

Prof. dr hab. inż. Krzysztof Szabat  
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych  
Wydział Elektryczny, Politechnika Wrocławska  
ul Smoluchowskiego 19  
50-372 Wrocław

Wrocław 2023-01-10

## 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**

Opracowana na podstawie zlecenia Przewodniczącego  
Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika,  
Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne  
Politechniki Warszawskiej

### 1. CHARAKTERYSTYKA DZIEDZINY I OCENA TEMATU ROZPRAWY

Od nowoczesnych procesów technologicznych oczekuje się ciągłego zwiększania produktywności przy jednoczesnej minimalizacji ponoszonych kosztów. Wynika to ze wzrastającej globalnej konkurencyjności, oczekiwaniu konsumentów na tańsze ale jednocześnie dobrej jakości produkty. W nowoczesnych liniach produkcyjnych podstawowym systemem wprawiającym w ruch urządzenia wykonawcze jest napęd elektryczny. Wynika to z jego szeregu korzystnych właściwości takich jak: łatwości dostarczania energii elektrycznej, odporności i niezawodności, łatwości kształtowania charakterystyk mechanicznych w nowoczesnych układach, niewielkim zakłóceniom towarzyszącym pracy napędu elektrycznego.

Nowoczesne napędy elektryczne pracują w zamkniętych strukturach sterowania regulacji momentu, prędkości i pozycji. Wzrost dynamiki pracy uzyskuje się za pomocą zwiększenia nastaw regulatorów. W podstawowym podejściu projektowym zakłada się stałość parametrów silnika elektrycznego i maszyny roboczej. Jednakże w wielu przypadkach takie założenie jest niespełnione. W układzie zmieniają się parametry zarówno silnika (np. ze względu na wzrost temperatury następuje zmiana rezystancji) czy maszyny roboczej (np. zmiana momentu

bezwładności). Zmiana parametrów układu powoduje pogorszenie właściwości dynamicznych napędu. Uzyskane przebiegi będą różniły się od założonych.

W rozprawie doktorskiej przedstawiono zagadnienia związane z zastosowaniem metod sterowania adaptacyjnego w układzie napędowym z silnikiem PMSM o zmiennym momencie bezwładności. W pracy przebadano dwa algorytmy sterowania. Pierwszy z nich oparty jest na regule Widrow'a-Hoff'a, drugi na algorytmach optymalizacyjnych inspirowanych przyrodą. Jako strukturę sterowania wybrano regulator stanu o zmiennych w czasie współczynnikach.

W mojej ocenie opiniowana rozprawa doktorska nawiązuje do najbardziej istotnych, nowoczesnych i cieszących się dużym zainteresowaniem zagadnień z dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne (również poprzedniej dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika) badanych przez szereg ośrodków naukowych i przemysłowych.

## 2. CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Przedstawiona do zaopiniowania rozprawa doktorska składa się z sześciu rozdziałów podstawowych, spisu treści, bibliografii, rysunków, tabel i załącznika. Całość pracy zawarta jest na 130 stronach. Autor odnosi się do 81 pozycji literatury. Oprócz pozycji klasycznych wymagających cytowania, większość zamieszczonych źródeł powstała w ciągu ostatnich lat.

Podstawowym celem pracy jest zaprojektowania i wszechstronne przebadanie struktury adaptacyjnej bazującej na algorytmach optymalizacyjnych inspirowanych przyrodą w celu zapewnienia niezmiennej odpowiedzi prędkościowej silnika PMSM o zmiennym momencie bezwładności.

Bazując na przedstawionym celu pracy w rozprawie zaproponowano następującą tezę naukową:

*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.*

W mojej ocenie teza pracy powinna być poszerzona o zagadnienia przedstawione w rozdziale trzecim. W przyjętej postaci nie są one ujęte a w rzeczywistości w dość istotny sposób poszerzają zakres pracy.

Recenzowana rozprawa napisana jest w sposób bardzo przejrzysty. Rozdziały następują w logicznej kolejności i są kompletne. We wstępie, wprowadzono do tematyki i przedstawiono przegląd literatury z zakresu badań. Następnie zaprezentowano tezę, cel i

zakres pracy oraz omówiono zawartość kolejnych rozdziałów. W rozdziale drugim przedstawiono model matematyczny silnika PMSM. Opisano dwie podstawowe struktury regulacji prędkości: kaskadową oraz z regulatorem stanu. Zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych obrazujących wpływ momentu bezwładności na przebiegi zmiennych stanu napędu. W końcowej części opisano wybrane struktury sterowania adaptacyjnego stosowane w napędzie elektrycznym.

