

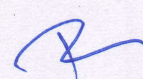
2. Załącznik do Wniosku (PL)

AUTOREFERAT

Dr inż. Marcin Stanisław Baszyński

Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
Katedra Energoelektroniki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii
AGH- Akademia Górniczo- Hutnicza im. Stanisława Staszica

Kraków 2017



Spis treści

1	OZNACZENIA PUBLIKACJI I OSIĄGNIĘĆ	3
2	POSIADANE DYPLOMY I STOPNIE NAUKOWE.....	4
3	INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH	4
4	WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO	5
4.1.	Tytuł osiągnięcia naukowego	5
4.2.	Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe.....	5
4.3.	Omówienie celu naukowego wymienionych prac i osiągniętych wyników	7
4.3.1.	Wprowadzenie.....	7
4.3.2.	Omówienie uzyskanych wyników.....	8
4.3.3.	Podsumowanie	12
5.	Bibliografia.....	13

1 OZNACZENIA PUBLIKACJI I OSIĄGNIĘĆ

W autoreferacie przyjęto następujące oznaczenia zgodnie z wykazem publikacji (załącznik 3):

[W1], [W2], [W3]... - publikacje stanowiące osiągnięcie naukowe zgodnie z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.). Publikacje w czasopismach indeksowanych w Web of Science i Journal Citation Reports,

[N1], [N2], [N3]... - publikacje stanowiące osiągnięcie naukowe zgodnie z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.). Publikacje w czasopismach (wydawnictwach) nie indeksowanych w Web of Science, z punktacją MNiSW,

[K1], [K2], [K3]... - publikacje stanowiące osiągnięcie naukowe zgodnie z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.). Publikacje konferencyjne nie indeksowanych w Web of Science, bez punktacji MNiSW

[R1], [R2], [R3]... - bibliografia tematyki.

IMIIONA I NAZWISKO: Marcin Stanisław Baszyński

2 POSIADANE DYPLOMY I STOPNIE NAUKOWE

Dyplom mgr inż. Elektrotechniki uzyskany w 2001 r. Wydział Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Elektroniki, Akademia Górniczo- Hutnicza w Krakowie.

Dyplom doktora nauk technicznych w specjalności Elektrotechnika, uzyskany 1 lipca 2008 r. Wydział Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Elektroniki, Akademia Górniczo- Hutnicza w Krakowie. Rozprawa doktorska uzyskała wyróżnienie Rady Wydziału.

Tytuł rozprawy: Jednofazowy prostownik wielokomórkowy z sinusoidalnym prądem źródła.

Promotor: prof. dr hab. inż. Stanisław Piróg

Rezenzenci: prof. dr hab. inż. Marek Hartman

dr hab. inż. Andrzej Senderski prof. AGH

3 INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH

1.12.2006 - 30.09.2008: Wydział Elektrotechniki Automatyki Informatyki i Elektroniki, Akademia Górniczo- Hutnicza w Krakowie na stanowisku asystenta

1.10.2008 - do chwili obecnej: Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Akademia Górniczo- Hutnicza w Krakowie na stanowisku adiunkta

4 WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO

wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.)

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Jako osiągnięcie naukowe, uzyskane po otrzymaniu stopnia doktora, przedstawiam cykl publikacji powiązanych tematycznie, zatytułowany:

„*Nowe układy zasilania oraz sterowania silników BLDC*”

4.2. Wykaz publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe

- [W1] **Baszyński Marcin**, "A model of the three-phase bridge rectifier with sinusoidal source current using FPGA implementation", *Przegląd Elektrotechniczny* nr. 3/2009, str.: 36-41, IF= 0,196, MNiSW= 6; lista B czasopism MNiSW, czasopismo indeksowe w JCR,
- [W2] **Baszyński Marcin**, "A model of the single-phase multicell rectifier with sinusoidal source current using FPGA implementation", *Przegląd Elektrotechniczny* nr. 10/2009, str.: 76-82, IF= 0,196, MNiSW= 6; lista B czasopism MNiSW, czasopismo indeksowe w JCR,
- [W3] **Baszyński Marcin**, "Low cost, high accuracy real-time simulation used for rapid prototyping and testing control algorithms on example of BLDC motor", *Archives of Electrical Engineering*, 2016 Vol.: 65 iss. 3, str.: 463–479, (publikacja indeksowana w Web of Science), MNiSW= 15; lista B czasopism MNiSW, czasopismo nie indeksowe w JCR,
- [W4] Stala Robert, Piróg Stanisław, **Baszyński Marcin**, Mondzik Andrzej, Penczek Adam, Czekoński Jarosław, Gąsiorek Stanisław, "Result of Investigation of Multicell Converter With Balancing Circuit – Part I", *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, nr. 6/2009, Vol.: 57 no. 7, str.: 2610- 2619, IF= 4,678; MNiSW= 24; lista A czasopism MNiSW, czasopismo indeksowe w JCR,,
- [W5] Stala Robert, Piróg Stanisław, Mondzik Andrzej, **Baszyński Marcin**, Penczek Adam, Czekoński Jarosław, Gąsiorek Stanisław, „Result of Investigation of Multicell Converter With Balancing Circuit – Part II”, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, nr. 6/2009, Vol.: 57 no. 7, str.: 2620- 2628, IF= 4,678; MNiSW= 24; lista A czasopism MNiSW, czasopismo indeksowe w JCR,
- [N6] **Baszyński Marcin**, Piróg Stanisław, "Determining the mechanical losses in a high-speed motor on the example of a flywheel energy storage system", *Archives of Electrical Engineering*, — 2012 Vol.: 61 no. 3 str.: 299–313, IF= 0,0, MNiSW= 6; lista B czasopism MNiSW, czasopismo nie indeksowe w JCR,
- [W7] **Baszyński Marcin**, Piróg Stanisław, "A Novel Speed Measurement Method for a High-Speed BLDC Motor Based on the Signals From the Rotor Position Sensor", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2/2014, Vol.: 10 no. 1, str.: 84–91, IF= 0,0 (IF za rok 2013: 8,785, IF za rok 2015: 4,708); MNiSW= 50; lista A czasopism MNiSW, czasopismo indeksowe w JCR,
- [N8] Piróg Stanisław, **Baszyński Marcin**, Siostrzonek Tomasz: „Energy Storage”- „The High-Speed Flywheel Energy Storage System”. 2010, SCIYO ISBN 978-953-307-119-0, str.: 37-67, IF= 0,0, MNiSW= 7; czasopismo nie indeksowe w JCR,

