

Wrocław, 5.06.2015

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

OPINIA

o rozprawie doktorskiej mgr inż. Błażeja Jakubowskiego
pt. „**Analiza przekształtnikowych układów sterowania
autonomicznym generatorem indukcyjnym**”

opracowana na zlecenie

Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Wrocławskiej

1. Ocena tematyki rozprawy

Rozprawa mgr inż. Błażeja Jakubowskiego poświęcona jest zagadnieniom analizy przekształtnikowych układów sterowania autonomicznym generatorem indukcyjnym. Tematyka związana z generatorami AC jest obecnie bardzo mocno rozwijana zarówno w kraju jak na świecie. Problem związany z emisyjnością dwutlenku węgla przez tradycyjne źródła energii elektrycznej doprowadziły do rozwoju „czystych” metod jej pozyskiwania. Wiele ośrodków naukowych prowadzi badania możliwości wykorzystania generatorów PMSG oraz indukcyjnych w elektrowniach wiatrowych oraz wodnych o różnych mocach. Coraz częściej pojawiają się także prace, w których zwraca się uwagę na potrzebę realizacji nisko kosztowych układów generatorów, które mogły by być wykorzystywane w krajach rozwijających się lub w miejscach trudnodostępnych. Zwraca się szczególną uwagę na rozwiązania, które nie współpracują z siecią i mają możliwość współbieżnej pracy z układami fotowoltaicznymi. Jednak Autor rozprawy słusznie zauważa, że ciągle istnieje potrzeba analizy przekształtnikowych układów sterowania autonomicznym generatorem indukcyjnym z wykorzystaniem lub bez dodatkowej baterii kondensatorów.

Jednym z powodów dużego zainteresowania maszynami indukcyjnymi pracującymi jako generatory są między innymi niskie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne oraz stosunkowo łatwa możliwość synchronizacji generatora indukcyjnego przeznaczonego do współpracy z siecią elektroenergetyczną. Pomimo tego, że w układach o dużych mocach częściej stosowane są generatory indukcyjne pierścieniowe, można zauważyć, że coraz większym zainteresowaniem cieszą się również generatory indukcyjne klatkowe. Ich prostota konstrukcja, niezawodność, niskie koszty, możliwość pracy w trudnych warunkach środowiskowych i odporność na zwarcia w obwodach obciążenia wpływa bezpośrednio na wzrost zainteresowania tymi maszynami w układach generacji energii o małej i średniej mocy. Generatory te mogą pracować przy oddawaniu energii elektrycznej do sieci lub w układach autonomicznych.

Autor podjął się zadania przeprowadzenia analizy układów autonomicznych generatorów indukcyjnych pracujących z trójfazową baterią kondensatorów wzbudzenia oraz wykonał badania układów sterowanych przy wykorzystaniu metody skalarnej oraz wybranych metod wektorowych. Podjął próbę wykonania syntezy układów sterowania i doboru parametrów regulatorów układu.

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 generatorem indukcyjnym.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Błażeja Jakubowskiego obejmuje 172 strony, zawiera wykaz oznaczeń oraz spis literatury (cytowanych jest 115 prac, w tym 5 Autora rozprawy). Pracę podzielono na 10 rozdziałów, z czego jeden stanowi załącznik opisujący stanowisko badawcze i układy pomiarowe.

Autor sformułował w rozprawie następującą tezę: ***„Zastosowanie przekształtnikowych metod sterowania autonomicznym generatorem indukcyjnym klatkowym zapewnia dokładne sterowanie napięciem generatora oraz stabilną pracę w szerokim zakresie zmian obciążeń i prędkości generatora.”***

Autor konsekwentnie dąży do udowodnienia postawionej przez siebie tezy posługując się metodami analitycznymi i symulacji komputerowej, a także badań eksperymentalnych jako sposobu ich weryfikacji.

W rozdziale pierwszym zawarto wstęp, omówienie stanu zagadnienia, 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 tezy rozprawy. Teza sformułowana jest w sposób prawidłowy, Autor w pracy konsekwentnie dąży do jej udowodnienia.

W rozdziale 2 opisano model matematyczny maszyny indukcyjnej zarówno z liniowym jak i nieliniowym obwodem magnetycznym. Przedstawiono metodę analizy układów z autonomicznymi generatorami indukcyjnymi w stanach statycznych.

