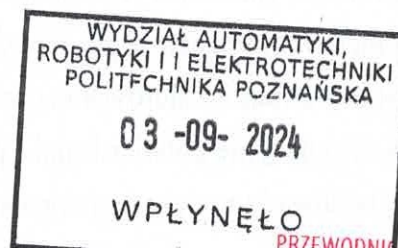


Prof. dr hab. inż. Marcin Morawiec
Wydział Elektrotechniki i Automatyki
Katedra Automatyki Napędu i Konwersji Energii
Politechnika Gdańska
Ul. Narutowicza 11/12; 80-233 Gdańsk
Tel. [REDACTED]
e-mail: [REDACTED]

Gdańsk, 26.VIII.2024



PRZEWODNICZĄCY RADY DYSCYPLINY
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne

prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Przemysława Siwka
pt. **"Analiza i sterowanie napędem PMSM zasilanym z bezpośredniego przekształtnika matrycowego typu Quasi-Z-Source"**

Recenzja została opracowana na zlecenie prof. dr hab. inż. Wojciecha Szelaąg, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Poznańskiej – uchwała z dnia 18.VI.2024 r. Pismo nr DR-012/65/2024 z dnia 25.VI.2024.

1. Uwagi dotyczące wyboru tematyki rozprawy

Oceniana rozprawa doktorska dotyczy sterowania silnikiem PMSM zasilanym z przekształtnika matrycowego wraz z dodatkowym układem umożliwiającym regulację napięcia na wejściu bezpośredniego przekształtnika matrycowego – struktura układu energoelektronicznego typu Quasi-Z-Source (QZS). Strukturę taką nazwano w skrócie przekształtnikiem QZSDMC. Zasilanie silnika PMSM za pomocą przekształtnika matrycowego jest specyficznym rozwiązaniem, przez co rzadko stosowanym w praktyce. W literaturze tematu znajdują się publikacje, które nie dotyczą jednak sterowania silnikiem PMSM z wykorzystaniem przekształtnika matrycowego z układem QZS na wejściu w celu zwiększenia napięcia zasilającego przekształtnik matrycowy, przez co zaproponowana tematyka jest oryginalna i aktualna. W rozprawie podjęto analizę pracy takiego rozwiązania w szczególności skoncentrowano się na regulacji napięcia na wyjściu QZS w układzie zamkniętym. Stabilizacja napięcia na wejściu przekształtnika matrycowego jest konieczna do zapewnienia stabilnej pracy silnika PMSM w pełnym zakresie zmian prędkości i momentu obciążenia. Warto zauważyć, że przekształtnik matrycowy jest układem energoelektronicznym obniżającym napięcie wyjściowe do około 86,6% wartości napięcia wejściowego (zasilania), dlatego do przekształtnika matrycowego dołączono na wejściu układ umożliwiający podwyższenie napięcia – QZS. Autor pracy zwraca uwagę na możliwość zapewnienia stabilnej pracy układu w przypadkach zaniku napięcia po stronie zasilania (sieci zasilającej), a dokładniej na „zwiększenie odporności układu na zapady napięcia zasilania”, poprzez zastosowanie struktury układu z QZS.

Cel rozprawy to opracowanie struktury, algorytmów sterowania i budowa układu napędowego PMSM zasilanego z bezpośredniego przekształtnika matrycowego typu QZS o zwiększonej odporności na zapady napięcia zasilania.

Do realizacji tak postawionego celu pracy przeprowadzono następujące zadania, szczegółowo opisane w poszczególnych rozdziałach rozprawy doktorskiej:

- przegląd metod sposobów zabezpieczania napędów elektrycznych przed zapadami napięcia,
- analiza metod stabilizacji napięcia wyjściowego z QZSDMC,
- opracowanie struktury sterowania napięcia wyjściowego z QZSDMC,
- badania symulacyjne potwierdzające przyjęte założenia,
- projekt, budowa i uruchomienie przekształtnika w warunkach laboratoryjnych,
- weryfikacja eksperymentalna struktury sterowania z silnikiem PMSM zasilanym z QZSDMC.