- [N9] **Baszyński Marcin**, Piróg Stanisław, „Zmodyfikowana modulacja unipolarna dla silnika BLDC wraz z układem sterowania”, *Przegląd Elektrotechniczny*, 5/2016, str.: 114–119, IF= 0,0; MNiSW= 14; lista B czasopism MNiSW, czasopismo nie indeksowe w JCR,,
- [W10] **Baszyński Marcin**, Piróg Stanisław, “Unipolar Modulation for a BLDC Motor with Simultaneously Switching of Two Transistors With Closed- Loop Control for Four Quadrant Operation”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 1/2018, Vol.: 14 no. 1, str.: 146–155, IF= 6,764 MNiSW= 45; lista A czasopism MNiSW, czasopismo indeksowe w JCR,
- [K11] **Baszyński Marcin**, “Sposób sterowania silnika BLDC o nieskojarzonych uzwojeniach”, Konferencja Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym "SENE 2017", Łódź, 22-24 listopada 2017, , IF= 0 MNiSW= 0.

4.3. Omówienie celu naukowego wymienionych prac i osiągniętych wyników

4.3.1. Wprowadzenie

W ostatnich latach coraz większą popularność zdobywają wysokoobrotowe silniki bezkomutatorowe (BLDC [R13], [R17], [R23], [R26], [R28], [R34], [R46], reluktancyjne [R15], [R16], [R31], [R32], indukcyjne [R1], [R10], [R12], [R22]) zasilane z specjalizowanych falowników, do których energia jest dostarczana przez sterowane zasilacze (jednofazowe i trójfazowe) [R3], [R11], [R12], [R14]. Zasilacze te zapewniają sinusoidalny przebieg prądu linii zasilającej, a w niektórych rozwiązaniach pełną także funkcję filtru aktywnego [R8], [R39] oraz kompensatora mocy biernej podstawowej harmonicznej. Wykonane w ten sposób układy napędowe wypierają tradycyjne wysokoobrotowe silniki komutatorowe. Wynika to z licznych zalet takiego rozwiązania:

- odporna na uszkodzenia konstrukcja wirnika o niskich kosztach wykonania,
- brak mechanicznego komutatora,
- wirnik jest wykonany w postaci jednolitego walca pozbawionego wystających elementów, co minimalizuje straty mechaniczne (aerodynamiczne) przy większych prędkościach obrotowych,
- wyższa sprawność niż silników komutatorowych,
- znacznie mniejsze gabaryty i masa,
- łatwość regulacji prędkości obrotowej,
- brak negatywnego oddziaływania na linię zasilającą i środowisko radioelektryczne (jeśli układ wyposażony jest w zasilacz sieciowy o podwyższonym współczynniku mocy).

Zalety tych silników powodują, że w wielu ośrodkach prowadzone są badania mające na celu uproszczenie sterowania, układu kontroli oraz zapewnienie im źródła zasilania ograniczającego negatywne oddziaływanie na linię zasilającą [R3], [R11], [R12], [R14].

Z wymienionych powodów zająłem się pracą badawczą poświęconą układom zasilania i sterowania wysokoobrotowych silników BLDC. W trakcie tych prac analizowałem układy zasilania jednofazowe (PFC) [W2], [W3] oraz trójfazowe z funkcją filtru aktywnego [W1], oraz silniki BLDC [N5], [W6], [N7]÷[N9], [W10]. Na potrzeby prac badawczych opracowałem metodę symulacji przekształtników energoelektronicznych w czasie rzeczywistym. Symulacje te były wykonywane w układzie FPGA (z stałoprzecinkową [W1] i zmiennoprzecinkową [W3] reprezentacją liczby).

Przedstawione w jednotematycznym cyklu publikacje obejmują: publikacje w czasopismach z listy JCR 7, publikacje w innych czasopismach 2 oraz rozdziałów w monografiach 1. Łączny Impact Factor tych prac, według stanu obecnego, wynosi 16,514, natomiast łączna liczba punktów, według aktualnej punktacji MNiSW, wynosi 197.

