

Bydgoszcz, dn. 29 sierpnia 2023 r.

Dr hab. inż. Jan Mućko, prof. PBS
Politechnika Bydgoska im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich
Wydział Telekomunikacji, Informatyki i Elektrotechniki
ul. Prof. S. Kaliskiego 7; 85-796 Bydgoszcz

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Agaty Bieleckiej

pt. **“Predictive control of shunt active power filter using feedback from the supply current”**

opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu
Morskiego w Gdyni, prof. dr hab. inż. Krzysztofa Góreckiego
(pismo z dn. 22.06.2023, Uchwała nr 8/2023 rady Naukowej Wydziału
Elektrycznego UMG z dn. 22 06 2023 r.)

1. Przedmiot recenzji. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autora?

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pt. *“ Predictive control of shunt active power filter using feedback from the supply current”*, której autorem jest mgr inż. Agata Bielecka. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Daniel Wojciechowski, prof. PG, a promotorem pomocniczym jest dr inż. Adam Muc z UMG.

Rozprawa napisana jest w języku angielskim i liczy 123 strony, a w tym spisy: treści, oznaczeń, skrótów, rysunków i tabel oraz dwa załączniki. Zasadniczy tekst zawarty jest w 5 rozdziałach oraz nienumerowanym rozdziale *„Conclusions”* podsumowującym treści rozprawy. Bibliografia liczy 151 pozycji. Zamieszczona w rozprawie doktorskiej literatura jest reprezentatywna dla analizowanych w pracy zagadnień. Recenzentowi nie jest znane inne opracowanie takie, jakie stanowi niniejsza rozprawa.

Publikacje mgr inż. Agaty Bieleckiej (zamieszczone w bibliografii) to 5 artykułów współautorskich opublikowanych w Przeglądzie Elektrotechnicznym (2019, 2020 i 2023 r.), Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin (2020 r.), Energies (2021 r.).

W bazie scholar.google znajduje się w sumie 11 artykułów współautorskich mgr inż. Agaty Bieleckiej, jednak część z nich nie dotyczy bezpośrednio tematów związanych z rozprawą doktorską.

W nienumerowanym rozdziale *Introduction* Doktorantka wprowadza w tematykę będącą przedmiotem rozprawy i wykazuje, że zagadnienia którymi będzie się w pracy zajmowała są aktualne. Następnie przedstawia on swoją motywację do pracy oraz *tezę, cel i zakres pracy*.

Celem pracy było: Opracowanie i eksperymentalna weryfikacja predykcyjnego sterowania ze sprzężeniem zwrotnym bocznikowego (równoległego) filtra aktywnego (APF),

zapewniającego wysoką skuteczność kompensacji i stosunkowo szybką reakcję na zmiany prądu obciążenia.

Teza postawiona w pracy to: Bocznikowy filtr aktywny (APF) z predykcijnym sprzężeniem zwrotnym od prądu zasilania zapewnia znacznie wyższą skuteczność kompensacji odkształceń prądu zasilania, asymetrii i mocy biernej (podstawowej harmonicznej) w szerokim zakresie mocy roboczej filtra, w porównaniu z bocznikowym filtrem ze sprzężeniem wyprzedzającym.

Założony został **zakres prac**, w którym należało przedstawić kompleksowe podejście do bocznikowego filtra aktywnego z algorytmem sterowania z predykcijnym sprzężeniem zwrotnym, który realizuje następujące funkcje:

- kompensacja harmoniczných prądu zasilającego,
- kompensacja niezrównoważenia podstawowej harmonicznej prądu zasilającego,
- kompensacja składowej biernej podstawowej harmonicznej prądu zasilającego.

