

Analiza stanów pracy wielokanałowych silników synchronicznych z magnesami trwałymi

Streszczenie. W artykule zamieszczono wybrane wyniki badań porównawczych prototypowych silników synchronicznych z magnesami trwałymi przeznaczonymi do zasilania wielokanałowego. Silniki tego typu stosowane są tam, gdzie wymagana jest wysoka niezawodność i bezpieczeństwo pracy – tzw. napędy krytyczne. Analizowano dwie konstrukcje różniące się sposobem wykonania uzwojenia stojana. Pierwsza konstrukcja posiadała uzwojenie o poskoku średnicowym, natomiast druga uzwojenie o poskoku istotnie skróconym. Obie konstrukcje posiadające identyczny wirnik (magnesy montowane powierzchniowo – SPM) pozwalają na wprowadzanie pewnej niesymetrii wewnętrznej (elektrycznej i magnetycznej) w jednym z kanałów silnika. Testy obejmowały zasilanie odpowiednio: jednego, dwóch oraz czterech kanałów w warunkach symetrii i niesymetrii wewnętrznej umownego kanału A silnika. Zostały pokazane wybrane przebiegi czasowe prądów i napięć. Dokonano porównania charakterystyk mechanicznych obu silników z uwzględnieniem pracy wielokanałowej oraz wybranych przypadków niesymetrii wewnętrznej.

Abstract. The paper presents selected results of comparative analysis of prototype synchronous motors with permanent magnets intended for multi-channel power supply. This types of motors are used where high reliability and safety are required - the so-called critical drives. Two designs with different method of making the stator winding were analyzed. The first prototype had a winding with a full pitch, while the second one had a winding with a fractional pitch. Both constructions with the same rotor (surface mounted magnets - SPM) allow to introduce some internal asymmetry (electrical and magnetic) in one of the motor channel. The tests included a few options of power supply - respectively: one, two and four channels in the conditions of symmetry and internal asymmetry simulated in channel A. Selected waveforms of currents and voltages have been shown. The mechanical characteristics of both motors were compared, taking into account multi-channel operation and selected cases of internal asymmetry. (*Analysis of operating states of multi-channel permanent magnet synchronous motors*).

Słowa kluczowe: silnik synchroniczny z magnesami trwałymi, PMSM, redundancja, napęd, wielokanałowy.

Keywords: permanent magnet synchronous motor, PMSM, redundancy, drive, multi-channel.

Wstęp

Nowoczesne napędy elektryczne mają za cel spełniać wiele bardzo często wymagających zadań w kontekście swojej wysoko efektywnej oraz niezawodnej pracy. Ma to swoje odzwierciedlenie głównie w kontekście transportu, zwłaszcza w dziedzinie szeroko pojętej elektromobilności – od pojazdów dwukołowych, samochodów, na statkach morskich oraz powietrznych kończąc (MEA – More Electric Aircraft). Niezawodność napędu elektrycznego jest bardzo ważna, ponieważ często wpływa na komfort, a przede wszystkim bezpieczeństwo podróżujących pasażerów. Tu pojawia się tzw. pojęcie nowoczesnych napędów krytycznych obejmujących takie układy napędowe jak koła samochodu, śmigła samolotu, pompy paliwa oraz wielu innych wymagających zwiększonej niezawodności. Główną właściwością napędu krytycznego jest zdolność kontynuowania pracy w przypadku wystąpienia awarii [1,2]. Realizowane może być to poprzez np. zastosowanie redundowanych układów zasilających oraz maszynowych. Niezależne układy napędowe pomimo oczywistej zalety jaką jest separacja (co w kontekście awarii jest najlepszym rozwiązaniem, gdyż ryzyko przeniesienia usterki na sąsiedni napęd jest minimalne) są jednak metodą kłopotliwą do zastosowania ze względu na konieczność zapewnienia dodatkowego miejsca na montaż. W kontekście pojazdów elektrycznych jest to czasem wręcz niewykonalne, ponieważ miejsce to jest bardzo ograniczone i na ma możliwości zastosowania dodatkowej maszyny. Problemem konstrukcyjnym staje się tu również waga – większa masa przyczynia się do zapewnienia większej ilości pobieranej energii, przez co skraca zasięg pojazdu elektrycznego. W związku z tym konstruktorzy oraz producenci poszukują coraz to nowych rozwiązań spełniających opisane kryteria i wymagania.

