

Robert Rossa

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice
Tomasz Biskup, ENEL-PC Sp. z o.o., Przyszowice

PORÓWNANIE KONSTRUKCJI OBWODÓW ELEKTROMAGNETYCZNYCH PRZEMYSŁOWYCH TRÓJFAZOWYCH ELEKTROWIBRATORÓW, INDUKCYJNEGO I PMSM, O PRĘDKOŚCI 1500 obr/min I MOCY 2 kW

COMPARISON OF ELECTROMAGNETIC CIRCUIT STRUCTURES OF INDUSTRIAL 3-PHASE ELECTRIC VIBRATORS, INDUCTION AND PMSM, WITH SPEED 1500 rpm AND 2 kW POWER

Streszczenie: Artykuł dotyczy napędów elektrowibracyjnych dwusilnikowych, które są źródłem drgań liniowych sinusoidalnie zmiennych w różnego typu przemysłowych urządzeniach wibracyjnych, jak np. przesiewacze czy przenośniki wibracyjne. W napędach tych stosowane są dwa elektrowibratory pracujące przeciwbieżnie, wyposażone zazwyczaj w trójfazowe silniki indukcyjne klatkowe zasilane bezpośrednio z sieci elektrycznej. Praca przeciwbieżna obu elektrowibratorów jest osiągana dzięki zjawisku samosynchronizacji. Dzięki pracom B+R, obecnie pojawiła się możliwość zastosowania w tego typu napędach elektrowibracyjnych silników synchronicznych z magnesami trwałymi (ang. skrót PMSM), zasilanych z dedykowanych przemienników częstotliwości. W artykule porównano konstrukcję obwodu elektromagnetycznego trójfazowego elektrowibratora indukcyjnego o mocy 2 kW i prędkości znamionowej 1500 obr/min, z konstrukcją obwodu elektromagnetycznego elektrowibratora wyposażonego w silnik PMSM, zapewniającego osiągnięcie podobnych parametrów w zakresie siły wymuszającej drgania. W oparciu o wyniki obliczeń elektromagnetycznych wykazano, że elektrowibrator z silnikiem PMSM, przy zachowaniu tych samych parametrów obciążenia, w stosunku do elektrowibratora indukcyjnego, charakteryzuje się znacząco wyższą sprawnością i jednocześnie mniejszymi wymiarami gabarytowymi i masą. W artykule opisano też inne istotne zalety zastosowania elektrowibratorów PMSM w napędach elektrowibracyjnych dwusilnikowych, w stosunku do napędów z elektrowibratorami indukcyjnymi.

Abstract: The article deals with dual motor electro-vibrating drives, which are the sources of linear sinusoidal vibrations in various types of industrial vibrating devices, like vibrating screens or conveyors. These drives use two counter-rotating electric vibrators, usually equipped with three-phase squirrel-cage induction motors powered directly from the electrical grid. The counter-rotating operation of both electric vibrators is achieved due to the phenomenon of self-synchronization. Thanks to R&D work, now it is possible to use permanent magnet synchronous motors (PMSM) in this type of drives, powered from dedicated frequency converters. The article compares the design of the electromagnetic circuit of a 3-phase induction electric vibrator with a power of 2 kW and a rated speed of 1500 rpm with the design of the electromagnetic circuit of an electric vibrator equipped with a PMSM motor, ensuring similar performance in terms of vibration exciting force. Based on the results of electromagnetic calculations, it has been shown that the electric vibrator with the PMSM motor, while maintaining the same load parameters in relation to the induction electric vibrator, is characterized by significantly higher efficiency and, at the same time, smaller overall dimensions and weight. The article also describes other significant advantages of using PMSM electric vibrators in dual motor electro-vibrating drives, compared to drives with induction electric vibrators.

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

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

1. Wstęp

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 prze-

ciwbieżna silników indukcyjnych jest osiągana dzięki tzw. zjawisku samosynchronizacji [1, 2], polegającemu na stopniowym, samoczynnym synchronizowaniu się prędkości obrotowych silników w trakcie rozruchu napędu. Samosynchronizacja występuje dopiero 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.

Przemysłowe napędy elektrowibracyjne są zwykle napędami pracującymi w cyklach wielogodzinnych, dlatego istotnym czynnikiem wpływającym na koszty użytkowania napędu jest sprawność zastosowanych elektrowibratorów. Silniki indukcyjne klatkowe małej mocy charakteryzują się stosunkowo niską sprawnością w porównaniu do innych rodzajów silników elektrycznych dostępnych aktualnie na rynku, a zwłaszcza w stosunku do silników synchronicznych z magnesami trwałymi (ang. skrót PMSM). Ponadto, silnik PMSM o tym samym gabarycie jak silnik indukcyjny, charakteryzuje się znacznie wyższą gęstością momentu, co w przypadku zastosowania silnika PMSM zamiast silnika indukcyjnego do napędu elektrowibratora o określonej sile wymuszającej drgania (narzucona prędkość drgań oraz wymiary i masa przeciwwag montowanych na obu końcach wału elektrowibratora) powinno skutkować zmniejszeniem objętości i masy obwodu elektromagnetycznego elektrowibratora.

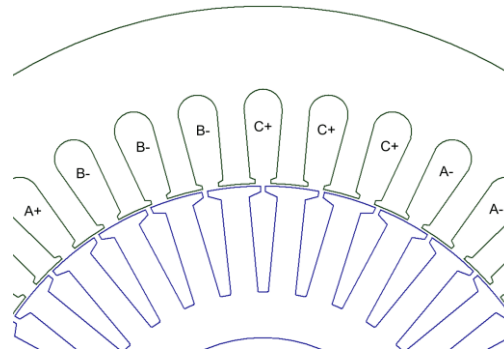
W artykule porównano konstrukcję obwodu elektromagnetycznego trójfazowego elektrowibratora indukcyjnego o mocy 2 kW i prędkości znamionowej 1500 obr/min, z konstrukcją obwodu elektromagnetycznego elektrowibratora wyposażonego w silnik PMSM, zapewniającego osiągnięcie podobnych parametrów w zakresie siły wymuszającej drgania. W oparciu o wyniki obliczeń elektromagnetycznych wykazano, że elektrowibrator z silnikiem PMSM, przy zachowaniu tych samych parametrów ob-

ciążenia, w stosunku do elektrowibratora indukcyjnego, charakteryzuje się znacząco wyższą sprawnością i jednocześnie mniejszymi wymiarami gabarytowymi i masą. W artykule opisano także inne istotne zalety zastosowania elektrowibratorów z silnikami PMSM w przemysłowych napędach elektrowibracyjnych dwusilnikowych, w stosunku do napędów z elektrowibratorami indukcyjnymi.

2. Obwód elektromagnetyczny elektrowibratora indukcyjnego

Do porównania konstrukcji obwodów elektromagnetycznych wybrano dostępny komercyjnie na rynku elektrowibrator indukcyjny 3-fazowy, 4-biegunowy, o mocy znamionowej 2,5 kW (moc pobierana) i prędkości synchronicznej 1500 obr/min. Stojan uzwojony elektrowibratora indukcyjnego nie odbiega konstrukcyjnie od stojanów innych zbliżonych mocą i prędkością silników indukcyjnych. Rdzeń stojana wykonany jest jako pakietowany z blach elektrotechnicznych prądnicowych. Uzwojenie stojana jest klasycznym uzwojeniem 3-fazowym, z cewkami rozłożonymi quasi-sinusoidalnie. W przypadku wybranego elektrowibratora indukcyjnego jest to uzwojenie wykonane jako jednowarstwowe, o liczbie żłobków na biegun i fazę $q = 3$.

Wirnik wybranego elektrowibratora indukcyjnego posiada uzwojenie jednoklatkowe, odlwane z aluminium. Zastosowano nieskomplikowany kształt żłobka, pokazany na rysunku 1, skutkujący stosunkowo płaską charakterystyką elektromechaniczną momentu w funkcji poślizgu lub prędkości obrotowej wirnika, z momentem rozruchowym $T_l = 38 \text{ N}\cdot\text{m}$ i momentem krytycznym $T_b = 46 \text{ N}\cdot\text{m}$ (wartości obliczone). W wirniku zastosowano 32 żłobki, wykonane ze skosem o jedną podziałkę żłobkową wirnika.

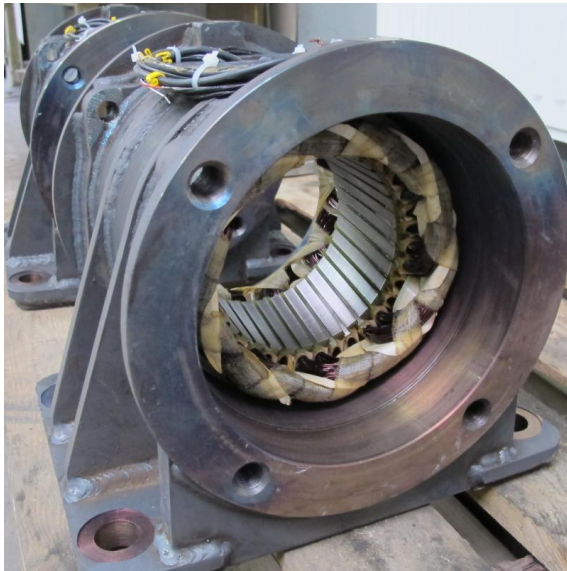


Rys.1. Fragment przekroju obwodu magnetycznego silnika indukcyjnego do przemysłowego elektrowibratora 1500 obr/min, 2 kW

Podstawowe dane konstrukcyjne obwodu elektromagnetycznego elektrowibratora indukcyjnego o mocy znamionowej (pobieranej) 2,5 kW zestawiono w tabeli 1.

3. Obwód elektromagnetyczny elektrowibratora PMSM

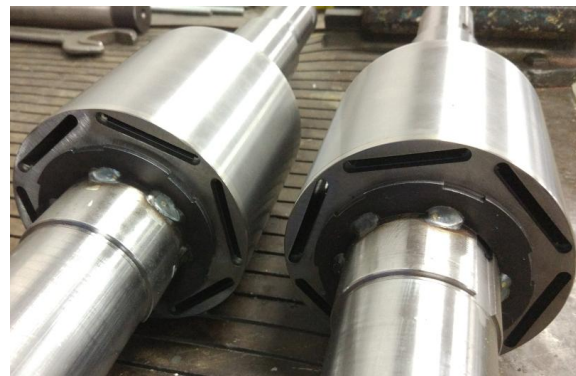
Silnik PMSM, mający być odpowiednikiem dla silnika w elektrowibratorze indukcyjnym, zaprojektowano z zachowaniem tej samej średnicy zewnętrznej rdzenia magnetycznego stojana oraz tej samej średnicy wewnętrznej rdzenia wirnika do jego osadzenia na wale. Dzięki temu, w początkowym etapie prac badawczych, możliwe było wykorzystanie wybranych podzespołów z seryjnie produkowanego elektrowibratora indukcyjnego. Silnik PMSM oznaczono typem SMwsK112S6.



Rys. 2. Uzwojony stojan silnika PMSM osadzony w korpusie stalowym spawanym. Uzwojenie rozłożone quasi-sinusoidalnie, jednowarstwowe, 2 żłobki na biegun i fazę, skos żłobków stojana o pełną podziałkę żłobkową

Tak jak opisany w punkcie 2 silnik indukcyjny, także silnik PMSM jest maszyną trójfazową, z uzwojeniem stojana rozłożonym quasi-sinusoidalnie. Zastosowano uzwojenie jednowarstwowe, o liczbie żłobków na biegun i fazę $q = 2$ (rys. 2). Silnik PMSM nie jest wyposażony w klatkę rozruchową w wirniku, zatem dla jego poprawnej pracy niezbędne jest zasilanie z odpowiednio zaprogramowanego przemiennika częstotliwości. Układ izolacyjny uzwojenia stojana dostosowano do takiego zasilania. W stojanie (tworniku) silnika PMSM zastosowano skos żłobków uzwojenia o jedną pełną podziałkę żłobkową (rys. 2), w celu zminimalizowania niepożądanego zjawiska tzw. momentu zaczepowego [3 ÷ 8].

Silnik PMSM zaprojektowano jako maszynę o liczbie biegunów magnetycznych $2p = 6$. Zastosowanie sześciu zamiast czterech biegunów magnetycznych wynika tu z korzystniejszego pod względem mechanicznym kształtu wykroju blach rdzenia magnetycznego wirnika. Z uwagi na stosunkowo dużą średnicę wału w silnikach do elektrowibratorów, wysokość rdzenia wirnika mierzona od wału do szczeliny powietrznej jest niewielka. Korzystne jest więc zastosowanie rozmieszczenia magnesów trwałych w obrębie podziałki biegunowej wirnika w postaci jednego magnesu płaskiego umiejscowionego możliwie blisko średnicy zewnętrznej wirnika, jak to pokazano na rysunkach 3 i 4.

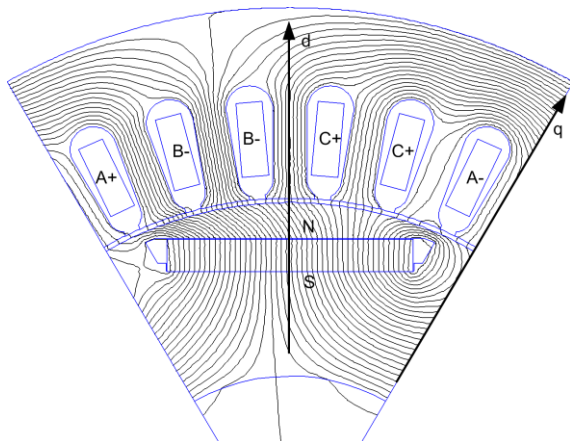


Rys. 3. Wirniki modelowych silników PMSM do elektrowibratorów o mocy 2 kW. Przy zastosowanym sposobie rozmieszczenia magnesów trwałych, zwiększenie liczby biegunów skutkuje zmniejszeniem objętości i masy nabiegunków oraz pojedynczego magnesu trwałego

Przy rozmieszczeniu magnesów trwałych w wirniku jak na rysunku 3, zwiększenie liczby biegunów skutkuje zmniejszeniem objętości i masy nabiegunków, tj. fragmentów rdzenia wirnika znajdujących się pomiędzy magnesami

a szczeliną powietrzną oraz zmniejszeniem objętości i masy każdego z magnesów. Z uwagi na drgania elektrowibratora, zmniejszenie masy nabiegownika i magnesu jest korzystne z punktu widzenia trwałości silnika PMSM, gdyż znacząco zmniejszają się narażenia mechaniczne działające na mostki magnetyczne w rdzeniu wirnika obecne przy zewnętrznych krawędziach gniazd do osadzenia magnesów.

Sześć biegunów magnetycznych w wirniku silnika PMSM wykonano na bazie magnesów trwałych z domieszkami pierwiastków ziem rzadkich NdFeB, typ N42UH. Magnesy NdFeB doskonale nadają się do zastosowania w aplikacjach, w których 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].



Rys.4. Przekrój poprzeczny 1/6 obwodu elektromagnetycznego modelowego silnika PMSM typu SMwsK112S6, z pokazanymi liniami ekwipotencjalnymi pola magnetycznego przy pracy znamionowej

Jako że silnik elektrowibratora PMSM nie posiada klatki rozruchowej w wirniku, do jego rozruchu i poprawnej pracy niezbędny jest dedykowany przemiennik częstotliwości. Konstrukcję i sposób sterowania odpowiedniego przekształtnika AC/DC/AC, przeznaczonego do zastosowania w napędach elektrowibracyjnych dwusilnikowych, przedstawiono w [10]. Dzięki zasilaniu z przemiennika częstotliwości, prędkość obrotowa silnika PMSM może być regulowana w szerokim zakresie. Dla wykonanego w ramach projektu PBS napędu elektrowibracyjnego, w którym przeciwbieżnie pracują dwa

egzemplarze opisanego tu silnika PMSM sterowane wg algorytmu podanego w [10], zakres regulacji prędkości to $0 \div 1800$ obr/min.



Rys. 5. Sposób zamocowania enkoderów inkrementalnych na modelowych elektrowibratorach z silnikami PMSM

Sterowanie pozycją wirników w dwusilnikowym napędzie elektrowibracyjnym opisanym w patencie [10] realizowane jest z wykorzystaniem enkoderów inkrementalnych. Sposób montażu enkoderów w wykonanych modelowych elektrowibratorach z silnikami PMSM pokazano na rysunku 5.

Tabela 1. Zestawienie podstawowych danych konstrukcyjnych obwodów elektromagnetycznych silników indukcyjnego i PMSM do zastosowania w elektrowibratorze o mocy 2 kW

	Silnik indukcyjny	Silnik PMSM
liczba biegunów	4	6
średnica zewnętrzna rdzenia stojana [mm]	175	175
średnica wewnętrzna stojana [mm]	110	115
długość czynna rdzenia [mm]	110	70
całkowita długość rdzenia uzwojonego stojana [mm]		
liczba żłobków stojana	36	36
skos żłobków uzwojenia stojana	brak	10 °mech.
szczelina powietrzna [mm]	0.5	0.7
liczba żłobków uzwojenia wirnika	32 (ze skosem)	brak
średnica wału pod pakietem wirnika [mm]	60	60
masa rdzenia stojana [kg]	9.0	5.2
masa miedzi w uzwojeniu stojana (obliczona) [kg]	2.9	2.4
masa rdzenia wirnika [kg]	4.1	3.2
masa klatki wirnika [kg]	1.1	---
masa magnesów trwałych (obliczona) [kg]	---	0.6
całkowita masa obwodu elektromag. (obliczona) [kg]	17.1	11.4

4. Porównanie wybranych obliczonych parametrów elektrowibratorów indukcyjnego i PMSM

W tabeli 2 zestawiono wybrane wyniki obliczeń elektromagnetycznych przeprowadzonych dla silników indukcyjnego i jego odpowiednika PMSM, przeznaczonych do zastosowania w elektrowibratorach o mocy ok. 2 kW. Obliczenia przeprowadzono dla prędkości synchronicznej 1500 obr/min.

Tabela 2. Zestawienie wybranych wyników obliczeń elektromagnetycznych silników indukcyjnego i PMSM do zastosowania w elektrowibratorze o mocy 2 kW

	Silnik indukcyjny	Silnik PMSM
prędkość obr., n [1/min]	1445	1500
częstotliwość, f [Hz]	50	75
prąd zasilania, I_1 [A _{rms}]	5,2	4,65
napięcie zasil., U [V _{rms}]	400	287
moc na wale, P_2 [W]	2010	2000
moc wejściowa, P_1 [W]	2512	2240
straty Cu stojana dP_{Cu1} [W]	262	103
straty w klatce wir. dP_{Al} [W]	90	---
straty w rdzeniu, dP_{Fe} [W]	40	27
straty mech. i dodatkowe [W]	110	110
suma strat, dP [W]	502	240
sprawność, η [%]	80.0	89.3
współczynnik mocy, $\cos \varphi$ [-]	0,69	0,97
moment na wale, T [N·m]	13.3	12.7
moment max., T_{max} [N·m]	46	73 (35)*
prąd przy T_{max} , I_{1max} [A _{rms}]	22	22 (11)*

* przy tym samym prądzie obciążenia jak dla silnika indukcyjnego 22 A_{rms}, silnik PMSM wytwarza znacznie wyższy moment, natomiast maksymalny prąd przemienika w modelowym napędzie wibracyjnym dwusilnikowym był ograniczony do ok. 11 A_{rms}.

Z porównania wyników obliczeń elektromagnetycznych zamieszczonych w tabeli 2 wynika, że:

- stosując w elektrowibratorze silnik PMSM w miejsce silnika indukcyjnego, długość czynną obwodu elektromagnetycznego można znacząco zmniejszyć, w analizowanym przykładzie elektrowibratora o mocy 2 kW zmniejszono długość rdzenia ze 110 mm do 70 mm, tj. o ok. 36 %;
- mimo zmniejszenia długości obwodu elektromagnetycznego, sprawność elektrowibratora z silnikiem PMSM powinna być znacząco

wyższa od sprawności elektrowibratora indukcyjnego, w analizowanym przykładzie obliczona sprawność silnika PMSM jest o 9,3 punktu procentowego wyższa od sprawności odpowiedniego elektrowibratora indukcyjnego;

- po uwzględnieniu sprawności przemiennika częstotliwości ok. 98 %, obliczona sprawność modelowego napędu elektrowibracyjnego z dwoma silnikami PMSM wynosi ok. 87,5 % i jest nadal znacząco wyższa od sprawności napędu z silnikami indukcyjnymi;
- pomimo znacznego zmniejszenia długości rdzenia, silnik PMSM nadal charakteryzuje się wyższą chwilową przeciążalnością momentem, należy jednak wziąć pod uwagę ewentualne ograniczenie momentu maksymalnego napędu z silnikami PMSM wynikające z dopuszczalnej obciążalności prądowej przemiennika częstotliwości.