Na podstawie przeprowadzonej analizy układu w stanach statycznych wyznaczono zależności określające warunki konieczne dla wystąpienia procesu samowzbudzenia generatora indukcyjnego klatkowego. Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych procesów samowzbudzenia generatora dla stanów biegu jałowego oraz stanów obciążenia autonomicznego generatora indukcyjnego, dla różnych wartości parametrów układu i prędkości kątowych wirnika generatora. Autor założył, że układ obciążany był wyłącznie poprzez zmianę wartości rezystancji R_o , pominał indukcyjności w obwodzie AC i DC. W rozdziale przedstawiono także metody sterowania amplitudą napięcia stojana generatora poprzez sterowanie mocą bierną dostarczaną z trójfazowej baterii kondensatorów wzbudzenia.

W rozdziale trzecim opisano możliwości wykorzystania przekształtnikowych układów do sterowania autonomicznym generatorem indukcyjnym z zastosowaniem trójfazowej baterii kondensatorów wzbudzenia oraz bez tego rodzaju baterii. Przedstawiono model matematyczny przekształtnika AC/DC z dynamicznym źródłem napięcia stałego w obwodzie DC.

Wyniki i analizy przedstawione w rozdziałach 2 i 3 stanowią dobrą wskazówkę przy projektowaniu generatorów indukcyjnych ze wzbudzeniem kondensatorowym oraz ze wzbudzeniem przekształtnikowym i pozwalają na wybór odpowiedniej metody do konkretnej aplikacji przemysłowej.

Rozdział czwarty dotyczy syntezy układu regulacji z regulatorem proporcjonalno całkującym. Przedstawiona analiza, niesłusznie nazwana kryterium optymalizacji, umożliwia dobór nastaw regulatora przy założonej maksymalnej wartości przeregulowania odpowiedzi skokowej układu regulacji. Nie podano

powodu, dla którego Autor nie zdecydował się na wykorzystanie powszechnie znanych metod doboru nastaw regulatorów (kryterium modułu i symetrii). Wyniki tego rozdziału można jednak traktować jako wskazówkę przy projektowaniu układów regulacji automatycznej o określonych wartościach przeregulowania i czasu ustalenia. Należy jednak pamiętać o istotnych uproszczeniach założonych na wstępie przez Autora.

Kolejne rozdziały (piąty, szósty i siódmy) zostały poświęcony analizie i syntezie przekształtnikowych układów regulacji amplitudy napięcia stojana autonomicznego generatora indukcyjnego bez zastosowania trójfazowej baterii kondensatorów wzbudzenia. Rozdziały te stanowią najważniejszą część rozprawy doktorskiej. Na szczególną uwagę zasługują zaprezentowane wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych. Przedstawiono tu również analizę i syntezę układu regulacji napięcia w obwodzie prądu stałego przekształtnika AC/DC. Pewne wątpliwości budzi metoda wyznaczania transmitancji operatorowej oraz przyjęte w niej założenia upraszczające. Pominięcie indukcyjności w obwodach AC i DC oraz zaniedbanie transmitancji przekształtnika może wprowadzać pewne błędy podczas analizy badanych układów w stanach dynamicznych.

Badania analityczne zostały zweryfikowane przez Autora na stanowisku laboratoryjnym. W badaniach rozpatrywano stany pracy jałowej generatora przy zmianach zadanych wartości amplitudy napięcia stojana generatora oraz przy zmianach zadanych wartości napięcia w obwodzie DC przekształtnika AC/DC. Rozpatrywano również stany obciążenia generatora indukcyjnego z odbiornikiem trójfazowym przyłączonym bezpośrednio do obwodu stojana generatora oraz z odbiornikiem przyłączonym do obwodu prądu stałego przekształtnika AC/DC. Niestety założono, że zmianie ulegają jedynie wartości rezystancji, co wpływa na pewne różnice pomiędzy badaniami analitycznymi i eksperymentalnymi. Autor w rozdziałach opisał również badania układu przy zmianach prędkości kątowej wirnika generatora indukcyjnego.

W rozdziale piątym przedstawiono metodę sterowania skalarne autonomicznym generatorem indukcyjnym. W rozdziale szóstym przedstawiono metodę wektorową sterowania polowo-zorientowanego generatorem indukcyjnym z orientacją względem wektora strumienia sprzężonego wirnika. Do estymacji strumienia wirnika wykorzystano powszechnie znany model prądowy maszyny indukcyjnej. W rozdziale

siódmym przedstawiono z kolei metodę wektorową sterowania polowo-zorientowanego generatorem indukcyjnym z orientacją względem wektora strumienia sprzężonego stojana.

