

doi:10.15199/48.2018.04.16

Model generatora nadprzewodnikowego

Streszczenie. Artykuł przedstawia koncepcję budowy modelu generatora nadprzewodnikowego HTS na bazie elementów silnika indukcyjnego. W obliczeniach został uwzględniony wpływ ułożenia magnesów neodymowych zamocowanych na wirniku, na kształt generowanego napięcia. Model obliczeniowy uwzględnia ponadto nieliniowe zmiany własności materiałów z jakich wykonana jest taśma nadprzewodnikowa w funkcji temperatury. Są to: rezystywność, przewodność cieplna, współczynnik wymiany ciepła z otoczeniem i wartość prądu krytycznego.

Abstract. The article presents the concept of building a model of a superconducting HTS generator based on induction motor elements. The permanent neodymium magnets location was optimized due to the shape of waveform of generated voltage. Simulation of the generator cooling was performed. (Model of superconducting generator).

Słowa kluczowe: generator nadprzewodnikowy, modelowanie FEM, taśmy nadprzewodnikowe HTS, magnesy neodymowe.

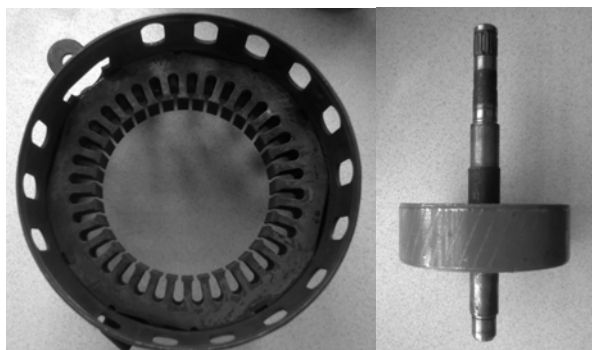
Keywords: superconducting HTS generator; FEM modelling; HTS tapes; permanent neodymium magnets.

Wstęp

Nowoczesne urządzenia nadprzewodnikowe posiadają wiele części zbudowanych z nadprzewodników wysokotemperaturowych. Właściwości fizyczne nadprzewodników bardzo mocno zależą od temperatury, natężenia pola magnetycznego oraz prądu przepływającego przez nadprzewodnik. Przekroczenie którejkolwiek z tych wartości powoduje powstanie strefy rezystywnej w nadprzewodniku i w efekcie końcowym wyjście ze stanu nadprzewodzenia.

Pomimo tego na świecie podejmowane są próby budowy wirujących maszyn elektrycznych wykorzystujących nadprzewodniki jako materiał uzwojeń. Do tej pory maszyny te były projektowane i budowane na duże moce. Przykładem tego mogą być generatory LTS (Low Temperature Superconductor) na moce 20 i 70 MVA, czy też HTS (High Temperature Superconductor) o mocy 50 MVA [1]. Jednakże obecne trendy dążące zarówno do miniaturyzacji jak i zastosowań urządzeń nadprzewodnikowych w nowych obszarach narzucają budowę urządzeń mniejszych mocy. Przykładem może być projekt TELOS hybrydowego samolotu elektrycznego [3] oraz projekty innych elektrycznych statków powietrznych [4-6]. Zapotrzebowanie na energię elektryczną w takim samolocie waha się w granicach od 1 do 10 MVA.

W artykule została przedstawiona koncepcja budowy generatora nadprzewodnikowego HTS z magnesami neodymowymi zamontowanymi na wirniku powstałego na bazie silnika 36-ścio żłobkowego (Rys. 1).



Rys. 1. Stojan i wirnik silnika 36-ścio żłobkowego

Model generatora nadprzewodnikowego

Generator zostanie wykonany z elementów silnika elektrycznego 36-ścio żłobkowego, którego uzwojenia

miedziane zostaną usunięte i zastąpione nadprzewodnikiem HTS, a na wirniku zostaną zamontowane magnesy neodymowe. W celu weryfikacji założeń budowy generatora została przeprowadzona symulacja komputerowa pracy generatora nadprzewodnikowego przy wykorzystaniu programu FEMM 4.2 (Finite Element Method Magnetics).

