

# Proces technologiczny produkcji wirnika silnika synchronicznego małej mocy wzbudzanego magnesami trwałymi

Paweł Zalas, Piotr Kisielewski

## 1. Wstęp

Nowoczesne konstrukcje silników elektrycznych wzbudanych magnesami trwałymi (PMSM) z klatką rozruchową lub bez klatki, przeznaczone do rozruchu bezpośredniego lub częstotliwością i pracy z regulowaną prędkością obrotową, stanowią bardzo ciekawą alternatywę dla stosowanych powszechnie klasycznych silników indukcyjnych [3, 4, 7]. Silniki tego typu charakteryzują się najkorzystniejszym spośród maszyn elektrycznych wirujących stosunkiem uzyskiwanego momentu i mocy znamionowej do objętości i masy maszyny. Maszyny takie najczęściej wykonuje się poprzez modyfikację maszyny indukcyjnej. Wymaga to jednak odpowiednich zmian w technologii wytwarzania poszczególnych elementów silnika, modyfikacji narzędzi oraz przyrządów wykorzystywanych do produkcji i kontroli poprawności wykonania poszczególnych części/detali oraz zmian kolejności i przebiegu odpowiednich procesów technologicznych. Maszyna PMSM to konstrukcja, która łączy w sobie zalety silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi (wysoką sprawność oraz współczynnik mocy) oraz prostotę konstrukcji i obsługi silnika indukcyjnego [1, 8].

W artykule opisano podstawowe problemy oraz niezbędne zmiany w procesie produkcji silnika LSPMSM małej mocy w stosunku do klasycznego silnika indukcyjnego. Wykorzystano doświadczenia zdobyte podczas wykonania prototypu silnika wzbudzanego magnesami trwałymi z klatką rozruchową, przeznaczonego do rozruchu bezpośredniego wentylatorów i pomp.

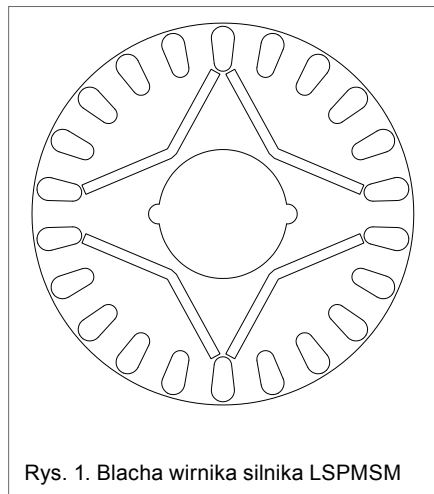
## 2. Konstrukcja wirnika silnika LSPMSM małej mocy

W opracowanej konstrukcji silnika LSPMSM małej mocy zarówno rdzeń stojana, jak i wirnika będą wykonywa-

ne w postaci pakietu blach. Blachy zarówno pakietu wirnika, jak i stojana będą wycinane podczas jednego procesu technologicznego z tego samego fragmentu taśmy elektrotechnicznej z wykorzystaniem pras szybkobieżnych. Jako materiał blach prototypowego silnika małej mocy wzbudzanego magnesami trwałymi zastosowano taśmę elektrotechniczną izotropową M600-50A (1.0814) z powłoką izolacyjną J3 wg PN-EN 10106, o grubości 0,5 mm.

W opracowanej konstrukcji blacha wirnika posiada 22 żłobki klatki rozruchowej, rozmieszczone równomierne na obwodzie, oraz cztery podwójne żłobki przeznaczone na magnesy trwałe. Kształt blachy pakietu wirnika silnika prototypowego pokazano na rys. 1. Żłobki przeznaczone na osadzanie magnesów są rozmieszczone niesymetrycznie, ale powtarzalnie, co 180 stopni (rys. 1).