Dla wszystkich układów sterowania przedstawiona została obszerna synteza regulacji. Pewne wątpliwości budzą zastosowane uproszczenia i sposób wyznaczania transmitancji opisującej układ regulacji napięcia w obwodzie pośredniczącym. Ważnym elementem rozdziałów 6 i 7 jest część związana analizą i syntezą układu służącego do odsprzęgnięcia torów regulacji składowych wektora prądu stojana.

W rozdziale ósmym przedstawiono opis i analizę przekształtnikowych metod sterowania autonomicznym generatorem indukcyjnym z zastosowaniem trójfazowej baterii kondensatorów wzbudzenia w obwodzie stojana generatora. Jako metodę sterowania wykorzystano metodę sterowania polowo-zorientowanego z orientacją względem wektora strumienia sprzężonego wirnika oraz metodę sterowania chwilową wartością mocy czynnej i biernej generatora. W rozdziale tym do wyznaczenia nastaw regulatora napięcia w obwodzie pośredniczącym zastosowano kryterium symetrii, przy wykorzystaniu założeń upraszczających z poprzednich rozdziałów. Przedstawiono wyłącznie wyniki badań symulacyjnych.

Rozdział dziewiąty jest w zasadzie załącznikiem, w którym przedstawiono schematy wykorzystywanych do badań eksperymentalnych układów z autonomicznymi generatorami indukcyjnymi. W rozdziale tym podano również parametry i dane znamionowe maszyn i urządzeń wykorzystywanych w badaniach. Przedstawiono opisy układów oraz przyjęte założenia, dla których wykonano badania symulacyjne oraz eksperymentalne. Szkoda, że Autor nie opisał bardziej szczegółowo prototypowego układu przekształtnikowego, sposobu jego sterowania, zdjęć rzeczywistego stanowiska.

Rozdział dziesiąty zawiera podsumowanie pracy oraz prawidłowe wnioski.

3. Uwagi ogólne

Tematyka związana z generatorami AC, w tym także generatorami indukcyjnymi, jest zagadnieniem intensywnie rozwijanym zarówno w kraju jak i na świecie. Podstawową zaletą generatorów indukcyjnych jest ich niewielka cena oraz prosta konstrukcja. Ważnym zagadnieniem, rozwijanym równoległe do systemów energetyki odnawialnej, są autonomiczne generatory. Istnieje wiele możliwości

sterowania tymi maszynami, które mają istotny wpływ na jakość regulowanego sygnału. Dlatego jest godnym podkreślenia, że Autor opiniowanej rozprawy doktorskiej podjął się tej złożonej i trudnej tematyki, sprawdził możliwości wykorzystania generatora indukcyjnego ze wzbudzeniem kondensatorowym, przekształtnikowym oraz z wykorzystaniem skomplikowanych metod wektorowych. Wszystkie układy zostały zweryfikowane na stanowisku badawczym.

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

1. W rozdziale 2 przedstawiono model matematyczny maszyny indukcyjnej z uwzględnieniem nieliniowości charakterystyki magnesowania. Do jej aproksymacji wykorzystano zależność (2.6). Nie podano w jaki sposób wyznaczone zostały współczynniki A, B, C. Czy sprawdzane były inne sposoby modelowania nieliniowości charakterystyki magnesowania?
2. Na podstawie przebiegu z Rys. 2.11 Autor stwierdza, że „Charakterystyki pokrywają się z dużą dokładnością ...”

Z przebiegów przedstawionych na rysunku można odczytać, że błąd pomiędzy wyznaczonymi charakterystykami dla układów z uproszczeniami i bez uproszczeń wynosi od 50 V dla 250 rad/sek. do 75 V dla 154 rad/sek. co stanowi odpowiednio około 12% i 100% wartości odczytanych z charakterystyk 4 i 6, 3 i 5. Jakie błędy są dopuszczalne przy projektowaniu tego typu modeli i jakie założenia przyjął Autor?

