

Grzegorz KŁAPYTA
Zakład Mechatroniki

BADANIA POMIAROWO-SYMULACYJNE DWUBIEGOWEGO KLATKOWEGO SILNIKA INDUKCYJNEGO PRZY UWZGLĘDNIENIU SYNCHRONICZNYCH MOMENTÓW PASOŻYTNICZYCH

Streszczenie. Artykuł ten przedstawia wyniki pomiarów i symulacji przykładowego dwubiegowego silnika indukcyjnego ze szczególnym uwzględnieniem zjawisk pasożytniczych. Pomiary realizowane były na stanowisku pomiarowym, którego głównym elementem jest momentomierz Hottinger. W symulacji użyto modeli poliharmonicznych sformułowanych z użyciem metody graficzno-analitycznej, zaimplementowanych w programie MATLAB.

MEASUREMENTS AND SIMULATIONS OF A DOUBLE-SPEED INDUCTION MOTOR WHEN TAKING INTO ACCOUNT PARASITIC SYNCHRONOUS TORQUES

Summary. This paper presents the results of measurements and simulations of a double-speed induction motor when taking into account parasitic synchronous torques. The measurements were taken at a measuring stand by means of Hottinger torquemeter. The simulations made in program MATLAB used the models created by graphical-analytical method.

1. WSTĘP

Silniki indukcyjne wielobiegowe znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle, wszędzie tam, gdzie procesy technologiczne wymagają regulacji w zakresie dwóch lub trzech prędkości obrotowych. Powszechnie stosowane są np. w przemyśle obrabiarkowym oraz w napędach pomp i wentylatorów. Istotne znaczenie z punktu widzenia dynamiki silnika mają zjawiska pasożytnicze, spowodowane występowaniem wyższych harmonicznych przepływu. Zjawiska pasożytnicze występujące w maszynach elektrycznych powodują szereg

niepożądanych zjawisk, takich jak: drgania, nadmierny hałas, trudności z rozruchem, czy też pulsacje prędkości w stanach ustalonych. W silnikach wielobiegowych zjawiska pasożytnicze występują w większym stopniu ze względu na konieczność dopasowania tego samego uzwojenia do dwóch lub trzech różnych prędkości, co wymusza stosowanie połączeń wewnętrznych między grupami, które prowadzą do powstania uzwojeń symetrycznych nieoptymalnych, charakteryzujących się rozszerzonym widmem harmonicznych przestrzennych pola magnetycznego, bądź też - uzwojeń niesymetrycznych (ułamkowych), generujących dodatkowo podharmoniczne.

Omawiane zadanie ma na celu dokonanie analizy teoretycznej przyczyn powstawania synchronicznych momentów pasożytniczych w indukcyjnych maszynach dwubiegowych, sformułowanie modeli matematycznych analizowanego silnika, wykonanie symulacji komputerowych wybranych stanów dynamicznych oraz pomiarowej weryfikacji otrzymanych wyników.

2. BADANY SILNIK

Obiektem badań i symulacji był dwubiegowy silnik typu Sg-132S 4/2 o mocy 4,7/5,7 kW i prędkości znamionowej 1445/2895 obr/min. Silnik ten posiada w zależności od układu połączeń $2p=2$ lub $2p=4$ bieguny. Zmianę prędkości obrotowej uzyskuje się poprzez zmianę układu połączenia obwodu stojana (w trójkąt lub podwójną gwiazdę).

3. MODEL MATEMATYCZNY

Model matematyczny badanego silnika dwubiegowego składa się z dwóch niezależnych części, z których każda opisuje jedną z możliwych konfiguracji połączeń. Maszyna rozpatrywana jest jako dwie niezależne maszyny jednobiegowe (z których każda ma parametry odpowiadające maszynie rzeczywistej), umieszczone na wspólnym wale i uruchamiane na przemian. Model ten został utworzony przy następujących założeniach upraszczających:

- obwód magnetyczny jest liniowy,
- uzwojenia są całkowite, symetryczne i rozłożone dyskretnie,
- szczelina powietrzna gładka (nieuźłobkowana),
- gęstość prądu wzdłuż wysokości zębów jest stała (pomijamy zjawisko wypierania prądów w prętach klatki).

