

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

Poznań, 14 maja 2022 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Karola Najdka

pt.: **Dobór nastaw regulatorów obiektów energoelektroniki w systemie elektroenergetycznym w oparciu o identyfikację i redukcję modeli oraz D-rozbitcie Neimarka**

1. Podstawa opracowania recenzji

Przedmiotem opinii jest rozprawa doktorska mgr. inż. Karola Najdka z Katedry Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej, pod tytułem *Dobór nastaw regulatorów obiektów energoelektroniki w systemie elektroenergetycznym w oparciu o identyfikację i redukcję modeli oraz D-rozbitcie Neimarka*. Recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika w Politechnice Wrocławskiej, pana prof. dr hab. inż. Andrzeja Dziedzica (pismo 38/RDN_AEE/2022 z dnia 15 marca 2022 r.) na podstawie dostarczonej rozprawy doktorskiej pod wyżej wymienionym tytułem. Recenzja ma być wykorzystana w postępowaniu o nadanie mgr. inż. Karolowi Najdkowi stopnia naukowego doktora nauk technicznych w zakresie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika.

2. Charakterystyka formalna pracy

Opiniowana obszerna rozprawa doktorska liczy 197 stron. Dysertacja zawiera 87 rysunków i zdjęć. Rozprawa jest podzielona na 5 rozdziałów merytorycznych, w tym wprowadzenie oraz wnioski i uwagi końcowe. Spis literatury załączony na końcu pracy zawiera łącznie 129 pozycji, w tym 8 prac autorskich Kandydata, z których 4 opublikowano w czasopismach z IF. Praca jest napisana komunikatywnym językiem, Autor rozprawy nie ustrzegł się jednak pewnych błędów stylistycznych i gramatycznych. Układ pracy nie budzi istotnych zastrzeżeń. Na początku pracy Autor zamieścił obszerne, 15 stronicowe zestawienie tabel i rysunków, oraz zestawienie ważniejszych symboli i akronimów. Materiały graficzne w pracy są staranne i czytelne.

3. Ocena podjętego tematu

Tematem przedstawionej rozprawy jest opracowanie sposobu doboru regulatorów dla przekształtników energoelektronicznych widzianych jako element systemu energoelektrycznego. Tak postawione zadanie wymaga nie tylko analizy pojedynczych przekształtników, ale także systemów złożonych z wielu elementów. Autor szczególną uwagę

SB

RDN AEE/G5/2022

śluszenie przykłada do analizy zapasu stabilności, zwłaszcza biorąc pod uwagę niestacjonarne parametry obiektów. Istotnym etapem projektowania układów sterowania są identyfikacja i modelowanie. Z reguły przy tym zachodzi konieczność redukcji rzędu uzyskanych modeli matematycznych, a zagadnienia te analizuje doktorant w rozprawie. Istotną cechą dysertacji jest próba opracowania analitycznego podejścia do zagadnienia analizy zapasu stabilności i projektowania układów regulacji. To bardzo interesujące i wartościowe, gdyż dominuje obecnie tendencja do wieloaspektowych badań symulacyjnych. Skuteczne narzędzia analityczne umożliwiają znaczne szybsze uzyskanie efektywnych rozwiązań problemu doboru parametrów regulatora.

Zagadnienie 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 dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika.

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 dla obiektów niestacjonarnych w zastosowaniach elektroenergetycznych nie są wystarczająco zbadane. Dlatego też zbadanie możliwości zastosowania metod identyfikacji i redukcji modeli oraz techniki D-rozbitcia Neimarka w systemie elektroenergetycznym Autor stawia sobie za cel rozprawy doktorskiej. Na tej podstawie Autor stawia dwuczłonową tezę pracy:

Identyfikacja i redukcja modeli obiektów energoelektroniki w systemie elektroenergetycznym w połączeniu z D-rozbitciem Neimarka umożliwia:

- 1. dobór i strojenie struktur regulacji przy jednoczesnym wskazaniu dopuszczalnych przestrzeni nastaw warunkujących pożądane właściwości dynamiczne obiektów*
- 2. tworzenie modeli symulacyjnych obiektów o zmniejszonej złożoności obliczeniowej.*

Zdaniem recenzenta cel pracy jest dobrze i jasno zdefiniowany, natomiast forma postawionych tez jest dyskusyjna. Zwłaszcza sformułowanie: „*wskazanie dopuszczalnych przestrzeni nastaw warunkujących pożądane właściwości*” sprawia wrażenie braku precyzji. Także drugi człon tezy nie określa kryteriów oceny złożoności, a przez to weryfikacja tak sformułowanej tezy jest uznaniowa.

W dalszej części doktorant definiuje 15 zadań szczegółowych, które konsekwentnie realizuje w pracy.

