

WPŁYNEŁO

03 GRU. 2019

dr.....

Wrocław, 30.11.2019

Dr hab. inż. Mateusz Dybkowski, prof. uczelni  
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych  
Wydział Elektryczny  
Politechnika Wroclawska

## OPINIA

o rozprawie doktorskiej mgra inż. Piotra Pury  
pt. „**Bezpośrednie metody sterowania maszyny dwustronnie zasilanej  
w warunkach sieci asymetrycznej**”

opracowana na zlecenie

Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej

Autor: mgr inż. Piotr Pura

Promotor: dr hab. Inż. Grzegorz Iwański

Promotor pomocniczy dr inż. Marek Michalczuk

### 1. Ocena tematyki rozprawy

Rozprawa doktorska mgra inż. Piotra Pury poświęcona jest zagadnieniom analizy przekształtnikowych układów sterowania dla maszyny dwustronnie zasilanej pracującej w warunkach sieci asymetrycznej. Tematyka związana z maszynami AC, w szczególności z generatorami AC, jest aktualnie intensywnie rozwijana zarówno w kraju jak i na świecie. Pojawiają się liczne publikacje naukowe podejmujące tematy związane z projektowaniem maszyn i urządzeń energoelektronicznych charakteryzujących się wysoką sprawnością oraz niezawodnością dla energetyki odnawialnej. Z punktu widzenia emisyjności, układy wykorzystujące odnawialne źródła energii są aktualnie bezkonkurencyjne na rynku wytwarzania energii elektrycznej. Wśród wielu maszyn elektrycznych stosowanych w energetyce

wiatrowej, wodnej itp. na szczególną uwagę zasługują maszyny dwustronnie zasilane (MDZ). Badania nad wykorzystaniem tych maszyn w energetyce odnawialnej są prowadzone w licznych ośrodkach naukowych w kraju i na świecie. Ośrodek, w którym doktorant prowadzi swoje badania jest jednym z wiodących w kraju w tej tematyce.

Pomimo tego, że coraz intensywniej rozwijane są układy sterowania dla maszyn z magnesami trwałymi (PMSM), i coraz częściej MDZ są zastępowane generatorami synchronicznymi z magnesami trwałymi, zasadnym wydaje się poszukiwanie takich rozwiązań układów sterowania, które zapewnią jak najlepsze właściwości tym układom w różnych warunkach pracy. W dalszym ciągu można zauważyć duże zainteresowanie klasycznymi maszynami indukcyjnymi oraz maszynami dwustronnie zasilanymi w energetyce odnawialnej, w szczególności dużych mocy.

W zawiązku z powyższym konieczne jest prowadzenie badań związanych między innymi z pracą generatorów współpracujących z siecią elektroenergetyczną, w szczególności podczas stanów awaryjnych tj. współpraca z siecią asymetryczną.

Jednym z powodów dużego zainteresowania maszynami dwustronnie zasilanymi i maszynami indukcyjnymi pracującymi jako generatory, są między innymi niskie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne oraz stosunkowo łatwa możliwość synchronizacji generatora przeznaczonego do współpracy z siecią elektroenergetyczną. Generatory te mogą pracować przy oddawaniu energii elektrycznej do sieci lub w układach autonomicznych.

Dlatego wybór tematu rozprawy uważam za trafny i niezwykle aktualny. Istotne jest też praktyczne znaczenie pracy i potencjalne możliwości wykorzystania otrzymanych wyników. W aktualne potrzeby trafia opracowanie narzędzi programowych do analizy układów sterowania maszyną dwustronnie zasilaną.

## **2. Ogólna charakterystyka rozprawy**

Opiniowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Piotra Pury obejmuje 120 stron, zawiera wykaz oznaczeń oraz spis literatury (cytowane są 72 prace, w tym 4 Autora rozprawy). Pracę podzielono na 5 rozdziałów.