3. W rozdziale 3 przedstawiono model matematyczny układu przekształtnikowego. W układzie wykorzystano modulator wektorowy SVM, jednak nie przedstawiono jego matematycznej postaci i sposobu wyznaczania czasów załączeń tranzystorów. Jest to o tyle istotny problem, że w całym rozdziale Autor nie przytoczył ani jednej pozycji literatury, z której korzystał przy opracowywaniu układu modulacji. Jeśli jest to algorytm Autorski tym bardziej wskazane byłoby przedstawienie modelu tego układu.

Zaznaczono, że pomija się czas martwy przekształtnika. O ile takie założenie jest słuszne przy analizie symulacyjnej to w badaniach laboratoryjnych konieczne wydaje się kompensowanie tego czasu. Czy Autor kompensował czas martwy przekształtnika, jeśli tak, to jaki algorytm był wykorzystany? Autor wspomina w pracy (Str. 51 (3.15)), że nie możliwa jest praca

w obszarze nadmodulacji i w trybie pracy blokowej. Z równania (3.15) wynika, że dla $m_d=1$ układ pracuje w trybie „six step mode”. Czy nie lepiej było od razu ograniczyć układ do wartości m_d wynikającej z pracy w obszarze liniowym? Czy modulator sam w sobie nie ma ograniczenia wynikającego ze sposobu wyznaczania czasów załączeń poszczególnych tranzystorów?

4. W celu wyeliminowania stanów nasycenia się regulatorów zastosowano cykliczne załączanie poszczególnych regulatorów. Dlaczego nie zastosowano układów z systemem anty-wind-up? Jaki regulator (regulatory) zastosowano w badaniach symulacyjnych i eksperymentalnych?

Czy sprawdzano działanie układu sterowania generatora z innymi postaciami regulatora niż ten opisany w rozdziale 4 (4.1)? Czy i jak ograniczano sygnał wyjściowy regulatora?

5. Rozdział 4 zatytułowano „Kryterium optymalizacji układów regulacji”. Co optymalizowano, jaka była funkcja celu, jak wyznaczano minimum funkcji celu? Dlaczego nie zastosowano powszechnie znanej metody kryterium modułu i symetrii, skoro większość obiektów analizowanych przez Autora wyrażona jest jako szeregowe połączenie obiektów inercyjnych pierwszego rzędu i/lub członu całkującego (tak jak zrobiono w rozdziale 8)? Jak zmieniają się nastawy parametrów przy zmianach parametrów schematu zastępczego generatora indukcyjnego? Czy sprawdzono wpływ nieliniowości charakterystyki magnesującej na zmienność parametrów regulatorów?

6. Pewne wątpliwości budzi fakt, że Autor przyjął w syntezie przedstawionej w rozdziale 2, 3, 4 i dalszych, że obiekt ma transmitancję pierwszego rzędu. Pominięto transmitancję przekształtnika, co nie zawsze jest słuszne (synteza obwodu regulacji prądu). Dlaczego założono, że nie uwzględnia się indukcyjności w obwodzie trójfazowym i w obwodzie DC. W stanach dynamicznych ten parametr musi być uwzględniany. Czy tak daleko idące uproszczenia mogą być przyczyną stosunkowo dużych różnic pomiędzy wynikami symulacyjnymi i eksperymentalnymi w stanach dynamicznych? Takie same założenia przyjęto we wszystkich rozdziałach pracy związanych z syntezą regulatorów dla różnych struktur sterowania.

7. Na Rys. 6.11 przedstawiono odpowiedzi układu na wymuszenie skokowe. W badaniach symulacyjnych założono, że analizuje się system przy

wymuszeniu skokiem o wartości 1V (tak samo założono w analizie z Rys. 6.16, 7.12). Czy taka wartość wymuszenia nie jest za mała, czy przy większych wymuszeniach skokowych (0-450V) różnice pomiędzy modelami pełnym i uproszczonym nie byłyby większe? W eksperymencie układ testowany jest przy innym wymuszeniu. Z czego wynikają różnice w stanach dynamicznych z Rys. 6.11?

