

Krzysztof TOMCZEWSKI

POLITECHNIKA OPOLSKA, INSTYTUT UKŁADÓW ELEKTROMECHANICZNYCH I ELEKTRONIKI PRZEMYSŁOWEJ
ul. Luboszycka 7, 45-036 Opole

Unipolarny układ zasilania silników reluktancyjnych

Dr inż. Krzysztof TOMCZEWSKI



Studia na kierunku elektronika ukończył w 1984 r. na Wydziale Elektrofizyki Politechniki Lwowskiej. Od 1995 r. jest zatrudniony w Politechnice Opolskiej. Stopień doktora w dyscyplinie elektrotechnika uzyskał na Wydziale Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Opolskiej w 2002 r. Jest autorem, około 70 publikacji i 7 patentów, głównie z zakresu optymalizacji konstrukcji przełączalnych silników reluktancyjnych i ich układów zasilania.

e-mail: k.tomczewski@po.opole.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono unipolarny układ zasilania umożliwiający rozszerzenie zakresu prędkości silników reluktancyjnych. Badano wpływ zastosowania nowego układu na uzyskiwane wartości prądów w czasie zasilania cewek, oraz na czas zaniku prądu po wyłączeniu zasilania. Obliczenia wykonano dla izolowanych magnetycznie obwodów o stałych parametrach oraz dla czteropasmowego silnika krokowego. Wyniki obliczeń porównano z uzyskanymi przy stosowaniu typowych układów zasilania. Pokazano możliwość znacznej poprawy warunków zasilania silnika w górnym zakresie prędkości.

Słowa kluczowe: układ zasilania, unipolarny, silnik krokowy.

Unipolar supply system for reluctance motors**Abstract**

The paper presents the influence of a modified supply system on current waveforms in inductive-resistive loads. Modification of a supply system dedicated for reluctance stepper and switched reluctance motor based drives was investigated. The modification influence on current values obtained during the step as well as current fall-off time after switching off the power was examined. Two configurations of the system were investigated: a system with common additional section (Fig. 8) and a system with independent supply sections (Fig. 15). Both influence the motor torque significantly. Calculations were carried out for constant-inductance, magnetically isolated circuits and a four-phase stepper motor. The current waveforms obtained from various systems for the same load and transistor keying frequency are presented. The possible significant improvement in power conditions at high-speed range is described in the paper. Application of the system shown in Fig. 8 results in the start-up frequency higher by 65%. The best results were obtained for the supply system with independent supply sections. The presented results come from initial investigation of the designed system.

Keywords: supply system, unipolar, stepper motor.

1. Wstęp

Istnieje szereg rozwiązań unipolarnych układów zasilania silników reluktancyjnych krokowych i przełączalnych [1, 2, 3]. W większości z nich główny nacisk położono na minimalizację liczby elementów energoelektronicznych [4, 6]. Obecnie dzięki rozwojowi półprzewodnikowych elementów dużej mocy możliwe jest stosowanie bardziej złożonych układów, pozwalających lepiej wykorzystywać możliwości silnika [5].

W napędach przeznaczonych do pracy w szerokim zakresie prędkości istotny problem stanowi spadek momentu wraz ze wzrostem prędkości. Jego głównymi przyczynami, oprócz wznastających strat mechanicznych są: indukcyjność uzwojeń, wzrost wartości siły elektromotorycznej rotacji oraz przepływ prądów w uzwojeniach po wyłączeniu zasilania pasma. Dwie pierwsze przyczyny uniemożliwiają osiągnięcie odpowiedniej wartości prądu w uzwojeniach, natomiast trzecia powoduje powstawanie składowych hamujących momentu [5].