W pracy nie wyjaśniono w sposób precyzyjny dlaczego podjęto się badań nad układem przekształtnika matrycowego o strukturze bezpośredniej, a nie pośredniej. Natomiast uważam, że zagadnienia dotyczące metod sterowania napędem z PMSM wraz z układem QZSDMC lub QZSIMC w obecności zakłóceń sieci zasilającej są niezwykle ważne i aktualne. Dlatego uważam wybór tematyki za bardzo trafny.

2. Zawartość rozprawy

Praca obejmuje 131 numerowanych stron i składa się z 5 rozdziałów, wykazu oznaczeń i symboli, streszczenia, wykazu literatury oraz załączników A i B.

Rozdział **pierwszy** to część wprowadzająca. W tej części Autor przedstawił uzasadnienie wyboru tematu i sformułował tezę pracy: „*odpowiednie sterowanie modulem Quasi-Z-Source umożliwia poprawę jakości regulacji prędkości podczas zapadów napięcia zasilania w napędzie z PMSM zasilanym za pomocą bezpośredniego przekształtnika matrycowego z modulem Quasi-Z-Source*”. Należy podkreślić, że teza pracy została sformułowana w sposób prawidłowy.

W rozdziale **pierwszym** Autor wymienił cele pracy oraz przedstawił listę czynności podjętych, aby sformułować wnioski oraz krótko streścił dalsze rozdziały pracy. Rozdział pierwszy podzielono na siedem podrozdziałów związanych z zagadnieniami automatyki i sterowania: silnik PMSM, napędy z PMSM, przekształtniki AC/DC/AC, przekształtniki AC/AC, uszkodzenia elektryczne sieci, zapady napięcia w napędach elektrycznych, sterowanie napięciem silnika przez QZS. W poszczególnych podrozdziałach przedstawiono strategię sterowania przyjętą dla silnika PMSM, model matematyczny silnika PMSM, podstawową strukturę sterowania z orientacją względem wektora pola (FOC), opisano przekształtniki matrycowe – rozwiązania konwencjonalne oraz z QZS – dodano analizę wpływu parametrów pasożytniczych na pracę układu. Przedstawiono europejską normę PN-EN 50160 opisującą podstawowe parametry napięcia zasilającego w sieciach elektroenergetycznych. Zaprezentowano podział uszkodzeń sieci. Wymieniono konsekwencje występowania zapadów napięcia sieciowego w pracy napędów elektrycznych oraz zaprezentowano kilka metod wykorzystywanych do zabezpieczenia napędów przed ich wystąpieniem. Rozdział pierwszy zawiera również istotne informacje, które pozwalają na wprowadzenie czytelnika do zasad sterowania i modulacji przekształtnikiem matrycowym. Istotnym podrozdziałem jest 1.7, gdyż stanowi wytłumaczenie zasady sterowania napięciem silnika poprzez układ QZS.

W rozdziale **drugim** przedstawiono badania symulacyjne układu napędowego z silnikiem PMSM zasilanym z układu QZSDMC. W rozdziale tym znajduje się schemat blokowy układu regulacji oraz sposób doboru nastaw regulatorów prądu i prędkości. Zaprezentowano dwa tryby pracy: bez podbicia napięciowego oraz z podbiciem napięciowym, które jest wykonywane zarówno bez regulacji, jak i z regulacją napięcia – pokazano zachowanie się układu przy zwiększaniu współczynnika wzmocnienia napięciowego B_{QZS} podczas pracy napędu.

Porównano tutaj prędkości PMSM w napędach zawierających i nie zawierających regulację podbicia napięciowego. Testy ograniczono tylko do pokazania prędkości kątovej wirnika i prądu i_q podczas długotrwałego obniżenia napięcia zasilania – brak jest testów zapadów napięcia sieci zasilającej trwających od pojedynczych ms do np. 100 ms. Niemniej jednak na zaprezentowanych przebiegach widoczna jest poprawna praca silnika PMSM.