8. Wątpliwości recenzenta budzi sposób wyznaczenia transmitancji operatorowej (5.11) opisującej zależność pomiędzy wartością napięcia w obwodzie pośredniczącym U_d a wartością pulsacji poślizgu. Autor wyznacza tę zależność zakładając, że napięcie w obwodzie pośredniczącym U_d w równaniu opisującym wartość prądu I_d jest stałe – znamionowe (jest parametrem) a nie jest zmienną stanu. Przy tym założeniu wyznacza aktualną wartość napięcia w obwodzie pośredniczącym z innej zależności. Ten sam sygnał traktuje już nie jako parametr lecz jako zmienną stanu układu. Na jakiej podstawie Autor przyjął takie założenie, czy transmitancja nie powinna być wyznaczona wokół punktu pracy? To samo dotyczy równania (6.41), (7.35), (8.12). Zgodnie z tą analizą wynika, że parametry regulatora PI powinny zależeć od napięcia U_d (np. równanie 5.12). Autor założył (niesłusznie), że wartość ta jest stała – znamionowa. Co w przypadku gdy wartość zadana napięcia w obwodzie pośredniczącym jest różna od wartości znamionowej? Podobnie, parametry regulatora zależą od aktualnej wartości R_d , która może ulegać zmianom. Cała analiza wskazuje jednoznacznie na celowość stosowania w układach autonomicznych adaptacyjnych regulatorów. Czy Autor testował takie układy zamiast klasycznego regulatora typu PI?
9. W pracy opisano kilka metod sterowania dla autonomicznego generatora indukcyjnego. Opisano ich syntezę i dokładną analizę w różnych warunkach pracy. Nie przedstawiono jednak analizy porównawczej, która pozwoliłaby na wyciągnięcie wniosków, która z analizowanych metod sterowania jest lepsza i ewentualnie dlaczego.

4. Uwagi szczegółowe i edytorskie

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

1. Str. 8 wiersz 3. Napisano, że konieczne jest uwzględnianie nieliniowości charakterystyki magnesowania przy rozpatrywaniu układów sterowania generatorów indukcyjnych, jednak w opisie i podczas realizacji sterowania wektorowego (rozdziały 6-8) założono stałość reaktancji magnesującej na znamionowej wartości.
2. W rozdziale 2.2 Autor sprowadza parametry reaktancyjne schematu zastępczego do parametrów określonych przy stałej wartości pulsacji stojana, jednak nigdzie w pracy (w tym w rozdziale 9) nie podaje ich wartości. Zdaniem recenzenta byłoby to wskazane.
3. Testy i badania przeprowadzone były wyłącznie przy obciążeniu rezystancyjnym generatora. Czy takie założenie nie wpływa w sposób istotny na różnice pomiędzy obliczeniami i wynikami eksperymentalnymi? Wskazane byłoby przeprowadzenie analizy wpływu indukcyjności L_0 na przebiegi charakterystyk (Rys. 2.9, 2.10, 2.11, 2.14).
4. Str. 77. W badaniach eksperymentalnych (Tabela 5.1) wartość K_{rd} była zdecydowanie mniejsza niż w obliczeniach (rozdział 5.3), dlaczego?
5. Str. 78. Czy rozbieżności na Rys. 5.7 przy małych wartościach zadanych u_d mogą wynikać z założenia, że $u_d = \text{const} = 450\text{V}$, czy z faktu, że w analizie nie uwzględniono indukcyjności?
6. Str. 78 akapit 2 oraz str. 79 akapit 1 od dołu. Napisano, że za błędy odpowiada nieprawidłowa „estymacja parametrów maszyny”. Czy faktycznie rezystancja wirnika była estymowana, czy Autor miał na myśli błędną identyfikację parametrów schematu zastępczego generatora indukcyjnego?
7. Rys. 5.9. Przedstawiono wpływ zmian obciążenia w obwodzie trójfazowym. Czy zmieniano tylko rezystancję, jeśli tak to z czego wynikało takie założenie?
8. Str. 85. Tytuł rozdziału 6.2 wskazuje, że prąd stojana i strumień maszyny mogą być traktowane nie jako zmienne stanu lecz także jako parametry, tytuł rozdziału powinien być inaczej sformułowany, gdyż prąd i strumień są zmiennymi stanu.
9. W rozdziale 6.9 pominięto transmitancję filtrów, przy takim podejściu otrzymano transmitancję inercyjną pierwszego rzędu. Zdaniem recenzenta są to zbyt daleko idące uproszczenia.

