

dr hab. inż. Marek Adamowicz, prof. PG  
Politechnika Gdańska  
Wydział Elektrotechniki i Automatyki  
ul. Gabriela Narutowicza 11/12  
80-233 Gdańsk

Gdańsk, dn. 17.11.2020 r.

### **Recenzja rozprawy doktorskiej**

wykonana na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i  
Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej

**Tytuł rozprawy: Sterowanie bezszczotkowej prądnicy indukcyjnej dwustronnie zasilanej w warunkach asymetrii napięcia sieciowego**

Autor rozprawy: **Gennadiy Dauksha**

#### **1. Tematyka i cel rozprawy.**

Rozprawa doktorska mgr inż. Gennadiya Dauksha dotyczy problemu sterowania bezszczotkową prądnicą dwustronnie zasilaną pracującą w elektrowni wiatrowej w szczególnym przypadku występowania asymetrii napięcia w sieci.

Maszyny indukcyjne dwustronnie zasilane znajdują zastosowanie w elektrowniach wiatrowych i napędach przemysłowych dużej mocy, w których wymagana jest regulacja prędkości kątowej wału. Ze względu na to, że maszyny dwustronnie zasilane mogą być przyłączane do sieci z dwóch stron, ich cechą charakterystyczną jest możliwość regulacji prędkości kątowej wału poprzez zmiany napięcia zasilającego z jednej strony maszyny, za pośrednictwem przekształtnika energoelektronicznego o ułamkowej mocy maszyny. Ponieważ koszt przekształtnika energoelektronicznego zazwyczaj znacznie przekracza koszt zasilanej maszyny o tej samej mocy, rozwiązanie polegające na zmniejszeniu mocy przekształtnika jest bardzo korzystne z ekonomicznego punktu widzenia.

Stosowane aktualnie w elektrowniach wiatrowych dużej mocy generatory asynchroniczne dwustronnie zasilane posiadają klasyczną konstrukcję i zawierają pojedynczy stojan połączony z siecią oraz pojedynczy wirnik z wyprowadzonymi zaciskami uzwojeń, do których, za pośrednictwem pierścieni ślizgowych i szczotek można przyłączyć trójfazowy przekształtnik energoelektroniczny. Maszyny asynchroniczne dwustronnie zasilane mogą generować moc zarówno przy prędkości nadsynchronicznej jak i podsynchronicznej, umożliwiając regulację mocy czynnej i biernej w szerokim zakresie, przy zastosowaniu przekształtnika o mocy stanowiącej ułamkową wartość mocy generatora. Zadaniem układu regulacji MDZ jest zapewnienie niezależnej regulacji mocy czynnej i biernej, przy spełnieniu wymagań odnośnie jakości generowanej energii elektrycznej, zgodnie ze stosownymi normami i obowiązującymi rozporządzeniami.

Niedogodnością rozwiązania MDZ jest występowanie problemów z pierścieniami ślizgowymi i szczotkami, które wymagają regularnej wymiany i przeglądów, podnosząc tym samym koszty utrzymania elektrowni wiatrowej oraz wpływając na obniżenie niezawodności.

MA

Rozwój bezszczotkowych maszyny indukcyjnych dwustronnie zasilanych (z ang. *Brushless Doubly Fed Induction Machines*), to znaczy nie zawierających pierścieni ślizgowych i szczotek, a więc stanowiących atrakcyjną alternatywę dla MDZ ze względu na zwiększoną niezawodność, ma długą historię. Już w 1907 roku Louis J. Hunt opracował konstrukcję pojedynczej maszyny z dwoma zestawami wielofazowych uzwojeń stojana, które nie są bezpośrednio sprzężone, ale oddziałują za pośrednictwem specjalnie skonstruowanego wirnika (*Hunt Louis J.: A new type of induction motor. Journal of the Institution of Electrical Engineers, 1907, 39(186), 648-667*).

