

Remigiusz KAŁUŻA, Tomasz TRAWIŃSKI

Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej, Zakład Mechatroniki

ASYMETRIA AMPLITUD PRĄDÓW FAZOWYCH STOJANA MASZYNY INDUKCYJNEJ KLATKOWEJ PRACUJĄCEJ W STANIE ZWARCIA

Streszczenie. W artykule przedstawiono próbę wyjaśnienia zjawiska asymetrii amplitud prądów fazowych maszyny indukcyjnej klatkowej pracującej w stanie zwarcia. Badania zjawiska przeprowadzono na podstawie analityczno-graficznej metody analizy równań modelu poliharmonicznego maszyny. Jako przyczynę asymetrii ustalono oddziaływanie wyższych harmonicznnych przestrzennych pola magnetycznego w szczelinie powietrznej.

ASYMMETRY OF PHASE STATOR CURRENTS AMPLITUDE OF AN INDUCTION MACHINE AT STALL

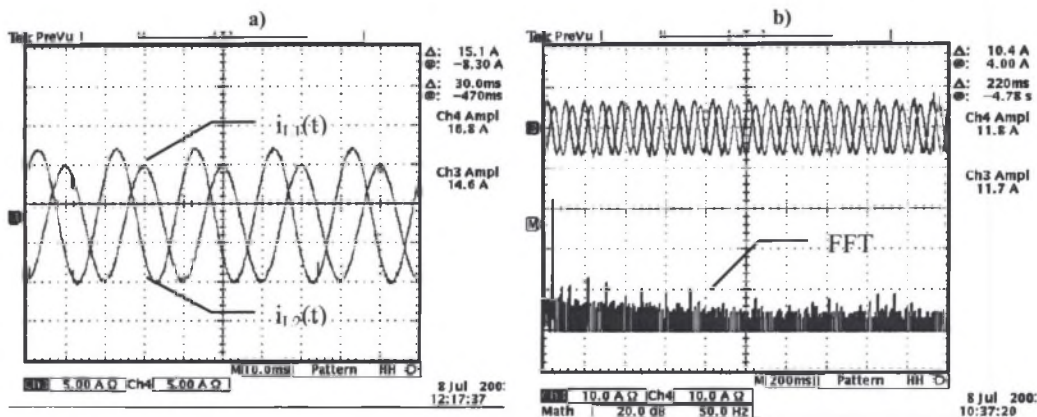
Summary. In the paper the asymmetry phenomena of stator currents amplitude of squirrel-cage induction machine worked at stall is cleared up. The analytical and graphical method was used to investigate the poliharmonic model of induction machine towards the asymmetry phenomena of stator currents amplitude. The reason why stator phase current amplitude asymmetry occurs are higher MMF space harmonics connected with discreet distribution of stator and rotor windings in slots.

1. WSTĘP

Asymetria amplitud prądów fazowych silnika indukcyjnego klatkowego, pracującego w stanie zwarcia, zwróciła uwagę autorów artykułu podczas wykonywania standartowych badań diagnostycznych maszyny. Dla przetwornika elektromechanicznego o symetrycznej budowie obwodu magnetycznego i elektrycznego (zarówno części stojana jak i wirnika), zasilanego z symetrycznego źródła napięcia o wartości obniżonej tak, aby wymuszony przepływ prądu nie powodował nasycenia obwodu magnetycznego, zasadne stało się udzielenie odpowiedzi na pytanie o przyczynę zaobserwowanego zjawiska.

W toku rozważań przyjęto jako prawdopodobne źródło asymetrii obecność w przebiegach prądów stojana składników o częstotliwościach różnych od częstotliwości sieci zasilającej, a więc wielkości generowanych za pośrednictwem wyższych harmonicznnych przestrzennych pola przepływu. Składniki te określane w literaturze przedmiotu prądami harmonicznymi zniekształcają przebiegi czasowe prądów przetwornika.

Dla postawionej tezy wykonano serię badań dokonując z użyciem oscyloskopu cyfrowego transformaty FFT prądów fazowych stojana. Przeprowadzona analiza nie wykazała obecności wyższych harmonicznych w badanych przebiegach czasowych. Prądy o różnych wartościach amplitud, których różnice sięgały (10÷15)%, miały zatem obraz sinusoidalny - rys. 1.



