

Szymon Lipiński, Jan Zawilak
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

WPLYW ODKSZTAŁCEŃ NAPIĘCIA W SIECI ZASILAJĄCEJ NA ROZKŁAD TEMPERATURY SILNIKA SYNCHRONICZNEGO WZBUDZONEGO MAGNESAMI TRWAŁYMI

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

Streszczenie: Silniki synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim są coraz częściej stosowane w miejsce silników indukcyjnych. Wobec tego muszą być odporne na podobne narażenia jak maszyny asynchroniczne. Jednym z takich narażeń jest praca przy zasilaniu napięciem odkształconym. Dotychczasowe prace dotyczące wpływu odkształceń napięcia zasilającego na silniki indukcyjne pokazują, że wyższe harmoniczne powodują wzrost temperatur w maszynie. Ze względu na zbliżoną konstrukcję, podobne 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 tego typu o mocy 1900 W oraz napięciu 400 V. Rozpatrywano przy tym pracę ustaloną silnika ze stałym obciążeniem i do obliczeń wykorzystano model numeryczny sprzęgający dwukierunkowo pole elektromagnetyczne i cieplne.

Abstract: Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors (LSPMSM) are increasingly used in preference to induction motors. Therefore they have to be resistant to the same exposures like asynchronous motors. One of such exposure 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. By virtue of similarity in 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. Two-way coupled electromagnetic and thermal model was utilized in numerical analysis.

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

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

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 od sinusoidalnego. W przypadku silników indukcyjnych praca przy odkształconym napięciu zasilającym powoduje zmniejszenie sprawności, zwiększenie temperatury pracy i wzrost wibracji wirnika [4, 5]. Ze względu na podobieństwa konstrukcyjne przewiduje się, że udział wyższych harmonicznych będzie miał podobny wpływ na straty, a zatem i na rozkład temperatury

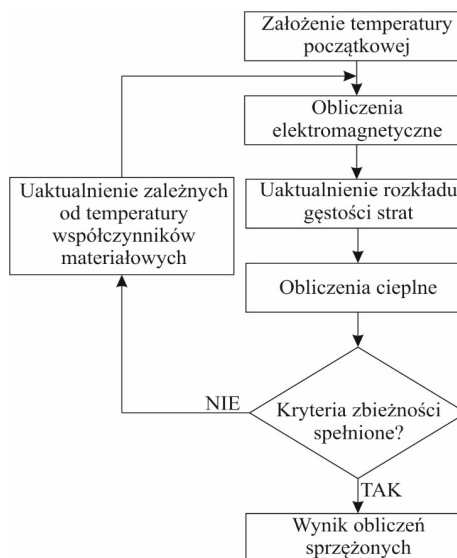
w maszynie synchronicznej z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim.

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, 8]. W zakresie pracy uwzględniono analizę wpływu każdej harmonicznej (oddzielnie) na straty występujące w maszynie, by określić zależność strat dodatkowych od rzędu harmonicznej. Ponadto rozpatrzono przypadki odkształcenia napięcia, dla których THD jest mniejsze niż 10%. Ma to na celu wyznaczenie wariantu, w którym straty i temperatury w maszynie będą maksymalne. Umożliwia to określenie przybliżonych względnych przyrostów

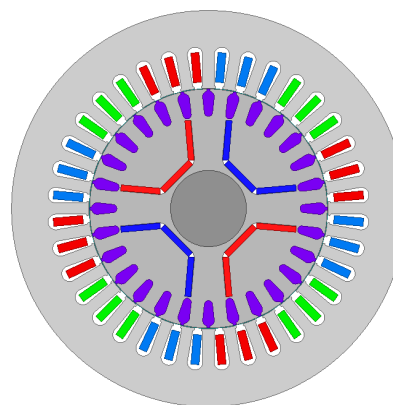
temperatur przy pracy maszyny zasilanej napięciem odkształconym. Analiza taka może okazać się szczególnie przydatna podczas projektowania silników dużej mocy, które najczęściej konstruowane są na indywidualne zamówienie, dla określonych warunków zasilania. Odkształcenie napięcia należy brać pod uwagę szczególnie w napędach pracujących w tej samej sieci co np. napędy przekształtnikowe, piece łukowe, spawarki itp. [4, 7].

