

# Wpływ wyższych harmonicznych napięcia zasilającego na rozkład temperatury silnika synchronicznego z magnesami trwałymi

Szymon Lipiński, Jan Zawilak

## 1. Wstęp

Silniki synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi są energooszczędną alternatywą dla silników indukcyjnych i znajdują zastosowanie w coraz bardziej wymagających napędach [1, 2, 3]. Wobec stawianych wymagań zamienności maszyny nowego typu muszą być odporne na podobne narażenia jak maszyny asynchroniczne. Jednym z takich narażeń jest praca przy zasilaniu napięciem odkształconym zawierającym wyższe harmoniczne. W przypadku silników indukcyjnych praca przy odkształconym napięciu zasilającym prowadzi do obniżenia sprawności, podwyższenia temperatury pracy i wzrostu wibracji wirnika [4, 5]. Ze względu na podobieństwa konstrukcyjne spodziewane jest, że udział wyższych harmonicznych będzie miał podobny wpływ na straty, a zatem i na rozkład temperatury w maszynie synchronicznej z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim.

Celem niniejszej pracy jest zbadanie wpływu wyższych harmonicznych napięcia na temperaturę pracy silnika. Przy czym poziom poszczególnych harmonicznych ujętych w analizie jest ograniczony wymaganiami norm określających jakość energii elektrycznej w tym zakresie [6, 7]. W zakres pracy wchodzi analiza wpływu każdej z harmonicznych z osobna na straty występujące w maszynie, aby określić zależność dodatkowych strat od rzędu harmonicznej. Ponadto rozpatrzono przypadki odkształcenia napięcia, przy którym THD zawiera się na poziomie do 10%, w celu wyznaczenia wariantu, w którym straty i temperatury w maszynie będą maksymalne. Pozwala to na określenie, jakiego rzędu względnych przyrostów należy się spodziewać przy pracy przy odkształconym napięciu zasilania. Analiza taka może się okazać szczególnie przydatna podczas projektowania silników dużej mocy, które z reguły konstruowane są na zamówienie. Wobec czego końcowy odbiorca może zdefiniować warunki zasilania. W szczególności należy brać pod uwagę występowanie wyższych harmonicznych, gdy napęd jest zasilany z tej samej sieci co inne odbiorniki zasilane przekształtnikowo, np.: piece łukowe, spawarki oraz silniki o znaczącej mocy pobierające prąd odkształcony [4, 7].

## 2. Model obliczeniowy

W obliczeniach wykorzystano możliwość dwukierunkowego sprzęgnięcia ze sobą obliczeń elektromagnetycznych i cieplnych. Dzięki temu możliwe jest uwzględnienie wpływu temperatury na właściwości elektromechaniczne silnika wskutek

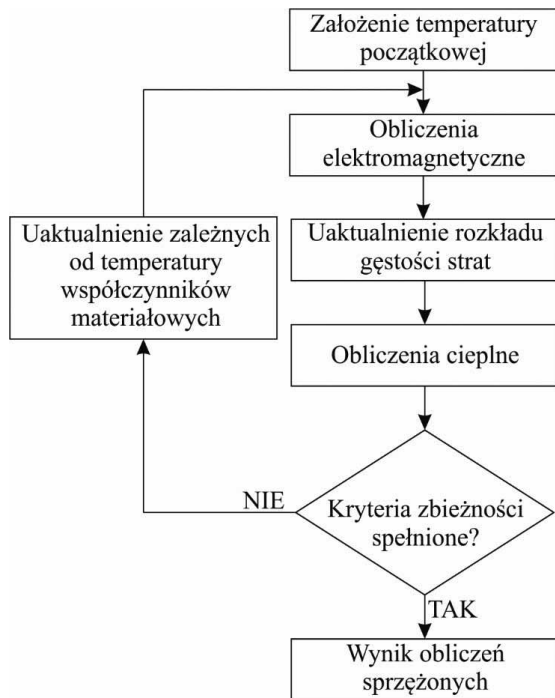
**Streszczenie:** Silniki synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim (LSPMSM) są wysoko sprawną alternatywą dla silników indukcyjnych. Wobec tego muszą one być projektowane z uwzględnieniem podobnych narażeń jak maszyny asynchroniczne. Jednym z takich narażeń jest praca przy zasilaniu napięciem odkształconym zawierającym wyższe harmoniczne. Dotychczasowe prace dotyczące wpływu odkształceń napięcia zasilającego na silniki indukcyjne pokazują, że prowadzą one do wzrostu strat i temperatur w maszynie. Ze względu na podobną konstrukcję, analogiczne zjawiska występują także w silnikach synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim. Na podstawie normy IEC 61000-2-2:2002 i IEC 61000-2-4:2002 zaprezentowano wpływ wyższych harmonicznych w napięciu zasilającym na temperaturę pracy silnika LSPMSM o mocy 1900 W oraz napięciu 400 V. Rozpatrywano przy tym pracę ustaloną silnika poddanego stałemu obciążeniu i wykorzystano model numeryczny sprzęgający dwukierunkowo pole elektromagnetyczne i ciepłe.

