

Janusz Bialik, Jan Zawilak
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

POLOWO–OBWODOWY MODEL I PARAMETRY DWUBIEGOWEGO SILNIKA SYNCHRONICZNEGO DUZEJ MOCY

FIELD–CIRCUIT MODEL AND PARAMETERS OF TWO SPEEDS SYNCHRONOUS LARGE POWER MOTORS

Abstract: In this paper the calculation results of a two–speed synchronous, silent–pole, high power motor, are presented. Using the FEM tool Maxwell 2D, the two dimensional, field–circuit model for the large power motor, type GAe 1510/12p was examined. The simulations, for load, for both rotational speeds, for two configurations of field winding (work with eight or ten active poles of rotor), were conducted.

Goal of this work is to determine the properties and the parameters of the two speed synchronous motors, with changing the pole number of magnetic field. Harmonic analysis of the armature currents and the voltages were done. The scope of the compensation of reactive power is done as well. A comparison between the calculated and measured results of physical quantities for load, in this synchronous motor is presented. The differences between the calculated and the measured results are less than 5%. It is accepted, that the introduced model can be used in evaluation of electromagnetic and mechanical phenomena occurring in different states of motor operation.

1. Wstęp

W celu precyzyjnego modelowania różnych stanów pracy maszyn elektrycznych, równania pola elektromagnetycznego, równania napięciowe oraz równanie ruchu muszą być rozwiązywane jednocześnie [7]. Taką możliwość mają metody polowo-obwodowe z odwzorowaniem ruchu elementów wirujących. Metody te mogą być stosowane w procesie projektowania maszyn oraz analizy zjawisk w maszynach już istniejących (hałas magnetyczny, drgania, proces nagrzewania, itd.). Metoda elementów skończonych FEM może być stosowana w przestrzeni dwu 2D oraz trójwymiarowej 3D. Większą dokładnością charakteryzują się modele trójwymiarowe. Jednak budowa modelu w przestrzeni 3D jak i obliczenia są bardzo czasochłonne. Modelowanie jest szczególnie trudne przy skomplikowanych strukturach i kształtach badanego obiektu. W celu skrócenia czasu obliczeń w modelach trójwymiarowych, zwykle odwzorowuje się fragment maszyny uznając ją jako symetryczną. Dlatego maszyny niesymetryczne o skomplikowanych strukturach modeluje się dwuwymiarowo [2]. Przykładem niesymetrycznych maszyn są dwubiegowe silniki synchroniczne dużej mocy. W silnikach tych uzwojenie stojana i wirnika są przełączalne, a zmiana obwodowego rozkładu pola magnetycznego i liczby biegunów odbywa się przez zmianę kierunku prądów w odpowiednich ze-

zwojach pasm fazowych. Tego typu silniki pracują z powodzeniem od kilku lat w napędach przewietrzania kopalń węgla i miedzi [3]. Celem niniejszej pracy jest prezentacja wyników obliczeń i pomiarów, dwubiegowego silnika synchronicznego typu GAe1510/12p o dwóch prędkościach obrotowych: $n=500$ ($p=12$) i $n=600$ obr/min ($p=10$) oraz mocach znamionowych odpowiednio $P=600$ i 1050 kW. Do obliczeń wykorzystano komercyjne oprogramowanie Maxwell 2D. W obliczeniach dla stanu obciążenia dokonano analizy harmonicznej prądów oraz napięć twornika oraz wyznaczono możliwości kompensacji mocy biernej.