Autor w rozprawie doktorskiej nie sformułował tezy jednak wyraźnie sprecyzował cel pracy jako: „*Celem niniejszej rozprawy jest analiza i sterowanie bezpośrednio maszyny dwustronnie zasilanej przyłączonej do sieci asymetrycznej.*”.

Autor pracy, słusznie, skupia się na propozycji i analizie bezpośrednich sterowań maszyny dwustronnie zasilanej zapewniających ciągłą pracę układu generacyjnego zarówno podczas normalnych warunków pracy jak i w warunkach sieci asymetrycznej. Jako podstawowy cel zakłada sobie zachowanie stałego momentu elektromagnetycznego oraz sinusoidalnych prądów generowanych przez stojan generatora. Cel ten próbuje osiągnąć stosując różne metody sterowania przekształtnikiem. Zakłada, że w układzie regulacji nie jest wykorzystywana dekompozycja zmiennych stanu na składowe zgodne i przeciwne, analizuje takie algorytmy sterowania, w których regulacji podlega moc chwilowa generowana przez stojan MDZ. Autor proponuje także nową koncepcję sterowania, w której zmienną podlegającą regulacji jest moment elektromagnetyczny oraz jego komplementarny skalar. Analizowany jest także wpływ dodatkowej informacji o prądzie wirnika w sterowaniu realizowanym we współrzędnych związanych ze stojanem.

Autor rozprawy podjął próbę wykonania syntezy układów sterowania i doboru parametrów regulatorów układu.

Autor konsekwentnie dąży do realizacji postawionego celu badawczego posługując się metodami analitycznymi i symulacji komputerowej, a także badań eksperymentalnych jako sposobu ich weryfikacji.

W rozdziale pierwszym zawarto wstęp, omówienie stanu zagadnienia pracy generatorowej maszyny dwustronnie zasilanej, metod regulacji bezpośredniej i współpracy z siecią asymetryczną, przedstawiono cel i zakres rozprawy doktorskiej. Cytowane publikacje dobrano w sposób prawidłowy z bardzo bogatej bibliografii przedmiotu, a wykonany przegląd stanu zagadnienia pokazuje drogę myślową, którą kierował się Autor przy opracowaniu celu rozprawy.

Cel i zakres prac dobrany i sformułowany jest w sposób prawidłowy, Autor w pracy konsekwentnie dąży do jego realizacji. Szkoda, że w pracy jasno nie sformułowano tezy rozprawy doktorskiej.

Drugi rozdział poświęcony jest maszynie dwustronnie zasilanej współpracującej z siecią elektroenergetyczną. Rozdział ten zawiera między innymi model matematyczny MDZ, analizę indukowania się napięć w wirniku związanych

ze składową zgodną i przeciwną, podane są sposoby wyznaczania wartości zmiennych zadanych. Niestety w rozdziale nie opisano modelu maszyny z nieliniową charakterystyką magnesowania, a jedynie klasyczny model o stałych parametrach. Wydaje się zasadne, że przy analizie struktur, które badane są w kolejnych rozdziałach konieczne jest zastosowanie modelu nieliniowego maszyny elektrycznej. Autor, dla przedstawionego modelu, konsekwentnie opisuje struktury sterowania pokazując ich wady i zalety.

Rozdział ten, jest najobszerniejszy i bardzo istotny z punktu widzenia realizacji celu rozprawy doktorskiej. Autor w jednym rozdziale opisuje zarówno model maszyny oraz układy sterowania. Wydaje się, że lepszym rozwiązaniem byłoby stworzenie nowego rozdziału, poświęconego wyłącznie opisowi powszechnie znanych algorytmów sterowania oraz nowych koncepcji struktur sterowania zaproponowanych przez Autora rozprawy. W tak obszernym rozdziale pewnemu zatarciu ulega waga zaproponowanych koncepcji nowych struktur sterowania.