Słowa kluczowe: silniki synchroniczne, magnesy trwałe, rozruch bezpośredni, analiza numeryczna, odkształcenie napięcia, pomiar temperatury

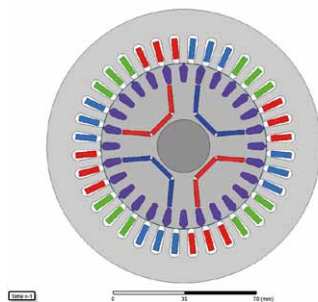
## INFLUENCE OF VOLTAGE HARMONIC DISTORTION ON TEMPERATURE DISTRIBUTION IN LINE-START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

**Abstract:** Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors (LSPMSM) are high-efficient substitute for induction motors. Therefore they have to be designed regarding the same exposures like asynchronous motors. One of such exposures is operation with distorted power supply voltage. Foregoing papers concerning influence of the voltage distortion on induction motors show that higher harmonics lead to increased temperature of the machine. Because of similar construction such phenomenon occurs also in LSPMSM. According to standards IEC 61000-2-2:2002 and IEC 61000-2-4:2002 presented influence of harmonics in power supply voltage during steady state operation with constant load equal to 1900 W and fed with voltage 400 V. Two-way coupled electromagnetic and thermal model was used in numerical analysis.

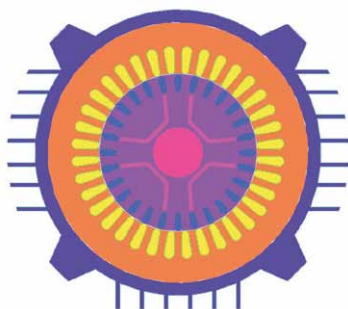
Keywords: synchronous motors, permanent magnets, line start, voltage distortion, numerical analysis, temperature measurement



Rys. 1. Algorytm obliczeń sprzężonych

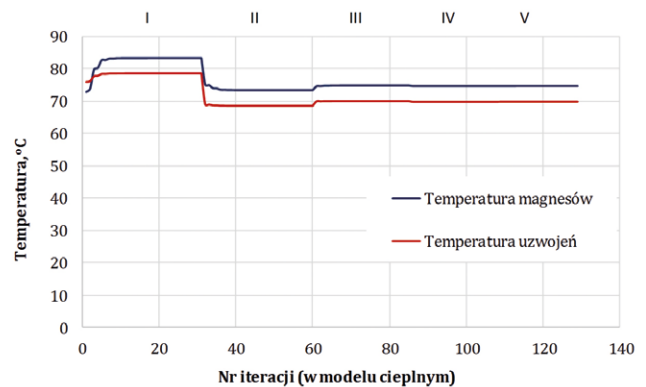


Rys. 2. Model elektromagnetyczny



Rys. 3. Model cieplny

zmian właściwości elementów obwodu elektrycznego i magnetycznego [8, 9, 10]. Idea algorytmu została przedstawiona na rysunku 1. W pierwszym kroku należy przygotować modele elektromagnetyczne i cieplne o odpowiadającej sobie geometrii (rys. 2, 3). Różnice, jakie występują w geometrii, dotyczą uzwojeń stojana, co wynika z modelowanych zjawisk. W modelu

