

Prof. dr hab. inż. Lech M. Grzesiak  
Politechnika Warszawska,  
Wydział Elektryczny

### 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*”

opracowana na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, elektronika i elektrotechnika Politechniki Wrocławskiej

## 1. Ocena wyboru tematyki rozprawy

Projektowanie regulatorów w tym dobór nastaw jest przedmiotem licznych publikacji. Pomimo tego, że zagadnienia te są przedmiotem prac badawczych od prawie 100 lat, pojawiają się nowe prace związane z nowymi strukturami i metodami sterowania. Publikowane są także wyniki prac dotyczące wyznaczaniem obszarów stabilności oraz wpływu uproszczeń modelu obiektu na jakość regulacji. D-rozbitcie Neimarka pozwala, w szczególności, na analityczne wyznaczenie obszarów stabilności regulatorów w układach liniowych. W pracy podjęto próbę wykorzystania teorii D-rozbitcia do redukcji modelu obiektu sterowania i wyznaczenia obszaru stabilności dla regulatora PI wykorzystywanego w strukturach sterowania przekształtnikami energoelektronicznymi oraz układami napędowymi dwumasowymi.

Tematykę rozprawy należy uznać za interesującą głównie pod względem opisywania zagadnień teoretycznych stabilności.

## 2. Charakterystyka pracy i zgłoszone uwagi

Opiniowana praca doktorska jest bardzo obszerna i liczy 230 stron łącznie ze spisem literatury zawierającym 128 pozycji. Podzielona została na 5 rozdziałów a istotne merytorycznie zagadnienia zostały przedstawione w rozdziałach 2, 3 i 4.

W rozdziale 1 dokonano przeglądu metod identyfikacji i redukcji modeli oraz technik doboru nastaw regulatorów oraz sformułowano tezę i cele pracy.

Teza pracy jest następująca:

**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.**

Moim zdaniem takie zdefiniowanie zadań badawczych jest poprawne i zgodne z wymaganiami stawianymi pracom doktorskim.

W rozdziale 2 zatytułowanym „Metody oraz techniki badawcze wykorzystywane w pracy” dokonano przeglądu metod identyfikacji obiektów sterowania oraz redukcji modeli matematycznych w znaczeniu obniżenia rzędu równań opisujących obiekt. Opisano także wybrane metody doboru nastaw regulatorów. W szczególności podrozdział 2.3.2 jest poświęcony opisowi zagadnień związanych z D-rozbięciem Neimarka.

W rozdziale 3 „Weryfikacja metod oraz technik na pojedynczych obiektach” opisane zostały 2 układy energoelektroniczne oraz jeden układ napędowy. Analizowane przekształtniki energoelektroniczne to: przekształtnik DC/DC podwyższający napięcie oraz przekształtnik DC/DC z transformatorem izolującym o topologii podwójnego mostka aktywnego (DAB). Analizowany układ napędowy to struktura z sinikiem elektrycznym i dołączonym obciążeniem, które nie jest sprzężone sztywnym wałem. W literaturze taki układ nazywany jest układem dwumasowym.

W rozdziale 4 „Zastosowanie identyfikacji, redukcji i D-rozbięcia Neimarka na poziomie systemowym” przedstawione są zagadnienia opisu i analizy systemu składającego się z wielu wyodrębnionych części nazwanych sub-systemami. W szczególności analizowana jest struktura z szeregowo połączonymi sub-systemami. Przykładowe analizy dotyczą systemu złożonego z filtra pasywnego i przekształtnika DC/DC oraz dwóch przekształtników DC/DC połączonych szeregowo (kaskadowo). W najbardziej złożonej konfiguracji rozpatrywany jest układ złożony z 4 sub-systemów w konfiguracji: filtr pasywny 1; przekształtnik DC/DC1; filtr pasywny 2; przekształtnik DC/DC2. Opisane zostały procedury projektowania regulatorów dla takiego przekształtnika złożonego z wykorzystaniem techniki D-rozbięcia Neimarka.

**Niestety materiał przedstawiony przedstawiony w rozprawie nie może zostać uznany za oryginalny wkład Autora pracy doktorskiej.** Zamieszczone analizy oraz wyniki obliczeń były publikowane wcześniej w wieloautorskich pracach wymienionych w spisie literatury jako [C1] do [C7]. Jedyna różnica to język polski rozprawy oraz język angielski artykułów. Kilkadziesiąt rysunków i wzorów zostało skopiowane z wskazanych prac. Wprawdzie Autor rozprawy jest współautorem wspomnianych publikacji, ale to nie daje podstaw do „przypisania sobie” wszystkich

treści tam zawartych. W dostępnych publikacjach [C3] i [C6] są zamieszczone informacje z której wynika, że znaczący jest także udział innych współautorów.

