

Zwarcia zwojowe w uzwojeniu stojana silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim

Streszczenie. Zbadano zjawiska towarzyszące zwarciom zwojowym w uzwojeniu stojana silnika LSPMSM. Badania zrealizowano przy użyciu modelu polowo-obwodowego badanego silnika. Wykonano obliczenia dla kilku przypadków zwarc w jednej z faz uzwojenia stojana. Zwarcia różnią się rozległością i wartością rezystancji punktu zwarcia. Zjawiska występujące w silniku na skutek zwarcia zwojowego pokazano porównując wybrane dwa przypadki: zwarcie czterech zwojów i całej cewki dla niemal zerowej wartości rezystancji punktu zwarcia. W obu przypadkach zwarcie następuje podczas pracy obciążonego znamionowo silnika zasilanego symetrycznym i sinusoidalnym układem napięć trójfazowych. Z wyników obliczeń polowo-obwodowych wyznaczono przebiegi czasowe prędkości obrotowej, momentu elektromagnetycznego, prądów fazowych stojana, prądu w zwojach zwartych, prądów w prętach klatki wirnika oraz mocy chwilowej pobieranej przez uszkodzony silnik. Analiza uzyskanych wyników wskazuje na możliwość wykorzystania pomiaru pobieranej mocy chwilowej do wczesnego wykrywania zwarcia zwojowego.

Abstract. The phenomena accompanying the coils short circuits in the stator winding of the Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor (LSPMSM) were investigated. The tests were carried out using a field-circuit mathematical model of the motor. Calculations were performed for several cases of short-circuits in one of the phases of the stator winding. Short circuits differ in the extent and value of the fault point resistance. The phenomena occurring in the motor due to a coil shorting are shown comparing the selected two cases: shorting of four turns and shorting of the entire coil for almost zero resistance of the fault point. In both cases, the short-circuit occurs when the motor is working with nominal load powered by a symmetrical and sinusoidal three-phase voltage system. The time characteristics of rotational speed, electromagnetic torque, stator phase currents, currents in short circuited turns, currents in the rotor cage bars and instantaneous power of damaged motor were determined from the results of the field-circuit calculations. The analysis of the obtained results indicates the possibility of using the measured instantaneous power of the motor for early detection of the coil shorting. (*Inter-turns short-circuits in stator winding of line-start permanent magnet synchronous motor*).

Słowa kluczowe: silnik synchroniczny, magnesy trwałe, rozruch bezpośredni, zwarcia zwojowe, uzwojenie stojana

Keywords: synchronous motor, permanent magnets, line-start, coils short circuits, stator winding

Wstęp

Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim (line-start permanent magnet synchronous motor – LSPMSM) mogą w niezbyt odległej przyszłości zastąpić powszechnie stosowane silniki indukcyjne klatkowe. W porównaniu z silnikami indukcyjnymi mają zdecydowanie wyższą sprawność i współczynnik mocy [2, 3, 4], lecz również wyższy koszt wytworzenia, bardziej odkształcone pole magnetyczne i trudny rozruch.

Ze względu na duże wartości sprawności i współczynnika mocy energochłonność silnika LSPMSM jest znacznie mniejsza niż indukcyjnego. Moc znamionowa silnika LSPMSM wyznaczona z prób termicznych, jest o ~25% większa od mocy znamionowej silnika indukcyjnego o tej samej wielkości mechanicznej. Inaczej mówiąc LSPMSM jest maszyną o mniejszych energochłonności i materiałochłonności.

Trudny rozruch silnika uruchamianego bezpośrednio wynika z momentu wytwarzanego przez magnesy trwałe podczas rozruchu. Zmniejsza on moment wytwarzany przez klatkę rozruchową, powoduje oscylacje prędkości i zwiększa wartości prądów stojana podczas rozruchu. Wydłuża również czas rozruchu. Może to w konsekwencji doprowadzić do uszkodzeń, a w wyniku ich rozwoju nawet do rozmagnesowania magnesów.