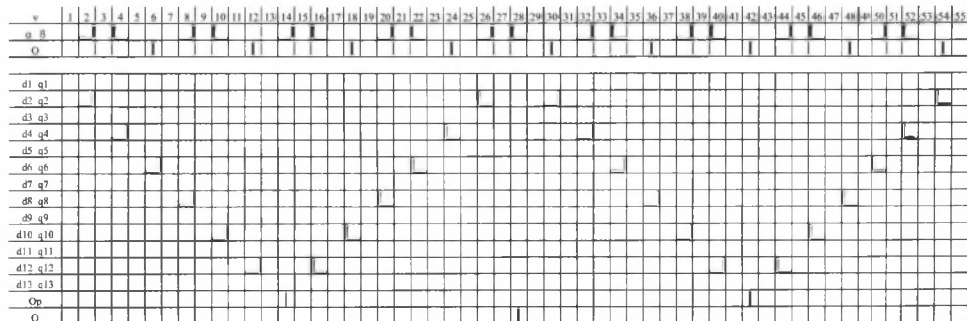
Rys. 1. Asymetria amplitud prądów fazowych silnika Sg 132-S4 pracującego w stanie zwarcia (a); transformata FFT wybranej fazy (b)

Fig.1. The asymmetry of phase currents of Sg132-S4 motor at stall (a) and FFT from stator current (b)

Otrzymane wyniki badań, wydają się zatem szczególnie ciekawe w świetle pracy [1], zgodnie z którą w stanie ustalonym pracy silnika indukcyjnego klatkowego w wyniku poliharmoniczności rozkładu czasowo-przestrzennego pola magnetycznego w szczelinie powietrznej zniekształceniu ulegają prądy fazowe maszyny. Przyjmując założenie, zgodnie z którym silnik indukcyjny pracujący w stanie zwarcia stanowi przypadek szczególnej powyższej prawidłowości, przyczynę asymetrii postanowiono ustalić analizując model matematyczny maszyny poliharmonicznej.

2. BADANIA SYMULACYJNE STANU ZWARCIA MASZYNY INDUKCYJNEJ KLATKOWEJ

Badaniom symulacyjnym poddano poliharmoniczny model matematyczny, sformułowany dla silnika indukcyjnego klatkowego, o danych nominalnych: $P_n = 5,5$ kW, $U_n = 380$ V, $I_n = 11,5$ A, $n_n = 1450$ obr/min i konstrukcyjnych: liczba żłobków stojana/wirnika - $Q_s/Q_r = 36/28$ oraz liczba par biegunów - $p=2$. Na mocy założeń upraszczających (nienasycony i liniowy obwód magnetyczny, gładka szczelina powietrzna, dyskretny rozkład uzwojeń stojana i wirnika w żłobkach) implementowano model poliharmoniczny w środowisku MATLAB/Simulink, uwzględniający wyłącznie harmoniczne przestrzenne przepływu. Opis matematyczny silnika przedstawiono we współrzędnych $\alpha\beta dq$ ($\alpha\beta$ – płaszczyzna stojana, dq – płaszczyzna wirnika). W oparciu o metodę analityczno-graficzną [2] sporządzono dla analizowanego silnika schemat rozkładu na maszyny elementarne (rys. 2.) oraz sformułowano równania tzw. zredukowanego modelu poliharmonicznego maszyny. Ze względu na przejrzystość wywodu uwzględnione zostały jedynie harmoniczne pola przepływu $v=2$, $p=26$. Zasady eliminacji i wyboru harmonicznych (właściwych dla poprawnego odwzorowania własności dynamicznych silnika), a także zasadność prowadzenia analizy na podstawie równań modelu zredukowanego przedstawiono w pracach [1, 2, 3].

