

Bogdan FABIAŃSKI*

NAPĘD SILNIKA RELUKTANCYJNEGO PRZEŁĄCZALNEGO O PODWYŻSZONYM BEZPIECZEŃSTWIE PRACY I EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ

Artykuł prezentuje autorską konstrukcję napędu silnika reluktancyjnego przełączalnego dla zastosowań w urządzeniach AGD. Zaproponowane rozwiązanie podparto analizą literatury w aspektach tak teoretycznych jak i praktycznych. Jako wprowadzenie przybliżono charakterystykę napędów z silnikiem SRM, której indywidualność stanowi o atrakcyjności tego typu napędów oraz o motywacji dla prowadzenia badań w ich zakresie. Opisano poszczególne moduły składowe systemu oparte na aktualnych rozwiązaniach układowych. W projekt wpisano założenia minimalizacji zakłóceń elektromagnetycznych, zwiększenia efektywności przetwarzania energii elektrycznej oraz zastosowanie redundantnego systemu bezpieczeństwa – także w oparciu o specjalizowane peryferia jednostki mikroprocesorowej. Punkt poświęcony badaniom zawiera zestaw przykładowych oscylogramów potwierdzających poprawność konstrukcji w zakresie pracy zasilacza w topologii *flyback*, aktywnego PFC oraz napędu jako układ regulacji prędkości obrotowej. Artykuł podsumowano wskazując kierunki dalszych badań.

1. WPROWADZENIE

1.1. Cel i motywacja

Artykuł powstał na bazie prac w ramach grantu „Proszkowe obwody magnetyczne w uniwersalnych napędach elektrycznych”. Jednym z jego zadań było wykonanie prototypu napędu silnika reluktancyjnego przełączalnego (SRM) mającego zastosowanie w konstrukcji urządzeń AGD. Wynikają z tego założenia zwartej budowy, niezawodności, bezpieczeństwa pracy, dopasowania zasilania do parametrów sieci energetycznej, energooszczędności, dostępności elementów na rynku oraz zgodności z obowiązującymi normami.

Celem niniejszej publikacji jest przedstawienie projektu i konstrukcji napędu SRM spełniającego powyższe założenia. Realizacja kompletnego napędu silnika stanowi złożone zagadnienie projektowe oraz konstrukcyjne. Napędy te wkraczają w okres gwałtownego rozwoju, zastosowań w komercyjnych rozwiązaniach stąd

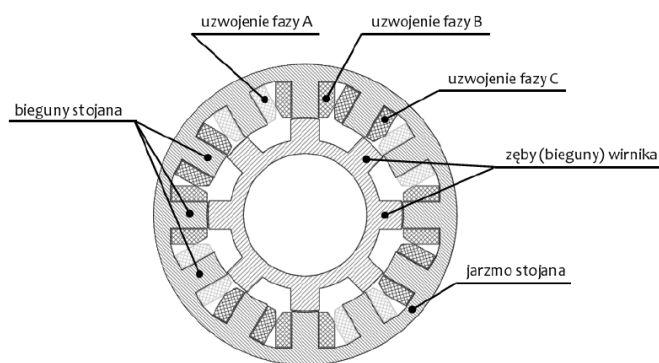
* Politechnika Poznańska.

trudno o poszukiwanie wzorca w tym zakresie. Mimo wszystko napędy SRM stosowane w typowych urządzeniach AGD zdążyły zdobyć renomę wydajnych oraz bezawaryjnych. Powyższe nobilituje je do implementacji w drogich, profesjonalnych liniach produktów.

Ciągły rozwój złożoności i miniaturyzacji układów scalonych, w ostatnim czasie także w zakresie integracji mikro- i energoelektroniki pozwala na autonomiczną realizację zadań przetwarzania energii przy redukcji ilości komponentów układowych. W konstrukcji wykorzystano najnowsze osiągnięcia na tym polu.

1.2. Silnik SRM

Silniki reluktancyjne przełączalne (SRM, ang.: „Switched Reluctance Motor”) ze względu na swą specyfikę konstrukcji i zasadę działania stanowią wspólnie o nieprzeciętnym potencjale zastosowań w układach napędowych.