W celu wykonania symulacji został odwzorowany model geometryczny generatora. Wymiary stojana i wirnika są rzeczywistymi wymiarami elementów silnika. Bieguny magnetyczne zostaną wykonane z magnesów neodymowych umocowanych na powierzchni wirnika.

Na wirniku zostanie umieszczonych 8 magnesów neodymowych co pozwoli na uzyskanie napięcia o częstotliwości 50 Hz przy 750 obrotach na minutę wirnika generatora. Szerokość magnesów została obliczona z (1) co pozwoli na uzyskanie kształtu sinusoidalnego generowanego napięcia [7]:

$$(1) \quad \tau = (\pi * D) / 2p$$

gdzie: D – promień wirnika razem z szerokością szczeliny powietrznej; $2p$ – liczba biegunów; τ – szerokość rzutu bieguna na stojan.

W przypadku maszyn elektrycznych o małych wymiarach szerokość rzutu bieguna na stojan jest w przybliżeniu równa szerokości bieguna.

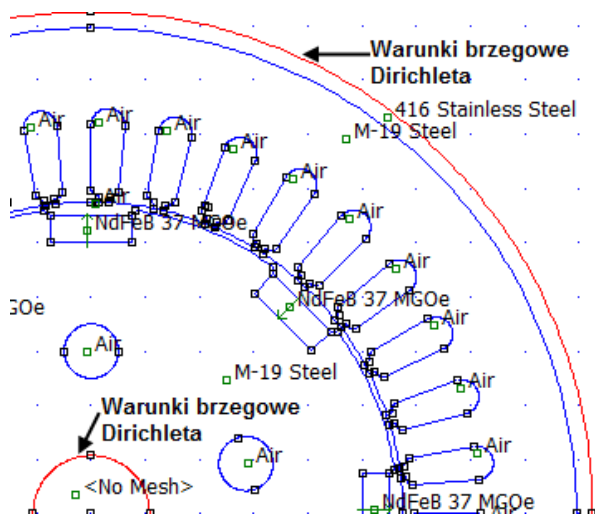
Dla wymiarów silnika na podstawie (1) zostały wykonane obliczenia, szerokość bieguna (magnesu) powinna się wahać od 12,41 mm do 15,80 mm (od $0,55\tau$ do $0,7\tau$) [7]. Na podstawie uzyskanych wyników zostały wybrane magnesy płytkowe wymiarach: długość 40 mm – wynika z wysokości wirnika, szerokość 15 mm – obliczona z (1), grubość 5 mm. Magnesy o takich wymiarach są powszechnie dostępne na rynku.

Drugim parametrem, który wpływa na kształt przebiegu jest kształt nabiegunnika, którego nie można zmienić, ponieważ magnesom nie uda się zmienić kształtu. Wobec tego magnesy umocowane na wirniku będą odchylane od osi wirnika o kąt α w celu uzyskania kształtu zbliżonego do sinusoidalnego generowanego napięcia.

Model obliczeniowy

Pierwszym etapem budowy modelu generatora wykorzystującego uzwojenie nadprzewodnikowe i magnesy trwałie było opracowanie modelu numerycznego 2D w symetrii osiowej (Rys. 2). Model numeryczny wiążący zarówno pole elektromagnetyczne, zależności

temperaturowe jak i obwód elektryczny pozwolił na wstępną ocenę pracy generatora jak i też wymagane zmiany w konstrukcji stojana i wirnika niezbędne do otrzymania pożądanego kształtu generowanego napięcia.

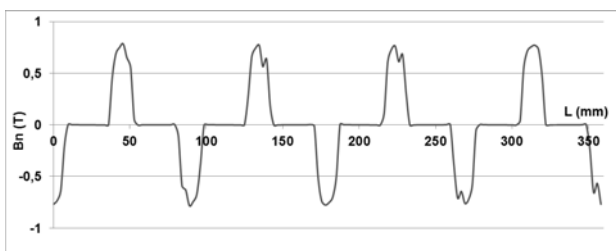


Rys.2. Zdefiniowanie materiałów i warunków brzegowych dla zagadnienia elektromagnetycznego

Budowę modelu numerycznego rozpoczęto od analizy pola elektromagnetycznego projektowanego generatora oraz ułożenia magnesów neodymowych i wpływu ich położenia na kształt generowanego napięcia.