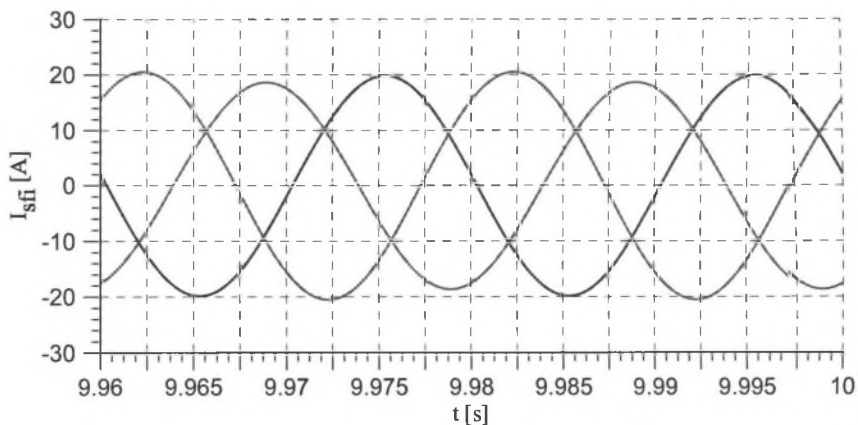


Rys. 2. Fragment schematu rozkładu maszyny poliharmonicznej na elementarne maszyny monoharmoniczne sporządzony dla silnika Sg 132-S4

Fig. 2. Fragment of the diagram of decomposition induction machine into elementary machines, prepared for Sg132-S4 motor

Rozwiązując równania modelu przyjęto parametry elektryczne i mechaniczne: sieć trójfazowa symetryczna, $U_n = 380 \text{ V}$, $f_0 = 50$, oraz parametry symulacji: algorytm cde4 (Runge-Kutta), krok całkowania $k_c = 0,00001 \text{ s}$, czas symulacji $t_s = 10 \text{ s}$.

Symulacja komputerowa wykazała, iż w stanie zwarcia maszyny, przy zasilaniu napięciowym, prądy stojana (i wirnika) charakteryzuje asymetria amplitud. Asymetria zauważalna jest już w przebiegach prądów wyznaczonych we współrzędnych osiowych ($\alpha\beta dq$), jak również w naturalnym (fazowym) układzie współrzędnych - rys.3. Transbrmata FFT prądów nie wykazała zawartości wyższych harmonicznych w ich przebiegach.

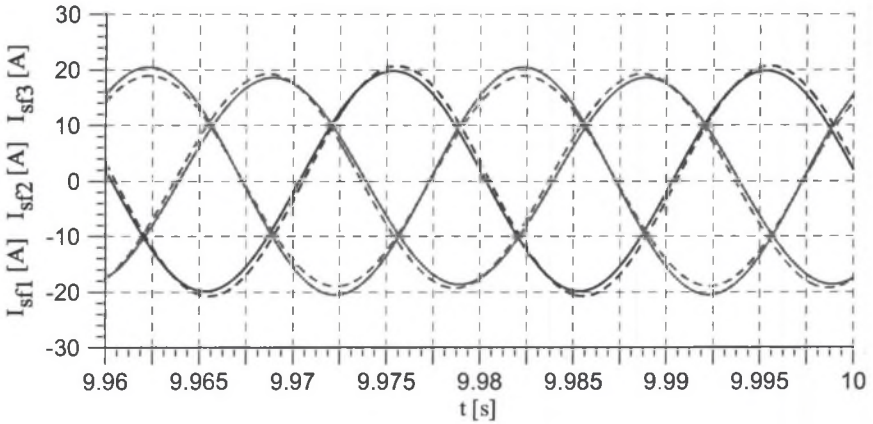


Rys. 3. Asymetria przebiegów czasowych prądów fazowych stojana silnika indukcyjnego klatkowego pracującego w stanie zwarcia

Fig. 3. Asymmetry of phase currents time plot of the induction squirrel-cage motor at stall

W celu wyjaśnienia asymetrii prądów fazowych stojana model silnika poddano szeregowi dodatkowych symulacji. Zbadano wpływ kąta początkowego położenia wirnika θ_0 oraz kąta fazowego napięcia sieci zasilającej φ_0 na amplitudy prądów fazowych maszyny oraz amplitudy prądów wyrażone we współrzędnych osiowych. Badania symulacyjne wykazały zmianę wartości amplitud prądów stojana i wirnika maszyny w funkcji położenia kąтового wirnika.