[C3] - Energies 2021, 14, 173.

- „Hybrid Tuning of a Boost Converter PI Voltage Compensator by Means of the Genetic Algorithm and the D-Decomposition”: Radosław Nalepa, Karol Najdek and Błażej Strong
  - Author Contributions: Conceptualization, R.N.; methodology, validation, formal analysis, resources, funding acquisition, R.N. and K.N.; software, investigation, data curation, K.N. and B.S.; writing—original draft preparation, R.N.; writing—review and editing, R.N., K.N. and B.S.; visualization, K.N.; supervision, project administration, R.N. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

[C6] - Energies 2020, 13, 6614

- „Application of D-Decomposition Technique to Selection of Controller Parameters for a Two-Mass Drive System”: Radosław Nalepa, Karol Najdek, Karol Wróbel and Krzysztof Szabat.
  - Author Contributions: All authors contributed equally to this paper, in particular: conceptualization, R.N. and K.S.; methodology, R.N. and K.S.; software, R.N. and K.N.; validation, K.N. and K.W.; formal analysis, R.N., K.N. and K.W.; investigation, K.N. and K.W.; resources, R.N., K.N., K.W. and K.S.; data curation, K.N. and K.W., writing—original draft preparation, R.N., K.N., K.W. and K.S.; writing—review and editing, R.N. and K.S.; visualization, K.N. and K.W.; supervision, R.N. and K.S.; project administration K.S.; funding acquisition, K.S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

W ustawie „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” zapisano definicje pracy doktorskiej:

Art. 187. 1. Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej lub artystycznej.

**2. Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**, oryginalne rozwiązanie w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze gospodarczej lub społecznej albo oryginalne dokonanie artystyczne.

**3. Rozprawę doktorską może stanowić praca pisemna**, w tym monografia naukowa, **zbiór opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów**

**naukowych**, praca projektowa, konstrukcyjna, technologiczna, wdrożeniowa lub artystyczna, a także samodzielna i wyodrębniona część pracy zbiorowej.

Precyzyjną interpretację dotyczącą składania rozpraw doktorskich można znaleźć w materiałach Rady Doskonałości Naukowej:

Komunikat nr 19/2020 - w sprawie składania rozpraw doktorskich ogłoszony 09.11.2020 przez Radę Doskonałości Naukowej zawiera stosowne wyjaśnienia:

*... Mając powyższe na uwadze, należy uznać, iż w świetle art. 187 ust. 3 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce dopuszczalne jest, aby rozprawa doktorska, jako praca pisemna, składała się po części z prac opublikowanych, jak i takich, których wyniki jeszcze nie zostały opublikowane ...*

Materiał zawarty w przedstawionej rozprawie, a dotychczas nieopublikowany może być ewentualnie dołączony jako manuskrypt - zgodnie z interpretacją RDN zawartą w Komunikacie nr 19/2020.

**Prace wyszczególnione jako [C1] do [C7] są zbiorem artykułów powiązanych tematycznie i mogą stanowić podstawę do procedowań związanych z ubieganiem się mgr. inż. Karola Najdka o stopień naukowy doktora.** Konieczne jest tylko wskazanie wkładu merytorycznego Autora w poszczególnych publikacjach.

W przypadku wybrania opcji poprawy i uzupełnienia złożonej pracy należy zwrócić uwagę na zgodność treści z tytułem.

Zmiany są niezbędne przede wszystkim w rozdziale 3 ze względu na aspekt oryginalności w kontekście wcześniejszych publikacji.

Sterowanie przekształtników energoelektronicznych o topologii DC/DC, DC/AC, AC/DC jest zagadnieniem wielokrotnie opisywanym w literaturze. Opis matematyczny i ewentualne uproszczenie polegające na obniżeniu rzędu układu są przedstawiane w wielu pracach. W rozprawie i np. publikacjach C1 i C3 rozpatrywany jest regulator liniowy PI. W praktycznych rozwiązaniach powszechne jest wykorzystanie regulatora PI z funkcją ograniczenia sygnału wyjściowego (anti-windup). Takie rozszerzenie analiz może być istotnym elementem uzupełniającym. Materiał zamieszczony w podrozdziale 3.3 jest zbędny, ponieważ nie jest to ... *obiekt energoelektroniki w systemie elektroenergetycznym ...*, a tylko takie urządzenia, zgodnie z tytułem rozprawy, powinny być rozważane. Jako obiekty energoelektroniczne w systemie elektroenergetycznym należy rozumieć przekształtniki dwukierunkowe AC/DC czy też przekształtniki złożone AC/DC/AC lub przekształtniki bezpośrednio AC/AC - jeśli wziąć pod uwagę system elektroenergetyczny napięcia przemiennego. Tego rodzaju przekształtniki służą do dołączania do sieci AC źródeł odnawialnych, filtrów aktywnych czy innych odbiorników napięcia DC lub AC. Rozważania dotyczące przekształtników DC/DC