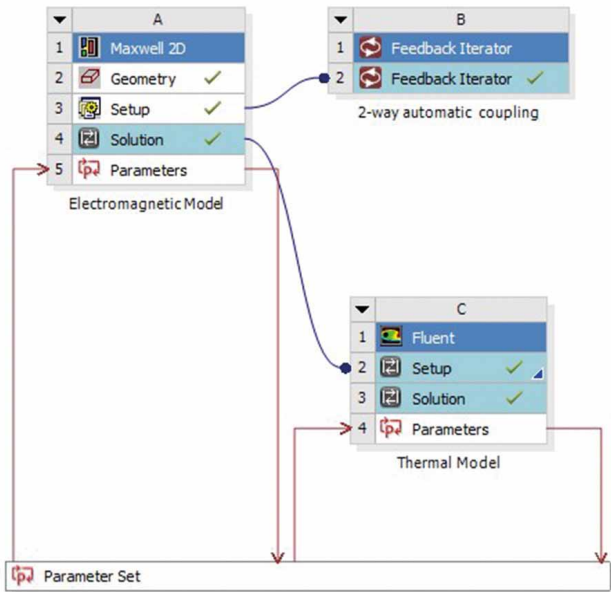


Rys. 4. Zbieżność obliczeń modelu sprzężonego; cyframi rzymskimi oznaczono nr przejścia pętli z rysunku 1

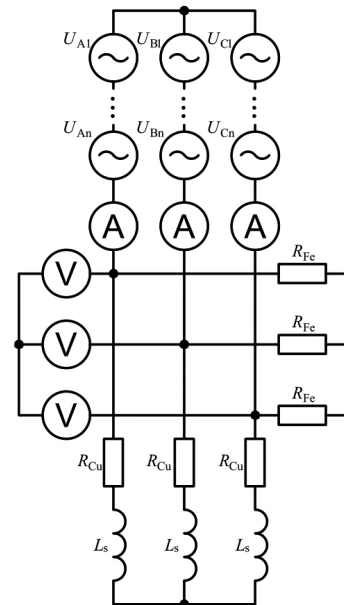
elektromagnetycznym kształt uzwojeń nie jest w pełni oddany, ponieważ istotny jest tylko wywołany przepływ. Przenikalność magnetyczna drutu, izolacji i powietrza jest w przybliżeniu taka sama, wobec czego takie uproszczenie jest dopuszczalne. Geometria uzwojeń została dokładniej przedstawiona w modelu cieplnym, gdzie należy odwzorować regiony o różnej przewodności cieplnej. Dodatkowo model uzupełniono o kadłub, który jest zbędny w obliczeniach elektromagnetycznych. Następnie przyjmuje się początkową temperaturę dla poszczególnych elementów maszyny i rozpoczyna się obliczenia modelu elektromagnetycznego. Temperatury początkowe przyjmuje się arbitralnie, jednak nie mają one wpływu na ostateczny wynik. Odpowiedni dobór temperatury początkowej pozwala jednak na zmniejszenie ilości iteracji potrzebnych do osiągnięcia zbieżności, co przyspiesza proces obliczeń. Przykładowy proces zbieżności pokazano na rysunku 4. Widać na nim, że uzyskanie zbieżności na poziomie  $0,1^{\circ}\text{C}$  osiągnięte jest już po trzech przebiegach. Zatem wymagana ilość iteracji powinna w większości przypadków zawierać się w przedziale od 3 do 5. Wynikiem obliczeń elektromagnetycznych jest rozkład strat w maszynie, który jest przenoszony do modelu cieplnego, gdzie jest to rozkład źródeł ciepła.

