

Dr hab. inż. Krzysztof Sozański, prof. UZ
Instytut Automatyki, Elektroniki i Elektrotechniki
Wydział Informatyki, Elektrotechniki i Automatyki
Uniwersytet Zielonogórski

Recenzja rozprawy doktorskiej *Pani mgr inż. Agaty Bieleckiej pt.*

Predictive control of shunt active power filter using feedback from the supply current

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Formalną podstawą opracowania tej recenzji jest Uchwała nr 8/2023 Rady Naukowej Wydziału Elektrycznego UMG z dnia 22 czerwca 2023 oraz pismo *Pana Dziekana Wydziału Elektrycznego UMG prof. dr hab. inż. Krzysztofa Góreckiego* wraz z umową.

Promotorem rozprawy doktorskiej jest *Pan dr hab. inż. Daniel Wojciechowski, prof. PG.*

Promotorem pomocniczym rozprawy doktorskiej jest *Pan dr inż. Adam Muc.*

Rozprawa mieści się w dziedzinie *nauk technicznych*, w dyscyplinie: *automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.*

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedstawiona rozprawa doktorska została napisana w języku angielskim. Dostarczona została w formie książkowej i sygnowana jest logiem Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Rozprawa ma sto trzysta (113) stron, zawiera: siedem (7) rozdziałów, dwa załączniki oraz spis literatury obejmujący sto pięćdziesiąt jeden (151) pozycji.

We wstępie zarysowano zakres zagadnień, których dotyczy ta rozprawa. Przedstawiona została również teza i w siedmiu punktach zakres pracy doktorskiej.

W pierwszym rozdziale Autorka przedstawiła wybrane zagadnienia z parametrami jakościowymi energii elektrycznej. Na końcu tego rozdziału omówiono również wybrane elementy teorii mocy. Należy uznać, że opis ten jest wystarczający na potrzeby tej pracy doktorskiej.

Rozdział drugi poświęcono zagadnieniom związanym z zakresem stosowania energetycznych filtrów aktywnych. Pokazano również topologię proponowanego rozwiązania równoległego energetycznego filtra aktywnego z filtrem LCL na wyjściu.

W kolejnym rozdziale omówiono w skrócie koncepcje cyfrowych układów sterowania równoległym energetycznym filtrem aktywnym. Przedstawiony został również cyfrowy układ sterowania dla projektowanego równoległego energetycznego filtra aktywnego z filtrem LCL

na wyjściu. Autorka oparła się na gotowym modelu laboratoryjnym energetycznego filtra aktywnego posiadającym niespotykaną ilość punktów pomiaru napić i prądów. Według danych z rys. 3.13, układ posiada: dwanaście przekładników prądu i osiem przekładników napięciowych. Pozwala to na komfortową obserwację stanu pracy równoległego energetycznego filtra aktywnego.

W czwartym rozdziale znajduje się analiza stabilności cyfrowego układu sterowania równoległym energetycznym filtrem aktywnym pracującym w układzie zamkniętym. Schemat blokowy cyfrowego układu sterowania został przedstawiony na rys. 4.2.

W rozdziale piątym przedstawiono wyniki badań modelu symulacyjnego i modelu laboratoryjnego. Porównano wyniki obu typów badań uzyskując bardzo dużą zbieżność. Świadczy to dobrze o trafności przyjętych modeli układów symulacyjnych równoległego energetycznego filtra aktywnego. Porównano układ ze sprzężeniem w przód z układem z ujemnym sprzężeniem zwrotnym. Dodatkowo zbadano jeszcze układ będący połączeniem obu układów.

W pracy zamieszczono wykaz literatury zawierający sto pięćdziesiąt jeden (151) pozycji, które moim zdaniem dobrze ilustrują wiedzę w zakresie rozpatrywanej w rozprawie tematyki. Autorka odpowiednio stosuje odnośniki do dołączonego do pracy wykazu literatury.

Poziom edytorski przedstawionej rozprawy należy uznać za bardzo dobry.

3. Ocena dorobku publikacyjnego Doktorantki

Na podstawie wykazu literatury zamieszczonego w pracy oraz Google Scholar można stwierdzić, że Doktorantka w dorobku naukowym posiada piętnaście publikacji naukowych, w tym trzy indeksowane przez JCR. Szkoda, że Autorka nie dołączyła do pracy wykazu swoich publikacji.

Można uznać, że bezpośrednio z rozprawą doktorską jest związanych pięć publikacji, tyle też Doktoranta umieściła w wykazie literatury. Wszystkie te publikacje są współautorskie. Jedna publikacja została opublikowana w czasopiśmie *Energies* indeksowanym przez JCR. Trzy artykuły zostały opublikowane w czasopiśmie *Przegląd Elektrotechniczny* oraz jeden w *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*.

