

dr hab. inż. Stefan Brock, prof. PP
Politechnika Poznańska
Instytut Robotyki i Inteligencji Maszynowej
ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań

Poznań, 20 stycznia 2023 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Rafała Szczepańskiego
pt.: **Sterowanie adaptacyjne silnika PMSM o zmiennym momencie bezwładności z wykorzystaniem inspirowanych przyrodą algorytmów optymalizacyjnych i regulatora bazującego na sprzężeniu od wektora zmiennych stanu**

1. Podstawa opracowania recenzji

Przedmiotem opinii jest rozprawa doktorska mgr. inż. Rafała Szczepańskiego z Instytut Nauk Technicznych Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu, pod tytułem *Sterowanie adaptacyjne silnika PMSM o zmiennym momencie bezwładności z wykorzystaniem inspirowanych przyrodą algorytmów optymalizacyjnych i regulatora bazującego na sprzężeniu od wektora zmiennych stanu*. Recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika w Politechnice Warszawskiej, pana prof. dr hab. inż. Tomasza Stareckiego (pismo z dnia 23 listopada 2022 r.) na podstawie dostarczonej rozprawy doktorskiej pod wyżej wymienionym tytułem. Recenzja ma być wykorzystana w postępowaniu o nadanie mgr. inż. Rafałowi Szczepańskiemu stopnia naukowego doktora nauk technicznych w zakresie nauk inżyniersko-technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

2. Charakterystyka formalna pracy

Opiniowana rozprawa doktorska liczy 130 stron. Dysertacja zawiera 47 rysunków i zdjęć. Rozprawa jest podzielona na 6 rozdziałów merytorycznych, w tym wprowadzenie oraz wnioski i uwagi końcowe. Spis literatury załączony na końcu pracy zawiera łącznie 81 pozycji, w tym 8 prac autorskich Kandydata, z których 5 opublikowano w czasopiśmie z IF. Praca jest napisana komunikatywnym językiem, Autor rozprawy nie ustrzegł się jednak pewnych błędów redakcyjnych. Układ pracy nie budzi istotnych zastrzeżeń. Materiały graficzne w pracy są staranne i czytelne.

3. Ocena podjętego tematu

Tematem przedstawionej rozprawy jest opracowanie sposobu takiego sterowania układem napędowym z silnikiem synchronicznym o wzbudzeniu od magnesów trwałych, by zapewnić poprawną pracę dla zmieniających się parametrów obiektu. Tak postawione zadanie

Strod

rozwiązywane jest w literaturze poprzez syntezę układu sterowania z wykorzystaniem metod adaptacyjnych lub też metod sterowania odpornego (krzepkiego).

Dobór struktury i parametrów takich układów regulacji dla nieliniowych i niestacjonarnych obiektów często nie jest możliwy na drodze analitycznej, gdyż wprowadzane wtedy uproszczenia pogarszają końcowy efekt. Konieczne w takich przypadkach jest zastosowanie metod optymalizacji numerycznej, wśród których wyróżniają się metody heurystyczne optymalizacji, inspirowane przyrodą. Wymienić można na przykład symulowane wyżarzanie, algorytmy genetyczne i ewolucyjne, algorytmy przeszukiwania rojem cząstek i szereg innych. Badania nad efektywnością takich algorytmów w zastosowaniach dla układów sterowania prowadzone są w wielu przodujących światowych ośrodkach naukowych.

Zagadnienie badawcze podjęte w rozprawie jest ważne zarówno z poznawczego jak i zwłaszcza z aplikacyjnego punktu widzenia. Uważam, że tematyka podjęta w ocenianej rozprawie jest aktualna i dobrze wpisuje się w ten zakres prac. Tematyka ta zawiera się w obszarze badań w zakresie automatyki i robotyki oraz elektrotechniki, które obecnie wchodzi w zakres dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

4. Przegląd i ocena wartości naukowej rozprawy

W rozdziale pierwszym rozprawy Autor wprowadza czytelnika w temat rozprawy, wskazując na celowość podjęcia przedstawionych prac. Na podstawie przeprowadzonego przeglądu literatury tematu Autor zauważa, że zagadnienia doboru nastaw regulatora adaptacyjnego dla obiektów niestacjonarnych w zastosowaniach napędowych nie są wystarczająco zbadane. Dlatego też zbadanie możliwości zastosowania metod optymalizacji inspirowanych przyrodą Autor stawia sobie za cel rozprawy doktorskiej. Na tej podstawie Autor stawia tezę pracy:

Możliwe jest uzyskanie powtarzalnych właściwości regulacyjnych napędu elektrycznego z silnikiem PMSM o zmiennym momencie bezwładności poprzez zastosowanie sterowania adaptacyjnego z modelem odniesienia bazującego na zaproponowanej procedurze adaptacji dla algorytmów optymalizacyjnych.