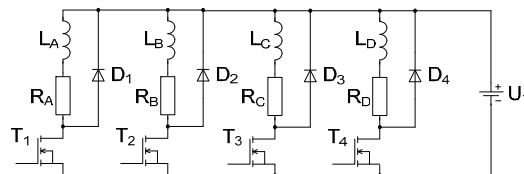
Jednym z możliwych sposobów przeciwdziałania tym zjawiskom jest podniesienie napięcia zasilania w zakresie wysokich prędkości i zwrot energii do odbiornika o wyższym napięciu [5]. Realizujący to nowy układ wykorzystuje do pracy dwa źródła zasilania. Został on opracowany na bazie znanego układu zasilania silników krokowych. W celu bezpośredniego porównania właściwości obu układów, wstępne obliczenia wykonano dla izolowanych magnetycznie cewek o stałych parametrach. Badano jak nowy układ zasilania wpływa na przebiegi prądów w czasie zasilania cewki i po jego wyłączeniu. Szybki przyrost prądu w czasie zasilania i krótki czas jego zaniku po wyłączeniu zasilania określają przydatność układu do zasilania silników w zakresie wysokich prędkości. W kolejnym etapie badano wpływ nowego układu zasilania na częstotliwość graniczną rozruchu silnika krokowego. Badania przeprowadzono metodami obliczeniowymi, symulując pracę układów w programie LTSpice i Matlab Simulink. Przedstawione wyniki są rezultatem wstępnych badań opracowanego układu i dotyczą możliwości rozszerzenia zakresu prędkości.

2. Typowy układ zasilania silnika krokowego

Typowy układ zasilania silników krokowych reluktancyjnych zawiera pojedyncze klucze tranzystorowe w torze zasilania każdego pasma, oraz połączone równolegle z uzwojeniami diody. Układ taki dla silnika czteropasmowego pokazano na rys. 1 [6].

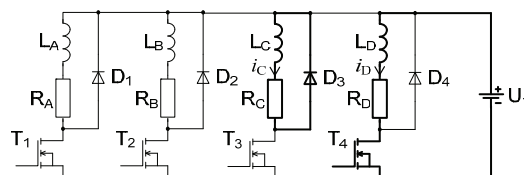
Główną zaletą tego układu jest prostota jego budowy. Zasilanie pasma następuje po załączeniu odpowiedniego klucza T_k , gdzie $k=1..4$ (rys. 2). Istotną wadą tego układu jest brak możliwości zwrotu energii z obciążenia do źródła zasilania. Zanik prądu w uzwojeniu jest wolny, ponieważ energia wytracana jest w pętli jałowej utworzonej przez uzwojenie i diodę (rys. 2). Dodanie w szereg z diodami rezystorów pozwala przyspieszyć ten proces, ale zwracana z silnika energia jest w całości tracona.

W zakresie wysokich prędkości wolny zwrot energii z wyłączanych uzwojeń może prowadzić do niewygaszania prądów w uzwojeniach. Na rysunkach przedstawiających przebiegi prądów zaznaczono przedziały, w których prąd przepływa w czasie zasilania uzwojenia i po jego wyłączeniu.



Rys. 1. Schemat typowego unipolarnego układu zasilania czteropasmowego silnika krokowego

Fig. 1. Schematic diagram of a typical unipolar, four-phase stepper motor supply system



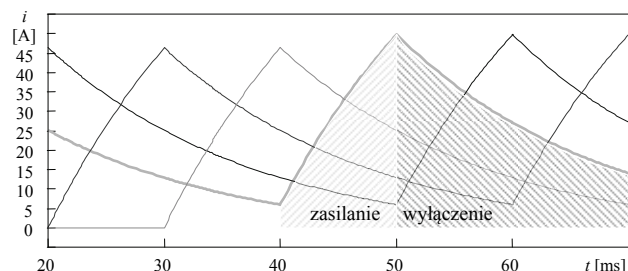
Rys. 2. Układ typowy w stanie zasilania pasma D i wygaszania prądów pasma C

Fig. 2. Typical system during supply in phase D and fall-off in phase C

i_C, i_D – currents in windings of C and D phase

Uzyskane wyniki świadczą o tym, że dla badanego obciążenia przy napięciu zasilania 12 V typowy układ działa nieprawidłowo

już przy częstotliwości 25 Hz. Obliczenia wykonano w programie LTSpice, dla obciążenia o indukcyjności 2 mH i rezystancji 0,1 Ω . Takie parametry zasilania i obciążenia przyjęto do obliczeń we wszystkich rozpatrywanych układach ze stałą indukcyjnością.

