

Filip Kutt, Michał Michna, Grzegorz Kostro
 Politechnika Gdańska
 Szymon Racewicz
 Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

WYZNACZANIE PARAMETRÓW MODELU GENERATORA SYNCHRONICZNEGO ZMODYFIKOWANĄ METODĄ SSFR W OPARCIU O SYMULACJE MES Z UWZGLĘDNIENIEM NASYCENIA

SYNCHRONOUS GENERATOR MODEL PARAMETERS ESTIMATION USING SSFR TESTS COMBINED WITH FEM SIMULATIONS TAKING INTO ACCOUNT SATURATION

Streszczenie: W artykule przedstawiono zmodyfikowaną metodę SSFR wyznaczania parametrów modelu generatora synchronicznego z uwzględnieniem nasycenia obwodu magnetycznego. Charakterystyki częstotliwościowe uzyskano na drodze symulacji z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Założono, że stan nasycenia rdzenia generatora może zostać uwzględniony poprzez zmianę wartości względnej przenikalności magnetycznej. W pierwszym etapie symulację wykonano w module magneto statycznym, wyznaczono wartość przenikalności względnej. W drugim etapie do obliczeń wykorzystano moduł AC zadając odpowiednią wartość przenikalności magnetycznej rdzenia. W celu weryfikacji zaproponowanej metody wykonano pomiary SSFR i symulacje MES dla generatora synchronicznego o wydanych biegunach.

Abstract: In this paper the StandStill Frequency Response characteristics (SSFR) of saturated synchronous generator (SG) have been calculated using Finite Element Method (FEM) analysis. It was assumed that the saturation level of the generator core can be taken into account by changing the value of the relative magnetic permeability μ_r . In the first step, the simulation is performed in the Magneto Static 2D module and the values of μ_r was determined. In the second step the proper value of the μ_r is set in the Steady State AC Magnetic module and the frequency characteristics were determine. In order to validate proposed approach FEM simulation from Flux2D software has been compared with the measurements performed on the 10 kVA, 4-poles synchronous machine ELMOR GCe64a of salient rotor construction, equipped with a damper winding.

Słowa kluczowe: SSFR, MES. Generator synchroniczny, model obwodowy, nasycenie

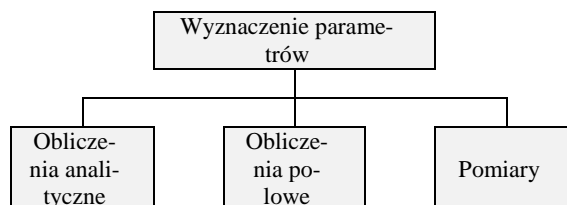
Keywords: SSFT, FEM, synchronous generator, circuit model, saturation

1. Wstęp

Analizę systemów elektromechanicznych przeprowadza się zarówno w oparciu o modele symulacyjne obwodowe (o parametrach skupionych) jak i z wykorzystaniem modeli polowych (o parametrach rozłożonych). W przypadku złożonych systemów generacji energii elektrycznej, w tym systemów elektrycznych nowoczesnych samolotów pasażerskich, modele obwodowe są łatwiejsze w opracowaniu i implementacji w programach symulacyjnych.

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z wyznaczeniem parametrów modelu obwodowego generatora synchronicznego. Podstawę analizy stanowi model obwodowy generatora opisany w osiach $qd0$ [3] oraz model matematyczny generatora synchronicznego wykorzystujący pochodne rzędów niecałkowitych

[1]. Parametry modelu (rezystancje, indukcyjności, itd.) mogą być wyznaczone na drodze obliczeń analitycznych, symulacji polowych lub pomiarów (rys. 1).



Rys. 1. Metody wyznaczania parametrów modelu obwodowego generatora synchronicznego

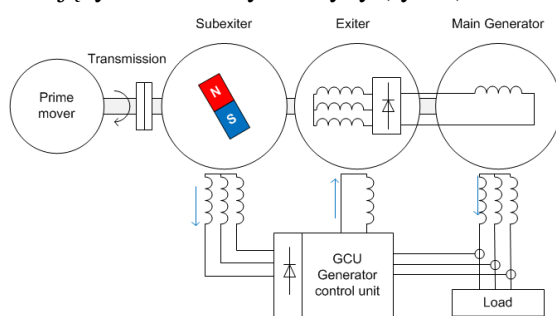
Obliczenia analityczne przeprowadza się w oparciu o uproszczone zależności dostępne w literaturze i podstawowe informacje na temat budowy maszyn. Metoda ta nie jest czaso-

chłonna jednak dokładność obliczeń jest ograniczona ze względu na szereg założeń upraszczających.