Zadania szczegółowe mające zrealizować cel pracy i udowodnić tezę zdefiniowane przez Autora to:

1. opracowanie predykcijnego sterowania ze sprzężeniem zwrotnym bocznikowego filtra aktywnego z uwzględnieniem warunków pracy rzeczywistego systemu,
2. analiza porównawcza strategii sterowania bocznikowego APF,
3. opracowanie algorytmu sterowania łączącego zalety strategii sterowania wyprzedzającego (sprzężenie „w przód”) i ze sprzężeniem zwrotnym,
4. analiza stabilności proponowanego układu sterowania ze sprzężeniem zwrotnym,
5. badania symulacyjne, weryfikacja i wielokryterialne porównanie właściwości algorytmów sterowania bocznikowego APF ze sprzężeniem zwrotnym, wyprzedzającym i kombinowanym,
6. badania laboratoryjne opracowanego systemu sterowania predykcijnego ze sprzężeniem zwrotnym,
7. analiza uzyskanych wyników badań.

W rozdziale *1 Electric power quality* opisano zagadnienia jakości energii elektrycznej w systemach zasilania, w tym aspekt harmoniczných prądu oraz asymetrię przebiegów prądów. Przedstawiono także wybrane zagadnienia z teorii mocy.

Rozdział 2 *Applicability of shunt active power filter* koncentruje się na warunkach zastosowania bocznikowego APF, przedstawiając jego topologię i wykonywane zadania. Ponadto przedstawiono wymagania dotyczące działania APF oraz obszar jego zastosowania.

Rozdział 3 *Control of shunt active power filter using feedback from the supply current* poświęcono zaproponowanemu algorytmowi predykcijnego sterowania ze sprzężeniem zwrotnym bocznikowego APF przedstawiając jego szczegółową strukturę i opis. Przedstawiono zaimplementowany regulator prądu oraz algorytm realizujący sterowanie. Ponadto rozdział ten zawiera przegląd różnych strategii sterowania wraz z ich zaletami i wadami.

W rozdziale 4 *Stability analysis of the control system of shunt active power filter with feedback from the supply current* przedstawiono analizę stabilności układu sterowania oraz

określono granice stabilności układu. Obejmuje to również ogólne wyprowadzenie transmitancji oraz strukturę blokową systemu sterowania.

W rozdziale 5 *Experimental and simulation results of the shunt active power filter control system using feedback from the supply current* przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych i laboratoryjnych. Przeprowadzone badania obejmowały porównanie harmonicznych prądu zasilania, asymetrii prądu zasilania oraz poziomu kompensacji mocy biernej podstawowej harmonicznej w następujących systemach regulacji: ze sprzężeniem zwrotnym, sprzężeniem wyprzedzającym i kombinowanym.

Badania przeprowadzono w sieci sztywnej, sieci miękiej i przy zasilaniu z generatora z silnikiem diesla. Ponadto w niniejszym rozdziale przedstawiono wpływ nieliniowości falownika oraz opóźnień wynikających z cyfrowej realizacji układu sterowania na skuteczność kompensacji realizowanej w układzie sterowania.

Nienumerowany rozdział *Conclusions* przedstawiają wnioski wyciągnięte z przeprowadzonych badań.

W załączniku A *Simulation model* przedstawiono środowisko, w którym przeprowadzano symulacje oraz podano wybrane parametry elementów modelu symulacyjnego.

W załączniku B *Laboratory model* przedstawiono fotografie i opis modelu laboratoryjnego oraz aparaturę pomiarową użytą podczas badań eksperymentalnych.

W celu realizacji pracy zastosowano typową metodę badawczą stosowaną w naukach technicznych, która zawierała: przegląd literatury, zidentyfikowanie problemów, przyjęcie założeń, opracowanie modelu matematycznego i symulacyjnego, wyznaczenie właściwości, dokonanie weryfikacji eksperymentalnej.

Uważam, że teza, cel rozprawy i zadania szczegółowe są ważne ze względów poznawczych oraz aplikacyjnych. Zostały one dostatecznie jasno sformułowane. Działania podjęte przez Doktorantkę są aktualne.

