

*silniki synchroniczne, magnesy trwałe,
technologia wykonania*

Paweł ZALAS*

MAGNESY TRWAŁE W WIRNIKU SILNIKA SYNCHRONICZNEGO MAŁEJ MOCY

W artykule opisano podstawowe problemy oraz niezbędne zmiany w technologii wytwarzania poszczególnych elementów silnika, modyfikacji narzędzi wykorzystywanych do produkcji poszczególnych części i detali oraz zmian kolejności i przebiegu odpowiednich procesów technologicznych w procesie produkcji silnika PMSM małej mocy w stosunku do klasycznego silnika indukcyjnego o zbliżonej mocy. W opracowaniu wykorzystano doświadczenia zdobyte podczas wykonania prototypów silników wzbudzanych magnesami trwałymi z klatką rozruchową oraz bez, przeznaczonych do rozruchu bezpośredniego oraz częstotliwościowego.

1. WSTĘP

Rozwijane obecnie nowoczesne konstrukcje silników elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi (PMSM) z klatką rozruchową lub bez klatki, przeznaczone do rozruchu bezpośredniego lub częstotliwościowego i pracy z regulowaną prędkością obrotową, stanowią bardzo ciekawą alternatywę dla stosowanych powszechnie klasycznych silników indukcyjnych. Silniki tego typu charakteryzują się najkorzystniejszym spośród maszyn elektrycznych wirujących stosunkiem uzyskiwanego momentu i mocy znamionowej do objętości i masy maszyny [2, 3, 6]. 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.

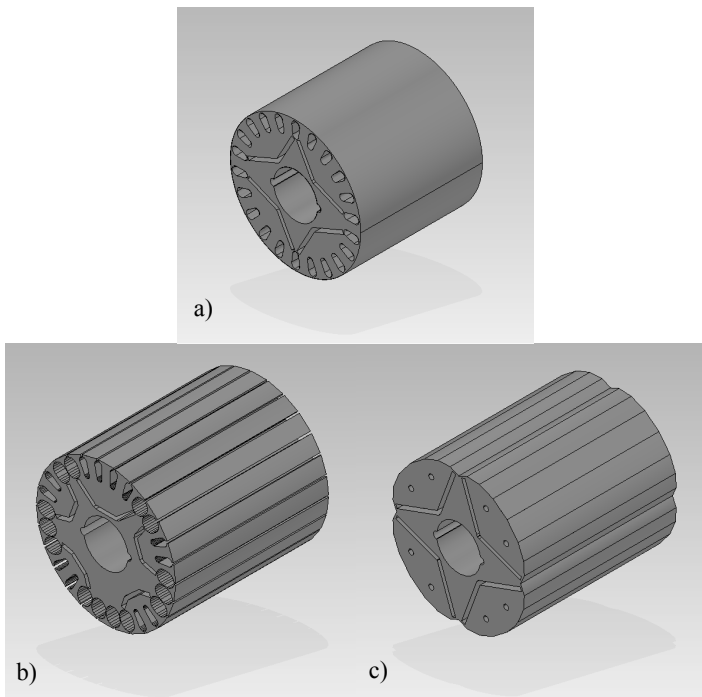
W artykule przedstawiono podstawowe problemy oraz niezbędne zmiany w procesie produkcji silników PMSM małej mocy o różnej konstrukcji i rozruchu bezpośred-

* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: pawel.zalas@pwr.wroc.pl

nim oraz częstotliwościowym w stosunku do klasycznego silnika indukcyjnego. Wykorzystano doświadczenia zdobyte podczas wykonania prototypów wirników silników wzbudzanych magnesami trwałymi.

