

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](mailto:w.jarzyna@pollub.pl)

Lublin, 02.10.2023 r.

## **RECENZJA**

### **ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGR. INŻ. DARIUSZA CHOLEWY PT. „ANALIZA PRACY I STEROWANIE WIELOFAZOWYCH GENERATORÓW INDUKCYJNYCH KLATKOWYCH”**

Podstawą opracowania recenzji jest uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Krakowskiej z dnia 29 czerwca 2023 r.

#### **1. Ocena problematyki rozprawy**

Rozprawa dotyczy metod regulacji napięcia wytwarzanego przez wielofazowy generator indukcyjny klatkowy o liczbie faz stojana większej niż 3. W intencji Doktoranta układ przeznaczony jest do systemów generacji, których praca odbywa się zmienną prędkością obrotową i zmiennym nieliniowym momentem napędowym generatora. Dobrym przykładem dla takich warunków pracy są wskazane przez Niego turbiny wiatrowe, które dla osiągnięcia efektywnych energetycznie warunków pracy wymagają śledzenia optymalnej trajektorii momentu zależnej od prędkości turbiny. Uzyskanie takiego reżimu pracy jest zalecane dla wszystkich zmiennoprędkościowych elektrowni wiatrowych. Producenci elektrowni wiatrowych realizują to zadanie poprzez wprowadzenie do układów generacji odpowiednich dla danego generatora elektrycznego układów przekształtnikowych. Stosowane komercyjnie najnowsze rozwiązania najczęściej bazują na maszynach z magnesami trwałymi o liczbie par biegunów znacząco przekraczających 100 i trójfazowych maszynach indukcyjnych. Spotyka się jeszcze, popularne do niedawna, rozwiązania generatorów dwustronnie zasilanych DFIG z maszynami indukcyjnymi pierścieniowymi wyposażonymi w układ przekształtników w obwodzie wirnika.

Analizowana w pracy konfiguracja elektrowni wiatrowej zasilającej akumulatory elektryczne, z reguły reprezentuje rozwiązania o niewielkiej mocy, których podstawową jednostką wytwórczą są maszyny BLDC. Wymaganą dla baterii regulację napięcia uzyskuje się poprzez zastosowanie przetwornic DC/DC, które mogą pracować w trybie obniżania i podwyższania napięcia. Powinny przy tym stosować tryby ładowania, w początkowym etapie ze stałym prądem, a po osiągnięciu dopuszczalnego napięcia ładowania, ze stałym napięciem. Ze względu na duży zakres zmian prędkości, problemem jest zachowanie odpowiedniego napięcia wyjściowego takich przekształtników.

W przypadku głębokich regulacji napięcia spada sprawność układu oraz rosną wymagania w odniesieniu do elementów jak i samej topologii przetwornic. Dlatego bardzo interesująca wydaje się być metodyka zaproponowana przez Doktoranta, która polega na wykorzystaniu do celów regulacji napięcia wielofazowej maszyny indukcyjnej o liczbie faz większej niż 3, z układem regulacji przełączającym kolejność faz prowadzącym do zmiany liczby par biegunów.

## **2. Ocena układu rozprawy, zastosowanego piśmiennictwa celu i hipotezy badawczej**

Oceniana praca doktorska przedstawiona została na 90 stronach i obejmuje osiem rozdziałów merytorycznych oraz pomocniczy wykaz oznaczeń.

Układ treści rozprawy jest zgodny z wymaganiem w pracach doktorskich porządkiem. Zawiera wstęp z opisem motywacji podjęcia pracy i uzasadnieniem celowości realizacji wybranego problemu. W rozdziale tym opisana jest zawartość pracy, a przedstawiony układ jest logicznie uzasadniony. W końcowej jego części podany jest cel rozprawy oraz hipoteza naukowa, sformułowana w następujący sposób: *Wielofazowa maszyna indukcyjna klatkowa sterowana za pomocą układu regulacji automatycznej może pracować jako prądnica, wytwarzając napięcie o żądanej wartości na zaciskach wyjściowych przekształtnika PWM włączonego na zaciski wielofazowego stojana, przy dużej zmienności prędkości napędzania oraz przy zmianach obciążenia.*