2. Model obliczeniowy

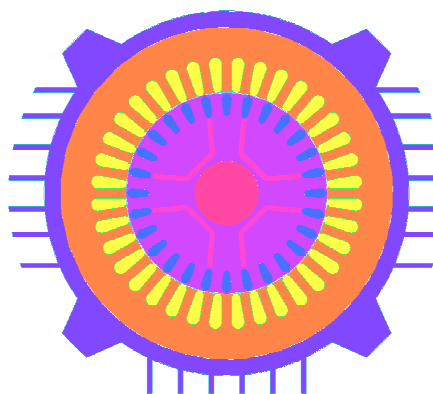
W obliczeniach wykorzystano możliwość dwukierunkowego sprzęgnięcia ze sobą obliczeń elektromagnetycznych i cieplnych. Dzięki temu możliwe jest uwzględnienie wpływu temperatury na właściwości elektromechaniczne silnika wskutek zmian właściwości elementów obwodu elektrycznego i magnetycznego [9, 10, 11]. Ideę algorytmu przedstawiono 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. W modelu elektromagnetycznym kształt uzwojeń nie jest w pełni oddany, ponieważ istotny jest tylko wywoływany przepływ. Przenikalność magnetyczna drutu, izolacji i powietrza jest w przybliżeniu taka sama, wobec czego takie uproszczenie jest dopuszczalne. Geometrię uzwojeń dokładniej przedstawiono w modelu cieplnym, gdzie odwzorowano regiony o różnej przewodności cieplnej. Dodatkowo model uzupełniono o kadłub, który jest zbędny w obliczeniach elektromagnetycznych. Następnie przyjęto początkową temperaturę dla poszczególnych elementów maszyny i rozpoczęto obliczenia modelu elektromagnetycznego. Temperatury początkowe przyjmuje się arbitralnie, jednak nie mają one wpływu na ostateczny wynik. Odpowiedni dobór pozwala 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°C osiągnięte jest już po trzech przebiegach. Zatem wymagana ilość iteracji powinna w większości przypadków wynosić od 3 do 5. Wynikiem obliczeń elektromagnetycznych jest rozkład strat w maszynie, który jest przenoszony do modelu cieplnego, gdzie jest to rozkład źródeł ciepła.



Rys. 1. Algorytm obliczeń sprzężonych

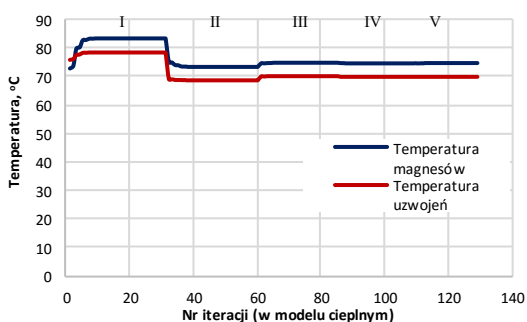


Rys. 2. Model elektromagnetyczny



Rys. 3. Model cieplny

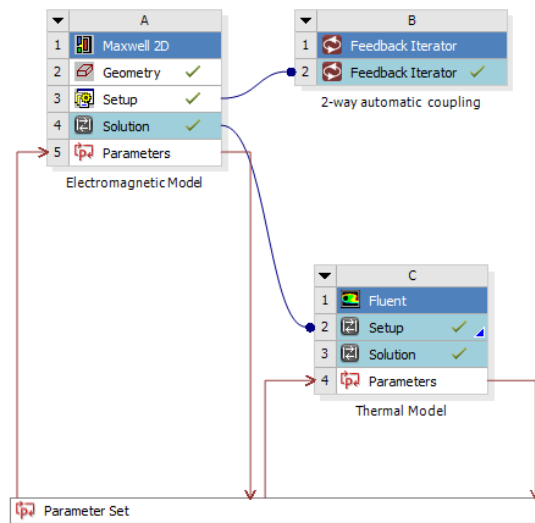
Po zakończeniu obliczeń cieplnych uzyskuje się nowy rozkład temperatury, który porównywany jest z poprzednimi obliczeniami. Jeśli kryteria zbieżności zostały osiągnięte lub wykonano zadaną liczbę iteracji obliczenia są zakończone. Wynikiem obliczeń są napięcia i prądy silnika przy danym obciążeniu uwzględniające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



