

Wysokoobrotowy układ napędowy z silnikiem indukcyjnym

Dariusz Sobczyński, Małgorzata Łatka, Wiesława Malska

Wstęp

Napędy elektryczne wysokoobrotowe zdobywają coraz większe znaczenie w wielu nowoczesnych rozwiązaniach technicznych. Wynika to z dużej gęstości mocy i małych rozmiarów silników wysokoobrotowych oraz możliwości regulacji ich prędkości w szerokich granicach.

Napędy wysokoobrotowe w zakresie małych mocy (do 1 kW) są powszechnie stosowane w sprzęcie gospodarstwa domowego i elektronarzędziach. Przykładowo silniki komutatorowe prądu przemiennego stosowane do napędu turbin odkurzaczy w firmie Zelmer osiągają prędkości znamionowe dochodzące do 40 000 obr/min. Podczas biegu jałowego – zatkany wlot powietrza w agregacie ssącym – prędkość wzrasta nawet do 48 000 obr/min). Przedmiotem pracy jest napęd składający się z wysokoobrotowego silnika indukcyjnego zasilanego z falownika napięcia, który zastępuje wspomniany wcześniej wysokoobrotowy silnik komutatorowy prądu przemiennego.

Zastosowanie – w miejsce dotychczas stosowanych wysokoobrotowych silników komutatorowych oraz silników wolnoobrotowych z przekładnią – silników bezkomutatorowych i zasilanie ich z przemienników częstotliwości wymaga zmian konstrukcyjnych. Najistotniejsze cechy charakteryzujące bezszczotkowe silniki wysokoobrotowe to [3]:

- użycie cienkich blach do wykonania stojana wynikające ze wzrostu strat w obwodzie magnetycznym, będących skutkiem zwiększonej częstotliwości napięcia zasilającego;
- zmniejszenie średnicy wirnika ze względu na duże siły odśrodkowe;
- zwiększenie gęstość prądów w uzwojeniach stojanów w odniesieniu do rozwiązań o standardowych prędkościach obrotowych.

Najczęściej jako silniki bezkomutatorowe wysokoobrotowe stosuje się maszyny z magnesami trwałymi lub maszyny indukcyjne z różnymi wykonaniami wirników.

W ramach współpracy z przemysłem wykonano szereg bezkomutatorowych wysokoobrotowych silników, przystosowanych do pracy w sprzęcie AGD. Przeprowadzono badania różnych typów układów przekształtnikowych, współpracujących z wybranymi silnikami. Układy te, o mocy do 1000 W, zasilane z sieci jednofazowej, charakteryzują się: ograniczonym negatywnym oddziaływaniem na sieć zasilającą (*unity power factor*), małą masą i gabarytami, prostym, bezczujnikowym układem sterowania zapewniającym kontrolę prądu przy ograniczonej dokładności regulacji prędkości obrotowej, możliwością zadawania prędkości obrotowej w szerokim zakresie, wysoką sprawnością i niezawodnością, minimalną liczbą półprzewodników i elementów biernych (dławiki, kondensatory), poprawną realizacją funkcji *fly start* i odpornością na odchylenia i wahania napięcia oraz przerwy w zasilaniu.

Streszczenie: W obecnie spotykanych rozwiązaniach w napędach małej mocy stosuje się silniki wysokoobrotowe komutatorowe. Są to jednak układy o małej sprawności energetycznej i dużym koszcie produkcji (wykonanie komutatora). Przyszłość nowoczesnych napędów, zwłaszcza w sprzęcie gospodarstwa domowego, elektronarzędziach, a także w lotnictwie, to układy napędowe z silnikami wysokoobrotowymi bezkomutatorowymi. Do grupy tej można zaliczyć m.in. silniki indukcyjne, silniki z magnesami trwałymi, silniki bezszczotkowe prądu stałego itp. W artykule opisano układ napędowy oraz przedstawiono wyniki badań silnika indukcyjnego wysokoobrotowego małej mocy, zasilanego napięciem o częstotliwości 667 Hz z przemiennika częstotliwości.