W rozdziale drugim zatytułowanym „Metody oraz techniki badawcze wykorzystane w pracy” Kandydat przedstawia metody identyfikacji i redukcji rzędu modeli. Dyskusyjny jest dobór metod identyfikacji, natomiast dla zadania redukcji Autor korzysta z narzędzi pakietu Matlab, które odpowiadają aktualnym uznanym metodom w tym zakresie. Następnie

SB

zaprezentowana została metoda D-rozbitcia dla prostego układu regulacji oraz dla obiektu z opóźnieniem w torze głównym i sprzężenia zwrotnego.

Obszerny rozdział trzeci przedstawia implementację metod z rozdziału 2 dla wybranych obiektów: przekształtnik podwyższający napięcie oraz przekształtnik z podwójnym mostkiem aktywnym. Dla każdego z obiektów wykonano badania symulacyjne i przeprowadzono weryfikację laboratoryjną.

Także kolejny czwarty rozdział jest obszerny i obejmuje opis systemów złożonych z pojedynczych obiektów. Wykorzystany został formalizm opisu czwórników, które są łączone kaskadowo. Jako obiekty wykorzystywane są te układy, które zostały przeanalizowane w części 3. Rozważania teoretyczne zweryfikowano na drodze symulacji.

Ostatni rozdział zawiera podsumowanie i wnioski

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

- Opracowanie i weryfikacja koncepcji wyznaczania nastaw regulatorów liniowych metodą D-rozbitcia, przy czym oryginalna metoda została tak zmodyfikowana, by uwzględniać wybrany zapas wzmocnienia i zapas fazy.
- Przeprowadzenie szeregu badań laboratoryjnych, weryfikujących analizy teoretyczne, dla różnorodnych stanowisk laboratoryjnych.
- Uogólnienie uzyskanych wyników dla przypadku złożonych systemów.

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. W treści pracy Autor zamiennie posługuje się określeniem „połączenie kaskadowe” oraz „połączenie szeregowe”. Jednak w zakresie Teorii obwodów, zwłaszcza w odniesieniu do czwórników, czy też ogólnie n -wrotników, określenia te dotyczą różnych konfiguracji systemów. W przypadku „połączenia szeregowego” bramy wejściowe i wyjściowe czwórników połączone są szeregowo. Jednak takich układów Autor nie analizuje w pracy.
2. W rozdziale 2.1 Autor przedstawia dwie bardzo proste metody identyfikacji obiektów sterowania Z czego wynika takie ograniczenie rozpatrywanych metod identyfikacji? Główną metodą stosowaną przez Autora jest identyfikacja na podstawie charakterystyk częstotliwościowych, wykonywana w otoczeniu punktu pracy ustalonego. Czy Autor analizował możliwość zastosowania innych metod, na przykład bazujących na wymuszeniu klasy PRBS?
3. Rozdział 2.2 opiera się na charakterystyce częstotliwościowej przedstawionej na rysunku 2.2. Warto by zatem przedstawić krótko przebieg eksperymentu, w wyniku którego uzyskano tę charakterystykę.

4. W literaturze dostępne są różne formy zapisu regulatorów PI/PID. Autor w pracy stosuje prosty zapis w postaci równoległej, przedstawiony dla regulatora PI równaniem 2.6. Czy było by możliwe zastosowanie metod omawianych w pracy do praktycznych form zapisu regulatora, które często zawierają dodatkowe parametry: współczynniki wagowe i współczynniki filtracji.
5. Obszary w przestrzeni parametrów powinny być zdefiniowane przez układy nierówności, natomiast podane wzory (na przykład 2.12 i 2.13) określają tylko granice tego obszaru. Nie jest jednak podane, która strona tej granicy tworzy obszar parametrów dla stabilnych układów regulacji. Jak należy interpretować dodatkowe równanie 2.14?
6. W dyskretnym układzie regulacji występują także inne opóźnienia niż te, które są na rys. 2.8 (na przykład wynikające z zastępczych opóźnień filtrów wejściowych, czy też z dyskretnej pracy układu sterowania). Nie zakłóca to jednak analizy dla układu liniowego.
7. Przejście z równania 2.15 do układu równań 2.16 i 2.17 jest dużym skrótem, a przedstawienie kolejnych kroków tej analizy było by wartościowe dla czytelników.
8. Punkt 2.3.2.4 nie jest jasny. Zapis operatora Laplace w postaci liczby rzeczywistej (2.35) wymaga komentarza. W jaki sposób określić kształt obszarów w przestrzeni parametrów na przykład dla oczekiwanej wartości przeregulowania i czasu ustalania?
9. Czy dla opisu przekształtnika wzorem 3.1 zastosowano zastępczy, ciągły sygnał sterujący? Jaki tryb modulacji został przyjęty? Stosując opis w postaci transmitancji konieczne jest podanie, co jest sygnałem wejściowym i wyjściowym. Czym jest parametr „D” we wzorach? Co zdaniem Autora jest powodem niezgodności opisu modelu matematycznego z wynikami eksperymentów symulacyjnego i laboratoryjnego. Jaki model został przyjęty do syntezy układu sterowania? Zabrakło w pracy krótkiego przedstawienia wyników działania układu regulacji dobranej w rozdziale 3.1
10. Uzyskane wyniki w pracy C3, na którą powołuje się Autor są dyskusyjne. Dobrze określona funkcja celu powinna zapewnić uzyskanie rozwiązań suboptymalnych w całej dziedzinie przeszukiwanych parametrów. Oczywiście, czas takiego przeszukiwania byłby dłuższy niż w przypadku wstępnego ograniczenia dziedziny. Ten aspekt nie został jednak uwypuklony w rozprawie.
11. Wątpliwości budzi dobór nastaw regulatora powiązany z efektem wchodzenia regulatora do strefy nasycenia. Nasycenie sygnału sterującego zależy zarówno od nastaw regulatora jak i od uchybu wartości regulowanej. Taki stan typowo występuje w układach regulacji, a powinien być eliminowany w przypadku na przykład układów wielowymiarowych, od których wymaga się liniowej pracy w każdym z wymiarów. Zatem dla jakiej wartości uchybu, czy też dla jakiego testu dynamicznego prowadzona