Tak scharakteryzowany model jest opisany we współrzędnych $\alpha\beta$ następującym układem równań macierzowych:

$$\begin{bmatrix} u_s^{\alpha\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s^{\alpha\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{\alpha\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{\sigma s}^{\alpha\beta} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_s^{\alpha\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{sr}^{\alpha\beta} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_r^{\alpha\beta} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left(\begin{bmatrix} M_{sr}^{dq}(\vartheta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r^{dq} \end{bmatrix} \right), \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r^{dq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r^{dq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{\sigma r}^{dq} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_r^{dq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \left(\begin{bmatrix} M_{rs}^{dq}(\vartheta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{\alpha\beta} \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} M_{rr}^{dq} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_r^{dq} \end{bmatrix},$$

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = T_e - T_m, \quad (2)$$

$$T_e = \sum_{v=1,2,3,\dots} T_{e\nu} = \sum_{v=1,2,3,\dots} \begin{bmatrix} i_s^{\alpha\beta} \end{bmatrix}^T \frac{\partial}{\partial \vartheta} \begin{bmatrix} M_{sr}^{dq}(\vartheta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r^{dq} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

gdzie:

$\begin{bmatrix} u_s^{\alpha\beta} \end{bmatrix}$ - sprowadzony wektor napięcia stojana,

$\begin{bmatrix} i_s^{\alpha\beta} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_r^{dq} \end{bmatrix}$ - sprowadzone wektory prądów stojana i wirnika,

$\begin{bmatrix} R_s^{\alpha\beta} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} R_r^{dq} \end{bmatrix}$ - sprowadzone macierze rezystancji uzwojeń stojana i prętów klatki wirnika,

$\begin{bmatrix} L_{\sigma s}^{\alpha\beta} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} L_{\sigma r}^{dq} \end{bmatrix}$ - sprowadzone macierze indukcyjności rozprożeń uzwojeń stojana i wirnika,

$\begin{bmatrix} M_{ss}^{\alpha\beta} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} M_{rr}^{dq} \end{bmatrix}$ - macierze indukcyjności własnych stojana i wirnika,

$\begin{bmatrix} M_{sr}^{dq}(\vartheta) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} M_{rs}^{dq}(\vartheta) \end{bmatrix}$ - macierze indukcyjności wzajemnych stojan-wirnik i wirnik-stojan,

J - moment bezwładności silnika,

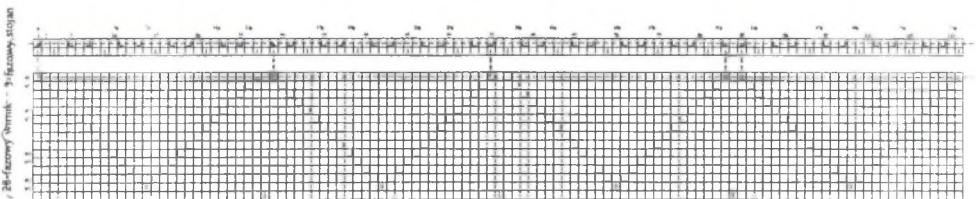
T_m - mechaniczny moment obciążenia na wale maszyny,

ϑ - kąt obrotu wirnika,

T_e - moment elektromagnetyczny jako suma momentów pochodzących od nieskończonego ciągu harmoniczných,

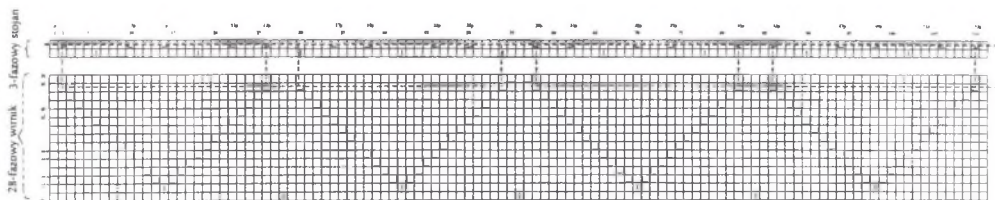
Ω_m - prędkość kątowa wirnika.