🇬🇧 HIGH-SPEED INDUCTION MOTOR DRIVE

Abstract: *At the present common solutions in low-power drives high-speed brush motors are used. However, these are systems of low energy efficiency and high cost of production. Future in modern drives, especially in household appliances, power tools as well as aviation are drive systems with high-speed brushless motors. This group may include, among others induction motors, permanent magnet motors, BLDC motors etc. The article describes the drive system and presents the research results of low-power, high-speed induction motor, supplied with a voltage frequency of 667 Hz from frequency converter.*

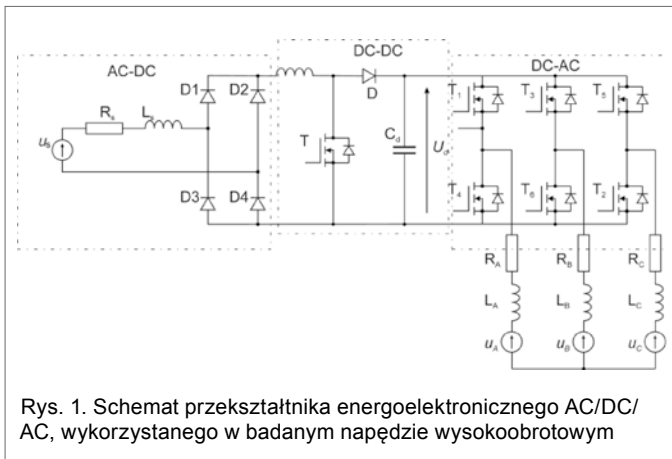
Słowa kluczowe: wysokoobrotowy układ napędowy, układ napędowy o regulowanej prędkości.

Keywords: high-speed motor drive, variable speed drive.

Topologia przekształtnika energoelektronicznego

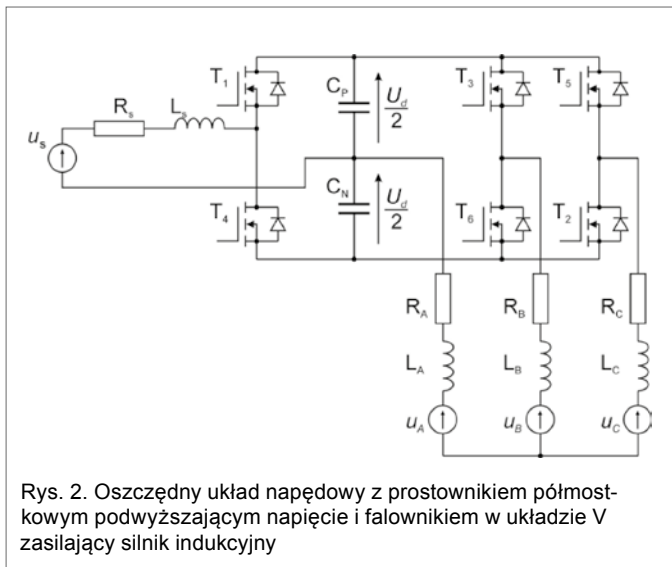
Typowy przekształtnik wykorzystany w badanym napędzie posiada topologię, zgodnie ze schematem na rys. 1, w której można wyróżnić trzy bloki: zasilacz (AC-DC), obwód pośredniczący (DC-DC) i falownik (DC-AC).

Istotą zastosowanego układu przekształtnikowego jest jego prosta, niezawodna konstrukcja, przy braku wymagań dotyczących dużej dokładności regulacji prędkości obrotowej realizowanej przez układ sterowania. Układ energoelektroniczny AC/DC/AC, zastosowany do sterowania silnikiem wysokoobrotowym, wykonano na bazie inteligentnego modułu mocy z wykorzystaniem układów logiki programowalnej (FPGA). Przekształtnik impulsowy AC/DC w tym układzie, w wyniku zastosowania odpowiedniego sposobu sterowania łącznikiem



Rys. 1. Schemat przekształtnika energoelektronicznego AC/DC/DC/AC, wykorzystanego w badanym napędzie wysokoobrotowym

reklama



Rys. 2. Oszczędny układ napędowy z prostownikiem półmostkowym podwyższającym napięcie i falownikiem w układzie V zasilający silnik indukcyjny

tranzystorowym, wymusza sinusoidalny kształt prądu źródła i ogranicza pobór mocy biernej, co eliminuje zjawisko negatywnego oddziaływania na linię zasilającą [4, 8, 9].