Rozdział **trzeci** autor poświęcił opisowi zbudowanego stanowiska laboratoryjnego do badania napędu z PMSM zasilanego QZSDMC. W podrozdziałach wymieniono założenia projektowe, przedstawiono parametry filtra sieciowego RLC, zdjęcia montażu na stanowisku, sterownik STM32H723ZGT6U, zdjęcie badanego silnika PMSM oraz inne. Należy zauważyć, że rozdział ten nie powinien znajdować się w głównej części pracy, a na jej końcu np. w załącznikach. Zawarto w nim istotne informacje na temat projektu i budowy przekształtnika matrycowego, a zabrakło w nim wyjaśnienia dlaczego wybrano jako obiekt sterowania silnik PMSM o napięciu znamionowym 24 V, prądzie 7,2 A (mocy znamionowej poniżej 300 W). Brak jest podania wszystkich niezbędnych parametrów silnika PMSM jak np. prędkości znamionowej, znamionowego momentu elektromagnetycznego i innych. Należy zauważyć, że dla napędu o napięciu znamionowym bliskim 400 V zasilanym z przekształtnika QZSDMC występują inne zjawiska podczas np. komutacji tranzystorów. Nie jest również jasne dlaczego wykorzystano tranzystory o napięciu znamionowym 600 V skoro układ zasilano napięciem o amplitudzie 20 V – rys. 4.1.

Czwarty rozdział poświęcony jest badaniom eksperymentalnym zaprojektowanego i zbudowanego układu napędowego. Przedstawiono w nim przebiegi prędkości kątovej wirnika, prądów i_q i i_A , trzech napięć zasilających u_{ABC} oraz napięcia u_{QZS} . Wybrane testy przeprowadzono dla układu bez regulacji (stała wartość) i z regulacją napięcia u_{QZS} . W rozdziale brakuje testów napędu dla zmiennych wartości momentu obciążenia – są tylko dla biernego momentu obciążenia, przy czym brakuje informacji w jaki sposób je zrealizowano – jakie warunki, jakie stanowisko i jaka była wartość momentu obciążenia. W podrozdziale 4.2 opisano metodę identyfikacji układu sterowania napięciem znajdującym się pomiędzy częścią QZS a DMC przekształtnika. W części tej opisano sygnały identyfikujące, metodę filtracji i normalizacji sygnałów wraz z narzędziem do poszukiwania modeli matematycznych oraz opisano jego model. W podrozdziale 4.3 wykorzystano wiedzę zdobytą w części 4.2 do opracowania regulatora napięcia QZS. Podrozdział rozpoczyna się od przedstawienia założeń projektowych regulatora. Następnie Autor przechodzi do opisu optymalizacji nastaw regulatora oraz jej wyników. Podrozdział 4.3 kończy się przedstawieniem danych porównujących efekty działania tradycyjnego regulatora proporcjonalno całkującego do zaproponowanego regulatora przestrajalnego.

Ważną częścią pracy jest podrozdział 4.4. Praca napędu podczas zapadów napięcia sieciowego. Niestety w rozdziale tym brakuje testów potwierdzających skuteczność zaproponowanych algorytmów sterowania, przy zapadach napięcia od strony sieci zasilającej. Z opisu, który znajduje się w podrozdziale 4.4 oraz z rys. 4.22 wynika, że wartość napięcia zasilania zmieniano nie w sposób skokowy tylko po tzw. rampie, która umożliwiała wolną zmianę wartości napięcia zasilającego np. o 20 V w czasie 2 s. Taka zasymulowana powolna zmiana modułu napięcia sieci nie stanowi żadnego problemu dla układu regulacji QZS w którym za pomocą regulatora PI regulowano napięcie (wymuszano pożądaną wartość napięcia). W celu pełnej analizy zjawisk występujących w chwili zapadów napięcia od strony sieci zasilającej należało przedstawić chwilowe zapady napięcia zasilającego zgodnie przybliżoną w pracy normą. Zapady takie można zrealizować poprzez dodatkowy układ dołączony na wejście do QZSDMC, który umożliwiłby wygenerowanie symetrycznego bądź niesymetrycznego zapadu napięcia o czasie trwania od np. 10 do 100 ms (poprzez dodatkowe łączniki – tyrystory szeregowo podłączone z rezystorem).