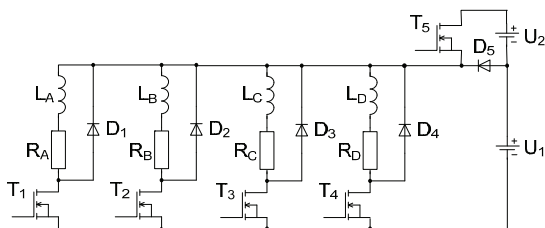


Rys. 3. Prądy w sekcjach obciążenia przy zasilaniu w typowym układzie, dla częstotliwości kluczwania 25 Hz

Fig. 3. Current waveforms in load sections supplied from a typical system, for the frequency of 25 Hz

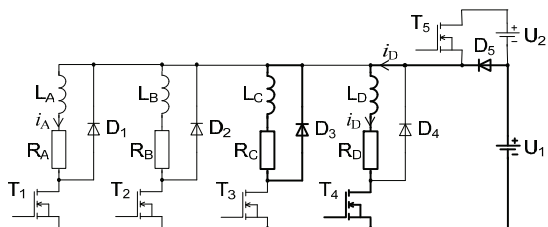
3. Układ z dwoma źródłami zasilania

W niektórych przypadkach do zasilania silników krokowych stosuje się układ umożliwiający zasilanie pasm fazowych napięciami o dwóch wartościach (rys. 4). Najczęściej układ ten stosuje się w celu obniżania napięcia zasilania podczas pozycjonowania silników krokowych. Znamionowe napięcie zasilania ($U_N=U_1+U_2$) uzyskuje się po załączeniu klucza T_5 . W czasie pozycjonowania pasma zasilają się niższym napięciem ze źródła U_1 przez diodę D_5 .



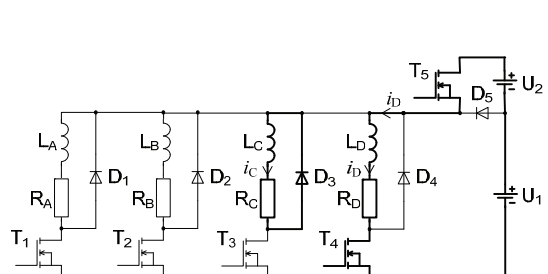
Rys. 4. Schemat unipolarnego układu zasilania czteropasmowego silnika krokowego z dwoma źródłami napięcia

Fig. 4. Schematic diagram of a unipolar, four-phase stepper motor supply system with two power sources



Rys. 5. Układ w stanie zasilania pasma D ze źródła U_1 i zaniku prądu w paśmie C

Fig. 5. Circuit during supply in phase D from U_1 source, and current fall-off in phase C

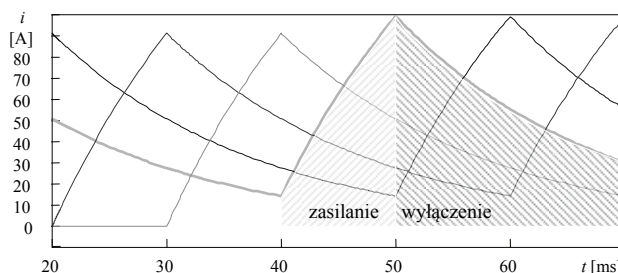


Rys. 6. Układ w stanie zasilania pasma D z połączonych szeregowo źródeł U_1 i U_2 oraz zaniku prądu w paśmie C

Fig. 6. Circuit during supply in phase D from sources U_1 and U_2 connected in series, and current fall-off in phase C

Układ taki może pełnić również inną funkcję. Po zmianie wartości napięć źródeł zasilania pozwala on zasilać pasma napięciem znamionowym ze źródła U_1 (rys. 5) lub wyższym, z szeregowo połączonych źródeł U_1 i U_2 (rys. 6). Zasilanie z jednego źródła może być stosowane w zakresie małych prędkości, natomiast napięcie wyższe, umożliwiające przyspieszenie narastania prądów fazowych, może być stosowane w zakresie wysokich prędkości. Podobnie jak w poprzednio omawianym układzie, po wyłączeniu zasilania prąd pasma przepływa w pętli jałowej.