W 2014 w czasopiśmie IEEE Transactions on Industrial Informatics został opublikowany artykuł, którego byłem głównym autorem (60%). Artykuł został zakwalifikowany do druku w grudniu 2012r. Jest to czasopismo o wysokiej renomie, co przekłada się na wysoką punktację zarówno MNiSW (50 punktów za 2014, 45 punktów za 2016) jak i IP w roku 2013: 8,785, za rok 2015: 4,708, za rok 2016: 6,764. Niestety z przyczyn ode mnie niezależnych w roku wydania artykułu nie przyznano temu czasopismu IF (choć artykuł znajduje się liście WoS i był cytowany 16 razy). Od momentu udostępnienia go w bazie IEEE Xplore Digital Library (styczeń 2013) został pobrany z niej 2292 razy (źródło: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6423900/metrics>). Artykuł ten jest znaczącym osiągnięciem, ponieważ jest jednym z dwóch artykułów, o tak

wysokiej punktacji (50) opublikowanych przez pracowników Wydziału EAIiB w latach 2013- 2016 (według źródła: <https://www.eaiib.agh.edu.pl/publikacje/?pg=lista>)

Baza publikacji WEAIiB 2013-2016							
lista publikacji Zaloguj							
Wyszukaj słów:				Szukaj	Wyczyść filtry		
L.p.	Rok	Typ publikacji	Autorzy	Tytuł	Punkty	Katedra edytująca	Status
1	2013	artykuły z listy A i B	Stale Robert	A natural DC-link voltage balancing of diode-clamped inverters in parallel systems	50	KEIASPE	gotowe
2	2014	artykuły z listy A i B	Piróg Stanisław, Baszyński Marcin	A novel speed measurement method for a high-speed BLDC motor based on the signals from the rotor position sensor	50	KEIASPE	gotowe
3	2014	artykuły z listy A i B	Gałas Zbigniew, Warwick Tucker	On the structure of existence regions for sinks of the Hénon map	45	KKE	gotowe
4	2014	artykuły z listy A i B	Satya N. Majumdar, Sanjay Subhchandit, Grzegorz Schell, Kusmiercz Łukasz	First order transition for the optimal search time of Lévy flights with resetting	45	KAIiB	gotowe

4.3.2. Omówienie uzyskanych wyników

Przy obecnej komplikacji przekształtników energoelektronicznych i ich układów sterowania, niezbędne jest opracowanie narzędzi pozwalających na ich bezpieczne testowanie [R5], [R6], [R8], [R27], [R38], [R40]. Jest to szczególnie istotne w przekształtnikach sieciowych oraz wysokoobrotowych silnikach. W przypadku przekształtników sieciowych wynika, to z dużej mocy zwarcia w miejscu przyłączenia urządzenia do sieci, która w przypadku błędnego sterowania w najlepszym przypadku spowoduje tylko uszkodzenie tranzystorów. W wirującym wirniku szybkoobrotowego silnika zmagazynowana jest duża energia, która przy błędnym sterowaniu może doprowadzić do mechanicznego uszkodzenia silnika. Dlatego w swoich pracach zajmowałem się narzędziami, które pozwolą na testowanie układów sterowania przekształtników w środowisku możliwie najlepiej odzwierciedlającym rzeczywistość i pracujących w czasie rzeczywistym [R4], [R25], [R27].

W systemach symulacji w czasie rzeczywistym można wyróżnić dwie główne metody:

- układ sterowania oraz matematyczny model przekształtnika implementowany jest w jednym układzie FPGA. Wówczas wszystkie istotne dla układu sterowania sygnały (prądy, napięcia) są opisane za pomocą równań matematycznych i dyskretyzowane. Następnie równania te są implementowane w układzie FPGA wraz z układem regulacji przekształtnika za pomocą jednego z języków opisu sprzętu (HDL). Wymiana danych pomiędzy układem sterowania, a modelem odbywa się za pośrednictwem cyfrowych szyn danych,
- symulacja HiL (ang. Hardware in the Loop), fizyczny układ sterowania jest podłączany do symulatora. Jest to metoda najlepiej odzwierciedlająca rzeczywistość ponieważ układ sterowania jest implementowany w docelowym sterowniku, a symulator jest odpowiedzialny za model przekształtnika wraz z linią zasilania. Symulator na podstawie sygnałów sterujących tranzystorami (wypracowanymi przez układ sterowania) wyznacza przebiegi prądów i napięć. Sygnały te przez przetworniki D/A są konwertowane na wartości analogowe i wprowadzane do układu sterowania.

W pierwszej z wymienionych metod należy rozwiązać kilka istotnych problemów [R43], [R48]:

- analityczne opracowanie równań matematycznych opisujących zachowanie przekształtnika,

- zapewnienie odpowiedniej szybkość obliczeń,
- opracowanie metody zapewniającej dokładność obliczeń,
- przygotowanie wygodnego sposobu akwizycji danych do ich dalszej analizy.

W pracy [W1] na przykładzie trójfazowego prostownika sterowalnego przedstawiałem drogę przygotowania symulacji: od wyprowadzenia równań (opisujących chwilowe przebiegi prądów oraz napięć w zależności od stanów tranzystorów) do implementacji ich w układzie FPGA. W tym artykule omówione zostało, także użycie tego typu symulacji do badania trójfazowej pętli PLL służącej do synchronizacji z linią zasilającą. Na podstawie analizy algebraicznej oraz badań przeprowadzonych przy użyciu modelu wykazałem, że w określonych warunkach tego rodzaju pętla fazowa może doprowadzić do błędnej synchronizacji. Aby temu przeciwdziałać zaproponowałem dwie modyfikacje pętli PLL przeciwdziałające błędnej synchronizacji. Wykazałem również odporność proponowanego układu synchronizacji na odkształcenia napięcia synchronizującego.