Od czasu gwałtownego rozwoju elektrowni wiatrowych w ostatniej dekadzie XX wieku, więc od ponad 20 lat, bezszczotkowe generatory indukcyjne dwustronnie zasilane są rozważane w literaturze jako potencjalne alternatywne rozwiązanie dla MDZ (*Williamson S., Ferreira A. C., Generalised theory of the brushless doubly-fed machine. Part 2: Model verification and performance. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 1997, 144(2), 123-129*). Jednakże, jak dotąd, nie znalazły się w produkcji na skalę przemysłową, nie są oferowane na rynku i nie są instalowane w przemysłowych elektrowniach wiatrowych. Wiąże się to między innymi z trudnościami technicznymi w uzyskaniu sprawności energetycznej, która byłaby zbliżona do MDZ oraz odpowiednio niskich kosztów produkcji, co z kolei jest związane z większym stopniem skomplikowania konstrukcji maszyny bezszczotkowej. Na świecie prowadzone są aktualnie intensywne badania nad możliwościami poprawy sprawności i obniżenia kosztów produkcji bezszczotkowych generatorów indukcyjnych dwustronnie, które doprowadziłyby do ich zastosowania w elektrowniach wiatrowych o mocach rzędu MW na skalę przemysłową. Badania dotyczą, między innymi, analizy wpływu liczby par biegunów dwóch stojanów znajdujących się w konstrukcji maszyny, a także wpływu nasycenia obwodu magnetycznego maszyny na pracę generatora oraz poprawy wytrzymałości mechanicznej ze względu na występowanie tętnień momentu różnego pochodzenia. Zastosowanie znajdują m.in. metody optymalizacji wielokryterialnej, w tym metody Pareto. Przykładem może być europejski projekt „*Industrialization of a 3 MW Medium-Speed Brushless DFIG Drivetrain for Wind Turbine Applications*” (<https://cordis.europa.eu/project/id/315485/reporting/pl>) zrealizowany przez konsorcjum dwóch uczelni: University of Cambridge oraz Delft University, a także producenta turbin wiatrowych Senvion oraz czterech mniejszych spółek technologicznych branży elektrowni wiatrowych. W Polsce projekt z zakresu układów generacji energii z bezszczotkowymi generatorami indukcyjnymi dwustronnie zasilanymi był realizowany w latach 2005 – 2008 na Akademii Morskiej w Gdyni (obecnie Uniwersytet Morski w Gdyni).

Większa złożoność modelu matematycznego bezszczotkowego generatora indukcyjnego dwustronnie zasilanego, powoduje, że bezpośrednie stosowanie metod sterowania znanych z układów MDZ jest niewystarczające. W celu szybkiego doprowadzenia do praktycznego zastosowania bezszczotkowych maszyn dwustronnie zasilanych w nowych elektrowniach wiatrowych, prowadzonym aktualnie intensywnym pracom nad optymalizacją konstrukcji powinny towarzyszyć równie intensywne badania nad opracowaniem metod sterowania oraz dostosowaniem ich do wymogów obowiązujących norm i rozporządzeń.

Mgr inż. Gennadiy Dauksha podjął się w rozprawie opracowania metody sterowania bezszczotkową prądnicą indukcyjną dwustronnie zasilaną, która będzie zapewniać niezawodną pracę elektrowni wiatrowej w warunkach asymetrii napięcia sieci. Celem

Ma

rozprawy było opracowanie i analiza metody sterowania kaskadową bezszczotkową maszyną indukcyjną dwustronnie zasilaną w warunkach występowania asymetrii napięcia sieci, z uwzględnieniem czterech, znanych z literatury, szczegółowych strategii sterowania:

- 1) Strategii redukcji tętnień momentu elektromagnetycznego,
- 2) Strategii generacji jednakowej wartości mocy czynnej we wszystkich fazach,
- 3) Strategii symetryzacji prądów fazowych stojana maszyny głównej,
- 4) Strategii symetryzacji prądów maszyny sterującej w warunkach asymetrii napięcia sieciowego.

Rozprawa nie zawiera jawnie postawionej tezy, jednakże można o jej niejawnym postawieniu przez autora wywnioskować na stronie 15 pracy, gdzie autor pisze: „... wybór optymalnej strategii można zdefiniować następująco: układ sterowania bezszczotkową maszyną dwustronnie zasilaną w warunkach pracy na sieć asymetryczną powinien dążyć do spełnienia celu priorytetowego - generacji pożądanej wartości mocy czynnej, jednocześnie nie przekraczając dopuszczalnej dla układu mechanicznego generatora amplitudy tętnień momentu elektromagnetycznego oraz zapobiegając przekroczeniu przez prąd sterujący dopuszczalnej wartości maksymalnej. Mówiąc inaczej, algorytm sterowania bezszczotkową maszyną dwustronnie zasilaną powinien być w stanie oszacować wartość tętnień momentu elektromagnetycznego przy wszystkich strategiach, wybierając taką, przy której amplituda tętnień będzie w dopuszczalnych dla jednostki przedziałach.”