Dalej Autor definiuje cel pracy doktorskiej:

opracowanie struktury adaptacyjnej bazującej na algorytmach optymalizacyjnych inspirowanych przyrodą w celu zapewnienia niezmiennej odpowiedzi silnika PMSM o zmiennym momencie bezwładności.

Na tej podstawie Doktorant przedstawia logicznie i spójnie zestawiony zbiór zadań szczegółowych, obejmujących opracowanie modeli symulacyjnych, wytypowanie struktur regulacji oraz weryfikację eksperymentalną.

Zdaniem recenzenta cel pracy jest dobrze i jasno zdefiniowany, a także teza sformułowana jest poprawnie. W dalszym toku pracy teza została udowodniona poprzez analizę i weryfikację zaproponowanego algorytmu sterowania adaptacyjnego. Cel pracy

S Brock.

został określony na podstawie przeglądu literatury tematu, obejmującej aktualny stan prac w tym zakresie.

W rozdziale drugim zatytułowanym „Napęd elektryczny z silnikiem PMSM o zmiennym momencie bezwładności” Kandydat przedstawia metody model matematyczny analizowanego napędu. Na tej podstawie Autor opracował model symulacyjny korzystając z narzędzi pakietu Matlab, które odpowiadają aktualnym uznanym metodom w tym zakresie. W dalszej części rozdziału następnie Autor zaproponował linearyzację poprzez odsprężanie, i tak opracowany prosty, linowy model został zaproponowany do syntezy regulatora ze sprzężeniem od wektora zmiennych stanu. Dodatkowo wektor zmiennych stanu został rozszerzony o całość z uchybu prędkości, co umożliwiło eliminację uchybu ustalonego prędkości. Zaproponowany układ regulacji został porównany z klasycznym regulatorem kaskadowym z elementarnymi regulatorami typu PI dla prędkości i składowych wektora prądu silnika. Następnie krótko przedstawione zostały wybrane struktury sterowania adaptacyjnego, do których Autor zaliczył sterowanie z przestrajaniem współczynnikami (*gain scheduling*), samostrojenie regulatora, sterowanie ślizgowe oraz sterowanie typu MRAS.

W rozdziale trzecim przedstawione zostało przeniesienie metody optymalizacji gradientowej z zakresu sztucznych sieci neuronowych do zadania optymalizacji współczynników regulatora. Autor przedstawia podobną strukturę liniowego neuronu AdaLine i regulatora ze sprzężeniem od rozszerzonego wektora stanu. To podobieństwo pozwala na zastosowanie gradientowego mechanizmu uczenia z nauczycielem. Oryginalnym dorobkiem Kandydata jest opracowanie wzorcowego modelu odniesienia, uwzględniającego złożoną strukturę układu napędowego. W toku przeprowadzonych badań symulacyjnych przeanalizowany został wpływ współczynnika szybkości uczenia na jakość adaptacji. Ciekawe są także badania wskazujące, że przyjęcie zbyt prostego modelu odniesienia skutkuje niestabilnością procesu adaptacji.

W rozdziale czwartym autor przeprowadza syntezę i badania symulacyjne wybranych algorytmów optymalizacji numerycznej. Na podstawie przeglądu literatury wytypowane zostały dwa algorytmy: przeszukiwania wzorcem oraz optymalizacji rojem cząstek. Autor opracował algorytm okresowego wyzwalania procedury adaptacji, synchronizowanej z okresowo zmiennym sygnałem zadaniem. Mechanizm ten, nazwany procedurą adaptacji dla algorytmów optymalizacyjnych PAAO, wykorzystany został wraz z oboma analizowanymi algorytmami. Przeprowadzone zostały szczegółowe badania skuteczności zaproponowanej procedury postępowania, obejmujące dobór poszczególnych hiperparametrów optymalizacji (liczebności populacji, prawdopodobieństw ruchu cząstek i innych). Wykazano także, że tak sformułowane prawo adaptacji jest odporne na uproszczony dobór modelu odniesienia.