Przebiegi prądów przy zasilaniu cewek ze źródła U_1 są zbliżone do uzyskanych dla układu podstawowego (rys. 3), natomiast przebiegi prądów uzyskane przy zasilaniu podwyższonym napięciem pokazano na rys. 7. Uzyskano znaczny wzrost wartości prądu, jednak prąd w obciążeniu nie zanika do chwili kolejnego załączenia zasilania danej sekcji.



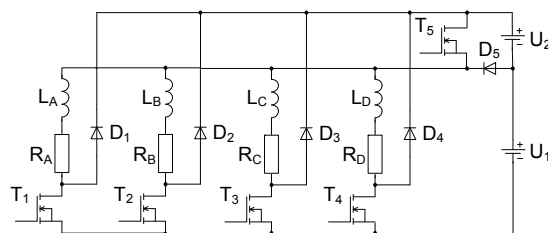
Rys. 7. Przebieg prądów w układzie z dwoma źródłami przy zasilaniu wyższym napięciem

Fig. 7. Current waveforms in a circuit with two power sources, supplied with high voltage

4. Nowy układ z dwoma źródłami zasilania

Nowy układ (rys. 8) różni się od pokazanego na rys. 4 tym, że katody diod podłączono do dodatniego bieguna dodatkowego źródła zasilania U_2 . Umożliwia to wybór sposobu rozładowywania energii z wyłączanych uzwojeń. Przy załączonym tranzystorze T_5 , po wyłączeniu zasilania pasma prąd przepływa przez uzwojenie, odpowiednią diodę D_k , gdzie $k=1..4$, tranzystor T_5 i diodę D_5 (rys. 9). W przypadku, gdy tranzystor T_5 jest wyłączony, energia z uzwojenia zwracana jest do źródła zasilania U_2 przez połączoną z nim diodę D_k i diodę D_5 (rys. 10), co przyspiesza zanik prądu w uzwojeniach.

Wadą tego układu (podobnie jak C-DUMP [3]) jest zależność obrotu przepływu prądu wyłączanej sekcji od sposobu zasilania uzwojeń innych sekcji (przez tranzystor T_5 lub diodę D_5). Zasilanie uzwojeń wyższym napięciem przez tranzystor T_5 , powoduje wolny zanik prądu w wyłączonym uzwojeniu (pętla jałowa). Z kolei zasilanie pasma przez diodę ze źródła U_1 , w celu dokonania szybkiego zwrotu energii z wyłączanego uzwojenia, uniemożliwia osiągnięcie dużej wartości prądu w zasilanym uzwojeniu. W związku z tym rozpatrzono dwie możliwości. Uzwojenia zasilano przez połowę czasu ze źródła U_1 i przez połowę z połączonych szeregowo źródeł U_1 i U_2 . Obliczenia wykonano dla obu kolejności zasilania napięciem znamionowym i podwyższonym.

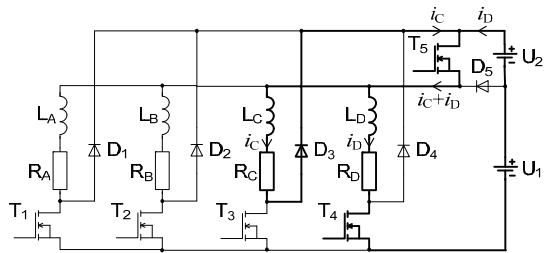


Rys. 8. Zmodyfikowany unipolarny układ zasilania czteropasmowego silnika krokowego

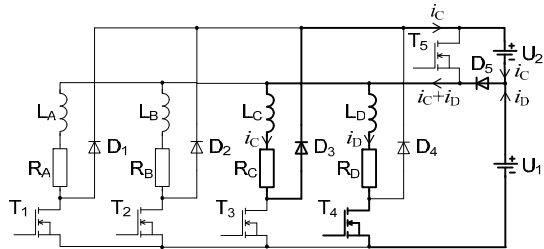
Fig. 8. Modified unipolar, four-phase stepper motor supply system

W pierwszym przypadku uzwojenia zasilano początkowo z połączonych szeregowo źródeł U_1 i U_2 , a następnie ze źródła U_1 .