W rozdziale tym Autor przedstawił między innymi przegląd histerezowych metod sterowania mocą oraz momentem maszyny dwustronnie zasilanej. Opisał koncepcje algorytmów sterowań bezpośrednich mocy oraz momentu i skłara pomocniczego  $X$  regulatorami liniowymi.

Najważniejszą częścią rozdziału jest część, w której Doktorant podaje sposoby modyfikacji podstawowej wersji sterowań z regulatorami liniowymi.

W wykazano, że bezpośrednie połączenie stojana MDZ do sieci elektroenergetycznej powoduje, że wszelkie zakłócenia w niej występujące, w szczególności asymetria napięcia, przenoszą się na samą maszynę.

Opisane zostały bezpośrednie metody regulacji mocy, momentu oraz prądu. Opisano zarówno układy nieliniowe o zmiennej częstotliwości łączy sterowalnych elementów półprzewodnikowych oparte na regulatorach histerezowych oraz liniowe o stałej częstotliwości łączy. W układach tych Autor rozprawy wykorzystał w strukturze różne typy regulatorów.

Najważniejszą częścią tego rozdziału jest zaproponowanie nowej struktury bezpośredniego sterowania momentem oraz skłarem pomocniczym. Autor zaproponował sterowanie, które skupia się na kontroli momentu elektromagnetycznego w jednej z osi sterowania i kontroli skłara pomocniczego

w drugiej. Celem takiego sterowania jest zapewnienie stałości momentu elektromagnetycznego przy asymetrii napięcia sieci zasilającej.

Autor zaproponował także wykorzystanie w układach sterowania informacji aktualnej wartości prądu wirnika. Zauważył on, że wykorzystując zależność przedstawiającą relację pomiędzy prądem stojana, wirnika oraz magnesowania i zależność przedstawiającą strumień stojana, można wyznaczyć nowy prąd stojana, który uwzględnia wartość prądu wirnika. Informacje te mogą w znaczący sposób poprawić działanie układów sterowania maszyną dwustronnie zasilaną, w szczególności przy współpracy z siecią asymetryczną.

Szkoda, że autor nie wykorzystał w badaniach modelu nieliniowego, a założył, że indukcyjność magnesująca jest stała w czasie. Niewątpliwie takie założenie znacząco upraszcza całą strukturę sterowania ale może powodować błędy przy obliczaniu składowych ortogonalnych w wirującym układzie współrzędnych zmodyfikowanej wartości prądu stojana, wykorzystujące w swojej strukturze sprzężenie od prądu wirnika odpowiednio w osi  $d$  oraz  $q$ .

Rozdział trzeci opiniowanej rozprawy doktorskiej przedstawia wyniki badań symulacyjnych metod zaprezentowanych w rozdziale 2. Badania wykonane są dla maszyny o mocy 2MW. W rozdziale tym Autor opisuje pracę układu dla warunków sieci symetrycznej oraz przy odkształceniu napięcia.

Metody sterowania MDZ poddane zostały testom dynamicznym oraz sprawdzono ich działanie podczas pracy ze zmienną prędkością wirowania wału. Niestety na wykresach nie przedstawiono przebiegów prędkości wirnika.

W badaniach wykazano, że podstawowymi wadami metod bezpośrednich bazujących na regulatorach histerezowych są zniekształcenia prądu oraz konieczność posiadania wyższego poziomu napięcia pośredniczącego obwodu napięcia stałego.

Wykazano, że wad tych nie mają metody o stałej częstotliwości łączeń wykorzystujące modulatory. Autor przedstawił schematy w wersji sterowania wykorzystującej regulatory typu PIR oraz PR. W realizacji sterowania w badaniach symulacyjnych oraz na stanowisku laboratoryjnym użyte zostały regulatory PR.

W rozdziale czwartym przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych z maszyną o mocy 7,5 kW. Badano wyłącznie metody z regulatorami liniowymi podanymi w rozdziale drugim. Pominięto analizę układów regulacji z regulatorami histerezowymi, co zdaniem recenzenta było słusznym posunięciem.