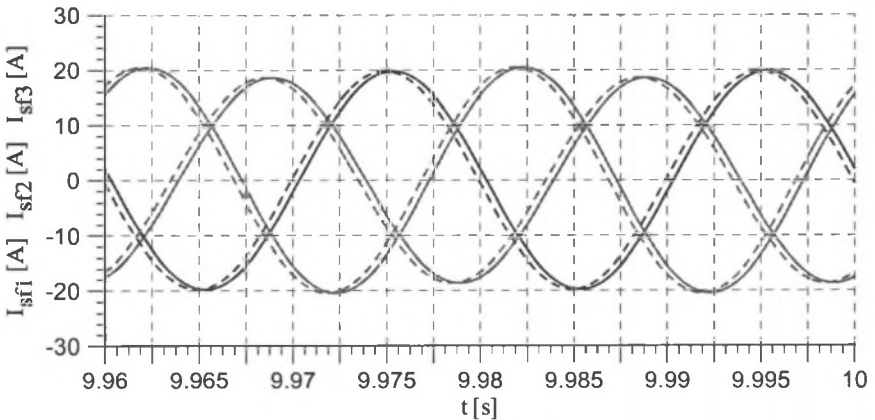
Zmiany zaobserwowano zarówno dla prądów wyznaczonych w naturalnym (fazowym), jak i osiowym układzie współrzędnych. Wielokrotna symulacja stanu zwarcia silnika dla kolejnych wartości kąta początkowego położenia wirnika nie pozwoliła jednak ustalić wartości ϑ_0 , przy której w maszynie popłynęłyby prądy symetryczne - rys. 4.



Rys. 4. Asymetria przebiegów czasowych prądów fazowych stojana silnika indukcyjnego klatkowego pracującego w stanie zwarcia przy zmianie kąta początkowego położenia wirnika w zakresie podziałki żłobkowej

Fig. 4. Asymmetry of phase current time plots of the induction squirrel-cage motor at stall over changes on initial rotor angular position in rotor pitch range

Analiza wpływu zmiany kąta fazowego napięcia zasilającego wykazała, że kąt ten nie wpływa na wartości amplitud prądów maszyny w stanie zwarcia, a zatem nie może być przyczyną ich asymetrii - rys. 5.



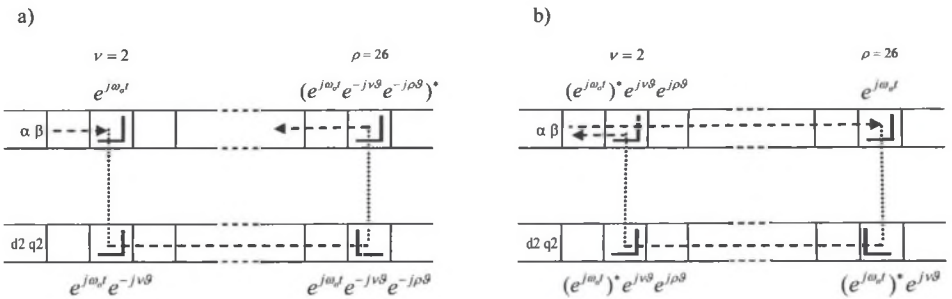
Rys. 5. Asymetria przebiegów czasowych prądów fazowych stojana silnika indukcyjnego klatkowego pracującego w stanie zwarcia przy zmianie kąta fazowego napięcia sieci zasilającej

Fig. 5. Asymmetry of phase current time plots of the induction squirrel-cage motor at stall over changes on stator voltage phase shift

Podsumowując wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych stwierdzić można, że asymetria amplitud prądów maszyny pracującej w stanie zwarcia wynika z obecności w szczelinie powietrznej wyższych harmonicznych przestrzennych przepływu. Asymetria jest funkcją położenia kąтового wirnika względem stojana. Zmiana kąta ϑ_0 w zakresie podziałki żłobkowej wirnika powoduje zmianę amplitud prądów w poszczególnych fazach maszyny, jednak nie prowadzi do ich symetryzacji. Zmiana fazy φ_0 napięć zasilających nie ma żadnego wpływu na poziom asymetrii prądów fazowych stojana (i wirnika). Transformata FFT nie wykazała w otrzymanych przebiegach obecności prądów harmoniczných.