Po odwzorowaniu modelu geometrycznego generatora w środowisku FEMM 4.2 zostały określone materiały i warunki brzegowe. Wzdłuż konturu zewnętrznego stojana generatora i konturu osi wirnika, zdefiniowane zostały warunki brzegowe Dirichleta, które zakładają, że pole magnetyczne nie wychodzi poza obszar generatora i nie wnika w oś wirnika, ma to na celu ograniczenie obszaru obliczeniowego modelowanego generatora (Rys. 2).

Wymuszenie magnesów neodymowych jest stałe, stal krzemowa M-19 opisana jest charakterystyką nieliniową – krzywą pierwotną magnesowania. W celu weryfikacji poprawności mocowania magnesów i kierunku magnesowania została przeprowadzona analiza rozkładu składowej normalnej indukcji wzdłuż środka szczeliny powietrznej, bez obrotu wirnika, kąt odchylenia magnesów od osi wirnika wynosił 0° (Rys. 3).



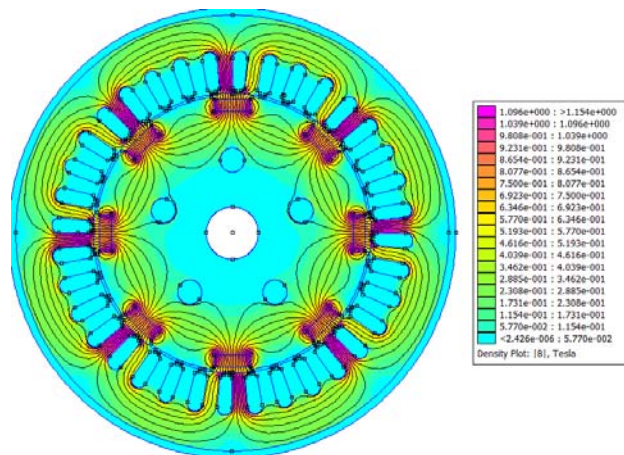
Rys.3. Rozkład indukcji składowej normalnej, bez obrotu wirnika, kąt odchylenia magnesów od osi wirnika 0°

Wykonanie analizy w programie FEMM umożliwiło wygenerowanie mapy rozkładu indukcji magnetycznej i linii pola co zostało przedstawione na rysunku 4. Wirnik generatora nie wykonywał obrotów, kąt odchylenia magnesów od osi wirnika wynosił 0°.

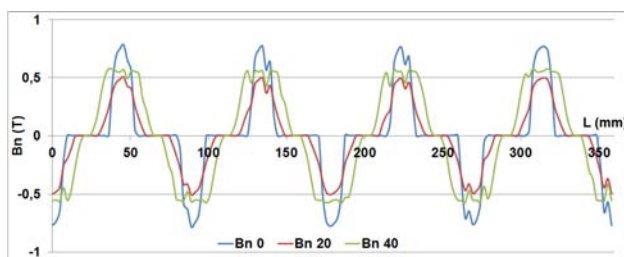
Przeprowadzone zostały symulacje w zakresie zmiany kąta odchylenia magnesu w zakresie od 0° do 45°.

Pozwoliło to na zbadanie wpływu kąta odchylenia magnesu na rozkład indukcji magnetycznej składowej normalnej wzdłuż środka szczeliny powietrznej (Rys. 5)

