

Prof. dr hab. inż. Wojciech Jarzyna
Katedra Napędów i Maszyn Elektrycznych
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Lubelska
ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin
tel. 81 5384339; e-mail: w.jarzyna@pollub.pl

Lublin, 10.02.2025 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marka Nowaka pt. „Zastosowanie regulatora proporcjonalno-rezonansowego w energoelektronicznych przekształtnikach sieciowych”

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza z dnia 22 stycznia 2025 r.

Recenzja wykonana została zgodnie ze szczegółowymi zasadami określonymi w paragrafie 2, ust.5 umowy o dzieło na wykonanie recenzji rozprawy doktorskiej.

1. Ocena układu rozprawy doktorskiej, w tym informacje o jej poszczególnych częściach składowych

Układ pracy jest zgodny ze zwyczajową formułą rozpraw naukowych. Wprowadzenie do tematyki z motywacją podjęcia tematu zaprezentowane są w pierwszej części wstępu. Bezpośrednio za nim przedstawiona jest koncepcja regulatora proporcjonalno-rezonansowego (P+R) oraz zapisane są podstawowe równania regulatora oraz obliczenia symulujące efekty przetwarzania tego regulatora. Znajdują się tam też elementy dyskusji, która prowadzi Autora do sformułowania celu rozprawy, a bezpośrednio dalej zaprezentowania zakresu badań oraz opisu zawartości pracy.

Rozdział drugi opisuje dalsze rozwinięcie modelu matematycznego zawierające syntezę członu rezonansowego. Przedstawionym równaniom towarzyszą rysunki struktury regulatora proporcjonalno-rezonansowego. Opisane rozważania modelowe prowadzą do postaci, na podstawie której Doktorant sformułował wniosek, że dobierając odpowiednio parametry, regulator P+R można zrealizować na układzie FPGA korzystając z algorytmów regulatorów PI.

Krótki rozdział trzeci zawiera podstawowe modele pracy sieci w sinusoidalnym stanie ustalonym wyjaśniające sposoby regulacji napięcia w sieci elektroenergetycznej współpracującej z przekształtnikowymi źródłami OZE.

Tematem rozdziału czwartego są badania symulacyjne falownika sieciowego z regulatorem P+R. W pierwszej części tego rozdziału zaproponowany został schemat

WPLYNEŁO

12. LUT. 2025

POLITECHNIKA RZESZOWSKA
im. Ignacego Łukasiewicza
KATEDRA WYDZIAŁU ELEKTROTECHNIKI I INFORMATYKI
STUDIA STACJONARNE
35-959 Rzeszów, ul. W. Pola 2
tel. 17 743 2429, 2430; 17 865 1998

regulatora dla sieci jednofazowej, w której regulator P+R przetwarza odpowiednio uchyb prądowy prowadząc do wygenerowania napięcia wymaganego w miejscu przyłączenia. Uruchomiony w programie IsSpice model sprawdza zachowanie układu w typowych stanach eksploatacyjnych takich jak: skokowe załączenie układu, skokowa zmiana mocy czynnej, pracę z odstrojonym od 50Hz regulatorem, pracę z zawartością harmoniczną rzędu 3, 5, 7 i 9 oraz w przypadku zasilania napięciem o modulowanej fazie. Dla wszystkich badań symulacyjnych przedstawione zostały przebiegi napięcia i prądu. W każdym z przypadków wizualnie kształt prądu wyglądał poprawnie. Nigdzie jednak, nie przedstawiona została żadna analiza ilościowa czy jakościowa potwierdzająca uzyskanie pożądanego kształtu prądu.

Rozszerzeniem opisanych badań symulacyjnych były badania układu trójfazowego. W tym przypadku, po zastosowaniu transformacji Clarke, zaprojektowano układ z dwoma regulatorami rezonansowymi prądu dla współrzędnych alfa i beta, po czym powtórzono badania rozszerzając je o testy przy 2% asymetrii. W konkluzji padły między innymi takie stwierdzenia, że „... układ w ciągu pierwszego okresu osiągnął wartości ustalone” oraz „Współczynnik asymetrii wynosił w tym przypadku 2%. Asymetria ta jest widoczna również w prądach fazowych.”. Takie stwierdzenia nie mają istotnych wartości, gdyż nie są poparte żadnymi ocenami ilościowymi. Dziwi fakt, że nie wspomniano o wyraźnie widocznych zakłóceniach wyższymi harmonicznymi prądu i nie skomentowano jakie to są wartości i z czego wynikają.