2. KONSTRUKCJA WIRNIKA SILNIKA SYNCHRONICZNEGO MAŁEJ MOCY

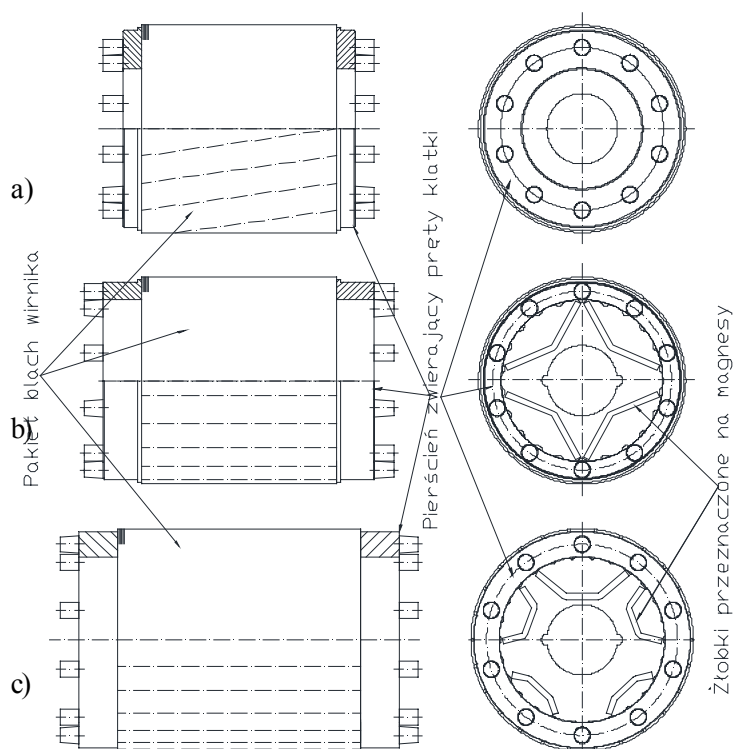
W opracowanych konstrukcjach jedno- (rys. 1a) i dwubiegowego (rys. 1b) silnika LSPMSM małej mocy oraz w silniku PMSM (rys. 1c) zarówno rdzeń stojana, jak i wirnika będą wykonywane w postaci pakietu blach. Blachy zarówno pakietu wirnika jak i stojana będą wycinane podczas jednego procesu technologicznego z tego samego fragmentu taśmy elektrotechnicznej z wykorzystaniem pras szybkobieżnych. Jako materiał blach prototypowych silników małej mocy wzbudzanych magnesami trwałymi zastosowano taśmę elektrotechniczną izotropową M600-50A (1.0814) z powłoką izolacyjną J3 wg PN-EN 10106, o grubości 0,5mm.



Rys. 1. Pakiety blach wirnika: jedno- (a) i dwubiegowego (b) silnika LSPMSM oraz silnika Interior PMSM (c)

Fig. 1. Laminated rotor cores of the one-speed (a), two-speed (b) LSPMSM and the Interior PMSM (c)

W procesie pakietowania wirnika typowego silnika indukcyjnego małej mocy wstępne pozycjonowanie blach ma na celu ustalenie odpowiedniego skosu żłobków. W przypadku opracowanych konstrukcji silników wzbudzanych magnesami trwałymi wstępne pozycjonowanie blach wirnika musi mieć na celu ustalenie prostoliniowości żłobków wirnika oraz przestrzeni przeznaczonych w dalszym etapie produkcji na zamontowanie magnesów trwałych. Wymaga to odpowiedniej modyfikacji narzędzi wykorzystywanych w tym procesie. W celu zwiększenia pewności poprawnego przebiegu tego procesu w opracowanych konstrukcjach blach wirników 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.