3. ANALIZA PRĄDÓW FAZOWYCH SILNIKA INDUKCYJNEGO KLATKOWEGO METODĄ KOLEJNYCH ODBIĆ

Poszukując przyczyny asymetrii amplitud prądów maszyny, analizie poddano równania opisujące ich przebieg w stanie pracy ustalonej. Na podstawie zredukowanego schematu rozkładu silnika (uwzględniającego zgodnie z implementowanym modelem harmoniczne $\nu=2$, $\rho=26$), śledząc kolejne odbicia prądów w uzwojeniach maszyn elementarnych wyznaczono postać czasową prądu stojana (i wirnika) wyrażoną w zespolonych współrzędnych osiowych (1)-(2). Metodę kolejnych odbić oraz jej zastosowanie w analizie równań maszyn poliharmoniczných przedstawia praca [1].



Rys. 6. Przykład wyznaczania prądów reakcji wtórnej stojana metodą kolejnych odbić: $\underline{i}_{s(2,26)}$ - (a),

$$\underline{i}_{s(26,2)} - (b)$$

Fig. 6. Estimation of stator currents connected with the second order armature reaction: $\underline{i}_{s(2,26)}$ - (a),

$$\underline{i}_{s(26,2)} - (b)$$

$$\underline{i}_s(t) = \underline{I}_{s(0)} e^{j\omega_s t} + \underline{I}_{s(2,26)}^* e^{-j(\omega_s - 28\Omega_m)t} e^{j28\vartheta_0} + \underline{I}_{s(26,2)}^* e^{-j(\omega_s - 28\Omega_m)t} e^{j28\vartheta_0}, \quad (1)$$

$$\underline{i}_r(t) = \underline{I}_{r(2)} e^{j(\omega_s - 2\Omega_m)t} e^{-j2\vartheta_0} + \underline{I}_{r(26)}^* e^{-j(\omega_s - 26\Omega_m)t} e^{j26\vartheta_0}, \quad (2)$$

gdzie: $\underline{i}_s(t), \underline{i}_r(t)$ - prąd stojana, prąd wirnika, ω_s - pulsacja sieci zasilającej, Ω_m - prędkość kątowna wirnika.

W świetle metody śledzenia odbić prądów w kolejnych uzwojeniach maszyn elementarnych poszczególne wyrażenia równania (1) noszą nazwy: składnik pierwszy - prąd reakcji pierwotnej, składnik drugi i trzeci - prądy reakcji wtórnej oraz w równaniu (2) składnik pierwszy i drugi - prądy reakcji pierwotnej.

Dla maszyny pracującej w ustalonym stanie zwarcia równania (1), (2) przyjmują postać (3), (4):

$$\underline{i}_s(t) = \underline{I}_{s(0)} e^{j\omega_o t} + \underline{I}_{s(2,26)}^* e^{-j\omega_o t} e^{j28\vartheta_o} + \underline{I}_{s(26,2)}^* e^{-j\omega_o t} e^{j28\vartheta_o}, \quad (3)$$

$$\underline{i}_r(t) = \underline{I}_{r(2)} e^{j\omega_o t} e^{-j2\vartheta_o} + \underline{I}_{r(26)}^* e^{-j\omega_o t} e^{j26\vartheta_o}. \quad (4)$$

Zależności (3), (4) poddane transformacji z osiowego układu współrzędnych do układu współrzędnych naturalnych wyznaczają postać czasową prądów fazowych maszyny pracującej w stanie zwarcia (5) (przedstawienie równań prądów fazowych wirnika z uwagi na znaczną ich liczbę odpowiadającą liczbie prętów klatki wirnika w artykule tym pominięto).