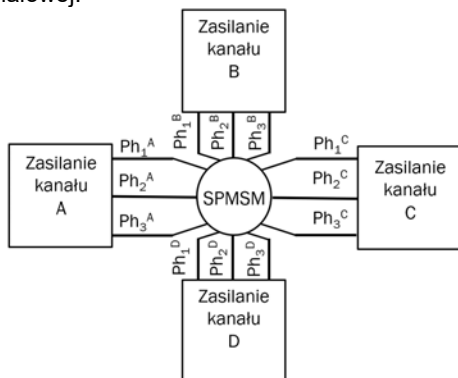
Celem artykułu jest analiza wielokanałowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi (PMSM) przy różnych wariantach zasilania kanałowego oraz wpływu niesymetrii wewnętrznej na jego parametry. Testy

praktyczne przeprowadzono dla dwóch prototypów które zostały zaprojektowane do uzyskania tej samej mocy wyjściowej przy założeniu pracy z połową kanałów. Stan pracy silnika przy wykorzystaniu tylko połowy dostępnych kanałów musi być stanem pracy ciągłej. W przypadku pracy krytycznej kiedy pracuje tylko jeden z czterech dostępnych kanałów wymaga się, aby silnik wytwarzał wymaganą moc wyjściową przez kilkanaście minut. Musi to być czas niezbędny do przeprowadzenia operacji np. awaryjnego zatrzymania urządzenia, ale w sposób w pełni kontrolowany. Dopuszcza się w takiej sytuacji do wzrostu temperatury powyżej wartości dopuszczalnej. Skutki przegrzania np. uzwojeń pracującego kanału są w takim przypadku wpisane w tryb pracy awaryjnej.

Napędy krytyczne – stosowane rozwiązania

Jedną z popularniejszych konstrukcji pozwalającą na poprawę niezawodności w napędach krytycznych jest zastosowanie maszyn wielofazowych [3-7]. Tego typu rozwiązanie pozwala na wykorzystanie większej liczby faz zasilających niż 3 i charakteryzuje się np. mniejszymi pulsacjami momentu elektromagnetycznego czy mniejszą obciążalnością prądowo-napięciową układów zasilających. Możliwy stan awaryjny (np. utrata zasilania jednej fazy) będzie pozwalał na kontynuację pracy, ale spowoduje asymetrię pola magnetycznego. Innym rozwiązaniem mogą być maszyny wielokanałowe (MCM) [8-18]. W odróżnieniu od maszyn wielofazowych, silniki wielokanałowe mają wyraźnie odseparowane kanały, które mogą być, ale nie muszą przesunięte względem siebie w fazie. Stosując to rozwiązanie uzyskujemy trójuzwojeniowy układ gwiazdowy z wektorami rozłożonymi co 120°. Uzwojenia kanałów są elektrycznie od siebie odseparowane co przy zasilaniu wymaga jednak specjalnego układu mocy – osobnych falowników i/lub źródeł zasilających. Podnosi to odporność na uszkodzenia i niezawodność napędu, jednak zwiększa koszty (głównie inwestycyjne). Maszyna MCM może pracować w czterech trybach zasilania: czterokanałowym

(ang. quad-channel mode - QCO) kiedy to zasilane są odpowiednie pasma wszystkich czterech kanałów, dwukanałowym (ang. dual-channel mode - DCO) przy zasilaniu dwóch kanałów oraz jednokanałowym (ang. single-channel mode - SCO). Na rysunku 1 pokazano schemat zasilania czterokanałowego (QCO) maszyny wielokanałowej.

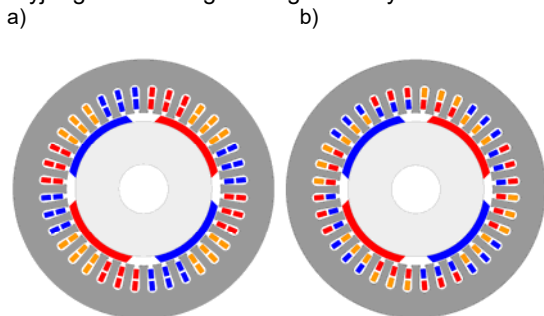


Rys. 1. Schemat zasilania czterokanałowego maszyny wielokanałowej.

