

**Jakub Bernatt, Maciej Balkowiec, Marcin Barański, Stanisław Gawron  
Tadeusz Glinka, Artur Polak  
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL**

## **SILNIK ASYNCHRONICZNY PIERŚCIENIOWY SYNCHRONIZOWANY MAGNESAMI TRWAŁYMI**

### **SLIP-RING ASYNCHRONOUS MOTOR SYNCHRONIZED WITH PERMANENT MAGNETS**

**Streszczenie:** Silnik indukcyjny pierścieniowy, z zabudowanymi w jarzmie wirnika magnesami trwałymi (SAS PM), charakteryzuje się łagodnym rozruchem asynchronicznym. Po rozruchu, silnik sam się synchronizuje i pracuje jako silnik synchroniczny wzbudzony polem magnetycznym magnesów trwałych. Przy pracy synchronicznej SAS PM ma znacznie wyższą sprawnością w porównaniu z silnikiem indukcyjnym. W artykule przedstawiono badania modelowe oraz symulacyjne dwóch konstrukcji silnika SAS PM: sześciobiegunowego o mocy 1.7 kW i czterobiegunowego o mocy 14.5 kW. Dla pierwszego silnika opracowano algorytm obliczeń charakterystyk elektromechanicznych: rozruchowych i synchronicznych. Wykonano silnik modelowy na którym przeprowadzono weryfikację opracowanego algorytmu. Wykorzystując ten algorytm, dla drugiego silnika obliczono charakterystykę rozruchową i charakterystyki elektromechaniczne przy pracy synchronicznej. Obliczenia wykazały, że silnik z magnesami trwałymi w układzie „I” ma znacząco lepsze właściwości synchroniczne w porównaniu z silnikiem z magnesami trwałymi w układzie „V”.

**Abstract:** A slip-ring asynchronous motor with permanent magnets built into the rotor yoke (SAS PM) is distinguished by the smooth start-up process. After start-up, motor self-synchronizes and operates as synchronous motor excited by magnetic field of permanent magnets. At synchronous operation the SAS PM has higher efficiency than induction motor. The article presents research of the mathematical model and simulations of two constructions of SAS PM motor: 6-pole rated at 1.7 kW and 4-pole rated at 14.5 kW. For the first motor the algorithm for electro-mechanic characteristics calculation during start-up and synchronous operation has been developed. Physical model of the motor was manufactured and calculation algorithm was verified. By using this algorithm, the start-up characteristic as well as electromechanical characteristic at synchronous operation for the second motor were calculated. Calculation have shown that motor with permanent magnets in "I" pattern has better properties at synchronous operation comparing to the motor with permanent magnets in "V" pattern.

**Słowa kluczowe:** *silniki synchroniczne, magnesy trwałe, pierścieniowe uzwojenie wirnika, rozruch asynchroniczny.*

**Keywords:** *synchronous motors, permanent magnets, slip-ring rotor winding, asynchronous start-up.*

### **1. Wstęp**

Silniki indukcyjne pierścieniowe charakteryzują się łagodnym rozruchem, gdyż w czasie załączania napięcia nie mają dużych uderzeń prądu i momentu zaburzeniowego. Rozrusznik rezystancyjny zmniejsza znacząco prąd rozruchowy i pozwala kształtować charakterystykę asynchronicznego momentu elektromagnetycznego w funkcji prędkości obrotowej. Prąd rozruchowy zwykle nie przekracza dwukrotnej wartości prądu znamionowego, a prąd zaburzeniowy, w pierwszej chwili po włączeniu silnika do sieci, nie przekracza czterokrotnej wartości prądu znamionowego. Moment rozruchowy, przy

dobrze dopasowanym rozruszniku, może osiągać wartość momentu maksymalnego. Dlatego na bazie silników indukcyjnych pierścieniowych są budowane silniki asynchroniczne synchronizowane tzw. SAS'y. Rozruch SAS'ów jest identyczny jak silników indukcyjnych pierścieniowych, a po rozruchu uzwojenie wirnika jest zasilane prądem stałym i silnik samoczynnie synchronizuje się z siecią elektroenergetyczną. Po synchronizacji silnik pracuje jako silnik synchroniczny. SAS'y łączą w sobie zalety silników indukcyjnych pierścieniowych i silników synchronicznych. W stanie pracy ustalonej SAS'y, w porównaniu z silnikami indukcyjnymi, mają wyższą sprawność i współczynnik mocy  $\cos\varphi \approx 1$ .

SAS'y są najczęściej stosowane w napędach elektrycznych dużej mocy pracujących w sposób ciągły.