Dokładniejsze wartości parametrów można wyznaczyć przeprowadzając symulacje metodą elementów skończonych (MES). Do opracowania poprawnego modelu numerycznego generatora niezbędna jest znajomość wymiarów maszyny, schematu uzwojeń oraz danych materiałowych. Proces przygotowania modelu numerycznego oraz symulacje są czasochłonne. Możliwe jest uwzględnienie nieliniowości charakterystyki magnesowania.

Parametry modelu obwodowego generatora można również wyznaczyć przeprowadzając odpowiednie pomiary. W przypadku generatora synchronicznego do zalecanych metod pomiarowych zalicza się między innymi metodę SSFR (ang. *StandStill Frequency Response*). Wytyczne IEEE [2] dotyczące metody SSFR pomijają wpływ nasycenia obwodu magnetycznego na wartości parametrów modelu obwodowego. Z uwagi na konieczność przeprowadzenia pomiarów przy rozwartych jak i zwartych zaciskach uzwojenia wzbudzenia w znacznym stopniu utrudnione jest wstępne namagnesowanie rdzenia maszyny.

Stosowanie metody SSFR do identyfikacji parametrów bezszczotkowych trójstopniowych generatorów synchronicznych (BTGS) stosowanych we współczesnych samolotach pasażerskich, wiąże się z dużymi utrudnieniami wynikającymi z budowy maszyny (rys. 2).



Rys. 2. Budowa bezszczotkowego trójstopniowego generatora synchronicznego

W takiej maszynie obwód wzbudzenia głównego generatora zasilany jest za pomocą dodatkowej maszyny – wzbudnicy. Układ ten w znacznym stopniu ogranicza możliwość realizacji pomiarów, ze względu na utrudniony dostęp do zacisków uzwojenia wzbudzenia.

W Katedrze Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych prowadzone były badania związane

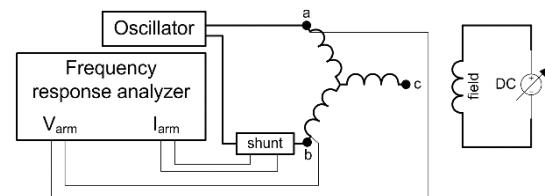
z modelowaniem systemu elektroenergetycznego samolotu bardziej elektrycznego. Jednym z zadań projektu było opracowanie modeli BTGS oraz weryfikacja metod wyznaczania ich parametrów. Równoległe prowadzone były badania nad modelem obwodowym będącym modyfikacją standardowego modelu opisanego w osiach prostokątnych $qd0$ oraz nad modelem wykorzystujący pochodne rzędów niecałkowitych. Istotnym zagadnieniem procesu modelowania systemu było uwzględnienie wpływu nasycenia obwodu magnetycznego w proponowanych modelach.

W artykule przedstawiono sposób implementacji metody SSFR w programie do symulacji MES umożliwiającą wyznaczenie charakterystyk częstotliwościowych przy nasyconym rdzeniu generatora.

W celu weryfikacji zaproponowanej metody wykonano pomiary SSFR i symulacje MES dla generatora synchronicznego ELMOR GCe64a (10kVA, 231V, $\cos\varphi=0,8$, 1500 obr/min 50Hz). Wyniki pomiarów i symulacji zostały porównane w celu weryfikacji poprawności przyjętych założeń upraszczających.

2. Pomiary SSFR

Metoda SSFR jest używana w celu identyfikacji parametrów liniowego modelu obwodowego generatora na podstawie charakterystyk częstotliwościowych [2]. Podstawowym ograniczeniem klasycznej metody SSFR jest konieczność wykonania części pomiarów przy rozwartych oraz zwartych zaciskach uzwojenia wzbudzenia (rys. 3). Komplikuje to znaczenie możliwość wstępnego namagnesowania maszyny w celu wyznaczenia parametrów modelu z uwzględnieniem nasycenia (rys. 3).