Zaproponowane w rozprawie autorskie rozwiązanie metody sterowania jest już w chwili obecnej znane na świecie dzięki artykułowi naukowemu autora rozprawy: „*Indirect Torque Control of a Cascaded Brushless Doubly-Fed Induction Generator Operating With Unbalanced Power Grid*” opublikowanemu w renomowanym magazynie *IEEE Transactions on Energy Conversion* (Impact Factor IF=4.51). Publikacja nastąpiła prawdopodobnie już po zakończeniu przez doktoranta prac nad rozprawą (*IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 35, No. 2, June 2020, 1065 – 1077*).

## 2. Analiza merytoryczna rozprawy

Praca liczy 107 stron i zawiera 7 rozdziałów, ponadto, liczący 86 pozycji spis literatury, wykaz skrótów i symboli oraz wykaz rysunków. Praca nie zawiera załączników.

W rozdziale 1, liczącym 10 stron, autor dokonał wprowadzenia w tematykę generacji energii ze źródeł odnawialnych, z uwzględnieniem wymagań stawianym elektrowniom wiatrowym odnośnie jakości generowanej energii. Autor opisał perspektywy zastosowania bezszczotkowych maszyn indukcyjnych dwustronnie zasilanych w przyszłych rozwiązaniach elektrowni wiatrowych, zestawiając je ze stosowanymi aktualnie generatorami pierścieniowymi dwustronnie zasilanymi (MDZ) oraz generatorami synchronicznymi z magnesami trwałymi. W dalszej części rozdziału 1 autor przeprowadził analizę stanu wiedzy oraz wyczerpującego przeglądu literatury światowej z zakresu sterowania bezszczotkowymi prądnicami indukcyjnymi dwustronnie zasilanymi, w tym z uwzględnieniem metod sterowania wykorzystywanych przy pracy generatora z asymetrią napięcia sieci. W swoich rozważaniach autor podkreśla podobieństwo maszyny dwustronnie zasilanej oraz bezszczotkowej maszyny dwustronnie zasilanej i wynikające z tego analogie przy formułowaniu strategii sterowania. Autor przyjmuje słusznie, że głównym celem sterowania generatorem elektrowni wiatrowej jest zapewnienie możliwości generowania mocy czynnej

oraz mocy biernej na zadanym poziomie. Autor formułuje cztery szczegółowe cele, rozszerzające główny cel sterowania, którymi są: „redukcja tętnień momentu elektromagnetycznego maszyny elektrycznej w warunkach pracy na sieć asymetryczną; symetryzacja prądów fazowych płynących do sieci w warunkach asymetrii napięcia sieciowego; symetryzacja prądów sterujących maszyną elektryczną w warunkach asymetrii napięcia sieciowego; generacja jednakowej wartości mocy czynnej we wszystkich fazach przy asymetrii napięcia sieciowego.”

W tym miejscu można by było inaczej sformułować użyte przez autora pojęcie „prądów sterujących maszyną elektryczną.” Przepływ prądów przez uzwojenia stojana jest raczej skutkiem przyłożenia napięcia sterującego do zacisków uzwojeń stojana.

Autor dalej wyjaśnia, że poszczególne cele szczegółowe, osiągnięte z wykorzystaniem oddzielnie każdej z analizowanych strategii będą rozłączne i formułuje zadanie i rolę nadrzędnego algorytm sterowania bezszczotkową maszyną dwustronnie, stawiając w sposób niejawną tezę pracy, którą recenzent omówił już w poprzedniej sekcji niniejszej recenzji.