W silnikach indukcyjnych elektryczne uszkodzenie uzwojenia stojana to, po mechanicznym uszkodzeniu łożyska, najczęściej występujący defekt. Przyczyną takiego uszkodzenia jest zazwyczaj degradacja izolacji uzwojenia spowodowana trudnymi warunkami pracy bądź długim czasem eksploatacji silnika. Możliwe rodzaje uszkodzeń to zwarcia zwojowe, zwarcia cewek, zwarcia międzyfazowe i zwarcia doziemne. Największe zainteresowanie budzą zwarcia zwojowe, bo w fazie początkowej są trudno zauważalne a ich działanie lokalne jest bardzo destrukcyjne. Ciekawe wyniki uzyskano z analizy polowo-obwodowej uszkodzonych silników indukcyjnych [1]. Użyte do obliczeń modele polowo-obwodowe zostały zweryfikowane pomiarowo co pozwala uważać uzyskane

wyniki za bardzo wiarygodne (również w odniesieniu do prądów klatki wirnika niedostępnej pomiarowo).

Gęstość prądu w zwartych zwojach może osiągać bardzo duże wartości (nawet do 75 A/mm² przy zanikowej rezystancji punktu zwarcia), co grozi szybkim przepaleniem tych zwojów. Skutkiem tego może być odłączenie zwartego zwoju bądź przerwanie fazy.

Długotrwałe utrzymywanie się zwarcia zwojowego, możliwe przy znacznej rezystancji punktu zwarcia, nagrzewa okolicę zwarcia i skutkuje przegrzewaniem izolacji i rozszerzaniem zwarcia.

Pojawiająca się przy zwarcu w stojanie reakcja w prętach wirnika ma charakter szybkich impulsów zniekształcających przebieg prądu wirnika. Wielkość tych impulsów wyraźnie zależy od ilości zwartych zwojów uzwojenia stojana i wartości prądu w nich płynącego. Amplituda impulsów znacznie wzrasta przy zwarcu całej cewki i wzrasta zarówno wartość pierwszej harmonicznej prądu wirnika jak i amplitud wyższych harmonicznych.

Każde, nawet niewielkie, elektryczne uszkodzenie uzwojenia silnika jest wyraźnie obserwowalne w przebiegu trójfazowej mocy chwilowej. Pojawia się wówczas składowa o częstotliwości 100Hz, której amplituda jest miarą wielkości uszkodzenia.

Zwarcia zwojowe uzwojeń stojana powodują nie tylko zakłócenia przebiegów momentu, prędkości, mocy czy prądu, ale również są przyczyną nadmiernego nagrzewania silnika. Nadmiernie nagrzewają się nie tylko uzwojenie stojana ale również inne główne elementy silnika: klatka wirnika i rdzeń stojana. Potwierdzają to krzywe nagrzewania tych elementów wyznaczone dla silnika ze zwartymi czterema zwojami uzwojenia stojana [5]. Badania 30 sekundowych zwarc zwojowych o większych rozmiarach wykazały, że zarówno przyrost temperatury uzwojenia stojana jak i klatki wirnika, zwiększają się nieliniowo ze wzrostem ilości zwartych zwojów uzwojenia fazowego stojana. Ze wzrostem uszkodzenia rośnie również szybkość narastania temperatury uzwojenia.

W przypadku zwarc zwojowych w stojanie silnika LSPMSM można spodziewać się podobnych lub nawet większych skutków termicznych [6, 7, 8, 9, 10]. Jednakże w takim silniku przegrzewanie wirnika grozi poważniejszymi konsekwencjami niż w silniku indukcyjnym. Zagrożone są przez wszystkim magnesy trwałe tworzące pole wzbudzenia. Obecnie powszechnie stosuje się magnesy neodymowe (NbFeB), produkowane technologią proszkową, o stosunkowo niskiej maksymalnej temperaturze pracy. Zakres tych temperatur to 80–200°C dla różnych rodzajów tych magnesów. Chociaż temperatura Curie pozbawiająca magnes jego właściwości magnetycznych jest wyższa (310–340°C) to maksymalna dopuszczalna temperatura pracy jest obniżona ze względu na szybkie utlenianie się proszków ze wzrostem temperatury.

