

Andrzej Boboń, Piotr Zientek
Politechnika Śląska, Gliwice

OBLICZENIA OSIOWEGO STRUMIENIA MAGNETYCZNEGO W MASZYNIE INDUKCYJNEJ METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

CALCULATION OF AXIAL MAGNETIC FLUX IN INDUCTION MACHINE BY FINITE ELEMENT METHOD

Abstract: In the paper results of finite-element calculations of the electromagnetic field in a squirrel-cage induction motor with particular reference to the shaft flux were presented. A three-dimensional field-circuit model of the 300 kW induction motor was developed taking into account supplying the stator winding from the voltage source and the rotary motion of the rotor. Distribution of axial and radial components of the magnetic flux density in the end-winding region and the bearing region as well as transient waveforms of the shaft flux were computed at the initial period of the motor start-up.

1. Wstęp

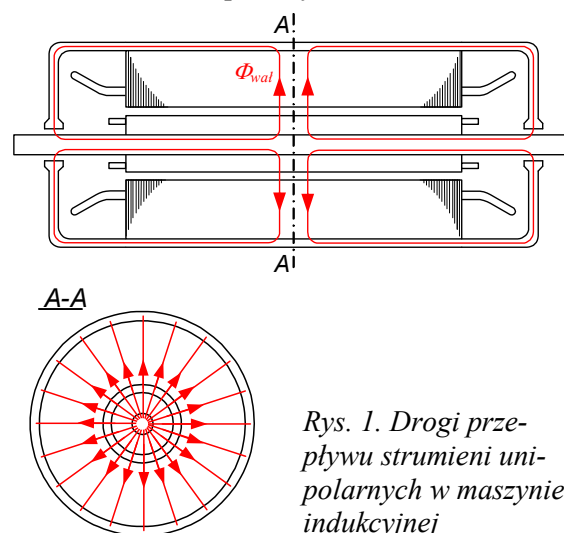
W trójfazowych maszynach indukcyjnych wirujących powstają osiowe strumienie magnetyczne płynące wzdłuż wału (strumienie wałowe). Przyczynami powstawania tych strumieni, jak również napięć wałowych, są rozmaite niesymetrie obwodu elektrycznego i magnetycznego maszyny. Niesymetrie powstają w maszynie indukcyjnej wskutek jej wewnętrznych uszkodzeń, na przykład zwarć zwojowych w uzwojeniach, pęknięć prętów lub pierścieni końcowych w wirniku, przerw w fazach stojana, jak również wskutek nierównomierności szczeliny powietrznej spowodowanej na przykład przez ekscentryczność wirnika. Ogólnie, są dwie główne przyczyny powstania strumieni osiowych w maszynie [2]:

- nierównomierność szczeliny powietrznej objawiająca się różnicą reluktancji pod sąsiednimi biegunami,
- powstanie kołowego przepływu prądu obejmującego wał.

Niewielkie i nieuniknione asymetrie magnetyczne i geometryczne występują również w maszynach nieuszkodzonych wskutek niejednorodności materiałów i technologicznych niedokładności wykonania i montażu.

Na rys. 1 przedstawiono główne drogi zamykania się strumieni osiowych. Zamykają się one przez wał, szczelinę powietrzną, rdzenie magnetyczne stojana i wirnika, obudowę i tarcze łożyskowe. W przekroju poprzecznym czynnym maszyny, strumienie te są strumieniami pulsującymi, jednokierunkowymi – są więc

strumieniami unipolarnymi. Nie uczestniczą



Rys. 1. Drogi przepływu strumieni unipolarnych w maszynie indukcyjnej

w użytecznym przetwarzaniu energii, ale mogą być przyczyną powstawania prądów łożyskowych oraz dodatkowych strat mocy czynnej w przewodzących elementach konstrukcyjnych i w skrajnych pakietach blach w strefie końcowej maszyny. W strefach skrajnych maszyny, istnieją również składowe osiowe strumieni rozproszenia, prostopadłe do skrajnych arkuszy blach w rdzeniu, indukując w nich prądy wirrowe i nagrzewając je.