Autorzy publikacji [4 i 5] zbudowali silniki asynchroniczne klatkowe synchronizowane polem magnetycznym wzbudzonym przez magnesy trwałe, które z powodzeniem zastosowali do napędów wentylatorów w kopalniach i do napędów młynów w zakładzie przetwórczym miedzi. Uzwojenie klatkowe jest standardowe, a magnesy trwałe są umieszczone w szczelinach w środku jarzma wirnika. Uzwojenie klatkowe służy do rozruchu asynchronicznego silnika. Gdy wirnik w czasie rozruchu osiągnie prędkość obrotową podsynchroniczną, to strumień magnetyczny magnesów trwałych samoczynnie synchronizuje wirnik z siecią elektroenergetyczną. Silnik przy pracy synchronicznej, w stosunku do silnika indukcyjnego realizującego to samo zadanie, ma większą sprawność energetyczną i współczynnik mocy  $\cos\phi \approx 1$ . To jest jego dużą zaletą, gdyż jest energooszczędny, w stosunku do silnika indukcyjnego. Jednak rozruch asynchroniczny silników indukcyjnych klatkowych dużej mocy jest rozruchem ciężkim:

- prąd rozruchowy ma składową ustaloną ( $6\div 7$ ) razy większą od prądu znamionowego, a składową udarową, zależną od fazy załączenia, nawet 1.8 razy większą od składowej ustalonej,
- moment udarowy, w zależności od fazy załączenia, może osiągać wartość 3.8 razy większą od momentu w stanie zwarcia ustalonego przy znamionowym napięciu,
- w czasie rozruchu w klatce wirnika wydziela się ciepło, w przybliżeniu równe energii kinetycznej wszystkich mas wirujących sprzęgniętych z wałem silnika, ciepło to powoduje wzrost temperatury klatki wirnika i stwarza zagrożenie termicznego rozmagnesowania magnesów trwałych, w szczególności przy rozruchach powtarzanych.

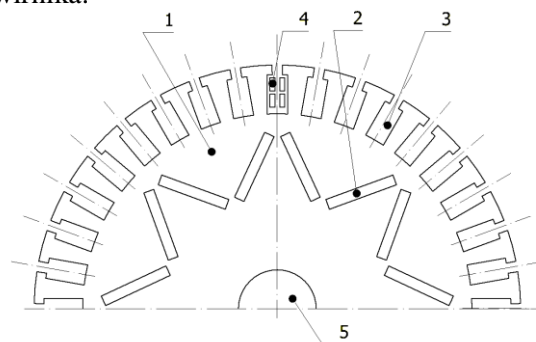
Magnesy trwałe, przy pracy synchronicznej silnika, obniżają straty mocy wzbudzenia, tym samym zwiększają niezawodność pracy i podwyższają jego sprawność.

Silniki indukcyjne klatkowe, z zabudowanymi magnesami trwałymi, sprawdzają się w eksploatacji, zatem powstała koncepcja budowy silników indukcyjnych

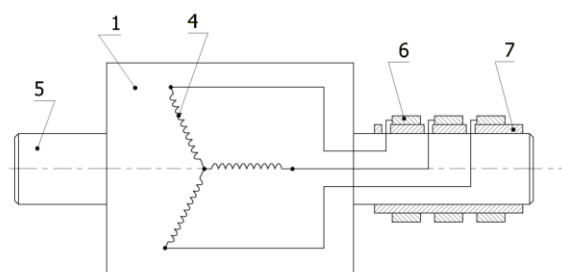
pierścieniowych z zabudowanymi magnesami trwałymi w wirniku, które umożliwiają realizację łagodnego rozruchu [2]. W artykule przedstawiono badania modelowe, symulacyjne i eksperymentalne, silników asynchronicznych pierścieniowych synchronizowanych polem magnetycznym wzbudzonym przez magnesy trwałe tzw. SAS PM.

## 2. Budowa wirnika SAS'a pierścieniowego

Stojan silnika elektrycznego, to jest jarzmo i uzwojenie, jest identyczny jak w silniku indukcyjnym. Wirnik silnika ma uzwojenie zabudowane w żłobkach i magnesy trwałe umieszczone w szczelinach wyciętych w pakiecie blach jarzma. Uzwojenie wirnika jest trójfazowe wykonane z drutu miedzianego izolowanego i jest połączone w gwiazdę bądź w trójkąt, a końce faz są dołączone do trzech pierścieni ślizgowych umieszczonych na wale wirnika.