Celowe więc wydaje się być dokładniejsze zbadanie skutków zwarc zwojowych w stojanach silników LSPMSM przy pomocy modelu polowo-obwodowego podobnego do użytego wcześniej w badaniach silników indukcyjnych [1].

Model obliczeniowy

W badaniach symulacyjnych zwarc zwojowych uzwojenia stojana silnika LSPMSM małej mocy o danych znamionowych zestawionych w tabeli 1, użyto modelu polowo – obwodowego przedstawionego na rysunku 1.

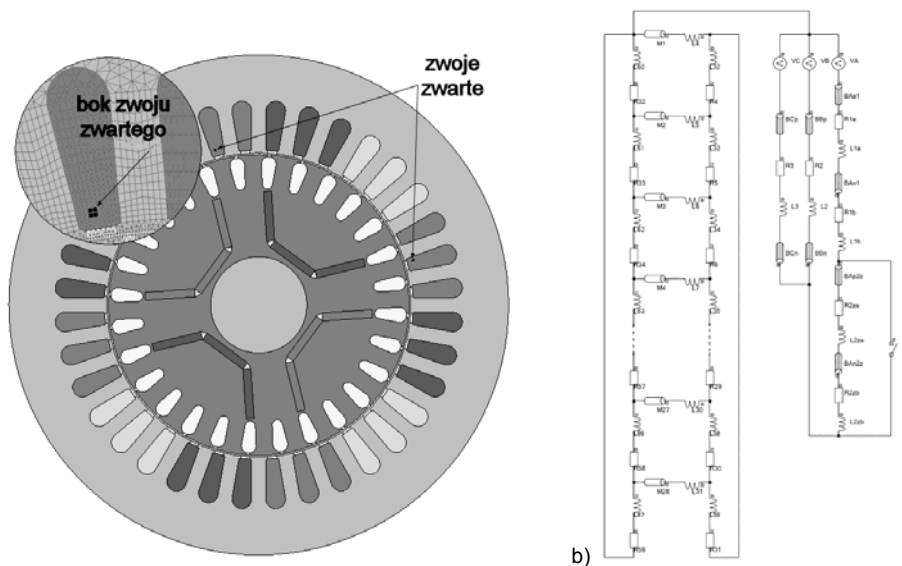
Z uzwojenia jednej z faz wydzielono, zarówno w części polowej (Fig. 1a) jak i obwodowej (Fig. 1b), elementy odpowiadające zwojom zwierzanym na połączeniach czołowych. W wydzielonym fragmencie występują również

rezystancje i reaktancje obu połączeń czołowych zwojów zwartych. W pozostałej części uzwojenia fazowego zarówno prostoliniowe części uzwojenia jak i połączenia czołowe mają reprezentacje sumaryczne.

Tabela 1. Dane znamionowe badanego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi (LSPMSM) w porównaniu do silnika indukcyjnego (IM) o takiej samej wielkości mechanicznej

Wielkość		LSPMSM	IM
Moc	[kW]	2,0	1,5
Napięcie	[V]	400	400
Prąd	[A]	3,541	3,5
Sprawność	[-]	0,872	0,78
Współczynnik mocy	[-]	0,935	0,79
Prędkość obrotowa	[1/min]	1500	1410
Moment	[N·m]	12,74	10,16
Moment rozruchowy M_r/M_n	[-]	1,16	2,5
Prąd rozruchowy I_r/I_n	[-]	5,1	5,3

Nieco odmienny model użyto do symulacji zwarcia całej cewki. W tym przypadku w modelu obwodowym reprezentowane są wszystkie cewki uzwojenia fazowego wraz z ich połączeniami czołowymi. W obu modelach obwodowych zwarcie realizowane jest przy pomocy wyłącznika S1 sterowanego czasowo. Wyłącznik to rezystor, który w stanie załączenia ma znikomą małą, a w stanie wyłączenia bardzo dużą rezystancję. Może więc być również użyty do symulacji zwarcia cewki lub zwojów przez dużą rezystancję punktu zwarcia.