Strumień osiowy może być zmierzony za pomocą cewki nawiniętej na wale silnika [6]. Napięcie indukowane w cewce może być wykorzystane jako sygnał diagnostyczny do wykrywania i identyfikacji różnych uszkodzeń wewnętrznych w maszynie, powodujących po-

wstanie asymetrii. Na przykład na podstawie analizy widma tego napięcia, mogą być wykryte pęknięte pręty w klatce wirnika, zwarcia zwojowe w uzwojeniu stojana, ekscentryczność wirnika itp. [3, 4, 6].

W artykule przedstawiono wyniki obliczeń strumieni osiowych metodą elementów skończonych (MES) przy wykorzystaniu trójwymiarowego modelu połowego silnika indukcyjnego klatkowego o mocy 300 kW. Wyznaczono trójwymiarowe rozkłady pola magnetycznego i przebiegi strumieni osiowych w początkowym okresie rozruchu silnika.

2. Trójwymiarowy model połowo-obwodowy silnika indukcyjnego

W modelu połowo-obwodowym maszyny indukcyjnej równania pola opisujące przestrzenno-czasowy rozkład pola elektromagnetycznego są powiązane z równaniami Kirchhoffa obwodów elektrycznych uzwojeń i z równaniami mechanicznego ruchu obrotowego.

Równania pola elektromagnetycznego formułowane są dla wektorowego potencjału elektrycznego T i skalarnego potencjału magnetycznego Ω

$$J = \text{rot } T, \quad H = T - \text{grad } \Omega \quad (1)$$

Wektorowy potencjał elektryczny T stosowany jest w regionach przewodzących, natomiast skalarny potencjał magnetyczny Ω w pozostałych regionach, co znacznie redukuje wymiary układu równań w porównaniu do sformułowania za pomocą wektorowego potencjału magnetycznego A stosowanego w modelach dwuwymiarowych [7]. Wielkością łączącą równania połowe z równaniami obwodów elektrycznych jest napięcie indukowane w uzwojeniach.

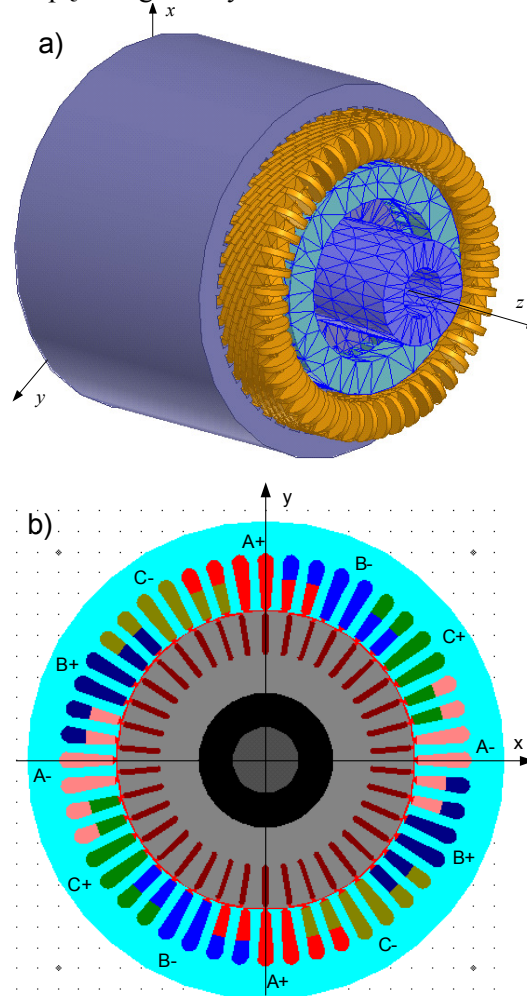
Ruch obrotowy wirnika opisany jest przez równanie

$$J = \frac{d\omega}{dt} = T_e + T_m \quad (2)$$

gdzie J jest momentem bezwładności, ω jest mechaniczną prędkością kątową wirnika, T_e , T_m jest odpowiednio elektromagnetycznym i mechanicznym momentem.