Rys.1. Przekrój poprzeczny jarzma wirnika: 1- pakiet blach wirnika, 2 - magnesy trwałe ułożone w kształcie „V”, 3 - żłobki, 4 - uzwojenie, 5 - wał, [2]



Rys.2. Uzwojenie wirnika połączone w gwiazdę z końcami faz wyprowadzonymi na pierścienie ślizgowe [2]

Aparat szczotkowy wraz ze szczotkami jest zamocowany na tarczy łożyskowej silnika. Budowę wirnika z uzwojeniem pierścieniowym i magnesami trwałymi zilustrowano na rysunkach 1 i 2.

Badania przeprowadzono na dwóch silnikach modelowych zbudowanych na

wykroju blachy stojana silników indukcyjnych o parametrach:

- 1.5 kW; 400 V; 4.1 A; 50 Hz; 860 obr/min.;  $\cos\varphi=0,79$ ; średnica blach: stojana 155/110 mm; wirnika 109,4/38 mm i długość pakietu 109 mm,
- 14.5 kW; 400 V; 28.6 A; 50 Hz; 1430 obr/min.;  $\cos\varphi=0,84$ ; średnica blach: stojana 246/162 mm; wirnika 161/66 mm i długość pakietu 194 mm.

Na pierwszym modelowym silniku opracowano algorytm obliczeń charakterystyk elektromechanicznych silnika, rozruchowych i synchronicznych oraz wykonano silnik modelowy na którym przeprowadzono weryfikację algorytmu projektowego. Na drugim silniku modelowym sprawdzono wpływ rozłożenia magnesów trwałych na charakterystyki elektromechaniczne silnika.

### 3. Silnik SAS PM o mocy znamionowej 1.7 kW

Stojan silnika elektrycznego, to jest jarzmo i uzwojenie, jest identyczny jak w silniku indukcyjnym. Magnesy trwałe NdFeB - N42UH o parametrach:  $B_r = 1.3T$ ;  $H_{cB} = 848 \text{ kA/m}$ ;  $\mu_r = 1.085$  i wymiarach  $109 \times 22 \times 4$ , zostały zabudowane w jarzmie wirnika pod żłobkami. Ze względu na małą średnicę blach wirnika magnesy trwałe są proste. Obliczenia charakterystyk rozruchowych i synchronicznych przeprowadzono dla założonych danych znamionowych silnika: 1.7kW; 3x400V; 3.3A; 50Hz; 1000obr./min.;  $M_N = 16.2N \cdot m$ ;  $M_{MAX} = 1.85M_N$ ;  $\cos\varphi=0,9$ ;  $\eta = 83\%$ .

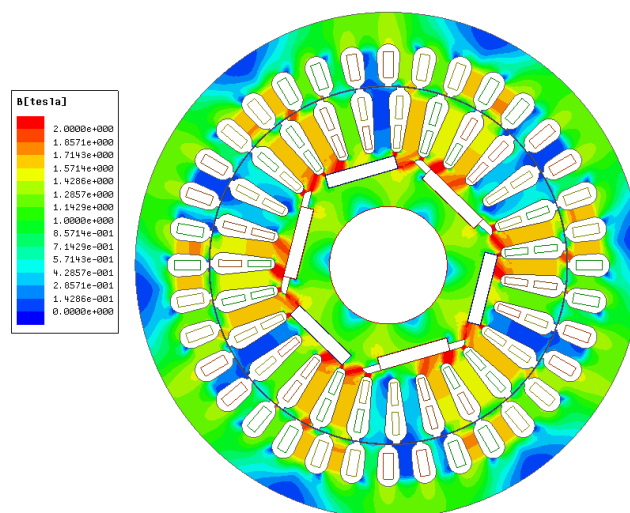
Obliczenia rozkładu indukcji magnetycznej, w obwodzie magnetycznym silnika, wzbudzonej przez magnesy trwałe, przeprowadzono metodą połową 2D MES w programie Ansoft Maxwell 2D. Wyniki obliczeń są przedstawione na rys.3.

Obliczenia charakterystyk rozruchowych i synchronicznych wykonano metodą obwodową. Strumień magnetyczny wzbudzany przez magnesy trwałe w czasie rozruchu indukuje w uzwojeniu stojana napięcie rotacji o częstotliwości elektrycznej obrotów:

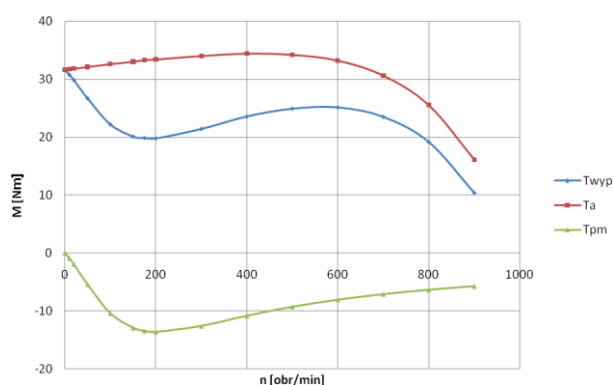
$$f_2 = n/60 \cdot p_b$$

W uzwojeniu płynie prąd, który ma dwie składowe: sieciową  $I_1$  o częstotliwości  $f_1$  i składową  $I_2$  o częstotliwości  $f_2$ . Składowa prądu  $I_1$  generuje moment asynchroniczny  $T_a$  determinujący rozruch silnika, a składowa