Cel rozprawy, którego realizacja ma dowieść spełnienia lub niespełnienia słuszności hipotezy naukowej określony został na stronie szóstej w nst. postaci:

*Opracowanie i zbadanie takiego sposobu sterowania przekształtnika VSI współpracującego z generatorem MIM, aby uzyskać napięcie  $u_{dc}$  o żądanej wartości przy różnych prędkościach  $\omega$  i zmiennym obciążeniu.*

Wynikające z tego celu zadania Autor określił w następujący sposób:

- sformułowanie prawa sterowania układem regulacji automatycznej,
- budowa mikrokontrolerowego układu sterowania,
- przeprowadzenia badań laboratoryjnych.

Bezpośrednio po sformułowaniu tych zadań, zapowiedziana została realizacja dwóch sposobów sterowania: sterowania skalarnego oraz sterowania wektorowego polowo zorientowanego oraz porównanie wyników badań z obu tych metod pod kątem jakości sterowania.

Wprowadzenie teoretyczne obejmuje elementy budowy maszyn wielofazowych oraz ich modele matematyczne i właściwości, które opisane są w rozdziałach dwa i trzy. Opisy te sporządzone zostały w oparciu o wcześniejsze prace Promotora oraz teorie sformułowane po raz pierwszy przez Twórcę tych modeli prof. Tadeusza Sobczyka. Wśród tych prac znalazły się również cztery współautorskie publikacje Doktoranta napisane razem z Promotorem rozprawy.

Kolejne merytoryczne części pracy zaliczyć już można do indywidualnych osiągnięć Doktoranta. W rozdziale czwartym przedstawia On układy sterowania skalarnego i wektorowego zaprojektowane specjalnie dla zastosowanej wielofazowej maszyny indukcyjnej. Kluczowe dla rozprawy są rozdziały piąty, szósty i siódmy. Doktorant realizuje w nich zadania modelowania, opis układu laboratoryjnego oraz przedstawia wyniki badań. Wnioski oraz konkluzje prezentuje w Podsumowaniu (rozdział ósmy), w którym formułuje swoją opinię nt. realizacji celu rozprawy i dowiedzenia hipotezy badawczej. Nieodczowny w rozprawach wykaz literatury jest ostatnim rozdziałem pracy. Zawiera on 39 pozycji, w tym tylko 28 to publikacje, które nie są utworami Autora lub jego promotora. Liczba ta wydaje się dość skromna, mimo uznaję, że wykaz jest kompletny, zwłaszcza wobec unikatowości rozwiązania maszyny wielofazowej o przełączalnej kolejności faz.

### **3. Wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych**

Zastosowane przez Autora rozprawy metody badawcze są zgodne z metodyką prac doktorskich i składają się na nie:

- a) studia literaturowe, analiza rozwiązań opisywanych w literaturze wraz wybranymi modelami matematycznymi,
- b) formułowanie własnych koncepcji,
- c) badania modelowe i prace symulacyjne,
- d) projekt, budowa i uruchomienie,
- e) wykonanie badań, analiza wyników zakończoną oceną i porównaniem wyników,
- f) formułowanie wniosków.

Wymienione metody badawcze realizowane były w poszczególnych rozdziałach pracy doktorskiej:

Ad.a) Rozdział pierwszy oraz rozdziały 2 i 3.

Jak zaznaczono w pkt.2 recenzji, badania literaturowe były dość ograniczone. Doktorant, chyba ze względu na liczne wcześniejsze prace, z założenia uznał, że model badawczy dotychczas wykorzystywany przez Niego do opisu matematycznego silnika wielofazowego jest najlepszy, nie podał alternatywnych metod i uzasadnienia swojego wyboru.

Ad.b) Własne koncepcje przedstawione zostały w rozdziale czwartym, a ich zakres jest wystarczający.

