

Łódź, 15.08.2019 r.

Dr hab. Jacek Kabziński, prof. PŁ
Instytut Automatyki Politechniki Łódzkiej
ul. Stefanowskiego 18/22
90-924 Łódź

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Mateusza Korzonka
pt. „Analiza stabilności wybranych estymatorów prędkości silnika indukcyjnego w różnych stanach pracy napędu”
opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej

1. Ocena tematyki rozprawy i zastosowanych metod badawczych

Recenzowana rozprawa jest poświęcona sterowaniu układami napędowymi z silnikami indukcyjnymi bez pomiaru prędkości i położenia. Sama koncepcja bezczujnikowego sterowania silnikiem indukcyjnym nie jest nowa. Pierwsze pomysły obserwatorów badanych w rozprawie pochodzą z przełomu wieków. Co raz więcej takich układów jest wykorzystywanych w praktyce przemysłowej, a to uwydatnia znaczenie zapewnienia niezawodności obserwatora w każdych warunkach pracy napędu. Takie zadanie postawił sobie p. mgr. inż. Mateusz Korzonek, który zajął się wyjątkowymi sytuacjami, w których klasyczne, znane, adaptacyjne obserwatory prędkości nie pracują poprawnie. Rozprawa jest poświęcona analizie takich przypadków niestabilnej pracy obserwatora i zaproponowaniu modyfikacji, które pozwolą choć część z nich wyeliminować.

Liczba rodzajów i wariantów obserwatora prędkości silnika indukcyjnego, które zostały zaproponowane w ostatnich 20 latach jest dość imponującą, jak i liczba publikacji, które tego problemu dotyczą (wyszukiwanie „sensorless + induction motor” w latach 2000-2019 w IEEE Xplore daje ok. 2200 publikacji, w tym ok. 350 w latach 2017-19). Nie sposób więc było odnieść się do wszystkich koncepcji odtwarzania prędkości silnika indukcyjnego. Autor rozprawy dokonał mądrego wyboru ograniczając się do obserwatorów pracujących w strukturze układu adaptacyjnego z modelem odniesienia. Prawidłowo zidentyfikował rodzinę obserwatorów, którą można analizować wspólnymi metodami teoretycznymi, która jest popularna w literaturze i która daje możliwości skutecznego zastosowania w napędowych układach przemysłowych. Jednocześnie rozważana rodzina obserwatorów, która obejmuje

różne warianty podukładu służącego za model odniesienia i podukładu adaptowanego jest dostatecznie bogata by problem podniesiony w rozprawie był obszerny i mający dostateczny walor ogólności, słowem miał cechy, którymi powinien charakteryzować problem naukowy w dziedzinie nauk technicznych.

O tym, że tematyka rozprawy jest aktualna i spotyka się z zainteresowaniem światowego środowiska naukowego najlepiej świadczy opublikowanie fragmentarycznych wyników rozprawy w latach 2016-2019 w kilku publikacjach konferencyjnych i kilku artykułach naukowych. Nie sposób nie podkreślić, że wybrany temat rozprawy pięknie wpisuje się w wieloletnią tradycję zespołu naukowego kierowanego przez p. prof. Teresę Orłowską-Kowalską, z którego Autor się wywodzi.

W rozprawie zastosowano właściwe metody badawcze i zaprezentowano pełny cykl badawczy od analizy teoretycznej, poprzez badania symulacyjne aż do udanej implementacji na stanowisku laboratoryjnym. Wymagało to połączenia wiedzy i umiejętności z teorii sterowania, napędu elektrycznego, energoelektroniki, przetwarzania sygnałów, informatycznych narzędzi sterowania. Rozprawa i dorobek naukowy p. mgra inż. Mateusza Korzonka idealnie mieszczą się w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika.

2. Charakterystyka rozprawy i ocena uzyskanych wyników

Rozprawa składa się z 7 rozdziałów, spisu literatury i 5 dodatków, całość zajmuje ok 170 stron.

W pierwszym rozdziale Autor przedstawia rzetelny przegląd literatury sięgając do początków wieku. Podaje systematyczną klasyfikację obserwatorów prędkości silników indukcyjnych i precyzyjnie lokalizuje obserwatory, którymi zajmuje się w rozprawie. Uzasadnia temat rozprawy pokazując, że kwestia utraty stabilności w szczególnych stanach pracy napędu jest zauważona i opisana w literaturze, oraz że kwestia modyfikacji obserwatora eliminującą to zjawisko przynajmniej częściowo jest otwartym i aktualnym obszarem badań. Relacjonuje też bibliografię z zakresu dyskretnej realizacji algorytmu obserwatora stwierdzając słusznie, że ten ważny temat nie jest dostatecznie opisany.