Po zakończeniu obliczeń cieplnych uzyskuje się nowy rozkład temperatury, który porównywany jest z poprzednim. Jeśli kryteria zbieżności zostały osiągnięte lub wykonano zadaną liczbę iteracji, obliczenia są zakończone. Wynikiem są napięcia i prądy silnika, przy danym obciążeniu, uwzględniające wpływ temperatury na własności materiałowe oraz rozkład temperatur w silniku.

W praktyce połączenie takie zostało zrealizowane w środowisku Ansys Workbench 17.1 oraz w programach Maxwell i Fluent (rys. 5). Moduł Feedback Iterator pozwala na zautomatyzowanie sprzęgnięcia modeli tak, że dane pomiędzy nimi przenoszone są w kolejnych przejściach pętli obliczeniowej automatycznie. Wadą takiego rozwiązania jest brak możliwości uzależnienia parametrów modelu obwodowego od temperatury, w szczególności rezystancji uzwojeń. Wobec tego proces zbieżności należy powtarzać kilkakrotnie dla kolejnych rezystancji uzwojeń, aż



Rys. 5. Realizacja modelu sprzężonego w środowisku Workbench



Rys. 6. Model obwodowy

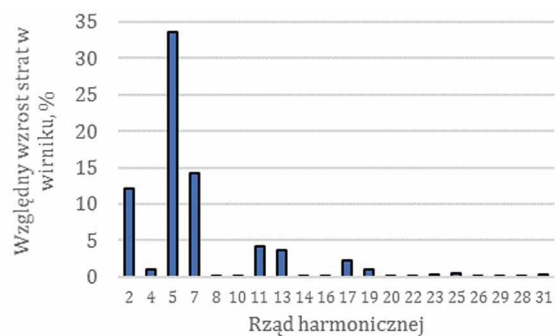
przyjęta rezystancja pokryje się dostatecznie dokładnie z tą, która wynika z obliczonej temperatury pracy. Ponadto model 2D nie pozwala na wyznaczenie temperatury uzwojeń w połączeniach czołowych, gdzie zwykle ta temperatura jest najwyższa. Jednak jest wystarczający do określenia temperatury magnesów, co jest istotne z punktu widzenia demagnetyzacji.

W celu wykonania analizy wpływu zawartości wyższych harmonicznych w napięciu na temperaturę pracy przygotowano model obwodowy zawierający szeregowo połączone źródła napięcia, które odpowiadają kolejnym harmonicznym (rys. 6). Zadając odpowiednie wartości amplitud poszczególnych źródeł, uzyskuje się pożądany ich udział w stosunku do składowej podstawowej. Ze względu na połączenie uzwojeń silnika w gwiazdę pominięto harmoniczne rzędu wielokrotności 3.

Rezystancje  $R_{Fe}$  i  $R_{Cu}$  reprezentują straty w żelazie oraz rezystancję uzwojeń stojana, a indukcyjności  $L_s$  reprezentują indukcyjności połączeń czołowych oraz indukcyjności części żłobkowych uzwojeń uzyskane z modelu polowego, co pozwala na sprzęgnięcie obu modeli. Aby dostatecznie dokładnie odwzorować przebiegi wyższych częstotliwości, konieczne było zmniejszenie kroku czasowego obliczeń do 0,05 ms.

### 3. Wyniki obliczeń

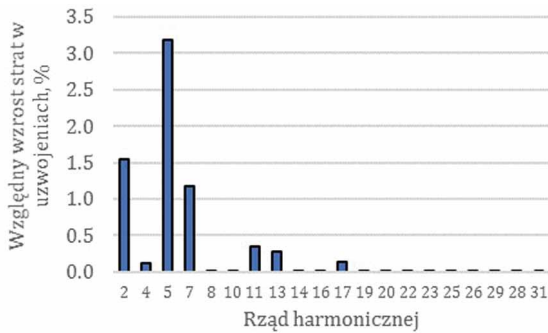
W pierwszej kolejności rozpatrzono wpływ poszczególnych harmonicznych na występujące straty. Na rysunku 7 przedstawiono względny przyrost strat w klatce wirnika i magnesach dla kolejnych harmonicznych z uwzględnieniem ich maksymalnych dopuszczalnych udziałów w sieciach przemysłowych [7]. Wyniki odniesiono do wartości strat przy zasilaniu napięciem nieodkształconym. Magnesy stanowiące lite elementy w zmiennym polu magnetycznym mogą stanowić źródło strat w wyniku indukujących się w nich prądów wirowych. Jednak w rozpatrywanym przypadku obliczone straty są rzędu pojedynczych