Podobnie jak w poprzednim rozdziale opisano zarówno pracę układu z siecią symetryczną jak i z siecią asymetryczną. Wykazano, że zaproponowane przez Autora zmiany w strukturach sterowania znacząco poprawiają pracę maszyny dwustronnie zasilanej przy pracy z siecią asymetryczną.

Szkoda, że mało miejsca poświęcono opisowi stanowiska laboratoryjnego. Nie przedstawiono w rozdziale, ani w załączniku (których jest brak), szczegółów budowy stanowiska, zdjęć, które są interesujące dla czytelnika. Wyniki i analizy przedstawione w rozdziałach 3 i 4 stanowią dobrą wskazówkę przy projektowaniu MDZ z przekształtnikiem wirnikowym i pozwalają na wybór odpowiedniej metody do konkretnej aplikacji przemysłowej.

Niestety podczas analizy Autor nie przedstawia przebiegów prędkości, dla której wykonane są badania. Jest to szczególnie istotne w przypadku gdy projektowana maszyna z układem sterowania ma być wykorzystana w turbinie wiatrowej, w której prędkość zmienia się wraz ze zmianami wiatru.

Ponadto, Autor nie podał żadnego komentarza odnoszącego się do wyników uzyskanych dla maszyny o mocy 2MW i 7,5kW. Oczywistym jest, że przy takiej dysproporcji mocy muszą być różnice w projektowaniu układów sterowania, doboru nastaw regulatorów czy też inny jest wpływ szumów pomiarowych czy też czasu martwego przekształtnika energoelektronicznego.

Rozdział piąty przedstawia wnioski wynikłe z przeprowadzonych analiz oraz badań. Zdaniem recenzenta, wnioski te są poprawnie sformułowane i poparte wynikami analiz przedstawionych w poprzednich rozdziałach.

Praca kończy się spisem bibliografii oraz spisem: symboli, rysunków oraz tabel.

### **3. Uwagi ogólne**

Tematyka związana z generatorami współpracującymi z siecią elektroenergetyczną przy asymetrii napięć sieci jest zagadnieniem szczególnie istotnym i stanowi poważny problem badawczy.

W rozprawie opisano i zbadano bezpośrednie algorytmy sterowania mocą oraz momentem maszyny dwustronnie zasilanej. Wykonano obszerne badania symulacyjne, które zostały zweryfikowane na opracowanym stanowisku

laboratoryjnym. Skupiono się na układach, w których głównym celem regulacji jest zapewnienie pracy ze stałym momentem elektromagnetycznym oraz sinusoidalnym prądem generowanym przez stojan. Wykazano, że układy zaproponowane w pracy działają w sposób poprawny, a jedyne odstępstwa zauważono dla układu bazującym na wyznaczaniu modułu strumienia wirnika.

Autor opisał i sprawdził działanie układu bezpośredniego sterowania mocą oraz bezpośredniego sterowania momentem i skalarem pomocniczym  $X$ , przy wykorzystaniu liniowych regulatorów proporcjonalno rezonansowych.

Wykazano, że dodanie do układu sterowania informacji o prądzie wirnika pozwala na uzyskanie krótszych czasów stanów przejściowych w obu testowanych algorytmach i zapewnia stabilność pracy układu kontrolowanego zgodnie z algorytmem bezpośredniej regulacji mocy, gdy implementowane są odprężenia torów regulacji oraz sprzężenia w przód.