Na początku liczącego 12 stron rozdziału 2, autor w sposób schematyczny i uproszczony przedstawia podstawowe różnice pomiędzy dwoma rodzajami bezszczotkowej maszyny dwustronnie zasilanej: maszyny z kaskadowym usytuowaniem dwóch uzwojeń stojana oraz maszyny z centrycznym usytuowaniem dwóch uzwojeń stojana. W dalszej części pracy autor zajmuje się wyłącznie kaskadową bezszczotkową maszyną indukcyjną dwustronnie zasilaną – jako rozwiązaniem bardziej perspektywicznym. Dalej, autor omawia konfigurację uzwojeń, schematy zastępcze oraz model matematyczny kaskadowej bezszczotkowej maszyny dwustronnie zasilanej, sprowadzony do nieruchomego układu współrzędnych  $\alpha\beta$  związanego ze stojanem głównym maszyny. Ze względu na dość nietypowe oznaczenie przez autora w modelu matematycznym maszyny wektorów przestrzennych za pomocą niepogrubionych, pochylonych liter (styl *Italic*), w pierwszej chwili czytelnik może mieć problemy ze zorientowaniem się, że jest to model wektorowy. Ponadto, jest to model uproszczony, jednakże autor nie podaje przyjętych założeń upraszczających, jak to ma zwykle miejsce w opracowaniach naukowych. Czytelnik może przyjąć zatem, że autor przyjął typowe założenia upraszczające stosowane w opisie modeli matematycznych trójfazowych maszyn elektrycznych dla celów syntezy układów regulacji. Cennym uzupełnieniem przedstawionego przez autora modelu wektorowego mogłoby być jeszcze pokazanie wykresu wskazowego ze wzajemnym usytuowaniem wektorów, czego zabrakło w pracy. Na przedstawionej z kolei, na rysunku 2.6, charakterystyce mocy czynnej maszyny sterującej w funkcji prędkości kątowej wirnika, w warunkach stałej mocy maszyny głównej, zabrakło zaznaczenia użytecznego obszaru pracy maszyny pracującej jako generator. Autor mógłby również pokazać charakterystykę napięcia stojana maszyny sterującej w funkcji prędkości kątowej wirnika. Zaznaczona na charakterystyce z rysunku 2.6 wartość  $\Omega_{m1}$  nie została opisana w tekście.

W rozdziale 3, liczącym 10 stron, autor w sposób opisowy dokonuje przeglądu trzech znanych z literatury metod sterowania kaskadową bezszczotkową maszyną indukcyjną dwustronnie zasilaną. W rozdziale 3.1 dokonuje przedstawienia sterowania wektorowego, w rozdziale 3.2 opisuje metodę pośredniego sterowania mocą oraz w rozdziale 3.3 opisuje metodę pośredniego sterowania momentem elektromagnetycznym. Autor podkreśla podobieństwa kaskadowej bezszczotkowej maszyny dwustronnie zasilanej i MDZ oraz wynikające z tego możliwości adaptacji znanych metod sterowania opracowanych dla MDZ

do sterowania bezszczotkową maszyną dwustronnie zasilaną. Autor podaje zalety i niedogodności poszczególnych metod, a zwięzły opis poszczególnych metod jest uzupełniony schematami układów sterowania oraz podstawowymi zależnościami charakteryzującymi poszczególne metody. Z rozdziału można wnioskować o dużej, posiadanej przez autora wiedzy specjalistycznej i doświadczeniu w realizacji praktycznej analizowanych metod sterowania. Miejscami autor nie ustrzegł się skrótów myślowych i żargonu inżynierskiego, którego nie wypada używać przy pisaniu rozpraw naukowych. Na przykład, na stronie 30 pracy: „*regulatory mocy/momentu elektromagnetycznego sterują bezpośrednio napięciem maszyny sterującej, robiąc zbędnymi podrzędne regulatory prądu maszyny sterującej*”. W rozdziale 3 autor całkowicie pominął problemy odtwarzania strumienia maszyny dla celów realizacji układów sterowania oraz wrażliwości układów regulacji na niedokładności odsprężenia torów regulacji zmiennych w osiach  $d$  i  $q$ , które w metodzie sterowania wektorowego mogą wynikać z przyjętych założeń uproszczających oraz problemów z odtwarzaniem wektora strumienia. Można zauważyć, że na pokazanych schematach układów sterowania znajduje się zawsze blok estymacji składowych wektora strumienia stojana o nazwie „Estymacja  $\psi_s$ ” i korzystnie byłoby zamieścić odniesienie do zawartości tego bloku w tekście rozdziału. Należy jednak przyznać, że opis estymatora strumienia użytego w pracy został zamieszczony przez autora w dalszej części pracy, w rozdziale 4.