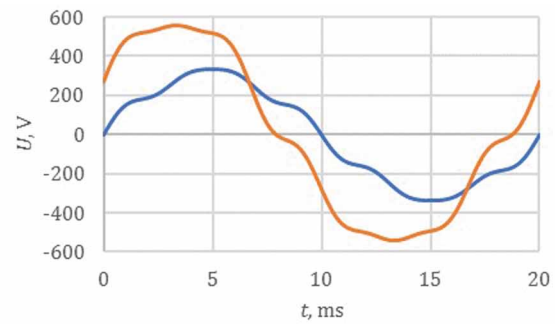
Rys. 7. Wpływ wyższych harmonicznych napięcia na straty w wirniku

miliwatów. Wynika to z faktu, że magnesy w ustalonym stanie pracy są nieruchome względem pola harmonicznej podstawowej, a pole pochodzące od wyższych harmonicznych jest skutecznie tłumione przez klatkę rozruchową. Ponadto rezystywność magnesów jest stosunkowo duża, przez co wyindukowane prądy są niewielkie. Zatem można praktycznie uznać, że za wzrost strat w wirniku w całości odpowiadają prądy wyższych harmonicznych wyindukowane w klatce. Dla harmonicznych rzędu powyżej 20 wzrost strat jest nieznaczny, powyżej 30. harmonicznej są pomijalnie małe.

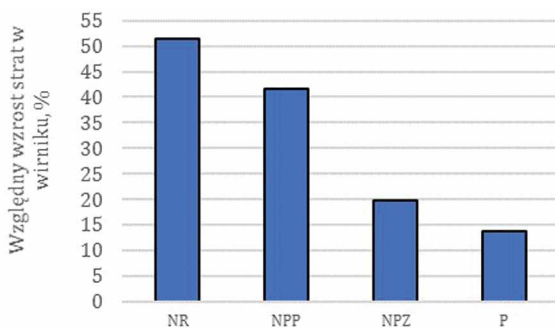
Przebieg wyższych harmonicznych pociąga za sobą wzrost prądu stojana. Pomimo tego, że zmiany są niewielkie, skutkują one wzrostem strat w uzwojeniach silnika, co przedstawiono na rysunku 8. Z obu wykresów wynika, że najwięcej strat powstaje wskutek najniższych harmonicznych. Wynika to głównie z faktu, że wartości dopuszczalne udziałów harmonicznych napięcia maleją wraz ze wzrostem rzędu harmonicznej. Ponieważ zwykle pojawia się więcej niż jedna harmoniczna, przebadano wpływ



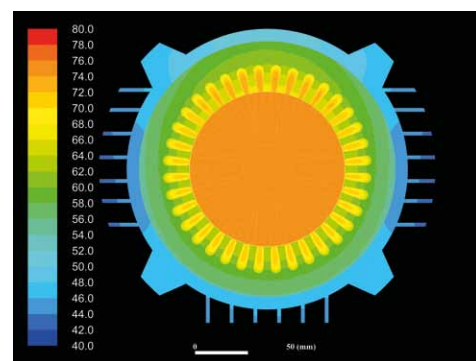
Rys. 8. Wpływ wyższych harmonicznych napięcia na straty w uzwojeniach stojana



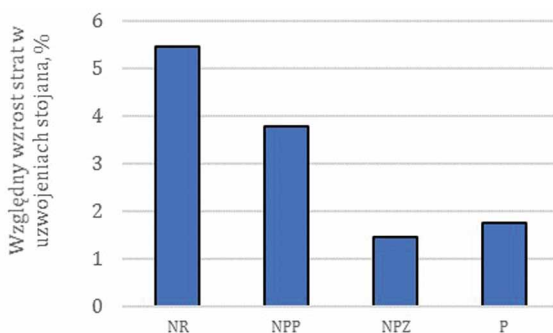
Rys. 11. Przebiegi napięcia odkształconego fazowego i międzyfazowego dla przypadku harmonicznych najniższych rzędów



