

Marian NOGA¹⁾, Lesław GOŁĘBIOWSKI²⁾, Damian MAZUR³⁾

OBLICZENIA PRĄDÓW WIRNIKA W SILNIKU INDUKCYJNYM (SILNIK Z EKSCENTRYCZNOŚCIĄ STATYCZNĄ, DYNAMICZNĄ)

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyższe harmoniczne prądów prętów wirnika silnika asynchronicznego w funkcji prędkości obrotowej. Do obliczeń tych zależności wykorzystano model 2.5D zbudowany za pomocą metody elementów skończonych. Przeprowadzono analizę harmonicznych. Otrzymane wyniki przedstawiono w funkcji prędkości obrotowej maszyny zarówno na wykresach trój- jak i dwuwymiarowych. Z wykresów tych odczytano parametry poszczególnych harmonicznych. Na ich podstawie dokonano identyfikacji pochodzenia tych harmonicznych jako współdziałanie układu prądu stojana z indukcją magnetyczną w szczelinie powietrznej, pochodzącą od wirnika. Zwrócono szczególną uwagę na wpływ nasycenia żelaza oraz ekscentryczności wirnika na te przebiegi.

CALCULATION OF ROTOR CURRENTS IN INDUCTION MOTOR WITH ROTOR ECCENTRICITY

Summary. Parasitic torque and rotor current harmonics as a function of the asynchronous motor rotational speed are presented in this paper. The analysis of torque and stator current harmonics has been performed with the computer simulation. The obtained results as a function of the electric motor speed are presented both on 2D and 3D graphs. The parameters for each particular harmonic have been found with these graphs. These graphs have enabled to identify the origins of these harmonics being the co-action of the stator current MMF and the magnetic induction from the rotor in the airgap. Particular attention has been paid to the problem of the iron saturation influence on these harmonics. The harmonics under study have been taken into consideration because they are present on the mentioned above graphs as a function of the speed. Their origin has been also indicated on the graphs made as an extension of the Kluszczynski analytic/graphic diagrams.

1. OBLICZENIA PRĄDU WIRNIKA W SILNIKU BEZ USZKODZEŃ I Z 28 PRĘTAMI WIRNIKA

Przedstawianą metodą były obliczane przebiegi prądów i momentu silnika asynchronicznego Sg90S-4 z aluminiową kłatką produkcji F.S.E. „TAMEL” w Tarnowie. Jest to silnik o mocy $P=1.1\text{kW}$ o napięciu znamionowym $U_n=380\text{V}$ (gwiazda) i prądzie znamionowym $I_n=2.8\text{A}$. Prędkość znamionowa $n=1415\text{ obr/min}$, ilość zębów stojana 36 i ilość zębów wirnika 28. Długość maszyny 0.07m, $\cos\varphi=0.8$. Przedstawiony program pozwolił obliczyć również wyższe harmoniczne przestrzenne sił radialnych i momentu elektromagnetycznego. Mogły być również uwzględniane uszkodzenia takie jak pęknięcie pręta czy pierścienia oraz ekscentryczność statyczna, dynamiczna i mieszana wirnika. Opis działania programu jest zawarty w [1].

1.1. Identyfikacja harmonicznych prądów prętów wirnika

Po dokonaniu obliczeń przebiegów prądów wirnika poddano je rozłożeniu w szereg Fouriera. Obliczenia symulowały nawrót maszyny z małym przyspieszeniem. Amplitudy harmonicznych można było przedstawić w zależności od częstotliwości oraz prędkości obrotowej jak na rys. 5. Maksymalne wartości harmonicznych zobrazowane na rys. 1 w funkcji ich częstotliwości w zależności od prędkości obrotowej tworzą charakterystyczne krzywe V, które ułatwiają określenie źródeł generacji tych harmonicznych. Identyfikację tych harmonicznych można przedstawić poniższym rozumowaniem:

¹⁾ Prof. dr hab. inż. Akademickie Centrum Obliczeniowe ACK „CYFRONET”, ul. Nawojki 11, 30-950 Kraków, Poland. email: yymnoga@cyf-kr.edu.pl

²⁾ Dr hab. inż. Politechnika Rzeszowska, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, Poland. e-mail: yegolebi@cyf-kr.edu.pl

³⁾ Mgr inż. Politechnika Rzeszowska, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, Poland. e-mail: mazur@prz.rzeszow.pl

Jeśli harmoniczną twornik-stojan oznaczymy przez $v = (6c_1 \pm 1)p$, twornik-wirnik przez $\mu = c_2 Z_2 \pm ep$, to harmoniczną przestrzenną układu prądu stojana w szczelinie powietrznej jest proporcjonalna do:

$$\sin(v\alpha - \omega_1 t), \quad (1)$$

gdzie: α - kąt mierzony w układzie związanym ze stojanem, ω_1 - pulsacja sieci, a t - czas.

