

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA RADY NAUKOWEJ
WYDZIAŁU ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI I INFORMATYKI
POLITECHNIKI ŚWIĘTOKRZYSKIEJ

Tytuł rozprawy: „**Analiza metod sterowania maszyny typu BLDC w stanie pracy generatorowej**”

Autor rozprawy: **mgr inż. Paweł Stawczyk**

Rozprawa została przygotowana pod merytoryczną opieką **prof. PŚk dr. hab. inż. Sławomira Karysia jako promotora i dr. hab. inż. Grzegorza Radomskiego jako promotora pomocniczego**. Recenzję przygotowano na podstawie umowy zawartej dnia 1. 06. 2023 r.

Przedstawiona do oceny rozprawa zawiera 139 stron tekstu, podzielonego na 7 rozdziałów, stosunkowo obszerny wykaz literatury obejmujący 97 pozycji, w tym 3 pozycje (PE, Energies, Konferencja CPE'2016) w których Doktorant jest współautorem oraz wykaz skrótów i oznaczeń. W rozdziale 6 zawarte zostały wnioski, a w rozdziale 7 dodatkowe równania mocy na wyjściu falownika. Do swojej rozprawy doktorskiej mgr inż. Paweł Stawczyk dołączył komplementarne opracowanie pt. „**Analiza porównawcza wyników badań symulacyjnych z wynikami badań eksperymentalnych**”, w którym - zgodnie z tytułem - porównał uzyskane za pomocą tych dwóch metod badawczych wyniki.

1. Dobór tematu i zakres pracy

Temat rozprawy dotyczy stosunkowo wąskiego zakresu energoelektroniki związanego ze zjawiskiem wstecznego przewodzenia tranzystorów polowych, ale Autor, w słowie wstępnym swojej rozprawy, przekonywująco, jak się wydaje, uzasadnia swój wybór. Samo zagadnienie przewodnictwa wstecznego tranzystorów polowych jest mało obecne w literaturze przedmiotu, nie tylko w Polsce, ale i na świecie. Autor dalej uzasadnia swój wybór tematu pracy wskazując,

że zwłaszcza w takich zastosowaniach jak pojazdy elektryczne o niskim napięciu baterii zasilającej układ napędu, sprawność samego przekształtnika może mieć również duże znaczenie. Zależy ona od strat mocy na jego elementach aktywnych i biernych jeżeli takie elementy przekształtnik posiada. Zastosowanie w przekształtniku tranzystorów polowych i wykorzystywanie ich zdolności do przewodzenia wstecznego daje możliwość zmniejszenia strat mocy ponieważ spadek napięcia na przewodzącym wstecznie tranzystorze jest znacznie mniejszy niż na przeciwrównoległej diodzie, która taki prąd przewodzi w typowym rozwiązaniu. W związku z tym Doktorant, wyprzedzając tezę pracy, omawia cel rozprawy, a właściwie zbiór zadań, które chce wykonać i stawia tezę, że **wykorzystanie wstecznego przewodzenia tranzystorów polowych w przekształtniku prowadzi do zwiększenia jego sprawności**. Zakłada, że do sterowania przekształtnika z obciążeniem w postaci maszyny bezszczotkowej (BLDC) zastosuje algorytmy przewodzenia wstecznego.

Nasuują się tu następujące uwagi. Jeżeli w rozprawie stawia się tezę, to pierwszy i zasadniczy cel pracy polega na udowodnieniu słuszności postawionej tezy. W podanym we Wstępie celu pracy Autor stwierdza, „celem niniejszej rozprawy jest analiza strat mocy występujących w przekształtniku współpracującym z maszyną BLDC w stanie pracy generatorowej”. Takie sformułowanie, zapewne wbrew intencjom Doktoranta, nie odnosi się bezpośrednio do postawionej tezy i jednocześnie zbyt daleko odbiega od tytułu rozprawy, której celem jest analiza metod sterowania maszyny BLDC .