10. Str. 113 Rys. 6.19. Po trzecim cyklu załączenia momentu obciążenia pojawia się błąd pomiędzy badaniami symulacyjnymi i eksperymentalnymi. Z czego wynika ten fakt? Skąd tak duże rozbieżności w przebiegach częstotliwości (to samo rys. 6.20, 6.22)? Czy przyczyną jest nieuwzględnienie indukcyjności w obwodzie trójfazowym? Różnica wynosi aż 2 Hz (rys. 6.20b).
11. Str. 120. W estymatorze strumienia zastosowano filtr górnoprzepustowy w celu wyeliminowania składowej stałej prądu stojana. Czy Autor wykonał niwelację offsetów i szumów pomiarowych, w jaki sposób dobrano stałą czasową filtra T_{ψ_f} i wzmocnienie K_{ψ_f} ?
12. Str. 124 Rys. 7.6. Kolorem zielonym zaznaczono tory podlegające odsprzęgnięciu. Przy sterowaniu opisanym w tym rozdziale nie wykonywano odsprzęgania w torze i_{sx} więc nie potrzebnie zaznaczono te tory kolorem zielonym.
13. Str. 125. Transmitancje (7.23) są słuszne jedynie przy założeniu, że układ jest pobudzany tylko jednym, wybranym, sygnałem. Inne sygnały są równe zero. Takie założenie może być przyjęte przy analizie układu opisanego w formie przyrostowej.
14. W rozdziale 7.5 pominięto w analizie transmitancję przekształtnika twierdząc, że jego stała czasowa jest dużo mniejsza od stałej czasowej obwodu regulacji. $T_{sy}=0.0059$ a T_p dla 1kHz to 0.001 więc nie można tej transmitancji pominąć w przypadku analizy wewnętrznych torów regulacji prądu.
15. Str. 128. W jaki sposób wyznaczono parametry schematu zastępczego silnika indukcyjnego?
16. Str. 137 Rys. 7.15 i 7.16. Pominięto wewnętrzną pętlę regulacji strumienia stojana oraz transmitancję przemiennika częstotliwości (wątpliwości budzi synteza pętli regulacji strumienia stojana).
17. Czy badania symulacyjne z rozdziału 8 były weryfikowane na stanowisku laboratoryjnym?
18. Co oznacza stwierdzenie, że czas próbkowania wynosił „około” 50 μ s? Czy stosowano multisampling? Jeśli tak to w jakich obwodach?
19. Na str. 40 i w innych miejscach pojawia się pojęcie „prędkość graniczna” (str. 40 akapit 1 wiersz 6). Pojęcie to nie zostało dokładnie wyjaśnione. Jak wyznaczyć tę wartość (z pracy można wywnioskować, że jest to około 150

- rad/sek.). Czy możliwe jest pokazanie wyników związanych ze zwarciem obwodu stojana w celu udowodnienia tezy ze str. 40?
20. Str. 62 akapit 4 „W celu określenia warunków optymalizacji...” W pracy nie wykonywano optymalizacji a jedynie analizowano metodykę wyznaczania parametrów regulatorów typu PI. Punkty optymalne są to punkty otrzymane dla założonych wartości przeregulowania i czasu narostu. Przeregulowanie wynosi 11% co nie do końca można uznać za „optymalne”.
 21. Na Rys. 6.7 przedstawiono wpływ zmian parametrów maszyny indukcyjnej na właściwości dynamiczne układu regulacji prądu stojana. Według recenzenta badania te nie do końca są analizą wrażliwości, gdyż nie uwzględnia się w nich estymatora zmiennych stanu.
 22. Dlaczego w rozdziale 7.9 nie pominięto transmitancji przekształtnika, tak jak robiono to w poprzednich rozdziałach? Wyniki przedstawione na Rys. 7.14 pokazują jednoznacznie, że nie powinno się zaniedbywać tej transmitancji gdyż obiekt ma charakter oscylacyjny a nie inercyjny. Autor twierdzi, że różnica pomiędzy obliczeniami i eksperymentem jest efektem błędnej identyfikacji rezystancji stojana. Budzi to moje wątpliwości, gdyż parametr ten jest łatwy do zmierzenia.
 23. Badania eksperymentalne ilustrujące działanie układów podczas procesów polegających na skokowej zmianie obciążenia (w torze AC oraz DC) przekształtnika AC/DC pokazują, że czas regulacji U_d po zmianie momentu zdecydowanie różni się od tego, który otrzymano podczas analizy syntezy układów regulacji automatycznej ($t=1$ sek. Rys. 7.19 i 7.20).