Do **uwag dyskusyjnych natury ogólnej**, jakie nasunęły mi się w czasie studiowania rozprawy należą:

1. Autor w pracy założył, że analizowany jest liniowy model maszyny dwustronnie zasilanej.

Czy takie podejście jest słuszne, w szczególności, że proponuje się nową koncepcję sterowania, która bazuje na wykorzystaniu prądu wirnika i prądu magnesującego w pętli sprzężenia zwrotnego? Autor na str. 27 pisze: „Przebiegi na Rys. 10 oraz Rys. 11 są zbliżone, co jest uzasadnione w przypadku pracy w stanie jałowym, jednakże w przypadku obciążenia maszyny niezbędne będzie uwzględnienie dodatkowych ograniczeń związanych z dostarczaniem mocy biernej przeznaczonej na magnesowanie do MDZ i związanych z tym strat.”. W pracy zakłada się jednak model liniowy w analizie symulacyjnej. Jaki jest wpływ takiego uproszczenia na otrzymane rezultaty. Co w przypadku gdy maszyna pracuje z dużymi prędkościami. Czy takie założenie nie jest zbyt daleko idące?

W rozdziale 2.5.1 opisano nową koncepcję sterowania dla MDZ. Zakłada ona wykorzystanie składowych prądu stojana oraz informacji o prądzie

- magnesowania. Czy w tej metodzie nie powinien być analizowany model, w którym uwzględnia się charakterystykę magnesowania, co za tym idzie zmienność  $L_m$ ?
2. W jaki sposób dobierano szerokość pętli histerezy w układach sterowania z tymi regulatorami? Czy przyjęto, że w modelu symulacyjnym wykorzystuje się idealny komparator z szerokością pętli histerezy równy zero? Czy autor samodzielnie pisał skrypt takiego regulatora? Warto pokazać schematy programów symulacyjnych, tych układów sterowania (z rozdziału 2.3). Jaki wpływ ma szerokość pętli histerezy na otrzymane wyniki?
  3. Czy modelowano w badaniach symulacyjnych czas martwy przekształtnika częstotliwości? Jaki jest wpływ tego czasu na pracę MDZ w opisywanych strukturach sterowania? O ile w maszynach małej mocy zjawiska te często są pomijane o tyle w przypadku maszyny 2MW czas martwy powinien być wzięty pod uwagę.
  4. Wzory (2.83) i (2.84) przedstawiają transmitancje regulatorów. Czy stosowano układy zapobiegające nasyceniu się układów lub ograniczenia sygnałów wyjściowych regulatorów? W jaki sposób dobierano nastawy regulatorów? Jaka korelacja zachodziła pomiędzy nastawami regulatorów dla maszyny 2MW i 7,5kW?
  5. W badaniach symulacyjnych „Wszystkie algorytmy sterowania zostały zaimplementowane i wykonane w bloku DLL za pomocą kodu języka C.”. Dlaczego? Czy nie dało się tego zrobić z wykorzystaniem elementów blokowych środowiska PSIM?
  6. W przedstawionych badaniach symulacyjnych brak jest przebiegów prędkości generatora. Czy badano działanie takich układów dla zmiennej prędkości (w szerokim zakresie jej zmian)? Takie badania wykonuje się przy testowaniu układów generacyjnych dla turbin wiatrowych, w których prędkość wiatru jest zmienna w czasie.
  7. Rys. 44. przedstawia porównanie zawartości względnej składowej o  $f = 2f_s$ , w sygnałach momentu elektromagnetycznego  $T_{em}$  oraz komponentu  $q_s$  mocy chwilowej stojana metod z regulatorami histerezowymi prezentowanych w



podrozdziale 3.1. Czy autor może jednoznacznie stwierdzić, która metoda sterowania, zdaniem Autora, jest najlepsza i dlaczego? . Z rysunku nie można wyciągnąć jednoznacznych wniosków.

8. Proszę o wyjaśnienie w jaki sposób w badaniach laboratoryjnych sterowano silnikiem indukcyjnym. Czy sterowano silnikiem poprzez wymuszenie momentu? W jaki sposób w warunkach laboratoryjnych zniekształcano napięcia sieciowe?
9. Skąd na rys. 64 takie tętnienia składowych prądu stojana oraz momentu elektromagnetycznego?
10. W badaniach symulacyjnych badano silnik o mocy 2MW, w badaniach laboratoryjnych silnik o mocy 7,5kW. Dlaczego nie wykonano badań symulacyjnych dla takiego samego silnika jak w badaniach eksperymentalnych? Można wtedy dokonać weryfikacji badań i uzyskanych wyników. Jak się ma 2MW do 7.5kW?