Przedstawione wyniki eksperymentalnych badań ilościowych były wystarczające, aby potwierdzić poprawność zaproponowanej metody sterowania bocznikowego filtra aktywnego, zgodnie z przyjętymi założeniami rozprawy. Jak można zaobserwować poszczególne przebiegi napięć i prądów zmierzone w układzie eksperymentalnym były zgodne z wynikami uzyskanymi symulacyjnie, co udowadnia, że założenia dotyczące struktury i algorytmu sterowania zostały zrealizowane, a cele postawione na wstępie rozprawy zostały osiągnięte.

Tak postawione zadanie było poważnym zadaniem zarówno naukowym jak i konstrukcyjnym. Zastosowanie opracowanego przez Doktorantkę układu może mieć szereg zastosowań praktycznych ważnych dla gospodarki.

2. Ocena wyboru tematyki rozprawy. Jaka jest przydatność rozprawy Autora z punktu widzenia nauk technicznych, czy założenia przyjęte przez Autora są uzasadnione?

Obecnie technologie związane z tzw. poprawą jakości energii elektrycznej są intensywnie rozwijane i znajdują coraz więcej zastosowań. Podstawową przyczyną pogorszenia jakości energii elektrycznej są odkształcenia prądu spowodowane przede wszystkim odchyleniem prądu od przebiegu sinusoidalnego, ale także asymetrią prądów i składową reaktywną prądu. Poważnymi konsekwencjami pogorszenia jakości energii elektrycznej są dodatkowe straty w sieci zasilającej, nagrzewanie się urządzeń elektrycznych, niedokładne działanie urządzeń zabezpieczających, przeciążenie urządzeń, niebezpieczeństwo pojawienia się rezonansu. Nowoczesnym rozwiązaniem do poprawy jakości energii elektrycznej jest zastosowanie przekształtników energoelektronicznych jak kompensatory statyczne (*static var compensator SVC*, *static synchronous compensator STATCOM*) czy filtry aktywne (*active power filter APF*).

Głównym celem rozprawy doktorskiej było opracowanie i eksperymentalna weryfikacja takiego sterowania bocznikowego filtra aktywnego (APF), która zapewnia wysoką skuteczność kompensacji harmonicznego prądu zasilającego, niezrównoważenia podstawowej harmonicznego prądu zasilającego oraz składowej bierny podstawowej harmonicznego prądu zasilającego i stosunkowo szybką reakcję na zmiany prądu obciążenia.

Cel ten dokładnie wpisuje się w najnowsze trendy rozwoju energoelektroniki do zastosowań w elektroenergetyce. Autor dokonując analizy teoretycznej, opisując algorytm sterowania oraz przeprowadzając eksperyment udowodnił, że zaproponowane rozwiązania spełnia postawione na wstępie założenia. Udowadnia także tezę pracy.

Uważam, że opracowana przez Doktorantkę struktura i sposób sterowania filtrem aktywnym są istotne zarówno w sensie poznawczym jak i dla rozwoju gospodarczego. Uważam, że tematyka przedstawiona przez Doktorantkę, opisująca tak szczegółowo zjawiska związane z *predykcijnym sterowaniem bocznikowym filtrem aktywnym przy użyciu sprzężenia zwrotnego od prądu zasilania* nie była w Polsce dotąd przedmiotem tak wnikliwych badań, co stanowiło ważny bodziec motywujący podjęcie prac badawczych.

Biorąc pod uwagę znaczenie i potrzebę dynamicznego rozwoju tych urządzeń uważam, że wybór tematyki badań jest zasadny zarówno z powodów poznawczych, jak i aplikacyjnych. Problematyka związana z realizowanym tematem jest aktualna. Znalazła ona odzwierciedlenie w tytule, który zrozumiale i komunikatywnie określa zawartość rozprawy. Zarówno analiza teoretyczna jak i wyniki zaprezentowane w rozprawie mogą być pomocne w projektowaniu nowoczesnych filtrów aktywnych.