Pojawiające się potencjalne uszkodzenia w układzie zasilającym lub samych kanałach silnika mogą wymusić pracę dwukanałową (DCO) lub w sytuacji krytycznej pracę jednokanałową (SCO). Od układu napędowego wymaga się, aby w trybie DCO mógł pracować w sposób ciągły z wymaganymi parametrami. W przypadku wystąpienia uszkodzeń krytycznych i sprawnym tylko jednym kanałem (SCO) nie jest już możliwa długotrwała praca z wymaganymi parametrami. Czas pracy w trybie SCO jest limitowany dopuszczalną temperaturą np. uzwojeń silnika lub pracą układu do powstania fizycznego uszkodzenia.

Modele prototypowych PMSM

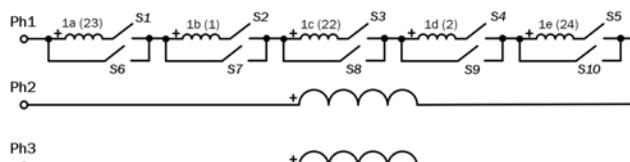
Na rysunku 2. pokazano geometrię obu modeli badanych wielokanałowych prototypów PMSM. Oba prototypy posiadają identyczne konstrukcje wirnika z magnesami montowanymi powierzchniowo (SPM), ale różnią się sposobem wykonania uzwojenia. W jednym z prototypów zastosowano uzwojenie dwuwarstwowe o poskoku średnicowym (SPMSM-Y9), w drugim o poskoku skróconym (SPMSM-Y3). Oba prototypowe silniki były projektowane do uzyskania tego samego punktu pracy tj. mocy wyjściowej 1500 W przy prędkości 1500 obr/min przy wykorzystaniu trybu pracy DCO. Przy projektowaniu prototypów wykorzystano obudowę komercyjnego silnika indukcyjnego czterobiegunowego o mocy 1500 W.



Rys. 2. Geometria analizowanych prototypowych wielokanałowych silników synchronicznych z magnesami trwałymi a) SPMSM-Y9, b) SPMSM-Y3

W obu prototypowych silnikach przewidziano możliwość praktycznego testowania różnych przypadków stanów pracy niesymetrycznej. Konstrukcje obu prototypów posiadają wyprowadzone na listwie zaciskowej końcówki uzwojeń

poszczególnych kanałów, z czego dla umownego kanału A poszczególne zezwoje uzwojenia fazy pierwszej zostały podzielone na dwie sekcje zawierające określoną liczbę zwojów. Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwe jest pominięcie wybranej sekcji i zasilanie kanału symulujące uszkodzenie (mogące wystąpić w trakcie eksploatacji). Na rysunku 3 pokazano schemat połączenia uzwojeń jednego z kanałów (umowny kanał A SPMSM-Y9) pokazujący możliwości konfiguracyjne w odniesieniu do testowania różnych przypadków pracy niesymetrycznej prototypowych SPMSM.



Rys. 3. Schemat uzwojenia jednego z kanałów SPMSM-Y9

W tabeli 1 pokazano przykładowe kombinacje kluczy z rysunku 3 uwzględniające wybrane stany pracy asymetrycznej (AS) umownego kanału A.

Tabela 1. Kombinacje połączeń dla łączników fazy 1 kanału A (do rysunku 3)

Stan pracy	Kombinacje łączników									
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
SYM	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
AS1	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0
AS2	1	1	1	0	1	0	0	0	1	0
AS3	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1

Dla przykładu w obu prototypach przypadek AS1 oznacza zmniejszenie liczby zwojów danej fazy kanału o jeden zwoj. AS2 jest to zmniejszenie liczby zwojów o 2 dla SPMSM-Y9 i o 4 dla SPMSM-Y3. W przypadku AS3 pomijany jest cały jeden zezwój tj. 24 zwoje dla SPMSM-Y9 i 44 zwoje dla SPMSM-Y3.

Wybrane parametry badanych prototypowych SPMSM zostały zamieszczone w tabeli 2.