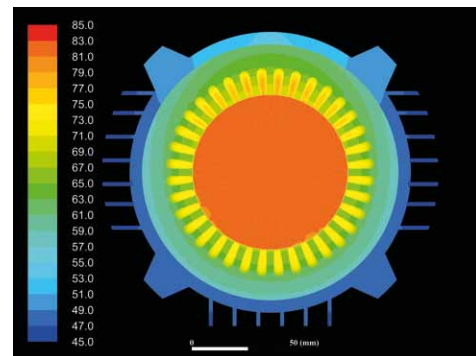
Rys. 9. Wpływ wielu harmonicznych na straty w wirniku



Rys. 12. Rozkład temperatury silnika zasilanego napięciem sinusoidalnym



Rys. 10. Wpływ wielu harmonicznych na straty w uzwojeniach stojana



Rys. 13. Rozkład temperatury silnika zasilanego napięciem odkształconym

wielu harmonicznych na temperaturę pracy silnika z zachowaniem warunku  $THD \leq 10\%$ .

Wobec mnogości doboru poszczególnych harmonicznych obliczenia przeprowadzono dla kilku wybranych przypadków:

- harmoniczne parzyste (P);
- harmoniczne nieparzyste o kolejności składowej przeciwnej (NPP);
- harmoniczne nieparzyste o kolejności składowej zgodnej (NPZ);
- harmoniczne najniższych rzędów (tj. 2, 4, 5, 7) (NR).

Jak wynika z rysunków 9 i 10, najbardziej niekorzystnym przypadkiem jest, gdy w napięciu pojawiają się jednocześnie napięcia kilku najniższych rzędów. Wobec stałości warunków odprowadzania ciepła to w tym przypadku wystąpią ekstremalne przyrosty temperatur. Na rysunkach 12 i 13 przedstawiono rozkład temperatur w stanie zasilania napięciem nieodkształconym i zawierającym wyższe harmoniczne o przebiegu jak na rysunku 11. W tabeli 1 dodatkowo zestawiono kluczowe wyniki obliczeń sprzężonych.



**Tabela 1.** Szczegółowe wyniki obliczeń sprzężonych; temperatury średnie wybranych elementów

	Napięcie sinusoidalne	Napięcie odkształcone
Napięcie, V	400 V	400 V
Prąd, A	3,33	3,46
$P_2$ , W	1900	1900
$P_1$ , W	2217	2243
cosφ	0,94	0,96
Sprawność, %	85,7	84,7
Temperatura żebra, °C	44	46
Temperatura kadłuba, °C	46	49
Temperatura uzwojeń, °C	69 (73 max)	73 (79 max)
Temperatura pakietu, °C	60	64
Temperatura magnesów, °C	76	82



**Rys. 14.** Miejsca zainstalowania termopar wewnątrz maszyny

**Tabela 2.** Weryfikacja eksperymentalna modelu numerycznego modelu sprzężonego

	Wyniki pomiarów	Wyniki obliczeń
Napięcie, V	400	400
Prąd, A	3,43	3,33
$P_2$ , W	1900	1900
$P_1$ , W	2226	2217
cosφ	0,94	0,94
Sprawność, %	85,4	85,7
Temperatura żebra, °C	41	44
Temperatura kadłuba, °C	45	46
Temperatura uzwojeń, °C	70	69 (73 max)
Temperatura pakietu, °C	55	60
Temperatura magnesów, °C	75	76



**Rys. 15.** Miejsca zainstalowania termopar na zewnątrz maszyny

### 3. Weryfikacja eksperymentalna

Wyniki wykonanych obliczeń zweryfikowano na stanowisku pomiarowym wyposażonym w rejestrator sygnałów z termopar typu T zainstalowanych na badanej maszynie (rys. 14, 15). Do zamocowania czujników wykorzystano dwuskładnikowy klej epoksydowy wymieszany z pyłem miedzianym. Takie rozwiązanie pozwala na zwiększenie przewodności cieplnej spoiwa i zmniejszenie błędu systematycznego.

