

**Jan Mróz**  
**Politechnika Rzeszowska**

## **AURA MAGNETYCZNA SILNIKA INDUKCYJNEGO JAKO SYGNAŁ DIAGNOSTYCZNY**

### **MAGNETIC AURA OF AN INDUCTION MOTOR AS A DIAGNOSTIC SIGNAL**

**Abstract:** Among various mechanical faults found with an induction cage motor, the airgap eccentricity and problems affecting the bearing belong to the most frequent. Due to this fact, there has been a rapid development in methods of diagnosing the induction cage motor's condition. Non-invasive methods are generally preferred, as in most cases they do not exert any influence over the motor's work and do not involve making any adjustments to the motor's structure. Moreover, most of them allow the diagnostic process to be carried out when the appliance is on line. With respect to induction cage motors, the motor supply current is the main diagnostic signal which meets the above-mentioned criteria. The aim of the article is to present an innovative idea (in diagnostics), that is the possibility of using the magnetic field surrounding an induction motor as a diagnostic signal in testing rotor's eccentricity. The modelling of the magnetic field around the induction cage motor was performed by means of the ANSYS software. The simulation involved both an induction motor with eccentricity and a defect-free motor. Experimental measurements were performed in laboratory conditions.

#### **1. Wstęp**

Obserwuje się dynamiczny rozwój metod diagnozowania stanu silników indukcyjnych. Preferuje się metody nieinwazyjne, które nie wywierają żadnego wpływu na pracę zespołu elektromaszynowego ani nie wymagają ingerencji w strukturę silnika. Dodatkowo żąda się, aby proces diagnostyczny był możliwy w trybie on line - podczas normalnej eksploatacji zespołu. Analiza sygnału diagnostycznego prowadzi do postawienia diagnozy, co do stanu silnika. Potrzebna w tym celu wiedza gromadzona jest dwutorowo:

- na podstawie obserwacji i badań silników w warunkach przemysłowych i laboratoryjnych w tym badań modeli fizycznych,
- w oparciu o techniki symulacyjne bazujące na matematycznych modelach obiektu.

Zestawienie tak uzyskanych wyników tworzy bazę wiedzy o zagadnieniu. W odniesieniu do silników indukcyjnych podstawowym źródłem sygnału diagnostycznego spełniającym powyższe wymagania jest analiza prądu silnika. W przypadku pojawienia się określonego uszkodzenia silnika o charakterze elektrycznym bądź mechanicznym dochodzi do odkształcenia tego prądu.

W artykule przedstawiono możliwość wykorzystania innego niż prąd silnika sygnału diagnostycznego do badania ekscentryczności wirnika. Jak to zostanie poniżej wykazane tym sygnałem może być pole magnetyczne wokół silnika indukcyjnego (aura). Pierwsze i jak do tej pory

jedyne, według wiedzy autora, publikacje na ten temat to prace [1, 2].

W dalszej części zostaną przedstawione własne doświadczenia związane z tym sposobem pozyskiwania sygnału diagnozującego silnik indukcyjny w aspekcie ekscentryczności. Dla silnika klatkowego Sg 112M-4 ze pomocą ANSYS 12.1 zamodelowano pole magnetyczne w bezpośrednim otoczeniu silnika symetrycznego oraz silnika z ekscentrycznością statyczną. Zdobyte na drodze modelowania informacje o kształcie pola magnetycznego i wielkości indukcji magnetycznej wokół silnika sprawnego, jak i wadliwego porównano z wynikami uzyskanymi z pomiarów zewnętrznego pola magnetycznego silnika klatkowego podczas jego pracy.

#### **2. Przyczyny i skutki ekscentryczności silnika indukcyjnego**

Wśród uszkodzeń mechanicznych silników indukcyjnych na czoło wysuwają się niedomagania łożysk, ale częstym przypadkiem jest także ekscentryczność maszyny- zakłócenie równomierności szczeliny powietrznej między stojanem a wirnikiem. Ekscentryczność może być:

- statyczna - położenie minimalnej szczeliny jest stałe w przestrzeni,
- dynamiczna - położenie minimalnej szczeliny przemieszcza się wzdłuż obwodu stojana,
- mieszana - jednocześnie występuje ekscentryczność statyczna i dynamiczna.