Ad.c) Badania modelowe i symulacyjne opisane są w rozdziale piątym. Ich zakres i szczegółowość dostosowana jest do celu i realizowanych zadań.

Ad.d) Model laboratoryjny opisany jest w rozdziale szóstym i spełnia stawiane wymagania.

Ad.e) Badania laboratoryjne opisane są w rozdziale siódmym.

Ad.f) Wnioski i ocena uzyskanych wyników jak i odniesienie Autora do postawionej tezy i zrealizowania celów opisane są w podrozdziale 7.6 oraz w rozdziale ósmym (Podsumowanie).

#### **4. Ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej przeprowadzonych badań i ich wyników**

Przeprowadzone przez Doktoranta badania mają charakter badań modelowych, symulacyjnych i laboratoryjnych. Wśród badań projektowych i modelowych wymienić można opracowanie:

- koncepcję stanowiska badawczego składającego się m.in. z generatora indukcyjnego dziewięciofazowego o przełączalnej kolejności zasilania, dziewięciofazowego dwupoziomowego przekształtnika energoelektronicznego IGBT wysterowanego do aktywnej pracy prostownikowej i obciążanego regulowanym obciążeniem rezystancyjnym w obwodzie prądu stałego,
- model sterowania skalarne go dziewięciofazowego generatora indukcyjnego o przełączalnej kolejności zasilania,
- model sterowania polowo zorientowanego skalarne go dziewięciofazowego generatora indukcyjnego o przełączalnej kolejności zasilania,
- parametryzacja obydwu wymienionych modeli.

Na bazie opracowanych przez siebie modeli, Doktorant stworzył modele numeryczne układu generatora indukcyjnego w środowisku Matlab-Simulink, na które składają się bloki:

- dziewięciofazowej maszyny indukcyjnej klatkowej w konfiguracji gwiazdowej („9-phase Asynchronous Machine” opracowaną wg. modelu matematycznego przedstawionego w rozdziale nr 3,
- selektora kolejności faz z nastawianą wartością histerezy przełączeń („9-phase Sequence Selector”), zrealizowany według zasady opisanej w podrozdziale 4.5.,
- dwupoziomowego tranzystorowego przekształtnika napięcia o topologii mostka wielofazowego („9-phase Voltage Source Inverter”) i układy jego sterowania skalarne go oraz wektorowe go,
- bloków transformacji wielkości naturalnych fazowych do stacjonarne go układu ortogonalne go („9-phase to alpha-beta”) oraz transformacji do niej odwrotne j („alpha-beta to 9-phase”) oraz innych pomocniczych bloków przetwarzania koniecznych do uruchomienia modelu symulacyjne go i do przeprowadzenia badań.

Na bazie opracowanych przez siebie modeli Doktorant przeprowadził szereg badań o charakterze badań symulacyjnych i laboratoryjnych. Wśród badań laboratoryjnych wymienić można testy a), b) i c):

- a) pomiary parametrów pracy w stanie ustalonym w funkcji prędkości dla trzech kolejności zasilania  $m=1, 2, 3$ . Pomiary zrealizowano w układzie sterowania wektorowe go (rozdz.7.1),
- b) pomiary jakości stabilizacji napięcia obwodu prądu stałego (rozdz.7.2),

c) proces uruchamiania układu dla kolejności  $m=1, 2, 3$ . (rozdz.7.3).

Zrealizowane w ramach pracy doktorskiej badania symulacyjne obejmują testy układów, które nie były realizowane laboratoryjnie. Testy te uzupełniają badania laboratoryjne, a niekiedy służą do celów porównawczych, np.: badania generatora PMSG czy badania rozszerzające, jak niżej wymienione testy d) i e).

d) zmiana kolejności zasilania podczas pracy z  $m=1$  na  $m=2$  i  $m=2$  na  $m=3$  dla układów zarówno ze sterowaniem wektorowym jak i skalarnym (rozdz. 7.4),

e) praca z przerwana fazą. Odpowiedzi przejściowe prądów fazowych i napięcia w obwodzie prądu stałego przy powstaniu przerwy w wybranej fazie (rozdz.7.5).

