

Elektrowibratory z silnikami synchronicznymi wzbudzanymi magnesami trwałymi przeznaczone do przemysłowych napędów elektrowibracyjnych

Robert Rossa

1. Wstęp

W latach 2015–2018 w Instytucie Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL oraz w firmie DEMETRIX Sp. z o.o., Sp. k. realizowano prace badawcze nad nowym typem wysokosprawnych napędów elektrycznych dla przemysłowych maszyn elektrowibracyjnych. Prace te były dofinansowane przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach trzeciej edycji Programu Badań Stosowanych. W wyniku realizacji projektu PBS opracowano modelowy, dwusilnikowy napęd elektrowibracyjny, generujący liniowe drgania mechaniczne, charakteryzujący się szeregiem zalet w stosunku do rozwiązań dostępnych na rynku [1].

W przemysłowych urządzeniach elektrowibracyjnych (przesiewacze, wstrząsarki itp.) często wymagane jest wymuszenie drgań mechanicznych liniowych, sinusoidalnie zmiennych. W dotychczasowych rozwiązaniach napędów elektrowibracyjnych drgania takie są wytwarzane przez dwusilnikowe układy napędowe, w których dwa identyczne elektrowibratory z silnikami indukcyjnymi klatkowymi pracują przeciwbieżnie, tzn. z tą samą prędkością obrotową wirników, lecz z przeciwnymi kierunkami wirowania.

Istotną wadą dotychczasowych rozwiązań dwusilnikowych napędów maszyn elektrowibracyjnych jest to, że praca przeciwbieżna silników indukcyjnych jest osiągana dzięki tzw. zjawisku samosynchronizacji [2], polegającemu na stopniowym, samoczynnym synchronizowaniu się prędkości obrotowych silników w trakcie rozruchu napędu. Samosynchronizacja występuje jedynie przy wyższych prędkościach obrotowych silników i może nie zostać osiągnięta w wyniku nawet drobnych wad konstrukcyjnych, montażowych lub materiałowych maszyny elektrowibracyjnej. Od początku rozruchu aż do momentu zsynchronizowania się prędkości obrotowych silników zjawisku samosynchronizacji towarzyszą niepożądane drgania maszyny elektrowibracyjnej, o maksymalnej amplitudzie znacznie większej od amplitudy drgań roboczych maszyny, przy czym zarówno amplituda, jak i kierunek tych drgań nie są kontrolowane. Podobne niepożądane zjawiska towarzyszą wyłączeniu dwusilnikowego napędu wibracyjnego z sieci zasilającej.

Kolejną istotną wadą obecnych rozwiązań napędów dwusilnikowych jest brak możliwości regulacji wzajemnego przesunięcia kąтового między osiami wirujących mas niewyważonych, napędzanych jednym i drugim silnikiem indukcyjnym, a w efekcie brak możliwości zmiany kierunku drgań liniowych

Streszczenie: W artykule przedstawiono konstrukcję obwodu elektromagnetycznego elektrowibratora wyposażonego w silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi (PMSM). Elektrowibrator ten jest przeznaczony do zastosowania w przemysłowych napędach elektrowibracyjnych, zwłaszcza w napędach dwusilnikowych generujących drgania mechaniczne liniowe, sinusoidalnie zmiennie. Wybrane parametry elektromechaniczne elektrowibratora z silnikiem PMSM porównano z parametrami odpowiedniego elektrowibratora tradycyjnego, wyposażonego w silnik indukcyjny klatkowy. Przedstawiono zalety wynikające z zastosowania elektrowibratorów z silnikami PMSM na tle dotychczasowych rozwiązań z silnikami indukcyjnymi.

Słowa kluczowe: silnik synchroniczny z magnesami trwałymi, elektrowibrator, napęd elektrowibracyjny

ELECTRIC VIBRATORS WITH PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS DEDICATED TO INDUSTRIAL ELECTRO-VIBRATING DRIVES

Abstract: In the paper a construction of electromagnetic circuit of electrovibrator equipped with permanent magnet synchronous motor (PMSM) is described. This electrovibrator is intended for use in the industrial vibrating motor drives, especially in dual-motor drives generating linear, sinusoidal mechanical vibrations. Selected electromechanical parameters of the electrovibrator with the PMSM motor are compared with the parameters of a similar traditional electrovibrator, equipped with a squirrel-cage induction motor. The advantages resulting from the use of electrovibrators with PMSM motors on the background of existing solutions with induction motors are presented.