Część merytoryczna praca mgr. inż. Pawła Stawczyka rozpoczyna się od dwóch rozdziałów przeglądowych, w których prezentowane są przekształtniki i algorytmy sterowania. W rozdziale pierwszym zaprezentowany został krótki przegląd układów przekształtników połączonych z maszyną BLDC i umożliwiających hamowanie odzyskowe. Autor prezentuje tu również opracowany przez siebie układ (Rys. 1.10) przekształtnika trójfazowego, w którym tylko jedna gałąź, zbudowana z dwóch tranzystorów polowych, jest w pełni sterowalna. Metoda sterowania i układ przekształtnika zostały opublikowane w pracach [42 – PE, 44 – IEEE-CPE-POWERENG Conference, 216], w których Doktorant jest współautorem. Drugi rozdział zawiera przegląd algorytmów sterowania przekształtników o różnej budowie, połączonych z maszyną BLDC pracującą w trybie generatorowym. W podsumowaniu Autor pisze, że wybrane algorytmy sterowania można rozwinąć wykorzystując mechanizm wstecznego przewodzenia tranzystorów polowych i twierdzi, że wówczas można „wielokrotnie” (str. 33) ograniczyć straty mocy występujące na przewodzących diodach. Ale czy dioda przewodzi i prąd się rozdziela

płynąc częściowo przez diodę i przez kanał wstecznego przewodzenia tranzystora, czy też tranzystor w pełni przejmuje przewodzenie wyłączając diodę – tego Autor nie mówi odsyłając czytelnika do literatury [54, 60, 97]. W ogólności nie zasługuje na dobrą ocenę sposób przywoływania i brak bardziej merytorycznego odniesienia się przez Autora rozprawy do - przynajmniej niektórych - z 97 pozycji literatury. Sam fakt przywołania tytułu źródeł oceniam pozytywnie, ale próba merytorycznego komentarza do wybranych pozycji źródłowych podniosłaby wartość części przeglądowej rozprawy.

Brakuje w tej pierwszej części pracy szczegółowego omówienia zjawiska wstecznego przewodzenia tranzystorów polowych, bo to zagadnienie nie jest szeroko omawiane i „na co dzień” obecne w literaturze przedmiotu, a w pracy Doktoranta stanowi warunek sine qua non podwyższenia sprawności przekształtnika. Próba autorskiego skomentowania tego mechanizmu i przybliżenia osiągnięć literatury światowej w tym zakresie podniosłaby wartość merytoryczną całej pracy. Pożądane byłoby opracowanie modelu, tranzystora przewodzącego wstecznie oraz podanie ważnych parametrów i charakterystyk, do których należy np.: spadek napięcia na tranzystorze przewodzącym i czasy przełączania w funkcji prądu, ograniczenia dopuszczalnej mocy, a także inne parametry mające wpływ na sprawność przekształtnika.

2. Analiza matematyczna

Rozdział trzeci rozprawy poświęcony został analizie matematycznej przekształtnika na podstawie modelu wartości średnich. Samej idei modelu wartości średnich Autor nie przybliży, ale podaje założenia i odwołania do literatury [9, 12]. Analiza matematyczna przeprowadzana jest na podstawie uproszczonych schematów zastępczych przekształtnika dla kolejnych metod sterowania i dla dwóch stanów energetycznych: gromadzenia oraz oddawania energii. W zakresie sterowania klasycznego analiza obejmuje cztery metody sterowania, a w zakresie sterowania z wykorzystaniem przewodzenia wstecznego – trzy. Zastosowanie modelu wartości średnich umożliwia wyznaczenie wyrażeń analitycznych pozwalających obliczyć moc doprowadzoną do przekształtnika oraz moc strat na jego elementach przewodzących i w rezultacie – sprawność.

Uwagi szczegółowe:

1. Na schematach zastępczych układu spadek napięcia na tranzystorze jest oznaczony symbolem U_T , który nie występuje w wyrażeniach analitycznych, natomiast straty na tranzystorze przewodzącym obliczane są jako $U_T = I_A R_{DS(ON)}$ (np. równanie 3.1 i inne).