Uzyskane przebiegi napięć i prądów pokazano na rys. 11 i 12. W drugim przypadku kolejność tą zmieniono. Uzyskane wyniki pokazano na rys. 13 i 14.

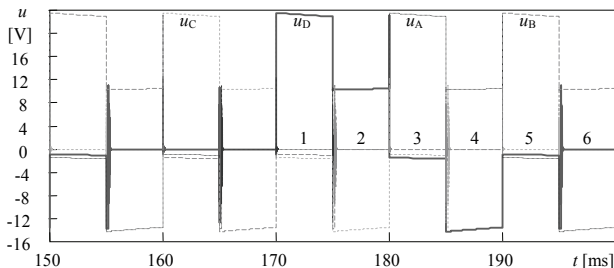


Rys. 9. Zmodyfikowany unipolarny układ zasilania czteropasmowego silnika krokowego podczas zasilania pasma D wysokim napięciem z połączonych szeregowo źródeł U_1 i U_2 oraz pętli jałowej pasma C do źródła U_2
 Fig. 9. Modified unipolar, four-phase stepper motor supply system during supply in phase D, with high voltage from sources U_1 and U_2 connected in series, and idle-loop in phase C

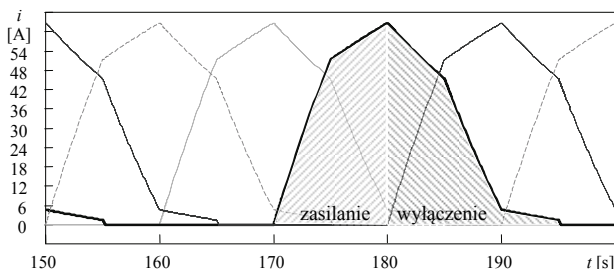


Rys. 10. Zmodyfikowany układ zasilania czteropasmowego silnika krokowego w stanie zasilania pasma D ze źródła U_1 i zwrotu energii z pasma C do źródła U_2
 Fig. 10. Modified unipolar, four-phase stepper motor supply system during supply phase D from source U_1 , and energy return from phase C to source U_2

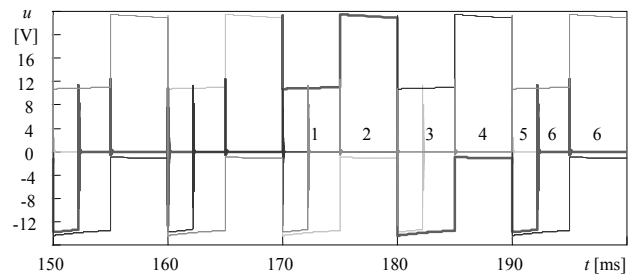
Na przebiegach napięć i prądów zaznaczono strefy odpowiadające różnym stanom pracy układu.



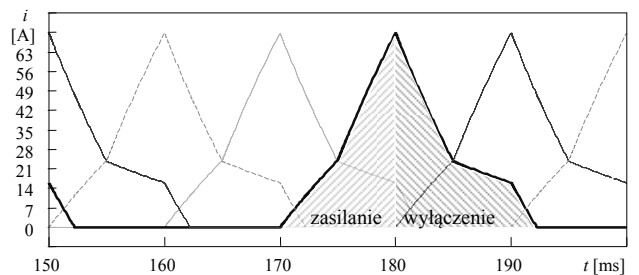
Rys. 11. Przebiegi napięć na obciążeniach w układzie po modyfikacji
 Fig. 11. Voltage waveforms on the loads in the modified system
 u_A, u_B, u_C, u_D – napięcia na obciążeniach, 1 – strefa zasilania sekcji D napięciem z szeregowo połączonych źródeł U_1 i U_2 , 2 – strefa zasilania sekcji D ze źródła U_1 , 3 – strefa zasilania sekcji A z połączonych źródeł U_1+U_2 , 4 – strefa zasilania sekcja A ze źródła U_1 , 5 – strefa zasilania sekcji B z połączonych źródeł U_1+U_2 , 6 – strefa wyłączenia