Autor formułuje dwie tezy rozprawy:

1. Zastosowanie zmian w strukturze modelu adaptacyjnego i/lub modyfikacji algorytmu adaptacji w estymatorach prądowych MRAS^{CC} i AFO zapewnia stabilną pracę estymatorów w generatorowym trybie pracy silnika indukcyjnego.
2. Zaprojektowane w postaci ciągłej zmodyfikowane estymatory MRAS^{CC}, po dyskretyzacji z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody Eulera zachowują swoje właściwości (w tym stabilność) podczas pracy w cyfrowej strukturze sterowania silnikiem synchronicznym.

Tezy są sformułowane precyzyjnie i można je zweryfikować na podstawie wyników rozprawy.

W rozdziale 2 i 3 oraz w związonym z nimi załączniku Autor przedstawia teoretyczne przesłanki zaproponowanych rozwiązań i uzyskanych w pracy wyników. Prawidłowo formułuje ogólny model wszystkich obserwatorów badanych w pracy. Szkicuje uzasadnienie funkcji błędu i prawa adaptacji estymowanej prędkości stosownych w obserwatorach. W rozdziale 3 podaje modele silnika indukcyjnego i trzech obserwatorów, które są głównymi „bohaterami” rozprawy:

1. obserwator, z modelem, w którym zmiennymi stanu są prąd stojana i strumień wirnika, przestrajającym odtwarzaną prędkością (oznaczany AFO),
2. obserwator z prądowym symulatorem strumienia wirnika i symulatorem prądu stojana przestrajającym odtwarzaną prędkością (oznaczany MRAC^{CC}),
3. obserwator z napięciowym symulatorem strumienia wirnika i symulatorem prądu stojana przestrajającym odtwarzaną prędkością (oznaczany MRAC^{CV}).

Model każdego z obserwatorów składa się z 5 równań różniczkowych (jeśli przyjmiemy opis przy pomocy zmiennych stanu), w których parametrami są obok parametrów silnika są wartości: prędkości kątowej wektora strumienia stojana ω_s i prędkości mechanicznej ω_m .

Przedstawione modele obserwatorów są powszechnie znane i wkład Autora polega tu na pewnym usystematyzowaniu zapisu. Zdecydowanie warto uzupełnić wyprowadzenia i uzasadnienie uproszczeń (patrz pkt. 3 Dyskusja wyników i uwagi).

Początek rozdziału 4 jest kontynuacją teoretycznych rozważań, które mają uzasadnić fakt, że stabilność obserwatora w punkcie pracy napędu sparametryzowanym stałymi wartościami prędkości kątowej wektora strumienia stojana ω_{s0} i prędkości mechanicznej ω_{m0} jest równoważna stabilności pewnej macierzy $\hat{A}_0^{AFO/CC/CV}$ 5×5 sparametryzowanej w ten sam sposób. Autor podaje te macierze dla trzech rozważanych obserwatorów i zamienia parametryzację prędkością kątową wektora strumienia stojana ω_{s0} i prędkością mechaniczną ω_{m0} na parametryzację momentem obciążenia m_{L0} i prędkością mechaniczną ω_{m0} . Pozwala to na numeryczne wyznaczenie tych punktów na płaszczyźnie (ω_m, m_L) , w których choć jedna wartość własna macierzy $\hat{A}_0^{AFO/CC/CV}$ ma dodatnią część rzeczywistą. Dla takich wartości (ω_{m0}, m_{L0}) obserwator będzie pracował niepoprawnie (niestabilnie). Autor stwierdza, że wyznaczony obszar zawiera się między dwiema prostymi wynikającymi z warunku $\det \hat{A}_0^{AFO/CC/CV} = 0$, a więc będącymi zbiorem takich (ω_{m0}, m_{L0}) , dla których macierz $\hat{A}_0^{AFO/CC/CV}$ ma zerową wartość własną. (Przedstawione tu wnioski końcowe są poprawne,

jakkolwiek wyprowadzenia są niekompletne i proszę o ich uzupełnienie zgodnie z pkt. 3 Dyskusja wyników i uwagi.)