Model matematyczny z oczywistych przyczyn nie może zawierać nieskończonego ciągu harmoniczných. Nie jest to zresztą konieczne, gdyż uwzględnienie głównego momentu elektromagnetycznego oraz kilku dominujących momentów pasożytniczych pozwala na uzyskanie przebiegów, które z dużą dokładnością odwzorowują rzeczywistość. Wyboru dominujących harmoniczných przestrzennych przepływu dokonujemy na podstawie znajomości schematu rozkładu maszyny na maszyny elementarne oraz współczynników uzwojeń dla poszczególnych rzędów harmoniczných [1], [2], [3]. Schematy rozkładu badanej maszyny wraz z torami generowania momentów pasożytniczych przedstawia rys.1 dla $2p=2$ oraz rys.2 dla $2p=4$.



Rys.1. Schemat rozkładu silnika o $Q_s=36$, $Q_r=28$, $2p=2$

Fig.1. Diagram of decomposition of a machine with $Q_s=36$, $Q_r=28$, $2p=2$



Rys.2. Schemat rozkładu silnika o $Q_s=36$, $Q_r=28$, $2p=4$

Fig.2. Diagram of decomposition of a machine with $Q_s=36$, $Q_r=28$, $2p=4$

4. SYMULACJE KOMPUTEROWE

Modele zostały zaimplementowane w programie Matlab przy użyciu narzędzi dostępnych w środowisku graficznym Simulink. Przedstawione zostaną wyniki symulacji dla części modelu odwzorowującej układ połączeń o liczbie par biegunów $2p=4$. Na podstawie schematu rozkładu badanego silnika na maszyny elementarne (rys.2) oraz znajomości współczynników uzwojeń można stwierdzić, że w odniesieniu do drugiego wiersza schematu rozkładu wirnika:

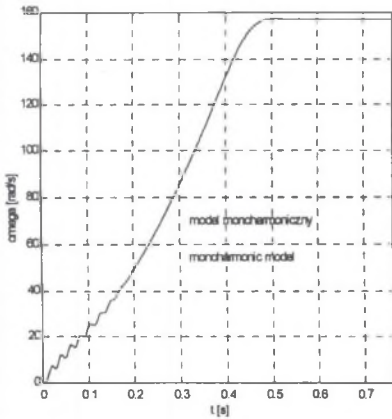
- największe znaczenie mają harmoniczne żłobkowe ($v=2,110$), których współczynnik uzwojenia $k_{wv}=0,959$;
- znacząca jest harmoniczna $v=26$ jako harmoniczna strefowa niskiego rzędu;
- pozostałe harmoniczne strefowe ($v=58,82,86$) mają mniejsze znaczenie.

Uwzględniając jedynie harmoniczne z 2 wiersza schematu rozkładu wirnika zbudowano 3 modele o różnej liczbie uwzględnianych harmonicznych. Pierwszy model (monoharmoniczny) uwzględnia jedynie harmoniczną główną ($v=2$), pozostałe dwa to modele poliharmoniczne uwzględniające odpowiednio 3 harmoniczne ($v=2,26,110$) oraz 6 harmonicznych ($v=2,26,58,82,86,110$).

5. WYNIKI SYMULACJI

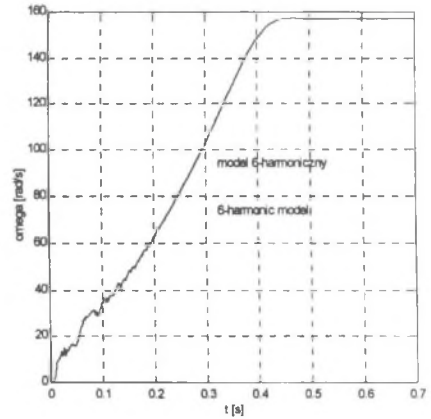
Przebiegi rozruchowe dla każdego z omówionych modeli przedstawiają poniższe rysunki: rys.3 - model monoharmoniczny; rys.4 - model 6-harmoniczny. Uwagę zwracają różnice czasu rozruchu oraz pojawianie się wahań prędkości podczas rozruchu dla modeli poliharmonicznych.