W kolejnych rozdziałach zawarto najbardziej wartościowe treści w ocenianej pracy doktorskiej. Rozdział trzeci jest poświęcony adaptacyjnej strukturze sterowania prędkością opartej na regulatorze stanu i reguła Widrow'a-Hoff'a. Kolejno przedstawiono sposób obliczania transmitancji układu zamkniętego z regulatorem stanu i omówiono w niej zagadnienia związane z określaniem modelu odniesienia. Następnie omówiono prawa adaptacji poszczególnych współczynników regulatora. Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych obrazujących działanie układu w różnych warunkach. W szczególności przeanalizowano wpływ wartości współczynnika uczenia i postaci modelu na właściwości struktury.

W rozdziale czwartym przedstawiono zagadnienia dotyczące zastosowania metod optymalizacji globalnej do doboru nastaw regulatora stanu układu napędowego z silnikiem PMSM o zmiennym momencie bezwładności. Po krótkim wprowadzeniu opisano stosowany mechanizm adaptacji. Aktualizacja (adaptacja) współczynników regulatora dokonywana jest każdym okresie pracy napędu. Omówiono możliwość użycia różnych modeli odniesienia. Szczegółowo opisano procedurę adaptacji. Omówiono dwa aspekty odnoszące się do zmian funkcji celu. Następnie opisano zastosowane algorytmy optymalizacyjne PSO i PS. W dalszej części omówiono wyniki badań symulacyjnych. Dogłębnie przeanalizowano szereg czynników wpływających na jakość działania badanych algorytmów. Porównano ich właściwości (czas działania, wartość funkcji celu). Omówiono również wpływ zastosowanego modelu.

Wyniki badań wykonanych na stanowisku rzeczywistym przedstawiono w rozdziale piątym. Dokładnie opisano w nim układ laboratoryjny. Następnie przedstawiono przykładowe wyniki badań odnoszące się do reguły Widrow'a-Hoff'a. Omówiono wpływ częstotliwości próbkowania i precyzji liczb zmiennoprzecinkowych w realizacji mikroprocesorowej na przebieg procesu adaptacji. Zaprezentowano szereg badań ukazujących działanie układu w różnych warunkach (zmiana momentu bezwładności, zmiana momentu obciążenia). Przedyskutowano wpływ dodatkowych czynników na wyniki badań. Kolejno zaprezentowano wyniki związane z algorytmem PSO i PS. Układy testowano w przypadku zmian momentu bezwładności i momentu obciążenia. Uzyskane wyniki potwierdziły badania symulacyjne.

Pracę zakończono podsumowaniem w którym przedstawiono najważniejsze wnioski dotyczące pracy. Sprecyzowano najważniejsze osiągnięcia Autora rozprawy.

### 3. OCENA PRACY

W opiniowanej pracy przedstawione zastały zagadnienia związane z zastosowaniem sterowania adaptacyjnego dla układu napędowego z silnikiem PMSM o zmiennym momencie bezwładności oraz momencie obciążenia. Tematyka i prezentowane wyniki są oryginalne zarówno w skali krajowej jak również światowej. Dodatkowym czynnikiem wyróżniającym pracę jest fakt, że Autor nie ograniczył się tylko do jednego rozwiązania ale zaprezentował dwa główne podejścia (rozdział trzeci i czwarty). Kolejną zaletą pracy jest podejście wybrane przez Autora i przedstawienie w rozprawie pełnego cyklu badawczego. Analiza teoretyczna jest poparta licznymi wynikami badań symulacyjnych oraz eksperymentem laboratoryjnym, dzięki czemu założony cel pracy został osiągnięty a teza rozprawy w pełni udowodniona.

Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć rozprawy należy zaliczyć:

- Opracowanie modeli symulacyjnych rozważanych w pracy układów adaptacji.
- Opracowanie struktury sterowania bezpośredniego bazującej na regule Widrow'a-Hoff'a. Przeprowadzenie szeregu eksperymentów ukazujących wpływ poszczególnych czynników na efektywność działania układu. Na szczególną uwagę zasługują tutaj zagadnienia związane z doboru rzędu modelu odniesienia.
- Opracowanie PAAO umożliwiającej zastosowanie wybranych algorytmów do adaptacyjnego doboru współczynników regulatora stanu. Zastosowanie algorytmów PSO i PS w zaproponowanej procedurze. Przeprowadzenie szeregu badań porównawczych.
- Implementacja zaproponowanych algorytmów w rzeczywistym układzie mikroprocesorowym. Wykonanie szeregu badań eksperymentalnych ukazujących właściwości zaproponowanych struktur pracujących na układzie rzeczywistym.