Rozdział **piąty** to podsumowanie uzyskanych rezultatów w pracy doktorskiej. Autor stwierdza w nim m. in., że cel pracy został osiągnięty, a teza udowodniona. Jednocześnie Autor wskazuje na wykonanie następujących zadań szczegółowych:

1. Przegląd metod zabezpieczania napędów elektrycznych przed zapadami napięcia (wykonanie i opis w podrozdziale 1.6 "Zapady napięcia a napędy elektryczne"),
2. Analiza metod stabilizacji napięcia wyjściowego z QZSDMC i ich krytyczna ocena (wykonanie i opis w podrozdziale 1.7 "Sterowanie napięciem silnika przez QZS"),
3. Opracowanie struktury układu automatycznej regulacji napięcia wyjściowego z QZSDMC (wykonanie i opis w podrozdziałach 2.1, 2.1.1 oraz 2.2),
4. Weryfikacja opracowanej struktury i algorytmów sterowania na modelu symulacyjnym (wykonanie i opis w rozdziale 2 "Badania symulacyjne"),
5. Zaprojektowanie, budowa i uruchomienie eksperymentalnego przekształtnika QZSDMC (wykonanie i opis w rozdziale 3 "Budowa Stanowiska"),
6. Weryfikacja eksperymentalna struktury i algorytmów sterowania na zbudowanym obiekcie rzeczywistym (wykonanie i opis w rozdziale 4 "Badania eksperymentalne").

Bibliografia rozprawy obejmuje 126 pozycji, którymi są monografie, artykuły w czasopismach międzynarodowych i krajowych oraz materiały pokonferencyjne. Wśród listy publikacji można znaleźć 4 prac własnych. Spis literatury świadczy o aktualności tematyki rozprawy, gdyż prawie 20 % prac to prace wydane po lub w 2020 roku.

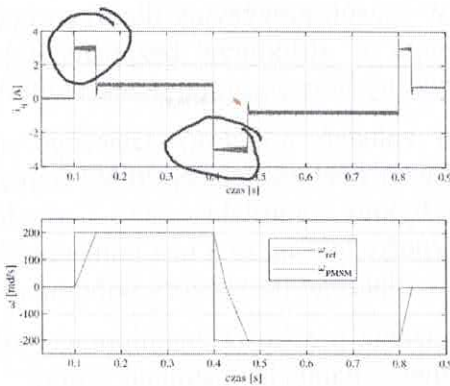
Załącznik A i B w których załączono schematy symulacji napędu PMSM z QZSDMC i schematy elektryczne i projekty płyt PCB.

3. Uwagi ogólne

Do uwag dyskusyjnych natury ogólnej, jakie nasunęły mi się podczas czytania rozprawy, należą:

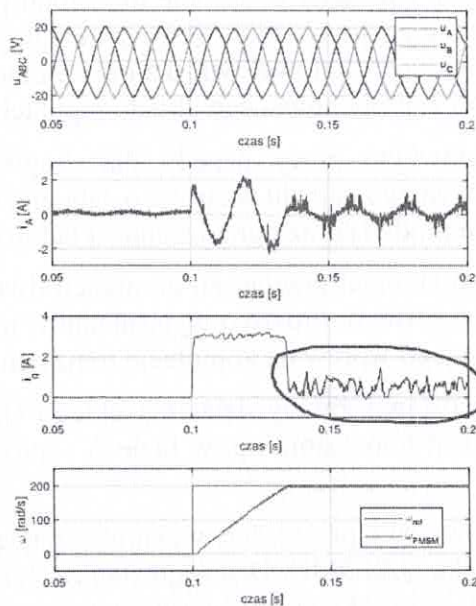
1. Postawiona teza pracy w kontekście zapadów napięcia zasilania nie została do końca udowodniona. W pracy brakuje analizy potwierdzającej, że „odpowiednie sterowanie modułem Quasi-Z-Source umożliwia poprawę jakości regulacji prędkości podczas zapadów napięcia zasilania w napędzie z PMSM”. Istotne jest, aby przedstawić szerszą analizę w której zostaną rozważane krótkotrwałe zapady napięcia np. 20 ms, 40 ms, 60 ms, 100 ms, 200 ms oraz o zmiennych amplitudach od np. 10 – 30 % U_n i ich wpływ na „jakość regulacji prędkości” oraz stabilność całego układu – np. wyłączenia przekształtnika matrycowego z powodu zaniku napięcia i inne. Istotne jest sprawdzenie zachowania się układu QZS w chwili zapadu napięcia – czy spowoduje to nagły wzrost napięcia na tranzystorach $S_{A, B, C}$? Jakie będą wtedy przebiegi napięć i prądów w fazach zasilających? Jakie przebiegi napięć i prądów za układem QZS w punktach A', B', C'? Co wtedy ze współczynnikiem wzmocnienia napięciowego B_{QZS} ? Testy można wykonać przy stałej i regulowanym współczynniku B_{QZS} . Jaki przebieg napięcia u_{QZS} ? W rozdziale 4.4 Praca napędu podczas zapadów napięcia, Autor podaje, że „Ze względu na brak możliwości laboratoryjnych nie sprawdzano tutaj szybkich zmian napięcia o czasie trwania nieprzekraczającym kilku okresów sieciowej sinusoidy”, a przecież do przeprowadzenia takich krótkotrwałych zapadów napięcia wystarczyłyby 3 rezystory (lub jeden trójfazowy o regulowanej wartości rezystancji) i stycznik trójfazowy wyzwalany z mikrokontrolera bądź innego układu. Jeżeli obecnie nie ma możliwości walidacji eksperymentalnej to zapewne można to przeprowadzić symulacyjnie w środowisku Matlab/Simulink.