Rys. 3. Układ pomiarowy do wyznaczania indukcyjności w osi d generatora metodą SSFR

Próby uwzględnienia zjawiska nasycenia rdzenia w metodzie SSFR zaproponowano w pracach [5-10]. Niestety przedstawiane metody modyfikacji SSFR mają ograniczenia, z których najważniejsze to czasochłonność pomiarów, oraz uwzględnienie nasycenia tylko dla niektórych parametrów modelu.

Dodatkowym problemem w czasie pomiarów parametrów modelu maszyny z uwzględnieniem nasycenia rdzenia jest nagrzewanie uzwojenia wzbudzenia. Pomiary wykonane dla niskich wartości częstotliwości poniżej 1Hz są obciążone dużym błędem wynikającym ze znacznego udziału rezystancji.

Założono, że proponowana przez autorów modyfikacja metody SSFR w celu wyznaczenia parametrów modelu maszyny z uwzględnieniem nasycenia powinna w znacznym stopniu ograniczyć czasochłonność tego procesu oraz być odpowiednia do zastosowania w modelu wykorzystującym pochodne rzędów niecałkowitych.

3. Implementacja metody SSFR w MES

Wartości parametrów modelu obwodowego wyznaczonych metodą SSFR zależą od poziomu nasycenia rdzenia generatora [4]. Ze względu na czasochłonność metody SSFR oraz problemy przy wyznaczaniu wartości parametrów modelu maszyny w stanie nasycenia zaproponowano wykorzystanie w tym celu symulacji MES.

Zjawisko nasycenia rdzenia generatora synchronicznego w proponowanym modelu zostało uwzględnione przyjmując założenia:

- rdzeń maszyny jest nasycony równomiernie,
- zjawisko nasycenia ma wpływ tylko na parametry w osi podłużnej generatora d .

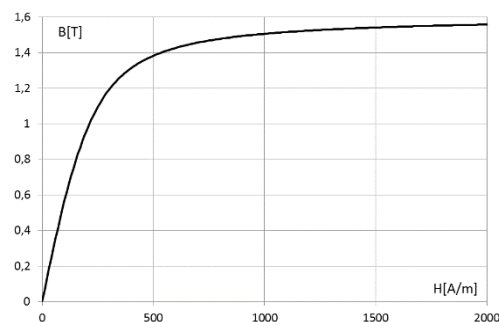
3.1 Model numeryczny generatora

Parametry w stanie nienasyconym i w stanie nasycenia zostały wyznaczone na podstawie symulacji MES w programie Flux2D, wykorzystując moduł „Steady State AC Magnetic”. Moduł ten wykorzystano do wyznaczenia wartości prądów i napięć (amplitud i faz) w funkcji częstotliwości, które to z kolei posłużyły do wyznaczenia parametrów modelu.

Moduł „Steady State AC Magnetic” nie umożliwia wprowadzenia dodatkowego źródła prądu stałego oraz magnesów trwałych jak również nie jest możliwe zdefiniowanie nieliniowej charakterystyki magnesowania. Dlatego do uwzględnienia namagnesowania rdzenia zaproponowano przeprowadzenie symulacji MES w dwóch etapach.

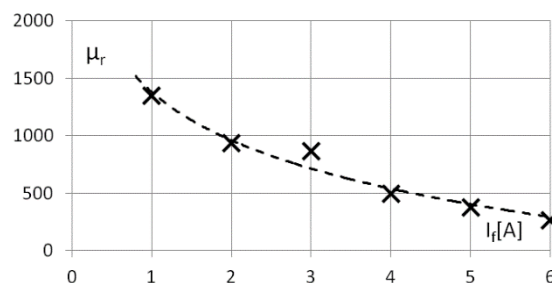
Założono, że stan nasycenia rdzenia generatora zostanie uwzględniony poprzez zmianę wartości względnej przenikalności magnetycznej μ_r . W celu wyznaczenia tej wartości wykonano w

pierwszym etapie symulacje MES korzystając z modułu „Magneto Static 2D” dla wartości prądu wzbudzenia z zakresu od 25% do 150% prądu znamionowego. Symulacje wykonano z uwzględnieniem nieliniowej charakterystyki magnesowania blach rdzenia generatora (rys. 4).