Przebieg momentu rozruchowego dla modelu monoharmonicznego przedstawia rys.5, a analogiczny wykres dla modelu 6-harmonicznego - rys.6.



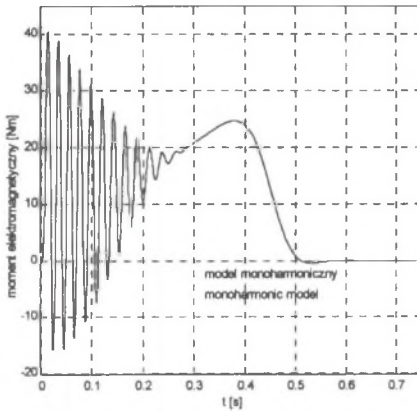
Rys.3. Charakterystyka rozruchowa silnika o $2p=4$ (model monoharmoniczny)

Fig.3. Starting characteristic of a motor with $2p=4$ (monoharmonic model)



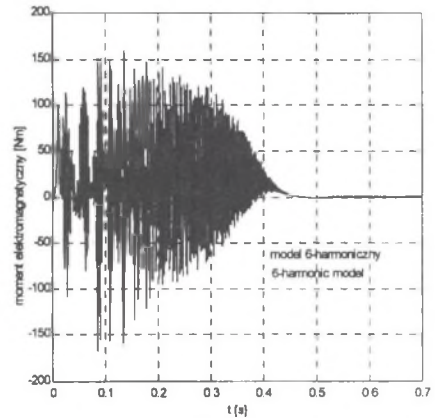
Rys.4. Charakterystyka rozruchowa silnika o $2p=4$ (model 6-harmoniczny)

Fig.4. Starting characteristic of a motor with $2p=4$ (6-harmonic model)



Rys.5. Przebieg momentu elektromagnetycznego podczas rozruchu silnika o $2p=4$ (model monoharmoniczny)

Fig.5. Electromagnetic torque during start of a motor with $2p=4$ (monoharmonic model)



Rys.6. Przebieg momentu elektromagnetycznego podczas rozruchu silnika o $2p=4$ (model 6-harmoniczny)

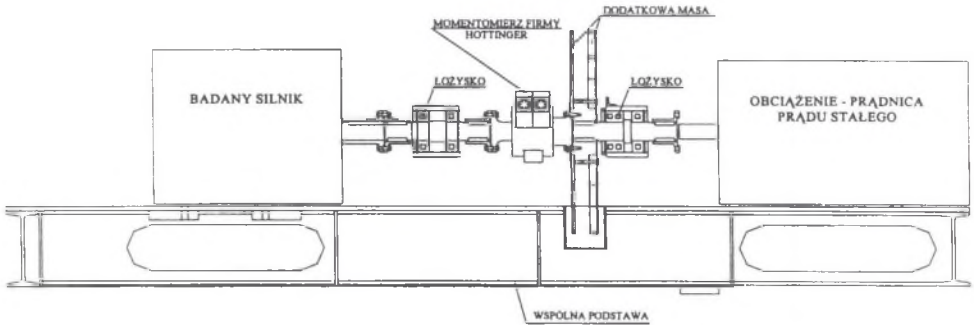
Fig.6. Electromagnetic torque during start of a motor with $2p=4$ (6-harmonic model)

6. POMIARY

Pomiary realizowane były na stanowisku pomiarowym [7], którego schemat przedstawia rys.7.

Zasadniczym elementem ww. stanowiska jest momentomierz firmy Hottinger.

