

**Robert Rossa**

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

## **ELEKTROWIBRATORY Z SILNIKAMI SYNCHRONICZNYMI WZBUDZANYMI MAGNESAMI TRWAŁYMI PRZEZNACZONE DO PRZEMYSŁOWYCH NAPĘDÓW ELEKTROWIBRACYJNYCH**

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

**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 zmienne. 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.

**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.

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

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

### **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 osiągnięta 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 kon-

trolowane. 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 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.

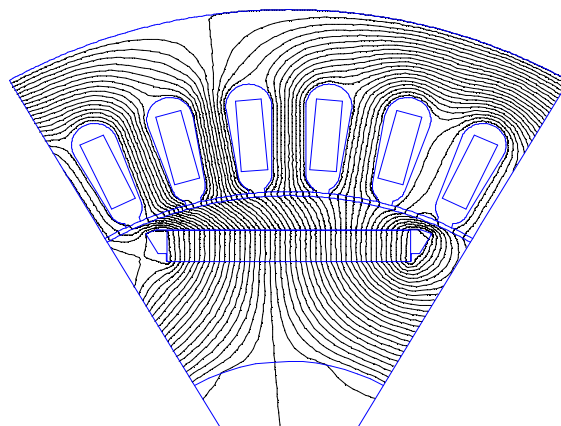
## 2. Obwód elektromagnetyczny elektrowibratora PMSM

Opisywany modelowy silnik elektrowibratora PMSM zaprojektowano we 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 (przełącznik dostarczyła firma Enel-PC Sp. z o.o.).

Modelowy silnik PMSM zaprojektowano 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 długotrwałe prace 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].

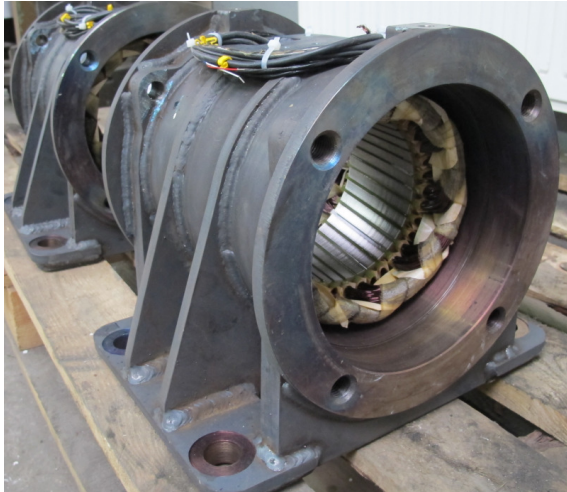


Rys. 1. Przekrój poprzeczny 1/6 obwodu elektromagnetycznego modelowego elektrowibratora PMSM typu SMwsK112S6, z zaznaczonymi liniami ekwipotencjalnymi pola magnetycznego przy pracy znamionowej

Fragment przekroju poprzecznego obwodu elektromagnetycznego 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 obwodzie  $\Pi$  115 mm;
- szczelina powietrzna  $\delta = 0.7$  mm;
- średnica wału pod pakietem wirnika  $D_w = 60$  mm;
- magnesy N42UH, dwa magnesy na długości rdzenia;

- masa miedzi w uzwojeniu twornika 2.35 kg. Konstrukcję mechaniczną modelowego elektrowibratora z silnikiem PMSM oparto na wykorzystaniu 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.



Rys. 2. Uzwojenia twornika silnika SMwsK112S6, osadzone w korpusie stalowym spawanym



Rys. 3. Wirnik i wał silnika SMwsK112S6

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



Rys. 4. Modelowe silniki PMSM - SMwsK112S6



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

### 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 zestawzić z parametrami odpowiedniego trójfazowego elektrowibratora indukcyjnego. Obliczeniowa moc zna-

mionowa 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  $Q_s = 36$ ;
- 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;
- masa miedzi w uzwojeniu twornika 2.9 kg.

Producenci elektrowibratorów z silnikami indukcyjnymi nie podają ich mocy znamionowej na wale 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.

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

	Silnik indukcyjny	Silnik PMSM
Moc na wale, $P_2$ [W]	2041	2144
Moc wejściowa, $P_1$ [W]	2501	2401
Sprawność, $\eta$ [%]	81.6	89.3
Moment na wale, $T$ [Nm]	13.49	13.64
Prąd zasilania, $I_1$ [A <sub>rms</sub> ]	4.55	4.88
Napięcie zasil., $U$ [V <sub>rms</sub> ]	400	380
Prędkość obr., $n$ [1/min]	1445	1500
Przyrost temp. uzw. [K]	80	53
Masa elektrowibratora bez przeciwwag [kg]	89	73.5

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;
- 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 ponad 7 % 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 funkcji 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.

#### 5. 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](https://www.allianceorg.com/pdfs/Magnet_Tutorial_v85_1.pdf).

#### Autor

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

#### 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.