Rys. 1. Schematyczny przekrój poprzeczny badanego silnika SRM 12/8

Monolityczna konstrukcja wirnika jak i stosunkowo prosta stojana sprawiają, że potencjalne koszty wytwarzania jednostkowego w produkcji masowej są bezkonkurencyjne (w porównaniu z konwencjonalnymi silnikami). Jednocześnie napędy SRM umożliwiają osiąganie dużej sprawności energetycznej w szerokim zakresie prędkości obrotowej – od 75 [%] do nawet 94 [%] [1,2]. Uniwersalność napędów SRM wpływa na coraz szersze zastosowanie zarówno w przemyśle jak i aplikacjach powszechnego użytku [3]. Silniki reluktancyjne umożliwiają pracę w trudnych warunkach otoczenia, przy wysokiej wilgotności, temperaturze czym zapewniają sobie coraz większy udział w rynku maszyn roboczych, trakcyjnych, pompach, wentylatorach.

Podstawowymi wadami silników SRM są: duże wahania momentu obrotowego, stosunkowo wysoki poziom generowanego hałasu oraz konieczność stosowania złożonych algorytmów sterowania. W praktyce nie spotyka się otwartych pętli

regulacji prędkości napędu SRM ze względu na stabilność i efektywność energetyczną [4].

Osobliwość silnika SRM stanowi o kontraście jego prostej z założenia konstrukcji i filozofii algorytmu sterowania do liczby kombinacji rozwiązań układowych w ostatecznej implementacji [5].

Maszyną w badanym napędzie był silnik w topologii 12/8, jak to zaprezentowano na schemacie z rysunku 1. Podstawowe, elektromagnetyczne równania ruchu dla modelu silnika są proste i zdefiniowane następująco:

$$E = \frac{\partial W_C}{\partial \theta \partial i} \omega \approx \frac{dL(\theta)}{d\theta} i \omega \quad (1)$$

$$T = \frac{\partial W_C}{\partial \theta} \approx \frac{1}{2} \frac{dL(\theta)}{d\theta} i^2 \quad (2)$$

gdzie: E – siła elektromotoryczna, W_C – koenergia pola magnetycznego uzwojenia fazy, θ – kąt obrotu, i – prąd fazowy, ω – prędkość obrotowa, L – indukcyjność uzwojenia fazy silnika.

W bardziej rozbudowanych modelach wprowadza się w równaniu strumieniowo-prądowym składową funkcję $\text{sat}(i)$ uwzględniającą zależność $L = f(i)$ [6]. W ogólnym przypadku, występujące w rzeczywistości nieliniowości $L(\theta)$ i $L(i)$ wymagają zastosowania szybkiego toru regulacji prądów fazowych celem utrzymania stałego momentu elektromagnetycznego T , co zostało uwzględnione w projekcie napędu.