Obliczenia połowe przeprowadzono przy wykorzystaniu programu Maxwell-3D dla silnika indukcyjnego o danych $P_N = 300$ kW, $U_N = 1000$ V, $I_N = 210$ A, $\cos\varphi_N = 0,86$,

$n_N = 1484$ obr/min, przeznaczonego do pracy w napędach górniczych.



Rys. 2. Trójwymiarowy model silnika indukcyjnego i rozkład cewek uzwojenia w żłobkach stojana

Na rys. 2a przedstawiono opracowany model obejmujący połowę silnika wzdłuż osi wału. Nie można bardziej uprościć geometrii modelu ze względu na konieczność uwzględnienia niesymetrii w maszynie. Rys. 2b przedstawia rozkład cewek uzwojenia stojana w żłobkach. Dla uzwojenia stojana zdefiniowano zewnętrzne obwody elektryczne dołączone do modelu MES i zasilono z trójfazowego źródła napięcia.

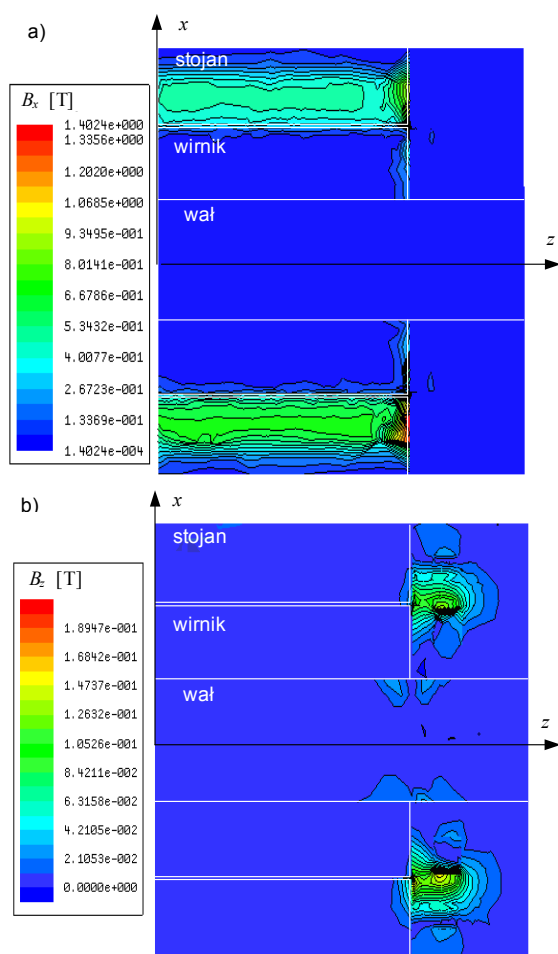
Opracowany model silnika uwzględnia nieliniowe charakterystyki magnesowania rdzeni magnetycznych, wypieranie prądu w prętach klatki wirnika, przestrzenne harmoniczne pola, ruch obrotowy wirnika, jak również anizotropię magnetyczną pakietów blach rdzeni magnetycznych. Aby uwzględnić wszystkie te czynniki, konieczne jest rozwiązywanie równań pola dowolnie zmiennego w czasie. Nawet wtedy,

gdzie interesują nas tylko przebiegi w stanie ustalonym, należy również obliczać przebiegi w poprzedzającym go stanie nieustalonym.

3. Wyniki obliczeń polowych

Na podstawie opracowanego modelu silnika indukcyjnego przeprowadzono obliczenia dla stanu nieustalonego podczas bezpośredniego rozruchu silnika nieobciążonego przy zasilaniu znamionowym trójfazowym napięciem.