Podobnie współdziałająca z nią harmoniczną przestrzenną układu prądu wirnika jest proporcjonalna do:

$$\sin[\mu\alpha_r \pm (\omega_1 - p\omega_r)t], \quad (2)$$

gdzie: α_r - kąt mierzony w układzie związanym z wirnikiem, ω_r - prędkość obrotu wirnika. Między kątem

α i α_r istnieje związek: $\alpha_r = \alpha - \omega_r t$, dlatego harmoniczną układu prądu wirnika można zapisać jako proporcjonalną do:

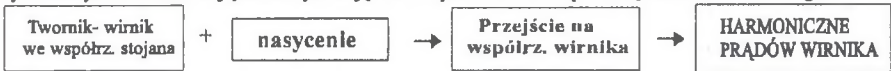
$$\sin[\mu\alpha \pm (\omega_1 \pm c_2 Z_2 \omega_r)t], \quad (3)$$

gdzie Z_2 to ilość prętów (faz) wirnika.

Na harmoniczną tę ma wpływ nasycenie obwodu magnetycznego, które można uwzględnić współczynnikiem:

$$\sin[2 \times c_3 (p \times \alpha - \omega_1 \times t)].$$

Powyższe czynniki ułatwiające identyfikację można przedstawić za pomocą schematu blokowego:



Do równanie twornik-wirnik określonego we współrzędnych stojana dodawano człon uwzględniający nasycenie, a następnie dokonywano przejścia na współrzędne wirnika. W ten sposób dla poszczególnych harmonicznym otrzymywano końcowe równanie prądów wirnika, dla którego obliczana była prędkość synchroniczna i nachylenie charakterystyki krzywych V przedstawione na rys.1. Również w tab. 1. zostały określone częstotliwości prądów wirnika przy prędkości synchronicznej równej $\omega_r = \omega_1/2$. Z tab. 1 wynika, iż są to częstotliwości różniące się między sobą o 300Hz z zakresu od 0Hz do 1200Hz, zidentyfikowane na podstawie schematu analityczno-graficznego z rys. 6.

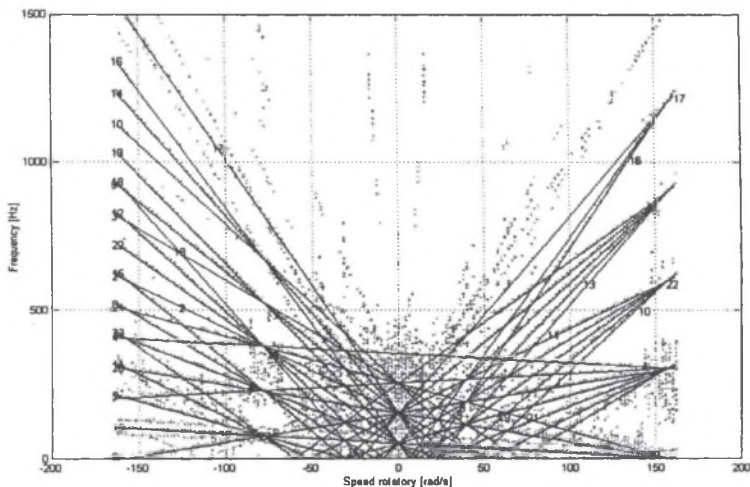
Tablica 1

Fragment identyfikacji harmonicznym prądów prętów wirnika w funkcji prędkości obrotowej w silniku bez uszkodzeń z 28 prętami