Tabela 2. Wybrane parametry prototypowych SPMSM

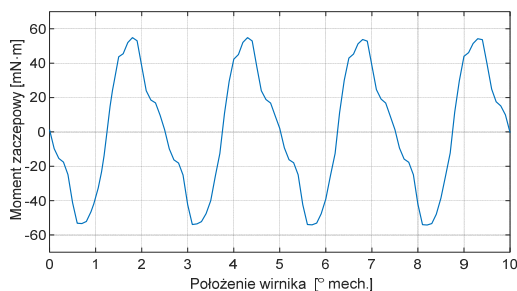
Parametr/Prototyp	SPMSM-Y9	SPMSM-Y3
Liczba faz	3	3
Liczba kanałów	4	4
Liczba żłobków	36	36
Liczba biegunów	4	4
Prędkość znamionowa	1500 obr/min	1500 obr/min
Moc ciągła przy pracy DCO	1500 W	1500 W
Wartość skuteczna prądu kanału w trybie pracy DCO	3,25 A	3,25 A
Typ uzwojenia	Dwuwarstwowe	Dwuwarstwowe
Poskok uzwojenia	9	3
Liczba zwojów w żłobku	48	88
Konfiguracja uzwojeń	gwiazda	gwiazda
Liczba zwojów pojedynczego kanału	1+23+2+22+24=72	1+43+4+40+44=132
Średnica drutu nawojowego	0,8 mm	0,6 mm
Magnes trwały	N48SH	N48SH

Rozwiązanie z magnesami montowanymi powierzchniowo i małą liczbą biegunów generuje dużą wartość momentu zaczepowego. Z tego też względu

zastosowano rozwiązanie konstrukcyjne minimalizujące problem momentu zaczepowego polegające na zastosowaniu metody pseudoskosu magnesów trwałych z podziałem na cztery segmenty.

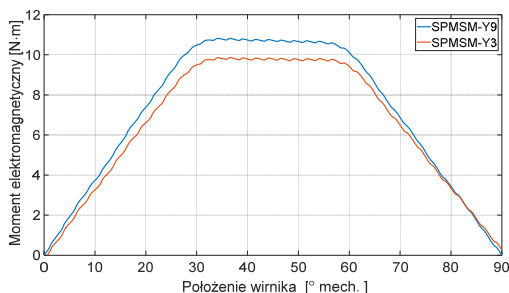
Obliczenia numeryczne

W środowisku programu Ansys Electronics [19] został zbudowany model połowy pozwalający na wyznaczenie podstawowych parametrów prototypowych SPMSM. Dla obu prototypów wyznaczono moment zaczepowy, charakterystykę statycznego momentu elektromagnetycznego oraz napięcia indukowane. Zależność momentu zaczepowego prototypów w funkcji położenia wirnika pokazano na rysunku 4. Z uwagi na identyczną konstrukcję moment zaczepowy powinien być identyczny dla obu konstrukcji.



Rys.4. Zależność momentu zaczepowego w funkcji położenia wirnika

Charakterystyki statycznego momentu elektromagnetycznego zostały pokazane na rysunku 5. Zostały one wyznaczone przy założeniu zasilania każdego kanału prądami: $I_1^A = I_{max}$, $I_2^A = I_3^A = -I_{max}/2$ gdzie $I_{max} = 1.418 \cdot 3.25/2$ (Tabela 2).



Rys.5. Zależność statycznego momentu elektromagnetycznego w funkcji położenia wirnika

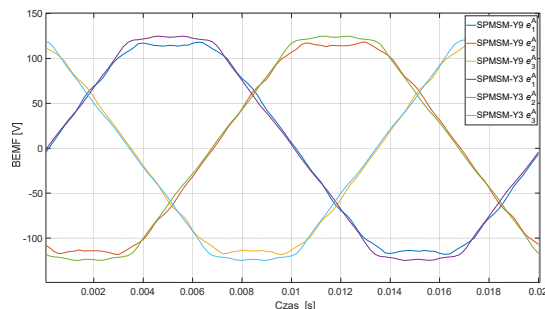
Przy tej samej wartości prądu zasilającego wariant z poskokiem skróconym wytwarza około 10% mniejszą wartość momentu elektromagnetycznego. Napięcia indukowane jednego z kanałów zostały pokazane na rysunku 7. Napięcia indukowane wyznaczono przy prędkości znamionowej wynoszącej 1500 obr/min.

Obliczenia wykazały, że w przypadku prototypu SPMSM-Y3 uzyskano nieznacznie niższą wartość napięcia indukowanego niż prototypu SPMSM-Y9.