W liczącym 26 stron rozdziale 4, autor skupił się na głównym celu pracy, którym jest opracowanie i analiza sterowania bezszczotkowej maszyny dwustronnie zasilanej w warunkach asymetrii napięcia sieci. Na początku rozdziału autor powołuje się na swoje dotychczasowe wyniki badań, opisane w pozycji [51]: „*Modified voltage oriented control of brushless doubly fed induction generator based drivetrain under grid imbalance conditions.*” 2019 Fourteenth Int. Conf. Ecol. Veh. Renew. Energies, pp. 1–7, 2019. Autor słusznie podkreśla, że metody sterowania wektorowego, w warunkach asymetrii sieci, nie są w stanie zapewnić sinusoidalnych prądów płynących z generatora bezszczotkowego dwustronnie zasilanego do sieci. Ilustruje to odpowiednimi przebiegami, pokazanymi na rysunkach 4.3 oraz 4.4. Autor trafnie zauważa, że w warunkach asymetrii napięcia sieci, generowanie zadanych wartości mocy  $p$  i  $q$  będzie powodować odkształcenie prądów stojana głównego maszyny. Autor po kolei analizuje realizację w warunkach występowania asymetrii napięcia czterech znanych z literatury strategii sterowania: redukcji tętnień momentu elektromagnetycznego, generacji jednakowej wartości mocy czynnej we wszystkich fazach, symetryzacji prądów fazowych stojana maszyny głównej, symetryzacji prądów maszyny sterującej w warunkach asymetrii napięcia sieciowego, konkludując, że pokazane w rozdziale 3, znane z literatury algorytmy sterowania, muszą w sytuacji asymetrii napięcia podlegać niezbędnym modyfikacjom. Podjęta w rozdziale 4 analiza modyfikacji znanych z literatury algorytmów sterowania kaskadową maszyną bezszczotkową dwustronnie zasilaną w warunkach pracy przy asymetrii napięcia sieci, jest kluczowym elementem rozprawy. W rozdziale 4.2 autor analizuje rozwiązanie problemu sterowania wektorowego w warunkach asymetrii sieci poprzez zastosowanie dekompozycji stacjonarnego asymetrycznego układu współrzędnych  $\alpha\beta$  na dwa stacjonarne układy o zgodnej i przeciwnej prędkości wirowania wektorów z wykorzystaniem znanej z literatury rezonansowej struktury dekompozycyjnej DSOGI (*Dual Second Order Generalized Integrator*). Sterowanie wektorowe z wykorzystaniem powyższego podejścia wiąże się z problemem określenia aktualnego

położenia wektora odniesienia dla orientacji układu. Analiza tego podejścia jest obszerna i stanowi dużą wartość pracy. Autor proponuje zastosowanie znanych z literatury regulatorów proporcjonalno-rezonansowych, co pozwala uniknąć konieczności dekompozycji toru regulacji składowych prądu stojana na kolejne pętle dla składowych zgodnych i przeciwnych.

W rozdziale 4.3 autor analizuje metodę pośredniego sterowania momentem w warunkach asymetrii sieci. W rozważaniach zawartych w tym rozdziale korzystne byłoby zilustrowanie przebiegów zadanych składowych alfa i beta prądu stojana maszyny głównej o asymetrii przeciwnej do asymetrii napięcia sieci. Opisy nowych zmiennych: „*strumienia magnetycznego stojana maszyny głównej o przeciwnej asymetrii*”, „*napięcia stojana maszyny głównej o przeciwnej asymetrii*” mogłyby być trochę inaczej sformułowane, gdyż nasuwa się pytanie: O przeciwnej asymetrii do czego? Z kolei, przy opisie estymacji strumienia stojana autor przyjmuje założenie o dostępności pomiarów napięcia stojana maszyny głównej i przedstawia równanie prostego integratora (4.15). Autor trafnie zauważa, że całkowanie równania napięciowego jest wrażliwe na zmiany rezystancji stojana i offset czujników pomiarowych i może być źródłem błędów i proponuje zmodyfikowaną strukturę estymatora strumienia stojana opartą o zastosowanie filtra dolnoprzepustowego drugiego rzędu. Na rysunku 4.14 autor pokazuje strukturę opracowanego finalnie układu pośredniego sterowania momentem w warunkach asymetrii sieci, pozwalającego na aplikację strategii stałego przebiegu składowej  $q$  mocy stojana maszyny głównej, strategii stałego przebiegu składowej  $p$  mocy stojana maszyny głównej, strategii symetrycznego prądu stojana maszyny głównej bądź strategii symetrycznego prądu stojana maszyny sterującej. W rozdziale 4.4 autor opisuje metodę wybór strategii przy pracy maszyny na sieć asymetryczną w układzie sterowania z rysunku 4.14. W tym celu proponuje strukturę estymacji oczekiwanego poziomu oscylacji momentu elektromagnetycznego kaskadowej bezszczotkowej maszyny dwustronnie zasilanej, pokazaną na rysunku 4.15.