można uznać za uzasadnione przy założeniu, że jest to fragment przekształtnika złożonego lub też dotyczy analizy sieci DC. W tytule jest wskazane, że rozprawa dotyczy urządzeń energoelektronicznych w systemach elektroenergetycznych i to jest istotne w aspekcie analizy odpowiednio dobranych przykładów.

Wskazane jest także dokonanie porównania jakości regulacji zaprojektowanych regulatorów do dostępnych rozwiązań prezentowanych w bogatej literaturze. Ważne są stany przejściowe, a w szczególności czas regulacji i przeregulowanie oraz właściwości w przypadku zmian obciążenia. Autor dobierając nastawy regulatora PI wskazuje, że można wzmocnienie części proporcjonalnej wybrać ujemne. To wymaga precyzyjnego przeanalizowania, ponieważ taki regulator w przypadku członu inercyjnego pierwszego rzędu (obiekt regulacji) spowoduje generowanie drgań, a w przypadku obiektu wyższego rzędu będą to drgania o narastającej amplitudzie.

### 3. Wniosek końcowy

Moim zdaniem rozprawa doktorska - mgr. inż. *Karola Najdka* pt. „*Dobór nastaw regulatorów obiektów energoelektroniki w systemie elektroenergetycznym w oparciu o identyfikację i redukcję modeli oraz D-rozbiecie Neimarka* **nie spełnia wymagań stawianego pracom doktorskim przez obowiązującą Ustawę i wnoszę o jej poprawienie** przed dopuszczeniem do publicznej obrony.

Warszawa, 15-09-2021

Recenzja uzupełniająca wersji poprawionej  
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*”

Opiniowana praca doktorska - w wersji poprawionej - jest nadal bardzo obszerna i liczy 197 stron łącznie ze spisem literatury zawierającym 129 pozycji przy czym treści merytoryczne są zawarte na 161 stronach. Podzielona została na 5 rozdziałów a istotne merytorycznie zagadnienia zostały przedstawione w rozdziałach 2, 3 i 4.

Zmiany w poprawionej wersji pracy w stosunku do poprzednio opiniowanej są następujące:

W rozdziale 3 usunięty został podrozdział 3.3 dotyczący analizy układu napędowego dwumasowego. Zmieniono także treści w podrozdziałach 3.1 oraz 3.2. W podrozdziale 3.1 opisano układ przekształtnika DC/DC podwyższającego napięcie. Analiza pracy dotyczy podstawowej konfiguracji z elementem indukcyjnym na wejściu i kondensatorem na wyjściu, przy czym obciążenie jest typu rezystancyjnego. Wybrany został najprostszy układ sterowania z regulatorem napięcia o strukturze PI. Opisy matematyczne są prowadzone w dziedzinie operatorowej. Zależności (3.10 i 3.11) na współczynniki wzmocnień liniowego regulatora PI zostały podane w funkcji pulsacji oraz ustalonego punktu zdefiniowanego jako  $\underline{z}=a+jb$ . Autor podaje że wybierając punkt  $z$  można uwzględnić pożądany zapas wzmocnienie, zapas fazy oraz ewentualnie oczekiwaną wrażliwość układu. Transmitancja układu zamkniętego ma w mianowniku wielomian stopnia trzeciego. Nie podano jak uwzględnione są położenia poszczególnych biegunów. Autor stwierdza, że do dalszej analizy będzie wykorzystywany rozszerzony opis obiektu regulacji uwzględniający analogowy filtr w torze sygnału mierzonego napięcia. Filtr opisano transmitancją członu inercyjny pierwszego rzędu. Do projektowania nastaw liniowego regulatora napięcia (PI) zastosowano algorytm genetyczny (to nie jest opisane) wykorzystując wyznaczone uprzednio dopuszczalne obszary zmienności wzmocnień części proporcjonalnej i całkującej regulatora. Obliczenia przeprowadzone zostały dla trzech wskaźników jakości: IAT, ITAE, ISTAE. Wspomniano też, że wykorzystywano przy tym technikę D-rozbitcia Neimarka.