Wśród przyczyn ekscentryczności należy wymienić:

- niekołowy otwór stojana,
- niekołowy przekrój poprzeczny wirnika,
- niecentryczne ustawienie wirnika w otworze stojana,
- ugięty wał,
- zużyte łożyska i związane z tym nadmierne luzy,
- zużyte zamki tarcz łożyskowych,
- jednostronny naciąg magnetyczny wskutek niesymetrii elektrycznej.

Skutkiem ekscentryczności jest jednostronny naciąg magnetyczny, wywołujący szereg niekorzystnych zjawisk, do których można zaliczyć:

- nadmierne obciążenie łożysk i ich nagrzewanie,
- przyspieszone zużycie smaru,
- wzmożone efekty wibroakustyczne (hałas, drgania),
- zacieranie wirnika o stojan (w skrajnych przypadkach),
- możliwy wzrost wartości potencjalnych prądów łożyskowych z powodu zwarć metalicznych w łożyskach przy dużym skosnym ustawieniu wirnika [4].

Tego typu awarie zwykle nie pojawiają się nagle i dlatego możliwa jest obserwacja trendu zjawiska, co jest jedną z podstaw diagnozowania.

### 3. Metody diagnozowania ekscentryczności

W odniesieniu do diagnozowania ekscentryczności można stwierdzić, że standardowym działaniem jest ocena widma prądu stojana. Niesymetria szczeliny powietrznej, która w przypadku ekscentryczności dynamicznej zmienia się dodatkowo w czasie, powoduje pojawienie się w tym widmie odpowiednich składowych.

Zasadniczą trudnością jest tutaj wyodrębnienie tych składowych, które w porównaniu z innymi, w tym ze składową sieciową, mają bardzo małe wartości.

Drugim problemem jest określenie, których częstotliwości należy poszukiwać w widmie prądu stojana. Jak już wspomniano wiedza na ten temat jest gromadzona zarówno w wyniku badań eksperymentalnych jak i symulacyjnych. Ta ostatnia droga jest szeroko rozwijana. Jej podstawą jest model matematyczny silnika dla celów diagnostycznych. Prace autorów [5, 6, 8, 9] wskazują, że dla prawidłowej oceny ekscentryczności silnika indukcyjnego konieczna jest

rezygnacja z wielu typowych i uznanych za standardowe założeń upraszczających dotyczących obwodowych modeli. Nieuchronnie następuje, więc komplikacja modelu.

W szczególności w [11] wykazano, że niezbędne jest uwzględnienie harmonicznych żłobkowych, co daje poprawny obraz zjawiska w sensie jakościowym, ale dla dobrej zgodności ilościowej potrzebne jest uwzględnienie nasycenia obwodu magnetycznego [10]. W [7] pokazano, że nowe możliwości oceny ekscentryczności tkwią w stosowaniu sygnału diagnostycznego w oparciu o składowe symetryczne prądu stojana, a nie prądu pojedynczej fazy. Pokazano, że oprócz generowania nowych częstotliwości w widmie prądu, ekscentryczność wywołuje również niesymetrię prądów danej częstotliwości i to może być sygnałem diagnostycznym.

Pozyskiwanie nowych sygnałów diagnostycznych jest także możliwe poprzez wykorzystanie pojawiających się wraz z ekscentrycznością nowych zjawisk wibroakustycznych [3].

Oryginalną drogą są prace [1, 2], gdzie badane jest pole magnetyczne wokół silnika.

### 4. Modelowanie pola magnetycznego wokół silnika

Dla silnika klatkowego Sg 112M-4 o danych:  $U_N=400/690$  V,  $I_N=8.26/4.77$  A,  $P_N=4$  kW,  $n_N=1430$  obr/min,  $\cos\varphi=0.83$ , ze pomocą ANSYS 12.1 zamodelowano pole magnetyczne w bezpośrednim otoczeniu silnika symetrycznego (długość szczeliny powietrznej jest równa:  $\delta = 0.3$  mm) oraz silnika z ekscentrycznością statyczną ( $\varepsilon=50\%$ ). Modelowany silnik ma klatkę zalewaną aluminium oraz kadłub wykonany ze stopu aluminium. Użyte materiały na rdzeń stojana i wirnika to blacha prądnicowa EP20 (analiza nieliniowa), natomiast wał maszyny zamodelowano z materiału o stałej przenikalności względnej, zakładając  $\mu_r=1200$ .