W ramach analiz rozważano zastosowanie przekształtników oszczędnych z ograniczoną liczbą elementów energoelektronicznych. Na rys. 2 przedstawiono jeden z analizowanych układów z trójfazowym silnikiem indukcyjnym. W takim rozwiązaniu tranzystory T1, T2 i kondensatory CP, CN stanowią jednofazowy prostownik z podwajaniem napięcia. Umożliwia on zmianę napięcia w obwodzie pośredniczącym, przy równoczesnym zapewnieniu bliskiego jedności współczynnika mocy (sinusoidalnego prądu wejściowego przekształtnika będącego w fazie z napięciem linii zasilającej). Pozostałe tranzystory T3, T4, T5 i T6 oraz kondensatory CP i CN tworzą asymetryczny falownik (falownik w układzie V) zasilający silnik indukcyjny. Układ z rys. 2 posiada możliwość zwrotu energii do jednofazowej linii zasilającej podczas pracy generatorowej silnika.

Zmienność mocy chwilowej 1-fazowego źródła zasilania, zgodnie z zależnością $p_s = U_s I_s (1 - \cos 2\omega t)$, przy stałej wartości mocy odbiornika symetrycznego powoduje, że kondensatory przemiennie oddają i gromadzą energię, co jest powodem pojawienia się pulsacji napięcia z podwojoną częstotliwością sieciową. Ponadto w napięciu tym występują dodatkowe pulsacje związane z przepływem prądu przez wspólny punkt połączonych kondensatorów i aby uzyskać zrównoważone napięcie na poszczególnych kondensatorach w obwodzie pośredniczącym

(DC-DC), pojemności tych kondensatorów muszą być odpowiednio duże. Zastosowanie rozwiązania oszczędnego (rys. 2.) skutkuje dwukrotnie mniejszą wartością skuteczną napięcia wyjściowego w porównaniu do topologii z falownikiem trójgałęziowym. Konieczne jest wówczas dwukrotne zwiększenie wartości napięcia obwodu pośredniczącego. Wpływa to znacząco na wzrost kosztów wytworzenia [5, 6, 8].

Wymienione wady nie negują możliwości stosowania układów przekształtnikowych oszczędnych do zastosowania w napędach małej mocy, zasilanych z sieci jednofazowej, m.in. w sprzęcie gospodarstwa domowego oraz w elektronarzędziach. Jednakże, aby spełnić wymagania dla tego typu napędów (małe, tanie i niezawodne), zastosowanie topologii przekształtnika AC-DC-AC pozwala na lepsze – w stosunku do układów oszczędnych – wykorzystanie napięcia obwodu pośredniczącego [1].

Silnik wysokoobrotowy

W badaniach, których wyniki są prezentowane w artykule, wykorzystano silnik indukcyjny trójfazowy z wirnikiem litym stalowym, o następujących parametrach:

- moc znamionowa $P_n = 1000$ [W]
- prąd znamionowy $I_n = 2,76$ [A]
- prędkość obrotowa znamionowa $n_n = 39\,940$ [obr/min]
- prędkość synchroniczna $n_s = 40\,020$ [obr/min]
- napięcie znamionowe stojana przy połączeniu w gwiazdę $U_n = 300$ [V]
- znamionowa częstotliwość napięcia $f_s = 667$ [Hz]