$$\begin{aligned} i_{s1}(t) &= \sqrt{\frac{2}{3}} I_{s(0)} \cos(\omega_o t) + \sqrt{\frac{2}{3}} I_{s(2,26)} \cos(\omega_o t - 28\vartheta_o) + \sqrt{\frac{2}{3}} I_{s(26,2)} \cos(\omega_o t - 28\vartheta_o), \\ i_{s2}(t) &= \sqrt{\frac{2}{3}} I_{s(0)} \cos(\omega_o t - \frac{2\pi}{3}) + \sqrt{\frac{2}{3}} I_{s(2,26)} \cos(\omega_o t - \frac{4\pi}{3} - 28\vartheta_o) + \sqrt{\frac{2}{3}} I_{s(26,2)} \cos(\omega_o t - \frac{4\pi}{3} - 28\vartheta_o), \\ i_{s3}(t) &= \sqrt{\frac{2}{3}} I_{s(0)} \cos(\omega_o t - \frac{4\pi}{3}) + \sqrt{\frac{2}{3}} I_{s(2,26)} \cos(\omega_o t - \frac{2\pi}{3} - 28\vartheta_o) + \sqrt{\frac{2}{3}} I_{s(26,2)} \cos(\omega_o t - \frac{2\pi}{3} - 28\vartheta_o). \end{aligned} \quad (5)$$

Analiza postaci równań opisujących przebiegi czasowe prądów stojana (i wirnika), wyrażonych we współrzędnych naturalnych (5) pozwala wyjaśnić przyczynę asymetrii ich amplitud, a także przedstawić fizykalną interpretację zaobserwowanego zjawiska.

W stanie zwarcia maszyny prądy reakcji pierwotnej wirnika $i_{r(2)}$, $i_{r(26)}$ i reakcji wtórnej stojana $i_{s(2,26)}$, $i_{s(26,2)}$ pulsują z częstotliwością sieci zasilającej. Transformata FFT poszczególnych przebiegów fazowych $i_{si}(t)$, $i_{ri}(t)$ pozornie sugeruje brak przepływu prądów wyższych harmonicznnych w uzwojeniach maszyny. Analiza budowy równań (5) pozwala jednak zauważyć, że prądy te płyną, a generowane są odpowiednio za pośrednictwem harmonicznnych 2, 26 oraz par harmonicznnych (2,26), (26,2) (słuszność powyższego spostrzeżenia znajduje uzasadnienie w tzw. charakterystykach częstotliwościowo – prędkościowych przedstawionych w pracy [4]).

W najprostszym możliwym przypadku, gdy kąt $\vartheta_o = 0$, zauważyć można, że dla drugiej i trzeciej fazy prądu stojana (5) przebiegi $i_{s(0)}$, $i_{s(2,26)}$, $i_{s(26,2)}$ przesunięte są wzajemnie o kąt $2\pi/3$. Przesunięcie to powoduje pomniejszenie wypadkowej amplitudy prądu fazowego $i_{s2}(t)$, $i_{s3}(t)$ względem amplitudy prądu fazy pierwszej, gdzie wskazane przesunięcie kątowe nie występuje i suma przebiegów składowych przyjmuje wartość maksymalną - rys.3. Dla przypadku, gdy kąt $\vartheta_o \neq 0$, wartość maksymalną przyjąć może amplituda fazy drugiej lub trzeciej. Należy jednak podkreślić, że wówczas pozostałe prądy w swoich amplitudach nie osiągną wartości maksymalnej, a zatem asymetria amplitud pozostaje. Podobna zależność obowiązuje dla prądów wirnika.

W ten sposób wyjaśnienie zaobserwowanego zjawiska zyskuje prostą interpretację fizyczną: w stanie zwarcia silnika indukcyjnego klatkowego asymetria amplitud prądów fazowych stojana wynika z przesunięcia kąтового pomiędzy przebiegami związanymi z podstawową harmoniczną rozkładu czasowo-przestrzennego pola w szczelinie powietrznej maszyny a przebiegami pobudzonymi za pośrednictwem wyższych harmonicznych przestrzennych. Odształcenie pola przepływu w szczelinie powietrznej maszyny powoduje przesunięcie kątowe prądów harmonicznych względem prądów związanych z harmoniczną podstawową o kąt fazowy $2\pi/3$. W zależności od kąta początkowego położenia wirnika prądy te powiększają lub pomniejszają wypadkową amplitudę prądu fazowego stojana.