jest synteza opisana w punkcie 3.2.3.1 oraz 3.2.4? Czy po wystąpieniu większego uchybu w trakcie pracy układ regulacji zachowa się poprawnie?

12. Wątpliwości budzą także wnioski z rozdziału 3.2.4. Czas narostu dla układu regulacji pracującego w nasyceniu zależy tylko od właściwości fizycznych obiektu, a nie od nastaw regulatora. Natomiast zwiększenie się przeregulowania przy wyjściu regulatora z nasycenia może świadczyć o błędach w działaniu układu anti-wind-up. Dla pracy regulatora w zakresie bliskim nasycenia kluczowe znaczenie ma implementacja układów anti-wind-up. Jaka konfiguracja była wykorzystywana w pracy?

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. Opis wyników pracy [A14] na stronie 25 jest nieprecyzyjny
2. Podział metod identyfikacji na stronie 37 jest niejasny. Na czym polegają „eksperymenty na obiekcie” i „obserwacje obiektu”?
3. Autor często prezentację zastosowanej metody ogranicza do podania nazwy funkcji w systemie Matlab (na przykład „balred” na stronie 43). W takim przypadku staranna lektura pracy wymaga uzupełnienia o dokumentację programu Matlab.
4. Informacja z rozdziału 2.3.1 o rozpowszechnieniu poszczególnych typów regulatorów wymaga uzupełnienia, dla jakich klas obiektów regulacji przygotowano takie zestawienie.
5. Na stronie 60 omyłkowo podano typ obiektu regulacji.
6. Autor konsekwentnie stosuje złożone, piętrowe opisy symboli, jak na przykład we wzorze 3.8. Taka konwencja utrudnia trochę płynne czytanie pracy. Brakuje także zbiorczej informacji, co oznaczają poszczególne symbole w takim opisie.
7. Duża liczba wniosków cząstkowych (na przykład w rozdziale 2.4 i 3.3) utrudnia lekturę pracy, bo czasami trudno wskazać, z której części pracy dany wniosek wynika. (przykładowo wniosek 4 w 2.4).
8. W literaturze w języku polskim przyjęło się stosować określenie przekształtniki (energoelektroniczne), a nie konwertery.
9. Przyjęto oznaczanie obrazów sygnałów (transformat sygnałów) dużymi literami. Zasada ta nie jest spełniona w rozdziale 3.3
10. Czym różni się opisane w rozdziale 4.3.2 kryterium GMPM od iloczynu logicznego kryteriów GM i PM ?

7. Wniosek końcowy.

Podsumowując powyższe uwagi uważam, że rozprawa doktorskiej mgr. inż. Karola Najdka z Katedry Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej, pod tytułem *Dobór nastaw regulatorów obiektów energoelektroniki w systemie elektroenergetycznym w oparciu o identyfikację i redukcję modeli oraz D-rozbiecie Neimarka* zawiera oryginalny i wartościowy dorobek naukowy. 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.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Karola Najdka z Katedry Energoelektryki Politechniki Wrocławskiej, pod tytułem *Dobór nastaw regulatorów obiektów energoelektroniki w systemie elektroenergetycznym w oparciu o identyfikację i redukcję modeli oraz D-rozbiecie Neimarka* stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a także wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Tym samym, zgodnie z obowiązującymi przepisami, stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Stefan Brock