Rys. 12. Przebiegi prądów w obciążeniach w układzie po modyfikacji
 Fig. 12. Current waveforms on the loads in the modified system



Rys. 13. Przebiegi napięć w układzie po modyfikacji przy zasilaniu początkowo z niższego napięcia
 Fig. 13. Voltage waveforms in the modified system, at initial supply with low voltage
 1 – strefa zasilania sekcji D napięciem ze źródła U_1 , 2 – strefa zasilania sekcji D z szeregowo połączonych źródeł U_1 i U_2 , 3 – strefa zasilania sekcji A ze źródła U_1 , 4 – strefa zasilania sekcji A z szeregowo połączonych źródeł U_1 i U_2 , 5 – strefa zasilania sekcji B ze źródła U_2 , 6 – strefa wyłączenia



Rys. 14. Przebiegi prądów w układzie po modyfikacji przy zasilaniu początkowo z niższego napięcia
 Fig. 14. Current waveforms in the modified system, at initial supply with low voltage

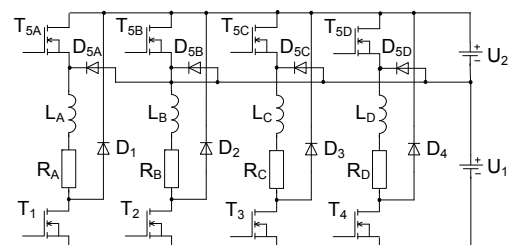
5. Układ zasilania z niezależnymi obwodami

Uzyskane w nowym układzie wyższe wartości prądów świadczą o możliwości uzyskania ich wartości znamionowej przy wyższych częstotliwościach niż w układzie typowym. Znalazło to potwierdzenie w przedstawionych dalej wynikach uzyskanych dla napędu z silnikiem krokowym. Uzależnienie sposobu rozładowania energii z wyłączanego uzwojenia od sposobu zasilania kolejnego pasma można wyeliminować stosując niezależne sekcje zasilające dla każdego obciążenia.

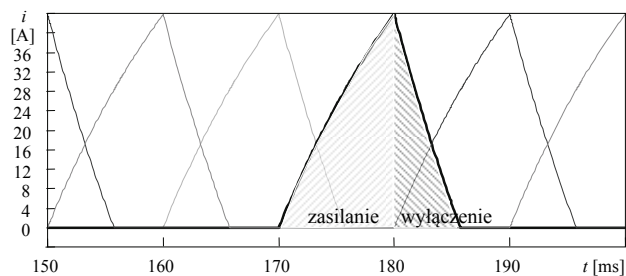
Układ przedstawiony na rys. 15 posiada niezależne sekcje zasilające i w związku z tym daje możliwość wyboru obwodu rozładowania energii z wyłączanych uzwojeń.

Rozpatrując możliwość stosowania tego układu w celu zwiększenia prędkości silnika, obliczenia wykonano dla stanu zwrotu energii do źródła U_2 . Uwzględniono przy tym dwie możliwości. Cewki zasilano z pojedynczego źródła zasilania napięciem U_1 (wyniki przedstawia rys. 16) oraz z połączonych szeregowo źródeł zasilania U_1 i U_2 (wyniki przedstawia rys. 17).

Układ ten umożliwia uzyskanie najwyższej wartości prądu, przy czasie zwrotu energii do źródła krótszym, niż w jego podstawowej wersji. Poprawę taką uzyskano zarówno przy zasilaniu uzwojeń przez tranzystor T_5 jak i przez diody D_5 .