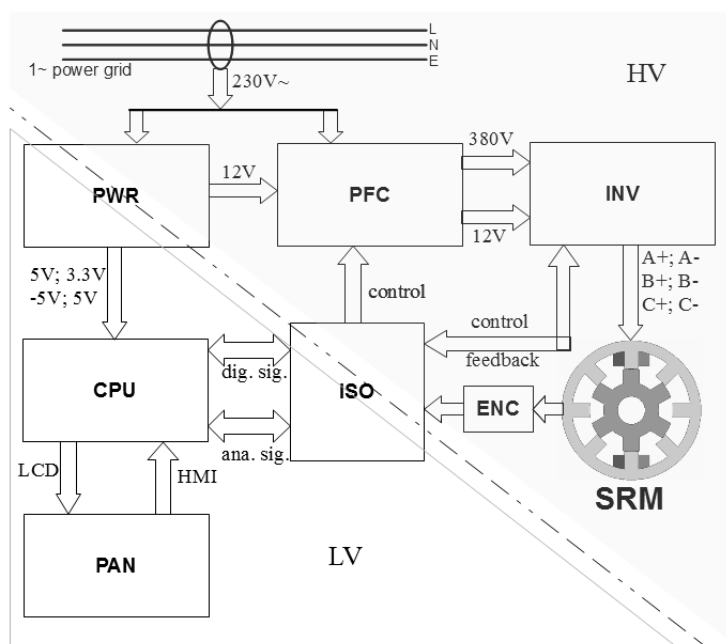
2. STRUKTURA NAPĘDU

2.1. Wstęp

Omówione wcześniej założenia konstrukcyjne (w szczególności bezpieczeństwo i niezawodność pracy) uwzględniono w zaproponowanym schemacie ideowym z rysunku 1. Dla uelastyczenia konstrukcji – ważną w aspekcie badawczo-rozwojowym zaproponowano modułarne rozwiązanie. Odpowiednie interfejsy integrują poszczególne bloki w funkcjonalną całość, z której są wyróżniane:

- PFC: zasilacz mocy z wbudowaną funkcjonalnością aktywnej korekcji współczynnika mocy,
- PWR: wielostopniowy zasilacz dla stopni pośrednich mocy oraz separowany galwanicznie dla układu sterowania,
- ISO: płyta separacji galwanicznej,
- CPU: sterownik mikroprocesorowy z układami towarzyszącymi,
- PAN: panel sterowania,
- INV: przekształtnik energoelektroniczny.

Modułowa struktura umożliwia łatwą identyfikację parametrów pracy oraz wprowadzanie korekt w konstrukcji bez konieczności ingerencji w cały system.



Rys. 2. Struktura autorskiego napędu sinika SRM

Schemat ogólny sterownika z rysunku 1 jest efektem rozważań mających na celu osiągnięcie zadowalającej separacji logicznej, geometrycznej i galwanicznej bloków będących potencjalnym źródłem zakłóceń od bloków szczególnie wrażliwych na takie oddziaływanie. Już na etapie koncepcji uwzględniono minimalizację geometrycznych pętli prądowych, długości ścieżek zasilających, całkowitą separację galwaniczną części wysoko i niskonapięciowej (zaznaczoną schematycznie przerywaną linią), geometryczną minimalizację bliskości i współbieżności torów wysokoprądowych oraz sterujących. [5]

W kolejnych akapitach podpunktu 2.2 zostaną przybliżone aspekty konstrukcyjne każdego z modułów.

2.2. Moduły składowe

Moduł PFC zawiera w sobie zarówno złożony wejściowy filtr pasywny jak i aktywny układ korekcji współczynnika mocy oparty na przetwornicy podwyższającej napięcie w trybie przewodzenia ciągłego prądu (*HiperPFS729*), którego zadaniem jest zapewnienie zgodności jakości poboru energii z sieci z

normą europejską EN61000-3-2 klasy C i D. Dodatkowo uzyskano stabilizowane napięcie w obwodzie DC przekształtnika. Poza zastosowaniem przetwornicy impulsowej o dużej sprawności energetycznej w konstrukcji użyto aktywny układ (*Cap007*) odłączający rezystory rozładowujące kondensator filtra wejściowego będące źródłem stałych strat energetycznych. Płytę PFC wyposażono w przełącznik bezpieczeństwa zamykającym obwód głównego napięcia zasilającego, którego cewka sterująca poza sygnałem z jednostki centralnej połączona jest w szereg z wyłącznikiem bezpieczeństwa. Przewidziano możliwość wyłączenia układu PFC z obwodu zasilania z poziomu układu sterowania.

Zaproponowana konstrukcja wymaga dostarczenia wielu poziomów napięć zarówno dla sekcji przetwarzania energii (HV) jak i sterującej (LV). Moduł zasilania niskimi napięciami PWR oparto o impulsowy zasilacz w topologii „flyback” z wielokrotnymi wyjściami. Przy niewielkich wymiarach i masie zapewnia separowane zasilanie (20 [W]) dla stopni pośrednich mocy oraz dla układu sterowania z oddzielnymi sekcjami: cyfrową i analogową. Zasadniczymi elementami zasilacza są: wejściowy filtr pasywny, układ sterujący *TNY278* z wbudowanym kluczem energoelektronicznym, izolowany optycznie obwód sprzężenia zwrotnego, dedykowany transformator impulsowy oraz wyjściowe stopnie filtrujące LC.