W pracy [W2] podobnie, jak w [W1] przedstawiłem opracowaną metodykę wykonania symulacji w czasie rzeczywistym, ale na przykładzie jednofazowego prostownika o sinusoidalnym prądzie linii zasilającej, bazującego na topologii wielokomórkowej. Ponieważ przekształtniki wielokomórkowe wymagają złożonego sterowania oraz układu rezonansowego zapewniającego poprawny rozkład napięć na kondensatorach wewnętrznych, dlatego w [W2] przedstawiłem opracowany przeze mnie układ sterowania oraz pełny model matematyczny tego przekształtnika. W artykule tym przedstawiłem także opracowaną metodę akwizycji danych pomiarowych. Metoda ta pozwala na przesłanie danych z symulacji do komputera PC i ich dalszą analizę. Ponadto moduł komunikacyjny był użyty do symulacji starzenia się kondensatorów. Uzyskanie możliwości zmiany wartości elementów on-line był bardzo ważnym osiągnięciem, ponieważ w układzie opisywanym w [W2] układ rezonansowy był odpowiedzialny za utrzymanie poprawnego rozkładu napięć na kondensatorach wewnętrznych układu.

Rozwiązanie przedstawione w [W1] i [W2] bazowało na stałoprzecinkowej reprezentacji liczby rzeczywistej, dużo większą dokładność obliczeń zapewnia zmiennoprzecinkowy typ reprezentacji liczby. W pracy [W3] przedstawiłem porównanie dokładności reprezentacji liczby przy tej samej długości słowa, na którym opisana jest wartość. Na przykładzie równań opisujących silnik BLDC, omówiłem metodę ich dyskretyzacji z zastosowaniem zmiennoprzecinkowej arytmetyki implementowanej w układzie FPGA. Dzięki zastosowaniu zapisu liczby o podwójnej precyzji rozwiązałem problem dokładności w obliczeniach modelu, wynikający z propagacji błędów zaokrąglenia liczby stałoprzecinkowej.

Na podstawie analizy zachowania przekształtnika oraz doświadczeń z modelem układu wyznaczanym w czasie rzeczywistym opisanym w [W2] wykonany i przebadany został rzeczywisty prostownik sieciowy o sinusoidalnym prądzie linii zasilającej. Wyniki tej pracy zostały opublikowane w [W4]. W trakcie prac badawczych przyjęto, że funkcjonalność ma umożliwiać pracę przekształtnika w systemach zasilania wysokoobrotowych silników małej mocy. Dlatego opracowany przeze mnie układ sterowania prostownika pozwalał na uzyskanie sinusoidalnego prądu linii zasilającej współfazowego z napięciem (ma niwelować negatywne oddziaływanie falownika silnikowego na linię zasilającą poprzez uzyskanie jednostkowego współczynnika mocy) oraz pozwalał na dwukierunkowy przekaz energii (przekształtnik czterokwadratowy). Przedstawiony w [W4] przekształtnik oparto na topologii przełączalnych kondensatorów (ang. flying capacitors). W tego typu przekształtnikach dużym problemem jest utrzymanie

stałego podziału napięć na kondensatorach wewnętrznych, jest to szczególnie istotne w układach, w których prąd przepływający przez kondensatory nie utrzymuje stałej wartości (np. AC/DC). Szczegółowa analiza tego problemu została zawarta w pracy [W5].

Przy pracach nad układami sterowania i zasilania silników wysokoobrotowych BLDC używanych jako wirujący magazyn energii ważna jest identyfikacja strat, momentu strat mechanicznych oraz określenie momentu elektromechanicznego rozwijanego przez silnik. W pracy [N6] przedstawiłem opracowany pod kątem silników wysokoobrotowych sposób identyfikacji wymienionych parametrów. W tym artykule przedstawiłem, także modyfikację zamkniętego układu regulacji pozwalającą na kontrolowany zwrot energii do kondensatora obwodu pośredniczącego, z którego zasilana jest elektronika sterująca przekształtnikiem. Modyfikacja ta pozwala na kontrolowane zatrzymanie układu i ponowny rozruch w przypadku zaniku napięcia w linii zasilającej (ang. flying start). Przedstawione w [N6] badania zostały wykonane na sieciowy przekształtnik PFC oraz trójfazowym, trójfazowy falowniku.

W układzie regulacji napędu kluczową informacją jest jego prędkość wirowania. Zazwyczaj informacja o prędkości jest pozyskiwana na podstawie dodatkowego enkodera [R29], [R49], [R50] lub tachogeneratorsa [R42]. Alternatywną metodą wyznaczenia prędkości jest estymacja okresu wirowania, bazująca na jednym z sygnałów z czujników położenia wirnika [R30], [R33], [R47].

W [W7] przedstawiłem nowatorski algorytm wyznaczania prędkości wirowania pozwalający na zwiększenie częstotliwości pomiaru (częstotliwości sześć razy większa niż w tradycyjnych metodach [R47]) oraz niwelujący niedokładność montażu czujników położenia. Opracowanie tej metody było znaczącym osiągnięciem naukowym, ponieważ metoda znacząco poprawiała dynamikę napędu z silnikiem BLDC (w stosunku do innych sposobów pomiaru). Praca poświęcona tej metodzie została opublikowana w renomowanym czasopiśmie o międzynarodowym zasięgu (IEEE Transaction on Industrial Informatic) i była pobrana 2190 z bazy IEEE Xplore.