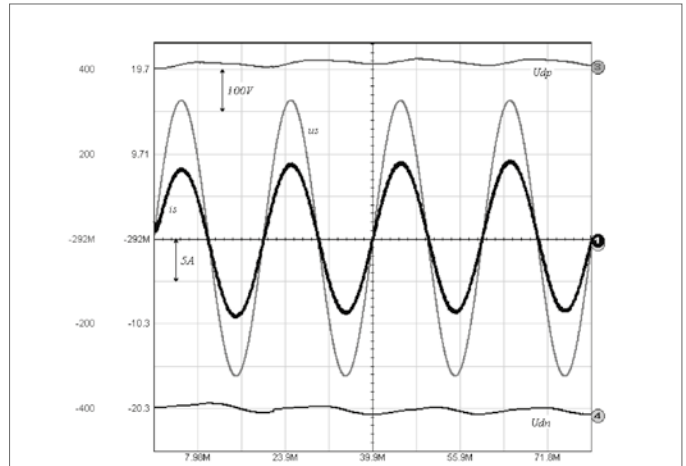
Silnik ten charakteryzuje się prostą konstrukcją wirnika, który wykonany jest z jednego kawałka stali, co przekłada się na niskie koszty wytworzenia. Średnica zewnętrzna wirnika litego wynosi 17,5 mm. Stojan omawianego silnika został wykonany z blachy transformatorowej ET-110-23 o grubości 0,23 mm. Podczas pakietowania kolejne wycinki obrócono o kąt 90°, z uwagi na anizotropowość. Silniki wysokoobrotowe charakteryzują się większym stosunkiem długości wirnika silnika do jego średnicy niż w przypadku wykonania standardowych (przystosowanych do bezpośredniego zasilania z linii zasilającej). Omawiany silnik posiada następujące wymiary: długość pakietu stojana $l_s = 125$ mm, średnica zewnętrzna $d_z = 56$ mm (rys. 4). Takie ukształtowanie konstrukcji wirnika silnika wysokoobrotowego wynika z wartości siły odśrodkowej, która nie może być większa niż w wykonaniach standardowych.

Uzwojenia stojana wykonano drutem miedzianym o średnicy $d_{uz} = 0,3$ mm. Założona gęstość prądu dla tak przyjętej średnicy wynosi $j_s = 9$ A/mm². Liczba zwojów połączonych szeregowo to 96, a liczba przewodów równoległych tworzących jeden zwoj $a_c = 8$; oznacza to konieczność umieszczenia w żłobku 368 przewodów. Obliczone na etapie projektowania straty całkowite silnika wynoszą $\Delta P = 163$ W. Podczas badań laboratoryjnych zastosowano silniki o chłodzeniu obcym.

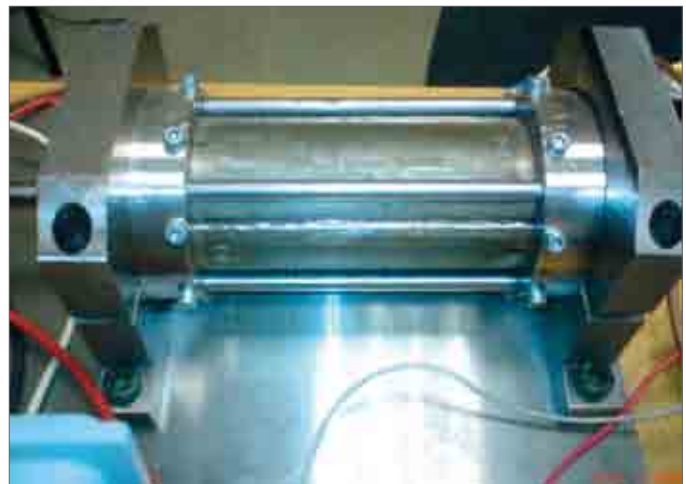
Badania układu napędowego wysokoobrotowego

Badania sprawdzające zostały przeprowadzone w laboratorium Katedry Energoelektroniki i Elektroenergetyki Politechniki Rzeszowskiej, gdzie wykonano układ pomiarowy przedstawiony na rys. 5.

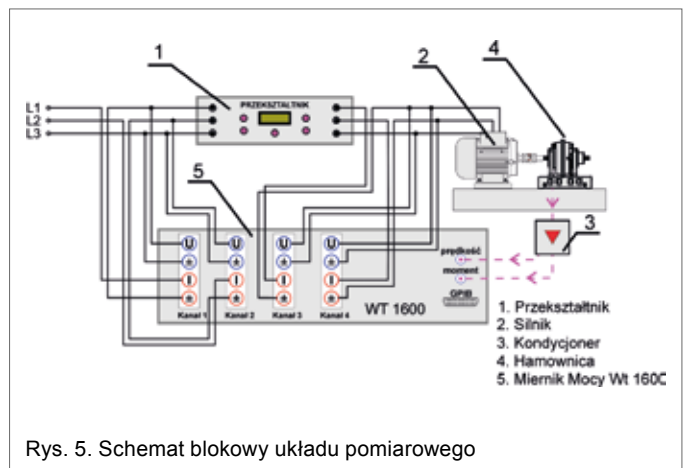
Stanowisko badawczo-pomiarowe składa się z przekształtnika energoelektronicznego AC/DC/AC (1) zasilającego wysoko-