Rys. 1. Polowo-obwodowy model do obliczeń zwarcia zwojowego w uzwojeniu stojana: a – część polowa modelu, b – część obwodowa modelu

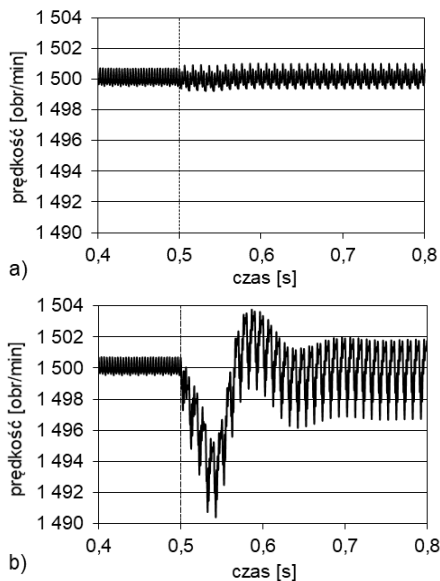
Wyniki obliczeń

Wykonano obliczenia dla kilku przypadków zwarc w jednej fazie uzwojenia stojana. Zwarcia różnią się rozległością i wartością rezystancji punktu zwarcia. Zjawiska występujące w silniku na skutek zwarcia zwojowego pokazano porównując zwarcie czterech zwojów i całej cewki (51 zwojów) dla niemal zerowej ($1 \cdot 10^{-6} \Omega$) wartości rezystancji stanu załączenia wyłącznika zwierającego. W obu przypadkach zwarcie następuje podczas pracy obciążonego znamionowo silnika zasilanego symetrycznym i sinusoidalnym układem napięć trójfazowych po czasie $t=0,5s$. W wyniku obliczeń polowo-obwodowych wyznaczono przebiegi czasowe prędkości, momentu, prądów fazowych stojana, prądu w zwojach

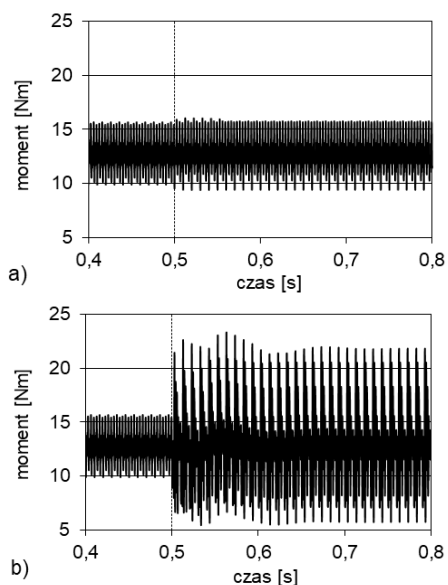
zwartych, prądów w prętach klatki wirnika oraz mocy chwilowej silnika i zestawiono je na rysunkach 2, 3, 4, 5, 6, 7.

W silnikach LSPMSM ze względu na niesymetrię magnetyczną wirnika spowodowaną obecnością niemagnetycznej klatki rozruchowej następuje znaczna deformacja prostokątnego pola magnesów. Jej skutki objawiają się w sile elektromotorycznej i prądzie uzwojenia twornika [8]. Dalszym wynikiem jest odkształcenie pola wypadkowego i generowanie przez jego wyższe harmoniczne prądów w prętach klatki rozruchowej wirnika wirującej z prędkością synchroniczną. Prędkość obrotowa i moment elektromagnetyczny oscylują wokół wartości znamionowych (założonych w obliczeniach). Po

wystąpieniu zwarcia zwojowego oscylacje zmieniają się skokowo i następnie ustalają na nowym poziomie. W przypadku zwarcia czterech zwojów zmiany momentu wynosiły $\pm 0,25M_n$. Dla zwarcia całej cewki zwiększyły się ($-0,55M_n-0,71M_n$).