Analizując dane z tabeli 2 można stwierdzić, że istotnymi zaletami wynikającymi z zastosowania w przemysłowych napędach elektrowibracyjnych silników PMSM w miejsce dotychczas stosowanych silników indukcyjnych, są:

- znaczące zmniejszenie energochłonności urządzeń elektrowibracyjnych, zwłaszcza pracujących w ruchu ciągłym;
 - zmniejszenie gabarytu i masy napędów elektrowibracyjnych, zwłaszcza dwusilnikowych.
- Kolejne istotne zalety zastosowania w dwusilnikowych napędach elektrowibracyjnych silników PMSM zamiast indukcyjnych są związane z wyeliminowaniem zjawiska samosynchronizacji. W napędach z silnikami PMSM sterowanych wg algorytmu podanego w patencie [10], praca przeciwbieżna obu silników jest zapewniona od startu aż do zatrzymania napędu, a zaletami tego są:
- zdecydowanie poprawiona kultura pracy napędu elektrowibracyjnego, poprzez wyeliminowanie lub ograniczenie niepożądanych, niekontrolowanych drgań i hałasu urządzeń wibracyjnych w trakcie ich rozruchu oraz zatrzymania;
 - możliwość zastosowania lżejszych i mniejszych gabarytowo konstrukcji przemysłowych urządzeń wibracyjnych;
 - poprawione bezpieczeństwo użytkowania i obsługi urządzeń wibracyjnych;
 - zwiększona trwałość napędzanych urządzeń wibracyjnych;

Ponadto, opisany w patencie [10] sposób sterowania dwoma silnikami PMSM wprowadza nowe funkcjonalności przemysłowych, dwusilnikowych napędów elektrowibracyjnych:

- 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,

Powyższe nowe funkcjonalności dwusilnikowych napędów elektrowibracyjnych mogą być przydatne w bazujących na drganiach liniowych procesach przetwarzania materiałów trudnodostępnych, gdzie klasyczne napędy wibracyjne są mało efektywne (zwiększenie wydajności przesiewania dla pewnej grupy materiałów).

5. 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, można opracować i wdrożyć przemysłowe urządzenia elektrowibracyjne dostosowane do specyficznych wymagań klienta, charakteryzujące się lżejszą konstrukcją i mniejszymi wymiarami gabarytowymi oraz znacznie wyższą sprawnością napędu elektrowibracyjnego, w stosunku do rozwiązań dostępnych obecnie na rynku.

6. Literatura

[1]. „Nowa generacja wysokosprawnych elektrowibratorów do urządzeń wibracyjnych”, *Napędy i Sterowanie*, nr 12/2018, str. 32-33.

[2]. Engel Z., „Badania synchronizacji i samosynchronizacji wibratorów mechanicznych”, *Mechanika Teoretyczna i Stosowana*, tom 5, zeszyt 4, str. 451, PWN, Warszawa, 1967.

[3]. Bianchini C., Immovilli F., Lorenzani E., Bellini A. and Davoli M., "Review of Design Solutions for Internal Permanent-Magnet Machines Cogging Torque Reduction," in *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 48, no. 10, pp. 2685-2693, 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, pp. 2023-2031, Apr. 2009.

[5]. Dosiek L., Pillay P., "Cogging torque reduction in permanent magnet machines", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 43, no. 6, pp. 1565-1571, 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, pp. 3238-3240, 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, pp. 1620.

[8]. Nadolski R., Gawęcki Z., „Analiza możliwości zmniejszenia momentu zaczepowego w silniku bezszczotkowym prądu stałego”, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 4/2015 (108).

[9]. "Magnet Guide & Tutorial", https://www.allianceorg.com/pdfs/Magnet_Tutorial_v85_1.pdf.

[10]. Patent do zgłoszenia nr P.426170, Paciorek K., Biskup T., Rossa R., Glinka T., „Układ napędowy dwusilnikowy maszyn elektrowibracyjnych oraz sposób jego rozruchu i sterowania w czasie pracy”.

Autorzy

dr inż. Robert Rossa
r.rossa@komel.com.pl
Sieć Badawcza Łukasiewicz Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL
40-203 Katowice, al. Roździeńskiego 188

dr inż. Tomasz Biskup
t.biskup@enel-pc.pl
ENEL-PC Sp. z o.o.
44-178 Przyszowice, ul. Graniczna 74B

Informacje dodatkowe

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