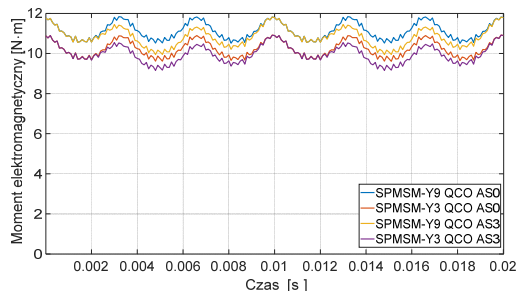
Przebieg momentu elektromagnetycznego wyznaczono przy założeniu idealnego wymuszenia prądowego. Na rysunku 7 pokazano przykładowe przebiegi wytwarzanego momentu elektromagnetycznego dla stanu symetrii wewnętrznej silnika oraz przypadku AS3 dla obu prototypów.

Przebieg momentu elektromagnetycznego wyznaczono przy założeniu idealnego wymuszenia prądowego. Na rysunku 7 pokazano przykładowe przebiegi wytwarzanego momentu elektromagnetycznego dla stanu symetrii

wewnętrznej silnika oraz przypadku AS3 dla obu prototypów.



Rys.6. Przebiegi czasowe napięć indukowanych jednego z kanałów prototypowych silników



Rys.7. Wybrane przebiegi momentu elektromagnetycznego dla obu prototypów

Bardziej szczegółowe wyniki obliczeń zawarto w tabeli 3 i 4 w odniesieniu do wytwarzanej wartości momentu elektromagnetycznego. Przypadek asymetrii AS3 odniesiono do pracy wszystkich kanałów QCO AS3, dwukanałowej DCO AS3 oraz jednocanałowej SCO AS3. W tabeli 3 zawarto wyniki obliczeń dla prototypu SPMSM-Y9, natomiast w tabeli 4 dla prototypu SPMSM-Y3.

Tabela 3. Wybrane wyniki obliczeń dla SPMSM-Y9

	T_{eav} [N·m]	T_{emax} [N·m]	T_{emin} [N·m]
QCO AS0	11,12	11,84	10,51
QCO AS3	10,09	11,82	10,46
DCO AS0	11,12	11,84	10,51
DCO AS3	10,53	11,82	9,37
SCO AS0	11,05	11,57	9,37
SCO AS3	9,87	12,00	7,78

Tabela 4. Wybrane wyniki obliczeń dla SPMSM-Y3

	T_{eav} [N·m]	T_{emax} [N·m]	T_{emin} [N·m]
QCO AS0	10,25	10,93	9,66
QCO AS3	9,97	10,92	9,16
DCO AS0	10,21	10,95	9,62
DCO AS3	9,67	10,8	8,63
SCO AS0	10,17	10,85	9,6
SCO AS3	9,11	10,65	7,65

Wyniki badań numerycznych wskazują, że oba rozwiązania dobrze tolerują stan pracy niesymetrycznej układu napędowego. W przypadku rozwiązania SPMSM-Y3 pojawienie się znacznej asymetrii powoduje nieznacznie lepszą tolerancję uszkodzenia z uwagi na mniejsze tętnienia wytwarzanego momentu elektromagnetycznego.

Stanowisko do badań laboratoryjnych

Na rysunku 8. pokazano stanowisko do testów laboratoryjnych analizowanych prototypowych SPMSM.

Oba prototypy zostały sprzężone poprzez sprzęgła i momentomierz. W zależności od rodzaju testu (wyznaczenie napięcia indukowanego, wyznaczenie

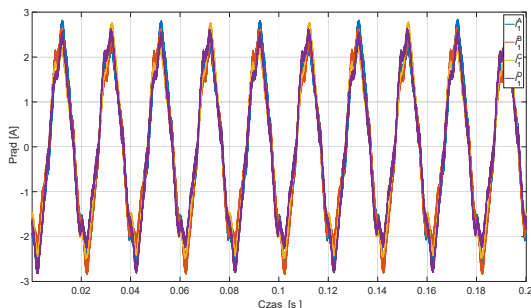
przebiegów czasowych prądów, charakterystyk mechanicznych) każdy z prototypów pełnił rolę silnika lub generatora. W układzie sterowania zastosowano falownik (lub falowniki w zależności od trybu pracy) przystosowane do zasilania silnika synchronicznego z magnesami trwałymi. Do rejestracji przebiegów czasowych (prądów, napięć) wykorzystano rejestrator oscyloskopowy. W przypadku wyznaczania charakterystyk mechanicznych, sprawności wszystkie wymagane parametry elektryczne i mechaniczne rejestrowano za pomocą analizatora mocy. Obciążenie generatora realizowano poprzez programowe obciążenie elektroniczne. Oba prototypy posiadają możliwość rejestracji temperatury uzwojeń. Zostało zamontowanych 12 termopar typu K w wszystkich fazach każdego kanału (4x3).