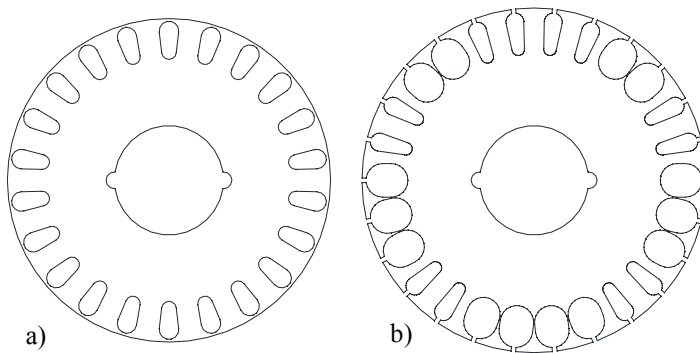


Rys. 2. Pakiety blach wirnika po operacji odlewania klatki: typowy silnik indukcyjny (a), silnik LSPMSM jedno- (b) i dwubiegowy (c)

Fig. 2. Laminated rotor cores with squirrel-cage and end rings: typical induction motor (a), one-speed (b) and two-speed (c) line start permanent magnet synchronous motor

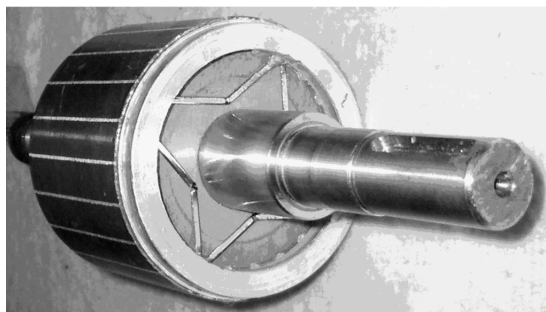
Odlewanie klatki wirnika opracowanych silników LSPMSM oraz pierścieni zwierających pręty klatki i nadlewek wykorzystywanych w procesie wyważania „wirnika gotowego” przewidziano metodą ciśnieniową. Jako materiał klatki wirnika przyjęto aluminium hutnicze EN AB-10500 (A1) wg PN-EN 576, utrzymywane podczas 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 zwierającego pręty klatki wirnika w procesie produkcji typowego silnika indukcyjnego stosowane są wkładki formująco-uszczelniające. Ich dodatkowym przeznaczeniem jest uszczelnienie formy zapobiegające wlewaniu się ciekłego aluminium do przestrzeni przeznaczonej na wał silnika [6]. Użycie typowego oprzyrządowania wykorzystywanego do ciśnieniowego odlewania wirnika silnika indukcyjnego nie zabezpiecza przed wlewaniem się ciekłego aluminium do przestrzeni przeznaczonych na osadzenie magnesów trwałych w opracowanych konstrukcjach silników LSPMSM. Wymaga to odpowiedniej modyfikacji obu wkładek (górną i dolną) oraz zmiany rozstawu dysz doprowadzających ciekłe aluminium. Pierścień zwierający pręty klatki wirnika opracowanych silników LSPMSM (rys. 2b, c) jest wyższy i węższy niż pierścień silnika indukcyjnego (rys. 2a), co ma na celu umożliwienie osadzenia magnesów trwałych w wirniku i obniżenie rezystancji połączeń pomiędzy prętami klatki [4, 5].

Innym rozwiązaniem może być zastosowanie skrajnych blach pakietu wirnika, które są pozbawione żłobków przeznaczonych na magnesy. Na rysunku 3 pokazano kształt specjalnej konstrukcji skrajnych blach pakietu wirnika jedno- i dwubiegowego silnika LSPMSM małej mocy, wykorzystywanych w procesie odlewania wirnika. Na rysunku 4 pokazano widok prototypu wirnika opracowanego silnika jednobiegowego, odlanego z wykorzystaniem dodatkowych blach skrajnych.



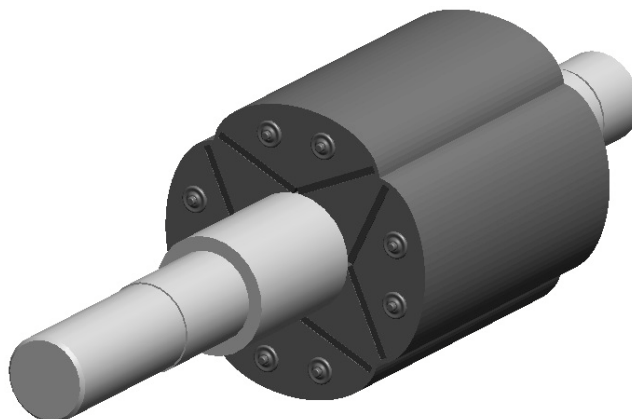
Rys. 3. Specjalna konstrukcja skrajnych blach pakietu wirnika jedno- i dwubiegowego silnika LSPMSM małej mocy