2. W pracy nie wyjaśniono w sposób precyzyjny dlaczego podjęto się badań nad układem przekształtnika matrycowego o strukturze bezpośredniej, a nie pośredniej. Proszę o uzasadnienie wyboru struktury bezpośredniej przekształtnika matrycowego.
3. Jaka była przesłanka do założeń projektu? Dlaczego silnik wybrano na napięcie znamionowe 24 V?, a napięcie sieci zasilającej 20 V? Bardziej interesującym rezultatem pod kątem aplikacyjnym byłoby zaprojektowanie i zbudowanie układu napędowego umożliwiającego pracę bezpośrednio na sieć bez konieczności obniżania do 20 V. Skoro napięcie zasilania to 20 V to dlaczego tranzystory dobrano na 600 V?
4. W rozprawie brakuje wskazania prędkości znamionowej silnika PMSM, częstotliwości podstawowej harmonicznej napięcia stojana oraz znamionowego momentu elektromagnetycznego. Proszę o uzupełnienie tych parametrów.
5. Autor przedstawił w rozprawie niepełne badania symulacyjne i eksperymentalne napędu PMSM zasilanego z QZSDMC. Są to głównie rozruchy i nawroty do prędkości znamionowej? (200 rad/s?). Na jakiej podstawie określono prędkość zadaną do układu regulacji? Brak testów symulacyjnych i/lub eksperymentalnych przeprowadzonych dla znamionowych wartości prędkości kątowej wirnika oraz momentu elektromagnetycznego uniemożliwia ocenę jakości zaproponowanego układu regulacji.
6. W rozprawie nie przedstawiono pracy napędu dla drugiej strefy regulacji. Proszę o sprawdzenie właściwości całego napędu w strefie osłabiania strumienia stojana (ujemna wartość składowej wektora prądu i_d oraz ograniczenie składowej i_q).
7. Na rys. 1.18 przedstawiono automat przełączeń komutacji dwukrokowej dla pojedynczej gałęzi przekształtnika matrycowego. Proszę o wyjaśnienie w jaki sposób powinien zostać dobrany próg i_{min} i jaki jest jego wpływ na komutację tranzystorów?
8. Szkoda, że Autor nie przedstawił zasady działania układu QZS na przebiegach napięć i prądów w chwili przełączeń tranzystora np. w fazie A – proces komutacji dla krótkich chwil czasowych.
9. Na rys. 1.24 przedstawiono cykl przełączeń wektorów napięciowych w pojedynczym okresie PWM przekształtnika QZSDMC. Dlaczego stan ST jest dodany w chwili trwania wektora zerowego? Z rys. 1.15 i 1.24 wynika, że wektor zerowy występuje na końcu okresu impulsowania. Czy rozważano wstawienie wektora zerowego na początku i na końcu okresu impulsowania o czasie $t_0/2$?
10. Jaki jest czas impulsowania oznaczany T_s oraz jaki T_{PWM} ? Czy są to te same czasy? Czy algorytm sterowania był wywoływany w czasie T_{PWM} ? Proszę o doprecyzowanie całej procedury.
11. W rozdziale 2.1.1 dokonano modyfikacji współczynników k_p i k_i uzyskanych z kryterium modułu. W rozprawie nie wyjaśniono w jaki sposób dobrano 0,6 dla k_{pi} oraz 4 dla k_{ii} . Podobnie wzmocnienia regulatora prędkości – jest 0,5 przy k_p . W jaki sposób zmiana tych wzmocnień wpływa na właściwości układu napędowego z PMSM?
12. Z czego wynikają oscylacje o narastającej amplitudzie, pojawiające się w przebiegu prądu i_q podczas rozruchu i nawrotu widoczne na rys. 2.5, 2.7, 2.9, 2.11?



RYСУNEK 2.7: Rozruch, nawrot i hamowanie napędu z obciążeniem o charakterze biernym i bez podbicia napięciowego $B_{QZS} = 1$. Symulowany prąd silnika i_q oraz jego prędkość.

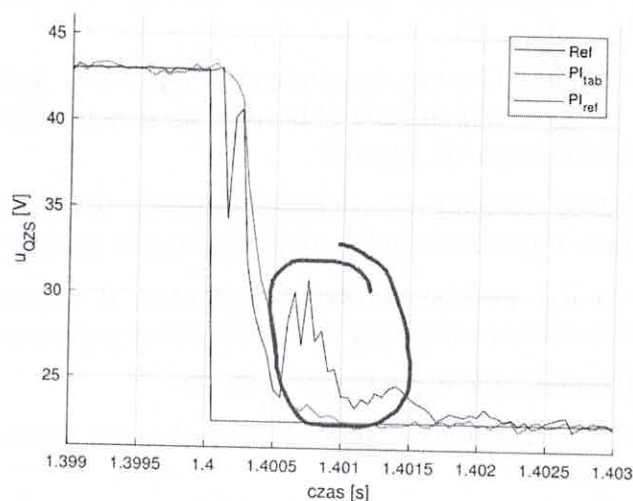
13. Z czego wynikają nietłumione oscylacje widoczne w przebiegu prądu i_q na rys. 4.2, 4.4, 4.5, 4.7, 4.9?



RYСУNEK 4.4: Rozruch napędu bez obciążenia i bez podbicia napięciowego $B_{QZS} = 1$. Napięcie i prąd zasilania oraz prąd i_q i prędkość silnika.