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

- We wstępie Autor pisze o strukturze sterowania która zmienia swoje zachowanie, myślę że lepiej używać sformułowania właściwości.
- We wzorze 3.1 jako indeksu używa się litery  $i$  a w dalszych zależnościach  $j$ .
- Na stronie 38 Autor pisze o wprowadzeniu oznaczenia  $J_{nom}$ , pojawia się ono jednak wcześniej na str. 29.
- Na stronie 38 Autor formułując transmitancję 3.5 używa oznaczeń  $\Omega$  a na rys. 3.3  $\omega$ .

-Na stronie 40 Autor pisze: ‘...aktualizuje współczynniki regulatora w każdej pętli regulacji...’ Jest to prawdziwe, ale czy słowo pętli nie lepiej zastąpić ‘kroku’ lub ‘okresie próbkowania’.

- Schemat struktury sterowania przedstawiono na rys. 3.6 i 3.7. Pokazują one realizację algorytmu w przestrzeni  $s$  i  $z$ . Wykonanie to jest poprawne, jednakże bardziej elegancko byłoby wybranie opisu  $s$  lub  $z$ .

- Rys. 3.8 Istniejący opis: ” Odpowiedź układu na po adaptacji” należy skorygować.

- W pracy występują różne oznaczenia czasu, np. w wyrażeniu 2.20 używa się  $t$  a w 4.1  $\tau$ .

- Brakuje  $s$  w wyrażeniu 4.2.

- Opisie rys. 4.15 zamiast litery  $q$  jest  $\dot{s}$ .

- Uwaga ogólna. W niektóre rozdziały poprzedzone są streszczeniem (np. 5), w niektórych go nie ma (np. 3). Zaleca się ujednoczenie formy rozprawy.

Moim zdaniem tych drobnych potknięć jest jednak znacznie mniej niż w standardowej pracy doktorskiej. Świadczy to dużej staranności w przygotowaniu rozprawy. Opiniowaną rozprawę czyta się z przyjemnością.

Po lekturze pracy nasuwa się kilka uwag o charakterze dyskusyjnym o różnej wadze merytorycznej, na które proszę o odpowiedź:

- Autor zalicza do metod sterowania adaptacyjnego również sterowanie ślizgowe. W mojej ocenie bardziej adekwatna jest nazwa sterowania odpornego.

- Na stronie 29 określono założenia projektowe wśród których wymieniono wymóg uzyskania braku lub pomijalnie małego przeregulowania. Nie wskazano jednak co to znaczy np. 2%. Kolejno napisano, że „suma chwilowych prądów...jest poniżej połowy wartości nominalnej prądu”. Skąd takie wymaganie odnoście sumy, przecież prąd  $i_d$  z definicji w niniejszej pracy równa się zero. Dodatkowo dlaczego połowy a nie wartości znamionowej?

- W rozdziale trzecim Autor pisze o założeniu pominięcia dynamiki pętli wymuszenia prądu. Jest to podejście jak najbardziej uzasadnione i opisane w wielu pracach badawczych. W pracy to zostało zrealizowane przez przyjęcie  $T_e=0s$ . Nasuwa się jednak pytanie czy nie słuszniejsze by było przyjęcie transmitancji całej pętli prądowej jako równej 1. Uprościłoby to ostateczne równania. Dlaczego Autor zdecydował się na zastosowane opisanego podejścia?

- W pracy zabrakło wyrażen umożliwiających dobór współczynników wzmocnień dla regulatora stanu dla stałych parametrów obiektu. Proszę o ich przedstawienie. Czy wszystkie otrzymane wyrażenia będą zawierały zmienny parametr  $T_m$ ?

- Na rys. 3.6 został przedstawiony schemat blokowy układu sterowania. Widoczne są na nim dwa ograniczenia w torach regulacji strumienia i momentu. Sprzężenia odsprzęgające (linearyzujące) model silnika PMSM wprowadzone są przed ograniczeniami. Można postawić pytanie: czy w czasie pracy z ograniczeniami model układu w dalszym ciągu jest liniowy? Czy sprzężenia te nie powinny być wprowadzone za ograniczeniami a maksymalne poziomy sygnałów podawane na przekształtnik skorelowane z maksymalnymi wartościami ograniczeń i wartościami linearyzacyjnymi. Dodatkowo proszę o skomentowanie ewentualnego zjawiska *wind-up*.