Moduł przekształtnika energoelektronicznego oparto o konstrukcję mostka asymetrycznego 3-fazowego. Zastosowano prosty obwód filtrujący przepięcia dren-źródło RDC [7] oraz asymetryczny tor sygnałów sterujących o znacznie niższej impedancji obwodu rozładowującego pojemność bramki tranzystora [8]. Dodatkowo rozproszone 3 kondensatory filtrujące w pobliżu kluczy energoelektronicznych od strony szyny zasilającej. Kondensatory elektrolityczne na szynie DC stanowią rezerwuuar energii. Część pośrednią mocy sterującą tranzystorami częściowo odseparowano od wysokoprądowej poprzez zastosowanie punktowego połączenia sygnałów poziomu odniesienia. Zastosowano płaszczyzny przewodzące w celu rozprowadzenia poziomu odniesienia napięcia źródła (S) poszczególnych tranzystorów minimalizując tym samym składowe reaktancyjne impedancji obwodu sterowania. Mostek tranzystorowy został dokładniej opisany w publikacji [5].

Płytę ISO oparto na szybkich transoptorach cyfrowych (*6N137*). Separacja analogowa została wykonana na płycie przekształtnika poprzez moduły czujników prądu (*ACS715*). Wyjścia transoptorów obciążono filtrami RC odcinającymi częstotliwości powyżej użytkowych. Moduł separacji galwanicznej stanowi podstawę systemu bezpieczeństwa. Zapewnia przejrzystość podziału na części LV i HV minimalizując tym samym zakres ewentualnej awarii systemu oraz znacznie ograniczając propagację zakłóceń przewodowych.

Moduł centralny oparty o nowoczesną, 32-bitową jednostkę mikroprocesora *STM32F103*. Płytę podzielono za pośrednictwem płaszczyzn przewodzących na sekcje: cyfrową oraz analogową. Zastosowane rozwiązania interfejsów pozwalają

na sterowanie modułem PFC, INV przy zapewnieniu interakcji z panelem sterowania. Do układów towarzyszących należą filtry aktywne sygnałów analogowych (przede wszystkim sygnałów wartości prądów fazowych silnika) oraz analogowe, histerezyowe regulatory prądu będącymi alternatywą dla rozwiązania liniowego regulatora zaimplementowanego w jednostce centralnej. Trasowanie ścieżek dla rezonatora kwarcowego – wrażliwego na zakłócenia elementu bezpośrednio wpływającego na stabilność pracy CPU minimalizuje sprzężenia elektromagnetyczne z otoczeniem układowym. Kondensatory odsprzęgające zasilanie mikroprocesora rozmieszczono priorytetowo bezpośrednio przy odpowiednich wyprowadzeniach. Płaszczyzny przewodzące pełnią rolę ekranu. Zasilania sekcji analogowej jednostki centralnej są dodatkowo filtrowane zapewniając separację od wysokich częstotliwości transmisji sygnałów cyfrowych.

2.3. Bezpieczeństwo pracy

System bezpieczeństwa pracy podzielono na następujące grupy funkcjonalne: mechaniczną, wbudowaną oraz programową.