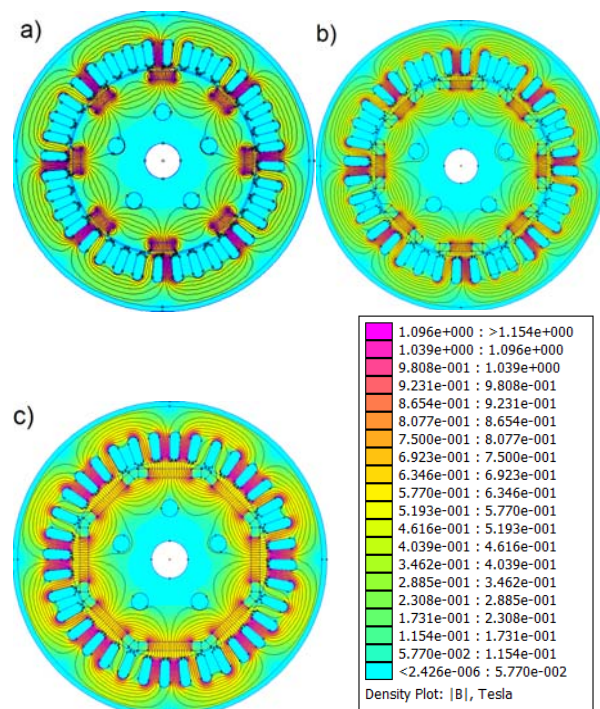
oraz rozkładu indukcji i linii pola w modelu (Rys. 6). Na tym etapie modelowania symulacja nie uwzględniała obrotu wirnika.



Rys.4. Mapa rozkładu indukcji magnetycznej i linii pola w modelu, bez obrotu wirnika, kąt odchylenia magnesów od osi wirnika 0°



Rys.5. Rozkład indukcji składowej normalnej, bez obrotu wirnika, dla kątów odchylenia magnesów od osi wirnika 0°, 20° i 40°

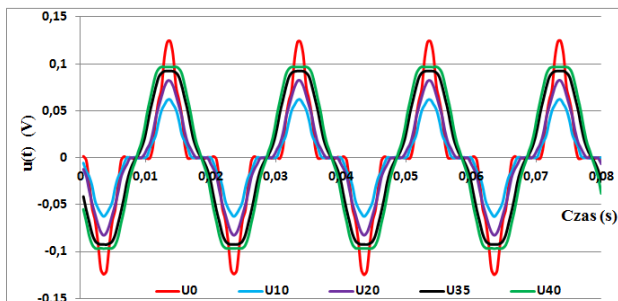


Rys.6. Mapa rozkładu indukcji magnetycznej i linii pola w modelu, bez obrotu wirnika, kąt odchylenia magnesów od osi wirnika: a) 0°, b) 20° i c) 40°

Dzięki zastosowaniu języka skryptowego LUA zamodelowany został ruch obrotowy wirnika, co umożliwiło symulację pracy generatora [8,9]. Celem symulacji było

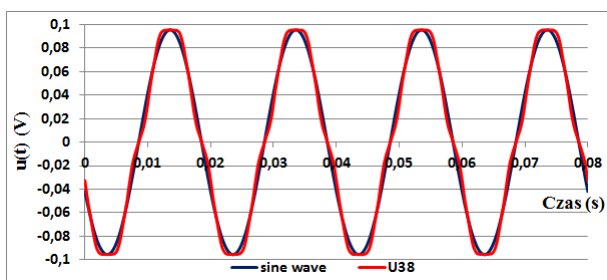
wybranie jak najlepszego kąta odchylenia magnesu od osi wirnika. Kryterium wyboru odpowiedniego kąta było uzyskanie przebiegu generowanego napięcia jak najbardziej zbliżonego do przebiegu sinusoidalnego.

Wygenerowane zostały przebiegi napięcia dla kątów od 0° do 25° z dokładnością co 5°, w zakresie kątów od 25° do 45° z dokładnością co 1°. Przykładowe przebiegi wygenerowanego napięcia zostały przedstawione na rysunku 7.



Rys.7. Przebiegi generowanego napięcia dla przykładowych kątów odchylenia magnesu od osi wirnika (0°, 10°, 20°, 35°, 40°)

W celu porównania podobieństwa wygenerowanego napięcia do przebiegu sinusoidalnego została obliczona powierzchnia pola pod wykresem i porównana z polem powierzchni przebiegu sinusoidalnego o takiej samej wartości maksymalnej amplitudy. Najlepszy wynik został uzyskany dla kąta odchylenia magnesu wynoszącego 38°. Podobieństwo krzywych dla tego przypadku zostało przedstawione na rysunku 8 i wynosiło 99%.