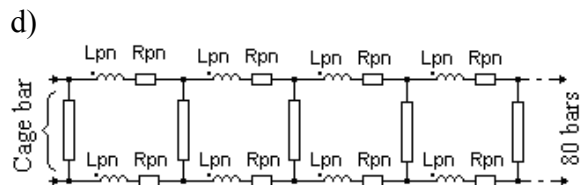
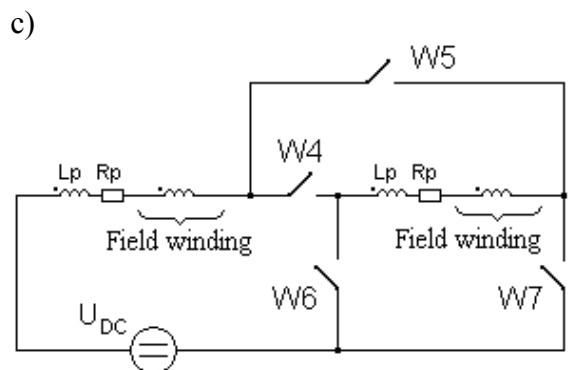
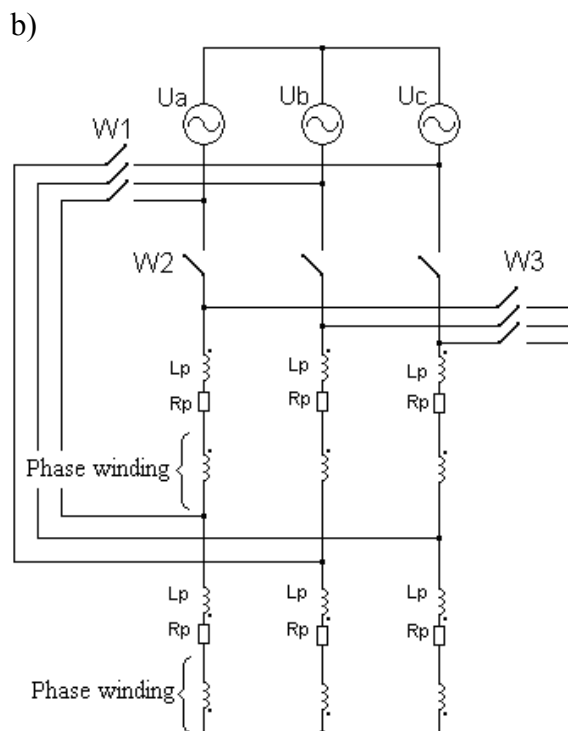
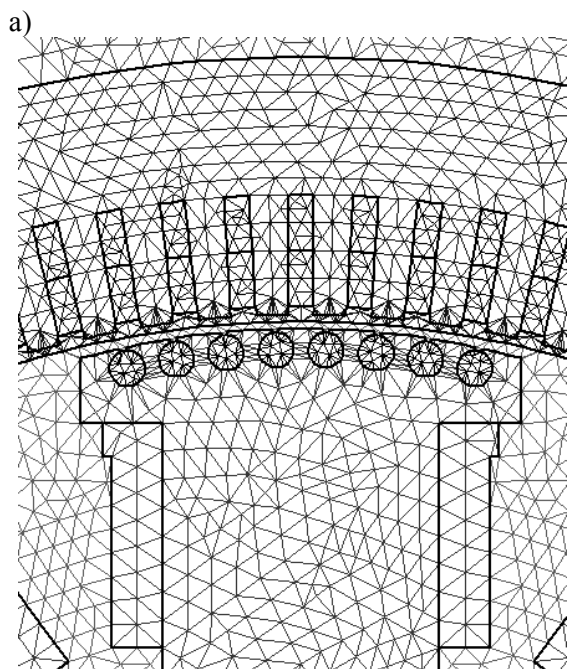
2. Polowo-obwodowy model dwubiegowego silnika synchronicznego

Wykorzystując model matematyczny, opisany w [1], zbudowano model polowo-obwodowy dwubiegowego silnika synchronicznego z biegunami wydatnymi typu GAe1510/12p, którego parametry znamionowe zestawiono w tabeli 1. Część polowa modelu uwzględnia nieliniowe charakterystyki magnetowodu silnika oraz ruch wirnika. Część obwodowa uwzględnia parametry elektryczne źródła zasilania, uzwojenie klatkowe (rozruchowe) oraz przełączalne uzwojenia stojana i wirnika.

Tabela 1. Znamionowe parametry silnika typu GAe 1510/12p

moc znamionowa	P_n	kW	600 / 1050
napięcie twornika	U_n	V	6000
skojarzenie faz	–	–	Y / YY
prąd znamionowy	I_n	A	86 / 121
napięcie wzbudz.	U_{fn}	V	51 / 70
prąd wzbudzenia	I_{fn}	A	175 / 240
prędkość obrotowa	n_n	obr/min	500 / 600
współcz. mocy	$\cos \varphi_n$	–	0,8 _i / 0,9 _p
sprawność	η_n	%	80,0 / 94,2

W opracowanym modelu 2D przyjęto stałe wartości parametrów połączeń czołowych wszystkich uzwojeń silnika. Wartości reaktancji i rezystancji połączeń czołowych wyznaczono wg znanych zależności [5,6]. Zmianę obwodowego rozkładu przepływów: uzwojenia twornika i magnesnicy, warunkujących zmianę liczby biegunów pola magnetycznego, uzyskuje się przez zmianę kierunków prądów w odpowiednich sekcjach tych uzwojeń, co uwzględniono w części obwodowej modelu (rys. 1b,c) [4].