#### **4. Uwagi szczegółowe i edytorskie**

W trakcie studiowania rozprawy doktorskiej nasunęły mi się także pytania i komentarze szczegółowe.

1. Na Rys. 3. przedstawiono wymagania sieciowe (Grid Codes) pracy odnawialnych źródeł energii elektrycznej w przypadku zapadu napięcia sieci elektroenergetycznej, do której zostały przyłączone. Jak wyglądają wymagania w Polsce? Warto pokazać te wymagania w szerszym ujęciu europejskim.
2. W Tabeli 1 nie zamieszczono informacji o prędkości. Ta informacja dla drugiego silnika jest podana w Tabeli 2.
3. Rozdział 2.3 powinien stanowić osobny rozdział pracy.
4. Modele lub wybrane modele wykonane w programie PSIM powinny być umieszczone w załączniku rozprawy doktorskiej.
5. Szkoda, że w pracy nie przedstawiono jasno sformułowanej tezy. Można ją jednak wywnioskować na podstawie analizy literaturowej oraz postawionego celu i zakresu pracy przedstawionych w rozdziale 1.

6. W jakim celu na rys 20 i rys. 23 umieszczono bloki transformacji prądów wirnika, skoro w metodach opisywanych w tym rozdziale nie wykorzystuje się tych składowych. Moim zdaniem taki rysunek powinien być powtórzony w rozdziale, w którym Autor opisuje swoje własne (autorskie) metody sterowania. W takiej formie czytelnik musi często wracać do poprzednich rozdziałów aby dokładnie przeanalizować koncepcje sterowania zaproponowane przez Autora.
7. „Rys. 38. Praca MDZ ze zmienną prędkością, sterowanej metodą DTQC [28] przy połączeniu z siecią asymetryczną,  $T_{emref} = - 9,5 \text{ kNm}$ .”. Nie podano w pracy jak zmieniała się prędkość ani nie umieszczono przebiegów zmian tej wielkości.
8. Szkoda, że nie wstawiono załączników z opisem stanowiska, zdjęciami, z programem symulacyjnym.

Rozprawa zawiera nieliczne pomyłki edytorskie oraz błędy stylistyczne. Poniżej podano niektóre z nich.

1. Str. 3. Styl zdania jest niepoprawny: „Prezentowane są tu dwa typy sterowania: jedno wykorzystujące regulatory histerezowe oraz drugie regulatory proporcjonalno – rezonansowe.”. Lepiej napisać: „Prezentowane są tu dwa typy sterowania: jedno wykorzystujące regulatory histerezowe oraz drugie oparte na regulatorach proporcjonalno – rezonansowych.”.
2. Przyimki i spójniki nie powinny stanowić ostatniego elementu w linii.  
W szczególności dotyczy to nowych zdań rozpoczynających się od przyimka (np. str. 8. linia 4 od góry, str. 26. Linia 8 od góry, str. 36. linia 7 od dołu, str. 65. linia 3).
3. Str. 3. Zdanie jest niezrozumiałe „Poruszono wyznaczenie sygnałów referencyjnych używanych w poszczególnych algorytmach, które zapewnia możliwość pracy ze stałym w czasie momentem elektromagnetycznym oraz sinusoidalnym prądem strony stojana.” Czy chodzi o poruszenie zagadnienia wyznaczenia...?