W podrozdziale 3.2 opisany jest przekształtnik DAB. Przedstawiona struktura sterowania (rys. 3.2) zawiera regulatory prądu i napięcia w połączeniu szeregowym. Kolejno podano schematy blokowe struktury regulacji prądu i regulacji napięcia. Na potrzeby projektowania regulatorów dokonano identyfikacji obiektów sterowania. W pierwszej kolejności wyznaczono transmitancję „prądową” jako człon inercyjny

pierwszego rzędu, komentując, że jest wyznaczona z dokładnością równą 98,6%. Jak to należy rozumieć i co było punktem odniesienia do porównania.

Wyznaczono zastawy regulatora w taki sposób aby pracował w zakresie liniowym. Czas narastania dla skokowego sygnału referencyjnego to ok. 10ms (rys. 3.9).

Nasuwa się pytanie czy tak nastawiony regulator zapewni dobrą jakość regulacji w szczególności dla skokowych zmian obciążenia.

W podobny sposób wyznaczono nastawy regulatora napięcia. Autor obserwując znaczące przeregulowanie na skok sygnału referencyjnego zaproponował zastąpienie regulatora PI regulatorem IP co jest rozwiązaniem dobrze znanym w teorii sterowania. Przeprowadzone są analizy i podana interpretacja właściwości zaprojektowanych regulatorów.

Zaskakujące jest stwierdzenie Autora (str. 89) że „... *dobrane nastawy sprawdzają się jedynie dla rozważań teoretycznych w przypadku, gdy analizowany jest konwerter z podwójnym mostkiem aktywnym ...*”. Można to odczytać, że Autor negatywnie ocenia własne pomysły na projektowanie regulatorów jako praktycznie nieprzydatne.

Niezrozumiałe jest także umieszczenie na str. 90 zdania „... W ramach prac na poziomie pojedynczych obiektów zastosowano technikę D-rozbitcia Neimarka dla układu dwumasowego ...”. W pracy poprawionej ten rozdział już nie istnieje.

Zamieszczone na str 90 i 91 wnioski cząstkowe moim zdaniem nie korespondują z treściami zawartymi w tym rozdziale, lub też są zbyt oczywiste.

Istoty materiał dotyczący analizy systemowych jest zawarty w rozdziale 4.

Zaproponowana została analiza systemów z wykorzystaniem opisu wrotnikowego.

Podsystemy są opisywane jako czwórniki i łączone szeregowo tworząc system.

Wykorzystane zostały opisy w dziedzinie operatorowej. Podane zostały rozbudowane zależności matematyczne opisujące podsystemy i system z nich utworzony. Ten rozdział można uznać za oryginalny wkład Autora do zagadnień analizy systemowej. Kolejno budowane są systemy składające się z filtra i przekształtnika DC/DC (2 podsystemy) oraz dalej systemy składające się z szeregowo połączonych wspomnianych podsystemów (rys. 4.11). W celu budowy złożonych systemów zaproponowana została metoda identyfikacji częstotliwościowej poszczególnych podsystemów. Wykorzystując technikę D-rozbitcia Neimarka wyznaczono obszary stabilności dla poszczególnych podsystemów oraz granice stabilności. Zaznaczono wyznaczone wzmocnienia regulatora napięcia dla 3 różnych wartości pulsacji. Analizy dotyczą także zmiany parametrów obiektu regulacji.

Przedstawione nastawy regulatorów zawierają ujemne wartości wzmocnień części proporcjonalnej(np. rys.4.21) ale także kolejne w następnych fragmentach pracy. Nie znajduję jednak komentarzy dotyczących tak wyznaczonych nastaw. W teorii sterowania znane są struktury regulatorów PI z ujemnym wzmocnieniem części proporcjonalnej. Dotyczy to w szczególności przypadków z obiektem, który nie jest minimalno-fazowym. Czy były przeprowadzone takie analizy?

Zastanawiające są sformułowania w rozdziale Podsumowanie (4.8). Jak należy rozumieć sformułowanie, że zastosowanie D-rozbiecia Neimarka umożliwia zredukowanie oscylacji oraz czasu ustalenia sygnałów na wyjściu podsystemów. Oscylacje są wynikiem źle zaprojektowanego regulatora albo błędnego lub niedokładnego opisu matematycznego obiektu regulacji.