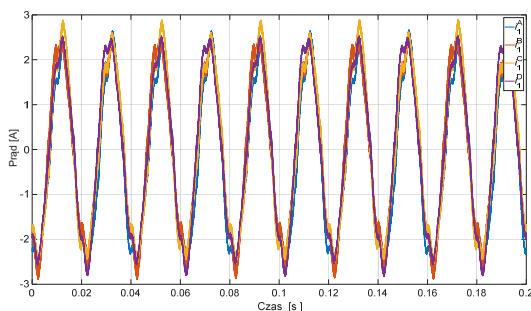
Rys.8. Widok stanowiska do testów laboratoryjnych prototypowych SPMSM

Wybrane wyniki testów laboratoryjnych

W warunkach laboratoryjnych zostały zarejestrowane przebiegi czasowe prądów. Z uwagi na ograniczenia co do możliwości rejestracji wszystkich prądów (4x3=12) ograniczono się do pomiaru tylko wybranych prądów. Na rysunkach 9-10 pokazano prądy wszystkich kanałów wybranej fazy. Rejestracji dokonano przy prędkości 1500 obr/min przy momencie obciążenia wynoszącym 10 Nm.



Rys.9. Przebiegi czasowe prądów kanałowych jednej z faz silnika SPMSM-Y9 dla trybu pracy QCO AS0

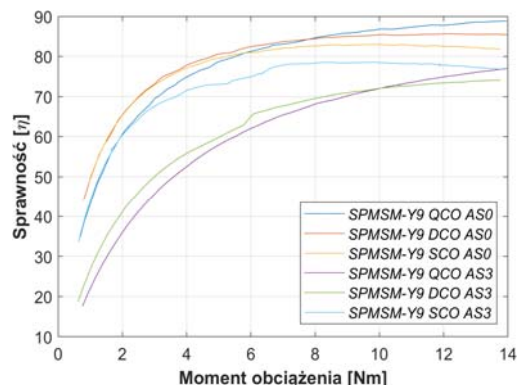


Rys.10. Przebiegi czasowe prądów kanałowych jednej z faz silnika SPMSM-Y3 dla trybu pracy QCO AS0

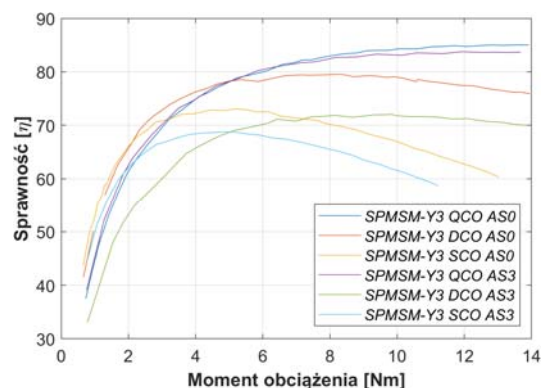
Porównując prądy w poszczególnych kanałach można zauważyć różnice pomiędzy nimi. Głównie wynika to z nieznacznych różnic pomiędzy napięciami indukowanymi w

poszczególnych kanałach. Uzyskane w warunkach rzeczywistych przebiegi czasowe prądów zawierają oprócz harmonicznej podstawowej również wyższe harmoniczne. To jest powodem, że są nie są one typowo sinusoidalne jak również jest to źródło zmniejszenia sprawności w obu prototypach.

Dla wybranych przypadków zostały wyznaczone charakterystyki mechaniczne oraz sprawności wypadkowej badanych prototypów. Sprawność została wyznaczona metodą bezpośrednią. Na rysunku 11 wyznaczono charakterystyki sprawności silnika SPMSM-Y9 przy prędkości wynoszącej 1500 obr/min dla wybranych wariantów asymetrii. Rysunek 12 przedstawia z kolei różne stany pracy dla prototypu Y3 (przy 1500 obr/min).



Rys.11. Zależność sprawności wypadkowej w funkcji momentu obciążenia prototypu SPMSM-Y9 dla wybranych stanów pracy



Rys.12. Zależność sprawności wypadkowej w funkcji momentu obciążenia prototypu SPMSM-Y3 dla wybranych stanów pracy

W tabeli 5 zestawiono maksymalne sprawności wypadkowe uzyskane w trakcie badań laboratoryjnych.