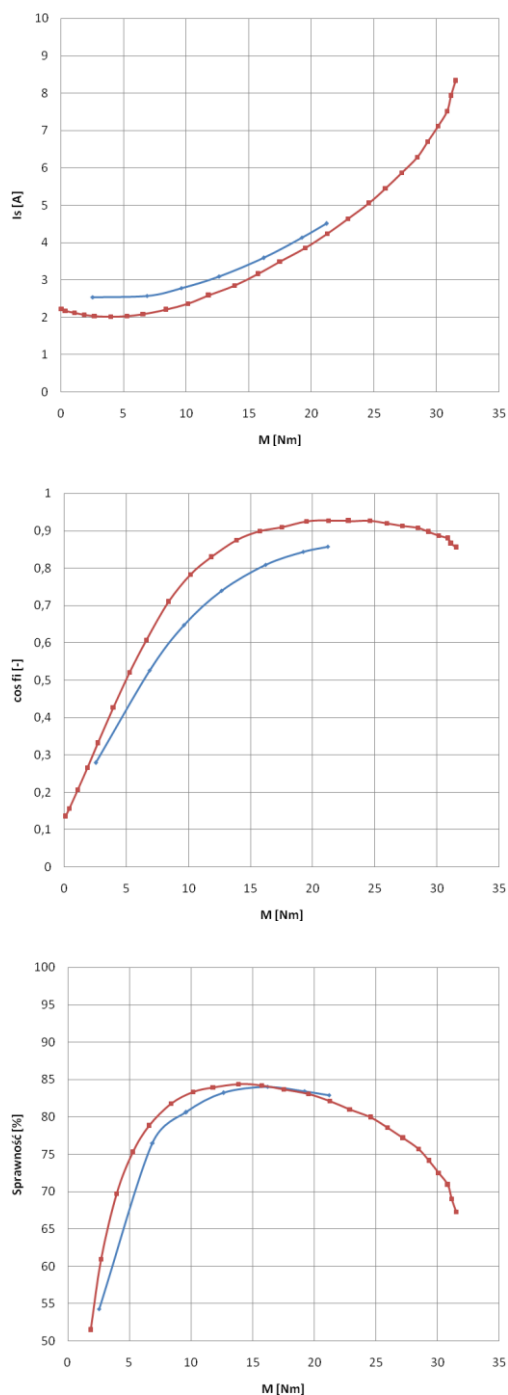
prądu  $I_2$  moment synchroniczny  $T_{PM}$ , który przy zmieniającej się prędkości obrotowej jest momentem zmiennym zakłócający przebieg rozruchu. Dla silnika modelowego obliczono charakterystyki momentu asynchronicznego uśrednione  $T_a$ ,  $T_{PM}$  i  $T_{wyp}$ , przy zwartym uzwojeniu wirnika. Wypadkowy (uśredniony) moment rozruchowy  $T_{wyp}$  silnika modelowego jest obliczany przy założeniu superpozycji obliczonych momentów asynchronicznego  $T_a$  i momentu zakłócającego od magnesów trwałych  $T_{PM}$ . Obliczone charakterystyki momentu rozruchowego, uśrednione, przedstawiono na rysunku 4. Obliczone charakterystyki elektromechaniczne synchroniczne przedstawiono na rys.5.



Rys.3. Obraz pola magnetycznego wzbudzonego przez magnesy trwałe w obwodzie magnetycznym silnika 1,7 kW

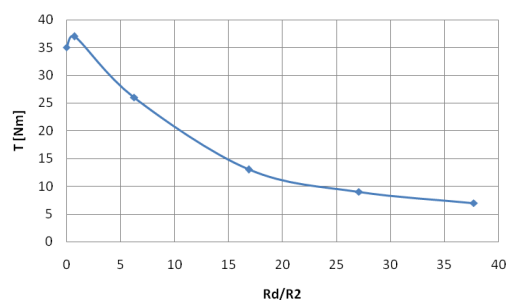


Rys.4. Obliczone uśrednione charakterystyki momentów:  $T_a$  – asynchronicznego,  $T_{pm}$  – od magnesów trwałych,  $T_{wyp}$  – wypadkowego