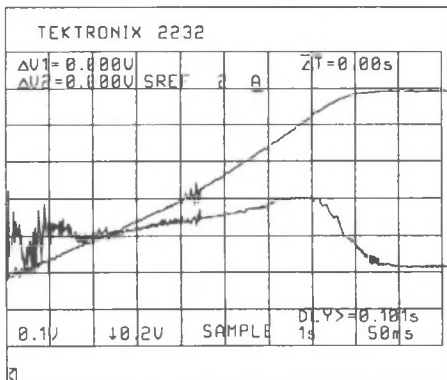
SCHEMAT STANOWISKA DO POMIARU MOMENTÓW



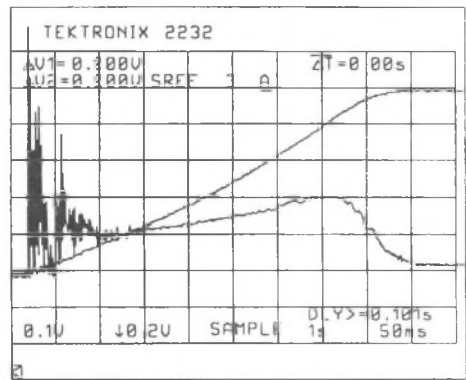
Rys.7. Stanowisko pomiarowe
Fig.7. Measuring stand

Badania pomiarowe zostały przeprowadzone dla silnika dwubiegowego typu Sg 132S-4/2 przy połączeniu w gwiazdę (prędkość znamionowa $n_n=2895$ obr/min). Prądnica obciążająca była odłączona, a dodatkowe masy nie założone.

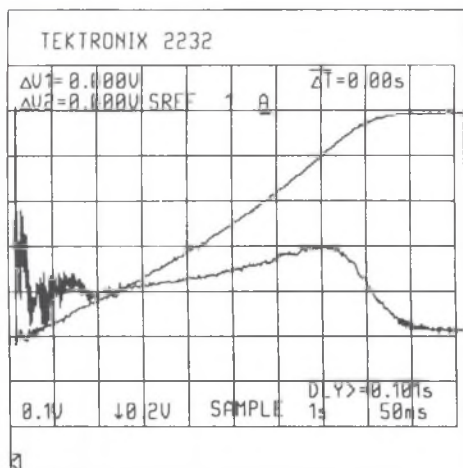
Zarejestrowano szereg charakterystyk rozruchowych silnika przy zmiennym kącie początkowym ustawienia wirnika. Przebiegi zostały zapisane za pomocą oscyloskopu Tektronix 2232. Zarejestrowane przebiegi przedstawiają rys. 8-11.



Rys.8. Przebieg momentu i prędkości – kąt początkowy 0°
Fig.8. Torque and speed curves – starting angle 0°

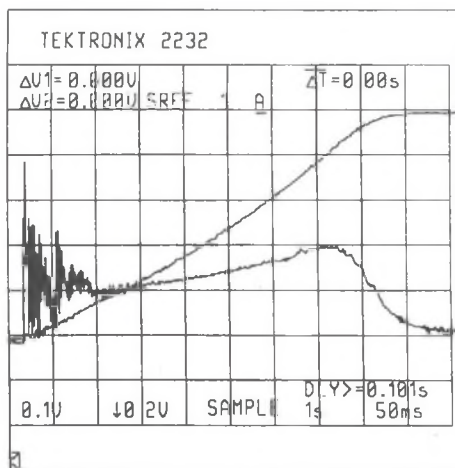


Rys.9. Przebieg momentu i prędkości – kąt początkowy -0.5°
Fig.9. Torque and speed curves – starting angle -0.5°



Rys.10. Przebieg momentu i prędkości –
kąt początkowy $\sim 1^\circ$

Fig.10. Torque and speed curves – starting angle $\sim 1^\circ$



Rys.11. Przebieg momentu i prędkości –
kąt początkowy $\sim 1.5^\circ$

Fig.11. Torque and speed curves – starting angle $\sim 1.5^\circ$

7. PODSUMOWANIE

Badania momentów pasożytniczych w maszynach dwubiegowych są zagadnieniem bardzo złożonym, wymagającym skomplikowanej analizy teoretycznej. Konstruowanie modeli wymaga dokonywania złożonych przekształceń matematycznych na długich łańcuchach równań.