3. Czy Autor rozwiązał postawione zagadnienie i użył właściwej metody?

Autor rozwiązał zagadnienie postawione w pracy i użył właściwej do tego metody. W tym celu sformułował własne, autorskie założenia dotyczące sterowania bocznikowym filtrem aktywnym. Zastosowana metodologia sprowadzała się do następujących sekwencji: przegląd literatury światowej naukowej i technicznej z wykorzystaniem adekwatnych do postawionego problemu baz, zdefiniowanie problemu badawczego i założeń, propozycja rozwiązania postawionego problemu (zaproponowanie topologii, sposobu sterowania, elementów), analiza matematyczna, badania symulacyjne, badania modelu laboratoryjnego, porównanie uzyskanych różnymi metodami wyników. Tego typu postępowanie jest podejściem typowym stosowanym przez społeczność naukową w dyscyplinie automatyka, elektronika,



elektrotechnika i technologie kosmiczne. Uważam, że zastosowana w rozprawie metodologia rozwiązania problemu naukowego i technicznego jest prawidłowa. Świadczy także o tym końcowy efekt badań w postaci prawidłowo działającego modelu eksperymentalnego.

4. Jaki jest charakter rozprawy (teoretyczny, doświadczalny, konstrukcyjny), jaka jest jej pozycja w stosunku do wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Rozprawa ma charakter zarówno teoretyczny, konstrukcyjny jak i doświadczalny. Po analizie literatury światowej Autor zaproponował strukturę układu sterowania i algorytm sterowania. Dokonał teoretycznej analizy działania układu. Przeprowadził także badania układu na drodze symulacyjnej i eksperymentalnej co świadczy także o doświadczalnym charakterze pracy.

Uzyskane przez Doktorantkę rezultaty potwierdzają postawioną na wstępie tezę badawczą. Została ona potwierdzona zarówno symulacyjnie jak i eksperymentalnie. Poruszana w rozprawie tematyka jest aktualna w stosunku do stanu wiedzy dotyczącej filtrów aktywnych. Świadczy o tym 5 publikacji Doktorantki umieszczonej w spisie literatury. W szczególności jedna z pozycji opublikowana została wysoko punktowany Energies (140 pkt.).

5. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek Autora?

Uważam, że oryginalny, samodzielny dorobek Autora to:

- przedstawienie zagadnień teoretycznych związanych zarówno z jakością energii elektrycznej, jak i tematyką filtrów aktywnych na podstawie przeglądu literatury,
- kompleksowa analiza stabilności proponowanego układu sterowania,
- opracowanie i wdrożenie algorytmu sterowania,
- opracowywanie i wdrażanie modeli symulacyjnych,
- rozbudowane badania symulacyjne,
- kompleksowe badania laboratoryjne.

W ramach niniejszej rozprawy opracowano i zaimplementowano w układzie sterowania nowy, dokładny algorytm predykcyjny służący do wyznaczania i sterowania prądem kompensacyjnym. Algorytm predykcyjny realizowany był w dziedzinie częstotliwości i umożliwiał kompensację wybranych harmonicznym prądu zasilającego, kompensację asymetrii tego prądu oraz mocy biernej podstawowej harmonicznym, przy jednoczesnej możliwości realizacji wszystkich lub tylko wybranych zadań. Zaproponowany został kombinowany układ sterowania, który łączy w jednym algorytmie zalety strategii sterowania zarówno w pętli zamkniętej, jak i otwartej.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

6.1. Uwagi do dyskusji, wymagające uzasadnienia (nie muszą to być słabe strony rozprawy)



- Stosunkowo mało informacji zawartych zostało w pracy (Załącznik B) dotyczących stanowiska laboratoryjnego. Brak jest np. informacji o istotnych parametrach falownika, jak np. opóźnienia wprowadzane przez tranzystory mocy, sposoby separowanego pomiaru wartości chwilowych prądów i napięć oraz opóźnień wprowadzanych przez te układy.
 - Brak jest informacji dotyczących strat mocy w falowniku w stosunku np. do mocy pozornej mierzonej na zaciskach tego falownika.
 - Brak jest szczegółowych informacji dotyczących filtra LCL. Podano jedynie wartości pojemności i indukcyjności. Nie wiadomo jaki typ kondensatora zastosowano i jaka jest pasożytnicza rezystancja (R_{ESR}) dla określonej częstotliwości prądu tego kondensatora. Podobnie nie podano informacji dotyczących parametrów pasożytniczych cewek filtra LCL. W jaki sposób zostało wykonane uzwojenie? Czy to były cewki powietrzne, czy cewki z rdzeniem? Jaki typ rdzenia został zastosowany i czy rdzeń ten może pracować przy częstotliwości, z którą przełączają tranzystory falownika? Pasożytnicze rezystancje elementów filtra LCL mogły mieć wpływ na wyniki badania stabilności układu.
 - Czy Doktorantka planuje komercjalizację wyników swoich badań?
- Proszę Doktorantkę o ustosunkowanie się do tych uwag.