Wybór tych badań uważam za uzasadniony, a uzyskane rezultaty są bardzo interesujące. Doktorant do tworzenia układu generacji zmiennoprędkościowej wykorzystał wielofazową maszynę indukcyjną klatkową. Modele matematyczne oparte o zapis matematyczny stworzony kiedyś przez profesora Tadeusza Sobczyka, a rozwijany później przez promotora rozprawy prof. Piotra Drozdowskiego. Przyznać należy, że Doktorant również miał swój udział w badaniach i rozwijaniu unikalnego zastosowania ww. maszyny indukcyjnej wyposażonej w układ przełączania kolejności faz.

Opisany w pracy zakres badań inspirował do wielu przemyśleń i z pewnością wymaga dalszych pogłębionych prac. W szczególności wymagają tego badania w stanach nieustalonych. Wątpliwości i pytania do tych wyników przedstawione są w dalszej części recenzji obejmującej pytania A.-D.. Niemniej jednak niewątpliwie teza rozprawy została uzasadniona a cel pracy został osiągnięty.

Przedstawione rozwiązanie może być konkurencyjne dla małych elektrowni wiatrowych, dla których rozszerzony zakres regulacji pozwoli uniknąć zastosowania przekładni mechanicznej.

## **5. Zagadnienia problemowe oraz pytania nt. zauważonych nieprawidłowości lub wątpliwości recenzenta**

Pytania problemowe sformułowane w podpunktach A.-D.. Dotyczą one kwestii merytorycznych, które częste wynikają z braku własnych interpretacji Autora. Bardzo często Doktorant przedstawia wyniki, zauważa jak zachowuje się układ, ale niestety nie poszukuje interpretacji takiego zachowania.

A. Podczas omawiania wyników Doktorant napisał w podsumowaniu: *"Jeśli chodzi o stabilizację napięcia wyjściowego i jego szybkość regulacji, to różnice nie były znacząco lepsze na rzecz sterowania wektorowego"*. Stwierdzenie to jest zaledwie zauważonym Autora faktem. Niestety w rozprawie brak jakiegokolwiek próby interpretacji takiego zachowania się układu. Doktorant powinien zgłębić ten przypadek i zastanowić się co spowodowało uzyskanie takiego niekorzystnego i niespodziewanego wyniku.

- B. Przedstawiony w rozprawie niekonwencjonalny układ generacji nie dał jednoznacznej odpowiedzi, czy wybrana droga skonstruowania wielofazowego generatora o przełączalnej kolejności uzwojeń wraz z towarzyszącymi mu przekształtnikami AC/DC jest konkurencyjna względem przetwornic napięcia DC/DC. Jaka jest w tej kwestii opinia doktoranta?
- C. W obserwowanych wynikach (rys. 7.2-1 i 7.2-2) zastanawiające są zwłaszcza przeregulowania napięcia i momentu podczas skokowej zmiany obciążenia generatora mocą elektryczną (przy sterowaniu wektorowym). Według jakich kryteriów dobierane były regulatory? Czy brane były pod uwagę opóźnienia w pomiarze momentu na wale silnika? Zwykle te pomiary obarczone są dużym opóźnieniem i m.in. z tego powodu w układach sterowania wektorowego moment na wale jest odtwarzany np. w estymatorach MRAS czy obserwatorach Luenbergera.
- D. Autor zadeklarował (str.44), że *"Dla pracy generatorowej model układu mechanicznego nie był wykorzystywany"*. Uzyskane w późniejszym etapie wyniki (rys. 7.2-1 i 7.2-2) wskazują na zauważalną ustępliwość charakterystyk mechanicznych maszyny napędzającej, co ma również wpływ na tłumienie przebiegów w stanach przejściowych. Zauważalna zmiana prędkości pod wpływem załączenia obciążenia zakłóca wykonywane próby jak i wpływa na dobór regulatorów.