W rozdziale piątym, za pomocą przekształcenia Tustina, Doktorant dokonał przekształcenia ciągłej transmitancji filtra do transmitancji dyskretniej i zaproponował numeryczną implementację algorytmu P+R na platformie rozwojowej z układem FPGA. Uzupełniając ten model o cyfrowe modele źródeł zasilania, stworzył jednolity model numeryczny przydatny do testowania regulatora z zachowaniem takich samych parametrów jak w układzie rzeczywistym.

Układ do symulacji w czasie rzeczywistym został zaprojektowany z wykorzystaniem narzędzia projektowego Quartus II. Do testów obliczeniowych przyjęte zostały parametry transformatora jednofazowego, parametry linii, dane falownika oraz nastawy regulatora P+R. Jednak ocena przeprowadzonych testów, tak jak w poprzednich przypadkach, jest bardzo przybliżona ze względu na brak ilościowych lub jakościowych ocen symulowanej odpowiedzi.

W dalszej kolejności wykonane zostały testy układu trójfazowego z regulatorem P+R. Niestety, i w tym razem, wyniki zostały bardzo ogólnie skomentowane słowami: „Podobnie jak w poprzednich przypadkach, reakcja układu regulacji na te zmiany była prawidłowa i prąd *szybko osiągnął* przebiegi referencyjne.” Dziwi więc, że w podsumowaniu tej części badań sformułowane zostały opinie, że wyniki z modelu zrealizowanego na FPGA miały większe opóźnienia niż w programie IsSpice, co jest jak przypuszczano wynikiem uwzględnienia niektórych rzeczywistych parametrów.

W rozdziale szóstym przeprowadzono testy porównujące dynamikę regulatora P+R z regulatorem PI. Do badań wykorzystano platformę symulacyjną opisaną w poprzednim rozdziale.

Wychodząc z założenia, że warunki pracy regulatorów mają być podobne, przyjęto te same wartości współczynnika wzmocnienia dla obu regulatorów. Założenie to jest dyskusyjne, bo przyjęta wartość jest optymalna tylko dla regulatora P+R, a dla regulatora PI tak nie jest. Uzyskane wyniki w każdej z prób były więc na korzyść regulatorów P+R.

Końcowe badania przeprowadzone zostały na stanowisku laboratoryjnym wyposażonym w symulator sieci ITECH IT7900, płytę ewaluacyjną falownika STEVAL-IHM023V3 z tranzystorami IGBT STGP10H60DF oraz płytę ewaluacyjną ALTERA DE1 zawierającą układ FPGA CYCLONE II. Na tak zestawionym stanowisku, dodatkowo wyposażonym w czujniki pomiaru prądu i napięcia oraz przetworniki A/C wykonano serie testów, które w dużej mierze powtarzają symulowane wcześniej stany pracy. W ich wyniku zauważono dużą zgodność z wcześniej uzyskiwanymi wynikami testów obliczeniowych. Realizując te testy zainteresowano się również odkształceniem wyższymi harmonicznymi prądu i napięcia. Wykreślono zmiany THDi oraz THDu w funkcji obciążenia prądowego. Uzyskane przy największych obciążeniach wartości dla THDi zbliżają się do 2% co jest bardzo dobrym wynikiem przekształtnika dla zastosowanej dwupoziomowej topologii.

Przedstawione wyniki testów ilustrowały również zmiany prądu w zależności od napięcia. Aby zmniejszyć to uzależnienie, zaproponowano oparcie wzorca napięcia na sygnałach z pętli fazowej PLL. Zadanie takie zrealizowano dla jednofazowej jak i trójfazowej sieci. Wskazaniem przez Doktoranta osiągnięciem jest dla tego rozwiązania opracowanie struktury generatora kwadraturowego do implementacji w układzie FPGA. Zastosowanie takiego rozwiązania pozwoliło uzyskać odporność układu na zakłócenia od harmonicznym napięcia.

Kolejne testy wykonywano podczas zmian mocy biernej. Wyniki ilustrowano za pomocą przebiegów sinusoidalnych. Rezultaty tych wyników komentowano bardzo lakonicznie, np. na str. 89 napisano: „*W przypadku regulacji mocy czynnej w każdym testowanym przypadku układ zareagował prawidłowo i osiągnął zadane wartości mocy*”. Podstawą takich stwierdzeń były tylko oscylogramy bez żadnych ilościowych i jakościowych opisów. Na podstawie przedstawionych wyników można więc potwierdzić opinie Doktoranta, że opracowany układ pracował poprawnie, ale o własnościach dynamicznych trudno wyrokować.