Należy uznać dorobek publikacyjny za wystarczający do nadania tytułu doktora.

4. Ocena tematu i celu pracy

Rozprawa pt. *Predictive control of shunt active power filter using feedback from the supply current* odnosi się do bieżących potrzeb przemysłu. Należy więc uznać tematykę pracy za słuszną i dostosowaną do bieżących trendów w układach elektronicznych i zgodną z dyscypliną automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Kompensacja harmonicznych i mocy biernej ma bezpośredni wpływ na oszczędność energii elektrycznej. Temat recenzowanej pracy w pokrywa się z jej zawartością.

Należy zaznaczyć, że użyta w tytule pracy nazwa energetyczny filtr aktywny (*active power filter*) nie jest całkowicie poprawna, chociaż jest zwyczajowo powszechnie używana. Energetyczny filtr aktywny nie spełnia wymogów definicji układu aktywnego. Moim zdaniem we wprowadzeniu do rozprawy zabrakło komentarza na ten temat.

Swobodnie tłumacząc na język polski angielską wersję tezy pracy można uzyskać następującą tezę:

Równoległy energetyczny filtr aktywny z predykcyjnym sterowaniem ze sprzężeniem zwrotnym od prądu zasilającego zapewnia znacznie wyższą skuteczność kompensacji: harmonicznym prądów zasilania, niesymetrii i mocy biernej w szerokim zakresie pracy filtra, w porównaniu do równoległego energetycznego filtra aktywnego ze sprzężeniem od prądu obciążenia (sprzężenie w przód).

Taka teza pracy wydaje się łatwa do udowodnienia, ze względu na to, że wprowadzenie ujemnego sprzężenia pozwala na kompensację wielu błędów układu. Poprawnie zaprojektowany układ zamknięty zawsze będzie lepszy od układu ze sprzężeniem w przód. Główną trudność stanowi jednak zapewnienie stabilności układu i poprawnego zachowania w stanach dynamicznych.

Autorka sformułowała również następujące cele pracy:

1. Opracowanie predykcyjnego sterowania ze sprzężeniem zwrotnym, równoległym energetycznym filtrem aktywnym, zdefiniowanego w dziedzinie częstotliwości z uwzględnieniem warunków pracy rzeczywistego systemu.
2. Analiza porównawcza strategii sterowania równoległym energetycznym filtrem aktywnym.
3. Opracowanie algorytmu sterowania łączącego zalety strategii sterowania i sprzężenia zwrotnego.
4. Analiza stabilności proponowanego układu sterowania ze sprzężeniem zwrotnym.
5. Testy symulacyjne, weryfikacja i wielokryterialne porównanie właściwości algorytmów sterowania algorytmów sterowania równoległym energetycznym filtrem aktywnym: ze sprzężeniem zwrotnym, ze sprzężeniem w przód i kombinowanym.
6. Badania laboratoryjne opracowanego predykcyjnego układu sterowania ze sprzężeniem zwrotnym,
7. Analiza uzyskanych wyników badań.

Należy uznać, że cele pracy dyplomowej zostały sformułowane poprawnie.

5. Zalety pracy

Autorka podjęła trud analizy, projektowania, i realizacji algorytmu sterowania energetycznym filtrem aktywnym z cyfrową pętlą sprzężenia zwrotnego. Z moich osobistych doświadczeń wynika, że realizacja takiego układu jest jednym z trudniejszych zadań w elektronice. Do realizacji zadania konieczne jest posiadane wiedzy i umiejętności w zakresie: elektrotechniki, elektroniki, energoelektroniki, cyfrowego przetwarzania sygnałów, automatyki i programowania. Autorka wykazała się zdolnościami do analizy i syntezy metod i układów sterowania układami elektronicznymi.

Spośród udokumentowanych w pracy osiągnięć autorki można wymienić:

- projekt i realizacja cyfrowego algorytmu sterowania równoległym energetycznym filtrem aktywnym z ujemnym sprzężeniem zwrotnym,
- opracowanie i implementacja predykcyjnego regulatora prądu,
- analiza stabilności układu i dobór nastaw regulatorów,

- implementacja algorytmu sterowania,
- badania symulacyjne układu sterowania oraz całego filtra,
- weryfikacja wyników za pomocą badań modelu laboratoryjnego energetycznego filtra aktywnego.

Do jednej z głównych zalet pracy Autorki należy zaliczyć to, że zaproponowane układy zostały zweryfikowane i potwierdzone przez badania eksperymentalne. Porównując wyniki badań symulacyjnych Autorka wykazała, że układ ze sprzężeniem zwrotnym pozwala na lepszą kompensację prądu linii w stosunku do układu ze sprzężeniem do przodu.