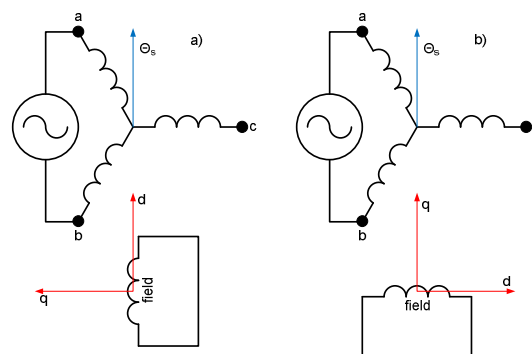


Rys. 4. Charakterystyka magnesowania rdzenia twornika i wzbudzenia generatora synchronicznego użyta w modelu MES w programie Flux2D

Na podstawie wyników symulacji MES wyznaczono zależność względnej przenikalności magnetycznej rdzenia od prądu wzbudzenia (rys. 5). Tak wyznaczona wartość względnej przenikalności magnetycznej rdzenia została wykorzystana w drugim etapie obliczeń.



Rys. 5. Względna przenikalność magnetyczna rdzenia generatora w funkcji prądu wzbudzenia

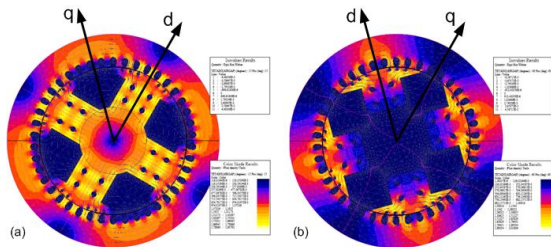


Rys. 6. Położenie wirnika względem stojana w zależności od wyznaczonej indukcyjności a) w osi d , b) w osi q

W drugim etapie wykonano symulacje MES w module „Steady State AC Magnetic” dla zmiennej wartości częstotliwości prądu twornika w zakresie od 0,01Hz do 100Hz. W symulacji wykorzystano źródło prądowe o stałej wartości skutecznej prądu wynoszącej 0.5% I_n . Symulacje wykonano dla dwóch położenia wirnika generatora w celu wyznaczenia wartości parametrów w osiach d i q (rys. 6).

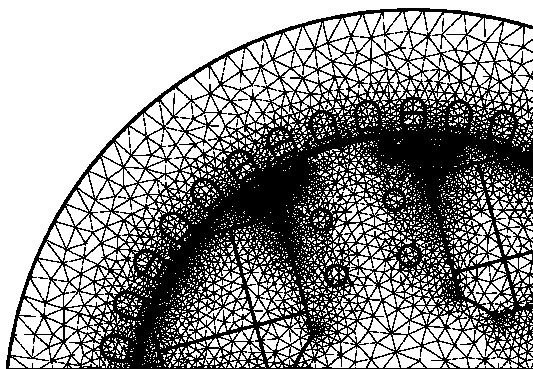
W celu uwzględnienia stanu nasycenia rdzenia generatora zadano wartość względnej przenikalności magnetycznej rdzenia zgodnie z wynikami uzyskanymi w poprzednim etapie.

Wykonane wstępne symulacje i analiza rozkładu indukcji w maszynie (rys. 7) pozwoliły na przyjęcie założenia upraszczającego, że zjawisko nasycenia obwodu magnetycznego może być uwzględnione tylko w przypadku wyznaczania parametrów w osi podłużnej d . W osi q zjawisko nasycenia nie ma istotnego wpływu ze względu na większą długość względną szczeliny powietrznej na drodze strumienia.



Rys. 7. Rozkład indukcji magnetycznej w rdzeniu maszyny w a) osi d , b) w osi q

Symulacje MES wykonano w programie Cedrat Flux2D. Fragment modelu geometrycznego generatora oraz podział na elementy skończone przedstawiono na Rys. 8.