Wyniki badań symulacyjnych zaprezentowane w rozdziałach 3. i 4. zostały zweryfikowane ma stanowisku eksperymentalnym, co przedstawiono w rozdziale 5. Opracowany został dedykowany układ mechatroniczny, umożliwiający łatwą zmianę momentu bezwładności zespołu maszynowego. Oprogramowanie sterujące zostało

Słowa.

zaimplementowane w procesorze serii STM32F40. Przedstawione eksperymenty laboratoryjne potwierdziły wcześniejsze badania symulacyjne. Warto zauważyć, że ich przeprowadzenie świadczy o dużym doświadczeniu programistycznym i eksperymentalnym Doktoranta.

Ostatni rozdział zawiera podsumowanie i wnioski

Podsumowując ocenę zawartości pracy, stwierdzam że głównymi osiągnięciami Kandydata są:

- synteza i analiza układu sterowania napędu z PMSM z wykorzystaniem koncepcji odsprężania linearyzującego oraz sprzężenia od rozszerzonego wektora stanu;
- opracowanie uniwersalnego algorytmu adaptacji poprzez optymalizację dla przypadku okresowych sygnałów zadanych;
- analiza i implementacja wybranych algorytmów adaptacji: gradientowego, przeszukiwania wzorcem i przeszukiwania rojem cząstek;
- przygotowanie sprzętowe i programistyczne stanowiska do testów laboratoryjnych;
- eksperymentalna weryfikacja wyników analiz symulacyjnych.

5. Wątpliwości i uwagi dyskusyjne

W trakcie lektury rozprawy nasunęło mi się kilka pytań. Większość z nich ma charakter dyskusyjny, dlatego też proszę o odpowiedź na nie w trakcie publicznej obrony.

1. Autor ogranicza sygnały sterujące – współrzędne wektora napięcia zadanego w wirującym synchronicznie układzie współrzędnych dq – stosując proste ograniczenie do wnętrza kwadratu o znormalizowanej długości. Natomiast fizyczne ograniczenie przekształtnika z obwodem pośredniczącym napięcia stałego dotyczy długości wektora napięcia stojana we wnętrzu koła o znormalizowanym promieniu. Zatem proponowane układy sterowania nie wykorzystują w pełni zakresu dostępnego napięcia. Czy pełne wykorzystanie zakresu dostępnych napięć miało by wpływ na działanie zaproponowanych algorytmów?
2. Analizowane metody sterowania ze sprzężeniem od wektora stanu zostały porównane z bardzo prostą, podręcznikową strukturą regulacji kaskadowej. Warto jednak zauważyć, że w praktyce z reguły stosuje się bardziej rozbudowane struktury kaskadowe, obejmujące na przykład zastosowanie regulatorów o dwóch stopniach swobody czy też stosowanie wyprzedzających sprzężeń wprzód. Zdaniem Recenzenta takie rozbudowane struktury kaskadowe mają właściwości regulacyjne porównywalne z proponowaną w dysertacji strukturą sterowania.
3. Dyskusyjny wydaje się przegląd metod sterowania adaptacyjnego, przedstawiony przez Autora w rozdziale 2.4. W opinii recenzenta sterowanie ślizgowe jest reprezentantem grupy regulatorów odpornych o stałych parametrach dobranych z

S. Brock

uwzględnieniem zakresu zmienności parametrów obiektu. Znane i stosowane w praktyce mechanizmy samostrojzenia regulatorów wymagają przeprowadzenia identyfikacji aktualnych parametrów obiektu (metodami na przykład odpowiedzi skokowej czy też oscylacji przekaźnikowych) i wyliczenia stałych nastaw regulatora. Natomiast metody harmonogramowania wzmocnień *gain scheduling* i MRAS zwykle klasyfikowane są jako regulatory adaptacyjne.