To spostrzeżenie jest wykorzystane dla zaproponowania modyfikacji obserwatorów AFO i MRAS^{CC}, które zredukują zbiór par (ω_{m0}, m_{L0}) , dla których macierz $\hat{A}_0^{AFO/CC/CV}$ ma choć jedną wartość własną w prawej półpłaszczyźnie Gaussa. Modyfikacja ma być taka, by $\det \hat{A}_0^{AFO/CC/CV} = 0 \Leftrightarrow \omega_{s0} = 0$.

Autor wzoruje się na podejściu przedstawionym w pracy E. Etien, C. Chainge and N. Bensiali, "On the Stability of Full Adaptive Observer for Induction Motor in Regenerating Mode," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, no. 5, pp. 1599-1608, May 2010 w odniesieniu do obserwatora AFO. Adaptuje je dla innych obserwatorów i dodaje jedną metodę poprawy dynamiki obserwatora. Ostatecznie, zaproponowanymi sposobami redukcji obszaru tych par (ω_{m0}, m_{L0}) , dla których macierz $\hat{A}_0^{AFO/CC/CV}$ ma choć jedną wartość własną w prawej półpłaszczyźnie Gaussa są

- a) dobór odpowiedniej macierzy wzmocnień od błędu odtwarzania prądu stojana w obserwatorze,
- b) modyfikacja prawa adaptacji przez wprowadzenie przesunięcia $e^{j\varphi}$,
- c) wprowadzenie dodatkowego prawa adaptacji (dodatkowej, szóstej zmiennej stanu).

Ta ostatnia (autorska) metoda okazuje się być najlepsza dla obserwatorów AFO i MRAS^{CC}, o czym przekonuje rozdział 4.3. W rozdziale 4.4 podano liczne badania symulacyjne i eksperymentalne, które potwierdzają ten wniosek. Podstawą oceny pracy napędu są charakterystyki mechaniczne uzyskiwane w układzie zamkniętym (sterowanie zorientowane polowo) z pomiarem prędkości. Przy ustalonej wartości prędkości stosowano liniową, wolną zmianę momentu. Podano także przykłady przebiegów dynamicznych (nawrotu „liniowego” i „schodkowego”) z obliczonymi wartościami całkowitego wskaźnika jakości. Liczba wykonanych testów i zamieszczonych w pracy przebiegów jest imponująca.

Rozdział 5 jest poświęcony eksperymentom mającym pokazać wpływ błędnej identyfikacji parametrów silnika na pracę obserwatora prędkości. W poprzednich rozdziałach zakładano, że parametry maszyny są dokładnie znane i z tego wynikało przybliżenie dynamiki błędu liniowym równaniem z macierzą stanu $\hat{A}_0^{AFO/CC/CV}$. Analiza nachylenia prostych $\det \hat{A}_0^{AFO/CC/CV} = 0$ przy zmianie parametrów nie ma związku z „błędą identyfikacją”. Przy rozbieżności parametrów silnika i obserwatora dynamika błędów odtwarzania jest po prostu opisana innym, znacznie bardziej skomplikowanym równaniem. Daje to efekt w postaci błędów

ustalonych, oscylacyjnych przebiegów lub niestabilnego zachowania obserwatora. Autor zbadał ten efekt symulacyjnie i doświadczalnie, stosując takie same eksperymenty jak w rozdziale 4. Jako, że maszyna jest opisana w jednostkach względnych, bogaty materiał doświadczalny przedstawiony w rozdziale 5 pozwala na wyciągnięcie wniosków co do możliwości stosowania konkretnego obserwatora przy spodziewanej niepewności w ocenie parametrów silnika.

Każdy z rozważanych obserwatorów został zaprojektowany jako układ ciągły. Jego realizacja w układzie sterowania jest układem dyskretnym w czasie. W rozdziale 6 Autor zastanawia się jaki sposób dyskretyzacji wybrać i porównuje dość arbitralnie wybrane metody: jawną i niejawną metodę Eulera, metodę Tustina i zmodyfikowaną metodę Eulera. Właściwie wszystkie te metody są dobrze znane i z góry wiadomo, że zmodyfikowana metoda Eulera (jako metoda drugiego rzędu) jest dokładniejszą od metod Eulera pierwszego rzędu. Autor bada zmianę biegunów macierzy stanu uproszczonego równania błędu po dyskretyzacji oraz przebiegi przejściowe w układzie sterowania z obserwatorem zrealizowanym z trzema różnymi krokami próbkowania. Przedstawione wyniki w bardzo obszerny sposób dokumentują możliwość zastosowania zmodyfikowanej metody Eulera do dyskretyzacji obserwatora, a dodatkowo pokazują, że obserwatory zmodyfikowane są bardziej odporne na dyskretyzację, niż klasyczne.