Na rys. 3 przedstawiono rozkład składowej promieniowej (a) i składowej osiowej (b) indukcji magnetycznej w płaszczyźnie przekroju podłużnego maszyny.



Rys. 3. Rozkład składowej promieniowej (a) i składowej osiowej (b) indukcji magnetycznej w płaszczyźnie przekroju podłużnego maszyny

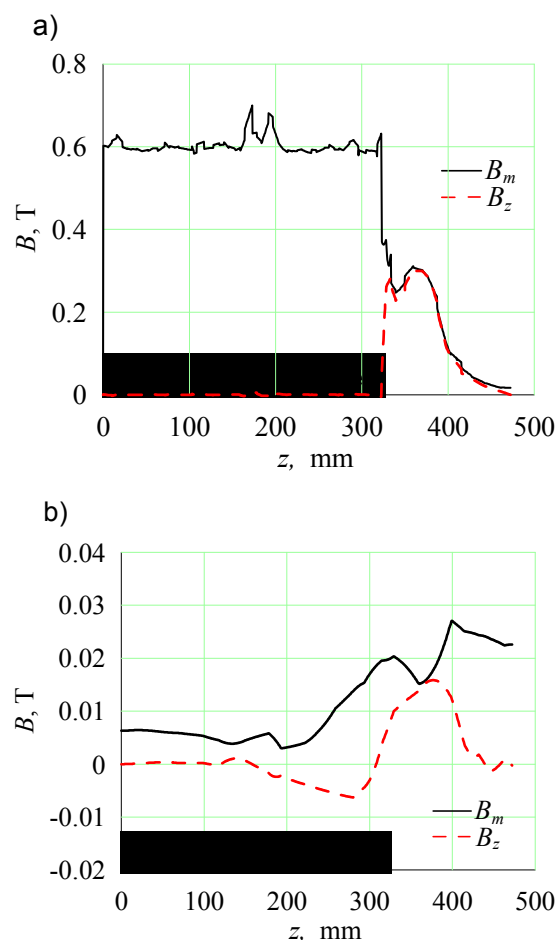
Rysunki przedstawiają rozkład pola w pierwszych chwilach rozruchu silnika z ekscentrycznie przesuniętym wirnikiem o ekscentryczności statycznej wynoszącej

$$\varepsilon_{\%} = \frac{\varepsilon}{\delta} 100\% \approx 57\% \quad (3)$$

gdzie δ jest średnią długością szczeliny powietrznej.

Składowa osiowa indukcji dominuje w strefie skrajnej maszyny w obrębie czół uzwojeń. Zauważyć można również pewną niesymetrię rozkładu pola względem osi stojana, spowodowaną ekscentrycznością wirnika.

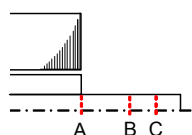
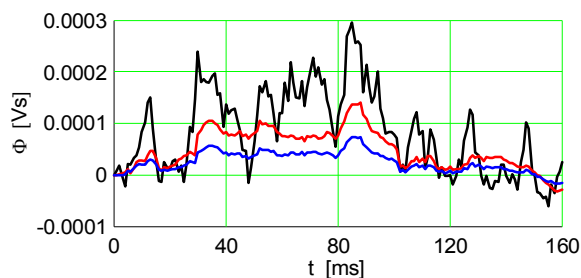
Na rys. 4 przedstawiono rozkład amplitudy i składowej osiowej indukcji magnetycznej w podłużnym przekroju maszyny bez ekscentryczności wirnika, pośrodku szczeliny powietrznej (a) oraz w wale (b). W szczelinie dominuje składowa promieniowa indukcji, a na zewnątrz strefy czynnej – składowa osiowa.