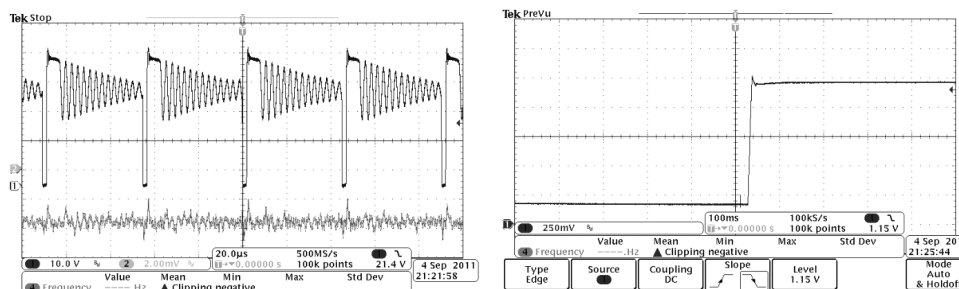
Wszystkie grupy logicznie przenikają się wzajemnie oraz uzupełniają, co stanowi o stabilności oraz zwiększa niezawodność systemu. Do grupy pierwszej należy wyłącznik awaryjny, który bezpośrednio włączony jest w obwód cewki sterującej stycznikiem zasilania głównego. Dodatkowo wymagana jest walidacja sygnałem programowym z jednostki centralnej, co daje podwójne zabezpieczenie przed niepożądanym załączeniem.

Przez wbudowane zabezpieczenia rozumiane są tutaj mechanizmy na stałe zaimplementowane w układach scalonych. W napędzie wykorzystano dwa sygnały: odpowiadającego za aktywację pośrednich stopni mocy oraz dedykowane wejście jednostki mikroprocesorowej (*TIMI_BKIN* [9]) blokujące pracę generatorów PWM (będącej tym samym zgodną z normą bezpieczeństwa EN/IEC 60335-1 klasy B [10]). Wejście *TIMI_BKIN* połączone jest bezpośrednio z sygnałem detekcji aktywacji wyłącznika awaryjnego – jest niezależne od działania programu sterującego.

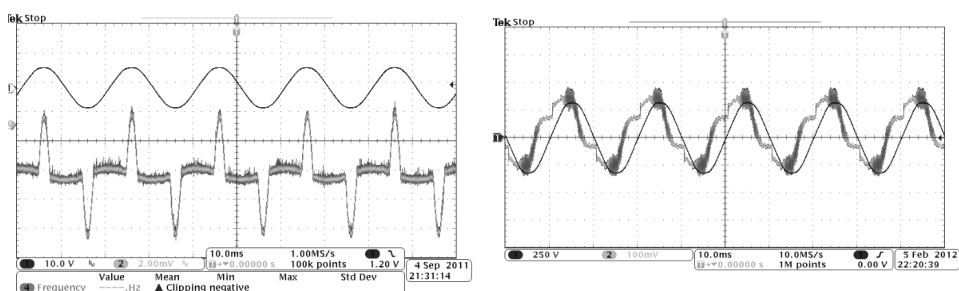
Programowe zabezpieczenia to szereg sygnałów sterujących i kontrolnych napędu oraz ich odpowiednie powiązanie logiczne. Dla przykładu, napięcie zasilające podawane jest na wejście przekształtnika dopiero w momencie przełączenia stacyjki na pulpicie sterowniczym. Zanim jednak to nastąpi, system testuje stan wyłącznika awaryjnego oraz obecność napięcia w obwodzie pośredniczącym. Aktywacja pracy przekształtnika (poprzez mechanizmy tak wbudowane jak i programowe) następuje po walidacji startu pracy napędu.

Schemat przepływu i walidacji stanów właściwych dla systemu bezpieczeństwa przedstawiono w publikacji [5].

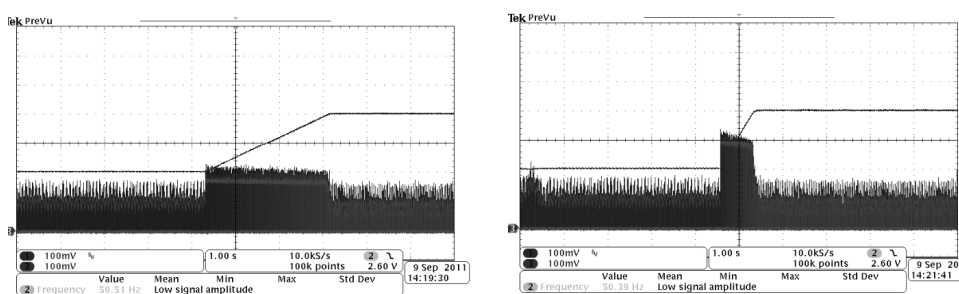
3. BADANIA



Rys. 3. Przebieg prądu i napięcia na tranzystorze mocy przetwornicy *flyback* (z lewej); ustalanie napięcia wyjściowego 15 [V] po załączeniu zasilania (z prawej)