Rys. 2. Prędkość obrotowa silnika synchronicznego z magnesami trwałymi podczas zwarcia w uzwojeniu fazowym ($t = 0,5s$): a) czterech zwojów, b) jednej cewki

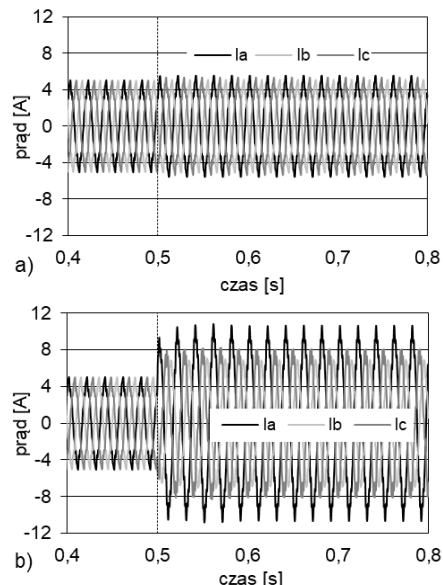


Rys. 3. Moment silnika synchronicznego z magnesami trwałymi podczas zwarcia w uzwojeniu fazowym ($t = 0,5s$): a) czterech zwojów, b) jednej cewki

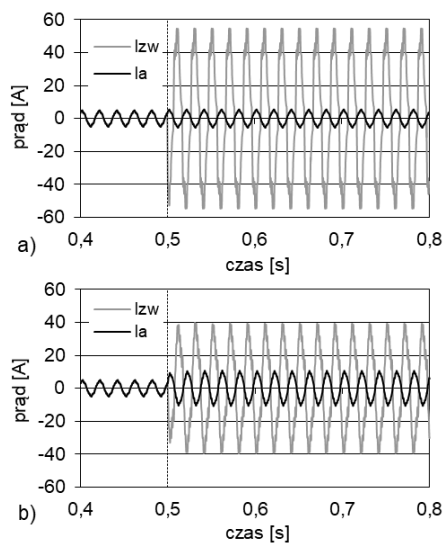
W przebiegach prądów fazowych w każdym z badanych przypadków zwarcia zwojowego zauważalna jest asymetria prądów i wzrost ich wartości (rys. 4). Największą wartość osiąga prąd tej fazy, w której część zwojów została zwarta, ale i w pozostałych fazach prądy nieco rosną. Prąd fazy ze zwojami zwartymi jest największy w przypadku bezporowego zwarcia całej cewki (rys. 4b) i osiąga wartość dwukrotnie większą od znamionowej.

Prąd w zwojach zwartych (rys. 5) zawsze jest znacznie większy niż w pozostałej części zwartego uzwojenia. I tak, bezporowe zwarcie czterech zwojów wywołuje w zwojach zwartych prąd 16-no krotnie większy od prądu fazowego

przed zwarcie (rys. 5a). Bezporowe zwarcie jednej cewki uzwojenia fazowego (rys. 5b) wywołuje w zwojach zwartych prąd 12 razy większy od prądu fazowego przed zwarcie. Gęstość prądu w podobnych proporcjach przekracza wartości znamionowe i jest źródłem szybkiego nagrzewania zwojów zwartych i ich okolicy.