Rys.8. Porównanie przebiegu napięcia generowanego przy odchyleniu magnesu o 38° i przebiegu sinusoidalnego o takiej samej maksymalnej wartości amplitudy

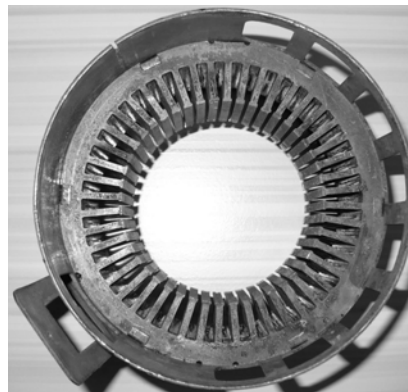
Chłodzenie generatora nadprzewodnikowego

Dla modelu generatora zbudowanego na bazie nadprzewodników HTS założono, że całość urządzenia będzie pracować w kąpeli ciekłego azotu. Przeprowadzono wstępne testy eksperymentalne pracy łożysk kulkowych w kąpeli LN₂. Okazało się, że łożyska ze smarem wewnątrz nie są w stanie zapewnić poprawnej pracy, ze względu na zbrzylenie się smaru, co powoduje brak możliwości płynnego obracania wirnika. Natomiast łożyska bez smaru (wyplukane w benzynie ekstrakcyjnej) spełniają poprawnie swoje zadanie. Dodatkowo chłodzenie azotem sprawia, że łożyska nie nagrzewają się i nie prowadzi to do zatrzymania wirnika.

Warunki chłodzenia w kąpeli cieczy kriogenicznej jaką jest ciekły azot LN₂ zostały odzwierciedlone w modelu w postaci zmiennej wartości strumienia ciepła odbieranego z powierzchni styku z ciekłym azotem [10]. Nieliniowa zależność wartości strumienia od różnicy temperatur została uwzględniona za pomocą kodu powstałego w języku LUA [8].

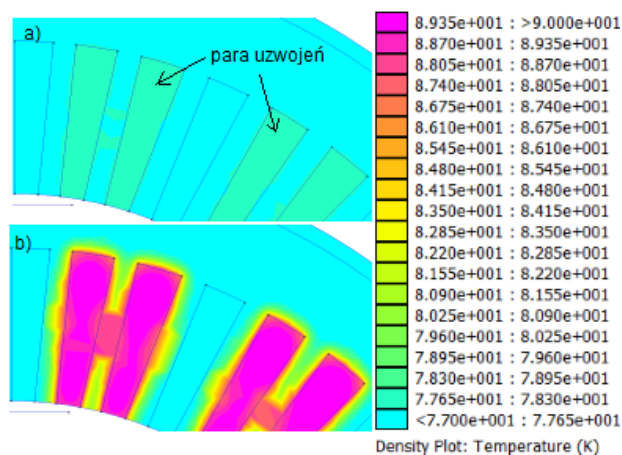
Nowe warunki brzegowe ustalone są dla każdego kroku obliczeń. Na zewnętrznej krawędzi stojana założono stałą

temperaturę równą 77K. W miejscu zestyku taśmy HTS i żłobków założono, że ciepło będzie się rozchodzić poprzez przewodzenie. W modelu powiązane zostało zagadnienie przepływu prądu z zagadnieniem rozkładu pola temperatur [8]. Właściwości fizyczne poszczególnych elementów generatora takie jak: konduktywności cieplne i rezystywności były nieliniowymi funkcjami temperatury. Na tym etapie badań brano pod uwagę również wykorzystanie stojana z 48 żłobkami przedstawionego na rys. 9.



Rys.9. Stojan modelu generatora z 48 żłobkami

Zamodelowano rozptył pola temperatury dla najgorszego przypadku pracy generatora, czyli wystąpienia zjawiska quenchu taśmy HTS i wydzielania się ciepła Joule'a w uzwojeniach generatora przy prądzie krytycznym taśmy. Założono, że w generatorze umieszczona będzie taśma SCS4050 produkcji SuperPower, której wartość krytyczna prądu jest równa $I_c=80A$. Rozkłady pola temperatur dla czasu $t_0=0$ ms oraz $t_k=140$ ms, przy założeniu że uzwojenia umieszczone są parami w co 3 żłobku w przypadku stojana 48-mio żłobkowego (Rys. 10) i w co 6 żłobku w przypadku stojana 36-cio żłobkowego zostały przedstawione na rysunku 11.