Tabela 5. Sprawności maksymalne uzyskane w warunkach laboratoryjnych dla obu prototypów

Sprawność\Prototyp	SPMSM-Y9 [%]	SPMSM-Y3 [%]
QCO AS0	89	84
DCO AS0	86	79
SCO AS0	83	71
QCO AS3	77	83
DCO AS3	74	72
SCO AS3	79	69

Analizując charakterystyki z rysunków 11 i 12 można zauważyć, że w przypadku pracy wszystkich kanałów bądź zasilania jedno lub dwukanałowego prototyp SPMSM-Y9 cechuje się wyższą sprawnością. Jest to spowodowane wyższą stałą napięciową a w konsekwencji stałą momentową. Jednak w przypadku pojawienia się asymetrii lepszą tolerancją wykazuje się prototyp o poskoku skróconym SPMSM-Y3. Skrócenie poskoku uzwojenia z jednej strony wpływa negatywnie na osiągi silnika w

zakresie symetrii zarówno sterowania czy też niesymetrii wewnętrznej samego silnika. Jednocześnie skrócenie poskoku zmniejsza wzajemne sprzężenia magnetyczne zarówno pomiędzy kanałami jak i poszczególnymi fazami. To finalnie wpływa na zwiększenie odporności na tolerancję stanów pracy niesymetrycznej. Największą tolerancję stanów pracy niesymetrycznej osiąga się przy poskoku uzwojenia wynoszącym jeden czyli typowym uzwojeniu skupionym. Wykonanie takiego uzwojenia wymaga jednak zaprojektowania nowego obwodu magnetycznego stojana. Typowy obwód magnetyczny trójfazowego silnika indukcyjnego wykorzystany w budowie prototypów SPMSM niestety nie nadawał się do wykonania takiego uzwojenia.

Wnioski

W pracy dokonano porównania dwóch prototypowych silników synchronicznych z magnesami montowanymi powierzchniowo. Różniły się one sposobem wykonania uzwojenia. W jednym z nich zastosowano uzwojenie rozłożone o poskoku średnicowym, natomiast drugi z nich miał uzwojenie o poskoku istotnie skróconym (33,33% poskoku średnicowego). Oba prototypy zostały przewidziane do zasilania czterokanałowego. Zgodnie z oczekiwaniami prototyp o poskoku średnicowym zapewnia większą sprawność przetwarzania energii, ale lepszą tolerancję stanów pracy niesymetrycznej wykazuje prototyp o poskoku skróconym. W dalszym etapie pracy zostaną poddane analizie typowe stany pracy awaryjnej np. częściowe zwarcia zwojowe oraz sposób diagnostyki pracy zasilania wielokanałowego.

Finansowanie: Projekt finansowany w ramach programu Ministra Edukacji i Nauki pod nazwą „Regionalna Inicjatywa Doskonałości” w latach 2019 - 2023 nr projektu 027/RID/2018/19 kwota finansowania 11 999 900 zł.

Artykuł jest publikacją pokonferencyjną Selected Issues in Power Engineering, Electrical Engineering and Industry 4.0 – Conference 30 November, 2022, Rzeszów.

Autorzy dziękują Panu mgr inż. Kamilowi Parfianowiczowi oraz dr hab. inż. Mariuszowi Korkoszowi, prof. PRz za pomoc w realizacji tej publikacji.

Autorzy: mgr inż. Krystyna Krzywdzińska-Kornak, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Zakład Elektrodynamiki i Systemów Elektromaszynowych, ul. Wincentego Pola 2, 35-959 Rzeszów, e-mail: krzywdzinska@prz.edu.pl.
mgr inż. Mateusz Suliga, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, E-mail: m.suliga@prz.edu.pl; Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, ul. Wincentego Pola 2, 35-959 Rzeszów