6.2. Uwagi szczegółowe

- Strona 7; linie 6 i 8 od dołu: Jest: „... *efficiency voltage value* ...” Nie spotkałem w literaturze pojęcia “*efficiency voltage value*”. Prawdopodobnie Doktorantce chodziło o *rms voltage value*.
- Strona 7; linia 4 od dołu: Jest: „*flicker - a visual effect of frequency variation of voltage in a system*”. Definicja ta jest niepoprawna.
- Strona 8; linia 3 od góry Jest: “*transients - sudden rise of signal*”. Definicja ta jest niepoprawna.
- Strona 13; linie 1-13 od dołu. Tekst o konsekwencjach wyższych harmonicznym umieszczony w miejscu, w którym omawiana jest *sliding discrete Fourier transform (SDFT)*, choć w sumie poprawny, jest w tym miejscu bez sensu. Ten tekst można było umieścić np. w rozdziale zatytułowanym *Introduction*.
- Strona 14; wzór (1.35) zawiera błąd.
- Strona 20; wzór (1.55) i (1.56). Nie zdefiniowano zmiennych U , I , oraz $s(t)$. Czy Doktorantce (wzór 1.55) chodziło w wartości skuteczne oznaczane wcześniej jako U_{RMS} i I_{RMS} ?
- Strona 22; linia 1 od góry. Jest: „... *fundamental harmonics of voltages and currents*”. Złe sformułowanie. Powinno być: *aparent power for fundamental harmonics of voltages and currents*.
- Strona 22; linie 2-7 od góry. Podane definicje są nieprecyzyjne. To nie są “... *voltages and currents* ...” ale pewne funkcje tych wielkości.

J. Mućko

- Strona 27; linia 2 pod wzorem (2.3). Jest: „ X_S - grid equivalent reactance”. Definicja jest nieprecyzyjna. Należało wspomnieć, że to jest: *grid equivalent reactance for the fundamental harmonic*.
- Strona 30; linia 4 od góry. Jest: „... pulsation of u_{DC} voltage”. Powinno być: ... ripple of u_{DC} voltage.
- Strona 102; linia 4 od dołu. Jest: „... with equivalent grid resistance equal to $R_S = 462.3 \Omega$.” 462.3Ω to chyba trochę za dużo jak na rezystancję sieci.

7. Czy rozprawa świadczy o dostatecznej wiedzy autora i znajomości współczesnej literatury z zakresu dyscypliny naukowej, jakiej rozprawa dotyczy?

Rozdziały *Introduction*, 1. *Electric power quality*, 2. *Applicability of shunt active power filter*, 3. *Control of shunt active power filter using feedback from the supply current* opisują stan wiedzy dotyczący podstaw teoretycznych, budowy, sposoby sterowania i zastosowań układów APF. W rozdziale 3 Doktorantka pokazuje obszary zagadnienia, które wymagają dalszych pogłębionych badań i przedstawia autorską, nowatorską koncepcję, która polega na połączeniu predykcyjnych strategii sterowania w pętli zamkniętej i otwartej w jednym algorytmie opracowanym dla bocznikowego APF z obwodem sprzęgającym LCL. Ta łączona strategia sterowania zapewnia szybką reakcję na stany nieustalone oraz wysoką skuteczność kompensacji.