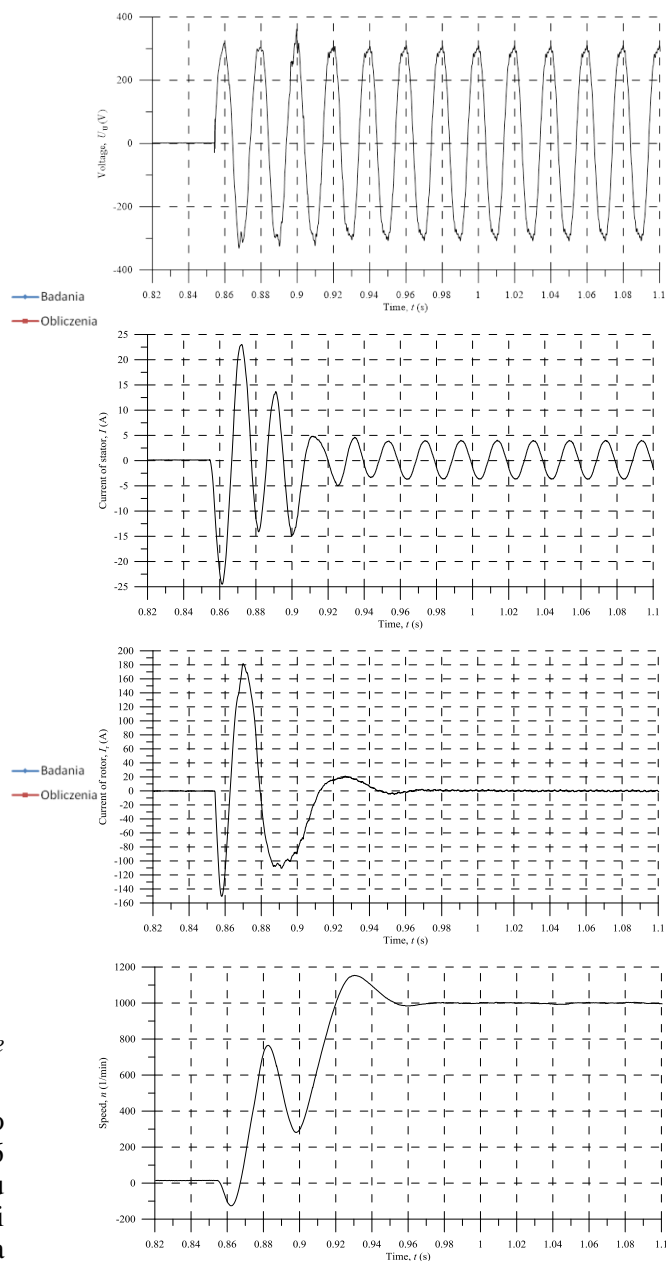


Rys.5. Obliczone charakterystyki synchroniczne prądu,  $\cos \varphi$  i sprawności silnika w funkcji momentu

Zbudowano silnik modelowy i poddano go badaniom laboratoryjnym. Na rysunku 6 przedstawiono zależność momentu rozruchowego silnika w funkcji rezystancji dodatkowej  $R_d/R_2$  w obwodzie wirnika ( $R_2=0.048 \Omega$ ,  $R_d$  w zakresie  $0 \div 37.5 \cdot R_2$ ), przy  $n = 0$ .



Rys.6. Moment rozruchowy silnika w funkcji rezystancji dodatkowej  $R_d/R_2$ .



Rys.7. Przebiegi napięcia zasilania, prądu twornika, prądu wirnika i prędkości obrotowej silnika w czasie rozruchu na biegu jałowym silnika.

Na rysunku 7 przedstawiono zarejestrowane przebiegi: prądu twornika, prądu wirnika, momentu i prędkości obrotowej, w czasie rozruchu silnika nieobciążonego.

Na wykresach na rysunku 5, przedstawiających charakterystyki synchroniczne obliczone, narysowano także charakterystyki zmierzone na silniku modelowym: prądu twornika  $I_s$ ,  $\cos\phi$  i sprawności  $\eta$  w funkcji momentu obciążenia. Jest to weryfikacja algorytmu obliczeń. Dla znamionowego momentu obciążenia 16.2 N·m wartość prądu zmierzona jest o 10% większa od obliczonej. Różnice te są większe dla mniejszych wartości momentu obciążenia i tak dla momentu 10 N·m różnica w wartościach obliczonej i zmierzonej wynosi 20%. Dla momentu znamionowego 16.2 N·m zmierzony  $\cos\phi=0.8$ , a obliczony 0.9. Natomiast sprawność dla znamionowego momentu obciążenia obliczona i zmierzona wynosi 84%. W tabeli 1 zestawiono porównanie parametrów znamionowych silnika indukcyjnego pierścieniowego typu SUDfL-100B oraz jego odpowiednika SAS PM. Sprawność silnika SAS PM jest prawie 17% większa od sprawności silnika indukcyjnego.