14. Do identyfikacji obiektu wykorzystano narzędzie Ident w Matlab. Jaka jest postać uzyskanej transmitancji? Czy jest to transmitancja dla całego obiektu – Tabela 4.1? Proszę o szerszą charakterystykę narzędzia Ident oraz potencjału jego wykorzystania do identyfikacji obiektów jak układy napędowe.
15. Na stronie 14 stwierdzono, że (...) „Obiekt sterowania zmienia się w szerokim zakresie”. Proszę o doprecyzowanie tego stwierdzenia w kontekście wzmocnienia B_{QZS} .
16. W podrozdziale 4.3.1 na stronie 89 stwierdzono, że (...) „Regulator przestrajalny cechuje się większą amplitudą oscylacji, która nie wpływa na czas trwania regulacji. Inaczej jest w przypadku zbrocza opadającego, gdzie pomimo tej samej amplitudy skoku układy regulacji zachowują się zupełnie inaczej. Po przełączeniu się regulatora P_{ltab} na parametry optymalizowane dla niskich wzmocnień, wyraźnie widać krótszy czas regulacji oraz mniejszą ilość oscylacji. W trakcie regulacji P_{lref} w odpowiedzi obiektu pojawiają się wyraźne oscylacje, które wydłużają proces. Oznacza to, że liniowy regulator referencyjny lepiej radzi sobie z wyższymi od optymalizowanego punktu pracy wartościami amplitudy u_{QZSref} niż w przypadku amplitud niższych”. Należy zauważyć, że regulator PI

(referencyjny) powinien działać w obu przypadkach tak samo. Autor odnosi się do rys. 4.20 na którym pokazano skok opadający:



(B) Skok opadający

Dla przebiegu w kolorze niebieskim po chwili 1.4005 s widoczne są: brak osiągnięcia wartości zadanej i zmiana wartości wyjściowej z regulatora napięcia – B_{QZS} , co wskazuje, że napięcie mierzone $u_{QZS,d}$ chwilowo wzrosło lub spowodowane jest to błędem pomiarowym (zakłóceniem) lub ograniczeniem wartości B_{QZS} na wyjściu regulatora PI (zbyt niską wartością ograniczenia wyjścia regulatora i stan nasycenia). Stąd rodzi się pytanie w jaki sposób ustawiono wartość ograniczenia regulatora napięcia? Dobrze byłoby pokazać na rys. 4.20 zmienną B_{QZS} oraz napięcie mierzone $u_{QZS,d}$ wraz z pozostałymi przebiegami.

17. Jaki jest czas wykonywania algorytmu sterowania w mikrokontrolerze? W jaki sposób dokonano rejestracji danych za pomocą mikrokontrolera? Jak ustawiono przerwania – ile przerw wykorzystał? Czy wykorzystano liczniki PWM? Jak ustawiono przetwornik – jaki tryb pracy, bo jest ich kilka. Proszę o szerszy opis, bo to zagadnienie jest bardzo ciekawe, a w rozprawie jest tylko charakterystyka sterownika.
18. W pracy nie wyjaśniono dlaczego nie wykorzystano struktury obserwatora do określania wartości prędkości kątowej wirnika i położenia – tylko pomiar z enkodera.

4. Uwagi szczegółowe i redakcyjne

Należy podkreślić, że rozprawa została napisana w sposób poprawny, zawiera szczegółowe wyjaśnienia wprowadzające czytelnika do opisywanego zagadnienia, przez co tekst jest zrozumiały i czytelny. Niemniej jednak nie unikniono drobnych błędów interpunkcyjnych, redakcyjnych i edytorskich, jak np.

1. W części „Lista symboli” jest i_i oraz i_o w opisie znaczenia podano – wektor prądu wejściowego do przekształtnika „matrycowego”, a powinno być matrycowego – podobnie na kolejnej stronie.
2. Pierwszy akapit i kilka zdań we wstępie nie są związane z tematyką rozprawy.
3. Co oznacza „podatność na pogorszenie jakości napięcia sieciowego” – str. 1.
4. W rozprawie Autor często stosuje sformułowanie „podbicie napięciowe” przed jego definicją, przez co z kontekstu zdań wynika jego znaczenie, ale powinno to zostać w sposób precyzyjny określone, a jest to dopiero na stronie 24 (1.46).