Fig. 3. Special structure of the end sheets of laminated rotor core: one-speed (a) and two-speed (b) low-power line start permanent magnet synchronous motor



Rys. 4. Wirnik silnika prototypowego wzbudzanego magnesami trwałymi
Fig. 4. Rotor of the prototype line start permanent magnet synchronous motor

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 zwiększy wstępne koszty produkcji.

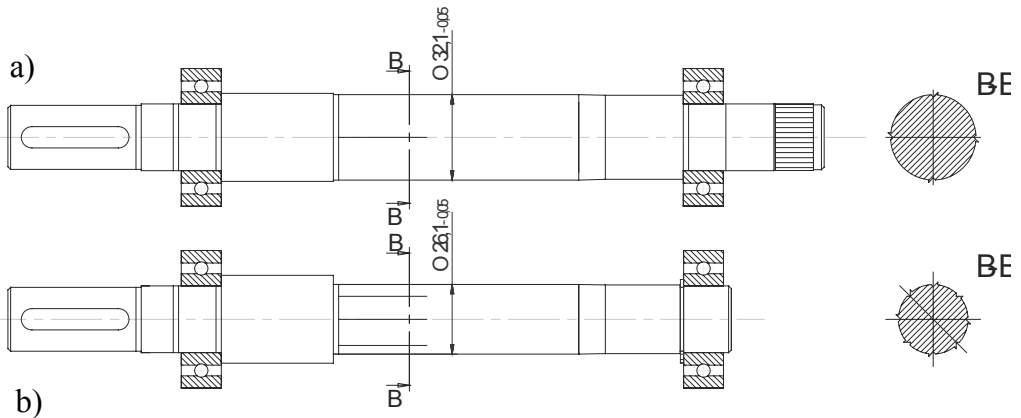


Rys. 5. Wirnik silnika Interior PMSM
Fig. 5. Rotor of the Interior PMSM

Na rysunku 1c i 5 pokazano opracowaną konstrukcję wirnika silnika typu Interior PMSM, z magnesami mocowanymi w odpowiednio rozmieszczonych gniazdach wewnątrz rdzenia magnetycznego pakietowanego wirnika. Silnik jest przeznaczony do rozruchu częstotliwościowego i pracy z regulowaną prędkością obrotową. W wirniku tym nie występuje klatka rozruchowa. W klasycznym wirniku klatkowym silnika indukcyjnego małej mocy, oraz w prezentowanych wcześniej (rys. 1a, 1b, 2, 4) kon-

strukcjach wirników jedno- i dwubiegowego silnika LSPMSM klatka utrzymuje mechanicznie pakiet blach. W zaproponowanym rozwiązaniu taką funkcję będą spełniały nity. Montaż silnika polega na złożeniu pakietu blach wirnika, unieruchomieniu z wykorzystaniem technologicznego trzpienia rozprężnego a następnie wykonaniu połączeń nitowanych. Tak wykonany pakiet osadzany będzie na wale. W dalszej kolejności montowane będą magnesy trwałe. W celu zwiększenia sztywności pakietu wirnika i zapobiegnięcia odginania się blach wirnika przewidziano zastosowanie skrajnych blach pakietu o grubości zwiększonej do 2 mm.