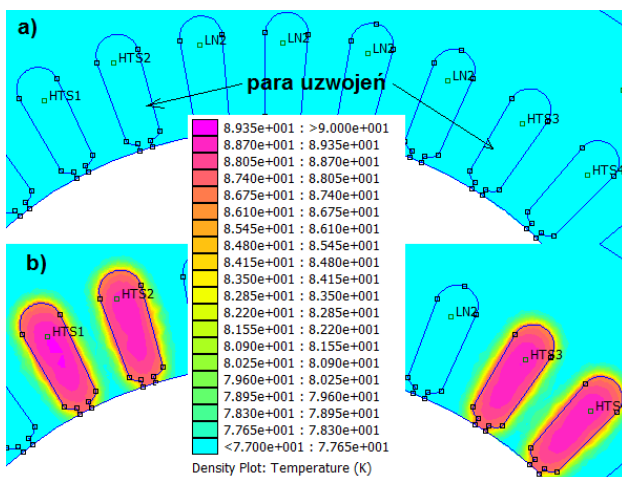


Rys.10. Rozkład temperatury w uzwojeniach i ich otoczeniu dla wybranych czasów $t_0=0$ ms (a) oraz $t_k=140$ ms (b) dla stojana 48-mio żłobkowego

Z rozkładu temperatury przedstawionego na rysunku 10 można zauważyć, że pomiędzy kolejnymi uzwojeniami tworzą się obszary o temperaturze zbliżonej do temperatury uzwojeń.

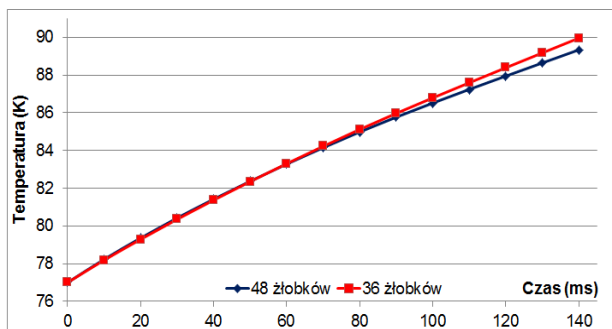
Można zauważyć, że model generatora wykazuje w takich warunkach chłodzenia dobre parametry dla dwóch typów stojanów (48-mio żłobkowego i 36-cio żłobkowego). Temperatura uzwojeń nie przyrasta w sposób gwałtowny i po czasie 140 ms osiąga wartość bliską 90 K. Jest to taka

wartość temperatury, która dla taśmy nadprzewodnikowej wykonanej na bazie nadprzewodnika YBCO jest bliska wartości temperatury krytycznej wynoszącej $T_c=92$ K [11].



Rys.11. Rozkład temperatury w uzwojeniach i ich otoczeniu dla wybranych czasów $t_0=0$ ms (a) oraz $t_k=140$ ms (b) dla stojana 36-cio żłobkowego

Dodatkowo wyznaczono również zmianę temperatury w uzwojeniu generatora dla stanu przejściowego, który wystąpił po pojawieniu się zakłócenia w czasie od $t_0=0$ ms do $t_k=140$ ms dla dwóch typów stojanów (Rys. 12).



Rys.12. Zmiana temperatury uzwojeniu generatora po wystąpieniu zakłócenia w generatorze dla stojana 48-mio żłobkowego i 36-cio żłobkowego

Na podstawie przeprowadzonych symulacji możemy zauważyć, że temperatura w uzwojeniu po wystąpieniu zakłócenia nie przyrasta w sposób gwałtowny dla obydwu typów stojanów. Po czasie 140 ms dla stojana 48-mio żłobkowego osiąga wartość 89,34 K, zaś dla stojana 36-cio żłobkowego temperatura wynosi 89,96 K. W przypadku stojana 36-cio żłobkowego nie tworzą się obszary pomiędzy sąsiednimi uzwojeniami o temperaturze zbliżonej do temperatury uzwojeń, jak ma to miejsce dla stojana 48-mio żłobkowego. Wynika to z grubości materiału pomiędzy żłobkami stojanów. Dla stojana 48-mio żłobkowego grubość ta wynosi 3mm, dla stojana 36-cio żłobkowego wynosi 6 mm, co powoduje wolniejszy przepływ ciepła pomiędzy uzwojeniami oraz dodatkowo większa powierzchnia styku z ciekłym azotem powoduje lepsze odprowadzenie ciepła.