Rys. 3. Przebiegi: napięcia sieci u_s , prądu linii zasilającej i_s , napięcia na kondensatorach U_{CP} i U_{CN} przekształtnika półmostkowego podwyższającego napięcie



Rys. 4. Wysokoobrotowy silnik indukcyjny trójfazowy na stanowisku badawczym



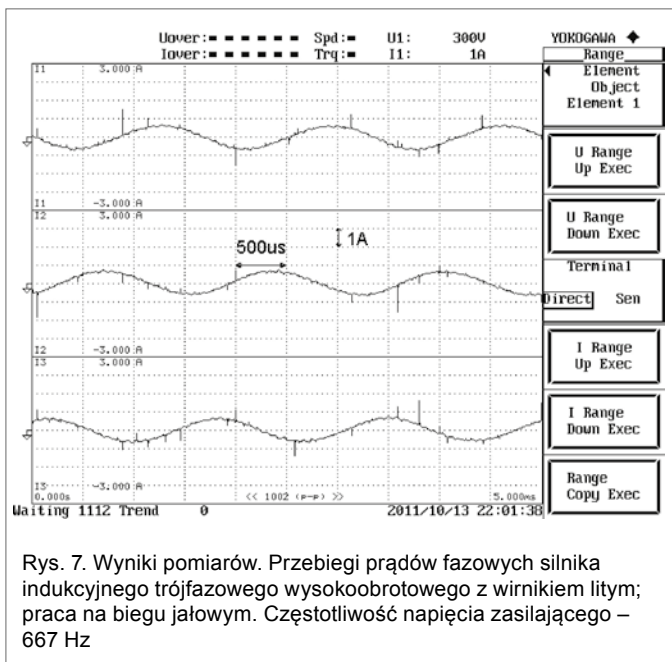
Rys. 5. Schemat blokowy układu pomiarowego

obrotowy silnik indukcyjny (2). Silnik połączony jest z hamownicą indukcyjną (4). Hamownica zawiera momentomierz oraz przetwornik obrotowo-impulsowy służący do pomiaru prędkości obrotowej. Sygnały momentu i prędkości za pomocą kondycjonera (3) przesyłane są do miernika mocy (5), który rejestruje również prądy i napięcia na wejściu i wyjściu przekształtnika.