6. Uwagi krytyczne i pytania do Doktorantki

1. Pomimo, że wyniki pracy zostały zweryfikowane za pomocą modelu laboratoryjnego Autorka nie umieściła w pracy pełnego schematu badanego układu. Moim zdaniem Załącznik B powinien być uzupełniony o taki schemat.
2. W pracy wykonane zostały szerokie badania symulacyjne układu. Moim zdaniem brakuje dokładnego schematu symulacyjnego układu. Podobnie jak poprzednim punkcie Załącznik A powinien być uzupełniony o taki schemat.
3. Zastosowany model laboratoryjny charakteryzuje się bardzo dużą ilością punktów pomiarowych, która w przypadku przemysłowej realizacji równoległego energetycznego filtra aktywnego byłaby nieuzasadniona ekonomicznie. W pracy moim zadaniem brakuje propozycji zmniejszenia ich ilości przez modyfikację algorytmu sterowania.
4. W pracy pokazano przebiegi czasowe podczas startu filtra (rys. 5.1). Interesujące byłyby również wykresy ilustrujące zachowanie układu podczas skokowej zmiany wartości prądu obciążenia.
5. Według danych z Załącznika B algorytm sterowania został zaimplementowany za pomocą procesora sygnałowego TMS 320C6672 i układu FPGA Cyclone V. Jaka jest struktura układu cyfrowego? Jaki jest podział zadań pomiędzy układami? Czy realizacja jest stała czy zmiennoprzecinkowa?
6. Dlaczego Autorka do oznaczenia prądu linii zasilającej i prądu obciążenia użyła takie dziwne nazwy jak *upstream current* oraz *downstream current*? Jednocześnie Autorka w tytule i w tezie pracy zastosowała nazwę prąd zasilania (*supply current*)?
7. W pracy brak jest informacji na temat rozdzielczości przetworników A/D i modulatorów PWM?
8. Czy nie wystąpiły problemy z układem synchronizacji (PLL) podczas prób modelu zasilanego z generatora napędzanego za pomocą silnika spalinowego?
9. Nie udało mi się w pracy znaleźć schematu układu połączonego (*combined*) będącego połączeniem układu ze sprzężeniem zwrotnym i ze sprzężeniem w przód?

7. Wybrane uwagi szczegółowe

Autorka nie zawsze konsekwentnie oznacza zmienne za pomocą czcionki typu italic, przykładowo ma to miejsce dla zmiennej *THD*.

Na głównym rysunku 2.5 przedstawiającym topologię równoległego energetycznego filtra aktywnego wszystkie prądy i elementy mają identyczne oznaczenie niezależnie od fazy np.: i_u , i_u , i_u . Natomiast na rysunku 3.3 na którym pokazano schemat blokowy układu sterowania podane zostały inne oznaczenia $i_{a,upstream}$, $i_{b,upstream}$, $i_{c,upstream}$.

Przyznając pełne prawo Autorki do twórczego nazywania zmiennych muszę jednak zauważyć, że w pracy jest sporo egzotycznych zmiennych np.: u^{set}_f , i^{set}_2 trochę pogarszających czytelność pracy.

Nie wszystkie użyte w pracy symbole zostały opisane w wykazie oznaczeń.

8. Podsumowanie

Pomimo wymienionych uwag krytycznych, wartość dodana pracy znacznie je przewyższa. Recenzowana praca zawiera oryginalne rozwiązania autorskie. Zaprezentowane rozwiązania mogą być przydatne dla projektantów układów elektronicznych.

Na podstawie analizy przedstawionej pracy mogę jednak stwierdzić, że Pani mgr inż. Agata Bilecka wykazała się: odpowiednią wiedzą w zakresie: projektowania zaawansowanych układów elektronicznych, umiejętnościami w zakresie: implementacji algorytmów sterowania, wraz z ich dyskretnymi układami sterowania oraz zdolnością do twórczej analizy otrzymanych wyników.

W świetle obowiązujących obecnie przepisów o stopniach naukowych, zgodnie z warunkami określonymi w z Ustawy o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w zakresie Sztuki z 14 marca 2003 roku, wraz z późniejszymi zmianami, należy uznać, że przedłożona rozprawa spełnia stawiane w nich kryteria dla dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Niniejszym wnioskuję więc o przeprowadzenie publicznej obrony rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Agaty Bileckiej na Wydziale Elektrycznym Uniwersytetu Morskiego w Gdyni. Składam również wniosek o wyróżnienie tej rozprawy doktorskiej.

Krzysztof Sozański
Krzysztof Sozański