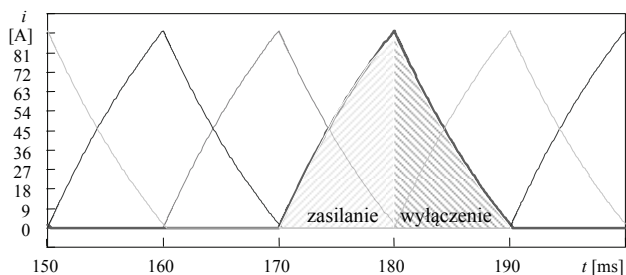


Rys. 15. Schemat układu z niezależnymi sekcjami zasilania pasm
 Fig. 15. Schematic diagram of a system with independent phase supply sections



Rys. 16. Przebiegi prądów w układzie po modyfikacji z niezależnymi sekcjami przy zasilaniu obciążenia napięciem ze źródła U_1

Fig. 16. Current waveforms in the modified system with independent phase supply sections, with loadings supplied from the source U_1



Rys. 17. Przebiegi prądu w układzie po modyfikacji przy niezależnym zasilaniu sekcji wyższym napięciem z szeregowo połączonych źródeł U_1 i U_2

Fig. 17. Current waveforms in the modified system with independent phase supply sections, with high voltage from sources U_1 and U_2 connected in series

6. Wpływ układu zasilania na pracę silnika krokowego

Wpływ układu zasilania na pracę silnika reluktancyjnego określono wykonując obliczenia dla czteropasmowego silnika krokowego. Do symulacji zastosowano program Matlab Simulink. Zastosowany silnik posiada 8 biegunów w stojanie i 6 zębów w wirniku. Skok wirnika wynosi 15° . Silnik zasilany jest napięciem 12V. Wyznaczona z symulacji graniczna częstotliwość rozruchu dla tego silnika przy zasilaniu z typowego układu i obciążeniu 0,12 Nm (rys. 1) wynosi 50 Hz. Podobnie, jak do obliczeń przebiegów prądów w nieruchomych, izolowanych cewkach, w trakcie symulacji pracy silnika zastosowano dodatkowe źródło zasilania o napięciu 12V.

W tabeli 1 zamieszczono wyniki uzyskane przy zasilaniu silnika z układu typowego i z nowego. Pasma silnika zasilano sekwencyjnie. Wyznaczano maksymalną częstotliwość rozruchu. Dla nowego układu obliczenia wykonano przy zasilaniu podwyższonym napięciem 24V, dla dwóch trybów pracy, w których początkowo pasmo zasilano napięciem 12V, a następnie 24V i w odwrotnej kolejności. W obu przypadkach przyjęto równe czasy zasilania napięciem znamionowym i podwyższonym.

Tab. 1. Zestawienie wybranych parametrów przebiegów prądu w typowym i nowym układach zasilania czteropasmowego silnika krokowego
Tab. 1. Comparison of chosen current waveform parameters in typical and new systems for four-phase reluctance stepper motor

Typ układu	I_{max}	f_{max}
	[A]	[Hz]
Podstawowy (zasilanie 12V)	4,5	50
Nowy (zasilanie w kolejności 12V i 24V)	4,6	83,3
Nowy (zasilanie w kolejności 24V i 12V)	4,1	83,3

I_{max} – maksymalna wartość prądu, f_{max} – częstotliwość graniczna rozruchu

Przy stosowaniu nowego układu uzyskano wzrost granicznej częstotliwości rozruchu silnika o ponad 60%. Częstotliwość graniczna rozruchu przy stosowaniu typowego układu zasilania wy-

nosi 50 Hz. Stosując nowy układ we wszystkich przypadkach uzyskano wzrost prędkości w stosunku do typowych układów. Najwyższą częstotliwość rozruchu 135,1 Hz uzyskano zasilając silnik dwufazowo, podwyższonym napięciem z układu z niezależnymi sekcjami (rys. 15). W układzie typowym (rys. 1) zakres prędkości obrotowych można również zwiększyć zasilając jednocześnie dwa pasma silnika. Taki sposób zasilania w zakresie dużych częstotliwości prowadzi jednak do ciągłego przepływu prądu w uzwojeniach i spadku sprawności napędu.