4. Rys. 1. Trafo jest skrótowcem pochodzącym od słowa transformator. Taki skrót nie został wprowadzony wcześniej w tekście pracy więc nie powinien być umieszczony na rysunku w rozprawie doktorskiej.
9. Błędy interpunkcyjne: str. 9. linia 1, w podpisie rys. 3. (przed który), str. 14 linia 4 od dołu, str. 89. linia 3.
10. Str. 14. „Sterowania jednak wymaga dekompozycji...”, powinno być „Sterowanie wymaga jednak dekompozycji...”
11. W części opisującej cel i zakres pracy poszczególne cele rozpoczynają się z dużych liter. Jest to nieprawidłowy zapis, gdyż są to równoważniki zdań, które powinny rozpoczynać się małą literą.
12. W opisie zawartości pracy opisy zawartości poszczególnych rozdziałów powinny zaczynać się od nowej linii lub akapitu.
13. Str. 17. Ostatnie zdanie drugiego akapitu: „...w myśl teorii składowych symetrycznych, gdyż składowa zerowej w takim układzie nie występuje...” powinno być: „... gdyż składowa zerowa w takim układzie...”.
14. Str. 33 linia 5 od dołu. „Wartości w ten sposób otrzymane są odejmowane...”, lepiej napisać: „Wartości otrzymane w ten sposób są odejmowane...”
15. Autor pisze zdania wielokrotnie złożone, z licznymi wtrąceniami, w których nie stosuje lub niewłaściwie stosuje interpunkcję. Lepiej jest opisywać pewne zjawiska za pomocą zdań prostych. Tekst jest wtedy bardziej zrozumiały. Przykład: str. 17 „Schemat obwodowy MDZ w stacjonarnym układzie współrzędnych  $\alpha\beta$  związanym ze stojanem zbudowany zgodnie z powyższymi założeniami jest przedstawiony na Rys. 4.”, str. 19 „Moment elektromagnetyczny wytwarzany przez MDZ można wyznaczyć na wiele sposobów na co pozwala dostęp i możliwość pomiaru prądów obwodu wirnika”.
16. Wzory (2.8) i (2.9) - niewłaściwe justowanie.
17. Dlaczego numeracja wzorów i rysunków jest niezgodna. Wzory numerowane są w każdym rozdziale od cyfry oznaczającej numeru rozdziału, natomiast rysunki, podobnie tabele, są numerowane w sposób ciągły? Jest to nielogiczne.
18. Wzory są integralną częścią zdania. Po wzorach powinny być umieszczone znaki interpunkcyjne.

19. Rys. 7. „...kolorem czerwonym oznaczono składowa przeciwna, niebieskim zgodna, pomarańczowym połączone amplitudy napięć” (składową, zgodną)
20. Str. 24. Styl: „...Opisuje on zależność dla składowej zgodnej napięcia i może być przydatna przy analizie wpływu...”, powinno być „... może być przydatny...”.
21. Po Tabeli 3 powinna być kropka Tabela 3.
22. Rys. 35. Praca MDZ ze zmienną prędkością sterowanej metodą DPC -powinno być sterowaną metodą DPC.
23. Zły zapis literatury. Po nazwisku nie stawia się przecinka a potem imienia, np.:  
 Boldea, **Ion**. 2016. Electric Generators Handbook, Variable Speed Generators. Second Edi. Taylor & Francis Group.  
 Cheng, **Peng**, Heng Nian, Chao Wu, i Z. Q. Zhu. 2017. „Direct Stator Current Vector Control Strategy of DFIG Without Phase-Locked Loop During Network Unbalance”. IEEE Transactions on Power Electronics 32 (1): 284–97. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2533638>.  
 Dybkowski, **Mateusz**, Teresa Orłowska-Kowalska, Marian P. Kazmierkowski, i Dariusz Stando. 2010. „Sterowanie Układu Napędowego z Silnikiem Indukcyjnym w Zastosowaniach Trakcyjnych”. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pojazdów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej 64 (30): 139–50.  
 Iwanski, **Grzegorz**, Piotr Pura, Tomasz Luszczuk, i Mateusz Szypulski. 2013. „Harmonics and Unbalance Compensation of The Generated Voltage in a Standalone DFIG”. W 2013 8th International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER 2013. <https://doi.org/10.1109/EVER.2013.6521627>.  
 Iwanski, **Grzegorz**, Tomasz Luszczuk, Piotr Pura, i Mateusz Szypulski. 2016. „Indirect Torque and Stator Reactive Power Control of Doubly Fed Induction Machine Connected to Unbalanced Power Network”. IEEE Transactions on Energy Conversion 31 (3): 1202–11. <https://doi.org/10.1109/TEC.2016.2557959>.
24. Lista użytych skrótów i symboli: wektory piszemy **boldem**