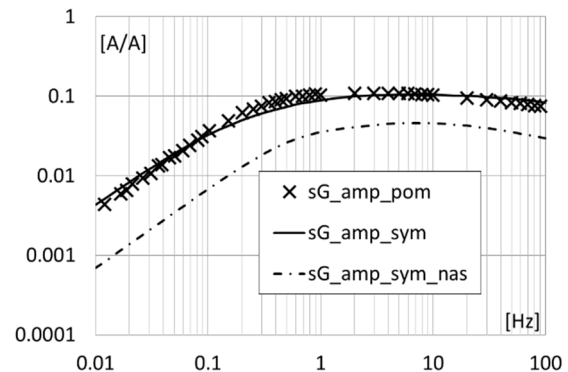


Rys. 8. Geometria generatora synchronicznego podzielona na elementy skończone

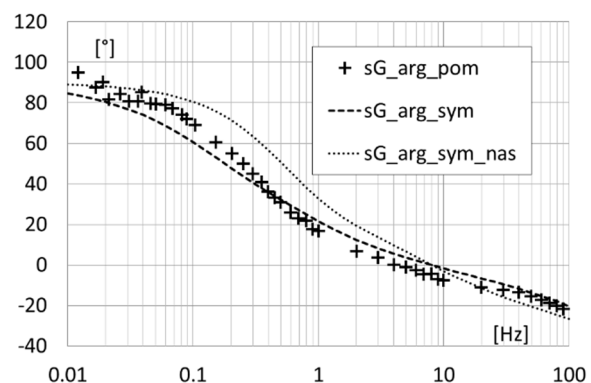
Symulacje „AC Magnetic” wykonano przy użyciu modelu liniowego ze zmienną wartością współczynnika μ_r dla różnych poziomów nasycenia rdzenia generatora.

4. Wyniki badań eksperymentalnych i symulacji MES

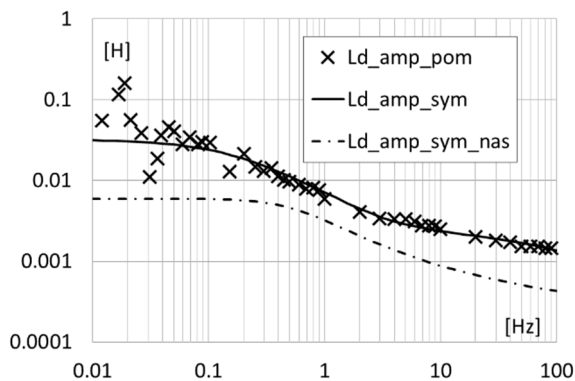
Wykonano pomiary parametrów modelu dla maszyny z nienasyconym rdzeniem magnetycznym metodą SSFR [2]. Na rys. 9 – 16 przedstawiono porównanie wartości parametrów wyznaczonych na podstawie wyników pomiarów i symulacji. Rysunki 9 i 10 przedstawiają stosunek prądu twornika do wzbudzenia sG. Rysunki 11 i 12 przedstawiają indukcyjność własną twornika w osi d . Wyniki pozwoliły na zweryfikowanie przyjętych założeń modelu. Na rysunkach zamieszczono również wyniki symulacji dla maszyny z nasyconym rdzeniem magnetycznym.



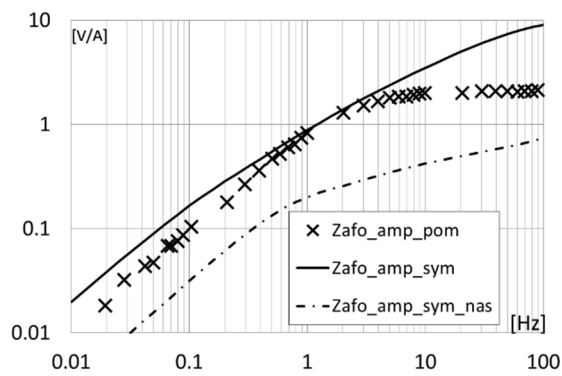
Rys. 9. Wyniki symulacji i pomiarów – funkcja przejścia sG, amplituda (pom – pomiar, sym – symulacja, nas – uwzględnienie zjawiska nasycenia rdzenia)