W procesie pakietowania wirnika typowego silnika indukcyjnego małej mocy wstępne pozycjonowanie blach ma na celu ustalenie odpowiedniego skosu żłobków. W przypadku opracowanej konstrukcji silnika wzbudzanego magnesami trwałymi wstępne pozycjonowanie blach wirnika musi mieć na celu ustalenie prostoliniowości żłobków wirnika oraz prze-



Rys. 1. Blacha wirnika silnika LSPMSM

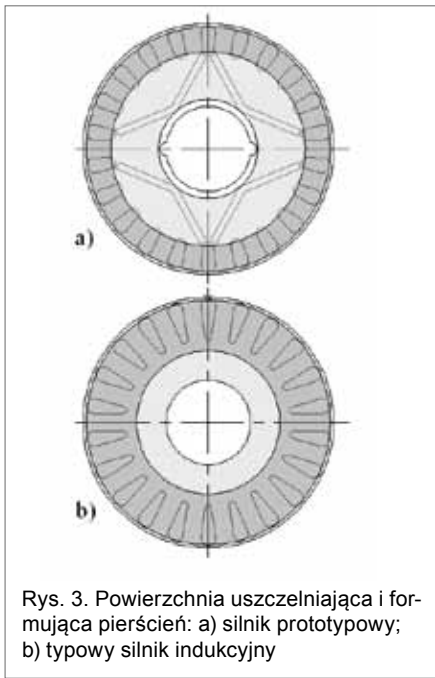
## SMALL POWER SYNCHRONOUS MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS

**Abstract:** The work presents basic problems as well as indispensable changes in technology of the production of individual units of motors, modification of tools as well as attachments used to production and accuracy check of realization of individual parts and details as well as changes order and course technological processes in process of production of low-power permanent magnet synchronous motors in relation to typical similar power induction motors. The article presents experiences captured during production of the prototype motor with squirrel-cage and permanent magnets (LSPMSM), designed to line starting of fans and pumps.

strzeni przeznaczonych w dalszym etapie produkcji na osadzenie magnesów trwałych. Wymaga to odpowiedniej modyfikacji narzędzi wykorzystywanych w tym procesie. W celu zwiększenia pewności poprawnego przebiegu tego proce-



Rys. 2. Pakiet blach wirnika silnika LSPMSM małej mocy

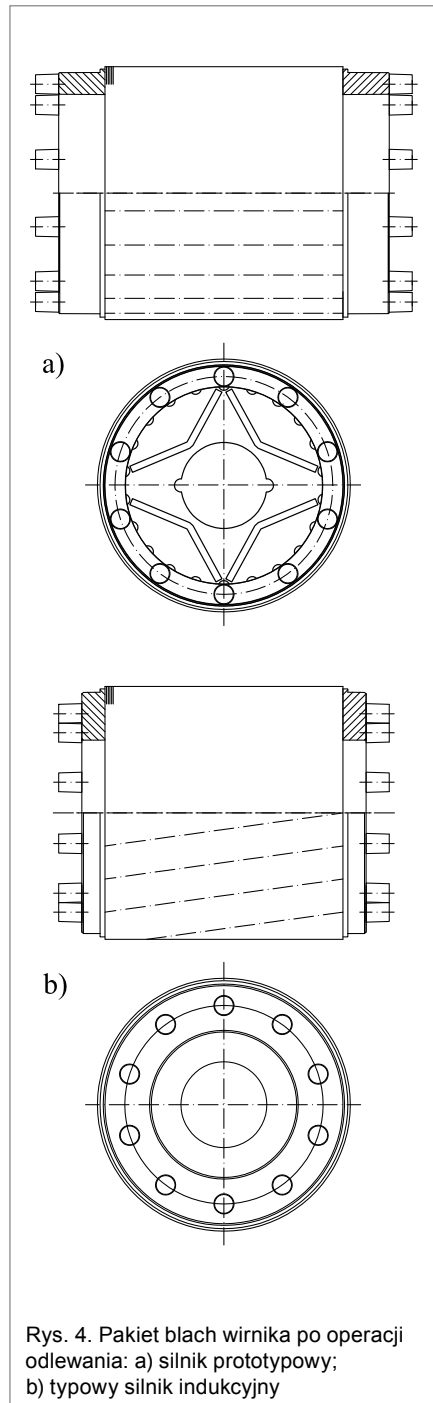


Rys. 3. Powierzchnia uszczelniająca i formująca pierścień: a) silnik prototypowy; b) typowy silnik indukcyjny