Keywords: permanent magnet synchronous motor, electrovibrator, vibrating motor drive

generowanych przez napęd. Ponadto silniki indukcyjne klatkowe nie są energooszczędne i mają stosunkowo dużą masę w odniesieniu do generowanego momentu obrotowego lub do generowanej siły wymuszającej drgania w napędzie elektrowibracyjnym.

W artykule opisano konstrukcję obwodu elektromagnetycznego jednego z modelowych elektrowibratorów z silnikiem

PMSM opracowaną w ramach projektu PBS, następnie porównano wybrane parametry elektromechaniczne modelowego elektrowibratora PMSM z parametrami typowego elektrowibratora z silnikiem indukcyjnym klatkowym, o zbliżonej wydajności i prędkości obrotowej.

2. Obwód elektromagnetyczny elektrowibratora PMSM

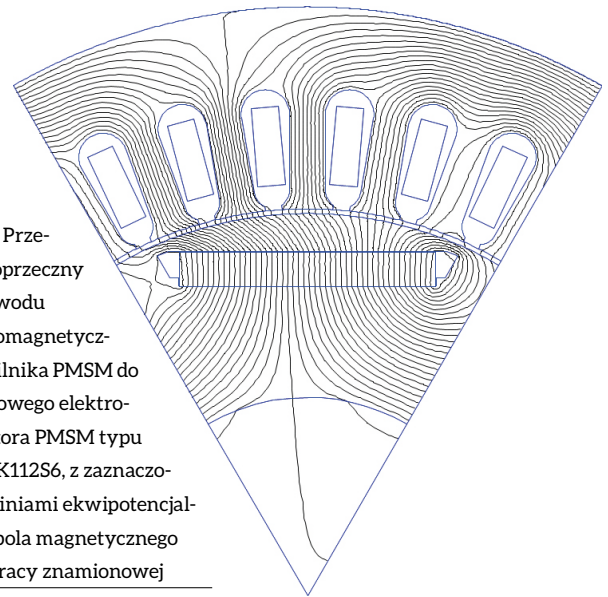
Opisywany modelowy silnik elektrowibratora PMSM zaprojektowano o wzniosie mechanicznym 112 mm. Maszynie nadano oznaczenie typu SMwsK112S6. Jest to silnik trójfazowy, z układem elektroizolacyjnym dostosowanym do zasilania z energoelektronicznych przemienników częstotliwości i o klasie temperaturowej H. Silnik ten nie jest wyposażony w klatkę rozruchową w wirniku i dla poprawnej jego pracy niezbędne jest zasilanie z odpowiednio zaprogramowanego przemiennika częstotliwości, który także został opracowany i wykonany w ramach projektu PBS (przemiennik dostarczyła firma Enel-PC Sp. z o.o.).

Modelowy silnik PMSM zaprojektowano jako maszynę o liczbie biegunów magnetycznych $2p = 6$. Uzwojenie twornika zaprojektowano jako klasyczne uzwojenie trójfazowe z cewkami rozłożonymi quasi-sinusoidalnie. Jest to uzwojenie jednowarstwowe, o liczbie żłobków na biegun i fazę $q = 2$. W tworniku zastosowano skos żłobków uzwojenia o jedną pełną podziałkę żłobkową, w celu ograniczenia niepożądanego zjawiska tzw. momentu zaczepowego [3–8].

W wirniku modelowego silnika PMSM rozmieszczono sześć biegunów magnetycznych na bazie magnesów trwałych NdFeB typu N42UH, wytrzymujących długotrwałą pracę w temperaturze do 180°C. Magnesy z domieszkami pierwiastków ziem rzadkich NdFeB doskonale nadają się do zastosowania w aplikacjach, gdzie są one narażone na drgania mechaniczne o znacznej amplitudzie i częstotliwości, gdyż poza sytuacjami skutkującymi mechanicznym uszkodzeniem magnesu (np. pęknięcie wskutek naprężeń mechanicznych) drgania mechaniczne mają znikomy wpływ na stabilność właściwości magnetycznych tych magnesów [9].