W liczącym 16 stron rozdziale 5, autor pokazuje na rysunkach od 5.1 do 5.18 wyniki badań symulacyjnych kaskadowej bezszczotkowej maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej dużej mocy, które potwierdzają analizy i rozważania przeprowadzone w rozdziale 4 dla dwóch metod sterowania: metody sterowania wektorowego oraz metody pośredniego sterowania momentem w warunkach asymetrii napięcia sieci. Na rysunku 5.14 autor pokazuje przebiegi symulacji przedstawiające wrażliwość metody pośredniego sterowania momentem w warunkach asymetrii napięcia sieci na niedokładność wyznaczenia parametrów obwodu zastępczego maszyny. Autor prezentuje wyniki symulacji dla dwóch wybranych poziomów niedokładności wyznaczenia parametrów: 5% oraz 10%. Korzystniej byłoby pokazać oddzielnie wpływ poszczególnych parametrów, gdyż zmiany niektórych parametrów zależą od warunków pracy, np. temperatury a inne od budowy obwodu magnetycznego maszyny. Należy mieć na uwadze, że w układzie rzeczywistym niedokładności wyznaczenia niektórych parametrów mogą osiągać poziom nawet 50% co wymaga w przyszłości uzupełnienia zaproponowanych metod sterowania w algorytmy odtwarzania zmiennych i parametrów modelu maszyny. Na rysunkach 5.17 i 5.18 pokazano przebiegi symulacji potwierdzające zdolność prawidłowej pracy proponowanego układu sterowania przy głębokiej asymetrii napięcia sieci na poziomie 10% i 20%, a więc wielokrotnie przekraczające poziom asymetrii napięcia sieci dopuszczane normami i właściwymi rozporządzeniami.

114

W pokazanych w pracy wynikach badań symulacyjnych nie przedstawiono hodografów napięcia stojana i prądu stojana maszyny głównej i maszyny sterującej, co byłoby cennym uzupełnieniem przebiegów czasowych tych wielkości.

W rozdziale 6 przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych na stanowisku laboratoryjnym z kaskadową bezszczotkową maszyną indukcyjną dwustronnie zasilaną małej mocy. W badaniach laboratoryjnych autor badał metodę pośredniego sterowania momentem. Po stronie maszyny sterującej zastosowany został przekształtnik jednokierunkowy z prostownikiem diodowym po stronie sieci, co spowodowało zawężenie zakresu pracy badanej maszyny. Zamieszczone w rozdziale 6 fotografie i tabela z parametrami stanowiska laboratoryjnego powinny raczej zostać zamieszczone na końcu rozprawy w osobnym załączniku. W przekształtniku zastosowano jednorodzeniowy mikrokontroler DSP typu TMS320F28335 (Texas Instruments), który dysponuje relatywnie niewielką mocą obliczeniową, stąd autor uzyskał duże korzyści w postaci oszczędności czasu obliczeń procesora dzięki zastosowaniu regulatorów proporcjonalno-rezonansowych. Częstotliwość przełączeń tranzystorów przekształtnika wynosiła 4kHz. Dużą wartością pracy, stanowiącą o innowacyjności proponowanego rozwiązania jest to, że autorowi udało się z sukcesem zaimplementować, opisane w poprzednich rozdziałach, regulatory proporcjonalno-rezonansowe. Autor uzyskał wyniki zgodne z oczekiwaniami, potwierdzające zasadność zaproponowanej metody sterowania w zakresie pracy generatora, który był możliwy do zbadania z zastosowaniem przekształtnika jednokierunkowego.

We wnioskach, autor jako podstawowe osiągnięcia własne wymienia m.in. implementację wybranych znanych z literatury metod sterowania kaskadową maszyną indukcyjną dwustronnie zasilaną oraz analiza pracy tych struktur w warunkach symetrycznego oraz asymetrycznego napięcia sieci. Spośród wybranych z literatury trzech metod sterowania: sterowania wektorowego, pośredniego sterowania mocą oraz pośredniego sterowania momentem, dwie metody sterowania, sterowanie wektorowe i pośrednie sterowanie momentem, zostały zbadane metodą badań symulacyjnych, a jedna - pośrednie sterowanie momentem, została zbadana na stanowisku laboratoryjnym.