2. W kolejnych równaniach jako istotny parametr występuje współczynnik wypełnienia D , jednakże nie podano jak określa się jego wartość- procentowo czy jako liczbę $D \leq 1$.
3. Rezystancja wewnętrzna baterii R_B (zależność 3.2) nie występuje na schematach zastępczych.
4. Nie jest jasne dlaczego w wyrażeniu (3.3), które określa prąd I_A w liczniku znalazł się czynnik $U_f(2 - D)$, a nie – np. $2U_f(1 - D)$?!
5. Lewa i prawa strona równań (3.1) i (3.2) mają różny wymiar jednostkowy [$A \neq Vs$]. Ten sam błąd występuje jeszcze w kolejnych równaniach?!

Jeśli chodzi o terminologię, to stan zasilania maszyny BLDC z baterii Doktorant nazywa gromadzeniem energii, natomiast proces ładowania baterii określany jest jako oddawanie energii. Analiza omawianej metody sterowania pozwala na opracowanie schematu zastępczego dwóch stanów systemu: **Bateria – Przekształtnik – Maszyna BLDC**. Równania (3.1) i (3.2) opisują układ zastępczy systemu, w którym do sterowania przekształtnika zastosowano metodę z przełączaniem jednego lub sześciu tranzystorów. Wyznaczenie z tych równań prądu I_A w obwodzie układu zastępczego umożliwi obliczenie mocy pobieranej ze źródła zasilającego oraz mocy strat w obwodzie, co pozwala wyznaczyć sprawność przekształtnika. Dla kolejnej metody sterowania opracowuje się nowy układ zastępczy systemu i wyznacza zależność pozwalającą obliczyć prądu I_A i sprawność przekształtnika.

3. Moc wyjściowa i problem strat mocy w przekształtniku.

Na rysunku 3.14 (i wielu kolejnych zatytułowanych jako „moc wyjściowa przekształtnika”) przedstawiono charakterystyki mocy na obciążeniu przekształtnika w funkcji współczynnika wypełnienia D . Warto zwrócić tu uwagę na wątpliwości terminologiczne albowiem sformułowanie „moc wyjściowa przekształtnika” można odebrać jakoby sam przekształtnik był generatorem mocy. Tymczasem przekształca on dostarczoną energię ze źródła energii elektrycznej – w tym wypadku może to być bateria albo maszyna BLDC - i doprowadza energię do obciążenia, które w badanym układzie może być na odwrót maszyną BLDC albo baterią. Skłania to również do zachowania ostrożności w określaniu stron (zacisków) przekształtnika jako wejście i wyjście, bo może on pracować jako falownik, ale też jako prostownik i obu tych trybów pracy dotyczą badania stanowiące przedmiot rozprawy. Racjonalne wydaje się przyjęcie, że kierunek przepływu energii określa gdzie jest wejście, a gdzie wyjście przekształtnika.

Analizując straty w przekształtniku dla poszczególnych metod sterowania Doktorant zamieszcza liczne wykresy strat w funkcji kilku parametrów takich jak np. współczynnik wypełnienia czy prędkość obrotowa. Dla przekształtnika, w którym zastosowano przewodzenie wsteczne straty w funkcji wymienionych parametrów zostały przedstawione na rysunku 3.21, a sprawność - na rysunku 3.22. Nie jest jasne w jaki sposób Autor uzyskał takie przebiegi, bo nie są to (chyba) wyniki badań symulacyjnych, o których traktuje następny rozdział?! Wydaje się, że te charakterystyki powstały jako wynik obliczeń opracowanych wyrażen analitycznych, co nie zostało w pracy podkreślone. Kieruję więc do Doktoranta następujące pytania i prośbę o komentarz:

1. Jeżeli są to wyniki obliczeń uzyskanych z wyrażen analitycznych, to jakie wartości wielkości fizycznych i parametry obwodu zastępczego zostały przyjęte? Moc strat została przedstawiona w rozprawie w postaci bezwymiarowej jako wartość względna w odniesieniu do mocy wyjściowej lub maksymalnej.
2. Przebieg charakterystyki strat mocy w funkcji współczynnika wypełnienia D wymaga wyjaśnienia, np. niemal skokowy, do 100%, wzrost strat mocy i jednocześnie spadek sprawności do zera w przekształtniku, w którym współczynnik D przekracza 40%, budzi zasadnicze wątpliwości. W przedziale czasu $t = T(1 - D)$, gdzie T oznacza okres, przekształtnik zasadniczo nie przekazuje energii z wejścia do wyjścia?! Oznacza to, że elementy aktywne nie przewodzą i straty mocy powinny być niewielkie czy nawet pomijalnie małe. Jeżeli jednak napięcie zasilające przekształtnik jest bardzo małe i w wyniku przewodzenia diod przeciwrównoległych energia jest przekazywana w przeciwną stronę, to należy podać warunki w jakich teoretycznie byłoby to możliwe oraz określić zakres dopuszczalnych wartości współczynnika D . Nie wolno zapomnieć, że analizowane wyniki uzyskano w określonym systemie, w którym energia może przepływać w obie strony przez przekształtnik umieszczony pomiędzy wybranymi podzespołami zdefiniowanymi w rozprawie jako źródło energii i obciążenie.

Wykorzystanie zjawiska przewodnictwa wstecznego przyczynia się do podwyższenia sprawności przekształtnika, ponieważ napięcie na tranzystorach przewodzących prąd znacznie się zmniejsza. Jednakże, jak twierdzi Autor, wzrost sprawności przekształtnika zależy nie tylko od wartości współczynnika wypełnienia, ale też od prędkości obrotowej maszyny, co wynika wprost ze wzrostu napięcia U_{EMF} maszyny BLDC. Charakterystyki podane na rysunku 3.23 potwierdzają, jak się zdaje, ten fakt chociaż Doktorant nie podaje skali dla napięcia U_{EMF} .

Rozdział 3 rozprawy prezentuje próbę przeprowadzenia analizy matematycznej, w wyniku której otrzymuje się zestaw wyrażeń opisujących istotne parametry i wielkości fizyczne systemu Bateria – Przekształtnik – Maszyna BLDC dla różnych metod sterowania. Otrzymane w wyniku analizy narzędzia matematyczne pozwalają wyznaczyć wartość prądu, moc uzyskiwaną na wyjściu przekształtnika, jak również moc strat w kolejnych układach zastępczych odpowiadających rozważanym metodom sterowania. W zastosowanym do analizy modelu wartości średniej nie uwzględnia się strat mocy związanych z przełączaniem tranzystorów, chociaż w przekształtnikach mogą one przewyższać straty mocy związane z przewodzeniem. Zwłaszcza w przekształtnikach wykorzystujących wsteczne przewodzenie tranzystorów polowych. Jednakże opracowanie, w zakresie przedstawionym w rozprawie, narzędzi matematycznych przydatnych do analizy sprawności wybranych układów przekształtników i metod sterowania należy uznać za wartość prezentowanej rozprawy.

4. Badania symulacyjne i eksperymentalne

W kolejnych rozdziałach rozprawy Autor przedstawia wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych. Do badań symulacyjnych wykorzystano środowisko Matlab-Simulink. Konsekwentnie przeprowadzone zostały badania systemu, w którym do sterowania przekształtnika wykorzystano klasyczne metody sterowania, a następnie badania porównawcze przeprowadzono z wykorzystaniem sterowania zapewniającego przewodzenie wsteczne. Wyniki badań zamieszczono na kolejnych rysunkach. Pozwoliły one na porównanie i ocenę spodziewanego wpływu wstecznego przewodzenia na moc wyjściową i sprawność przekształtnika. Wzrost mocy wyjściowej i sprawności potwierdzają charakterystyki zamieszczone na rysunkach 4.20, 4.21 i 4.22.

Do przeprowadzenia badań eksperymentalnych Doktorant zbudował stanowisko pomiarowe w oparciu o dostępną w laboratorium aparaturę. Wykorzystał trójfazowy przekształtnik trójfazowy i opracował mikroprocesorowy układ sterowania z procesorem sygnałowym. Do pomiarów mocy wykorzystał analizator Yokogawa WT1600 sprzężony z komputerem, a obciążenie stanowiła maszyna BLDC PBL60-58. Najpierw przeprowadzono badania eksperymentalne przekształtnika sterowanego według klasycznych algorytmów, a następnie badania z wykorzystaniem zjawiska przewodzenia wstecznego. Badania eksperymentalne przeprowadzono dla pięciu różnych algorytmów sterowania. Wyniki podsumowujące

zaprezentowano na rysunkach 5.23 i 5.24. Przedstawiają one charakterystyki mocy na wyjściu przekształtnika oraz jego sprawność w funkcji współczynnika D i prądu fazowego maszyny.