Rys. 1. Polowo-obwodowy model dwubiegowego silnika: część polowa a) fragment obwodu z siatką dyskretyzacyjną w obszarze szczeliny powietrznej; część obwodowa: b). uzwojenie twornika, c). uzwojenie magnesnicy, d). uzwojenie rozruchowe (klatkowe)

Obliczenia wykonano dla dwóch wersji wirnika o 10-ciu biegunach mechanicznych: z 10 i 8 biegunami czynnymi (przy 8 biegunach czynnych wyłączone są uzwojenia dwóch biegunów).

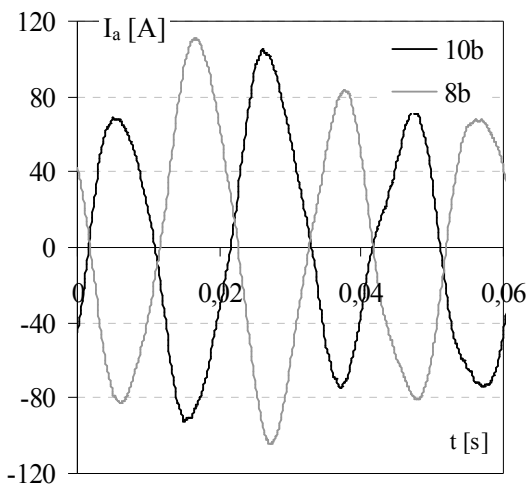
3. Analiza prądu zasilającego

Obliczenia i pomiary wykonano dla stanu wynikającego z pracy wentylatora tj:

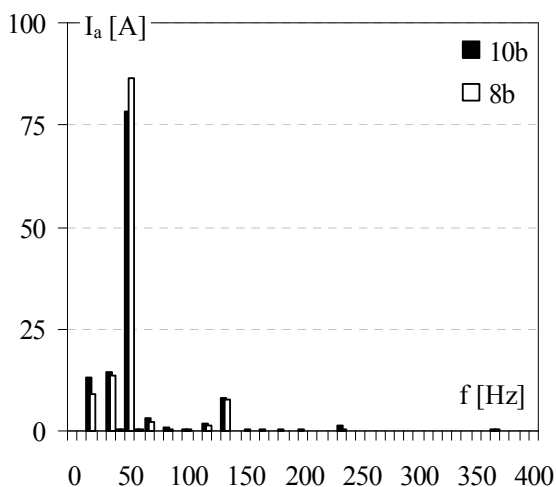
- dla 10-ciu biegunów czynnych: $1,0 M_n$ dla większej oraz $0,77 M_n$ dla mniejszej prędkości obrotowej,
- dla 8-miu biegunów czynnych: $0,74 M_n$ dla większej oraz $0,75 M_n$ dla mniejszej prędkości obrotowej.

Prąd wzbudzenia przyjęto $I_f=200$ A dla obu przypadków i obu prędkości obrotowych.

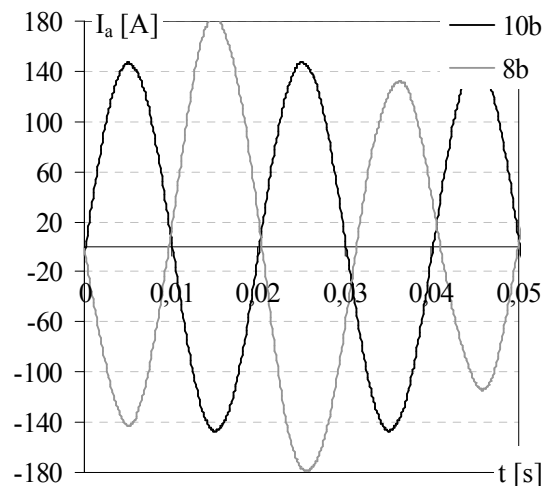
Dla różnych konfiguracji uzwojenia wirnika, dokonano analizy harmonicznego prądów oraz napięć stojana i porównano je z pomiarami. Wyniki obliczeń zestawiono na rysunkach 2 - 5 (10b oraz 8b oznacza odpowiednią liczbę biegunów czynnych).