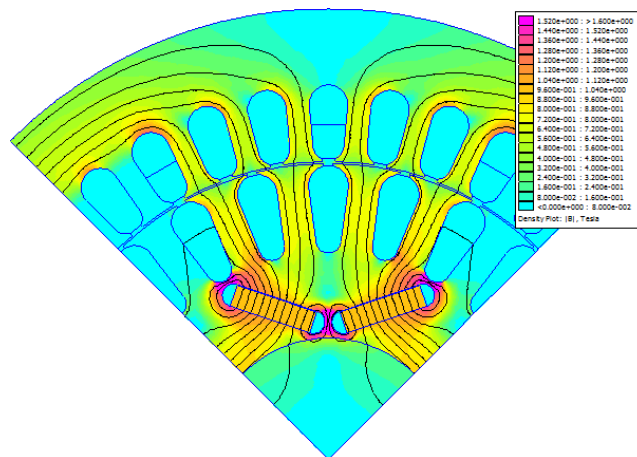
Tabela 1. Porównanie podstawowych parametrów silnika SUDf100L-6B w wykonaniu bez magnesów oraz z magnesami trwałymi

	Silnik	
	SUDf100L-6B	SAS PM
$U_N$	3x400V (50Hz)	3x400V (50Hz)
$I_s$ [A]	4.1	3.59
$\cos \phi$ [-]	0.79	0.81
$P_N$ [kW]	1.5	1.7
$M_n$ [Nm]	16.66	16.2
$n_N$ [rpm]	860	1000
$\eta$ [%]	67.1	84

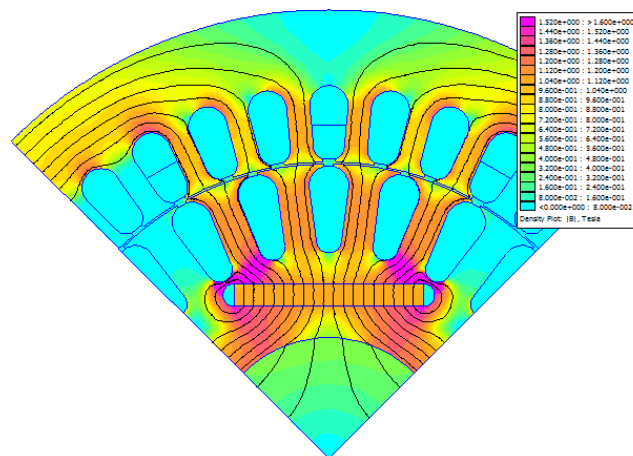
#### 4. Silnik SAS PM o mocy znamionowej 14.5 kW

Silnik asynchroniczny synchronizowany polem magnetycznym magnesów trwałych o mocy 14.5 kW wykorzystano do sprawdzenia wpływu ukształtowania magnesów trwałych w jarzmie wirnika na charakterystyki synchroniczne. Wykonano obliczenia dwóch wariantowych rozwiązań ułożenia magnesów

trwałych: w kształcie litery „V” i liniowymi „I”’. Obliczenia charakterystyk rozruchowych i synchronicznych przeprowadzono dla założonych danych znamionowych silnika: 14.5 kW; 3x400V; 28.6 A, 50 Hz, 1500 obr/min., 98.84 N·m,  $\cos\phi = 0.84$ . Obwód magnetyczny składa się z blach o średnicach: stojana 246/162 mm i wirnika 161/66 mm i długość pakietu 194 mm. W jarzmie wirnika są umieszczone magnesy trwałe: NdFeB - N42UH o parametrach w temp. 120°C ( $B_r = 1.157$  T;  $H_{cB} = 848$  kA/m;  $\mu_r=1.085$ ). Obliczenia rozkładu indukcji magnetycznej w obwodzie magnetycznym maszyny, wzbudzonej przez magnesy trwałe, przeprowadzono metoda połową 2D MES w programie Femm. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 8 i 9.