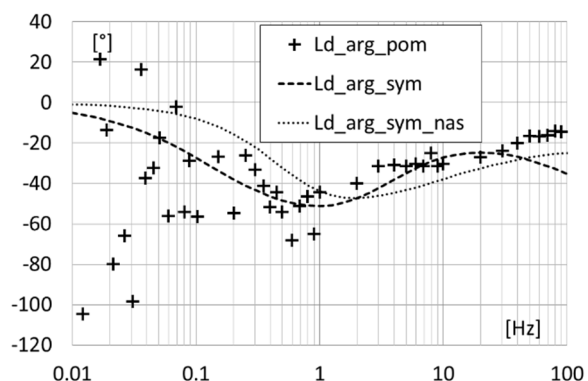
Rys. 10. Wyniki symulacji i pomiarów – funkcja przejścia sG, faza (pom – pomiar, sym – symulacja, nas – uwzględnienie zjawiska nasycenia rdzenia)



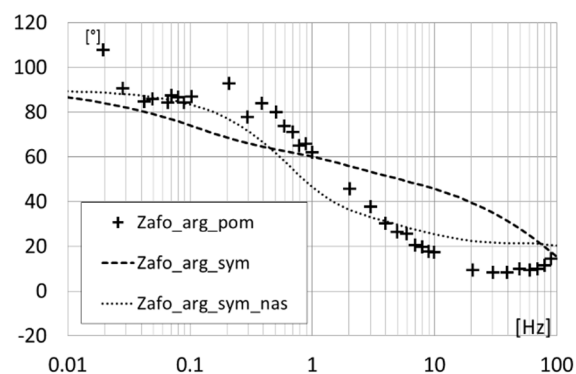
Rys. 11. Wyniki symulacji i pomiarów – indukcyjność twornika w osi d, amplituda (pom – pomiar, sym – symulacja, nas – uwzględnienie zjawiska nasycenia rdzenia)



Rys. 13. Wyniki symulacji i pomiarów – funkcja przejścia Z_{af0} , amplituda (pom – pomiar, sym – symulacja, nas – uwzględnienie zjawiska nasycenia rdzenia)



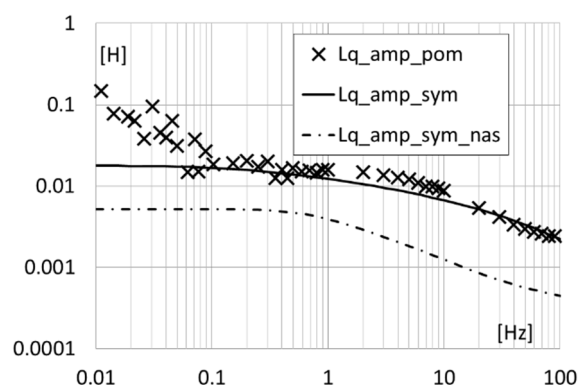
Rys. 12. Wyniki symulacji i pomiarów – indukcyjność twornika w osi d, faza (pom – pomiar, sym – symulacja, nas – uwzględnienie zjawiska nasycenia rdzenia)



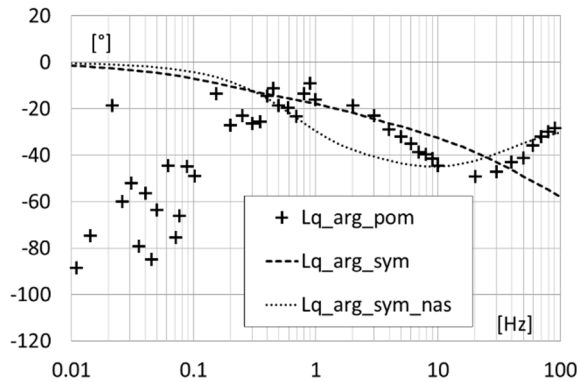
Rys. 14. Wyniki symulacji i pomiarów – funkcja przejścia Z_{af0} , faza (pom – pomiar, sym – symulacja, nas – uwzględnienie zjawiska nasycenia rdzenia)

Na rys. 13 i 14 przedstawiono stosunek napięcia wzbudzenia do prądu twornika, natomiast na rys. 15 i 16 pokazano wyznaczoną zależność wartości odpowiednio amplitudy i argumentu indukcyjności w osi q od częstotliwości. W symulacjach tych uwzględniono zjawisko nasycenia, które jak widać ma istotny wpływ na wartości parametrów. Może to oznaczać, że na parametry w osi q nasycenie obwodu magnetycznego spowodowane prądem magnesującym będzie miało zauważalny wpływ.