## **Podsumowanie**

### Ocena celów naukowych.

Na stronie 32 podano, że „Celem pracy jest zbadanie możliwości zastosowania identyfikacji i redukcji modeli oraz techniki D-rozbiecia Neimarka w systemie elektroenergetycznym podczas doboru nastaw regulatorów obiektów energoelektroniki dla pojedynczych obiektów, a także zespołów obiektów. Cel został poprawnie sformułowany, a w treści pracy są opisy i analizy dotyczące tych zagadnień.

### Ocena źródeł literaturowych.

W spisie literatury podano 107 prac opublikowanych w czasopismach lub materiałach konferencyjnych oraz 14 książek. Spis jest uzupełniony o 8 pozycji w których mgr inż. Karol Najdek jest współautorem. Stosunkowo niewielka jest liczba artykułów dotyczących sterowania przekształtników napięcia stałego w tym o topologii DAB, które są głównym przedmiotem analiz. Można jednak uznać, że jest to zbiór obejmujący prawie wszystkie zagadnienia przedstawiane w pracy.

### Ocena rozwiązania problemów naukowych i oryginalności

Autor podjął się rozwiązania zagadnień naukowych, które zostały sformułowane w tezie pracy:

„Identyfikacja i redukcja modeli obiektów energoelektroniki w systemie elektroenergetycznym w połączeniu z D-rozbiem 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”.

Korzystając z techniki D-rozbiecia Neimarka przeprowadzono analizy dotyczące identyfikacji i redukcji modeli przekształtnika o topologii podwyższającej napięcie oraz przekształtnika o topologii DAB. Najbardziej rozbudowany fragment dotyczy analiz złożonych systemów, składających się z filtrów pasywnych i przekształtników podwyższających napięcia stałego.

Opisy matematyczne przekształtników napięcia stałego są dostępne w licznych publikacjach i przedstawiane są modele uproszczone wykorzystywane do



projektowania regulatorów. Opisany w pracy sposób jest jednym z wielu. Zaprojektowane regulatory, których działanie jest zobrazowane zamieszczonymi wynikami badań symulacyjnych i badań laboratoryjnych nie wskazują na szczególne zalety tak prowadzonego projektowania. Przytaczane w literaturze wyniki pokazują czasy narastania na poziomie kilkunastu *mikrosekund* w porównaniu do kilkunastu *milisekund* uzyskanego w zamieszczonym eksperymencie.

Typowe rozwiązania topologii DAB zawierają filtry prądowe typu  $\pi$  z dwoma kondensatorami i dwoma dławikami. Korzystając z takiej topologii można łatwiej wykazać konieczność redukcji opisu obiektu regulacji.

Bardziej wartościowe i oryginalne są analizy systemowe, ale w tym przypadku nie ma potwierdzenia jakości regulacji w eksperymencie. Pomimo tych uwag dyskusyjnych stwierdzam, że praca zawiera rozwiązania postawionych problemów naukowych.

#### Ocena redakcji pracy.

Redakcja pracy nie jest doskonała. Jest napisana językiem zawierającym określenia żargonowe np. „konwerter typu boost” zamiast używanej w polskich opisach nazwy „przekształtnik podwyższający napięcie”. Na wielu rysunkach są opisy w języku angielskim pomimo, że praca jest napisana w języku polskim. Przyjęty sposób zapisywania zmiennych z rozbudowanymi indeksami górnymi i dolnymi (nawet kilkanaście znaków w indeksie) utrudnia czytanie i interpretowanie zapisów równań. Szczególnie jest to widoczne w rozdziale 4 gdzie podawane są rozbudowane zależności matematyczne - uzyskane prawdopodobnie w wyniku komputerowych przekształceń symbolicznych - nie mieszczące się nawet na połowie strony np. wzory (4.71) i (4.72). W pracy zamieszczono 88 rysunków, z których wiele zawiera kilka oddzielnych fragmentów graficznych. Taka konstrukcja pracy powoduje, że jest to raczej pogłębiony raport z przeprowadzonych wielu analiz i badań komputerowych, z pogłębioną analizą problemów naukowych.

#### **Wniosek końcowy**

Moim zdaniem rozprawa doktorska - mgr. inż. *Karola Najdka* pt. *„Dobór nastaw regulatorów obiektów energoelektroniki w systemie elektroenergetycznym w oparciu o identyfikację i redukcję modeli oraz D-rozbiecie Neimarka spełnia w poprawionej postaci wymagania stawianego pracom doktorskim przez obowiązującą Ustawę i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.*

Warszawa 9-05-2022