Inne, podane niżej pytania a.-k. wynikają w części z braku wszystkich wyjaśnień i wątpliwości co do poprawności zapisu, jak również zainteresowania recenzenta poruszaną przez Doktoranta problematyką.

- Co określają napięcia  $u_{s1}$  i  $u_{s2}$  na rysunkach 7.1-3 ÷ 7.1-5? Z ich kształtu wnioskować można, że są to napięcia wyjściowe falownika napięcia z modulacją PWM przebiegu sinusoidalnego, a tymczasem w badanym układzie przekształtnik AC/DC pracuje jako prostownik aktywny a nie falownik.
- Z jakiego powodu prądy stojana  $i_{s1}$  i  $i_{s2}$  mają kształt trójkątny a nie sinusoidalny?
- Skąd wynikają chwilowe przeregulowania napięcia  $u_{dc}$  na rys. 7.3-1 ÷ 7.3-3 podczas uruchomienia układu generacyjnego? Podobne pytania nasuwają się dla pozostałych przebiegów przejściowych przedstawionych na rysunkach 7.5-2, 7.5-3.
- str.16, trzeci wers poniżej (2-3-2): Dlaczego wielkość względna ma wymiar amperów?
- Przedstawiając model matematyczny w rozdziale 3, Doktorant powinien sformułować najpierw jego założenia.
- W wzorze 3.2-42 moment elektromagnetyczny oznaczono jak wektor, dlaczego?
- Na stronie 37 Doktorant podaje, że *"Parametry modelu matematycznego generatora zostały wyznaczone z wykorzystaniem zależności (3.2-30, 3.2-33, 3.2-35, 3.2-40)."* Czy nie zaszła tutaj pomyłka?
- Jak określono histerezę  $h$  przejścia pomiędzy przedziałami? Ile ona wynosiła? Czy wartość ta zmieniała się dla różnych przejść?

- i. Moc maszyny trójfazowej przed przezwojeniem wynosiła 4 kW, a po przezwojeniu na układ dziewięciofazowy tylko 1 kW. Dlaczego tak radykalnie spadła moc maszyny? Na jakiej podstawie określono moc maszyny? Czy były wykonywane próby obciążeniowe z pomiarami temperatury, które pozwoliłyby wyznaczyć obciążalność prądową i moc maszyny?
- j. Skąd wynikają pulsacje momentu  $T_e$  na rys. 7.1-3 ?
- k. Generatory dwustronnie zasilane DFIG mogą pracować w szerszym zakresie niż wskazany przez Doktoranta zakres  $(0,7 \div 1,3)\omega_n$ . Podany zakres rzeczywiście jest najczęściej stosowany mimo możliwości pracy z niemal dwukrotną prędkością obrotową. Ograniczenie to wynika z trudności zachowania niskiego THD przy szerokim zakresie regulacji oraz racjonalnej potrzeby minimalizowania mocy przekształtnika, która jest proporcjonalna do głębokości zmian prędkości. Przykładowo dla  $\Delta\omega_n = 0,3\omega_n$  moc przekształtnika to zaledwie 30% mocy maszyny elektrycznej.

Wielka szkoda, że Doktorant nie analizował uzyskanych wyników i nie przedstawił pogłębionej analizy przypadków.

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

Na podstawie przedstawionej dyskusji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Dariusza Cholewy stanowi oryginalne rozwiązanie problemu badawczego. Doktorant wykazał się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne oraz szczegółową wiedzą w zakresie modelowania wielofazowych maszyn indukcyjnych klatkowych wraz z układami przekształtnikowymi współpracującymi z tą maszyną. Realizując pracę naukową dowiódł posiadania umiejętności stosowania różnych metod badawczych co świadczy o posiadaniu kwalifikacji i umiejętności samodzielnego prowadzenia prac naukowych.

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

**Stwierdzam, 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. Dariusza Cholewy do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Krakowskiej.**