5. W tekście rozprawy często Autor stosuje sformułowanie „klucze energoelektroniczne” w odniesieniu do tranzystorów. Natomiast nie są to klucze tylko łączniki energoelektroniczne.
6. Na stronie 43 jest zdanie „Uznano, że pomiar wykonywany będzie w trakcie trwania wektora, który ma większe wypełnienie obliczone dla danego okresu sterowania” – czy może Autor wyjaśnić dlaczego tak uznano?
7. Jaka jest rozdzielczość pomiarowa zaprezentowanych w rozprawie przebiegów na rysunkach? (ile próbek w prezentowanym oknie czasowym np. na rys. 2.7?)
8. Parametry w Tabeli 3.3 powinny zostać uzupełnione o częstotliwość znamionową, prędkość znamionową oraz znamionowy moment elektromagnetyczny.
9. Co oznaczają „szpilki widoczne w pomiarze” – str. 66?
10. Co oznacza „badanie zwiększania częstotliwości regulacji na tłumienie szybkozmiennych oscylacji obiektu” – str. 107?

5. Ocena rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa stanowi rozszerzenie wiedzy teoretycznej oraz doświadczalnej na temat sterowania napędem z silnikiem PMSM zasilanym z bezpośredniego przekształtnika matrycowego z dołączonym na wejściu układem umożliwiającym zwiększenie napięcia – przekształtnikiem QZS. Praca jest podsumowaniem i rozszerzeniem kilkuletniej działalności Autora w określonej dziedzinie – jak wielokrotnie podkreśla w rozprawie – zdobył nową wiedzę w zakresie projektowania układów energoelektronicznych, algorytmów sterowania i modulacji oraz algorytmów optymalizacji i identyfikacji obiektu. Autor samodzielnie osiągnął podane cele pracy.

Rozważania teoretyczne zostały poparte wynikami badań eksperymentalnych. Autor zastosował właściwe metody badawcze. Praca zawiera wnioski, które będą bardzo przydatne przy praktycznej realizacji układów napędowych zasilanych z przekształtników matrycowych – zwłaszcza w zakresie metody modulacji oraz synchronizacji pomiarów. Zrealizowano również testy przedstawiające pracę układu przy obniżonym napięciu sieci zasilającej – w stanach awaryjnych.

Recenzowana rozprawa wykazuje duży poziom teoretycznej wiedzy autora, wysokie umiejętności praktyczne oraz zdolność do samodzielnej pracy badawczej. Autor zbudował złożone stanowisko badawcze, a całość prac i badań przeprowadził z bardzo dużym zaangażowaniem. Należy podkreślić, że budując stanowisko laboratoryjne musiał rozwiązać szereg złożonych problemów technicznych.

Za oryginalne osiągnięcia Autora uważam:

- opracowanie metody pomiaru i transformacji napięcia wyjściowego z przekształtnika QZS umożliwiającej uzyskanie pojedynczej zmiennej stanu będącej sumą informacji ze wszystkich trzech faz modułu,
- zaprojektowanie, budowa i oprogramowanie stanowiska laboratoryjnego do badania napędu z PMSM zasilanym z bezpośredniego przekształtnika matrycowego typu Quasi-Z-Source,
- opracowanie przestrajalnego regulatora PI do sterowania napięciem QZS i weryfikacja jakości jego pracy na stanowisku rzeczywistym.

6. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa, niezależnie od uwag podanych w niniejszej recenzji, stanowi oryginalne rozwiązanie ważnego i aktualnego zagadnienia naukowego. Autor wykazał się ogólną wiedzą i przygotowaniem w dziedzinie elektrotechniki, co potwierdza i dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i wyciągania istotnych wniosków.

Uwzględniając przedstawione argumenty stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Przemysława Siwka pt. „Analiza i sterowanie napędem PMSM zasilanym z bezpośredniego przekształtnika matrycowego typu Quasi-Z-Source” stanowi cenny wkład w rozwój dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne oraz odpowiada wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim w rozumieniu Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. z 2017 poz. 1789) i wnioskuje o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