Rys. 4. Odkształcenia prądu zasilającego przekształtnik; bez aktywnego PFC (z lewej) oraz z aktywnym PFC (z prawej), 4% obciążenia znamionowego - wyjście 360 [V], 117 [mA]



Rys. 5. Skok zadanej prędkości obrotowej z 1000 do 2000 [obr/min]; ograniczenie prądu fazy do 0,75 [A] (z lewej strony) oraz 1,75 [A] z prawej; czas regulacji odpowiednio: 2,5 [s]; 0,5 [s]

4. PODSUMOWANIE

W artykule przybliżono zagadnienia konstrukcyjne kompaktowego napędu silnika reluktancyjnego przełączalnego dla zastosowań w urządzeniach AGD. Zaproponowane rozwiązanie podparto analizą literatury w aspektach teoretycznych i praktycznych. Na wstępie przybliżono charakterystykę napędów z silnikiem SRM

oraz wynikającą z niej motywację dla realizacji założonych celów projektowych. Opisano poszczególne moduły składowe w tym elementy kluczowe w procesie efektywnego przetwarzania energii elektrycznej oraz elementy będące składnikami wielopoziomowego systemu bezpieczeństwa. Badania podparte odpowiednimi oscylogramami potwierdzają poprawność konstrukcji w zakresie pracy zasilacza flyback (rys.3), pracy aktywnego PFC (rys.4) oraz napędu jako układu regulacji prędkości obrotowej (rys.5). Powstała konstrukcja jest platformą dla opracowania złożonych algorytmów sterownia w rzeczywistym układzie wbudowanym [11]. Rozwinięcie tych algorytmów umożliwi szczegółowe wyznaczenie sprawności energetycznej napędu w dalszych badaniach.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Andrada, Blanqué, Perat, Torrent, Martínez, Sánchez, *Comparative efficiency of switched reluctance and induction motor drives for slowly varying loads*, International Conference of Renewable Energies and Power Quality, 2006.
- [2] Takanori S., Shinya I., Naoki T., Akira C., Tadashi F., Hirinori N., *Development of High Efficiency Switched Reluctance Motor*, Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan vol.126, no.4, p. 511-518, 2006.
- [3] Murphy A., *Design of a Switched Reluctance Machine Drive for Automotive Applications*, p. 11-12, School of Electronic Engineering Dublin City University, 2008.
- [4] Vukosavic S., Stefanovic V.R., *SRM inverter topologies: a comparative evaluation*, Industry Applications Society Annual Meeting, 946 - 958 vol.2, 1990.
- [5] Fabiański B., „Przekształtnik napędu silnika reluktancyjnego przelączalnego”, materiały konferencyjne SEN, CD ISBN: 978-83-7283-439-3, Łódź 2011.
- [6] Maciejuk A., Deskur J., *Modelling of Switched Reluctance Motor Drive*, XIX Symposium EPNC, Maribor 2006.
- [7] Philips Semiconductors, *Power Semiconductors Applications, Chapter 3: Motor Control*, nota aplikacyjna producenta, 2002.
- [8] Balogh L., „*Design And Application Guide For High Speed MOSFET Gate Drive Circuits*”, nota aplikacyjna Texas Instruments (TI), 2006.
- [9] ST Microelectronics (ST), *TRM0008 Reference manual*, nota aplikacyjna, str.284, 2011.
- [10] Norma IEC 60335-1, *Household and similar electrical appliances – Safety – Part 1: General requirements*, IEC, 2004.
- [11] Fabiański B., *Synchronizacja fazowa silnika reluktancyjnego przelączalnego na podstawie asymetrycznego sygnału sprzężenia zwrotnego*, Studia z Automatyki i Informatyki, Tom 36, ss. 15-26, ISBN 978-83-7654-161-7, Poznań 2011.