Ciekawą propozycją okazało się wprowadzenie mocy jako wzorca przebiegu, co pozwoliło ustabilizować moc nawet po wystąpieniu zapadu napięcia.

Analogiczne badania przeprowadzono dla sieci o podwyższonej częstotliwości, która współpracuje z modułami PV, bateriami oraz generatorem maszynowym. Podczas tych testów szczególną uwagę zwrócono na badania w stanie nieustalonym. Na podstawie uzyskanych wyników potwierdzono możliwość kompensacji mocy biernej pokładowej sieci np. statku powietrznego za pomocą opracowanego układu.

2. Ocena zastosowanego piśmiennictwa

Przegląd literaturowy nie ma osobnego rozdziału i jest realizowany w sposób ciągły poprzez odwołania do bibliografii. Większość z 69 pozycji ujętych w wykazie bibliograficznym nie jest starsza niż 10 lat, a gro z nich to wysoko punktowane czasopisma naukowe oraz wydawnictwa konferencyjne, które można pobrać z internetowych baz danych. Te cechy upoważniają mnie do stwierdzenia poprawności zastosowanego piśmiennictwa.

3. Wskazanie oraz ocena celu i problemu naukowego oraz zastosowanych metod badawczych

Celem pracy, zgodnie z zapisami podrozdziału 1.2., jest opracowanie nowego sposobu implementacji regulatora proporcjonalno rezonansowego, który jest prostszy od dotychczas stosowanych oraz umożliwi łatwe parametryzowanie, a wskazaną docelową strukturą implementacji jest programowalna macierz bramek FPGA. Cel ten jest tak sformułowany, że stanowi również określenie problemu naukowego.

Realizacja celu przewidziana jest przez Doktoranta w dziewięciu zadaniach, na które składają się:

- studia literaturowe dotyczące regulatora Proporcjonalno Rezonansowego P+R,
- synteza regulatora do struktury, która umożliwi jego implementację w FPGA,
- badania symulacyjne regulatora P+R w układzie regulacji przekształtnika sieciowego dla zasilania jedno i trójfazowego,
- dyskretyzacja opracowanej struktury,
- badania symulacyjne regulatora, metodą HiL (ang. Hardware in the Loop) w układzie regulacji przekształtnika sieciowego dla zasilania jedno i trójfazowego przy wykorzystaniu programowalnego układu cyfrowego FPGA,
- badania eksperymentalne regulatora P+R w układzie regulacji przekształtnika sieciowego dla zasilania jedno i trójfazowego,
- modyfikacje układu regulacji jednofazowego przekształtnika, umożliwiające sterowanie składową bierną prądu (wirtualna pętla fazowa),
- implementacja pętli sterowania mocą czynną i bierną,
- testy działania regulatora w sieci o podwyższonej częstotliwości.

Cel i zadania sformułowane są poprawnie, a ich kolejność charakteryzuje się logicznym następstwem działań odpowiadającym metodom badań naukowych towarzyszącym naukom inżynierijsko-technicznym. Zestawiając zadania te pod kątem metod naukowych wyróżnić można następujące metody:

- a) studia literaturowe,
- b) badania modelowe i symulacyjne,
- c) badania fizyczne realizowane na stanowisku laboratoryjnym,
- d) badania analityczne oraz opracowanie i formułowanie wniosków.

Wymienione metody zostały zastosowane w rozprawie. Główna część studiów literaturowych przeprowadzona została we wstępie pracy, w której Doktorant sformułował problem naukowy i często odwoływał się do najważniejszych pozycji naukowych z literatury światowej, umożliwiając w ten sposób zapoznanie się ze stanem wiedzy w zakresie problemu naukowego rozprawy. W kolejnych rozdziałach, przystępując do rozwiązania szczegółowych zadań, Doktorant przytoczył adekwatne do danego problemu opinie i przykłady bibliograficzne.

Badania modelowe i symulacyjne prowadzone były w kilku częściach pracy w rozdziałach drugim, trzecim, czwartym, piątym i szóstym, stanowiąc najbardziej rozbudowaną metodę badawczą. Podczas ich realizacji wykorzystywano modelowanie matematyczne wraz z opracowaniem założeń, programowaniem w językach wyższego rzędu i przygotowaniem danych modelu, obliczeniami symulacyjnymi i dalszą analizą wyników.