Temperatury mierzono w czasie pracy ustalonej silnika przy stałym obciążeniu aż do uzyskania stanu cieplnie ustalonego wewnątrz maszyny. Tak uzyskane wyniki pomiarów zebrano w tabeli 2. Uzyskane wyniki potwierdzają skuteczność zastosowanego modelu w celu wyznaczenia temperatury pracy maszyny.

### 4. Podsumowanie


Odkształcenia napięcia zasilającego negatywnie wpływają na pracę silnika synchronicznego z magnesami trwałymi. Przeprowadzone badania pokazują, że należy się w takim przypadku liczyć ze zwiększonymi stratami w uzwojeniach stojana i klatce wirnika, które prowadzą w ekstremalnym przypadku do obniżenia sprawności nawet o 1 punkt procentowy. Skutkiem wyższych strat jest podwyższenie się temperatury pracy maszyny o 3–6 stopni Celsjusza, co negatywnie wpływa na trwałość izolacji, w przypadku gdy silnik zasilany jest bezpośrednio z sieci. Analogiczna analiza może się okazać przydatna szczególnie w przypadku projektowania napędu zasilanego z przekształtników energoelektronicznych, gdzie z zasady działania wynika zasilanie napięciem odkształconym.

## Literatura

- [1] ZAWILAK J., ZAWILAK T.: *Energooszczędne silniki synchroniczne z magnesami trwałymi*. „Napędy i Sterowanie” 2/2014.
- [2] ZAWILAK J., ZAWILAK T.: *Energooszczędne silniki synchroniczne dużej mocy wzbudzone magnesami trwałymi*. „Przegląd Elektrotechniczny” 10/2015.
- [3] KISIELEWSKI P., PACHOLSKI E., LEŚNIK M., ZAWILAK T., ZAWILAK J., ŻELEŹNIK M.: *Konstrukcja, wykonanie i próby typoszeru prototypów dużych silników synchronicznych z magnesami trwałymi*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 3/2016.
- [4] CHING-YIN LEE, WEI-JEN LEE, YEN-NIEN WANG, JYH-CHERNG GU: *Effects of voltage harmonics on the electrical and mechanical performance of a three-phase induction motor*. 1998 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, Cat. No. 98CH36202, pp. 88–94.
- [5] CUMMINGS P.G.: *Estimating Effect of System Harmonics on Losses and Temperature Rise of Squirrel-Cage Motors*. IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. IA-22, NO. 6, pp. 1121–1126, 1986.
- [6] *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-2: Environment – Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems*. IEC 61000-2-2:2002.
- [7] *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-4: Environment – Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances*. IEC 61000-2-4:2002.
- [8] LIN E., HU X.: *Understanding temperature-dependent demagnetization*. „Ansys Advantage” Volume VI, Issue 3, 2012.
- [9] COOK J.G., MOORE J.P., MATSUMURA T., VAN DER MEER M.P.: *The Thermal and Electrical Conductivity of Aluminum*. KLEMENS P.G., CHU T.K., *Thermal Conductivity 14*, Springer Science+Business Media, New York, 1976.
- [10] MATULA R.A.: *Electrical Resistivity of Copper, Gold, Palladium and Silver*. „The Journal of Physical Chemistry” Vol. 8, No. 4, 1979.

## Informacje dodatkowe

Obliczenia wykonano przy użyciu zasobów udostępnionych przez Wrocławskie Centrum Sieciowo-Superkomputerowe (<http://wcss.pl>), grant obliczeniowy Nr 390.

 mgr inż. Szymon Lipiński – Politechnika Wroclawska  
dr hab. inż. Jan Zawilak, prof. PWr. – Politechnika Wroclawska

artykuł recenzowany