Następnie badaniom poddano przekształtnik sterowany według algorytmów zapewniających wykorzystanie zjawiska przewodzenia wstecznego. Te badania eksperymentalne przeprowadzono dla czterech różnych algorytmów sterowania. Wyniki podsumowujące zaprezentowano na rysunkach 5.45 i 5.46. Przedstawiają one charakterystyki mocy na wyjściu przekształtnika oraz jego sprawność w funkcji współczynnika D i prądu fazowego maszyny. Dodatkowo na rysunku 5.47 załączono wyniki badań sprawności i mocy maksymalnej na wyjściu przekształtnika w funkcji prędkości obrotowej maszyny. W podsumowaniu Doktorant stwierdza, że uzyskane charakterystyki mocy dla metod sterowania, w których wykorzystano przewodzenie wsteczne mają przebieg analogiczny do charakterystyk uzyskanych dla sterowania klasycznego. Podkreśla, że **wykorzystanie zjawiska przewodzenia wstecznego podwyższa sprawność przekształtnika.**

5. Podsumowanie

Oceniając rozprawę należy podkreślić, że Doktorant zajął się zagadnieniem przewodnictwa wstecznego tranzystorów polowych, które jest stosunkowo mało obecne w literaturze przedmiotu, zwłaszcza w Polsce. Za osiągnięcie Autora uważam opracowanie, w zakresie przedstawionym w rozprawie, narzędzi matematycznych przydatnych do analizy sprawności przekształtników i algorytmów sterowania. Opracowane narzędzia zostały wykorzystane do analizy układów zastępczych i badań symulacyjnych, a wnioski z tych badań zostały wykorzystane w badaniach eksperymentalnych. Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone na stanowisku laboratoryjnym skonstruowanym przez Autora rozprawy. Opracowanie licznych badań symulacyjnych i eksperymentalnych na podstawie opracowanych pięciu algorytmów sterowania, a także przeprowadzenie analizy porównawczej uzyskanych wyników stanowią istotną wartość rozprawy. Przeprowadzenie badań eksperymentalnych z wykorzystaniem różnych algorytmów sterowania wymagało modyfikacji układu samego przekształtnika, a jednym z nich był przekształtnik z dwoma sterowanymi tranzystorami opracowany przez Doktoranta.

Opracowane narzędzia matematyczne, a także uzyskane wyniki mogą być podstawą do dalszych badań przekształtników z wykorzystaniem zjawiska wstecznego przewodzenia. Kończąc proszę Doktoranta o odniesienie się do wymienionych wyżej uwag szczegółowych i

postawionych pytań, a także – jeżeli uzna to za stosowne – do odniesienia się do innych krytycznych opinii zawartych w recenzji.

6. Wnioski końcowe

Pomimo licznych uwag krytycznych, uwzględniając wartość całej rozprawy, wkład, zaangażowanie i osiągnięcia Doktoranta wymienione w podsumowaniu stwierdzam, że :

Zakres i poziom uzyskanych wyników badawczych odpowiada ustawowym (Ustawa Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce Dz. U. z 2018 r. poz. 1669 z późn. zm. oraz odpowiednio art.14, ust.2, p.2 ustawy z 14 marca 2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym) i zwyczajowym wymaganiom stawianym rozprawom na stopień doktora nauk technicznych.

Wnioskuje zatem do Wysokiej Rady Naukowej Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Świętokrzyskiej o przyjęcie rozprawy zatytułowanej : „Analiza metod sterowania maszyny typu BLDC w stanie pracy generatorowej” i dopuszczenie jej Autora, mgr. inż. Pawła Stawczyka do publicznej obrony.

Prof. UMG Jan Iwaszkiewicz