Przedstawione w tych rozdziałach treści wskazują, że Autor rozprawy posiada rozległą wiedzę dotyczącą omawianej w rozprawie problematyki. Bibliografia liczy 151 pozycji, w tym 6 pozycji współautorskich Doktorantki.

8. Czy Autor wykazał umiejętność poprawnego przekonywującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Autor wykazał umiejętność poprawnego przekonywującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników. Styl pracy jest jasny i zrozumiały. Uważam, że dostrzeżone usterki nie mają wpływu na ogólną, bardzo dobrą ocenę pracy.

9. Czy i jaka jest przydatność rozprawy dla gospodarki narodowej?

Przedstawione przez Autora rozwiązanie może mieć znaczny wpływ na rozwój wiedzy i zastosowań filtrów aktywnych, co może być bardzo atrakcyjne dla operatorów polskich sieci elektroenergetycznych i zakładów przemysłowych, w których występują odbiorniki nieliniowe o znacznych mocach. Zarówno uzyskane parametry modelu eksperymentalnego jak i wyniki badań symulacyjnych wskazywać mogą na duże możliwości aplikacyjne.

J. Mućko

10. Czy rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy?

Po zapoznaniu się z zakresem badań naukowych i wnioskami zawartymi w recenzowanej rozprawie uważam, że **stanowi ona oryginalne rozwiązanie problemu naukowego** w oparciu o analizę, modelowanie i sterowanie energoelektronicznym filtrem.

Uważam, że **dostrzeżone usterki mają jedynie marginalny wpływ na ogólną, bardzo dobrą ocenę pracy**. Dostrzeżone usterki występują sporadycznie i dotyczą przede wszystkim tzw. „literówek” oraz stosowania nieprecyzyjnych określeń.

Zawarte w recenzowanej rozprawie rozważania teoretyczne i badania symulacyjne, potwierdzone wynikami badań eksperymentalnych, wskazują na szerokie możliwości ich praktycznego zastosowania. Autor wykazał się dużym zasobem wiedzy teoretycznej, szczegółową znajomością zagadnień objętych tematyką pracy oraz dobrą znajomością literatury specjalistycznej. Jego przygotowanie badawcze zaowocowało umiejętnościami wykorzystania specjalistycznego oprogramowania i aparatury pomiarowej. Wszystko to świadczy o **umiejętności Autora do prowadzenia badań naukowych** pozwalających rozszerzyć wiedzę dotyczącą uprawianej dyscypliny naukowej.

Treść rozprawy jest zrozumiała, zawiera niezbędne sformułowania, zastosowana terminologia jest prawidłowa, a przyjęte oznaczenia i symbole są czytelne. Liczne rysunki ilustrują omawiane zagadnienia. Podsumowując należy stwierdzić, że badania przeprowadzone przez mgr inż. Agatę Bielecką są celowe i przydatne zarówno w sensie poznawczym jak i aplikacyjnym. **Stwierdzam, że postawiony w pracy cel, dzięki zastosowanym metodom badawczym i opracowaniu nowych rozwiązań technicznych, został osiągnięty, a teza udowodniona.**

Wniosek

Przedstawione w rozprawie doktorskiej pt. „*Predictive control of shunt active power filter using feedback from the supply current*” zagadnienia związane z analizą, badaniami i zastosowaniem tego typu urządzeń należy uznać za istotne pod względem naukowym, jak i w procesie ich analizy i projektowania.

Pani mgr inż. Agata Bielecka wykazała się bardzo dobrą znajomością badanych zagadnień oraz umiejętnością formułowania i rozwiązywania problemów naukowych.

Według mojej oceny, recenzowana praca doktorska mgr inż. Agaty Bieleckiej spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z Ustawą o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz.U. z 2017 r. poz. 1789) oraz zgodnie z Ustawą z 3 lipca 2018 r. – Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1669 z póź. zm.) w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, **wnoszę o przyjęcie rozprawy i jej dopuszczenie do publicznej obrony. Wnoszę także o wyróżnienie tej pracy.**

Jan Mućko