## 5. Ocena rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Piotra Pury ma charakter analityczno-eksperymentalny. Dotyczy trudnego i ważnego aspektu związanego z elektrotechniką i napędem elektrycznym. Autor wykazał się dobrą znajomością tej tematyki. Osiągnął założone przez siebie cele, posługując się teorią układów sterowania wektorowego oraz techniką symulacji komputerowej dla generatorów współpracujących z siecią asymetryczną. Ponadto zrealizował i przebadał model laboratoryjny generatora z wykorzystaniem analizowanych metod sterowania przekształtnikowego oraz przy wykorzystaniu danych pochodzących z wykonanych obliczeń analitycznych.

Redakcja rozprawy doktorskiej jest dosyć staranna, a stosowana terminologia jest prawidłowa. Praca stanowi dojrzały - osobisty - dorobek Autora.

Przedstawione wyniki w sposób istotny mogą przyczynić się do dalszego rozwoju teorii i praktyki projektowania układów sterowania dla MDZ współpracujących z siecią asymetryczną.

W szczególności za **osiągnięcia własne Autora uznaje:**

- Opracowanie sposobu wyznaczania modułu strumienia wirnika dla metody DTC z regulatorami histerezowymi.
- Opracowanie bezpośredniego algorytmu sterowania momentem i skalarem pomocniczym w wersji z regulatorami histerezowymi i liniowymi.
- Implementację algorytmu bezpośredniej kontroli mocy w przypadku sieci symetrycznej jak i asymetrycznej, zapewniająca pracę ze stałym momentem elektromagnetycznym jak i sinusoidalnym prądem stojana.
- Uwzględnienie informacji o aktualnym prądzie wirnika w sygnale wyznaczania składowych mocy i momentu, w celu zapewnienia stabilności w przypadku DPCPWM oraz skrócenia stanów przejściowych w przypadku DPCPWM oraz DTXCPWM.

## 6. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa **Mgr inż. Piotra Pury pt. " Bezpośrednie metody sterowania maszyny dwustronnie zasilanej w warunkach sieci asymetrycznej"**, niezależnie od uwag krytycznych podanych w punktach 2, 3 i 4 niniejszej recenzji, stanowi dobry, samodzielny wkład doktoranta w nauki techniczne (aktualnie nauki *inżynieryjno-techniczne*), w szczególności w zagadnienia związane z przekształtnikowymi metodami sterowania dla maszyny dwustronnie zasilanej współpracującej z siecią asymetryczną. Uzyskane rezultaty mają istotne znaczenie zarówno poznawcze jak i aplikacyjne i mogą być wykorzystane w dalszych pracach badawczych w energoelektronice i energetyce odnawialnej. Praca stanowi dowód na opanowanie teorii energoelektroniki, automatyki napędu, maszyn elektrycznych, metod symulacji komputerowej i sterowania w czasie rzeczywistym oraz świadczy o dojrzałości naukowej Autora.

W związku z powyższym stwierdzam, że **przedstawiona praca doktorska odpowiada wszystkim warunkom określonym przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytułach naukowych** w odniesieniu do dyscypliny **automatyka, elektronika i elektrotechnika (zawierającą dyscyplinę elektrotechnika)** i stawiam wniosek o jej dopuszczenie o publicznej obrony.

Dyktant: Mateusz