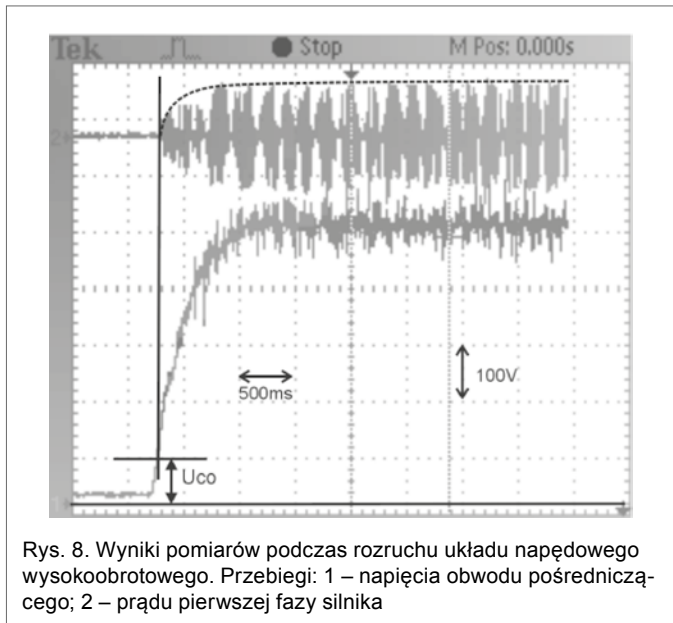
reklama

Rys. 6. Widok ogólny stanowiska laboratoryjnego

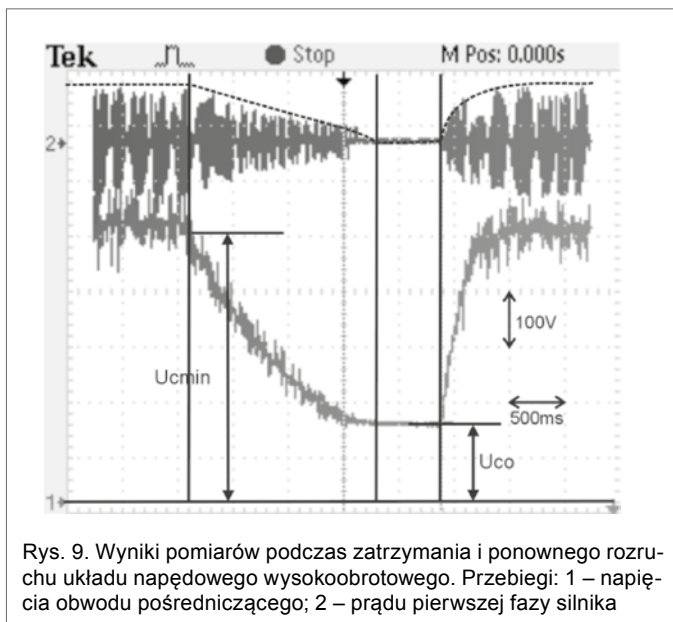


Rys. 7. Wyniki pomiarów. Przebiegi prądów fazowych silnika indukcyjnego trójfazowego wysokoobrotowego z wirnikiem litym; praca na biegu jałowym. Częstotliwość napięcia zasilającego – 667 Hz

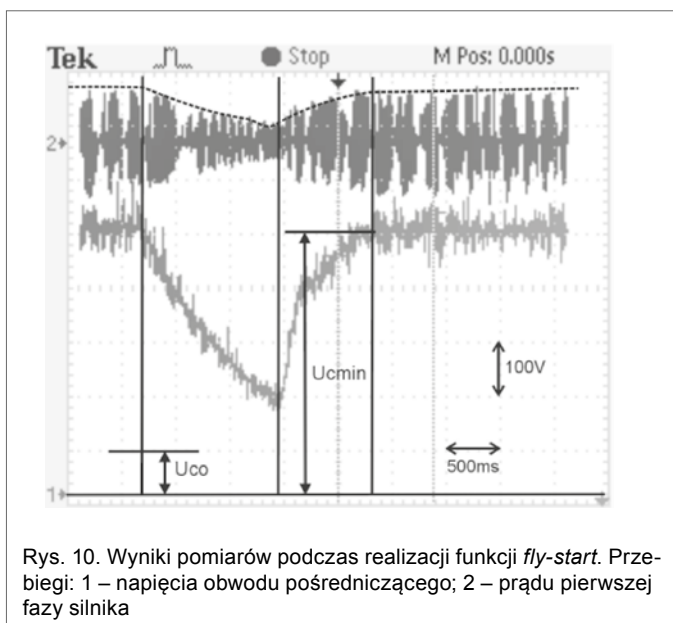
Konstrukcja tego typu napędu zapewnia bezpieczeństwo użytkownika, gdyż wirujące elementy silnika, jak i agregatu ssącego, są osłonięte przez obudowy, które jednocześnie pełnią funkcje konstrukcyjne. W przypadku silnika jest to stojan wraz tarczami łożyskowymi, natomiast w przypadku agregatu ssącego obudowa turbiny. Podczas prób napędu na stanowisku badawczym turbina została zdemontowana, a silnik został połączony – za pomocą sprzęgieł wysokoobrotowych o odpowiedniej wytrzymałości mechanicznej – z hamownicą. Przestrzeń nad elementami wirującymi została zabezpieczona za pomocą osłon. Głównym celem było sprawdzenie parametrów elektrycznych badanego napędu. Przeprowadzono rejestrację przebiegów prądów silnika wysokoobrotowego, a także zarejestrowano napięcie obwodu pośredniczącego w różnych stanach dynamicznych układu napędowego. Podczas badań nie zajmowano się zagadnieniami wynikającymi z niedokładności wyważenia wirnika. Prezentowane wyniki dotyczą silnika indukcyjnego wysokoobrotowego z wirnikiem litym. Na rys. 7 przedstawiono przebiegi prądów fazowych trójfazowego silnika indukcyjnego wysokoobrotowego, zasilanego napięciem o częstotliwości 667 Hz, pracującego na biegu jałowym.