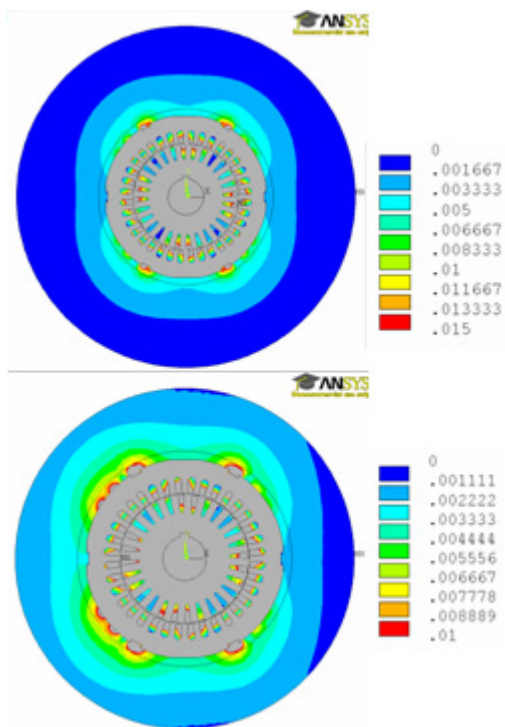
Model zbudowano dla silnika pracującego w stanie jałowym. Wirnik wiruje z prędkością bardzo zbliżoną do synchronicznej, a wartość prądu w klatce jest bliska zeru.

Model wykonano przy następujących założeniach upraszczających:

- pole magnetyczne w rdzeniu maszyny jest płaskorównoległe,
- zbudowany model silnika nie uwzględnia kadłuba i skrzynki zaciskowej, które są wykonane ze stopu aluminium i nie wpływają na rozkład indukcji magnetycznej wokół silnika,

- w stanie jałowym gęstość prądu w klatce wirnika jest równa zero.

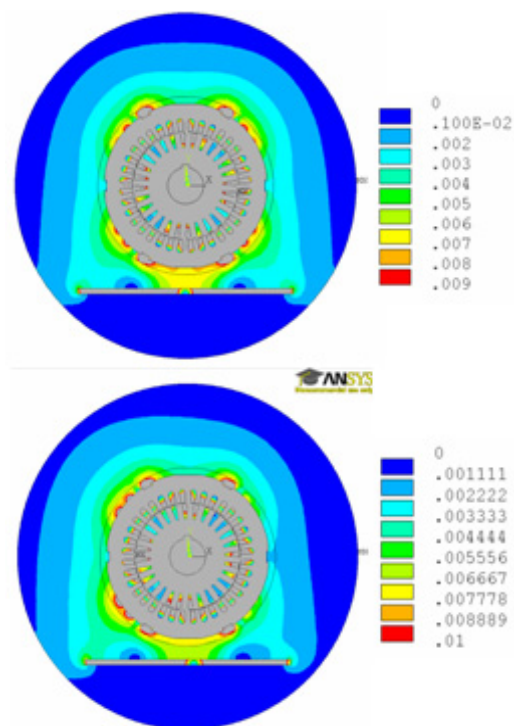
Modelowany jest stan statyczny (*Static Analysis*) odpowiadający wybranej chwili czasowej, gdy wartość gęstości prądu żłobka stojana w jednym paśmie fazowym, modelowanego silnika wynosi  $2983825 \text{ A/m}^2$ , natomiast wartości gęstości prądu żłobka w pozostałych fazach są równe połowie tej wartości. W celu obliczenia pola na zewnątrz silnika został on otoczony pierścieniem o grubości kilkakrotnie przekraczającej wysokość jarzma stojana. W związku z tym można założyć, że na zewnątrz tego pierścienia pole już zanika, a to uprawnia do postawienia warunku brzegowego typu *Infinite Boundary* (technicznie zamodelowana nieskończoność).



Rys.1. Pole magnetyczne na zewnątrz silnika o symetrycznej szczelinie powietrznej i z ekscentrycznością statyczną.