Wreszcie rozdział 7 zawiera podsumowanie i końcowe wnioski.

Po przeczytaniu całej rozprawy można potwierdzić, że jej tezy zostały udowodnione. Faktycznie, zastosowanie zmian w strukturze modelu adaptacyjnego i/lub modyfikacji algorytmu adaptacji w estymatorach prądowych MRAS^{CC} i AFO zapewnia stabilną pracę estymatorów w generatorowym trybie pracy silnika indukcyjnego. W stosunku do obserwatora AFO i modyfikacji polegających na: a) doborze odpowiedniej macierzy wzmocnień od błędu odtwarzania prądu stojana w obserwatorze, b) wprowadzeniu przesunięcia w prawie adaptacji taki wniosek był już publikowany w literaturze, w odniesieniu do obserwatora MRAS^{CC} i modyfikacji polegającej na wprowadzeniu dodatkowego prawa adaptacji jest to oryginalny wynik rozprawy.

Także druga teza: „zaprojektowane w postaci ciągłej zmodyfikowane estymatory MRAS^{CC}, po dyskretyzacji z wykorzystaniem zmodyfikowanej metody Eulera zachowują swoje właściwości (w tym stabilność) podczas pracy w cyfrowej strukturze sterowania silnikiem synchronicznym” jest udowodniona w rozdziale 7, choć chciałoby się dodać oczywiste uzupełnienie „przy odpowiednim doborze kroku dyskretyzacji”.

Zaproponowanie i przebadanie oryginalnej modyfikacji algorytmu obserwatora uważam za najbardziej wartościowy element rozprawy. Po za tym rozprawa robi wrażenie dużą liczbą przeprowadzonych eksperymentów (symulacyjnych i na stanowisku laboratoryjnym), które bardzo obszernie dokumentują praktyczne aspekty tez i wniosków. Doskonały i przydatny jest też sposób prezentowania kontekstu prowadzonych badań w bibliografii sterowania bezczujnikowego. Specjalne, dodatkowe rozdziały są poświęcone innym rodzajom obserwatorów.

4. Dyskusja wyników i uwagi

Rozprawa doktorska dokumentuje prawidłowe postawienie i samodzielne rozwiązanie problemu naukowego, ale także kompetencje Autora w prowadzeniu klarownego i przekonującego dla czytelnika wywodu przedstawionych rezultatów. Jakkolwiek recenzowana rozprawa nie wymaga uzupełnień, to w przedstawionym wywodzie są pewne luki i niejasności. Uwagi przedstawione poniżej mają na celu zmuszenie Autora do uzupełnienia tych luk, przy czym tryb pisemnej odpowiedzi na recenzję będzie zupełnie wystarczający. Uwagi są różnej wagi i znaczenia, zostały umieszczone niżej w kolejności „chronologicznej”.

1. A) Zapis funkcji Lapunowa na stronie 24 nie jest poprawny. Układ dynamiczny, z którym jest związana ta funkcja jest traktowany jak stacjonarny, stąd argument t w (2.8) i dalej jest niepotrzebny (gdymby niestacjonarność była uwzględniana, to składnik $\frac{\partial V}{\partial t}$ wchodzi do $\frac{dV}{dt}$). Funkcja Lapunowa musi być funkcją wszystkich zmiennych stanu układu, a tymi są \mathbf{e} i $\Delta\omega_m$, czyli prawidłowy zapis to $V(\mathbf{e}, \Delta\omega_m)$, co zresztą odpowiada (2.11).
- B) Z (Z.1.2) wynika, że założono $\omega_m = const$. Trzeba to wyraźnie napisać. Żeby ostatnia linia (Z.1.2) była prawdziwa trzeba pierwszy składnik funkcji Lapunowa pomnożyć przez T_N
- C) Co to znaczy „estymator jest asymptotycznie stabilny w analizowanym przedziale zmienności”? Z przeprowadzonego rozumowania można konkludować jedynie, że jeżeli dobierzemy prawo adaptacji $\frac{d}{dt}\hat{\omega}_m = \dots$ takie, że w pewnym obszarze $\frac{dV}{dt} < 0$, jeżeli $\Delta A(\Delta\omega_m)|_{\Delta\omega_m = 0} = 0$, to zerowy punkt równowagi układu opisanego równaniami $T_N \frac{d}{dt}\mathbf{e} = \dots, \frac{d}{dt}\Delta\omega_m = -\frac{d}{dt}\hat{\omega}_m = \dots$ jest lokalnie, asymptotycznie stabilny.
- D) Jeżeli założenie o tym, że parametry obserwatora są inne niż silnika są kolejno eliminowane ($\Delta B = 0, A(\omega_m) = \hat{A}(\hat{\omega}_m)$), to może lepiej z niego zrezygnować od razu i przeprowadzić to wyprowadzenie dla przypadku dokładnie znanych parametrów?