Ip	C ₁	C ₂	e	Twornik-wirnik	C ₃	we współrz. wirnika	Nachylenie	Pręđ. synchr.	f[Hz] $\omega_r = \omega_1/2$	Nr linii
1	0	1	1	$\sin(26\alpha + \omega_1 t - 28\omega_1 t)$	0	$\sin(26\alpha_r + \omega_1 t - 2\omega_1 t)$	0,32	157	0	19
5	0	1	1	$\sin(26\alpha + \omega_1 t - 28\omega_1 t)$	-1	$\sin(22\alpha_r + 3\omega_1 t - 6\omega_1 t)$	0,95	157	0	20
9	0	1	1	$\sin(26\alpha + \omega_1 t - 28\omega_1 t)$	-2	$\sin(18\alpha_r + 5\omega_1 t - 10\omega_1 t)$	1,59	157	0	21
25	1	1	5	$\sin(18\alpha - \omega_1 t - 28\omega_1 t)$	2	$\sin(26\alpha_r - 5\omega_1 t - 2\omega_1 t)$	0,32	-785	300	7
23	1	1	5	$\sin(18\alpha - \omega_1 t - 28\omega_1 t)$	1	$\sin(22\alpha_r - 3\omega_1 t - 6\omega_1 t)$	0,95	-157	300	6
21	1	1	5	$\sin(18\alpha - \omega_1 t - 28\omega_1 t)$	0	$\sin(18\alpha_r - \omega_1 t - 10\omega_1 t)$	1,59	-31,4	300	5
33	2	1	3	$\sin(34\alpha - \omega_1 t - 56\omega_1 t)$	1	$\sin(38\alpha_r - 3\omega_1 t - 18\omega_1 t)$	2,86	-52,33	600	11
27	2	1	3	$\sin(34\alpha - \omega_1 t - 56\omega_1 t)$	0	$\sin(34\alpha_r - \omega_1 t - 22\omega_1 t)$	3,5	-14,27	600	8
35	2	1	3	$\sin(34\alpha - \omega_1 t - 56\omega_1 t)$	-1	$\sin(30\alpha_r + \omega_1 t - 26\omega_1 t)$	4,14	12,08	600	22
45	3	2	3	$\sin(50\alpha - \omega_1 t - 84\omega_1 t)$	2	$\sin(58\alpha_r - 5\omega_1 t - 26\omega_1 t)$	4,14	-60,38	900	23
43	3	2	3	$\sin(50\alpha - \omega_1 t - 84\omega_1 t)$	1	$\sin(54\alpha_r - 3\omega_1 t - 30\omega_1 t)$	4,77	-31,4	900	15
50	4	2	5	$\sin(66\alpha - \omega_1 t - 112\omega_1 t)$	1	$\sin(70\alpha_r - 3\omega_1 t - 42\omega_1 t)$	6,68	-22,43	1200	18
46	4	2	5	$\sin(66\alpha - \omega_1 t - 112\omega_1 t)$	-1	$\sin(62\alpha_r + \omega_1 t - 50\omega_1 t)$	7,96	6,28	1200	16

Nachylenie w silniku bez uszkodzeń z 28 prętami w prądach wirnika zmienia się co $k \approx 0,65$ dla konkretnej częstotliwości wirnika. Nachylenie zmienia się w zależności od nasycenia, a częstotliwości przy prędkości synchronicznej $\omega_1/2$ mają jednakowe wartości *niezależnie od nasycenia, tworząc wiązki harmonicznym*.

Na rys. 1 są przedstawione częstotliwości harmonicznym prądów wirnika w funkcji prędkości obrotowej w silniku bez uszkodzeń. Układają się one w charakterystyczne krzywe V , mające węzły dla prędkości obrotowej np. $\omega_1/2$ czy $-\omega_1/4$. Równania identyfikujące te harmonicznym wraz ze współczynnikiemami określającymi: c_1 - harmoniczną twornik-stojan, c_2 - harmoniczną twornik-wirnik, c_3 - harmoniczną nasycenia są podane w tab. 1.



Rys. 1. Przebieg częstotliwości harmoniczných prądów prętów wirnika w funkcji prędkości obrotowej w silniku bez uszkodzeń z 28 prętami

Fig. 1. Harmonic frequency pattern of rotor currents us rotational speed - motor free of damages with 28 bars

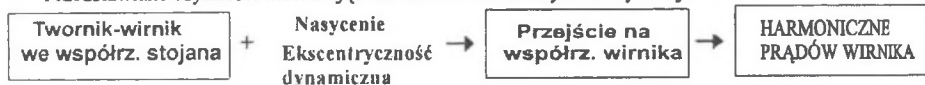
2. OBLICZENIA PRĄDU WIRNIKA DLA SILNIKA Z EKSCENTRYCZNOŚCIĄ DYNAMICZNĄ I Z 28 PRĘTAMI WIRNIKA

Schemat blokowy identyfikacji podany poprzednio należy teraz uzupełnić efektem ekscentryczności dynamicznej.