Podjęmowana przeze mnie problematyka przekształtników sieciowych oraz sterowania silnikami BLDC wynikała z mojego zainteresowania wirującymi magazynami energii FESS (ang. Flywheel Energy- Storage System). Układ kinetycznego magazynu energii jest bardzo złożonym systemem wymagający rozwiązania wielu problemów:

- konstrukcja wirującej masy powinna zapewnić maksymalną wartość zgromadzonej energii, nie powodując nadmiernego wzrostu masy układu napędowego (maksymalny moment bezwładności),
- układ regulacji musi mieć możliwość łatwego przejścia z pracy silnikowej do generatorowej,
- w dużych magazynach energii stosowane są dwa identyczne silniki, dlatego należy wyposażyć układ regulacji w możliwość kontroli rozkładu mocy obu silników oraz zapewnić mechanizm ograniczający tętnienia momentu,
- przyjęta metoda modulacji powinna ograniczać tętnienia momentu,
- należy zapewnić przekształtnikowi sieciowemu bezpieczne warunki startu.

W [N6] przedstawiłem algebraiczne rozwiązanie problemu kształtu wirującej masy, zapewniającego maksymalną gęstość zgromadzonej energii. W [N8] przedstawiłem analizę pracy przekształtnika dla dwóch silników BLDC pracujących jako napęd FESS. Na podstawie tej analizy zaproponowałem wprowadzenie przesunięcia fazowego do sygnałów PWM, co ogranicza tętnienia momentu pochodzące od składowej zmiennej

prądów poszczególnych silników. Zaproponowałem także, aby sterowanie maszyn realizować tak, aby do pewnego poziomu mocy pojedyncze maszyny np. 0,8 pracuje tylko jedna z nich, a po przekroczeniu tej wartości mocy obciążenie zostanie rozłożone równo na obie maszyny. Sterowanie takie ogranicza straty mocy w przekształtnikach, poprzez wyeliminowanie strat stałych jednego z przekształtników, przy małych obciążeniach oraz umożliwia schłodzenie maszyny nieobciążonej.

W klasycznej modulacji unipolarnej przejście z pracy silnikowej do generatorowej jest realizowane poprzez zmianę logiki komutacji (np. na podstawie znaku uchybu prędkości). Nie ma możliwości przejścia z pracy silnikowej do generatorowej (lub odwrotnie) tylko przez zmianę wartości współczynnika wypełnienia impulsów [R35], [R41], [R45]. Jest to utrudnieniem przy realizacji układu sterowania wirującego magazynu energii, aby rozwiązać ten problem zaproponowałem w [N9] modyfikację klasycznej modulacji unipolarnej polegającą na wprowadzeniu dodatkowych impulsów sterujących i jak wykazałem w [N9] modyfikacja ta pozwala na przejście z pracy silnikowej do generatorowej, poprzez zmianę wartości współczynnika wypełnienia impulsów. Dodatkowo, aby uprościć układ sterowania silnika BLDC i uczynić go identycznym z układem sterowania silnika komutatorowego prądu stałego zaproponowałem w [N9] prostownik logiczny. Celem prostownika logicznego jest modyfikowanie znaku prądów fazowych silnika tak, aby przy pracy silnikowej wartość prądu była dodatnia, natomiast ujemna przy pracy generatorowej. Modyfikacja znaku prądu jest wykonywana na podstawie sygnałów o położeniu wirnika (np. sygnałów z czujników Halla). Ponieważ hamowanie silnika BLDC przy zastosowaniu modulacji unipolarnej odbywa się pod wpływem SEM, dlatego nie ma możliwości wymuszenia maksymalnego momentu hamującego przy prędkościach bliskich zeru. Aby w trakcie całego procesu hamowania wymuszać stałą wartość prądu (momentu) zaproponowałem przełączenie na modulację bipolarną w chwili, gdy spada wartość prądu silnika. W [N9] przedstawiłem implementację tej metody oraz przedstawiłem wyniki badań rzeczywistego napędu potwierdzające poprawność metody.

W modulacji PWM można wyróżnić sześć różnych technik sterowania: H-PWM-L-ON [R35], [R41], [R45], H-ON-L-PWM [R2], [R35], [R36], [R41], [R45], [R47], PWM-ON [R19], [R20], ON-PWM [R44], PWM-ON-PWM [R9], [R24] i H-PWM-L-PWM. Pierwsze pięć wymienionych technik PWM to modulacje unipolarne, natomiast ostatnia to modulacja bipolarna. Przykładowo opis H-PWM-L-ON oznacza, że górny tranzystor gałęzi falownika jest impulsowany (przez $T/3$), natomiast dolny tranzystor drugiej przewodzącej gałęzi jest trwale zwarty (przez $T/3$). Wadą tej metody jest nierównomierne nagrzewanie się tranzystorów. W przypadku techniki PWM-ON, każdy z tranzystorów na początku okresu przewodzenia prądu przez $T/6$ jest modulowany, natomiast przez pozostały okres $T/6$ jest trwale załączony. Wszystkie z wymienionych metod modulacji [R2], [R9], [R19], [R20], [R24], [R35], [R36], [R41], [R44], [R46] charakteryzują się tym, że częstotliwość składowej zmiennej prądu silnika jest równa częstotliwości impulsowania tranzystorów. Dlatego częstotliwość tętnień momentu silnika jest równa częstotliwości przełączania łączników półprzewodnikowych. W pracy [W10] przedstawiałem rozwiązanie, które dwukrotnie zwiększa częstotliwość składowej zmiennej prądu nie zwiększając częstotliwości przełączeń tranzystorów. Zwiększenie częstotliwości składowej zmiennej prądu niweluje, także wartość tętnień momentu. W tej pracy przedstawiłem, także kompleksowe rozwiązanie problemu czterokwadrantowej pracy silnika BLDC. Jest to ważne osiągnięcie, ponieważ na przestrzeni ostatnich lat można znaleźć artykuły poświęcone układom kontroli prędkości umożliwiającym