Osiągnięciem autora zasługującym na podkreślenie jest modyfikacja metody sterowania wektorowego oraz modyfikacja metody pośredniego sterowania momentem, które umożliwiają zastosowanie tych metod do sterowania kaskadową bezszczotkową maszyną indukcyjną dwustronnie zasilaną w warunkach występowania asymetrii napięcia sieci. Wartość pracy potwierdzają weryfikacja zmodyfikowanych metod sterowania na drodze symulacji oraz badań na stanowisku laboratoryjnym.

Zaproponowane przez autora rozwiązania są dobrą podstawą do prowadzenia dalszych prac nad dostosowaniem bezszczotkowych maszyn indukcyjnych dwustronnie zasilanych do przemysłowego zastosowania w elektrowniach wiatrowych, gdzie będą mogły konkurować większą niezawodnością ze stosowanymi aktualnie maszynami dwustronnie zasilanymi. Stanowi to niewątpliwie o przydatności rozprawy dla nauk inżynierjno-technicznych.

### 3. Uwagi ogólne

Na stronie 26 oraz na stronie 54 pracy autor przywołuje pozycję literaturową [70]: *Akagi, Hirofumi; Watanabe, Edson Hirokazu; Aredes, "Instantaneous Power Theory and Applications To Power Conditioning," John Wiley Sons, Inc., pp. 41–104, 2007.*

Proszę wyjaśnić jak mają się wprowadzone w rozprawie oznaczenia i pojęcia:

$p$  - składowa  $p$  całkowitej mocy chwilowej

$q$  - składowa  $q$  całkowitej mocy chwilowej

do wprowadzonych przez Akagiego w pozycji [70] oznaczeń i pojęć:

$p$  – chwilowa moc rzeczywista

$q$  – chwilowa moc urojona

$s$  – chwilowa moc zespolona.

Na stronie 27 autor przywołuje pojęcia *poślizgu* oraz *pulsacje poślizgu wirnika*, powołując się przy tym na zależność (2.43). Jednakże w pracy autor nie podaje ani razu definicji ani zależności matematycznych na poślizg oraz pulsację poślizgu wirnika w kaskadowej bezszczotkowej prądnicie indukcyjnej dwustronnie zasilanej. Proszę o podanie tych definicji oraz odpowiednich zależności.

Na stronie 65, w tabeli 5.1, autor podaje parametry kaskadowej bezszczotkowej maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej, której model został użyty w badaniach symulacyjnych. Maszyna główna i maszyna sterująca charakteryzują się takim samym znamionowym prądem stojana  $I_{sn} = 1760$  A oraz taką samą przekładnią napięciową stojan/wirnik, równą 0,34. Model maszyny wraz z układem sterowania autor zaimplementował w środowisku symulacyjnym PSIM i uzyskał szereg wyników. Z kolei, na stronie 82, w tabeli 6.1, autor podaje parametry kaskadowej bezszczotkowej maszyny indukcyjnej dwustronnie zasilanej, o różnych prądach znamionowych stojana maszyny głównej (3,5 A) oraz maszyny sterującej (4,4 A) oraz o różnych przekładniach napięciowych stojan/wirnik maszyny głównej (9,5) i maszyny sterującej (10,857). Maszyna ta została wykorzystana przez autora w badaniach eksperymentalnych.

Mając na uwadze, że przy opracowywaniu, analizie i dostosowywaniu układów regulacji do maszyn o różnych mocach i konstrukcjach, duże korzyści można osiągnąć poprzez stosowanie wielkości względnych do opisu wielkości i parametrów występujących w modelach matematycznych maszyn, proszę podać układ wielkości odniesienia (wielkości bazowych) zgodnie z którym można by było dokonać analizy porównawczej wyników dla tych dwóch maszyn o różnych mocach wykorzystując opis zmiennych w jednostkach względnych.

