyć, że zmniejszenie zużycia energii dla już istniejącego urządzenia lub linii produkcyjnej może być także uzyskane poprzez odpowiednią modyfikację oprogramowania sterującego.

Jednocześnie powyższa tematyka stosunkowo rzadko jest szczegółowo omawiana w literaturze naukowej. Wynika to z faktu, że praktyczne rozwiązania są tajemnicą firm, które je wdrażają, gdyż wiąże się to ze znacznym zyskiem finansowym.

Najwięcej projektów realizowanych przez firmę współpracującą w ramach badań jest związanych z przemysłem samochodowym, dlatego też przeprowadzone badania były głównie ukierunkowane na potrzeby tej branży.

Podsumowując, **tezy pracy**, podane na s. 16 mogą być uznane za nadzwyczaj trafne i istotne z punktu widzenia zarówno naukowego, jak też w aspekcie przyszłych zastosowań proponowanych rozwiązań w praktyce przemysłowej. Brzmia one następująco:

1. Możliwe jest stworzenie środowiska symulacyjnego umożliwiającego zastosowanie procedury wirtualnego rozruchu do badań efektywności energetycznej systemów napędów elektrycznych stosowanych w automatyce przemysłowej.

2. Możliwe jest opracowanie uniwersalnej metody modelowania i symulacji systemów napędów elektrycznych, których głównym kryterium walidacji są ich właściwości energetyczne.

3. 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.

W celu udowodnienia powyższych tez pracy zaproponowano i rozwiązano następujące zagadnienia badawcze:

- opracowanie modeli poszczególnych elementów wybranych przemysłowych systemów napędów elektrycznych,
- przeprowadzenie symulacji mającej na celu weryfikację poprawności i dokładności stworzonych modeli w oparciu o pozyskane dane z rzeczywistych urządzeń,
- stworzenie symulatorów wykorzystujących wcześniej stworzone modele do przeprowadzenia wirtualnego rozruchu dostępnych stanowisk testowych,
- opracowanie i implementacja narzędzi do automatycznego doboru nastaw systemów napędów elektrycznych w środowisku wirtualnego rozruchu.

2. Przegląd treści rozprawy

Tekst rozprawy liczy 151 stron i został podzielony na 10 rozdziałów, bibliografię, spis skrótów, spis rysunków i spis tabel. Przegląd treści rozprawy jest omówiony poniżej.

Rozdziały 1-4 stanowią wprowadzenie w tematykę rozprawy.

We wprowadzeniu krótko omówiono zakres i cel pracy oraz sformułowano zakres i tezę pracy. Uzasadniono celowość stosowania wirtualnego rozruchu w przemyśle motoryzacyjnym i omówiono „state of the art” rozważanej tematyki.

W rozdziale 2 zaprezentowano ideę przemysłu 4.0 i pojęcia z nią związane: wirtualną inżynierię i wirtualny rozruch.

Rozdział 3 wprowadza w szeroko rozumianą tematykę efektywności energetycznej. Na początku omówiono zagadnienia emisji gazów cieplarnianych zarówno w aspekcie prawnym, jak też ich powiązanie z energochłonnością produkcji i eksploatacji samochodów. Zaprezentowano interesujące dane związane z energochłonnością i efektywnością energetyczną produkcji w kilku wiodących niemieckich firmach samochodowych. W następnej kolejności zaprezentowano przegląd najważniejszych zagadnień prawnych związanych z efektywnością energetyczną i zrównoważonym rozwojem.

W rozdziale 4 omówiono elementy i systemy napędów elektrycznych stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym. Omówiono silniki elektryczne ze szczególnym uwzględnieniem silników indukcyjnych, falowniki i przekładnie zębate.

Główne wyniki pracy są zaprezentowane w rozdziałach 5-9.

Rozdział 5 prezentuje metodykę badań doświadczalnych. Na początku omówiono konstrukcję doświadczalnych stanowisk badawczych z badanymi systemami napędów elektrycznych od różnych producentów.

Pierwszym z nich jest przenośnik taśmowy z trzema systemami napędowymi: SIEMENS SINAMICS, SEW MOVITRAC i NORD NORDAC. Napędzane wały przenośnika, łożyskowanie i enkodery są jednakowe.

Drugim stanowiskiem jest przenośnik paskowy zbudowany z identycznych komponentów elektrycznych, jak przenośnik taśmowy.