2. Jeżeli Autor twierdzi, że z warunku $\frac{d}{dt} \hat{\omega}_m = \eta_1 \frac{e^T \Delta A(\Delta \omega_m) \hat{x}}{\Delta \omega_m}$ można wyprowadzić (2.17), to proszę o takie wyprowadzenie.
3. Modele silnika i obserwatorów są podawane z użyciem wektorów przestrzennych, a późniejsza analiza stabilności odwołuje się do zmiennych stanu. Poproszę o modele silnika i obserwatorów zapisane przez użyciu zmiennych stanu.
4. Jeżeli Autor twierdzi, że z warunku $\frac{d}{dt} \hat{\omega}_m = \eta_1 \frac{e^T \Delta A(\Delta \omega_m) \hat{x}}{\Delta \omega_m}$ można wyprowadzić (3.13), (3.16) i (3.20) to poproszę o uzupełnienie tego wyprowadzenia.
5. Kluczowe jest precyzyjne wyjaśnienie co Autor rozumie pod pojęciem „stabilności obserwatora”. Czy możemy przyjąć definicję: „jeżeli w punkcie pracy napędu $\omega_m = \omega_{m0} = const, m_L = m_{L0} = const$ zerowy punkt równowagi układu równań $T_N \frac{d}{dt} \mathbf{e} = \dots, \frac{d}{dt} \Delta \omega_m = \dots$ jest asymptotycznie, lokalnie stabilny, to mówimy, że obserwator jest stabilny w tym punkcie pracy napędu”, czy Autor zaproponuje inne podejście?
6. W jakim celu Autor wspomina o kryterium Hurwitza, choć nigdy go nie używa?
7. Wyprowadzenie równania (4.2) jest mocno niejasne. Przede wszystkim równanie powinno dotyczyć wszystkich (pięciu) zmiennych stanu obserwatora – jak w (4.1), a w zmodyfikowanym obserwatorze MRAS^{CCμ} także dodatkowej zmiennej (czyli sześciu). W (4.2) i w dodatku Autor zapisuje to tak, jakby równanie dotyczyło tylko błędów odtwarzania prądów i strumieni. Jeżeli przyjmiemy założenia z dodatku $\Delta B = 0, \Delta A(\Delta \omega_m) = 0$, to równanie (Z1.3) jest po prostu liniowe, więc co tu jest linearyzowane? Czym jest \mathbf{e}_0 ? Poproszę o powtórzenie tego wyprowadzenia co najmniej dla jednego obserwatora poczynając od zapisania pełnych równań (pięciu) zmiennych stanu (czyli błędów odtwarzania) aż do wyprowadzenia macierzy równania uproszczonego \hat{A}_0 – na przykład (4.9).
8. W macierzy \hat{A}_0 występuje składowa strumienia ψ_{ref} , która jest wartością zadaną z układu sterowania. Co jeśli faktyczny strumień w stanie ustalonym różni się od ψ_{ref} ?
9. Autor pisze wielokrotnie (np. (4.7) i dalej), że „granice stabilnego przedziału pracy” obserwatora wyznacza się z warunku $\det \hat{A}_0 = 0$. To stwierdzenie pozostawione bez komentarza sugeruje jakoby warunkiem granicznej stabilności każdej macierzy było zerowanie się jej wyznacznika, co oczywiście nie jest prawdą – wystarczy spojrzeć na macierz $\begin{bmatrix} a & 1 \\ -1 & a \end{bmatrix}$, która jest stabilna dla $a < 0$, niestabilna dla $a > 0$, a jej wyznacznik $a^2 + 1$ jest zawsze dodatni. Dlatego poproszę o porządne wytłumaczenie dlaczego

warunek $\det \hat{A}_0 > 0$ jest dostatecznym warunkiem niestabilności obserwatora o pięciu zmiennych stanu, a warunek $\det \hat{A}_0 < 0$ nie jest dostatecznym warunkiem stabilności, i co najważniejsze jak to wygląda w przypadku obserwatora zmodyfikowanego, który ma 6 zmiennych stanu?