Wnioski

W artykule przedstawiono koncepcję budowy generatora nadprzewodnikowego o małych rozmiarach, który mógłby być wykorzystany do układów zasilania samolotów lub zasobników ECM (electronic countermeasures).

Jednym z głównych zadań przy budowie modelu generatora nadprzewodnikowego jest poprawne zaprojektowanie rozmieszczenia neodymowych magnesów trwałych na wirniku, co spowoduje, że generowane napięcie będzie miało kształt zbliżony do sinusoidy. Dzięki modelowi FEMM generatora udało się przeprowadzić optymalizację ułożenia magnesów ze względu na kształt generowanego napięcia. Magnesy zostaną zamontowane na wirniku pod kątem 38° co pozwoli uzyskać przebieg podobny do sinusoidalnego w 99%. Przeprowadzone symulacje numeryczne pola temperatur pozwalają wnioskować, że poprawnie dobrano sposób chłodzenia modelu generatora. Na podstawie symulacji możemy stwierdzić, że w przypadku pojawienia się zakłócenia po czasie 140 ms uzwojenie nadprzewodnikowe nie osiąga temperatury krytycznej. Daje to wystarczający czas na zadziałanie zabezpieczeń w przypadku przekroczenia wartości krytycznej prądu.

Autorzy: dr hab. inż. Dariusz Czerwiński, prof. nadzw., Politechnika Lubelska, Instytut Informatyki, ul. Nadbystrzycka 36B, 20-618 Lublin, e-mail: d.czerwinski@pollub.pl
mgr inż. Mieczysław Pciań, Politechnika Lubelska, Instytut Informatyki, ul. Nadbystrzycka 36B, 20-618 Lublin, e-mail: m.pcian@pollub.pl

LITERATURA

- [1] Janowski T., Kondratowicz-Kucewicz B., Wojtasiewicz G.: Nadprzewodnikowe Maszyny Elektryczne w Napędach Jednostek Pływających, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 83, str. 161-166, 2009
- [2] Sosnowski, J.: Nadprzewodniki wysokotemperaturowe w maszynach elektrycznych, Nowa Elektrotechnika, 2005
- [3] Mankbadi R., Campbell C., Dittman E., MacRae J., Ehringer C., Stone A., Lake K., Haskins S.: Design of a Hybrid Electrical Propulsion System, 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 19th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 13t, 2011
- [4] Masson P. J., Ratelle K., Delobel P. A., Lipardi A., Lorin C.: Development of a 3D sizing model for all-superconducting machines for turboelectric aircraft propulsion, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 23, no. 3, June 2013
- [5] Berg F., Palmer J., Miller P., Husband M., Dodds G.: HTS Electrical System for a Distributed Propulsion Aircraft, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 25, no. 3, June 2015
- [6] Berg F., Palmer J., Miller P., Dodds G.: HTS System and Component Targets for a Distributed Aircraft Propulsion System, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 27, no. 4, June 2017
- [7] Jezierski E.: Maszyny synchroniczne, PWT, Warszawa 1951
- [8] Czerwiński D., Badurowicz M.: Rozszerzenie możliwości obliczeniowych środowiska FEMM za pomocą języka LUA, Logistyka nr 6, str. 2922-2928, 2014
- [9] Meeker D.: Finite Element Method Magnetics, Version 4.2, User's Manual, October 25, 2015
- [10] Kozak S.: Numerical model of superconducting fault current limiter, Przegląd Elektrotechniczny, R. LXXX 11, str. 1101-1105, 2014
- [11] SuperPower® 2G HTS Wire Specifications, <http://www.superpower-inc.com>, 2017