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

1. Str. 4- 5. Wykaz ważniejszych oznaczeń – nie podano jednostek.
2. Str. 4. Symbolem s oznaczono operator Laplace’a oraz poślizg maszyny indukcyjnej, co może wprowadzać zamieszanie podczas analizy układów regulacji automatycznej opisanej w rozdziałach 4-9.
3. Str. 4. s , z napisano bieguny i zero – powinno być bieguny i zera (patrz rozdział 6, 7, 8 (np. str. 109 Tabela 6.3)).

4. Str. 6. Wykaz skrótów – brak podania rozwinięcia skrótu SVM – Space Vector Modulation.
5. Str. 6. Brak skrótu DFIG pojawiającego się na str. 7 wiersz 7.
6. Str. 7 wiersz 7. Jest [15 ,41 , 42 ,113] powinno być [15, 41, 42, 113].
7. Str. 7 akapit 4. „... układy autonomiczne generatorów indukcyjnych...” lepiej napisać „...autonomiczne układy generatorów indukcyjnych...”.
8. Autor rozprawy ma tendencje do pozostawiania przyimków w końcu linii, co według recenzenta jest niepoprawne. W szczególności uwagę zwracają przyimki rozpoczynające nowe zdanie, a pozostawione na końcu linii (np. str. 7 akapit 4 wiersz 7, str. 9 akapit 5 wiersz 3, akapit 7 wiersz 2, str. 10 akapit 2 wiersz 4 itd...).
9. Str. 7 akapit 4. „W układach przy współpracy z siecią...” lepiej napisać „W układach współpracujących z siecią...”.
10. Str. 9 akapit 1. „W tej pracy układy...” lepiej napisać „ W niniejszej pracy...”.
11. Str. 9 akapit 2. „...są coraz częściej...” lepiej napisać „...coraz częściej są...”.
12. Str. 9 akapit 2. nagminne powtórzenia słowa „układów” (4 razy w dwóch zdaniach).
13. Str. 12 akapit 1 wiersz 7. Podane zdanie nie powinno znaleźć się w celu rozprawy gdyż odnosi się ono do wniosków ze zrealizowanej pracy.
14. Str. 18 Rys. 2.2. Błędne formatowanie podpisu rysunku.
15. Str. 18 równanie (2.9). W tekście powyżej wzoru Autor odnosi się do wektorów, a w zależności są moduły wektorów.
16. Str. 18. Równanie (2.9) ma inną postać niż odpowiadające mu równanie (2.5) i (2.6)
17. Str. 18 Rys. 2.2 b). Oś y L [H] – powinno być Lm [H]?
18. Str. 26 Rys. 2.10. W podpisie powinno być napisane, że rezystancje zmieniano w zakresie 1000 – 0.01 Ω aby podpis był zgodny ze wskazaniem na wykresie (zwiększanie obciążenia to zmniejszanie rezystancji).
19. Str. 30 akapit 3 wiersz 3, str. 57 akapit 1 wiersz 4, str. 91 akapit 3 wiersz 6, str. 111 akapit 3 - interpunkcja.
20. Str. 30. Nie jest jasne z jakich równań wyprowadzono równanie (2.31).
21. Str. 30 – str. 31. W równaniu (2.31) s- operator Laplace’a, w (2.32) pierwiastek równania charakterystycznego a jeszcze dalej poślizg i/lub