czterokwadrantową pracę silnika BLDC. Niestety większość artykułów nie przedstawia kompletnego rozwiązania, w którym układ sterowania dokonuje zmiany kierunku wirowania, oraz hamowania z odzyskiem energii w obu kierunkach wirowania. W [R7] opisują układ sterowania silnikiem windy, w którym nie ma pracy generatorowej, ponieważ zastosowano przekładnię ślimakową. Przy zmianie kierunku wirowania autorzy [R7] proponują zmianę przewodzących par tranzystorów. Inne podejście do hamowania odzyskowego proponowane w [R18] zakłada odłączenie mostka tranzystorowego na czas hamowania i podłączenie zwykłego prostownika diodowego, który ładuje akumulator. W artykule [W10] zaproponowany został kompletny układ sterowania umożliwiający czterokwadrantową pracę silnika BLDC. Szczegółowo omówiono problem zmiany kierunku wirowania silnika. Dla zachowania spójności układu regulacji zaproponowano zmianę przypisania sygnałów z czujników położenia. Natomiast układ regulacji został tak zmodyfikowany, aby umożliwić łatwe przejście z pracy silnikowej do generatorowej obu kierunkach wirowania (praca czterokwadrantowa).

W przekształtnikach zasilających wysokoobrotowe silniki stosowanych w wirujących magazynach energii istotne jest ograniczenie strat elektrycznych, dzięki czemu zwiększa się sprawność magazynu energii. W [K11] przedstawiłem opracowany przeze mnie układ zasilania silnika BLDC, pozwalający na zmniejszenie o połowę napięcia na kondensatorze obwodu pośredniczącego (w stosunku do klasycznych metod zasilania) przy zachowaniu nominalnej prędkości silnika. Ograniczenie napięcia obwodu pośredniczącego powoduje zmniejszenie strat występujących w trakcie przełączania tranzystorów. Przedstawione w [K11] wyniki są wstępnymi wynikami prac, aktualnie pracuję na publikacją tego tematu w renomowanym czasopiśmie.

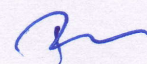
4.3.3. Podsumowanie

Do najważniejszych osiągnięć naukowych uzyskanych w ramach prowadzonych badań i przedstawionych w jednotematycznym cyklu publikacji należą:

- opracowanie szybkich i dokładnych metod symulacji przekształtników energoelektronicznych w czasie rzeczywistym. W tym metoda pozwalająca na wykonanie opisu modelu, przy pomocy zmiennoprzecinkowej reprezentacji liczby rzeczywistej,
- opracowanie nowatorskiej metody pomiaru prędkości silnika BLDC odpornej na niedokładny montaż czujników oraz zapewniającej wysoką częstotliwość pomiaru,
- opracowanie nowej metody modulacji falownika dla silnika BLDC minimalizującej tętnienia momentu, poprzez zwiększenie częstotliwości składowej zmiennej prądu bez zwiększania częstotliwości przełączeń tranzystorów,
- opracowanie nowego sposobu zasilania silników BLDC pozwalającego na dwukrotne zmniejszenie napięcia obwodu pośredniczącego z zachowaniem nominalnej prędkości wirowania.