1. Dodając ekscentryczność dynamiczną $ecc = k(\alpha - \omega_r t) \Rightarrow \alpha = \alpha_r + \omega_r t \Rightarrow ecc = k\alpha_r$, gdzie $k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$ do równania wirnika z nasyceniem, można było zauważyć, iż:

- ✓ Zwiększa się rząd harmoniczných $k\alpha$ przy dodatnich wartościach ekscentryczności w stosunku do silnika bez uszkodzeń lub zmniejsza przy ujemnych wartościach rzędu ekscentryczności.
- ✓ Nachylenie zmienia się w zależności od nasycenia c_3 o $2 p c_3 / (2 \pi)$, ale jest takie samo jak dla silnika bez uszkodzeń. Ekscentryczność dynamiczna po przejściu na współrzędne wirnika nie wprowadza czynników związanych z ω_r i ω_1 .

Przedstawiane czynności można ująć na schemacie blokowym identyfikacji:



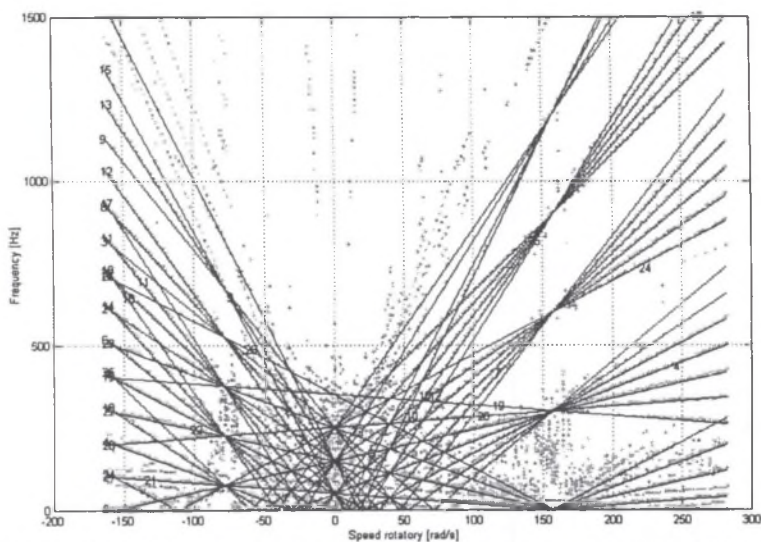
Przykład: Wpływ nasycenia na częstotliwość harmonicznę prądu wirnika przy $\omega_r = \omega_1/2$

$$\sin 2c_3(p\alpha - \omega_1 t) \Rightarrow \alpha = \alpha_r + \omega_r t \Rightarrow \sin 2c_3(p\alpha_r + p\omega_r t - \omega_1 t)$$

gdy $\omega_r = \omega_1/2$,

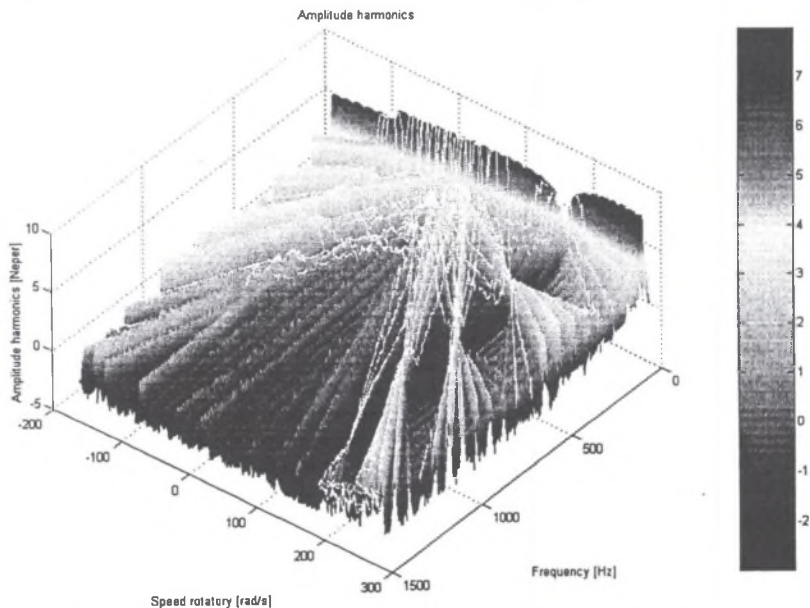
to wpływ nasycenia wynosi $\sin 2c_3(p\alpha_r)$ i nie zależy od czasu t .

- ❖ Częstotliwości przy prędkości synchronicznej $\omega_r = \omega_1/2$ mają jednakowe wartości niezależnie od nasycenia oraz następnych większych wartości ekscentryczności dynamicznej ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$). Częstotliwości są takie same jak w silniku bez uszkodzeń. Wiązki tworzone przy prędkości $\omega_r = \omega_1/2$ dadzą się więc wytłumaczyć działaniem nasycenia.



Rys. 2. Przebieg częstotliwości harmonicznych prądów prętów wirnika w funkcji prędkości obrotowej w silniku z 28 prostymi prętami i z ekscentrycznością dynamiczną

Fig. 2. Frequency of the rotor bar currents us rotational speed in the motor with 28 straight bars and dynamic eccentricity

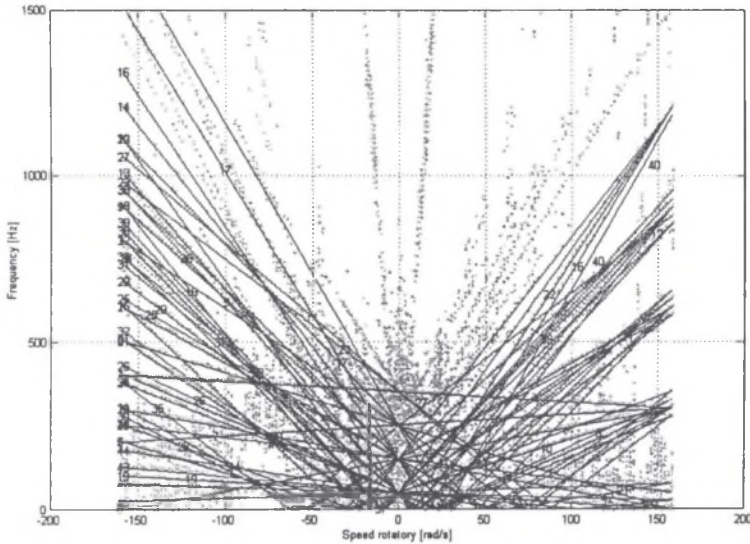


Rys. 3. Moduły harmonicznych prądów prętów wirnika w funkcji prędkości obrotowej w silniku z ekscentrycznością dynamiczną i z 28 prostymi prętami

Fig. 3. Modules of the harmonics of the rotor bar currents us rotational speed the motor with 28 straight bars and dynamic eccentricity

3. OBLICZENIA PRĄDU WIRNIKA DLA SILNIKA Z EKSCENTRYCZNOŚCIĄ STATYCZNĄ I Z 28 PRĘTAMI WIRNIKA

Z rys. 5 można odczytać częstotliwości prądów wirnika przy prędkości synchronicznej równej $\omega_r = \omega_1 / 2$ dla silnika z ekscentrycznością statyczną. Z rys. 6 wynika, że są to częstotliwości harmonicznych prądów prętów wirnika (lub ich moduły) silnika z ekscentrycznością statyczną, które różnią się od częstotliwości silnika bez uszkodzeń czy z ekscentrycznością dynamiczną o $k \cdot 25$ Hz ($k = \pm 1, \pm 2, \pm 3$). Sposób generacji tych harmonicznych prądów wirnika został przedstawiony na schemacie analityczno-graficznym na rys. 6.



Rys. 4. Przebieg częstotliwości harmonicznych prądów prętów wirnika w funkcji prędkości obrotowej w silniku z 28 prostymi prętami i z ekscentrycznością statyczną

Fig. 4. Harmonic frequencies of the currents in rotor bars vs the rotational speed in the motor with 28 straight bars and static eccentricity

Uwzględnienie ekscentryczności statycznej polega na dodaniu członu $ecc = \sin k\alpha = \sin k(\alpha_r + \omega_r t)$, gdzie $k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$ do zależności identyfikujących równania prądu wirnika przy nasyceniu żelaza. Można było zauważyć, iż:

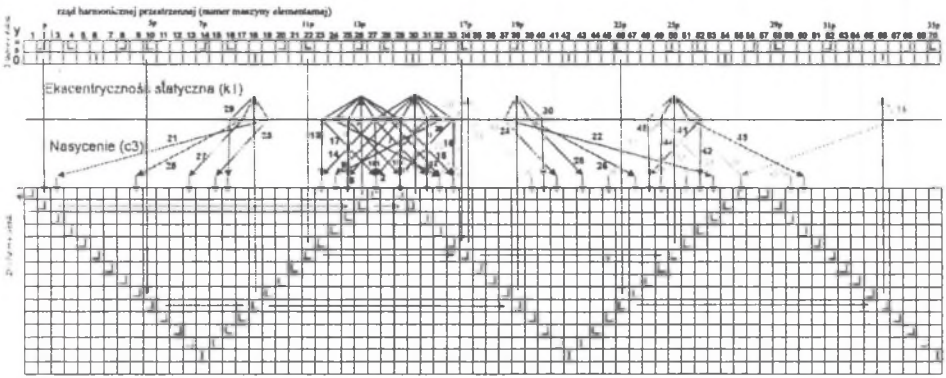
- ✓ Zwiększa się rząd harmonicznych $k\alpha$ (rząd taki sam jak przy ekscentryczności dynamicznej).
- ✓ Nachylenie charakterystyki zmienia się w zależności od nasycenia, ale różni się od nachylenia charakterystyki silnika bez uszkodzeń. Ekscentryczność statyczna po przejściu na współrzędne wirnika wprowadza czynnik związany z $k \omega_r t$, który powoduje zmianę nachylenia charakterystyki.

Częstotliwości przy prędkości synchronicznej $\omega_r = \omega_1 / 2$ mają jednakowe wartości dla konkretnej harmonicznej ekscentryczności statycznej ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$) (niezależnie od nasycenia) i różnią się przy kolejnym k o 25 Hz. Częstotliwości te różnią się od częstotliwości silnika bez uszkodzeń.

Przykład obliczania częstotliwości harmonicznych prądów prętów wirnika przy prędkości $\omega_r = \omega_1 / 2$ dla różnych rzędów ekscentryczności statycznej $ecc = k$ oraz przy różnych nasyceniach c_3 .

*exc. stat. $\sin k\alpha = \sin k(\alpha_r + \omega_r t)$, zmiana częstotliwości o $k \omega_r$ [rad/s], gdy $\omega_r = \omega_1 / 2$
 $k \omega_1 / 2 \Rightarrow k = 1, 1 \cdot \omega_1 / (2 \cdot 2\pi) = 314 / (2 \cdot 2\pi) = 25 \text{ Hz}$*

Ekscentryczność statyczna powoduje więc rozmycie węzłów krzywych V o wielokrotność 25 Hz.



Rys. 5. Schemat analityczno-graficzny generacji harmonicznych prądów wimika w silniku indukcyjnym z ekscentrycznością statyczną i z 28 prostymi prętami

Fig. 5. Trajectories of generating harmonics of the rotor bar currents in the motor with 28 bars and static eccentricity—these trajectories slope shows the magnetic circuit saturation and eccentricity influence

Tablica 2

Częstotliwości harmonicznych prądów wimika przy prędkości obrotowej $\omega_r = \omega_1 / 2$

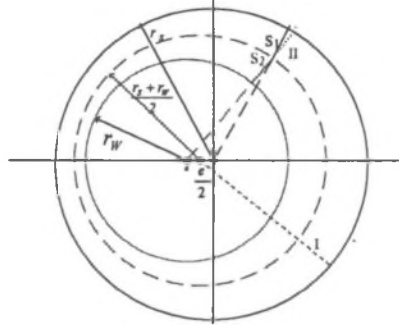
Rząd eksk. k	Dla ekscentryczności statycznej						
	0	1	2	3	3	75	
f [Hz]	0	25	25	50	50	75	75
f [Hz]	300	325	275	350	250	375	225
f [Hz]	600	625	575	650	550	675	525
f [Hz]	900	825	775	850	750	875	725
f [Hz]	1200	1225	1175	1250	1150	1275	1125

przy nasyceniu $c_3=0, \pm 1, \dots, \pm 8$

Częstotliwości prądów prętów wimika nie zależą od liczby prętów w wimiku (tzn. w obliczeniach silników z 28, 26 i 24 prętami nie zauważono różnic między harmonicznymi prądów prętów wimika). Szukając częstotliwości prądów wimika przez podstawianie kolejnych równań wimika z różną liczbą prętów otrzymujemy takie same częstotliwości prądów wimika dla silników z 28, 26 i 24 prętami w wimiku. Te częstotliwości są zależne od ekscentryczności dynamicznej, a w szczególności od ekscentryczności statycznej. Przy różnej liczbie prętów silniki różnią się między sobą rzędami harmonicznych, lecz prędkości synchroniczne i częstotliwości mają takie same bez względu na to, czy są z ekscentrycznością, czy bez uszkodzeń. Zauważono, że nachylenie charakterystyk harmonicznych prądów prętów wimika ma przyrost $c_0 k \cdot 0.64$, gdzie $k = 1, 2, 3$ dla konkretnej częstotliwości wimika w silniku z 28 prętami bez uszkodzeń i z ekscentrycznością dynamiczną. Natomiast dla silnika z ekscentrycznością statyczną dostajemy dodatkowo człony $k \cdot \omega_1$, czyli przyrost nachylenia harmonicznej o $1/2\pi = 0.16$ Hz. W silniku bez uszkodzeń lub z ekscentrycznością dynamiczną nie ma tego członu (charakterystycznego dla ekscentryczności statycznej), ale we wszystkich przypadkach działa nasycenie, które zmienia nachylenie o przyrost $2c_3 p / 2\pi = 4/2\pi = 0.64$, $(\sin 2c_3(p\alpha - \omega_1 t) \Rightarrow \sin 2c_3(p\alpha_r + p\omega_r - \omega_1 t))$. Można również zauważyć, że tworzą się wiązki harmonicznych także przy prędkości $\omega_{r2} = -\omega_1/4$. Są to również harmoniczne (np. prądu wimika silnika z ekscentrycznością dynamiczną, gdy $Z_2 = 28$) mające te same częstotliwości przy podanej prędkości $\omega_{r2} = -\omega_1/4$. Jeśli zauważy się, że najmniejsze nachylenie charakterystyk wynosi $2/2\pi = 0.32$, to przy różnicy prędkości $\omega_{r1} - \omega_{r2} = 3/4\omega_1$ otrzymujemy częstotliwość nowej wiązki 75 Hz dla prędkości ω_{r2} (patrz rys. 3). Ogólnie nachylenie charakterystyk w rozważanym przypadku można zapisać $2/2\pi \cdot (2i \pm 1)$, gdzie $i = 0, 1, 2$, a więc nowe częstotliwości przy prędkości ω_{r2} mogą się różnić o 150 Hz. Występują więc 2 razy częściej niż przy prędkości ω_{r1} . Przyczynia się do tego również rozważany wcześniej „konglomerat” ekscentryczności z nasyceniem, który nie zmienia drogi identyfikacji (współczynnik przy kącie α równy jest 0), ale przy prędkości ω_{r2} daje również różnicę 150 Hz. A więc do wiązek przy ω_{r1} czy ω_{r2} mogą wchodzić harmoniczne

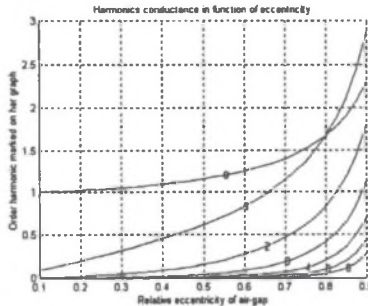
z różnych wiązek przy drugiej częstotliwości ω_{r1} czy ω_{r2} . Porównując rys. 3 oraz 5 zauważa się, że punkty przecięcia harmoniczných prądów wirnika dla prędkości ω_{r1} czy ω_{r2} są wyraźnie jednopunktowe dla ekscentryczności dynamicznej. Przy występowaniu ekscentryczności statycznej węzły te stają się wielopunktowe i występują co 25 Hz.

4. WPŁYW WARTOŚCI AMPLITUD HARMONICZNYCH PRZEWODNOŚCI SZCZELINY WYWOŁANYCH EKSCENTRYCZNOŚCIĄ NA IDENTYFIKACJĘ HARMONICZNYCH



Rys. 6. Sposoby modelowania szczeliny powietrznej do obliczeń testowych
 Fig. 6. Ways of modelling the air gap for test calculations

Pierwszy testowy (rys. 6) sposób modelowania szerokości szczeliny powietrznej polega na wykreśleniu promienia od punktu leżącego w połowie między środkiem stojana a środkiem wirnika. Szerokość szczeliny to odcinek s wyznaczony na tym promieniu przez powierzchnię stojana i wirnika. Natomiast drugi sposób modelowania szczeliny powietrznej polega na wykreśleniu okręgu w szczelinie, leżącego dokładnie między stojanem a wirnikiem. Jego środek to punkt leżący w połowie między środkami stojana a wirnika. Szerokość szczeliny jest w tym przypadku równa sumie $s1$ (czyli odcinka między powierzchnią wirnika a tym dodatkowym okręgiem wyznaczonym na promieniu ze środka wirnika) oraz $s2$ (czyli odcinka między powierzchnią stojana, a tym dodatkowym okręgiem wyznaczonym na promieniu ze środka stojana). Jeśli wymiary maszyny elektrycznej są właściwe, między tak wyznaczonymi szerokościami szczeliny nie zauważa się różnic. Dokonano rozkładu Fouriera odwrotności tak obliczonej szczeliny powietrznej. Otrzymane w ten sposób harmoniczne przewodności magnetycznej szczeliny powietrznej są przedstawione na rys. 7 w funkcji względnej ekscentryczności.



Rys.7. Względna wartość kilku amplitud harmoniczných przewodności magnetycznej w funkcji względnej wartości ekscentryczności szczeliny powietrznej

Fig. 7. The relative value of several amplitudes of the permeance harmonics vs. the relative value of the air gap eccentricity
 Inne stosowane w literaturze [56, 138] sposoby liczenia szczeliny dały w efekcie tę samą przewodność. Przedstawione na rys. 7 wykresy potwierdziły znany wcześniej przebieg harmoniczných 1 i 2 przewodności szczeliny. Zwraca uwagę powiększanie się wraz z ekscentrycznością harmoniczných przewodności zerowego

rzędu. Odpowiada to jakby pomniejszeniu się wraz z ekscentrycznością średniej zastępczej wartości szczeliny. Efekt ten powiększa się szczególnie dla dużych ekscentryczności, co było obserwowane w wynikach pomiarów i obliczeń. Harmoniczne prądu czy momentu właściwe dla silnika bez uszkodzeń występują również dla silnika z ekscentrycznością, lecz ich amplituda powiększa się, ponieważ harmoniczna przewodności magnetycznej szczeliny zerowego rzędu wraz z ekscentrycznością jest większa. Efekt ten może być dlatego pomocny w diagnostyce występowania ekscentryczności przez pomiar poziomu amplitud określonych harmonicznych.

LITERATURA

1. Gołębiowski L., Noga M., Mazur D.: Harmoniczne momentu i prądu silnika asynchronicznego. XXXVI Między-narodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, SME 2000, nr 50, Wrocław 2000, 47-63.
2. Gołębiowski L., Mazur D.: Identification of the torque and stator current harmonics in the induction motor. ICEM 2000, Espoo Finland, August 2000, 295-298.
3. Ho S.L., Fu W.N.: Comprehensive approach to the solution of direct-coupled Multislice model of skewed rotor induction motors using time-stepping eddy-current finite element method. *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 33, no. 3, 1997, 2265-2273.
4. Kameari A.: Calculation of transient 3D eddy current using edge elements. *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 26, no. 2, 1997, 488-492.
5. Kluszczyński K., Mikiewicz R.: Momenty pasożytnicze w indukcyjnych silnikach klatkowych. Politechnika Śląska, Gliwice 1995.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Kazimierz Zakrzewski

Wpłynęło do Redakcji dnia 10 lutego 2001 r.

Abstract

The model described in [1] is applied to calculations. To consider the skew of the rotor bars the whole machine is divided along its whole length into 7 elementary machines of straight but offset against each other bars. The magnetic field in the cross-section of each elementary machine is calculated by means of the finite element method. The iron saturation of the magnetic circuit is reflected with the polynomial relation of the magnetic field strength to the magnetic induction. A 9-th order polynomial is used. The presented previously method was used for time calculations of the time waveforms of currents and torques for the Sg90S-4 with aluminium cage manufactured by Electric Motor Manufacturing (F.S.E.) "TAMEL" in Tarnów, Poland. The motor operating data are as follows: the motor output $P=1.1\text{kW}$, the rated voltage $U_N = 380\text{volts}$, the rated current $I_N = 2.8\text{ amps}$, the rated speed is $n=1415\text{ rpm}$. The computational program presented here also produced the spatial harmonics of radial forces and electromagnetic torque of higher order. The failures of bar or ring fracture as well as static, dynamic and mixed eccentricity were also considered. The best results for the harmonic analysis were obtained at lower speeds. But from the point of view of the computational speed the speed of 20 rad/s^2 appeared to be the most suitable. The electromagnetic torque and current values in time obtained this way are subjected to harmonic analysis by means of the FFT method. The frequencies of the rotor bar currents do not depend on the number of bars in the rotor (i.e. no differences between the harmonics of the currents in the rotor bars were noticed in the calculation results for the motors with 28, 26 i 24 bars). When seeking the frequencies of the rotor currents by substituting the various number of bars to each separate rotor equation the same frequencies of the rotor currents are obtained for the motors with 28, 26 and 24 rotor bars. These frequencies depend on the dynamic eccentricity, and even more on the static one. For various bar numbers the motors vary by the harmonic orders, however the synchronous speeds and frequencies are the same for each particular motor either with eccentricity or free of defects.