Rys.8. Rozkład pola magnetycznego w obwodzie magnetycznym silnika wzbudzanego przez magnesy trwałe ułożone w kształcie „V” [1]



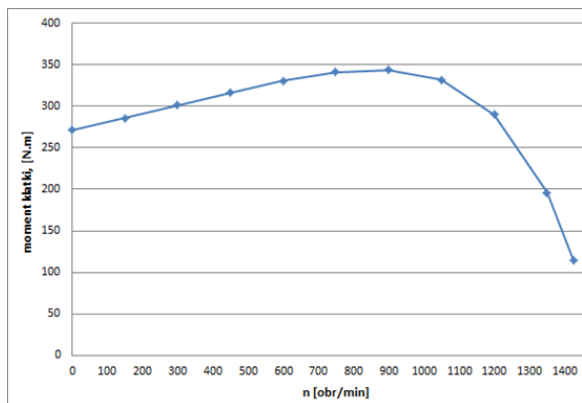
Rys.9. Rozkład pola magnetycznego w obwodzie magnetycznym silnika wzbudzanego przez magnesy trwałe liniowe „I” [1]

W silniku modelowym założono żłobki proste w stojanie i żłobki skoszone o jedną podziałkę zębową w wirniku. Dane nawojowe uzwojenia stojana: liczba zwojów w fazie – 88,

liczba obwodów równoległych – 4, rezystancja uzwojenia  $0.26\Omega$ , połączenie faz – Y. Dane nawojowe uzwojenia wirnika: liczba zwojów w fazie – 48, liczba obwodów równoległych – 1, rezystancja uzwojenia  $0.073\Omega$ , połączenie faz – Y. Wykorzystując rozkłady pola magnetycznego przeprowadzono obliczenia charakterystyki momentu asynchronicznego przy zwartym uzwojeniu wirnika oraz charakterystyki elektromechaniczne dla pracy synchronicznej w funkcji kąta momentowego. Obliczono charakterystykę rozruchową silnika:

- momentu asynchronicznego przy zwartym uzwojeniu wirnika,
- momentu hamującego generowaną przez magnesy trwałe.

Sumując te dwie charakterystyki obliczono uśrednioną wypadkową charakterystykę momentu rozruchowego silnika. Obliczenia były realizowane metodą obwodową z wykorzystywany program Maxwell. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 10.

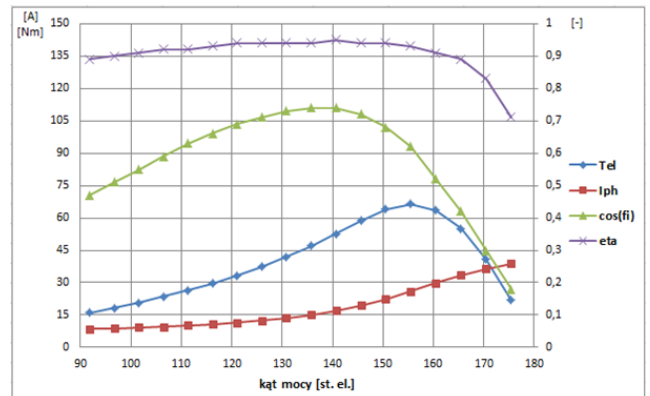


Rys.10. Charakterystyka momentu asynchronicznego (rozruchowego uśrednionego) w funkcji prędkości obrotowej [1]

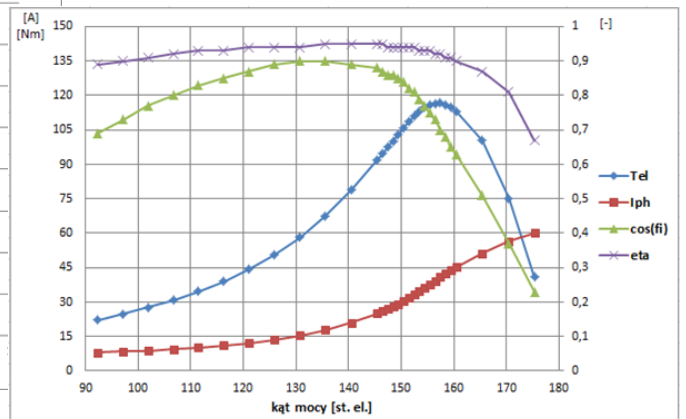
Sinki 1,7 kW i 14,5 kW mają stosunkowo małe średnice blach wirnika. Umieszczając magnesy trwałe w jarzmie zmniejszono przekrój żłobków, to spowodowało zmniejszenie uzwojenia wirnika w stosunku do silników indukcyjnych, a tym samym wzrost rezystancji uzwojenia. Większa rezystancja uzwojenia spowodowała wzrost momentu rozruchowego przy  $n = 0$ , ilustrują to rysunki 4 i 10. Także zależność momentu rozruchowego od rezystancji dodatkowej jest nietypowa dla silników indukcyjnych pierścieniowych, jak to widać na rys.6.