Rys. 4. Rozkład amplitudy i składowej osiowej indukcji magnetycznej wzdłuż maszyny pośrodku szczeliny powietrznej (a) oraz w wale (b)

Na rys. 5 przedstawiono przebiegi strumienia magnetycznego w wale podczas rozruchu silnika z ekscentrycznością statyczną wirnika. Strumień obliczany był w każdej chwili czasowej przez całkowanie indukcji magnetycznej w kilku przekrojach poprzecznych wału A, B, C.

$$\Phi_{\text{wał}} = \int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} \quad (4)$$



Rys. 5. Przebiegi strumienia osiowego w wałe podczas rozruchu silnika w przekrojach poprzecznych wału A, B, C

Strumień osiowy przyjmuje największe wartości na końcach rdzeni magnetycznych. W miejscach tych zawiera on również najwięcej składowych szybkozmiennych.

4. Uwagi końcowe

Wykorzystując trójwymiarowy model polowo-obwodowy maszyny indukcyjnej, rozwiązywany metodą elementów skończonych, możliwe jest obliczenie przebiegów strumieni magnetycznych osiowych w różnych warunkach niesymetrii elektrycznych i magnetycznych maszyny. Obliczenia powinny obejmować stan nieustalony i następujący po nim stan ustalony maszyny indukcyjnej załączonej do sieci zasilającej w określonych warunkach pracy. Wyniki analizy przebiegów strumienia osiowego mogą być wykorzystane do identyfikacji składowych strumienia związanych z określonymi przypadkami niesymetrii występujących w maszynie. W zastosowaniach diagnostycznych można wykorzystać przebiegi napięcia indukowanego przez strumień osiowy w cewce obejmującej wał maszyny.

W obliczeniach strumieni wałowych lub napięć wałowych, wymagających odwzorowania szeregu składowych szybkozmiennych, trzeba stosować odpowiednio zagęszczoną siatkę elementów skończonych i mały krok czasowy. Z tych powodów, jak również ze względu na konieczność prowadzenia obliczeń w całym zakresie stanu nieustalonego, obliczenia polowe są bardzo czasochłonne i wymagają dostępu do komputerów o dużej mocy obliczeniowej.

Literatura

- [1]. Boboń A., Drak B., Niestrój R., Zientek P.: *Napięcia wałowe i prądy łożyskowe w silnikach indukcyjnych dużej mocy*. Monografia, BOBRME KOMEL, Katowice, 2011.
- [2]. de Jong H.C.J.: *AC motor design. Rotating magnetic fields in a changing environment*. Springer-Verlag 1989.
- [3]. Jarzyna W.: *Diagnostic characteristics of axial flux in an induction machine*. "Electrical Machines and Drives", 11-73 September 1995, Conference Publication No. 4 12, IEE, pp.141-146.
- [4]. Kokko V.: *Condition monitoring of squirrel-cage motors by axial magnetic flux measurements*. Academic Dissertation, University of Oulu, OULU 2003.
- [5]. Kovacs K.P.: *Two-pole induction-motor vibrations caused by homopolar alternating fluxes*. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol.96, No.4, July/Aug 1977, pp.1105-1108.
- [6]. Vas P.: *Parameter Estimation, Condition Monitoring, and Diagnosis of Electrical Machines*. Clarendon Press, Oxford, 1993.
- [7]. Zhou P., Fu W.N., Lin D., Stanton S., Cendes Z.J.: *Numerical Modeling of Magnetic Devices*. IEEE Transaction on Magnetics, Vol.40, No.4, July 2004, pp.1803-1809.

Autorzy

dr inż. Andrzej Boboń
 Andrzej.Boboń@polsl.pl
 dr inż. Piotr Zientek, Piotr.Zientek@polsl.pl
 Politechnika Śląska
 Instytut Elektrotechniki i Informatyki
 44-100 Gliwice, ul. Akademicka 10A

Praca naukowa współfinansowana ze środków na naukę jako projekt badawczy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr N N510 602540.