7. Wnioski

Porównując wyniki symulacji pracy omawianych układów stwierdzono, że nowy układ we wszystkich przedstawionych wersjach posiada lepsze właściwości w zakresie dużych prędkości, niż układ typowy. Uzyskany wzrost szybkości narastania prądu w nowym układzie, daje możliwość pracy silnika z wartością znamionową prądu przy znacznie wyższych częstotliwościach kluczkowania, niż jest to możliwe w układzie typowym. Również drugi istotny parametr, jakim jest czas rozładowania energii z wyłączanego uzwojenia, potwierdza znacznie lepsze właściwości nowego układu w zakresie wysokich prędkości.

Najlepsze rezultaty uzyskano stosując układ, w którym wszystkie uzwojenia zasilano z niezależnych sekcji (rys. 17) napięciem z połączonych szeregowo źródeł U_1 i U_2 . Obliczenia wykonane dla silnika krokowego zasilanego z nowego układu potwierdziły możliwość pracy napędu w znacznie szerszym zakresie prędkości. Nowy układ umożliwia uzyskanie większej mocy napędu w zakresie wysokich prędkości, natomiast w zakresie niskich i średnich prędkości pozwala zasilac silnik napięciem znamionowym.

Wadą układów z dwoma źródłami zasilania (oprócz konieczności stosowania dwóch źródeł zasilania) jest przepływ prądu przez diodę podczas zasilania uzwojeń niższym napięciem. Powoduje on dodatkowe straty w układzie. Straty te są jednak kompensowane przez zwrot energii do źródła zasilania.

Dodatkowym warunkiem stosowania nowego układu jest zapewnienie odpowiedniej izolacji uzwojeń silnika, co nie stanowi realnego ograniczenia w przypadku silników niskonapięciowych, oraz odpowiednia konstrukcja mechaniczna, umożliwiająca pracę przy wyższych prędkościach. W kolejnych etapach przeprowadzone zostaną badania symulacyjne i eksperymentalne mające na celu ocenę przydatności prezentowanych układów do zasilania przełączalnych silników reluktancyjnych SRM, w celu rozszerzenia ich zakresu prędkości przy zachowaniu stałego momentu.

8. Literatura

- [1] Ching T. W., Chau K. T., Chau C. C.: A new zero-voltage-transition converter for switched reluctance motor drives Authors. IEEE Power Electronics Specialists Conference Record, Fukuoka, Japan, 17-22 May 1998, v. 2, p. 1295-1301.
- [2] Kalamdani A. A.: A Novel Solution to Variable Speed Operations of Switched Reluctance Motors. Proceedings of 13th IEEE Bangalore Section National Symposium on Power Systems held on 26-27 November 2004 at Indian Institute of Science, Bangalore, p. 1-7.
- [3] Kirshnan R.: A novel converter topology for switched reluctance motor drives improving efficiency and simplifying control strategy. Power Electronics Specialists Conference, PESC '94 Record., 25th Annual IEEE, vol. 2., pp. 937-942.
- [4] Le-Huy H., Viarouge P., Francoeur B.: A novel unipolar converter for switched reluctance motor, Power Electronics, IEEE Transactions on Magnetics, Volume 5, Issue 4, Oct. 1990 Page(s):469 – 475.
- [5] Tomczewski K., Witkowski A.: LTSpice simulation of power supply system for switched reluctance motors, Computer applications in electrical engineering, ALWERS, Poznań 2006, pp. 131-143.
- [6] Vukosavic S., Stefanovic V.R.: SRM Inverter Topologies: A Comparative Evaluation, IEEE Transactions on Industry Applications, vol 27, nr 6, str. 1034-1047, 11/12 1991.