Rys. 4. Prądy fazowe silnika synchronicznego z magnesami trwałymi podczas zwarcia w uzwojeniu fazowym ($t = 0,5s$): a) czterech zwojów, b) jednej cewki

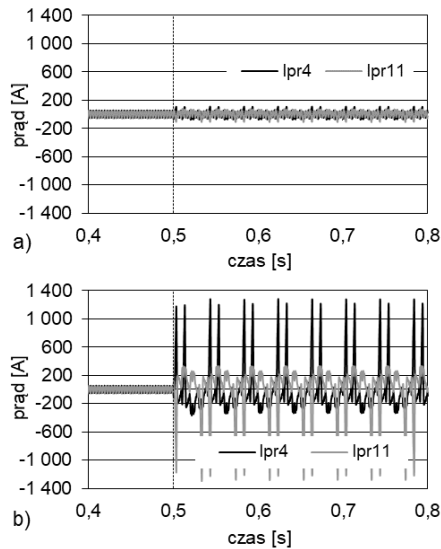


Rys. 5. Prąd w obwodzie zwartym podczas zwarcia w uzwojeniu fazowym ($t = 0,5s$): a) czterech zwojów, b) jednej cewki

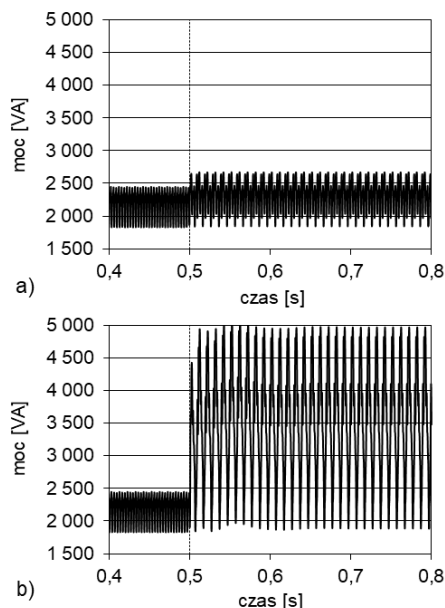
Ze względu na omówione wcześniej odkształcenie pola w szczelinie silnika LSPMSM prądy w klatce wirnika (rys. 6) płyną także przy prędkości synchronicznej. Jednak ich wartość jest niewielka ($57A$ – co oznacza średnią gęstość prądu $2,1A/mm^2$). W zwarcie całej cewki uzwojenia stojana (rys. 6b) średnia gęstość prądu osiąga $47,8A/mm^2$ a lokalnie nawet $75A/mm^2$. Tak duże gęstości prądów oznaczają gwałtowny wzrost temperatury wirnika i zagrożenie magnesów demagnetyzacją termiczną.

Skutki zwarcia najbardziej widoczne są w przebiegu trójfazowej mocy chwilowej [1]. Jej wartość średnia po zwarcie znacznie wzrasta (rys. 7). Wartość średnia mocy chwilowej może być miarą wielkości uszkodzenia gdyż rośnie proporcjonalnie z uszkodzeniem. W porównywanych przypadkach zwarc zwojowych wartość średnia mocy przed

zwarciami wynosi 2200VA, a po zwarcu czterech zwojów (rys. 7a) wzrasta o 6% i po zwarcu całej cewki (rys. 7b) rośnie o 60%. Są to wartości dla zwarc bezoporowych. Zwarcie cewki przez rezystancję 1Ω zmniejsza prąd w zwoju zwartym o połowę, a przyrost wartości średniej mocy chwilowej zmniejsza się do 20%.



Rys. 6. Prąd w wybranych prętach wirnika (4 i 11) podczas zwarcia w uzwojeniu fazowym ($t = 0,5s$): a) czterech zwojów, b) jednej cewki



Rys. 7. Moc chwilowa pobierana przez silnik podczas zwarcia w uzwojeniu fazowym ($t = 0,5s$): a) czterech zwojów, b) jednej cewki

Podsumowanie

Polowo-obwodowa analiza silnika LSPMSM ze zwartymi zwojami uzwojenia fazowego stojana pokazała, że zastosowany model obliczeniowy daje wyniki porównywalne z uzyskanymi wcześniej i zweryfikowanymi pomiarowo wynikami dla silnika indukcyjnego o tej samej wielkości mechanicznej (tab. 1).