Rozmieszczenie magnesów trwałych w silnikach LSPMSM i PMSM ma znaczący wpływ na parametry maszyny, takie jak współczynnik mocy, sprawność i przeciążalność momentem [2, 3] oraz istotnie wpływa na poziom występowania wyższych harmonicznych. W celu zwiększenia przestrzeni przeznaczonej na osadzenie magnesów trwałych w opracowanych konstrukcjach silników średnica wału pod pakiet została zmniejszona w stosunku do typowej (rys. 6a), stosowanej w klasycznych silnikach indukcyjnych o w.m. 90 [1] i wynosi 26mm (rys. 6b). W celu zapewnienia odpowiedniego oparcia dla łożyska od strony przeciwnapędowej w zastosowanej konstrukcji wału przewidziano dodatkowe podcięcie przeznaczone na osadzenie sprężystego pierścienia Segera (rys. 6b). Ze względu na zastosowane marki blach w przyjętych konstrukcjach wirników, wykonanych z pakietu blach z magnesami trwałymi wewnątrz wirnika, w opracowanej konstrukcji wału przewidziano 8 radełek prostych (rys. 6b) o długości 35mm, rozmieszczonych symetrycznie na obwodzie [6].



Rys. 6. Konstrukcja wału silnika: typowy silnik indukcyjny (a), silnik wzbudzany magnesami trwałymi z zespołem chłodzenia obcego (b)

Fig. 6. Structure of motor shaft: typical induction motor (a), line start permanent magnet synchronous motor with foreign cooling (b)

Wał silnika dwubiegowego (rys. 1b, 2c) został również użyty w konstrukcji wirnika silnika Interior PMSM (rys. 1c, 5) przeznaczonego do rozruchu częstotliwościowego oraz pracy z regulowaną prędkością obrotową. Ponieważ w tej konstrukcji przewidziano zastosowanie zespołu chłodzenia obcego, długość wału od strony przeciwnapędowej została ograniczona do czopa, zapewniającego pewne osadzenie łożyska, a tarcza strony przeciwnapędowej została zamknięta. Zastosowany wał wirnika będzie wycinany z pręta okrągłego o średnicy 34mm. Jako materiał pręta przyjęto stal typu C45-E (1.1191) wg PN-EN 10083-2.

4. WNIOSKI

Technologia wykonania stojanów silników LSPMSM i PMSM małej mocy jest analogiczna jak w klasycznych silnikach indukcyjnych produkowanych wieloseryjnie. Największe i niezbędne zmiany w przebiegu procesów technologicznych podczas produkcji wirników opracowanych konstrukcji silników, 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.

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

LITERATURA

- [1] DĄBROWSKI M., *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, WNT, Warszawa 1988.
- [2] KISIELEWSKI P., *Technologia montażu magnesów trwałych w wirniku silnika synchronicznego dużej mocy*, Prace Nauk. IMNiPE. PWr. nr 64, Studia i Materiały nr 30, 2010, s. 40–46.
- [3] KISIELEWSKI P., ANTAL M., GIERAK D., ZALAS P., *Zastosowanie magnesów trwałych w silnikach elektrycznych dużej mocy*, SME 2011, Szczecin, 19–22 czerwca 2011, Masz. Elektr. Zesz. Probl. BOBRME Komel, nr 92, s. 187–192.
- [4] TUROWSKI J., *Obliczenia elektromagnetyczne elementów maszyn i urządzeń elektrycznych*, WNT, Warszawa 1982.
- [5] ŚLIWIŃSKI T., *Metody obliczania silników indukcyjnych*. T. 1. *Analiza*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2008.
- [6] ZALAS P., KISIELEWSKI P., *Zastosowanie magnesów trwałych w silnikach elektrycznych małej mocy*, Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych, PEMINE, Ryto, 25–27 maja 2011, Masz. Elektr. Zesz. Probl. BOBRME Komel, nr 91, s. 109–112.

PERMANENT MAGNETS IN ROTOR OF LOW-POWER SYNCHRONOUS MOTOR

The work presents basic problems as well as indispensable changes in technology of the production of individual units of motors, modification of tools used to production of individual parts and details as well as changes order and course technological processes in production process of low-power permanent magnet synchronous motors (PMSM) in relation to typical similar power induction motors. The article presents experiences captured during production of the prototype permanent magnet motors with squirrel-cage and without, designed to line starting and frequency controlled starting.