su, w opracowanej konstrukcji blachy wirnika przewidziano dodatkowe marki (półkoliste wycięcia w blachach od strony wału), rozmieszczone symetrycznie na wewnętrznej średnicy blachy (rys. 1). W celu unieruchomienia wstępnie pozycjonowanych (za pomocą szpilek) blach pakietu wirnika zostaną one osadzone na technologicznym trzpieniu rozprężnym z wykorzystaniem prasy hydraulicznej. Kształt trzpienia rozprężnego również musi zostać zmodyfikowany (dodatkowa nadlewka) i dopasowany do kształtu marek blach, co uniemożliwi obrót blach podczas procesu pakietowania oraz odlewania klatki wirnika. Widok pakietu blach wirnika po operacji pozycjonowania pokazano na rys. 2.

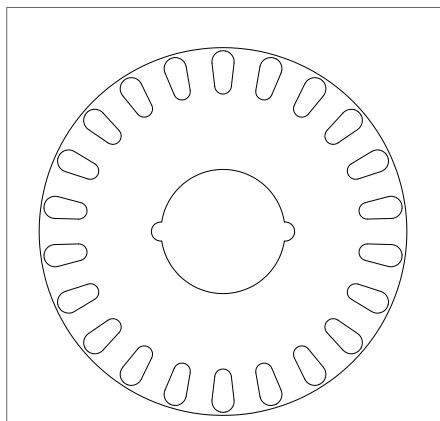
Odlewanie klatki wirnika opracowanego silnika LSPMSM oraz pierścieni zawierających pręty klatki i nadlewk wykorzystywanych w procesie wyważania „wirnika gotowego” wykonane będzie metodą ciśnieniową. Jako materiał klatki wirnika przyjęto aluminium hutnicze EN AB-10500 (A1) wg PN-EN 576, utrzymywane podczas procesu w stanie płynnym. Ze względu na wysoką temperaturę panującą w tym procesie odlewanie musi się odbywać przed włożeniem magnesów do wirnika. W innym przypadku doszłoby do odmagnesowania magnesów trwałych pod wpływem wysokiej temperatury.

W celu ustalenia odpowiednich wymiarów pierścienia zawierającego pręty klatki wirnika w procesie produkcji typowego silnika indukcyjnego stosowa-



Rys. 4. Pakiet blach wirnika po operacji odlewania: a) silnik prototypowy; b) typowy silnik indukcyjny

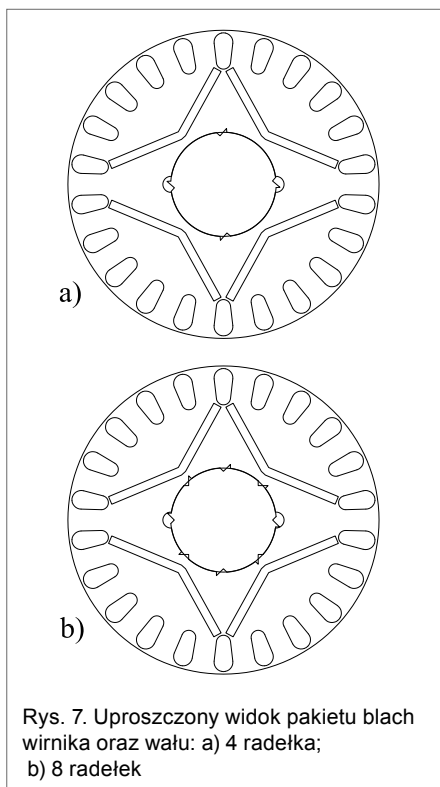
ne są wkładki formująco-uszczelniające. Ich dodatkowym przeznaczeniem jest uszczelnienie formy, zapobiegające wlewu się ciekłego aluminium do przestrzeni przeznaczonej na wał silnika. Użycie typowego oprzyrządowania wykorzystywanego do ciśnieniowego odlewania wirnika silnika indukcyjnego nie zabezpieczy przed wlewu się ciekłego aluminium do przestrzeni przeznaczonych na osadzenie magnesów trwałych w opracowanej konstrukcji silnika LSPMSM. Wymaga to odpowiedniej modyfikacji obu wkładek (górnej i dolnej) oraz zmiany