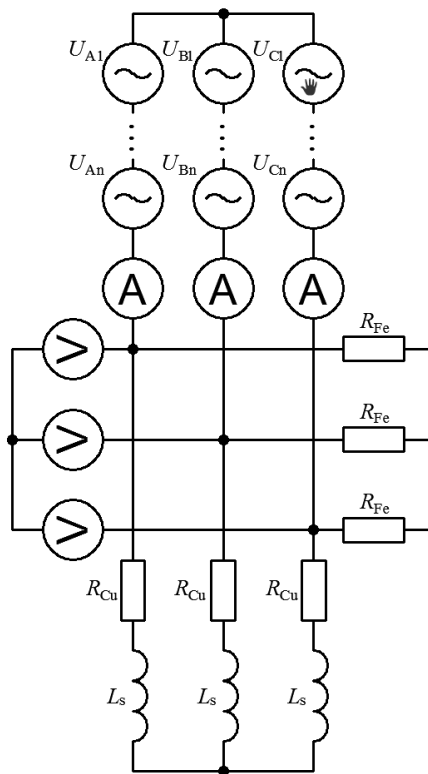
Rys. 4. Zbieżność obliczeń modelu sprzężonego, cyframi rzymskimi oznaczono nr przejścia pętli z rysunku 1

W praktyce połączenie takie zostało zrealizowane w środowisku Ansys Workbench 17.1 oraz 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, szczególnie rezystancji uzwojeń. Wobec tego proces zbieżności należy powtarzać kilkakrotnie dla kolejnych wartości rezystancji uzwojeń, aż 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 model ten jest wystarczający do określenia temperatury magnesów, co jest istotne ze względu na demagnetyzację.

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 L_s indukcyjności połączeń czołowych oraz sprzęgnięcie modelu polowego i obwodowego. Aby dostatecznie dokładnie odwzorować przebiegi wyższych częstotliwości konieczne było zmniejszenie kroku czasowego obliczeń do 0.05 ms.



Rys. 5. Realizacja modelu sprzężonego w środowisku Workbench

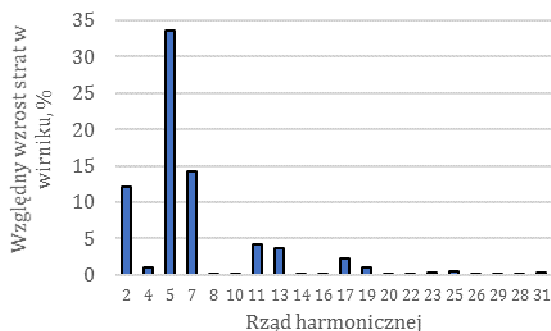


Rys. 6. Model obwodowy

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. W rozpatrywanym przypadku obliczone straty są rzędu pojedynczych 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 uznać praktycznie, że za wzrost strat w wirniku w całości odpowiadają prądy wyższych harmonicznych wyindukowanych w klatce. Dla harmonicznych rzędu powyżej 20 wzrost strat jest nieznaczny, powyżej 30-tej harmonicznej jest pomijalnie mały.

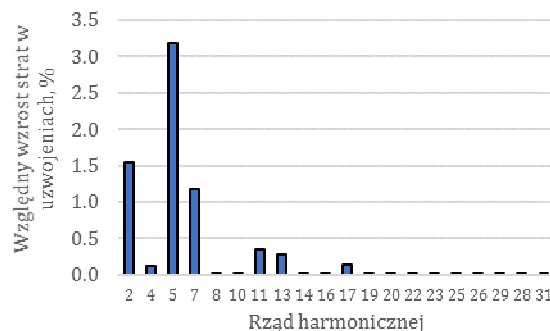


Rys. 7. Wpływ wyższych harmonicznych napięcia na straty w wirniku

Przepływ wyższych harmonicznych powoduje wzrost prądu stojana. Mimo iż zmiany te są niewielkie skutkują one wzrostem strat w uzwojeniach silnika, co pokazano na rysunku 8. Z obu wykresów wynika, że najwięcej strat powodują harmoniczne najniższych rzędów. Wynika to głównie z faktu, że wartości dopuszczalne maleją wraz ze wzrostem rzędu harmonicznej. Ponieważ w praktyce zwykle pojawia się więcej niż jedna harmoniczna, przebadano również wpływ wielu harmonicznych na temperaturę pracy silnika z zachowaniem warunku $THD \leq 10\%$.