Rys. 8. Wyniki pomiarów podczas rozruchu układu napędowego wysokoobrotowego. Przebiegi: 1 – napięcia obwodu pośredniczącego; 2 – prądu pierwszej fazy silnika



Rys. 9. Wyniki pomiarów podczas zatrzymania i ponownego rozruchu układu napędowego wysokoobrotowego. Przebiegi: 1 – napięcia obwodu pośredniczącego; 2 – prądu pierwszej fazy silnika



Rys. 10. Wyniki pomiarów podczas realizacji funkcji *fly-start*. Przebiegi: 1 – napięcia obwodu pośredniczącego; 2 – prądu pierwszej fazy silnika

Zarejestrowano przebiegi napięcia obwodu pośredniczącego podczas załączenia i wyłączenia układu (rys. 8–10). Istotnym elementem z punktu widzenia przyszłego użytkownika było sprawdzenie poprawności realizacji funkcji układu sterowania, takich jak: zatrzymanie i ponowne uruchomienie układu spowodowane zanikiem napięcia zasilającego oraz poprawna realizacja funkcji *fly-start*. Elektronika układu napędowego zasilana jest z obwodu pośredniczącego, co oznacza, iż załączenie układu może nastąpić tylko wówczas, gdy uzyskany zostanie odpowiedni poziom napięcia U_{co} , pozwalający na prawidłowe działanie układów elektronicznych. Drugą graniczną wartością układu jest napięcie U_{cmin} , oznaczające minimalną wartość roboczą napięcia obwodu pośredniczącego. Powyżej tej wartości realizowane jest wzmocnienie zadane z regulatorów. Pomiędzy wartościami granicznymi $U_{co}-U_{cmin}$ wzmocnienie układu zależy liniowo od wartości U_c . Na rys. 8–10 przedstawiono kolejno wybrane wyniki pomiarów podczas rozruchu, zatrzymania i ponownego rozruchu oraz ponownego uruchomienia przy niepełnym zatrzymaniu badanego układu. Przebiegi oznaczone numerem 2 przedstawiają prąd fazy pierwszej silnika. Kształt tego prądu (występujące w nim przerwy) jest wynikiem nastawy długiego okresu rejestracji (0,5 s/dz), koniecznego do uchwycenia zmian napięcia obwodu pośredniczącego, co powoduje zdudnienia i nieprawidłowe odtwarzanie przebiegu na rejestratorze.

Podsumowanie

Artykuł ten zawiera wybrane wyniki badań napędu składającego się z trójfazowego silnika indukcyjnego zasilanego napięciem o podwyższonej częstotliwości. Przy realizacji układów napędowych indukcyjnych zasilanych z falowników podwyższonej częstotliwości konieczne jest rozwiązanie dwóch problemów. Pierwszym jest wybór rodzaju (typu) silnika wysokoobrotowego, drugim jest dobór i wykonanie falownika napięcia. Napęd taki może stanowić alternatywę dla stosowanego obecnie w sprzęcie gospodarstwa domowego silnika komutatorowego. W badanym napędzie zastosowano konstrukcję wirnika litego o średnicy zewnętrznej 17,5 mm, który wykonany jest z jednego kawałka materiału. Konstrukcja wirnika sprawia, iż powierzchnia jest gładka, co znacząco wpływa na zmniejszenie oporów tarcia wirnika o powietrze podczas pracy układu. Konstrukcja ta również w znaczny sposób wpływa na zredukowanie niewyważenia wirnika. Wykonawca silnika, firma Zelmer, wyważył wirnik z dopuszczalnym niewyważeniem resztkowym o wartości $e = 0,4$ gmm. Prędkość krytyczna (rezonansowa) dla wirnika silnika wynosi w przybliżeniu 1460 rad/s. Wyniki badań opisanego w artykule napędu (rys. 1) są zadawalające, a współpraca z firmą Zelmer stwarza szansę na innowacyjne, prototypowe zastosowanie w sprzęcie AGD.