W dalszej części rozdziału 5 omówiono przygotowane przez Autora rozprawy oprogramowanie S7_PLC_Data_Logger. Jest ono dedykowane do komunikacji z analizatorami jakości energii elektrycznej Janitza oraz ze sterownikami PLC SIEMENS serii S7.

Następnie omówiono komercyjne oprogramowanie KepServerRX stosowane również do akwizycji niektórych doświadczalnych.

Na końcu tego rozdziału omówiono zbudowane w ramach realizacji pracy stanowisko wirtualnego rozruchu ze sterownikiem SIEMENS S7 300 z CPU 319F-3 PN/DP, symulatorem PROFINET i urządzeniem RF::FSBox.

W Rozdziale 6 zaprezentowano stosowane w firmie ProPoint S.A. podejście do modelowania napędów elektrycznych bazujące na komponentach (ang. component-based modeling). Idea ta jest w pełni zgodna z typowym podejściem stosowanym w automatyce, które pozwala opisać złożony system techniczny jako połączenie jego poszczególnych części. Główne wyróżnione części każdego napędu to: falownik, silnik, wał silnika, przekładnia, łożyska, urządzenie wykonawcze i enkoder.

Każdy z modeli opisany jest przez zestaw parametrów wejściowych i wyjściowych, pozwalających na jego konfigurację i połączenie z pozostałymi elementami systemu. W przypadku falowników opisano także najczęściej stosowane rampy prędkości: prostokątną, trapezową i wygładzoną. Omówiono także opracowany w ramach

realizacji rozprawy algorytm pozycjonowania oraz zaimplementowane w falownikach algorytmy sterowania skalarnego (liniowe i paraboliczne).

Rozdział 7 prezentuje walidację zbudowanych z wykorzystaniem stanowisk laboratoryjnych omówionych w rozdziale 5 oraz analizę efektywności energetycznej napędów w funkcji konfiguracji parametrów ich pracy.

Do oceny jakości zbudowanych modeli wykorzystano 4 funkcje kosztu, bazujące na różnicy pomiędzy przebiegami z modelu i z odpowiadającego mu rzeczywistego urządzenia. Są to funkcje: średni błąd, średni błąd bezwzględny, średni bezwzględny błąd skalowany i średni błąd kwadratowy.

Walidacji poddano modele falownika, zaimplementowany algorytm pozycjonowania i algorytmy sterowania skalarnego.

W dalszej części tego rozdziału dokonano walidacji modeli napędów elektrycznych, opisujących zużycie przez nie energii. Do walidacji wykorzystano te same funkcje kosztu, co wcześniej. Rozważono wpływ nastaw pozycjonera i parametrów algorytmów skalarnych na zużycie energii przez napęd.

W Rozdziale 8 omówiono następny etap badań, jakim był dobór konfiguracji sprzętowej odpowiedniej dla zadanej aplikacji i optymalnej w sensie założonej funkcji kosztu, opisującej zużycie energii elektrycznej, straty energii elektrycznej i efektywność energetyczną. Wyniki symulacyjne zostały także zweryfikowane doświadczalnie na stanowiskach laboratoryjnych.

Rozważono systemy napędowe dla przenośnika taśmowego i paskowego oraz mieszalnika śluczanego w przemyśle spożywczym (dla mieszalnika przeprowadzono wyłącznie badania symulacyjne ze względu na brak rzeczywistego urządzenia laboratoryjnego). Rozważono różne konfiguracje komponentów silnik-przekładnia dla wszystkich rozważanych urządzeń systemu. Dokonano bardzo dokładnej analizy wszystkich rozważanych konfiguracji pod kątem ich optymalności w sensie przyjętych energetycznych funkcji kosztu. Interesującym wynikiem jest to, że w zasadzie każda konfiguracja jest optymalna w sensie innej funkcji kosztu.

W Rozdziale 9 zaprezentowano symulacyjną optymalizację nastaw napędów. Rozważono tu tylko te parametry, które są najbardziej istotne z punktu widzenia optymalizacji zużycia energii. Są to: prędkość obrotowa silnika i wartości ramp przyspieszającej i hamującej. Parametry te są najczęściej dobierane przez automatyków.

W początkowej części rozdziału zaprezentowano algorytm genetyczny, który był później implementowany do wyznaczania optymalnych parametrów napędów. Omówiono zasadę jego działania oraz numerycznie zbadano wpływ jego parametrów na działanie: wielkości populacji, liczby iteracji, metody selekcji metody krzyżowania, i metody mutacji. W wyniku tych testów dobrano optymalny zestaw parametrów algorytmu, stosowany w dalszych badaniach.