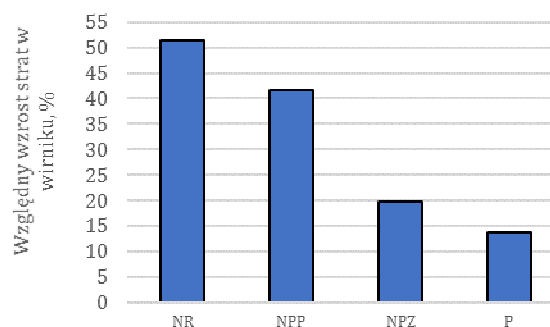
Wobec mnogości doboru poszczególnych harmonicznych obliczenia przeprowadzono dla kilku wybranych przypadków:

- 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).

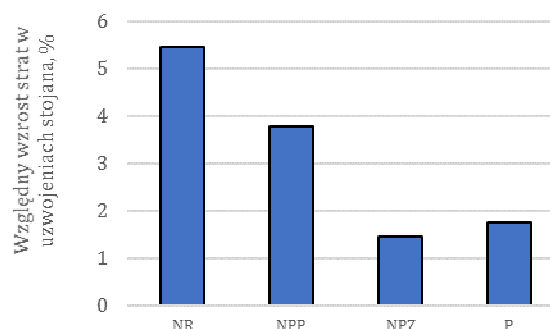


Rys. 8. Wpływ wyższych harmonicznych napięcia na straty w uzwojeniach stojana

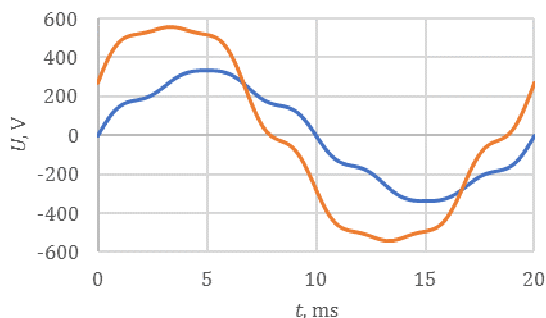
Jak wynika z wyników pokazanych na rysunkach 9 i 10 najbardziej niekorzystnym przypadkiem jest, gdy w napięciu pojawiają się jednocześnie napięcia kilku najniższych rzędów. W tym przypadku, wobec stałości warunków odprowadzania ciepła, wystąpią ekstremalne przyrosty temperatur. Na rysunkach 12 i 13 pokazano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



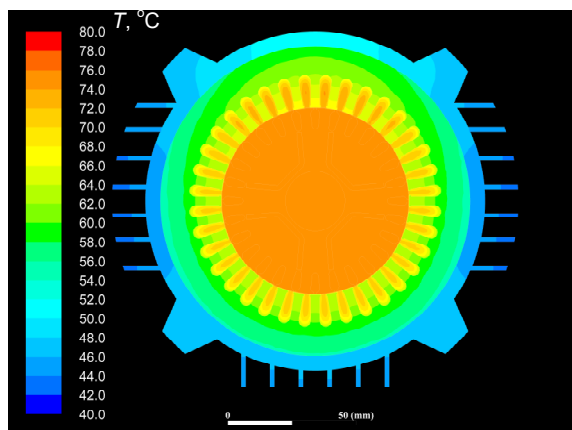
Rys. 9. Wpływ wielu harmonicznych na straty w wirniku



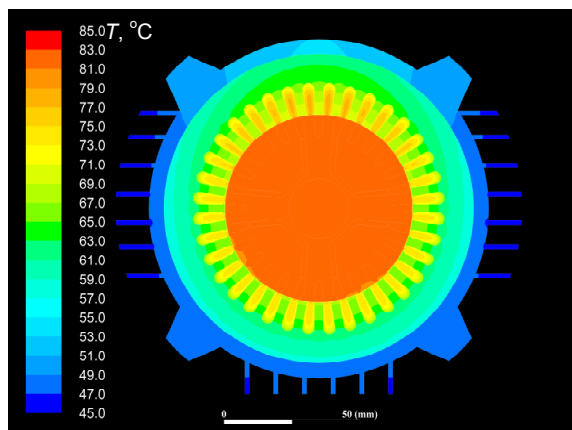
Rys. 10. Wpływ wielu harmonicznych na straty w uzwojeniach stojana