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki obliczeń dla silnika symetrycznego oraz dla silnika z ekscentrycznością statyczną  $\varepsilon=50\%$  polegającą na przesunięciu wirnika w lewo, (na rysunku 1 u dołu), o  $0,15 \text{ mm}$  ( $50\%$  wartości  $\delta$  długości szczeliny). Można stwierdzić, że przy ekscentrycznym położeniu wirnika względem stojana dochodzi również do ekscentrycznego rozkładu pola magnetycznego na zewnątrz badanego silnika. Wartość indukcji magnetycznej w analizowanej chwili czasowej na powierzchni ze-

wewnętrznej korpusu z lewej strony silnika wzrasta o około  $33\%$ , a po prawej stronie badanego silnika maleje w podobnym stopniu. Symulację prowadzono także z uwzględnieniem wpływu stalowego podłoża, na którym będzie ustawiony silnik klatkowy w czasie badań laboratoryjnych. Rysunek 2 pokazuje jak na rozkład zewnętrznego pola magnetycznego wpływa stalowa płyta fundamentowa.



Rys.2. Wpływ stalowej płyty fundamentowej na pole magnetyczne na zewnątrz silnika o symetrycznej szczelinie powietrznej i z ekscentrycznością statyczną.

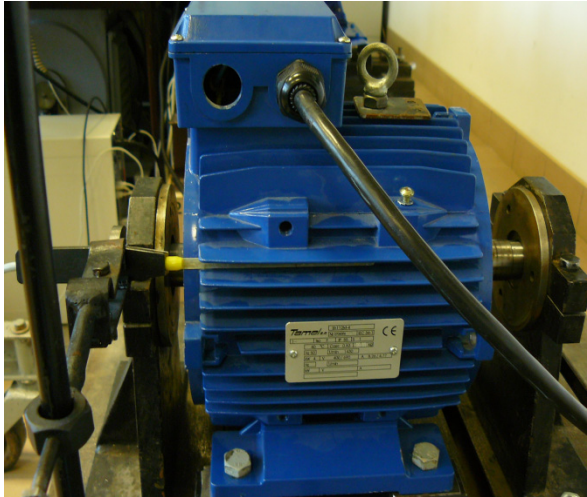
Wprowadzenie obecności płyty fundamentowej znacznie zmienia kształt pola magnetycznego, ale tu także widoczny jest wpływ ekscentryczności na rozkład pola (wzrost indukcji magnetycznej w rejonie zmniejszonej szczeliny powietrznej).

## 5. Pomiary rozkładu pola magnetycznego w otoczeniu silnika

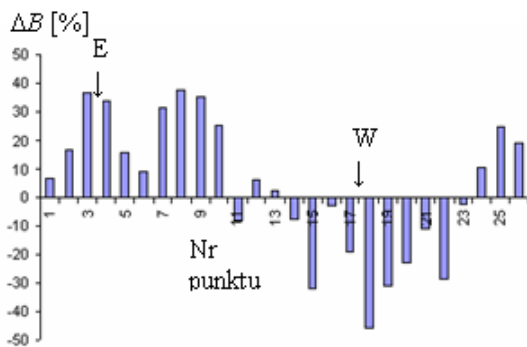
Dla silnika z p.4 przeprowadzono badania laboratoryjne wpływu ekscentryczności szczeliny powietrznej na rozkład pola. Można było tego dokonać poprzez usunięcie tarcz łożyskowych i umieszczenie wirnika na dwóch ruchomych stojakach zewnętrznych (rys.3).

Pomiary dla silnika z ekscentryczną szczeliną powietrzną wykonano dla stanu jałowego maszyny i porównano je z pomiarami dla silnika

nieuszkodzonego pracującego na biegu jałowym. Wartość skuteczną indukcji magnetycznej na zewnątrz silnika zmierzono hallotronowym miernikiem stałego i zmiennego pola magnetycznego HTM – 12c w 26 punktach między żebrami na powierzchni zewnętrznej korpusu silnika, co przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 3. Badany silnik z wirnikiem umieszczonym na zewnętrznych stojakach



Rys. 4. Zmiany wartości indukcji magnetycznej wokół silnika spowodowane ekscentrycznością statyczną

Zmianę indukcji magnetycznej wywołaną ekscentrycznością statyczną obliczono z zależności:

$$\Delta B = \frac{B_{sym} - B_{eksc}}{B_{sym}} 100 \quad (1)$$

gdzie:  $B_{sym}$ ,  $B_{eksc}$  – skuteczna wartość indukcji magnetycznej w danym punkcie pomiarowym dla silnika symetrycznego, dla silnika z ekscentrycznością statyczną. W strefie obejmującej punkty pomiarowe od 14 do 22 szczelina powietrzna miała najmniejszą wartość i zachodził przypadek  $B_{eksc} > B_{sym}$  co oznacza ujemną wartość  $\Delta B$ . Zmniejszenie wielkości szczeliny powietrznej o 50%, z 0.3 mm na 0.15 mm powoduje wzrost indukcji magnetycznej na zewnątrz silnika średnio o około 25%. W obszarze zwiększonej szczeliny (punkty od 1 do 10) – indukcja maleje.