5. Bibliografia

- [R1] Agamloh E. B., Cavagnino A., Vaschetto S., "Accurate Determination of Induction Machine Torque and Current Versus Speed Characteristics", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.: 53, Issue: 4, str.: 3285 – 3294, (2017),
- [R2] Becerra R. C., Jahns T. M., Ehsani M., "Four-quadrant sensorless brushless ECM drive" in Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf., Mar. 1991, str.: 202 – 209, (1991),
- [R3] Bist V., Singh B., "A PFC-Based BLDC Motor Drive Using a Canonical Switching Cell Converter", IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol.: 10, Issue: 2, str.: 1207 – 1215, (2014),
- [R4] Blanchette H. F., Ould-Bachir T., David J. P., "A State-Space Modeling Approach for the FPGA-Based Real-Time Simulation of High Switching Frequency Power Converters", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.: 59, Issue: 12, str.: 4555 – 4567, (2012),
- [R5] Chen Y., Dinavahi V., "Digital Hardware Emulation of Universal Machine and Universal Line Models for Real-Time Electromagnetic Transient Simulation", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.: 52, Issue: 59, str.: 1300- 1309, (2012),
- [R6] Chong Y. J., Parameswaran S., "Configurable Multimode Embedded Floating-Point Units for FPGAs", IEEE Trans. on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, Vol.: 19, Issue: 11, str.: 2033- 2044, (2011),
- [R7] Das D., Kumaresan N., Nayanar V., Sam K. N., Gounden N. A., "Development of BLDC Motor-Based Elevator System Suitable for DC Microgrid", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol.: 21, Issue: 3, str.: 1552 – 1560, (2016),
- [R8] Dufour C., Belanger J., Lapointe V., "FPGA-based ultra-low latency HIL fault testing of a permanent magnet motor drive using RT-LABXSG" in Proc. IEEE Int. Power Sys. Tech. Conf., str.: 1 - 7, (2008),
- [R9] Fang J., Li H., Han B., "Torque ripple reduction in BLDC torque motor with nonideal back EMF", IEEE Trans. on Power Electron., Vol.: 27, Issue: 11, str.: 4630–4637, (2012),
- [R10] Fnaiech M. A., Khadraoui S., Nounou H. N., Nounou M. N., Guzinski J., Aburub H., Datta A., Bhattacharyya S. P., "A Measurement-Based Approach for Speed Control of Induction Machines", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol.: 2, Issue: 2, str.: 308 – 318, (2014),
- [R11] Foroozeshfar R., Adib E., "New three-phase discontinuous voltage mode cuk power-factor correction converter for low-power applications", IET Power Electronics, Vol.: 6, Issue: 5, str.: 946 – 953, (2013),
- [R12] Gonzalez-Ramirez M., Cruz-Villar C. A., "Variable speed drive with PFC front-end for three-phase induction motor", Electronics Letters, Vol.: 53, Issue: 16, str.:1139 – 1140, (2017),
- [R13] Gurumurthy S. R., Agarwal V., Sharma A., "Optimal energy harvesting from a high-speed brushless DC generator-based flywheel energy storage system", IET Electric Power Applications, Vol.: 7, Issue: 9, str.: 693 – 700, (2013),
- [R14] Ho C. N. M., Li R. T., Siu K. K. M., "Active Virtual Ground—Bridgeless PFC Topology", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.: 32, Issue: 8, str.: 6206 – 6218, (2017),
- [R15] Huang S. D., Cao G. Z., He Z. Y., Pan J. F., Duan J. A., Qian Q. Q., "Nonlinear Modeling of the Inverse Force Function for the Planar Switched Reluctance Motor Using Sparse Least Squares Support Vector Machines", IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol.: 11, Issue: 3, str.: 591 – 600, (2015),



- [R16] Kojima T., Doncker R. W., "Impact of Zero-Volt Loop Control on Efficiency of Switched Reluctance Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.: 53, Issue: 4, str.: 3621 – 3634, (2017),
- [R17] Kokawalage H., Ransara S., Madawala U. K., Liu T. H., "Buck converter based model for a brushless DC motor drive without a DC link capacitor", IET Power Electronics, Vol.: 8, Issue: 4, str.: 628 – 635, (2015),
- [R18] Kumar V. V., Udayakumar V., Muruganandham J., "Speed control of BLDC motor for four quadrant operation without loss of power", 2015 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC), (2015),
- [R19] Lai Y. S., Shyu F. S., Chang Y. H., "Novel loss reduction pulse-width modulation technique for brushless DC motor drives fed by MOSFET inverter" IEEE Trans. on Power Electron., Vol.: 19, Issue: 6, str.: 1646 – 1656, (2004),
- [R20] Lai Y. S., Shyu F. S., Chang Y. H., "Novel pulse-width modulation technique with loss reduction for small power brushless DC motor drives" in Proc. Conf. Rec. IEEE IAS Ann. Meet., 2002, str.: 2057 – 2064, (2002),
- [R21] Lee T. L., Hu S. H., "An Active Filter With Resonant Current Control to Suppress Harmonic Resonance in a Distribution Power System", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol.: 4, Issue: 1, str.: 198 – 209, (2016),
- [R22] Lefebvre G., Gauthier J. Y., Hijazi A., Lin-Shi X., Digarcher V. L., "Observability-Index-Based Control Strategy for Induction Machine Sensorless Drive at Low Speed", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.: 64, Issue: 3, str.: 1929 – 1938, (2017),
- [R23] Li H., Li W., Ren H., "Fault-Tolerant Inverter for High-Speed Low-Inductance BLDC Drives in Aerospace Applications", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.: 32, Issue: 3, str.: 2452 – 2463, (2017),
- [R24] Li Q., Huang H., Yin B., "The study of PWM methods in permanent magnet brushless DC motor speed control system" in Proc. Int. Conf. Electr. Mach. Syst., Oct. 2008, str.: 3897–3900.
- [R25] Lucia Ó., Urriza I., Barragan L. A., Navarro D., Jimenez Ó., Burdio J. M., "Real-Time FPGA-Based Hardware-in-the-Loop Simulation Test Bench Applied to Multiple-Output Power Converters", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.: 47, Issue: 2, str.: 853 – 860, (2011),
- [R26] Luo H., Krueger M., Koenings T., Ding S. X., Dominic S., Yang X., "Real-Time Optimization of Automatic Control Systems With Application to BLDC Motor Test Rig", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.: 64, Issue: 5, str.: 4306 – 4314, (2017),
- [R27] Myaing A., Dinavahi V., "FPGA-Based Real-Time Emulation of Power Electronic Systems With Detailed Representation of Device Characteristics", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.: 58, Issue: 1, str.: 358- 368, (2011),
- [R28] Naseri F., Farjah E., Ghanbari T., "An Efficient Regenerative Braking System Based on Battery/Supercapacitor for Electric, Hybrid, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles With BLDC Motor", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.: 66, Issue: 5, str.: 3724 – 3738, (2017),
- [R29] Nguyen T. D., Tseng K. J., Zhang S., Nguyen H. T., "On the modeling and control of a novel flywheel energy storage system", Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium, str.: 1395 - 1401,
- [R30] Park B. G., Lee K. J., Kim R. Y., Kim T. S., Ryu J. S., Hyun D. S., "Simple Fault Diagnosis Based on Operating Characteristic of Brushless Direct-Current Motor Drives", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.: 58, Issue: 5, str.: 1586 - 1593, (2011),