- operator Laplace'a. Taki zapis jest niezrozumiały i wprowadza problemy przy czytaniu rozprawy.
22. Str. 40 akapit 3 linia 3. „waha się” – żargon lepiej napisać oscyluje, zmienia się...
 23. Str. 41 wiersz 5 od dołu. „...w pracy tej...” powinno być „... w pracy...”
 24. Str. 44 -45. Autor zamiennie stosuje tekście zapis skalarny i wektorowy co jest niepoprawne.
 25. Str. 45 pierwszy akapit od dołu. Niepotrzebne powtórzenie „Schemat takiego układu...”.
 26. Str. 46 akapit 1 wiersz 5. $T_m=1/f_m$ – indeks m stosuje się przy oznaczeniu mechanicznej stałej czasowej lepiej stosować oznaczenie (T_v).
 27. Str. 47 akapit 4 wiersz 2. „kluczami” – żargon (klucz górny, klucz dolny)
 28. Str. 48. Wzór (3.10) jest powtórzeniem ze str. 41.
 29. Str. 48 po równaniu (3.10): „częstotliwość modulacji modulatora” – lepiej „częstotliwość pracy...”.
 30. Str. 49 akapit 1: „kata” powinno być „kąta”.
 31. Str. 56. Stan quasi ustalony – brak wyjaśnienia (stan quasi statyczny?).
 32. Str. 62 akapit 1 linia 3. Autor nazywa miejsca zerowe licznika transmitancji operatorowej zerami , a miejsca zerowe mianownika biegunami. W akapicie jest pomyłka: „...układ ten posiada dwa zera...” powinno być bieguny.
 33. Str. 69 akapit 5: „...modulator SVM steruje łącznikami...” modulator nie steruje, a jedynie wyznacza sygnały sterujące.
 34. Str. 72. W równaniach (5.1)-(5.4) s oznacza poślizg, a na Rys. 5.2 tym symbolem oznaczono operator Laplace'a.
 35. Str. 71 Rys. 5.2. Błędny opis rysunku. Pierwsza część schematu przedstawia równanie (5.8) a nie (5.9).
 36. Str. 75 podpis z Rys. 5.5, str. 102 Rys. 6.11 „Obwód DC nieobciążony” jest niewłaściwy, gdyż $P_d=0,2P_{sN}$, to samo Str. 134 Tabela 7.2 „Generator nieobciążony” - $R_d=800\Omega$.
 37. Str. 101. Preregulowanie podane jest w jednostkach względnych a już na str. 103 w [%].

38. Str. 103 Tabela 6.2. Wszystkie wartości przeregulowania powinny być zapisane z tą samą dokładności co do drugiego miejsca po przecinku $y_p=11,02\%$.
39. Str. 105 akapit 2 od dołu: „znamionowej prędkości kątovej synchronicznej” lepiej napisać „znamionowej synchronicznej prędkości kątovej”.
40. Rys. 7.1. Źle oznaczono kąt transformacji $xy/\alpha\beta$.
41. Falownik – żargon lepiej przemiennik częstotliwości.
42. Str. 164. „... zastosowano procesor sygnałowy TMS320F240 firmy dSpace, „typ 1103”” – powinno być „...zastosowano układ szybkiego prototypowania firmy dSpace typ 1103 z procesorem TMS320F240...”.
43. Str. 165 akapit 1. Zwrot „tej maszyny” jest zbędny.

5. Ocena rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska Pana mgr inż. Błażeja Jakubowskiego ma charakter analityczno-eksperymentalny. Dotyczy trudnego i ważnego aspektu związanego z elektrotechniką i napędem elektrycznym. Autor wykazał się dobrą znajomością tej tematyki. Osiągnął sformułowaną przez siebie tezę, posługując się teorią układów sterowania skalarne, wektorowe oraz techniką symulacji komputerowej dla autonomicznych generatorów indukcyjnych klatkowych. 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 bardzo staranna, a stosowana terminologia jest prawidłowa. Praca stanowi dojrzały - osobisty - dorobek Autora.

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

- analizę stanów pracy autonomicznego generatora indukcyjnego z zastosowaniem opracowanych modeli matematycznych,
- przeprowadzenie analizy warunków wzbudzenia autonomicznych generatorów indukcyjnych oraz opracowanie metody analizy i wyznaczania przebiegów elektromagnetycznych podczas procesu wzbudzenia autonomicznego generatora indukcyjnego,

- analizę klasycznych oraz przekształtnikowych układów sterowania amplitudą napięcia stojana autonomicznego generatora indukcyjnego, w szczególności metod wektorowych, wykonanie badań symulacyjnych i eksperymentalnych,
- wyznaczenie wpływu zmian prędkości wirnika generatora indukcyjnego oraz wpływu zmian rezystancji w obwodzie DC przekształtnika AC/DC na właściwości dynamiczne wybranych układów regulacji,
- opracowanie koncepcji i stanowiska badawczego.

6. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa **Mgr inż. Błażeja Jakubowskiego pt. "Analiza przekształtnikowych układów sterowania autonomicznym generatorem indukcyjnym"**, niezależnie od uwag krytycznych podanych w punktach 3 i 4 niniejszej recenzji, stanowi dobry, samodzielny wkład doktoranta w nauki techniczne, w szczególności w zagadnienia związane z przekształtnikowymi metodami sterowania dla generatorów indukcyjnych. 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 i stawiam wniosek o jej dopuszczenie do publicznej obrony.**

Dyplomistka Materna