Badania na fizycznym stanowisku laboratoryjnym, poza zaprojektowaniem, konstrukcją i zestawieniem stanowiska, wiążą się również z jego uruchomieniem i oceną zgodności wyników. Te wszystkie zadania Doktorant zrealizował zgodnie z założeniami.

Analiza wyników i formułowanie wniosków to element kluczowy dla podsumowania wyników badań. Doktorant zrealizował to zadanie poprawnie, wykazał się umiejętnością stosowania tej metody badawczej.

4. Ocena części rozprawy dotyczącej omówienia wyników badań

Zaprezentowane przez Doktoranta wyniki badań miały najczęściej formę oscylogramów przebiegów prądu i napięcia. Badane zmiany wielkości wymuszających miały z reguły stosunkowo niewielką wartość, czasami określaną przez samego Autora na 2%. Przy wprowadzeniu zmian wielkości zadawanej na tak małym poziomie, nie ma możliwości sporządzenia wizualnej oceny odpowiedzi. Niestety Doktorant nie zaproponował żadnej metody ilościowej czy jakościowej, które mógłby zrobić, gdyż miał przecież pliki numeryczne z wartościami, a tym samym możliwość do odczytania zmian i odpowiedniego ich przetworzenia. Podobnie przedstawia się analiza dynamiki prądu na zmiany napięcia. Przykładowo na str.52 Doktorant napisał, „*prąd szybko osiągnął przebiegi referencyjne*”.

Tym niemniej, oceniając efekty rozprawy uznaję, że Doktorant zrealizował cel i wykonał wszystkie zaplanowane zadania badawcze. Ze względu na znaczenie w procesie rozwiązania problemu naukowego wymienię następujące osiągnięcia:

- Analiza i synteza regulatora P+R;
- Uruchomienie i przeprowadzenie badań symulacyjnych;
- Implementacja regulatora P+R w strukturze FPGA i jego badanie;
- Zaprojektowanie i uruchomienie stanowiska laboratoryjnego dla wymaganego zakresu badań oraz przeprowadzenie badań laboratoryjnych;

- Wykazanie możliwości stosowania opracowanych rozwiązań dla mikro-sieci o podwyższonej częstotliwości zasilania 400 Hz;
- Umiejętne formułowanie wniosków. Opracowane przez Doktoranta wnioski są konkretne, mają zwartą i logiczną formę.

5. Informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań

Nie ma wątpliwości, że opracowane w rozprawie rozwiązanie ma duży potencjał aplikacyjny, ale odpowiedź w jaki sposób mogą być wykorzystane wyniki pozostawię do przedstawienia Doktorantowi, gdyż sporządzana ocena dotyczy zawartości rozprawy a nie opinii recenzenta nt. wskazań praktycznego zastosowania uzyskanych wyników. Niestety Doktorant, pomimo że znał wymagania uchwały senatu własnej uczelni, nie przedstawił w rozprawie swoich opinii w tym zakresie. W związku z powyższym, w kolejnej części recenzji znajduje się pytanie dotyczące tego problemu.

6. Informacja o ewentualnych nieprawidłowościach, które pojawiły się w ocenianej rozprawie oraz wątpliwościach wymagających przedstawienia opinii Doktoranta

Uwaga, recenzent zastosował oznaczenia do wskazania miejsca, której dotyczy uwaga, np. str.36, 16 w.g.- co oznacza, że zapis dotyczy 36 strony i 16 wiersza liczonego od góry strony.

- 6.1. Podczas badań przyjęto te same wartości dla współczynników wzmocnienia członu proporcjonalnego regulatorów PI oraz P+R pomimo, że są różne zasady ich doboru. Optymalne warunki doboru spełnione są tylko dla regulatora P+R. Dlaczego dla regulatora PI nie dobrano również optymalnych nastaw? (str.55, 5 w.g.)
- 6.2. Proszę zaproponować metodę analizy, która pozwoli bez żadnych wątpliwości ocenić dynamikę badanych procesów, np.:
 - Układ już w ciągu pierwszego okresu, począwszy od zmiany wartości referencyjnych osiągnął wartości ustalone (str.36, 4w.g.). Wizualnie oceniam, że zmiany ustabilizowały się niemal po 1 ms.
 - W czasie trwania tego testu, nie stwierdzono znacznego przesunięcia fazowego między prądem a napięciem (str.36, 16 w.g.). Co znaczy określenie znacznego? Jak to się przekłada na wymuszenie?
 - Test, którego rezultat przedstawiono na rysunku 4.15, dotyczy pracy układu w warunkach asymetrii napięcia. Współczynnik asymetrii wynosił w tym przypadku 2%. Asymetria ta jest widoczna również w prądach fazowych. (str 36, 3 w.d.). To sztuka spostrzec na odkształconym przebiegu sinusoidalnym dwu procentowe zmiany.
 - Układ zareagował prawidłowo i w drugim okresie po zadanej zmianie osiągnął zadany przebieg (str.46, 9w.d.). Doktorant nie sformułował na czym polega prawidłowa reakcja układu, jakie są wymagania w zakresie czasu, amplitudy, itp.?