Charakterystyki elektromechaniczne dla pracy synchronicznej obliczono metodą obwodową, w środowisku GNU Octave/Matlab. Charakterystyki elektromechaniczne: momentu ( $T_{el}$ ), prądu

( $I_{pf}$ ),  $\cos\phi$  ( $\cos\phi_i$ ) i sprawności ( $\eta$ ), w funkcji kąta między osią siły magnetomotorycznej magnesów trwałych i osią siły magnetomotorycznej uzwojenia stojana, przedstawiono na rysunkach 11 i 12.



Rys.11. Charakterystyki synchroniczne: momentu ( $T_{el}$ ), prądu ( $I_{pf}$ ),  $\cos\phi$  ( $\cos\phi_i$ ) i sprawności ( $\eta$ ), w funkcji kąta między osią siły magnetomotorycznej magnesów trwałych i osią siły magnetomotorycznej uzwojenia stojana, dla silnika „V” [1]



Rys.12. Charakterystyki elektromechaniczne: momentu ( $T_{el}$ ), prądu ( $I_{pf}$ ),  $\cos\phi$  ( $\cos\phi_i$ ) i sprawności ( $\eta$ ), w funkcji kąta między osią siły magnetomotorycznej magnesów trwałych i osią siły magnetomotorycznej uzwojenia stojana, dla silnika „I” [1].

## 5. Wnioski

Silnik elektryczny wzbudzany magnesami trwałymi i z pierścieniowym uzwojeniem rozruchowym SAS PM może być wykorzystany do napędu maszyn roboczych o dużym momencie rozruchowym i urządzeń mechanicznych o długich czasach rozruchu. Rozruch silnika odbywa się z wykorzystaniem rezystorów rozruchowych. Prąd rozruchowy i moment rozruchowy można ustalać poprzez wartość włączanej rezystancji i jej stopniowanie w funkcji prędkości obrotowej. Ciepło w czasie

rozruchu silnika wydziela się w większej ilości w rezystorach rozruchowych, niż w uzwojeniu wirnika. Nie ma więc zagrożenia przegrzania magnesów trwałych. Po rozruchu, silnik sam się synchronizuje i pracuje jako silnik synchroniczny wzbudzony polem magnetycznym magnesów trwałych. Po synchronizacji silnika szczotki na pierścieniach ślizgowych mogą być zwarte bądź są podnoszone. Podniesienie szczotek jest korzystne, gdyż szczotki i pierścienie nie ścierają się i nie powodują, poprzez tarcie, dodatkowych strat mocy. Tego typu silniki mogą być stosowane do każdego rodzaju napędu elektrycznego.

Opracowany algorytm obliczeń projektowych silnika, w tym charakterystyk momentu rozruchowego i charakterystyk elektromechanicznej dla pracy synchronicznej zweryfikowano na silniku modelowym o mocy 1.7 kW. Wykorzystując ten algorytm przeprowadzono obliczenia projektowe dwóch silników o mocy 14.5 kW z magnesami trwałymi ułożonymi w jarzmie wirnika, jeden według litery „V”, a drugi prosty „I”. Silnik z magnesami prostymi „I” ma korzystniejsze parametry przy pracy synchronicznej. Moment maksymalny silnika wynosi 118 N·m i jest o 80% większy niż w silniku z magnesami trwałymi „V”. Sprawność maksymalna silnika

wynosi 95% i w dużym zakresie zmiany momentu obciążenia, jest większa od 90%, a  $\cos\phi=0.9$ . Porównując charakterystyki elektromechaniczne silnika przy pracy synchronicznej widać, że zależą one od magnesów trwałych, ich wielkości i sposobu ich rozmieszczenia w wirniku. Dla każdej rozważanej konstrukcji silnika należy wybrać korzystne rozwiązanie ułożenia magnesów trwałych w jarzmie wirnika.

## 6. Literatura

- [1] Glinka T., Bernatt J.: Asynchronous Slip-Ring Motor Synchronized with Permanent Magnet. Archives of Electrical Engineering. ISSN 1427-4221. Nr 1/2017. Str. 199-206.
- [2] Bernatt J., Gawron S., Glinka T., Pacholski E., Staszewski K.: Wirnik silnika elektrycznego z magnesami trwałymi. Zgłoszenie patentowe P.415273, zarejestrowany w dniu: 14.12.2015 r. przez Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL.
- [3] Rossa R.: „Silnik reluktancyjny z dodatkowym wzbudzeniem magnesami trwałymi”. Praca doktorska. Biblioteka Politechniki Śląskiej. Listopad 2006r.
- [4] Zawilak T.: „Utilizing the deep bar effect in direct on startof permanent magnet machines”. Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2007. Nr 2/2013. S. 177 - 179.
- [5] Zawilak T.: „Zawilak J.: „Silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi w napędzie młyna kulowego”, Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe, ISSN 0239-3646. Nr 3/2016 r. s. 169 – 17