- [R31] Peng F., Ye J., Emadi A., "An Asymmetric Three-Level Neutral Point Diode Clamped Converter for Switched Reluctance Motor Drives", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.: 32, Issue: 11, str.: 8618 – 8631, (2017),
- [R32] Peng F., Ye J., Emadi A., Huang Y., "Position Sensorless Control of Switched Reluctance Motor Drives Based on Numerical Method", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.: 53, Issue: 3, str.: 2159 – 2168, (2017),
- [R33] Pirog S., Baszynski M., Siostrzonek T., "Energy Storage- The High- Speed Flywheel Energy Storage System", SCIYO str.: 37 - 67.
- [R34] Ransara H. K. S., Madawala U. K., "A Torque Ripple Compensation Technique for a Low-Cost Brushless DC Motor Drive", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.: 62, Issue: 10, str.: 6171 – 6182, (2017),
- [R35] Seiko Epson Corp., "Brushless dc motor without position sensor and its controller", E.P. Patent 0 553 354 B1, (1993),
- [R36] Shao J., Nolan D., Teissier M., Swanson D., "A novel microcontroller based sensorless brushless DC (BLDC) motor drive for automotive fuel pumps" in Proc. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.: 39, Issue: 6, str.: 1734 – 1740, (2013).
- [R37] Shu Z., Lin H., Ziwei Z., Yin X., Zhou Q., "Specific order harmonics compensation algorithm and digital implementation for multi-level active power filter", IET Power Electronics, Vol.: 10, Issue: 5, str.: 525 – 535, (2017),
- [R38] Sohn J., Swartzlander E.E., "Improved Architectures for a Fused Floating-Point Add-Subtract Unit", IEEE Trans. on Circuits and Systems, Vol.: 59, Issue: 10, str.: 2285 - 2291, (2012),
- [R39] Stala R., Stawiarski L., "Real-time models of PV arrays implemented in FPGAs", Przegląd Elektrotechniczny, Vol.: 86, Issue: 2, str.: 358 - 363, (2010).
- [R40] Stala R., Szarek M., "Energy Losses Estimation of Photovoltaic System Based on the FPGA Real-Time Simulation", Przegląd Elektrotechniczny, Vol.: 86, Issue: 2, str.: 364 - 369, (2010),
- [R41] Su G. J., McKeever J. W., "Low-cost sensorless control of brushless DC motors with improved speed range" IEEE Trans. on Power Electron., Vol.: 19, Issue: 2, str.: 296 – 302, (2004),
- [R42] Subkhan M., Komori M., "New Concept for Flywheel Energy Storage System Using SMB and PMB", IEEE Trans. Applied Superconductivity, Vol.: 21, Issue: 3, str.:1485 - 1488, (2011),
- [R43] Subrahmanya V., Oruganti R. V., Bubshait A. S., Dhanikonda V. S., Simões M. G., "Real-time control of hybrid active power filter using conservative power theory in industrial power system", IET Power Electronics, Vol.: 10, Issue: 2, str.: 196 – 207, (2017),
- [R44] Tokyo Shibaura Electric Co., "Drive control apparatus for brushless DC motor and driving method therefore" U.S. Patent 5 491 393, (1996),
- [R45] Tokyo Shibaura Electric Co., "Inverter and air conditioner controlled by the same" U.S. Patent 5 486 743, (1996),
- [R46] Valle R. L., de Almeida P. M., Ferreira A. A., Barbosa P. G., "Unipolar PWM predictive current-mode control of a variable-speed low inductance BLDC motor drive", IET Electric Power Applications, Vol.: 11, Issue: 5, str.: 688 – 696, (2017),
- [R47] Varghese R., Kottalil A. M., Kumar S. N., "A Novel Speed Measurement Technique and Speed Control of Five Phase BLDC Motor on a 16-Bit Microcontroller Platform", International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol.: 3, Issue:5, str.: 554 - 562, (2014),

- [R48] Wang C., Li W., Belanger, J., "Real-time and faster-than-real-time simulation of Modular Multilevel Converters using standard multi-core CPU and FPGA chips", Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE , str.: 5405 – 5411, (2013),
- [R49] Zhang C., Tseng K. J., Nguyen T.D., Wan J., Zhao G., "Control system design and implementation of a partially-self-bearing flywheel energy storage system", Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2011 6th IEEE Conference, str.: 2039 – 2045, (2011),
- [R50] Zhou L., Qi Z., "Modeling and Control of a Flywheel Energy Storage system for Uninterruptible Power Supply", Sustainable Power Generation and Supply. International Conference Supergen 09, str.: 1 – 6, (2009).