- *reakcja układu regulacji na te zmiany była prawidłowa i prąd szybko osiągnął przebiegi referencyjne.* (str.52, 3 w.d.). Wizualnie bez analizy ilościowej jest bardzo trudno zaobserwować i ocenić reakcje układu.
- 6.3. W jaki sposób wyniki rozprawy mogą być praktycznie wykorzystane w gospodarce?
- 6.4. Do regulacji mocy chwilowej Doktorant stosuje metodę $p - q$ (wg. teorii Hirofumi Akagi), której wielkości p , q nie określa się formalnie mocą czynną bierną. Tymczasem Doktorant stosuje takie określenia (str. 53) pisząc, że steruje „*mocą czynną i bierną*” a na rys. 5.19 wielkości te zapisuje dodatkowo dużymi literami P i Q . Definicja mocy czynnej i biernej nie uzasadnia stosowania takiego określenia, a wobec toczącej się dyskusji w środowisku naukowym, zasadniej byłoby określać te moce chwilowymi mocami $p - q$.
- 6.5. Inne przykładowe błędy, głównie o charakterze redakcyjnym i formalnym to:
- brak wykazu symboli i oznaczeń, które ułatwiają i porządkują symboliczne określenia, a w treści pracy niekiedy brak takich wyjaśnień, np. dotyczy transmitancja $G_A(s)$, str.9 , współczynników k_P , k_Q (str.31),
 - liczne pomyłki w powoływaniu się na rysunki i wzory, np. str.14, 15, 22, 25, 38.
 - zdarzają się formalne błędy zapisu, m.in. wzór (5.17),
 - po przejściu na analizę dyskretną, ponownie pojawia się bez uzasadnienia rysunek 5.3 modelu ciągłego, który zresztą jest powtórzeniem Rys.2.3.,
 - Tabela 5.3. Na schemacie brak jest uwzględnionego w tabeli dławika sieciowego,
 - Rys.5.20 – co reprezentują te wykresy, bez żadnej skali na osiach?
 - *Zmiana charakteru mocy czynnej.*(str.55, 9 w.d.) nieprecyzyjne określenie

Pana Doktoranta proszę o ustosunkowanie się do przedstawionych uwag 6.1. ÷ 6.3. formie pisemnej i przesłanie odpowiedzi z wykorzystaniem poczty elektronicznej na adres e-mail recenzenta pobrany ze strony <https://ehms.pollub.pl/standard/staff.php>.

7. Ocena, czy rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego

Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego opracowania nowego sposobu implementacji regulatora proporcjonalno rezonansowego z wykorzystaniem bezpośrednio programowalnej macierzy bramek FPGA. Koncepcja ta i jej wykonanie spełniają wymagania oryginalnego rozwiązania w zakresie zastosowania wyników własnych badań naukowych w sferze naukowej z dużymi możliwościami implementacji w gospodarce.

8. Ocena, czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Kandydata do stopnia doktora w dyscyplinie albo dyscyplinach oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Na podstawie opinii przedstawionych w niniejszej recenzji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Marka Nowaka stanowi oryginalne rozwiązanie problemu badawczego. Doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne oraz szczegółową wiedzą w zakresie energoelektroniki i analizy złożonych układów elektrycznych oraz prowadzenia badań z wykorzystaniem symulacji komputerowej i implementacji w technice FPGA. Realizując pracę naukową Pan mgr inż. Marek Nowak dowiódł umiejętności stosowania różnych metod badawczych, co świadczy o posiadaniu wystarczających umiejętności do samodzielnego prowadzenia prac naukowych.

Uwzględniając wymienione argumenty wnioskuję, aby rozprawę doktorską mgr inż. Marka Nowaka uznać za istotny wkład Autora w rozwój dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Stwierdzam więc, że opiniowana praca spełnia warunki i wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Marka Nowaka do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Rzeszowskiej im. Ignacego Łukasiewicza.