Na stronie 93, jako jedno z podstawowych osiągnięć własnych, przedstawionych w pracy autor wymienia: *analizę strategii sterowania maszyną w warunkach zakłóconej symetrii napięcia sieciowego*. W pracy zabrakło podstawowych zależności opisujących współczynniki asymetrii napięć, w tym współczynnika asymetrii napięć przewodowych. Przykładowo, na stronie 55 autor pisze: *"Takie rozwiązanie jest bardzo trudne do realizacji, ponieważ wymaga znajomości wartości tych oscylacji dla danego poziomu asymetrii, co wymaga żmudnych obliczeń."* Proszę o podanie definicji przywoływanego w tekście poziomu asymetrii.



Na końcu rozprawy autor podaje wykaz skrótów i symboli, których konsekwentnie trzyma się w napisanej pracy. Przyjęta symbolika, zwłaszcza oznaczenia wektorów, znacząco się różni od symboliki stosowanej powszechnie w literaturze naukowej w Polsce i na świecie. Na przykład, wektory przestrzenne prądów i napięć zostały oznaczone literami pochylonymi (*Italic*), nie pogrubionymi, a wektory przestrzenne strumieni magnetycznych literami greckimi pochylonymi (*Italic*), nie pogrubionymi. Proszę wyjaśnić przyjęty sposób oznaczenia wektorów przestrzennych. Recenzent ma obawy, czy w przypadku tak przyjętej symboliki czytelnik będzie w stanie jednoznacznie rozróżnić opis wektora przestrzennego i modułu wektora przestrzennego strumienia magnetycznego, czy wartości chwilowej i amplitudy strumienia magnetycznego w układzie trójfazowym. Podobnie, wątpliwości recenzenta dotyczą opisu wektorów przestrzennych napięć i prądów.

#### 4. Uwagi szczegółowe i redakcyjne

nr strony	wiersz/nr rysunku/tabeli	Uwagi
1	Tytuł rozprawy	Zgodnie z obowiązującymi w języku polski zasadami deklinacji, w tytule rozprawy powinno być: „ <i>Sterowanie bezszczotkową prądnicą indukcyjną dwustronnie zasilaną ...</i> ” Z kolei, autor poprawnie użył odmiany przez przypadki powyżej frazy w pierwszym wierszu streszczenia na str. 3.
15	1	„... <i>symetryzacja prądów sterujących maszyną elektryczną ...</i> ” Prądy nie sterują maszyną. Ich przepływ przez uzwojenia stojana jest skutkiem przyłożenia napięcia sterującego do zacisków uzwojenia stojana.
40	Rys. 4.1, Rys. 4.2	Korzystnie, aby w opisie rysunków została jednoznacznie podana chwila czasowa wystąpienia zakłócenia symetrii napięcia sieci oraz poziom tego zakłócenia.
76	9	Przywoływana pozycja [36] dotyczy normy PN-EN 50160 w wersji z 2002 roku, a więc nieaktualnej. Aktualna wersja normy PN-EN 50160 jest z roku 2010 (z późniejszymi poprawkami), stąd do opisu zagadnień jakości energii odpowiednio byłoby cytować pozycje literaturowe wydane po 2010 roku.
81	6	Jest: „ <i>w nadrzędnymi regulatorami</i> ” powinno być: „ <i>z nadrzędnymi regulatorami</i> ”
82	Tab. 6.1	Jest: „ <i>bezszczotkowej</i> ” powinno być: „ <i>bezszczotkowej</i> ”
98	4	Pozycja literaturowa [62] ma w rzeczywistości tylko dwóch autorów: G. Iwanski oraz G. Abad, a nie trzech jak jest w rozprawie.
98	8	W rzeczywistości oryginalny tytuł pozycji literaturowej [66] jest w języku angielskim: „Direct Torque Control of a Doubly-Fed Induction Generator Connected to Unbalanced Grid”

## 5. Ocena ogólna i wniosek końcowy

Prezentowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego postawionego przez autora. Autor wykazał ogólną wiedzę teoretyczną i doświadczenie praktyczne w dyscyplinie naukowej **elektrotechnika**, będącej przedmiotem dotychczasowej działalności naukowej kandydata. Jednocześnie stwierdzam, że wykazana wiedza teoretyczna i doświadczenie praktyczne autora pozostają w ścisłej relacji do dyscypliny **automatyka, elektronika i elektrotechnika** wg nowej klasyfikacji.

Uwagi krytyczne przedstawione powyżej mają charakter dyskusyjny i nie pomniejszają wartości pracy. **Stwierdzam, że praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy i stawiam wniosek o dopuszczenie do publicznej obrony.**