Literatura

- [1] BINKOWSKI T., GRAD M., ŁATKA M., MAŁSKA W., SOBCZYŃSKI D.: *13th International Power Electronics and Motion Control Conference, 1–3 September 2008*. „A Drive System with High-Speed Single-Phase Supplied Three-Phase Induction Motor”, 2008, 729–732.
- [2] BINKOWSKI T.: *Sterownik wysokoobrotowego trójfazowego silnika indukcyjnego*. Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie elektrycznym – SENE'09, Łódź 2009.

- [3] LAHTEENMAKI J.: *Design and voltage supply of high-speed induction machines*. Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering, Series No. 108, Finnish Academy of Technology, Espoo 2002.
- [4] ŁATKA M., GRAD M.: *Analiza odkształceń napięć i prądów przekształtnika AC/DC zastosowanego w wysokoobrotowych układach napędowych w urządzeniach AGD*. „Przegląd Elektrotechniczny” 8/2011.
- [5] PANDEY A., SINGH B., KOTHARI D. P.: *Comparative Evaluation of Single-phase Unity Power Factor Ac-dc Boost Converter Topologies*. „Journal Institution of Engineers India Part Electrical Engineering Division”. VOL 85, 2004, p. 102–109.
- [6] PIRÓG S.: *Energoelektronika – negatywne oddziaływania układów energoelektronicznych na źródła energii i wybrane sposoby ich ograniczenia*. Wydawnictwa AGH, Kraków 1998.
- [7] PIRÓG S.: *Magazyny energii*. Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym – SENE’07, Łódź 2007, s. 15–31.
- [8] SOBCZYŃSKI D.: *Przekształtniki energoelektroniczne do zasilania wysokoobrotowych silników małej mocy*. Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym – SENE’09, Łódź 2009.
- [9] SOBCZYŃSKI D.: *Metoda modulacji wektorowej w falowniku dwufazowym*. „Przegląd Elektrotechniczny” 2/2007, s. 71–74.

Artykuł został opracowany w ramach projektu badawczego rozwojowego R01 039 02 finansowanego przez MNiSW.

dr inż. Dariusz Sobczyński, dr inż. Małgorzata Łatka,
dr inż. Wiesława Malska – Katedra Energoelektroniki
i Elektroenergetyki, Politechnika Rzeszowska, ul. W. Pola 2,
35-959 Rzeszów, e-mail: dsobczyn@prz.edu.pl;
mlatka@prz.edu.pl; wmalaska@prz.edu.pl

dr inż. Dariusz Sobczyński jest adiunktem w Katedrze Energoelektroniki i Elektroenergetyki Politechniki Rzeszowskiej. Swoje zainteresowania naukowe koncentruje wokół napędów wysokoobrotowych małej mocy, ze szczególnym uwzględnieniem zastosowań w sprzęcie AGD.

dr inż. Małgorzata Łatka jest adiunktem w Katedrze Energoelektroniki i Elektroenergetyki Politechniki Rzeszowskiej. W zakresie działalności naukowej interesuje się zagadnieniami związanymi z problematyką jakości energii elektrycznej, a w szczególności zajmuje się oddziaływaniem układów energoelektronicznych na sieć zasilającą i wybranymi sposobami ich minimalizacji oraz układami o zmniejszonym oddziaływaniu na sieć zasilającą, a także zagadnieniami kompensacji mocy biernej z wykorzystaniem układów energoelektronicznych.

dr inż. Wiesława Malska jest adiunktem w Katedrze Energoelektroniki i Elektroenergetyki Politechniki Rzeszowskiej. Swoje zainteresowania naukowe koncentruje wokół zagadnień związanych z oddziaływaniem wybranych przekształtników energoelektronicznych na sieć zasilającą

artykuł recenzowany