LITERATURA

- [1] Cao W., Mecrow B., Atkinson G., Bennett J., Atkinson D., Overview of Electric Motor Technologies Used for More Electric Aircraft (MEA), *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 9, pp. 3523-3531, Sept. 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2165453.
- [2] Bianchi N., Michieletto D., Cinti L., Contò C., Carlet P., Brunetti M., Nesci A.: Permanent Magnet Synchronous Motor Drives for More-Electric Aircraft, *2022 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Sorrento, Italy, 2022, pp. 871-876, doi: 10.1109/SPEEDAM53979.2022.9842284.
- [3] Wilczyński F., Strankowski P., Guziński J., Morawiec M., Lewicki A., Kostro G., Five-Phase Induction Motor Drive Operation During Stator Phase Fault, *Automatyka - Elektryka – Zakłócenia*, vol. 8 (2017) no. 4(30), 28-37
- [4] Umoh G., Ogbuka C., Obe E., Modelling and analysis of five-phase permanent magnet synchronous motor in machine variables, *Przegląd Elektrotechniczny*, 96 (2020), no. 1, 123-126, 10.15199/48.2020.01.21
- [5] Bernatt J., Gawron S., Glinka T., Wolnik T., Analiza korzyści zastosowania uzwojeń 6-fazowych w silnikach wzbudanych magnesami trwałymi, *Przegląd Elektrotechniczny*, 98 (2022) no. 09, 302-306, doi:10.15199/48.2022.09.70
- [6] Świerczyński D., Jasiński A., Sulima R., Grochowski G., Moradewicz A., Milczarek A., Napęd sześciofazowy z silnikiem PMSM dla pojazdów elektrycznych i hybrydowych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 99 (2023), no. 1, 262-269, doi:10.15199/48.2023.01.53
- [7] Kutsyk A., Korkosz M., Semeniuk M., Nowak M.: An Influence of Spatial Harmonics on an Electromagnetic Torque of a Symmetrical Six-Phase Induction Machine *Energies* 2023, 16, 3813, <https://doi.org/10.3390/en16093813>
- [8] Korkosz M., Bogusz P., Prokop J.: The Fault-Tolerant Quad-Channel Brushless Direct Current Motor. *Energies*. 2019; 12(19):3667. <https://doi.org/10.3390/en12193667>
- [9] Bogusz P., Korkosz M., Pakla B., Prokop J.: Comparative Study of the Performance of Brushless DC Motor with Permanent Magnets Under Classic and Dual-Channel Operation, *2018 International Symposium on Electrical Machines (SME)*, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISEM.2018.8442672.
- [10] Gurleyen H., Dual-Channel Variable Flux Reluctance Generator Design for More Electric Aircraft, *2021 3rd Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*, 2021, pp. 126-131, doi: 10.1109/GPECOM52585.2021.9587645.
- [11] Korkosz, M., Prokop, J., Pakla, B., Bogusz, P.: Frequency analysis in fault detection of dual-channel BLDC motors with combined star-delta winding. *IET Electr. Power Appl*, 15: 824-836. <https://doi.org/10.1049/elp2.12056>
- [12] Bai H., Zhu J., Qin J., Sun, J., Fault-tolerant control for a dual-winding fault-tolerant permanent magnet motor drive based on SVPWM. *IET Power Electronics*, 2017 (10): 509-516. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2015.1033>
- [13] Mu J., Meng X., Zhang Z., Yang H.: Simulation and Analysis of a Novel Dual-Channel Stator Distributed Excitation Double Salient Motor, *2022 5th International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA)*, Guangzhou, China, 2022, pp. 196-201, doi: 10.1109/ICPEA56363.2022.10052416.
- [14] Chang C., Zhou Q.: Research on Sensorless Control Technology of Dual-winding PMSM, *2020 5th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE)*, Dalian, China, 2020, pp. 246-250, doi: 10.1109/CACRE50138.2020.9230256.
- [15] Gurleyen H.: Dual-Channel Variable Flux Reluctance Generator Design for More Electric Aircraft, *2021 3rd Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*, Antalya, Turkey, 2021, pp. 126-131, doi: 10.1109/GPECOM52585.2021.9587645.
- [16] Nounou K., Charpentier J.F., Marouani K., Benbouzid M., Kheloui A., Emulation of an Electric Naval Propulsion System Based on a Multiphase Machine Under Healthy and Faulty Operating Conditions, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 8, pp. 6895-6905, Aug. 2018, doi: 10.1109/TVT.2018.2834342.
- [17] Jiang X., Huang W., Cao R., Hao Z., Jiang W., Electric Drive System of Dual-Winding Fault-Tolerant Permanent-Magnet Motor for Aerospace Applications, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 12, pp. 7322-7330, Dec. 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2454483.
- [18] Alberti L., Bianchi N.: Impact of winding arrangement in dual 3-phase induction motor for fault tolerant applications, *The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010*, Rome, Italy, 2010, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICELMACH.2010.5607941.
- [19] ANSYS. Ansys Electronics Release 2022 R1; ANSYS Inc.: Canonsburg, PA, USA, 2022.