- W rozdziale trzecim Autor pisze o konieczności dopasowania transmitancji modelu odniesienia do transmitancji obiektu. Jak stwierdza, w przypadku braku zgodności obu wyrażeń układ może nawet stracić stabilność. Na poziomie ogólnym zgadzam się Autorem. Jednakże warto rozważyć następujące zagadnienie. Należy zauważyć, że transmitancja obiektu jest tylko pewnym przybliżeniem silnika, w rzeczywistości występuje w nim np. nieliniowe tarcie, pomija się dynamikę wymuszania prądów itp. Czyli w zasadzie z definicji idealne dopasowanie nie jest możliwe. Dodatkowo może zaistnieć konieczność śledzenia nieznanej (dowolnej) trajektorii. Czy w takim przypadku (nieznana trajektoria) możliwe jest zastosowanie sterowania adaptacyjnego proponowanego przez Autora? Jakie czynniki mogą zwiększyć efektywność jego pracy? Prosiłbym również o pokazanie badań w których współczynnik tłumienia w transmitancji modelu wynosi 0.7. Czy taki współczynnik ma wpływ na szybkość adaptacji? (w pracy zamieszczono wyniki tylko dla wartości równej 1).

- Z przebiegów przedstawionych na rys. 3.8 wynika, że współczynnik  $k_{w2}$  zwiększa swoją wartość nieustannie w sposób linowy (nie aperiodyczny). Czy istnieje wartość graniczna tych zmian (np. w czasie symulacji 10-krotnie większym niż zakładano)?

- Czy wprowadzenie różniczkowania błędu śledzenia do praw adaptacji może poprawić zbieżność algorytmu?

- Na stronie 68 przedstawiono różne wartości regulatora stanu uzyskane przez algorytmy optymalizacyjne. Prosiłbym o podanie wartości idealnych (wyliczonych na podstawie równań) i skomentowanie różnicy. Czy w przypadku wartości współczynnika tłumienia w modelu równego 0.7 takie różnice również będą występować? Na rys. 4.15 przedstawiono wykresy dotyczące serii badań. Proszę o podanie wyznaczonych współczynników struktury w każdym przypadku.

- Z przeprowadzonej analizy wynika, że algorytm PS działa szybciej lecz wyznaczone rozwiązanie jest mniej dokładne niż dla PSO. Czy można połączyć oba algorytmy w procesie optymalizacji?

- Algorytmy optymalizacyjne przedstawione w rozprawie gwarantują zbieżność rozwiązania. Jednakże w poszczególnych oknach (zwłaszcza na początku działania) rozwiązanie może być

gorsze. Jak pisze Autor w konkretnym przypadku w układzie może powstać większe przeregulowanie co może być nieakceptowalne. Czy możliwe jest powiązanie algorytmu przedstawione w rozdziale 3 w celu określenia kierunku zmian parametrów z algorytmem optymalizacji PSO czy PS?

#### 4. PODSUMOWANIE

Powyższe uwagi mają charakter dyskusyjny i nie wpływają na bardzo pozytywną ocenę rozprawy. Recenzowana rozprawa doktorska 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* zawiera rozwiązanie problemu naukowego, dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy badawczej, potwierdza bardzo dobre przygotowanie z dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne (również poprzedniej dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika) a zwłaszcza z teorii sterowania, napędu elektrycznego, modelowania i programowania. Dowodem tych umiejętności są nie tylko rozważania teoretyczne i badania symulacyjne, ale również ich praktyczne wykorzystanie, udowodnione poprzez badania eksperymentalne wykonane na stanowisku laboratoryjnym.

Należy podkreślić, że materiał zawarty w rozprawie był prezentowany na konferencjach krajowych i zagranicznych. Dodatkowo autor rozprawy publikował w uznanych czasopiśmie co podkreśla aktualność tematyki i wskazuje na wysoki poziom merytoryczny zagadnień poruszanych w rozprawie. Należy również podkreślić dużą liczbę cytowań Autora i wysoki H indeks.

Reasumując, w mojej opinii recenzowana rozprawa doktorska w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą ustawę o tytule i stopniach naukowych i w związku z powyższym stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Dodatkowo wnoszę o wyróżnienie rozprawy.

*Aleksy Srebnik*