#### 4. Wnioski

Przedstawione rezultaty badań symulacyjnych i eksperymentalnych wskazują, że zewnętrzne pole magnetyczne mogłoby być sygnałem w diagnozowaniu ekscentryczności statycznej wirnika. Wpływ ekscentryczności dynamicznej i mieszanej na ewentualne zmiany kształtu i wartości pola magnetycznego wokół silnika wymagają dalszych badań, podobnie jak wpływ magnetycznego kadłuba i zewnętrznych pól zakłócających sygnał diagnostyczny. Możliwe jest śledzenie trendu zmian wartości indukcji magnetycznej w ustalonych, dostępnych punktach na obwodzie kadłuba silnika pracującego w stanie jałowym (spełniony wymóg bezinwazyjnej diagnozy on-line). Może to być podstawą technicznej realizacji metody diagnostycznej badania ekscentryczności wirnika, która mogłaby mieć nazwę „metoda aury magnetycznej”.

#### 5. Literatura

- [1] Chmelik K., Vachala A.: *Pole magnetyczne wokół silnika asynchronicznego*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 62, 2001, wyd. BOBRME Komel, s. 23-25.
- [2] Chmelik K., Vachala A., Čech V.: *Magnetic field in the surroundings of induction motors*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Seria Elektryka, nr 176, 2001, s. 209-216.
- [3] Dorell D.G., Thomson W.T., Roack S.: *Analysis of fair-gap flux, current and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic air-gap eccentricity* In 3-phase induction motors. IEEE Trans. On IAS, 1995, s. 563-570.
- [4] Drak B., Zientek P., Niestrój R., Boboń A.: *Wpływ asymetrii szczeliny powietrznej na wartość napięcie i prądów wałowych w silnikach indukcyjnych*

dużej mocy. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 81, 2009, wyd. BOBRME Komel, s. 73-82.

[5] Drozdowski P., Weinreb K.: *Metody matematyczne diagnozowania silników indukcyjnych*. Wiadomości Elektrotechniczne nr 12, 1996, s. 522-525.

[6] Rusek J.: *Interharmoniczne generowane przez maszynę indukcyjną ze statyczną lub dynamiczną ekscentrycznością*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 83, 2009, wyd. BOBRME Komel, s. 129-134.

[7] Sobczyk T.J., Weinreb K., Sułowicz M.: *Diagnostyka silników klatkowych oparta na składowych symetrycznych prądach stojana*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, nr 49, 2000, s. 28-36.

[8] Weinreb K., Sułowicz M.: *Skuteczne wykrywanie ekscentryczności dynamicznej w silniku asynchronicznym*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 83, 2009, wyd. BOBRME Komel, s. 207-212.

[9] Weinreb K., Węgiel T.: *Nieinwazyjna diagnostyka wirnika maszyny asynchronicznej*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 69, 2004, wyd. BOBRME Komel, s. 35-40.

[10] Weinreb K., Węgiel T., Warzecha A., Sułowicz M.: *Wpływ nasycenia głównego obwodu magnetycz-*

*nego na ocenę ekscentryczności dynamicznej silnika asynchronicznego klatkowego*. Prace Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Elektryka nr 177, 2001, s. 121-128.

[11] Węgiel T., Weinreb K., Sułowicz M.: *Wpływ harmonicznych żłobkowych przewodności na kształt widma prądu stojana w maszynie indukcyjnej z ekscentrycznym wirnikiem*. Prace Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Elektryka nr 50, 2000, s. 236-243.

*Badania zrealizowane z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS zakupionego w wyniku realizacji Projektu nr POPW.01.03.00-18-012/09 "Rozbudowa infrastruktury naukowo-badawczej Politechniki Rzeszowskiej" współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej 2007-2013, Priorytet I. Nowoczesna Gospodarka, Działanie 1.3 Wspieranie innowacji.*

#### **Autor**

Dr inż. Jan Mróz, Politechnika Rzeszowska, 35959 Rzeszów ul. W. Pola 2, 017 8651360, janmroz@prz.edu.pl

#### **Recenzent**

*Prof. dr hab. inż. Zbigniew Stein*