4. Ciekawym wydaje się możliwość zastosowania innych metod uczenia z nauczycielem na potrzeby doboru współczynników regulatora. Czy Autor przeprowadził na przykład badania gradientowej metody uczenia z efektem *momentum*, lub też z modyfikowanym współczynnikiem szybkości uczenia w trakcie kolejnych powtórzeń?
5. Zaproponowana na rysunku 3.6 struktura układu regulacji zawiera blok całujący, wyznaczający dodatkową zmienną stanu, a następnie bloki ograniczeń. Taka struktura prowadzi do niekorzystnego efektu nasycania *wind-up*. W przeprowadzonych testach ten efekt nie wystąpił z uwagi na małe zakresy zmian wartości zadanej prędkości (3% prędkości nominalnej). Czy tego typu efekt wystąpił w układzie laboratoryjnym i w jaki sposób zapewniono jego eliminację?
6. Model wzorcowy odniesienia dobrany został na podstawie optymalnego regulatora dla nominalnych parametrów obiektu. Wydaje się jednak, że wybór modelu odniesienia powinien uwzględniać także przyjęty do analizy zakres zmienności parametrów obiektu, zwłaszcza momentów bezwładności i momentów obrotowych obciążenia silnika. Takie podejście zapewniło by weryfikację, czy wymagany moment obrotowy nie przekracza ograniczenia momentu maksymalnego silnika.
7. W jaki sposób została zdefiniowana przestrzeń poszukiwań dla poszczególnych parametrów regulatora. Czy zostały zaproponowane zabezpieczenia bezpiecznej pracy układu w przypadku testowania konfiguracji niestabilnej parametrów regulatora?
8. Metoda przeszukiwania wzorcem ma charakter optymalizacji lokalnej, natomiast metoda optymalizacji rojem cząstek przeszukuje całą przestrzeń parametrów. Ponieważ wyniki obu metod są podobne, czy zatem w badanym problemie występują minima lokalne?
9. Wszystkie wykonywane testy dotyczyły sytuacji, w której sygnał zadanej prędkości miał charakter powtarzalnych skoków jednostkowych. Czy zaproponowane algorytmy sprawdziły by się takim układzie, w którym zadana prędkość zmieniała by się w sposób nieregularny lub nawet stochastyczny?
10. Przedstawiony w rozdziale 5.2 problem z implementacją algorytmu gradientowego z wykorzystaniem liczb zmiennoprzecinkowych pojedynczej precyzji można rozwiązać stosując odpowiednią normalizację wartości.

S. Brock .

6. Dodatkowe uwagi krytyczne o charakterze redakcyjnym.

Praca napisana jest staranna. W pracy są nieliczne błędy redakcyjne, językowe i interpunkcyjne. Chciałby zwrócić uwagę na kilka z nich:

1. Określenie „Przebieg” to „szereg następujących po sobie kolejno wartości tej samej wielkości fizycznej”, dlatego też wyrażenie „Przebieg czasowy” jest nadmiarowe.
2. Rysunki z przebiegami symulacyjnymi są dosyć małe, natomiast zdecydowanie za małe są opisy tekstowe na tych rysunkach.
3. W kilku miejscach w tekście omyłkowo widoczne są komendy formatujące programu edycyjnego.

7. Wniosek końcowy.

Podsumowując powyższe uwagi uważam, że rozprawa doktorskiej mgr. inż. Rafała Szczepańskiego z Instytut Nauk Technicznych Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu, pod tytułem *Sterowanie adaptacyjne silnika PMSM o zmiennym momencie bezwładności z wykorzystaniem inspirowanych przyrodą algorytmów optymalizacyjnych i regulatora bazującego na sprzężeniu od wektora zmiennych stanu* zawiera oryginalny i wartościowy dorobek naukowy. Zagadnienie badawcze zostało prawidłowo określone i odniesione do bieżącej literatury światowej. Przyjęta przez Autora metoda rozwiązania, polegająca na modelowaniu matematycznym, badaniach symulacyjnych i końcowej weryfikacji laboratoryjnej jest uznaną metodą badawczą w zakresie automatyki i robotyki. Analiza pracy wykazała jej oryginalność i umożliwiła wskazanie samodzielnego i oryginalnego dorobku autora. Praca jest napisana w sposób jasny i zwięzły, typowy dla dobrych prac publikowanych w zakresie reprezentowanej dziedziny. Redakcja pracy jest staranna i nie budzi zastrzeżeń. Zaproponowana metoda wykorzystania metod optymalizacji do adaptacji parametrów regulatora pracującego z okresowym, skokowym wymuszeniem może być podstawą dalszych prac zmierzających do implementacji przemysłowych.

Zapowiadane tytułem i sformułowane w rozdziale pierwszym cele pracy zostały osiągnięte. Praca koncentruje się w zakresie automatyki i sterowania. Autor wykazał się także dobrym opanowaniem metod badań empirycznych i symulacyjnych, dowodząc umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w zakresie nauk technicznych. Przedstawione uwagi krytyczne, często dyskusyjne, nie podważają tej oceny.

W mojej opinii recenzowana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Rafała Szczepańskiego z Instytut Nauk Technicznych Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu, pod tytułem *Sterowanie adaptacyjne silnika PMSM o zmiennym momencie bezwładności z wykorzystaniem inspirowanych przyrodą algorytmów optymalizacyjnych i regulatora bazującego na sprzężeniu od wektora zmiennych stanu* stanowi oryginalne rozwiązanie

S. Brock.

problemu naukowego, a także wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Tym samym, zgodnie z obowiązującymi przepisami, stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Stefan Brock