Fragment przekroju poprzecznego obwodu magnetycznego silnika SMwsK112S6 pokazano na rysunku 1. Na rysunku 2 pokazano zamocowany w korpusie uzwojony twornik, z widocznym skosem żłobków, a na rysunku 3 wirnik silnika wraz z wałem napędowym i jedną z tarcz łożyskowych. Podstawowe dane konstrukcyjne obwodu elektromagnetycznego silnika PMSM zestawiono poniżej:

- liczba biegunów magnetycznych $2p = 6$;
- średnica zewnętrzna pakietowanego rdzenia stojana (twornika) $D_1 = 175$ mm;
- średnica wewnętrzna stojana $D = 115$ mm;
- długość rdzenia $L_{Fe} = 70$ mm;
- liczba żłobków stojana $Q_s = 36$;
- skos żłobków 10 mm na $\varnothing 115$ mm;
- szczelina powietrzna $\delta = 0,7$ mm;
- średnica wału pod pakietem wirnika $D_w = 60$ mm;
- magnesy N42UH, dwa magnesy na długości rdzenia;
- uzwojenie twornika o masie miedzi 2,35 kg.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny 1/6 obwodu elektromagnetycznego silnika PMSM do modelowego elektrowibratora PMSM typu SMwsK112S6, z zaznaczonymi liniami ekwipotencjalnymi pola magnetycznego przy pracy znamionowej

Konstrukcję mechaniczną modelowego elektrowibratora z silnikiem PMSM oparto o wykorzystanie tarcz łożyskowych i mas niewyważonych z komercyjnie oferowanych na rynku elektrowibratorów z trójfazowymi silnikami indukcyjnymi. W ramach projektu PBS zaprojektowano i wykonano natomiast spawany korpus stalowy elektrowibratora PMSM, pokazany na rysunkach 2 i 4.

Modelowy elektrowibrator PMSM wykorzystuje enkoder inkrementalny do precyzyjnego, ciągłego odczytu informacji o aktualnym położeniu osi magnesów trwałych względem osi faz uzwojenia twornika. Enkoder ten zamontowano na osłonie jednej z dwóch mas niewyważonych elektrowibratora, jak pokazano na rysunku 5.

3. Porównanie wybranych parametrów modelowego elektrowibratora PMSM i odpowiednika indukcyjnego

Modelowy elektrowibrator SMwsK112S6 jest maszyną sześciobiegunową, jednak dzięki zasilaniu z dedykowanego przemiennika częstotliwości może on pracować w szerokim zakresie prędkości obrotowych, z prędkością maksymalną ok. 1800 obr./min. Przyjmując, że prędkość znamionowa modelowego elektrowibratora to 1500 obr./min, jego osiągnięte parametry elektromechaniczne postanowiono zestawić z parametrami odpowiedniego trójfazowego elektrowibratora indukcyjnego. Obliczeniowa moc znamionowa elektrowibratora PMSM to 2 kW (na wale). Do porównania dobrano dostępny na rynku elektrowibrator indukcyjny 4-biegunowy renomowanego producenta, o tym samym wzniosie mechanicznym osi wału, z zamontowanymi takimi samymi masami niewyważonymi, o mocy znamionowej wejściowej 2,5 kW. Podstawowe dane konstrukcyjne elektrowibratora indukcyjnego są następujące:

- liczba biegunów magnetycznych $2p = 4$;
- średnica zewnętrzna pakietowanego rdzenia stojana (twornika) $D_1 = 175$ mm;
- średnica wewnętrzna stojana $D = 110$ mm;
- długość rdzenia $L_{Fe} = 110$ mm;
- liczba żłobków stojana $Q_s = 36$;



Rys. 2. Uzwojony twornik silnika SMwsK112S6 osadzony w korpusie stalowym spawanym

- skos żłobków stojana – brak;
- szczelina powietrzna $\delta = 0,5$ mm;
- liczba żłobków wirnika $Q_r = 32$;
- skos żłobków wirnika – o jedną podziałkę żłobkową;
- średnica wału pod pakietem wirnika $D_w = 60$ mm;
- uzwojenie twornika o masie miedzi 2,9 kg.