Rys. 5. Specjalna konstrukcja skrajnej blachy pakietu wirnika silnika LSPMSM małej mocy



Rys. 6. Wirnik silnika prototypowego wzbudzanego magnesami trwałymi



Rys. 7. Uproszczony widok pakietu blach wirnika oraz wału: a) 4 radełka; b) 8 radełek

rozstawu dysz doprowadzających ciekłe aluminium. Na rys. 3 pokazano obszar uszczelniany przez wkładki formujące (kolor jasnoszary) oraz obszar przeznaczony na pierścień zwierający klatkę (kolor ciemnoszary) w typowym silniku indukcyjnym oraz silniku prototypowym.

W celu utrzymania odpowiednich parametrów pierścienia zwierającego pręty klatki rozruchowej [2] silnika LSPMSM opracowano odpowiedni kształt z uwzględnieniem minimalnych skosów odlewniczych i nadlewek. Widok pakietu blach wirnika opracowanego silnika oraz typowego silnika indukcyjnego zbliżonej mocy po operacji odlewania pokazano na rys. 4. Pierścień zwierający pręty klatki wirnika (rys. 4 a) jest wyższy i węższy niż pierścień typowego silnika indukcyjnego (rys. 4 b), co ma na celu umożliwienie osadzenia magnesów trwałych w wirniku i obniżenie rezystancji połączeń pomiędzy prętami klatki [2, 5, 6].

Innym rozwiązaniem ułatwiającym przebieg procesu odlewania klatki może być zastosowanie skrajnych blach pakietu wirnika, które są pozbawione żłobków przeznaczonych na magnesy. Na rys. 5 pokazano kształt specjalnej konstrukcji skrajnej blachy pakietu wirnika, wykorzystywanej w procesie odlewania wirnika opracowanego silnika LSPMSM małej mocy. Na rys. 6 pokazano widok prototypu wirnika opracowanego silnika, odlanego z wykorzystaniem dodatkowych blach skrajnych.

Zastosowana metoda wymaga jednak dodatkowej operacji w procesie produkcji, polegającej na usunięciu wewnętrznej części skrajnej blachy w celu odsłonięcia żłobków na magnesy, co wydłuża proces produkcji i stanowi dodatkowe utrudnienie oraz zwiększa sumaryczne koszty wytworzenia silnika. Wymaga to również wykonania szeregu dodatkowych blach wirnika o specjalnym kształcie, a wykonanie w tym celu odpowiedniego wykrojnika istotnie zwiększyłoby wstępne koszty produkcji.

W typowym silniku indukcyjnym zbliżonej mocy do silnika prototypowego w celu uniemożliwienia obrotu pakietu blach wirnika na wale stosowane są zazwyczaj cztery radełka proste, rozmieszczone symetrycznie na obwodzie. W opracowanym silniku wzbudzanym magnesami trwałymi, ze względu na zastosowanie marek blachy wirnika (rys. 1, 2), zachodzi prawdopodobieństwo trafienia dwóch radełek na pustą przestrzeń pakietu. Taki przypadek po-



Rys. 8. Płytkowe magnesy neodymowe typu N40SH



Rys. 9. Proces osadzania magnesów trwałych w wirniku

kazano na rysunku 7. Ze względu na to w opracowanym silniku LSPMSM ilość radełek pod pakiet musi być zwiększona dwukrotnie (z 4 do 8) i powinny być one przesunięte o kąt około  $45^\circ$  względem siebie (rys. 7 b).

W opracowanej konstrukcji wirnika zastosowano neodymowe magnesy płytkowe o kształcie prostokąta typu N40SH (rys. 8).