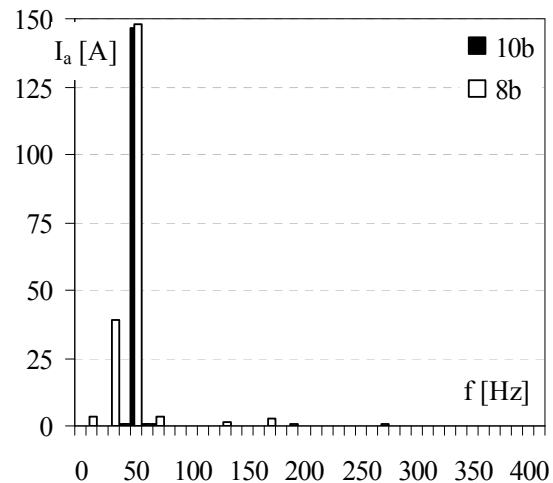
Rys.2. Obliczone przebiegi prądu jednej fazy twornika dla $n=500$ obr/min



Rys.3. Harmoniczne prądu jednej fazy twornika dla $n=500$ obr/min



Rys.4. Obliczone przebiegi prądów twornika dla $n=600$ obr/min



Rys.5. Harmoniczne prądu twornika dla $n=600$ obr/min

Analiza harmoniczna obliczonych i pomierzonych wielkości dowodzi, że dla pracy przy większej prędkości obrotowej z 10 aktywnymi biegunami, napięcia i prądy twornika są praktycznie sinusoidalne (rys. 4, 5). Dla mniejszej prędkości obrotowej przy dziesięciu biegunach aktywnych, prądy twornika są bardziej odkształcone (rys. 2, 3). Praca przy mniejszej prędkości obrotowej powoduje odkształcenia napięcia zasilającego uzwojenie stojana (tab.3). Odkształcenia prądu dla 500 obr/min są mniejsze podczas pracy z 8 biegunami aktywnymi (rys.2 i 3). Rozwiązanie to jest zdecydowanie gorsze dla większej prędkości obrotowej (rys.4 i rys.5).

Wyniki analizy harmonicznego wielkości obliczonych i pomierzonych zestawiono w tabelach 2 oraz 3.

Tabela 2. Wyniki analizy harmonicznej prądów i napięć zasilających dla większej prędkości obrotowej $n=600$ obr/min i różnych konfiguracji wirnika

harmo- niczna.	f Hz	10 biegunów wirnika				8 biegunów wirnika			
		obliczenia		pomiar		obliczenia		pomiar	
		U	I	U	I	U	I	U	I
		V	A	V	A	V	A	V	A
2	20	3,87	0,12	1,70	0,08	3,87	0,07	1,59	0,02
4	40	8,06	0,55	3,46	0,30	4,99	0,93	4,71	0,53
5	50	4982,96	146,66	4992,19	148,0	4958,49	147,75	4992,11	125,4
6	60	4,17	0,67	2,83	0,02	3,13	0,93	4,95	0,64
8	80	8,32	0,25	0,77	0,07	8,30	0,32	1,68	0,03
10	100	5,42	0,16	0,69	0,27	5,40	0,20	1,93	0,09
12	120	4,10	0,12	0,24	0,04	4,08	0,14	0,77	0,03
14	140	3,33	0,10	0,13	0,03	3,31	0,13	0,71	0,01
16	160	2,81	0,09	0,29	0,02	2,79	0,08	0,46	0,02
18	180	2,44	0,08	0,25	0,02	2,45	0,12	0,43	0,03
20	200	2,16	0,07	0,52	0,05	2,15	0,10	0,76	0,08
22	220	1,95	0,06	0,44	0,04	1,94	0,08	0,39	0,00
24	240	1,77	0,05	0,09	0,03	1,76	0,07	0,30	0,01
26	260	1,64	0,05	0,17	0,01	1,62	0,08	0,31	0,02
28	280	1,51	0,05	0,26	0,01	1,50	0,05	0,35	0,01
30	300	1,39	0,04	0,06	0,03	1,39	0,05	0,32	0,05
32	320	1,31	0,04	0,23	0,02	1,30	0,05	0,26	0,01
34	340	1,24	0,04	0,43	0,02	1,22	0,05	0,42	0,01
36	360	1,14	0,04	0,15	0,01	1,12	0,04	0,03	0,02
38	380	1,09	0,03	0,23	0,01	1,08	0,04	0,17	0,01
40	400	0,98	0,03	0,75	0,03	0,99	0,04	1,55	0,05