Wykazano obecność momentów pasożytniczych w badanym silniku dwubiegowym i wykazano, jaki wpływ wywierają na wybrane przebiegi. Opracowane modele zawierają harmoniczne z jednego tylko wiersza schematu rozkładu i w związku z tym stanowią jedynie pierwsze przybliżenie końcowego modelu. Już jednak uzyskane na tej podstawie wyniki symulacji wykazują duże podobieństwo do analogicznych przebiegów znanych z literatury. Również wyniki pomiarów potwierdzają prawidłowość skonstruowanych modeli. Dalsze prace będą w kierunku konstruowania dokładniejszych modeli, uwzględniających większą liczbę harmonicznych. Zbadany również zostanie wpływ układu połączeń na występowanie momentów pasożytniczych.

LITERATURA

1. Kluszczyński K., Miksiewicz R.: Modelowanie 3-fazowych maszyn indukcyjnych przy uwzględnieniu wyższych harmonicznych przestrzennych przepływu, Zeszyty Naukowe Pol.Śl. Nr 1272, Gliwice 1995.

2. Kluszczyński K., Miksiewicz R.: Momenty pasożytnicze w indukcyjnych silnikach kłatkowych, Prace Sekcji Maszyn Elektrycznych i Transformatorów Komitetu Elektrotechniki PAN, t.I, PTETiS, Warszawa-Gliwice 1993.
3. Kluszczyński K.: Momenty pasożytnicze w maszynach asynchronicznych, Zeszyty Naukowe Pol.Śl., ser. Elektryka, z.102, Gliwice 1986.
4. Wach P.: Uzwojenia ułamkowe maszyn elektrycznych prądu przemiennego, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa-Wrocław 1997.
5. Kłapyta G.: Wyniki pomiarów dwubiegowego silnika indukcyjnego. Proceedings of XIII Seminar on Electrical Engineering, Istebna Pietraszonka, 28.11-01.12 1999.
6. Kłapyta G.: Badania symulacyjne dwubiegowego silnika indukcyjnego. Proceedings of XIII Seminar on Electrical Engineering, Istebna Pietraszonka, 28.11-01.12 1999.
7. Pilch Z., Kłapyta G.: Stanowisko do pomiaru momentów w silnikach indukcyjnych metodą dynamiczną – zagadnienia projektowe. Proceedings of XIII Seminar on Electrical Engineering, Istebna Pietraszonka, 28.11-01.12 1999.

Recenzent: Dr hab. inż. Krystyna Macek – Kamińska

Wpłynęło do Redakcji dnia 10 kwietnia 2000 r.

Abstract

Multi-speed induction motors are widely used in industry. They have to work at two or even three speeds so they cannot be best optimised. That is why in multi-speed motors parasitic torques are much more visible than in single-speed ones. They cause several harmful phenomena like vibrations, loudness, starting troubles, etc. So during exploration of induction motors we should take parasitic torques into account.

The mathematical model of an induction machine is described by the equations 1-3. According to these equations we create the model independently for each speed. While creating the model we cannot consider all harmonics. To choose the most important of them we use the diagram of decomposition of a machine into elementary machines (Figs.1,2). Considering only one row of the diagram of decomposition we have built 3 models: monoharmonic, 3-harmonics and 6-harmonics. The results of simulations are shown in Figs 3-6.

Measurements of the examined machine were made at the measuring stand shown in Fig.7. The most important part of stand is Hottinger torquemeter. Starting curves were observed on Tektronix 2232 oscilloscope. The results at different starting angles are shown in Figs 8-11.

Analysis of parasitic torques is a difficult problem. While creating models we have to transform long equations and it is very easy to make a mistake. We have shown that there is influence of parasitic torques on machine characteristics. The results of simulations are very similar to the measurement results in spite of fact that the created models are very simple. Next step is to create better models taking into consideration more harmonics.