Przyjęty nieskomplikowany kształt (rys. 8) zwiększa łatwość wykonania przestrzeni na magnesy trwałe oraz minimalizuje prawdopodobieństwo uszkodzenia magnesów w trakcie instalacji w wirniku. Taki kształt magnesów trwałych obniża również istotnie ich cenę, ponieważ cena magnesu jest uzależniona nie tylko od rodzaju, objętości i powłoki ochronnej, ale również od jego kształtu. Jednak ze względu na ich kruchość w opracowanej konstrukcji silnika LSPMSM zastosowano dwa magnesy na długości pakietu wirnika, w każdym z 4 podwójnych żłobków (rys. 1). Stanowi to dodatkową trudność, ponieważ wymaga od obsługi zainstalowania 16 magnesów z zachowaniem odpowiedniej biegunowości.

Osadzanie magnesów w opracowanym silniku LSPMSM przewidziano ręczne (rys. 9) z zastosowaniem narzędzi niemagnetycznych. Proces ten wymaga

stworzenia specjalnego stanowiska wykonanego również z materiałów niemagnetycznych, gdyż znaczne siły oddziaływania magnesów bardzo utrudniają ich rozłączenie i rozłożenie na pulpicie roboczym.

W celu zapobiegnięcia wysuwaniu się magnesów z pakietu blach wirnika przewidziano zastosowanie dwuskładnikowego kleju epoksydowego odpornego na wysokie temperatury. Wymaga to jednak stworzenia dodatkowej powierzchni odstawczej w celu zapewnienia wymaganego czasu do utwardzenia się kleju przed przekazaniem wirnika do kolejnej operacji w toku produkcji silnika.

### 3. Podsumowanie

Technologia wykonania stojanów silników LSPMSM małej mocy jest analogiczna jak w klasycznych silnikach indukcyjnych produkowanych wieloseryjnie. Największe i niezbędne zmiany w przebiegu procesów technologicznych podczas produkcji wirników w tego typu konstrukcjach silników wzbudanych magnesami trwałymi, w stosunku do klasycznego silnika indukcyjnego, dotyczą procesu pakietowania oraz odlewania klatki rozruchowej. Zapewnienie poprawnego przebiegu tych procesów wiąże się z koniecznością ponownego opracowania i zmiany oprzyrządowania niezbędnego w wieloseryjnej produkcji przemysłowej, ale ze względu na bardzo dobre parametry eksploatacyjne tych silników jest to ekonomicznie uzasadnione.

### 4. Literatura

- [1] BERNATT J.T., GLINKA T.: *Problemy konstrukcji maszyn elektrycznych w aktualnych pracach BOBRME Komel*. Problemy eksploatacji maszyn i napędów elektrycznych. PEMINE, Ryto 2009. BOBRME „Komel”, Katowice 2009, s. 13–24.

- [2] DĄBROWSKI M.: *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. WNT, Warszawa 1994.
- [3] GLINKA T.: *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [4] KISIELEWSKI P.: *Technologia montażu magnesów trwałych w wirniku silnika synchronicznego dużej mocy. Zagadnienia maszyn, napędów i pomiarów elektrycznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2010, s. 40–47.
- [5] TUROWSKI J.: *Obliczenia elektromagnetyczne elementów maszyn i urządzeń elektrycznych*, WNT, Warszawa 1982.
- [6] ŚLIWIŃSKI T.: *Metody obliczania silników indukcyjnych. T. 1. Analiza*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2008.
- [7] ZAWILAK T., ANTAL L.: *Porównanie silnika indukcyjnego z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi i rozruchem bezpośrednim. Zagadnienia maszyn, napędów i pomiarów elektrycznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005, s. 212–221.
- [8] ZAWILAK T., ANTAL L.: *Porównanie silnika indukcyjnego oraz synchronicznego z magnesami trwałymi i rozruchem bezpośrednim – badania eksperymentalne*. Problemy eksploatacji maszyn i napędów elektrycznych. PEMINE, Ryto, [23–25] maj 2007. BOBRME „Komel”, Katowice 2007, s. 277–282.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010–2013 jako projekt badawczy POIG.01.01.02-00-113/09

dr inż. Paweł Zalas, dr inż. Piotr Kisielewski – Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wrocławska, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław

artykuł recenzowany