4. PODSUMOWANIE

Zjawisko asymetrii amplitud prądów fazowych stojana w stanie zwarcia silnika indukcyjnego klatkowego (rys. 1) jest związane z występowaniem wyższych harmonicznych w czasowo-przestrzennym rozkładzie pola w szczelinie powietrznej maszyny. Poszukując przyczyny asymetrii badaniom symulacyjnym poddano model poliharmoniczny maszyny. Badania wykazały zgodność jakościową zjawiska asymetrii amplitud prądów fazowych pomiędzy wynikami pomiarów a wynikami symulacji komputerowej. Stwierdzono brak wpływu kąta fazowego napięcia zasilającego na występowanie asymetrii. Zmiana położenia kąтового wirnika wpływa na amplitudy prądów w poszczególnych fazach, nie prowadzi jednak do ich symetryzacji. Drogą teoretycznej analizy prądów stojana i wirnika wyznaczonych we współrzędnych osiowych, a następnie przetransformowanych do fazowego układu współrzędnych, wskazano przyczynę asymetrii oraz zinterpretowano ją fizycznie. W stanie zwarcia silnika indukcyjnego klatkowego asymetria amplitud prądów fazowych maszyny wynika z przesunięcia kąтового pomiędzy przebiegami związanymi z podstawową harmoniczną rozkładu czasowo-przestrzennego pola w szczelinie powietrznej maszyny a przebiegami pobudzonymi za pośrednictwem wyższych harmonicznych przestrzennych. Odształcenie pola przepływu w szczelinie powietrznej maszyny powoduje przesunięcie kątowe prądów harmonicznych względem prądów związanych z harmoniczną podstawową. W zależności od kąta początkowego położenia wirnika prądy te powiększają lub pomniejszają amplitudę prądów fazowych, ale suma ich wartości chwilowych zawsze równa się zeru. Występowanie asymetrii amplitud prądów fazowych może być wykorzystane jako miara poliharmoniczności pola magnetycznego w szczelinie maszyny lub jako estymata położenia kąтового wirnika.

LITERATURA

1. Kluszczyński K.: Momenty pasożytnicze w maszynach asynchronicznych, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, s. ELEKTRYKA, z.102, Gliwice 1986.
2. Kluszczyński K., Miksiewicz R.: *Modelowanie 3-fazowych maszyn indukcyjnych przy uwzględnieniu wyższych harmonicznych przestrzennych przepływu*, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, s. ELEKTRYKA, z.142, Gliwice 1995.
3. Trawiński T., Kluszczyński K.: *Porównanie różnych technik i metod rozwiązywania zredukowanych modeli poliharmonicznych maszyn indukcyjnych*, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, s. ELEKTRYKA, z.173, Gliwice 2000.
4. Trawiński T., Pilch Z.: „Wpływ zmiany częstotliwości sieci zasilającej na pulsację elektromagnetycznych momentów przemiennych w indukcyjnych silnikach klatkowych”, V Krajowa Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym SENE'2001, Łódź – Arturówek, Materiały Konferencyjne, tom II, str. 635-640, 14-16 listopad 2001 r.

Recenzent: Dr hab. inż. Krystyna Macek-Kamińska prof. Pol. Opolskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 25 maja 2004 r.

Abstract

During standard procedure of induction squirrel-cage motors with straight rotor bars equivalent circuit parameter identification, the high asymmetry of stator currents sometimes is observed. In this article, basing on so-called poliharmonic model of an induction machine, the asymmetry of stator currents is cleared up. In chapter 2 results of computer simulation obtained for an induction motor with constructional parameters: stator/rotor slots $Q_s/Q_r=36/28$ and pole pairs $p=2$ working at stall are presented. Analysis of simulation results of poliharmonic models of an induction machine reveals stator phase current amplitude asymmetry. The current amplitude asymmetry reaches about 10-15% of maximum stator phase current. In chapter 3, the time varying stator and rotor currents from which teaks into consideration currents induced by 2nd and 26th space harmonics is given in complex axes coordinates. Assuming angular speed $\Omega_m=0$ – stall, the stator currents in natural coordinates is obtained. Its time form in Eqn (5) is given. As it shows the phase currents connected with 26th space harmonics are arranged in space with phase angle shift equals $2\pi/3$, but have opposite orientation according to currents induced by 2nd space harmonics. This phenomenon leads to stator phase currents amplitude asymmetry.