Jako zadania optymalizacji rozważono: minimalizację zużycia energii elektrycznej, maksymalizację efektywności energetycznej oraz minimalizację strat energii. Zadania

te zostały rozwiązane dla obu rozważanych w pracy doświadczalnych napędów z wykorzystaniem algorytmu genetycznego, zaimplementowanego w środowisku RF::ViPer. Wyniki uzyskane z tej metody zostały zweryfikowane z wykorzystaniem przeglądu zupełnego, który zawsze pozwala na znalezienie minimum, jednakże może być stosowany tylko w prostszych przypadkach i jest nieefektywny czasowo.

Wyniki badań zaprezentowanych w tym rozdziale wskazują, że:

1. Podstawowe nastawy napędu (zadana prędkość obrotowa i parametry obu ramp) mają wpływ na zużycie energii elektrycznej przez napęd, które jest opisane przez wszystkie rozważane funkcje kosztu.

2. W każdym rozważanym wypadku nastawy optymalne w sensie wybranej funkcji kosztu muszą być wyznaczane indywidualnie i dla każdej z rozważanych funkcji kosztu są różne.

Rozdział 10 stanowi podsumowanie pracy oraz kreśli kierunki dalszych badań rozważanej w pracy tematyki.

Na końcu pracy znajdują się: bibliografia, wykaz publikacji własnych i opis udziału Doktoranta w projektach badawczo-rozwojowych. Można tam znaleźć również spis tabel i rysunków.

Osiągnięcia rozprawy

Na podstawie analizy treści rozprawy można wskazać następujące główne osiągnięcia rozprawy:

- Opracowanie zgodnych z podejściem bazującym na komponentach modeli rozważanych napędów elektrycznych.
- Opracowanie autorskiego oprogramowania S7_PLC_Data_Logger do akwizycji danych dotyczących zużycia energii z badanych systemów napędowych i zastosowanie go do badań realizowanych w dalszej części pracy.
- Opracowanie i weryfikacja praktyczna (na stanowiskach doświadczalnych) metodyki symulacyjnej konfiguracji sprzętowej napędu elektrycznego z wykorzystaniem założonych komponentów i pod kątem spełnienia określonych wymagań dotyczących zużycia energii.
- Opracowanie i weryfikacja praktyczna metodyki symulacyjnego doboru nastaw napędu elektrycznego pod kątem minimalizacji zużycia energii.
- Wykonanie szczegółowej analizy konfiguracji różnych typów i konfiguracji napędów elektrycznych pod kątem ich efektywności energetycznej w sensie typowych funkcji kosztu. Analiza ta jest dedykowana pod kątem zastosowań w wirtualnym rozruchu urządzeń i linii technologicznych.
- Implementacja algorytmu genetycznego na platformie środowisku RF::ViPer, co radykalnie ułatwia jego zastosowanie na platformach przemysłowych. Algorytm ten został wykorzystany do optymalizacji energetycznej rozważanych napędów elektrycznych.

- Opracowanie konfiguracji algorytmu genetycznego pod kątem jego zastosowania do rozwiązywania rozważanych w pracy problemów optymalizacji.

Bibliografia pracy liczy 130 pozycji i jest dobrana w sposób trafny i w pełni potwierdza dobre osadzenie problematyki pracy w aktualnym stanie badań z obszaru optymalizacji energetycznej urządzeń przemysłowych. Na podkreślenie zasługuje podanie i omówienie dużego zestawu dokumentów prawnych związanych z efektywnością energetyczną.

Prezentowane przez Autora wyniki były prezentowane na konferencjach międzynarodowych (m.in. MMAR, AUTOMATION, ISEEIE, ICCAR, ICRAE, GCMM) oraz są opublikowane w wysoko notowanych czasopismach o zasięgu krajowym i międzynarodowym, w tym w jednym czasopiśmie z listy filadelfijskiej.

Na podkreślenie zasługuje także bardzo dobra aktywność Doktoranta w realizacji dużych projektów naukowo-badawczych. Był On koordynatorem w jednym projekcie, głównym specjalistą ds. wirtualnego rozruchu oraz Autorem wniosków o dwa projekty (oba rozpatrzone pozytywnie).