10. W odróżnieniu od Autora recenzent nie oblicza w pamięci wyznaczników 5×5 i poprosi o wyprowadzenie (4.12) i pozostałych wzorów na wyznaczniki \hat{A}_0 .
11. Jakie „odpowiednie” przekształcenie zostało użyte do przejścia od (4.13-14) do (4.15)?
12. Warto skomentować znaczenie prostej $\omega_{s0} = 0$ i wytłumaczyć dlaczego nie można jej wyeliminować.
13. Autor kilkakrotnie twierdzi, że „współczynniki wzmocnień regulatora PI nie wpływają na stabilną pracę obserwatora”. Nie jest to do końca prawda, bo wiadomo, że niefortunny wybór tych współczynników generuje punkty niestabilnej pracy w innych ćwiartkach charakterystyki mechanicznej. Poproszę o rozwinięcie tego problemu.
14. Czy nie ma możliwości takiego doboru współczynników wzmocnień (4.20), żeby były niezależne od ω_{m0} ?
15. Trzeba poprawić wzory z funkcją Lapunowa (4.29) i dalej tak jak opisano w uwadze 1A.
16. Poproszę o uzupełnienie „krok po kroku” wyprowadzenia (4.32) i (4.33).
17. Poproszę o uzupełnienie „krok po kroku” wyprowadzenia (4.34) i (4.35).
18. W całej pracy Autor wielokrotnie używa terminu „poprawa stabilności” obserwatora. Otóż, ze stabilnością jak ze świeżością – albo jest albo jej nie ma. Nie istnieje „poprawiona stabilność”. Owszem, z lokalną stabilnością punktu równowagi wiążą się dwa aspekty: obszar „przyciągania”, z którego trajektorie dążą do punktu równowagi oraz szybkość (wykładnik) tego dążenia. Można więc „poprawiać” zwiększając ten obszar i tę szybkość, ale akurat tym rozprawa się nie zajmuje. Ale w końcu wszyscy rozumiemy, że chodzi o wyeliminowanie takich punktów pracy napędu, w których obserwator traci stabilność.

Mam nadzieję, że przemyślenie tych uwag wzmocni kompetencję i pewność siebie Autora, i w tej intencji je formułuję.

5. Ocena sposobu prezentacji wyników

Praca napisana jest w klarowny i precyzyjny sposób. Redakcja oznaczeń i rysunków jest bardzo staranna. Wykazy oznaczeń i skrótów są niezbędne do przeczytania pracy. Uwag


redakcyjnych jest tak mało, że zrezygnowałem z ich przekazywania na piśmie. Dobór i wykorzystanie źródeł jest bogaty i prawidłowy. Eksperymenty są opisane rzetelnie, podane są wszystkie parametry i współczynniki. Stanowisko laboratoryjne jest skonstruowane zgodnie z regułami sztuki.

6. Konkluzja

Praca jest ciekawa i wartościowa, odnosi się do problemów bardzo aktualnych w sterowaniu układami napędowymi. Autor przedstawił obszerną analizę problemu, opracowanie teoretyczne wyników, badania symulacyjne i badania eksperymentalne na stanowisku laboratoryjnym. Wykazał się przy tym dużym zasobem wiedzy z zakresu automatyki napędu, teorii sterowania, informatycznych technik symulacji i przetwarzania danych pomiarowych, udowodnił zdolności umożliwiające praktycznego uruchomienie stanowiska laboratoryjnego.

W pracy określono poprawnie zagadnienie naukowe, rozwiązano je samodzielnie, przy użyciu właściwych metod, uzyskano nowe wyniki merytoryczne. Autor wykazał się właściwą wiedzą, umiejętnością przedstawienia wyników, umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Praca nie wymaga uzupełnień.

Rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i w świetle obowiązujących przepisów może być dopuszczona do publicznej obrony.


Jacek Kabziński