Gęstość prądu w zwartych zwojach osiąga bardzo duże wartości do $75A/mm^2$, co grozi szybkim przepaleniem tych

zwojów. Skutkiem tego może być odłączenie zwartego zwoju bądź przerwanie fazy. Długotrwałe utrzymywanie się zwarcia zwojowego, możliwe przy znacznej rezystancji punktu zwarcia, skutkuje znacznym obniżeniem sprawności silnika.

Przy zwarcu całej cewki uzwojenia stojana (rys. 6b) średnia gęstość prądu w klatce wirnika osiąga $47,8A/mm^2$, a lokalnie na wysokości pręta nawet $75A/mm^2$. Tak duże gęstości prądów oznaczają gwałtowny wzrost temperatury wirnika aż do przekroczenia temperatury Curie i rozmagnesowanie magnesów.

Każde, nawet niewielkie, zwarcie zwojowe uzwojenia stojana silnika jest obserwowalne w przebiegu trójfazowej mocy chwilowej. Wartość średnia trójfazowej mocy chwilowej po zwarcu znacznie wzrasta. Może więc być miarą wielkości uszkodzenia gdyż rośnie proporcjonalnie do wielkości zwarcia.

Autorzy: dr inż. Maciej Antal, dr inż. Adam Gozdowiak, Politechnika Wroclawska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, Polska, E-mail: maciej.antal@pwr.edu.pl; adam.gozdowiak@pwr.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Antal M., Antal L., Zawilak J., Badania uszkodzeń uzwojenia stojana klatkowego silnika indukcyjnego, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, (2007), nr 76, 83-88
- [2] Feng X., Bao Y., Liu L., Huang L., Zhang Y., Performance investigation and comparison of Line Start-up Permanent Magnet Synchronous Motor with super premium efficiency, *2012 XXth International Conference on Electrical Machines*, (2012), 424-429
- [3] Zawilak J., Zawilak T., Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o dużej sprawności, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2014), R 90 nr 1, 224-226
- [4] Fei W., Luk P. C. K., Ma J., Shen J. X., Yang G., A High-Performance Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor Amended From a Small Industrial Three-Phase Induction Motor, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, (2009), no. 10, 4724-4727
- [5] Antal L., Gwoździewicz M., Marciniak T., Antal M., Badania skutków cieplnych zwarc zwojowych w uzwojeniach stojana silnika indukcyjnego, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wroclawskiej. Studia i Materiały*, (2012), nr 32, 316-324
- [6] Obeid N. H., Boileau T., Nahid-Mobarakeh B., Modeling and diagnostic of incipient inter-turn faults for a three phase permanent magnet synchronous motor, *2014 IEEE Industry Application Society Annual Meeting, Vancouver, BC*, (2014), 1-8
- [7] Aubert B., Régnier J., Caux S., Alejo D., Kalman-Filter-Based Indicator for Online Interturn Short Circuits Detection in Permanent-Magnet Synchronous Generators, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62 (2015), no. 3, 1921-1930
- [8] Zawilak T., Gwoździewicz M., Uzwojenie mieszane stojana typu gwiazda-trójkąt w silniku synchronicznym z magnesami trwałymi, *Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne*, (2011), Nr 91, 191-194
- [9] Urresty J., Riba J., Romeral L., Saavedra H., Analysis of demagnetization faults in surface-mounted permanent magnet synchronous with inter-turns and phase-to-ground short-circuits, *2012 XXth International Conference on Electrical Machines, Marseille*, (2012), 2384-2389
- [10] Wei-fu Lu, Hai-sen Zhao, Shi Liu, Demagnetization conditions comparison for line-start permanent magnet synchronous motors, *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, (2014), 48-52