W tym miejscu należy też podkreślić, że zaprezentowane przez Autora wyniki mogą znaleźć zastosowanie nie tylko branży motoryzacyjnej, lecz także w każdej innej dziedzinie przemysłu, gdzie są stosowane napędy elektryczne.

Na podstawie powyższych rozważań można stwierdzić, że **hipoteza naukowa pracy, podana na początku niniejszej recenzji została w pełni potwierdzona.**

3. Uwagi dyskusyjne

Podczas lektury recenzowanej rozprawy nasunęły się również pewne uwagi o charakterze dyskusyjnym. Pierwsza z nich ma naturę bardziej ogólną, pozostałe są szczegółowe. Są one podane poniżej.

3.1. Uwaga ogólna

W rozdziale 6 od s. 49 zaprezentowano modele napędów elektrycznych zbudowane zgodnie z podejściem bazującym na komponentach. Podejście to jest oczywiste i w pełni zgodne z ogólnymi zasadami stosowanymi w automatyce od wielu lat. Jednakże modele te uwzględniają zależności wejściowo-wyjściowe wyłącznie w stanie ustalonym. Dlaczego modele te nie uwzględniają dynamiki opisywanych elementów, opisanych nawet przez najprostsze modele transmitancyjne? Z analizy wykresów (zob. np. rysunki 7.1, 7.5, 7.9) można wnioskować, że dodanie dynamiki poprawiłoby dokładność tych modeli.

3.2. Uwagi szczegółowe

s. 44 – jaki protokół komunikacyjny był stosowany do wymiany danych pomiędzy PLC i komputerem stosowanym do akwizycji danych?

s. 45 – opisano, że zebrane dane są zapisywane do pliku tekstowego. Dlaczego nie zastosowano pliku *.csv?

- s. 47 – dyskusyjne są nazwy języków programowania sterowników PLC używane w tym miejscu – typowe nazwy stosowane od wielu lat i zapisane Polskiej Normie są: „język drabinkowy”, „język schematów funkcyjnych” i „graf sekwencji”.
- s. 47 – w tekście podano, że w skład stanowiska wchodzi sterownik PLC serii S7-300, a na rys. 5.4 jest pokazany schematycznie sterownik serii 1500.
- s. 49 – zapisano, że model zawiera 6 komponentów, a na rys. 6.1 widać 7.
- s. 49 – Jaki jest sens rozdzielenia jako osobnych komponentów silnika jego wału? Czy raczej nie chodzi tu o rozdzielenie obwodu elektrycznego od części mechanicznej? To samo pytanie dotyczy oddzielenia łożysk od przekładni, choć są one jej integralną częścią.
- s. 50, rys 6.2, s 52, rys. 6.5, s. 54 rys. 6.6, – w opisie angielskim „cycle time” jest nazwą okresu próbkowania, a w opisie w języku polskim ten parametr jest nazwany „stała czasowa symulacji”.
- s. 89, opis wzoru (8.1) – co to jest „stała czasowa symulatora”?
- s. 92₇ – chodzi chyba o przenośnik paskowy?

4.Strona formalna

Od strony formalnej tekst rozprawy nie budzi większych zastrzeżeń. Układ pracy jest poprawny i spójny logicznie. Tekst jest przejrzysty i „łatwy w czytaniu”.

Od strony edytorskiej praca jest przygotowana starannie, w trakcie czytania dostrzeżono nieliczne „literówki”, błędy językowe i interpunkcyjne, przykładowo: 27¹, 39_{4,5}, 47¹¹, 93₈, 100₁, 107₁₄, 108₅, 117₁, 123₂

5.Podsumowanie

Podsumowując, stwierdzam, że uwagi dyskusyjne podane w punktach 3 i 4 nie umniejszają wartości naukowej ocenianej pracy. Uważam, że praca opisuje wartościowy i oryginalny dorobek naukowy Doktoranta, a zakres i poziom naukowy uzyskanych wyników badawczych odpowiadają w pełni ustawowym i zwyczajowym wymaganiom, stawianym rozprawom na stopień doktora nauk technicznych. Recenzowana praca doktorska spełnia zatem wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z Ustawą o stopniach i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach 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 późn. zm.) w dziedzinie nauk inżyniersko-technicznych, w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika. Wnioskuje zatem do Wysokiej Komisji powołanej przez Radę Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Śląskiej w Gliwicach o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie jej Autora, mgr inż. Szymona Bysko do publicznej obrony.