Producenci elektrowibratorów z silnikami indukcyjnymi nie podają ich mocy znamionowej na wałe oraz sprawności, więc przeprowadzono badania laboratoryjne elektrowibratora indukcyjnego, które zestawiono z wynikami badań modelowego elektrowibratora PMSM. W trakcie badań elektrowibrator indukcyjny był zasilany z zespołu maszynowego lub bezpośrednio z sieci, a elektrowibrator PMSM z dedykowanego przemiennika częstotliwości. Wybrane wyniki badań laboratoryjnych obu elektrowibratorów zestawiono w tabeli 1.

Z porównania parametrów klasycznych elektrowibratorów indukcyjnych trójfazowych renomowanego producenta oraz odpowiadających im wydajnością modelowych elektrowibratorów PMSM z silnikiem SMwsK112S6 można wnioskować, że:

- długość czynną obwodu elektromagnetycznego elektrowibratora zmniejszono w nowym rozwiązaniu o 36%, ze 110 mm do 70 mm;



Rys. 3. Wirnik i wał silnika SMwsK112S6



Rys. 5. Sposób zamocowania enkodera inkrementalnego dla modelowego silnika SMwsK112S6



Rys. 4. Modelowe silniki PMSM – SMwsK112S6

Tabela 1. Zestawienie wybranych wyników z próby nagrzewania elektrowibratorów z silnikiem indukcyjnym i PMSM

	Silnik indukcyjny	Silnik PMSM
Moc na wałe, P_2 [W]	2041	2144
Moc wejściowa, P_1 [W]	2501	2401
Sprawność, η [%]	81.6	89.3
Moment na wałe, T [N·m]	13.49	13.64
Prąd zasilania, I_1 [Arms]	4.55	4.88
Napięcie zasil., U [Vrms]	400	380
Prędkość obr., n [1/min]	1445	1500
Przyrost temp. uzw. [K]	80	53
Masa elektrowibratora bez przeciwwag [kg]	89	73.5

- pomimo zmniejszenia długości obwodu elektromagnetycznego uzyskano sprawność elektrowibratora PMSM o 7,7 punktu procentowego wyższą od sprawności odpowiedniego elektrowibratora indukcyjnego (dla mocy na wale 2 kW osiągnięto w elektrowibratorze bazującym na PMSM sprawność 89,3%, wobec sprawności 81,6% dla elektrowibratora indukcyjnego);
- po uwzględnieniu sprawności przemiennika częstotliwości ok. 98%, sprawność modelowego napędu z elektrowibratorami PMSM wynosi ok. 87,5% i nadal jest o ok. 6 punktów procentowych wyższa od sprawności rozwiązania klasycznego, indukcyjnego;
- zmniejszenie długości rdzenia magnetycznego elektrowibratora o 36% przekłada się, przy zastosowaniu podobnej konstrukcji i materiałów w kadłubie i tarczach łożyskowych, na redukcję masy elektrowibratora PMSM w stosunku do elektrowibratora indukcyjnego o ok. 17,5%, z 89 kg (bez zamontowanych mas niewyważonych) na ok. 73,5 kg.

Biorąc pod uwagę powyższe dane, można stwierdzić, że istotnymi zaletami wynikającymi z zastosowania w urządzeniach elektrowibracyjnych nowych napędów elektrowibracyjnych z silnikami PMSM, w stosunku do napędów klasycznych indukcyjnych, są:

- możliwość zmniejszenia gabarytu i masy napędzanych przemysłowych urządzeń elektrowibracyjnych;
- znaczące zmniejszenie energochłonności urządzeń elektrowibracyjnych, zwłaszcza pracujących w ruchu ciągłym.

Innymi zaletami, wynikającymi z wyeliminowania zjawiska samosynchronizacji w napędach elektrowibracyjnych dwusilnikowych, poprzez zapewnienie w pełni przeciwbieżnej pracy napędu od startu do zatrzymania, są:

- zdecydowanie poprawiona kultura pracy napędu elektrowibracyjnego, poprzez wyeliminowanie lub ograniczenie niepożądanych, niekontrolowanych drgań i hałasu urządzeń wibracyjnych w trakcie ich rozruchu oraz zatrzymania;
- poprawione bezpieczeństwo użytkowania i obsługi urządzeń wibracyjnych;
- zwiększona trwałość napędzanych urządzeń wibracyjnych;
- nowa funkcjonalność napędów elektrowibracyjnych z silnikami PMSM:
 - możliwość zmiany kierunku generowanych drgań liniowych;
 - możliwość regulacji prędkości obrotowej napędu wibracyjnego w szerokim zakresie (zmiana częstotliwości drgań i tym samym parametrów przesiewania, szybkości transportu materiału);
 - możliwość zadawania cyklu pracy napędu wibracyjnego, z uwzględnieniem zmian prędkości napędu i kierunku generowanych drgań, możliwość zaprogramowania i wywoływania z pamięci sterownika różnych wcześniej zaprogramowanych cykli pracy napędu,
- możliwość zastosowania nowych funkcjonalności napędu wibracyjnego (wymienionych wyżej) dla materiałów trudnoodsiewalnych, gdzie klasyczne napędy wibracyjne są mało efektywne (zwiększenie wydajności przesiewania dla pewnej grupy materiałów).

4. Podsumowanie


Opisane w artykule rozwiązanie modelowego elektrowibratora, z silnikiem PMSM zamiast silnika indukcyjnego, jest przeznaczone głównie do napędów elektrowibracyjnych dwusilnikowych, gdzie dwa identyczne elektrowibratory PMSM są zasilane z dedykowanego przemiennika częstotliwości i pracują przeciwbieżnie od startu aż do zatrzymania, z możliwością zmiany cyklu pracy napędu wibracyjnego (zmiana prędkości lub kierunku generowanych mechanicznych drgań liniowych).

W oparciu o zaproponowane rozwiązanie napędu elektrowibracyjnego, bazujące na dwóch silnikach PMSM, Instytut KOMEL wspólnie z firmą DEMETRIX są w stanie opracować i wykonać przemysłowe urządzenia elektrowibracyjne dostosowane do specyficznych wymagań klienta, charakteryzujące się lżejszą konstrukcją i zmniejszonymi wymiarami gabarytowymi oraz znacznie wyższą sprawnością napędu elektrowibracyjnego w stosunku do rozwiązań dostępnych obecnie na rynku.

Literatura

- [1] Nowa generacja wysokosprawnych elektrowibratorów do urządzeń wibracyjnych. „Napędy i Sterowanie” 12/2018.
- [2] ENGEL Z.: *Badania synchronizacji i samosynchronizacji wibratorów mechanicznych*. „Mechanika teoretyczna i stosowana”, tom 5, zeszyt 4, PWN, Warszawa 1967.
- [3] BIANCHINI C., IMMOVILLI F., LORENZANI E., BELLINI A., DAVOLI M.: *Review of Design Solutions for Internal Permanent-Magnet Machines Cogging Torque Reduction*, in IEEE Trans. on Magn., vol. 48, no. 10, Oct. 2012.
- [4] ZHU L., JIANG S., ZHU Z., AND CHAN C.: *Analytical methods for minimizing cogging torque in permanent-magnet machines*, IEEE Trans. on Magn., vol. 45, no. 4, Apr. 2009.
- [5] DOSIEK L., PILLAY P.: *Cogging torque reduction in permanent magnet machines*, IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 43, no. 6, Nov.–Dec. 2007.
- [6] ZHU Z., RUANGSINCHAIWANICH S., SCHOFIELD N., HOWE D.: *Reduction of cogging torque in interior-magnet brushless machines*, IEEE Trans. on Magn., vol. 39, no. 5, Sep. 2003.
- [7] KANG G.-H., HUR J.: *Analytical prediction and reduction of the cogging torque in interior permanent magnet motor*, in Proc. IEEE Int. Conf. Electric Machines and Drives, May 2005.
- [8] NADOLSKI R., GAWĘCKI Z.: *Analiza możliwości zmniejszenia momentu zaczepowego w silniku bezszczotkowym prądu stałego*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 4 (108)/2015.
- [9] *Magnet Guide & Tutorial*, https://www.allianceorg.com/pdfs/Magnet_Tutorial_v85_1.pdf.

Projekt „Nowa generacja wysokosprawnych elektrowibratorów do urządzeń wibracyjnych”, współfinansowany ze środków NCBiR w ramach Programu Badań Stosowanych, zgodnie z umową: PBS3/B4/15/2015.

 dr inż. Robert Rossa

e-mail: r.rossa@komel.katowice.pl

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL