

SYMPTOMY ASYMETRII WIRNIKA W UKŁADACH NAPĘDOWYCH O ZMIENNEJ PRĘDKOŚCI KĄTOWEJ WAŁU Z SILNIKIEM KLATKOWYM

Piotr KOŁODZIEJEK

Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 58 347 60 76 e-mail: piotr.kolodziejek@pg.gda.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono badania eksperymentalne symptomów asymetrii wirnika silnika indukcyjnego klatkowego wynikającej z uszkodzenia. Uwzględniono współczesne struktury układów sterowania napędami o zmiennej prędkości kątowej wału, sterowania z pomiarem prędkości kątowej wału oraz sterowania bezczujnikowego. Wyniki przeprowadzonych badań znajdują zastosowanie w diagnostyce układu napędowego. Wybór sygnału diagnostycznego istotnie wpływa na możliwości detekcji uszkodzenia we wczesnej fazie rozwoju lub przy ograniczonym obciążeniu silnika. Przedstawiono badania wrażliwości zmiennych stanu oraz zmiennych sterujących na asymetrię wirnika.

Słowa kluczowe: silnik klatkowy, uszkodzenie wirnika, sterowanie bezczujnikowe, analiza wrażliwości.

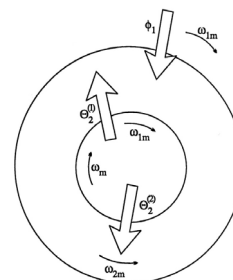
1. WSTĘP

Asymetria wewnętrzna wirnika silnika klatkowego jest przedmiotem badań prowadzonych od czasu skonstruowania pierwszej maszyny. W literaturze opisano kilkadziesiąt metod eksploatacyjnych i laboratoryjnych, które opracowane zostały przy założeniu badania maszyny bez dołączonego układu regulacji. Większość opracowanych metod nie uwzględnia zasilania maszyny z przekształtnika, które wprowadza dodatkowe zagadnienia do analizy. Rozwój układów napędowych w kierunku zasilania z przekształtników oraz stosowania zaawansowanych układów sterowania stawia nowe zadania w zakresie diagnostyki uszkodzeń. W celu zidentyfikowania metod diagnostyki znajdujących zastosowanie w układach napędowych o zmiennej prędkości kątowej wału wymagane jest przeprowadzenie badań symptomów uszkodzeń występujących w układzie sterowania. Analiza teoretyczna zjawiska uszkodzenia wirnika jest znana z literatury [1]. Znaczny wkład w badania zjawiska asymetrii wirnika maszyny indukcyjnej klatkowej mają polskie ośrodki naukowe, w tym Politechniki Śląskiej [1], Politechniki Krakowskiej [2], Politechniki Gdańskiej [3, 4], Politechniki Opolskiej [5], Politechniki Wrocławskiej [6] i inne. Aktualne metody pomiarowe w diagnostyce uszkodzeń silników indukcyjnych klatkowych opisane zostały w [4, 6]. W artykule przedstawiono eksperymentalną weryfikację wpływu zjawiska asymetrii na zmienne stanu oraz zmienne sterujące w układach napędowych o zmiennej prędkości kątowej wału. Badania symulacyjne symptomów asymetrii wirnika w układach napędowych z silnikiem klatkowym o zmiennej prędkości wału oraz charakterystyki

częstotliwościowe estymatorów zmiennych stanu przedstawiono w pracach [7, 8]. W artykule przedstawiono badania eksperymentalne dla struktur sterowania z pomiarem prędkości kątowej oraz sterowania bezczujnikowego. Symptomy uszkodzenia badane były z wykorzystaniem struktur układów sterowania oraz estymacji zmiennych stanu opisanych w [9, 10].

2. SYMPTOMY USZKODZENIA WIRNIKA

W silniku indukcyjnym przy asymetrii wirnika strumień magnetyczny wzbudzony przez uzwojenie stojana wytworzy dwie składowe przepływy - zgodną i przeciwną.

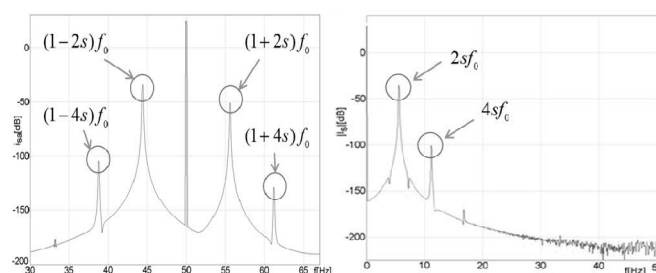


Rys. 1. Składowe przepływy w asymetrycznym wirniku [1]

Składowa zgodna $\theta_2^{(1)}$ wirując zgodnie ze strumieniem ϕ_1 generuje użyteczny moment elektromagnetyczny. Składowa przeciwna $\theta_2^{(2)}$ wiruje z prędkością kątową

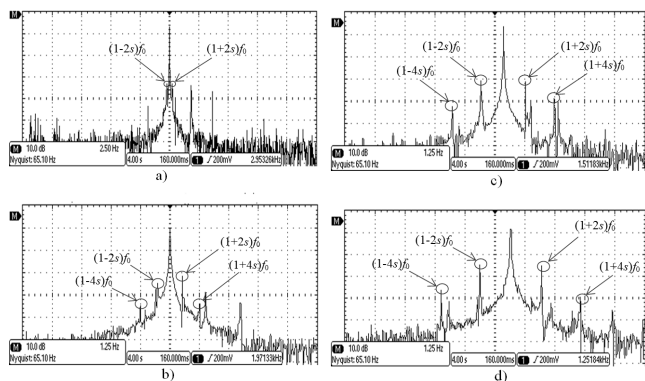
$$\omega_{2m} = \omega_m - s\omega_{1m} = (1 - 2s)\omega_{1m} \quad (1)$$

wzbudzając strumień ϕ_2 indukujący w uzwojeniu stojana prąd wzbudzający przepływ $\theta_1^{(2)}$ jak na rysunku 1.



Rys. 2. Symptomy asymetrii wirnika w widmie prądu fazowego stojana (a) oraz w widmie modułu wektora Parka prądu stojana (b) w silniku klatkowym przy prędkości znamionowej

W wyniku oddziaływania przepływu $\theta_1^{(2)}$ i strumienia ϕ_2 wytwarzany jest hamujący moment elektromagnetyczny. Zjawiska występujące przy uszkodzeniu wirnika w silniku indukcyjnym opisano w [1]. Najczęściej stosowane metody diagnozowania asymetrii są związane są z badaniem składowej przeciwnej w prądu fazowego stojana [4,6]. Na rysunku 2 przedstawiono badania symulacyjne widma prądu fazowego stojana (rys. 2a) oraz widmo modułu wektora prądu stojana przy uszkodzeniu wirnika (rys. 2b), gdzie f_0 oznacza częstotliwość napięcia zasilania, s – poślizg. Badania symulacyjne wykonano z wykorzystaniem metodyki modelowania zaproponowanej w [8]. Na rysunku 3 przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych zarejestrowanych na stanowisku laboratoryjnym przy zasilaniu z pośredniego przemiennika częstotliwości z falownikiem napięcia [11, 12]. W badaniach



Rys. 3. Symptomy uszkodzenia w widmie prądu fazowego stojana przy znamionowej prędkości kątowej oraz momencie obciążenia (a) $M_o=0$; (b) $M_o=0,3$; (c) $M_o=0,5$; (d) $M_o=0,65$ [j. w.] w silniku klatkowym przy asymetrycznym wirniku

symulacyjnych (rys. 2) i eksperymentalnych (rys. 3) zweryfikowano występowanie harmonicznych o częstotliwości zgodnej z analizą teoretyczną zjawiska asymetrii wirnika. Zarówno w badaniach symulacyjnych i eksperymentalnych na rysunkach 2 i 3 widoczne są harmoniczne o częstotliwości stanowiącej wielokrotność podstawowej harmonicznej od uszkodzenia wyznaczonej z równania (1). Składowe te wynikają z faktu, iż zaindukowana składowa przeciwna prądu stojana wzbudza strumień magnetyczny, który na zasadzie opisanej w punkcie drugim artykułu wytworzy dwie składowe przepływu, z których składowa przeciwna wiruje w rozpatrywanym przypadku z prędkością kątową

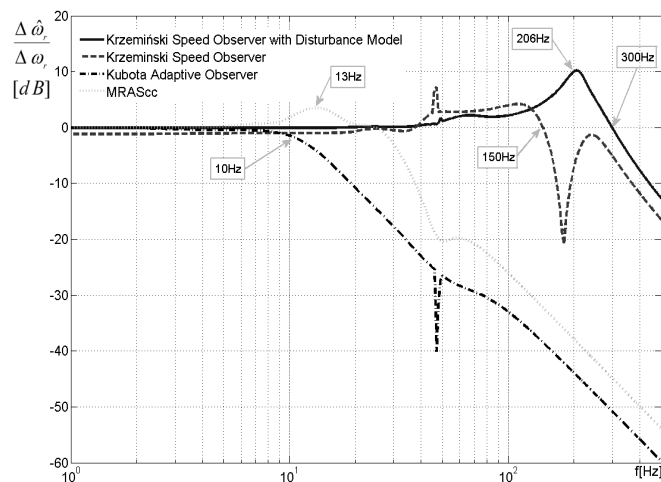
$$\omega_{3m} = (1 - 4s)\omega_{1m} \quad (2)$$

wzbudząc strumień ϕ_3 indukujący w uzwojeniu stojana prąd wzbudzący przepływ $\theta_1^{(3)}$. W wyniku oddziaływania przepływu $\theta_1^{(3)}$ i strumienia ϕ_3 wytwarzany jest dodatkowy hamujący moment elektromagnetyczny. Ze względu na silne tłumienie składowej przeciwnej o częstotliwości stanowiącej wielokrotność podstawowej składowej przeciwnej przepływu – co wynika z konstrukcji silnika oraz momentu bezwładności - harmoniczne prądu o tych częstotliwościach w diagnostyce asymetrii mogą pełnić rolę pomocniczą przy identyfikacji źródła harmonicznych w widmie. Jednym z ograniczeń metody diagnozowania uszkodzenia z wykorzystaniem analizy widma prądu fazowego stojana jest brak jednoznacznej informacji o przyczynie występowania harmonicznej o danej częstotliwości. Wobec

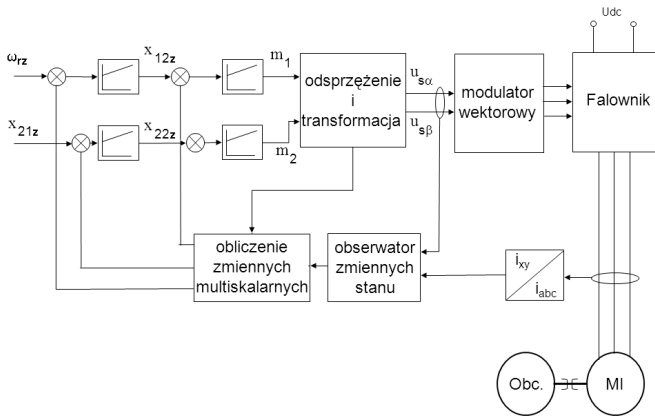
tego obserwowane w widmie harmoniczne o poszukiwanej częstotliwości związanej z asymetrią wirnika mogą wynikać w szczególnym przypadku z innego uszkodzenia, częstotliwości zazębienia przekładni lub też mogą pochodzić od obciążenia.

3. SYMPTOMY USZKODZENIA W UKŁADACH REGULACJI AUTOMATYCZNEJ

Opisane w literaturze metody diagnozowania uszkodzeń w znakomitej większości opracowane zostały w czasach, w których nie stosowano powszechnie zasilania silników klatkowych z przekształtników oraz układów automatycznej regulacji [5]. Rozwój techniki cyfrowej oraz energoelektroniki upowszechnił stosowanie układów napędowych zasilanych z przekształtnika sterowanych mikroprocesorowo. Aktualnie stosowane zaawansowane układy napędowe o zmiennej prędkości kątowej wału z wykorzystaniem estymatorów zmiennych stanu i identyfikacją parametrów w czasie rzeczywistym stawiają nowe zadania w zakresie metod diagnostyki, w tym asymetrii wirnika. Synteza układu sterowania silnikiem klatkowym oparta jest na założeniu idealnej symetrii. W układzie regulacji obiektem niesymetrycznym uchyb regulacji nie zostanie skompensowany, a układ sterowania będzie zadawał zmienny sygnał w celu jego skompensowania [8, 11]. Układ napędowy z układem regulacji rozszerza możliwości diagnozowania uszkodzenia poprzez wykorzystanie zmiennych sterujących. Na symptomy asymetrii pojawiające się w zmiennych stanu oraz w zmiennych sterujących w bezczujnikowym układzie regulacji istotnie wpływają właściwości stosowanych estymatorów zmiennych stanu. W pracy [7] przedstawiono badania charakterystyk częstotliwościowych wybranych struktur obserwatorów zmiennych stanu oraz estymatora MRAS. Wykazano, że właściwości obserwatorów są zbliżone do filtrów dolnoprzepustowych, a kształt charakterystyki umożliwia ocenę czy i z jakim wzmocnieniem symptomy uszkodzeń będą odtwarzane. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe charakterystyki częstotliwościowe obserwatorów zmiennych stanu wyznaczone przy sterowaniu skalarnym – bez układu regulacji. Układ sterowania bezczujnikowego wymaga dodatkowo uwzględnienia pasma przenoszenia układu regulacji. Uwzględniając ponadto wrażliwość parametryczną obserwatora, niestacjonarność parametrów schematu



Rys. 4. Charakterystyki częstotliwościowe obserwatorów dla odtwarzanej prędkości obrotowej [5]



Rys. 5. Schemat bezczujnikowego układu sterowania silnikiem klatkowym z wykorzystaniem multiskalarnego modelu maszyny

zastępczego silnika i wpływu nastaw regulatorów, diagnozowanie uszkodzenia staje się zagadnieniem bardzo złożonym – przekraczającym ograniczenia znanych metod analitycznych. W badaniach wykorzystano układ sterowania multiskalarnego opisany w [9], którego schemat przedstawiono na rysunku 5. W syntezie bezczujnikowego układu regulacji wykorzystano strukturę obserwatora prędkości opisaną w [10], która w postaci ogólnej opisana jest równaniami:

$$\frac{d\hat{i}_s}{d\tau} = a_1\hat{i}_s + a_2\hat{\psi}_r - ja_3\xi + a_4u_s + k_1e_{i_s}, \quad (3)$$

$$\frac{d\hat{\psi}_r}{d\tau} = a_6\hat{i}_s + a_3\hat{\psi}_r + j\xi - k_2V\hat{\psi}_r - jk_3S(V - V_f)\hat{\psi}_1, \quad (4)$$

$$\frac{d\xi}{d\tau} = j(\hat{\omega}_{vr}\xi + k_4e_{i_s}), \quad (5)$$

$$\frac{dV_f}{d\tau} = k_5(V - V_f)_1, \quad (6)$$

$$\frac{d\hat{\omega}_{vf}}{d\tau} = k_6(\hat{\omega}_r - \hat{\omega}_{vf}), \quad (7)$$

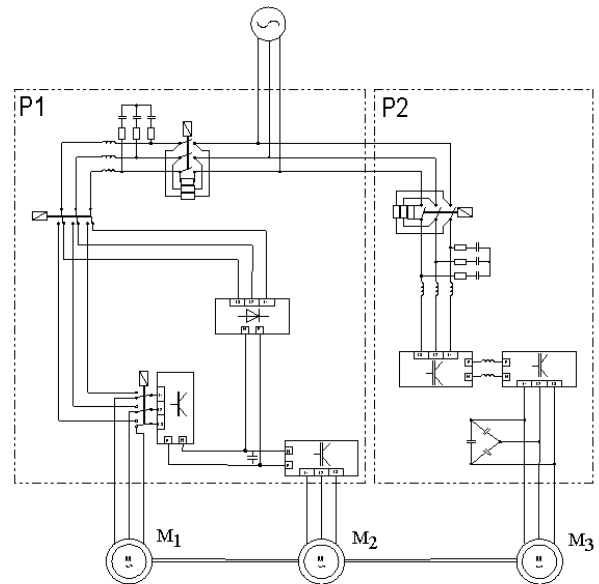
$$\hat{\omega}_r = \frac{\text{Re}\left\{\xi_\alpha^*\hat{\psi}_r\right\}}{|\hat{\psi}_r|^2}, \quad (8)$$

$$\hat{\omega}_{vr} = \hat{\omega}_{vf} + a_6 \frac{\text{Im}\left\{\hat{\psi}_r^*i_s\right\}}{|\hat{\psi}_r|^2}, \quad (9)$$

$$V = -\text{Im}\left\{\hat{\psi}_r^*\xi\right\}, \quad (10)$$

gdzie a_1, a_2, \dots, a_6 - współczynniki wyznaczone z parametrów schematu zastępczego maszyny, k_1, k_2, \dots, k_6 oznaczają współczynniki wzmocnienia obserwatora, \hat{i}_s - estymowany wektor prądu stojana, $\hat{\psi}_r$ - estymowany wektor strumienia wirnika, $\hat{\omega}_r$ - estymowana wartość prędkości kątowej wirnika, τ - czas względny.

Badania zrealizowano na stanowisku laboratoryjnym stanowiącym zespół silników klatkowych o mocy 5,5kW zasilanych z pośrednich przemienników częstotliwości z falownikami napięcia, którego schemat przedstawiono na rysunku 6. Badania na stanowisku można wykonać wykorzystując przekształtniki maszynowe z dodatkowym zasilaniem obwodu pośredniczącego z niesterowanego mostka prostowniczego. W takim układzie należy uwzględnić ograniczony zakres prędkości kątowej wału lub zastosować dodatkowy algorytm sterowania z osłabianiem pola elektromagnetycznego. Do badań wykorzystano silnik



Rys. 6. Schemat stanowiska laboratoryjnego

klatkowy, w którym zamodelowano uszkodzenie trzech prętów wirnika, które zostały przewiercone w pobliżu połączenia czołowego, co uzasadnione jest miejscem występowania rzeczywistych uszkodzeń. Warto zaznaczyć, że Polsce produkowane są wirniki klatkowe z dodatkowym centralnym pierścieniem zwierającym, co ogranicza skutki przerwania pręta wirnika i w którym mierzone amplitudy harmonicznnych związanych z uszkodzeniem będą

Tablica 1. Względna wrażliwość zmiennych stanu i zmiennych sterujących na asymetrię wewnętrzną maszyny indukcyjnej w układzie regulacji z pomiarem prędkości kątowej

$\omega_{ri}[p.u.]$	$M_0[p.u.]$	$x_{11}[\%]$	$x_{12}[\%]$	$x_{21}[\%]$	$x_{22}[\%]$	$i_m[\%]$	$m_1[\%]$	$m_2[\%]$	$P_m[\%]$	$Q_m[\%]$
0,25	0,25	5,25	74,03	4,73	35,23	37,16	148,69	35,68	71,06	42,73
	0,45	6,44	30,98	4,81	36,98	33,85	95,72	35,71	39,71	45,52
	0,65	7,03	25,61	4,16	31,04	32,23	63,18	45,82	43,29	64,92
0,5	0,25	2,50	81,93	3,31	25,63	32,99	166,05	37,76	104,03	34,66
	0,45	3,13	49,59	3,47	29,44	28,65	132,66	33,58	66,75	33,73
	0,65	2,50	31,17	3,70	32,51	27,27	120,04	40,19	44,32	31,05
	0,72	2,50	26,54	3,80	32,30	24,37	113,18	39,37	31,76	35,21
0,75	0,25	2,80	98,11	3,27	25,46	21,14	163,78	46,90	69,20	24,45
	0,45	2,80	63,15	2,90	25,17	27,53	147,71	59,73	80,86	29,59
	0,65	2,80	41,34	3,17	28,95	24,70	136,16	63,99	52,61	30,37
	0,72	3,74	37,42	2,91	30,36	23,44	123,57	62,55	35,60	29,32
1	0,25	2,50	80,06	2,22	19,95	23,17	163,55	179,55	85,92	25,45
	0,45	2,50	70,38	2,31	22,21	23,46	176,43	227,25	65,79	24,66
	0,65	2,50	46,87	2,67	24,80	25,04	137,35	120,92	45,07	26,53
	0,72	2,50	38,26	2,99	26,89	26,66	134,06	137,05	41,85	34,87

Tablica 2. Względna wrażliwość zmiennych stanu i zmiennych sterujących na asymetrię wewnętrzną maszyny indukcyjnej w bezczujnikowym układzie sterowania

$\omega_{ri}[p.u.]$	$M_0[p.u.]$	$x_{11}[\%]$	$x_{12}[\%]$	$x_{21}[\%]$	$x_{22}[\%]$	$i_m[\%]$	$m_1[\%]$	$m_2[\%]$	$P_m[\%]$	$Q_m[\%]$
0,25	0,25	9,39	16,55	2,55	24,84	18,52	160,51	28,96	71,61	23,98
	0,45	9,23	11,45	2,95	26,78	18,13	119,38	21,56	27,40	25,03
	0,65	9,12	8,27	4,32	33,07	13,56	85,13	27,91	22,71	28,59
	0,72	8,98	60,22	2,74	25,21	25,00	62,65	26,42	11,00	32,61
0,5	0,25	3,13	31,68	2,04	20,18	15,46	102,59	26,47	32,59	23,44
	0,45	3,13	16,60	2,35	23,52	13,14	78,64	31,47	17,64	24,39
	0,65	3,13	11,22	3,01	26,48	12,55	48,58	35,17	10,83	25,72
	0,72	3,13	9,54	3,20	25,68	11,81	39,76	31,41	9,72	25,89
0,75	0,25	3,74	30,66	1,79	19,73	14,10	112,59	61,99	44,62	24,74
	0,45	3,74	17,45	2,23	20,43	13,61	90,31	57,62	18,63	22,68
	0,65	3,74	12,10	2,98	24,14	12,04	74,31	58,99	11,21	24,78
	0,72	3,74	11,67	3,19	24,86	10,89	66,20	59,38	8,48	23,44
1	0,25	2,50	26,97	2,16	22,53	17,86	109,67	112,73	32,01	22,48
	0,45	2,50	19,74	2,58	27,09	14,53	95,26	141,90	19,40	28,61
	0,65	2,50	17,45	2,75	30,00	15,90	71,11	326,98	15,67	31,04
	0,72	2,50	13,13	3,77	31,26	13,69	65,24	313,68	13,60	31,86

zmniejszone. W oparciu o powyżej opisane założenia przeprowadzono pomiary wrażliwości zmiennych stanu tj. prędkości kątowej x_{11} , momentu elektromagnetycznego x_{12} , kwadratu strumienia wirnika x_{21} , zmiennej multiskalarniej x_{22} , modułu wektora prądu stojana i_m , mocy czynnej - P_m , mocy biernej Q_m oraz zmiennych sterowania nieliniowego m_1 i m_2 na asymetrię wirnika przestrzeni zmiennej prędkości kątowej oraz momentu obciążenia. Wyniki badań zestawiono odpowiednio w tablicach 1 i 2. W przeprowadzonych badaniach najwyższą wrażliwością na asymetrię wirnika wykazują zmienne sterowania nieliniowego m_1 i m_2 , których wykorzystanie umożliwia detekcję uszkodzenia wirnika w początkowej fazie rozwoju. Uszkodzenia mogą zostać wykryte przy mniejszej wartości obciążenia niż przyjęte w literaturze minimum 50% obciążenia znamionowego [6]. Z przeprowadzonych badań wynika, że w układach sterowania skalarnego przy braku dostępności zmiennych układu regulacji zmiennymi stanu, które wykazują najwyższą wrażliwość na uszkodzenie wirnika są moc bierna i moc czynna.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

W artykule przedstawiono badania eksperymentalne symptomów asymetrii wirnika silnika indukcyjnego klatkowego wynikających z uszkodzenia w układach napędowych o zmiennej prędkości kątowej wału. Przeprowadzone badania wykazały, że w układach napędowych z układem regulacji dla celów diagnostycznych korzystniejsze jest wykorzystanie zmiennych układu sterowania ze względu na wyższą wrażliwość na uszkodzenie wirnika, co pozwala na detekcję we wczesnej fazie rozwoju uszkodzenia lub przy ograniczonym momencie obciążenia silnika. Wczesna detekcja uszkodzenia umożliwia zastosowanie sterowania tolerującego uszkodzenia i ograniczenie lub spowolnienie dalszego rozwoju uszkodzenia. Dla układów sterowania skalarnego maszynami indukcyjnymi zaleca się wykorzystanie mocy chwilowych w diagnostyce asymetrii przy założeniu wczesnej detekcji uszkodzenia. Wyniki przeprowadzonych badań mogą znaleźć zastosowanie w zintegrowanych systemach diagnostyki uszkodzeń w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem mikroprocesora sterującego przekształtnikiem.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Glinka T.: Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle, BOBRE Komel, Katowice 1993.

2. Sobczyk T.: Metodyczne Aspekty Modelowania Matematycznego Maszyn Indukcyjnych, WNT 2004.
3. Swędrowski L., Wilk A., Kostro G., Dobrowolski P.: Wpływ wybranych asymetrii uzwojenia silnika asynchronicznego na jego właściwości rozruchowe, 39th International Symposium on Electrical Machines SME 2003, Gdańsk - Jurata, Poland 2003.
4. Swędrowski L.: Pomiary w diagnostyce silników indukcyjnych klatkowych, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2013.
5. Hickiewicz J., Szymaniec S., Wach P.: Diagnostyka maszyn elektrycznych indukcyjnych klatkowych metodami wibroakustycznymi, Materiały XII Szkoły Jakości Niezawodności Maszyn i Napędów Elektrycznych. Tom XXI, str 5-28, Instytut Elektrotechniki w Warszawie, Kołobrzeg 1985.
6. Kowalski C. T.: Monitorowanie i diagnostyka uszkodzeń silników indukcyjnych z wykorzystaniem sieci neuronowych, Prace naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. nr. 57 Wrocław, 2005,
7. Kołodziejek P., Bogalecka E.: Frequency Characteristics of Induction Machine Speed Observers, Electromagnetics Phenomena in Nonlinear Circuits, Lille, France 2008.
8. Kołodziejek P., Bogalecka E.: Broken rotor bar impact on sensorless control of induction machine, COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering Vol.28 No. 3, Emerald Group Publishing Limited, Southampton 2009, ISSN 0332-1649.
9. Krzemiński Z., Cyfrowe sterowanie maszynami asynchronicznymi, Gdańsk, 2001.
10. Krzemiński Z.: Struktura obserwatora prędkości silnika indukcyjnego z modelem zakłóceń, Modelowanie i Symulacja MIS 2006, Kościelisko 2006.
11. Kołodziejek P.: Broken Rotor Symptoms in the Sensorless Control of Induction Machine, COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, No. 1, Emerald Group Publishing Limited, Southampton 2012, ISSN 0332-1649.
12. Kołodziejek P., Rotor Asymmetry Analysis and Diagnosis in the Closed-Loop and Sensorless Controlled Induction Motor Drive, COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering No. 1, Emerald Group Publishing Limited, Southampton 2013, ISSN 0332-1649.

ROTOR ASYMMETRY SYMPTOMS IN VARIABLE SPEED INDUCTION MOTOR DRIVE

The paper presents experimental verification of squirrel-cage induction motor rotor asymmetry symptoms resulting from broken rotor bars. Up-to-date variable speed drives control system topologies are investigated including measurement-based and sensorless control. Results of this study are dedicated for implementation in the real-time automated diagnostic system of the variable speed IM drive. State and control variables sensitivity to the asymmetry symptoms are presented. The most sensitive state and control system variables selection is recommended in selected control system topologies for asymmetry diagnosis.

Keywords: squirrel-cage induction motor, rotor fault, sensorless control, sensitivity analysis.