Dla niskich wartości częstotliwości przesunięcie fazowe między prądem a napięciem w czasie pomiarów było znikome co spowodowało znaczne obniżenie dokładności wyznaczonych na podstawie pomiarów parametrów generatora.



Rys. 15. Wyniki symulacji i pomiarów – indukcyjność twornika w osi q, amplituda (pom – pomiar, sym – symulacja, nas – uwzględnienie zjawiska nasycenia rdzenia)



Rys. 16. Wyniki symulacji i pomiarów – indukcyjność twornika w osi q , faza (pom – pomiar, sym – symulacja, nas – uwzględnienie zjawiska nasycenia rdzenia)

5. Wnioski

W artykule przedstawiono wyniki prac związanych z wyznaczaniem parametrów modelu maszyny z nasyconym rdzeniem magnetycznym w dziedzinie częstotliwości. W celu wyznaczenia parametrów wykorzystano model MES oraz analizę SSFR. Wyniki pomiarów posłużyły do weryfikacji poprawności przyjętych założeń upraszczających modelu MES. Zaproponowana metoda pozwala wystarczająco dokładnie wyznaczyć parametry nasyczonego modelu generatora w stanie nasycenia. Wadą metody jest konieczność posiadania szczegółowych informacji dotyczących konstrukcji generatora i materiałów z jakich wykonany jest generator. Nasycenie rdzenia generatora zostało uwzględnione w modelu poprzez zależną od natężenia pola wzbudzenia wartość względnej przenikalności magnetycznej blach elektrotechnicznych. W modelu założono równomierne nasycenie obwodu magnetycznego. W rzeczywistości parametry w osiach d i q będą związane z przepływem strumieni przez obszary o różnym poziomie nasycenia. W następnym etapie badań planuje się uwzględnienie nierównomiernego nasycenia obwodu magnetycznego.

6. Literatura

- [1]. S. Racewicz, D. M. Riu, N. M. Retière, P. J. Chrzan, "Half-order modelling of saturated synchronous machine", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 10, pp. 5241–5248, Oct. 2014.
- [2]. IEEE Guide for Test Procedures for Synchronous Machines, *IEEE Std 115*, 2009.
- [3]. P.C. Krause, "Analysis of electric machinery". McGraw-Hill, USA, 1986.
- [4]. F. Kutt, S. Racewicz, M. Michna, "SSFR test of synchronous machine for different saturation levels using finite-element method", *Industrial Electronics Society, IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE*, vol., no., pp.907,911, Oct. 29 2014-Nov. 1 2014
- [5]. J. Verbeeck, R. Pintelon, P. Lataire, "Influence of saturation on estimated synchronous machine parameters in standstill frequency response tests", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 15, no. 3, pp. 277-283, 2000.
- [6]. F. S. Sellschopp, M. A. Arjona, „Determination of Synchronous Machine Parameters Using Standstill Frequency Response Tests at Different Excitation Levels”, *IEEE Int. Electric Machines & Drives Conference IEMDC'07*, vol. 2, pp. 1014-1019, May 2007.
- [7]. Gh. Ahrabian, A. M. El-Serafi, "Identification of the synchronous machine parameters under magnetic saturated conditions using Stand Still Frequency Response Test", presented at *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2001.
- [8]. R. Escarela-Perez, T. Niewierowicz, E. Campero-Littlewood, "Synchronous machine parameters from frequency-response finite-element simulations and genetic algorithms", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 16, no. 2, pp. 198-203, Jun 2001.
- [9]. R. Escarela-Perez, E. Campero-Littlewood, T. Niewierowicz, "Efficient finite-element computation of synchronous machine transfer functions", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 38, no. 2, pp. 1245-1248, Mar 2002.
- [10]. S. Racewicz, D. Riu, N. Retière, P. J. Chrzan, "Non linear half-order modelling of synchronous machine", in *IEMDC 2009*, Miami, Florida, May 2009, p. 778-783.

Autorzy

dr inż. Filip Kutt filip.kutt@pg.gda.pl, dr inż. Michał Michna michal.michna@pg.gda.pl, dr inż. Grzegorz Kostro grzegorz.kostro@pg.gda.pl: Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechnik i Automatyki, dr inż. Szymon Racewicz: Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Nauk Technicznych, Katedra Mechatroniki i Edukacji Techniczno-Informatycznej