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



Rys. 12. Obliczony rozkład temperatury silnika zasilanego napięciem sinusoidalnym



Rys. 13. Obliczony rozkład temperatury silnika zasilanego napięciem odkształconym

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
$\cos\phi$	--	0.94	0.96

sprawność	%	85.7	84.7
temp. żebra	°C	44	46
temp. kadłuba	°C	46	49
temp. uzwojeń	°C	69 (73 max)	73 (79 max)
temp. pakietu	°C	60	64
temp. magnesów	°C	76	82

4. Weryfikacja eksperymentalna

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



Rys. 14. Miejsce zainstalowania termopar wewnątrz maszyny

Temperatury mierzono w czasie pracy ustalonej silnika przy stałym obciążeniu aż do uzyskania stanu cieplnie ustalonego wewnątrz maszyny. Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 2. Na podstawie porównania wyników obliczeń i pomiarów wykonanych na modelu fizycznym można potwierdzić skuteczność zastosowanego modelu obliczeniowego do wyznaczenia temperatury pracy maszyny.

Tabela 2. Zestawienie wyników obliczeń i pomiarów temperatur badanego modelu silnika

	jedn.	wyniki pomiarów	wyniki obliczeń
napięcie	V	400	400
prąd	A	3.43	3.33
P_2	W	1900	1900
P_1	W	2226	2217

$\cos\phi$	--	0.94	0.94
sprawność	%	85.4	85.7
temp. żebra	°C	41	44
temp. kadłuba	°C	45	46
temp. uzwojeń	°C	70	69 (73 max)
temp. pakietu	°C	55	60
temperatura magnesów	°C	75	76

5. Podsumowanie

Odształcenie napięcia zasilającego ma negatywny wpływ na pracę silnika synchronicznego z magnesami trwałymi. Wyniki wykonanych badań pokazują, że w takim przypadku należy liczyć się ze zwiększonymi stratami, które prowadzą w ekstremalnym przypadku do zmniejszenia sprawności nawet o 1 punkt procentowy. Dodatkowym negatywnym skutkiem jest zwiększenie temperatury pracy maszyny o 3 – 6 stopni Celsjusza. Podobne obliczenia mogą być przydatne w przypadku projektowania silników zasilanych z przekształtników energoelektronicznych, które powodują zniekształcenie napięcia zasilającego.

6. Literatura

- [1]. J. Zawilak, T. Zawilak „Energoozczędne silniki synchroniczne z magnesami trwałymi”, Napędy i Sterowanie, Nr 2, luty 2014, str. 102 – 105, 2014.
- [2]. J. Zawilak, T. Zawilak „Energoozczędne silniki synchroniczne dużej mocy wzbudzone magnesami trwałymi”, Przegląd Elektrotechniczny, R.91 NR 10/2015, str. 117 - 120.
- [3]. P. Kisielewski, E. Pacholski, M. Leśnik, T. Zawilak, J. Zawilak, M. Żeleźnik „Konstrukcja, wykonanie i próby typoszeregu prototypów dużych silników synchronicznych z magnesami trwałymi”, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, Nr 3/2016 (111), str. 191 – 195, 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, str. 88 - 94, 1998.

[5]. P. G. Cummings „Estimating Effect of System Harmonics on Losses and Temperature Rise of Squirrel-Cage Motors”, IEEE Transactions on Industry Applications, VOL. IA-22, NO. 6, str. 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]. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-12: Environment – Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public medium-voltage power supply systems, IEC 61000-2-12:2003.

[9]. E. Lin, X. Hu „Understanding temperature-dependent demagnetization”, Ansys Advantage, Volume VI, Issue 3, str. 56-57, 2012.

[10]. J.G. Cook, J.P. Moore, T. Matsumura, M.P. van der Meer „The Thermal and Electrical Conductivity of Aluminum”, P.G. Klemens, T.K. Chu, Thermal Conductivity 14, Springer Science+Business Media, New York, 1976.

[11]. R.A. Matula, „Electrical Resistivity of Copper, Gold, Palladium and Silver”, The Journal of Physical Chemistry, Vol. 8, No. 4, 1979.

Autorzy

Szymon Lipiński, Jan Zawilak
 Politechnika Wrocławska
 Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
 ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław
 szymon.lipinski@pwr.edu.pl
 jan.zawilak@pwr.edu.pl

Informacje dodatkowe

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