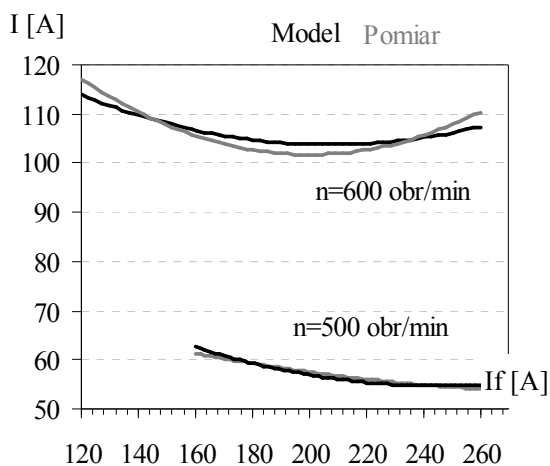
Tabela 3. Wyniki analizy harmonicznej dla mniejszej prędkości obrotowej $n=500$ obr/min i różnych konfiguracji wirnika

harmo- niczna	f Hz	10 biegunów wirnika				8 biegunów wirnika			
		obliczenia		pomiar		obliczenia		pomiar	
		U	I	U	I	U	I	U	I
		V	A	V	A	V	A	V	A
2	16,67	1,49	13,05	2,80	21,59	2,70	9,26	1,96	21,28
4	33,33	10,67	14,39	7,17	10,03	5,44	13,69	2,97	17,54
6	50	4974,79	78,10	4997,38	76,68	4971,04	86,23	4925,75	91,87
8	66,67	12,07	3,07	4,63	1,97	5,89	2,31	1,03	2,27
10	83,33	6,60	0,91	2,50	0,43	6,35	0,50	0,29	0,56
12	100	4,62	0,50	1,82	0,20	4,42	0,29	0,98	0,39
14	116,67	4,14	1,96	1,99	1,62	2,93	1,31	1,19	1,65
16	133,33	8,69	8,23	6,30	6,83	7,45	7,55	5,69	7,33
18	150	2,72	0,22	9,47	0,37	2,71	0,24	9,35	0,31
20	166,67	2,03	0,30	0,72	0,20	2,11	0,14	0,13	0,20
22	183,33	2,14	0,25	0,80	0,16	1,95	0,10	0,17	0,13
24	200	1,97	0,31	1,39	0,51	2,00	0,21	0,56	0,46
26	216,67	1,66	0,02	0,58	0,07	1,69	0,03	0,25	0,25
28	233,33	1,68	1,23	0,29	0,60	1,14	0,33	1,65	1,22

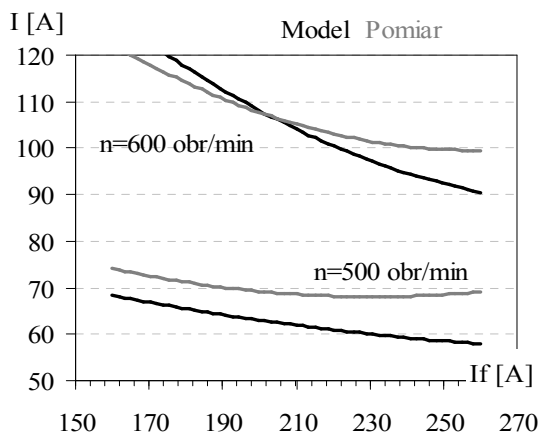
30	250	1,27	0,11	29,13	0,32	1,42	0,05	29,86	0,58
32	266,67	1,25	0,15	0,25	0,11	1,43	0,12	0,17	0,12
34	283,33	1,48	0,17	0,59	0,08	1,09	0,18	0,25	0,12
36	300	0,95	0,13	0,68	0,07	1,20	0,04	0,58	0,12
38	316,67	1,15	0,11	0,09	0,15	1,11	0,04	0,60	0,31
40	333,33	0,98	0,02	0,33	0,02	1,03	0,02	0,20	0,03
42	350	0,88	0,08	21,61	0,24	1,12	0,08	19,20	0,22
44	366,67	1,05	0,38	0,25	0,13	1,43	0,37	0,25	0,05
46	383,33	0,71	0,14	0,44	0,06	1,03	0,12	0,22	0,06
48	400	0,85	0,01	0,95	0,01	0,84	0,02	1,13	0,06

4. Kompensacja mocy biernej

W obliczeniach charakterystyk przyjmowano zmianę prądu wzbudzenia silnika obciążonego momentem wentylatora (pkt. 3) od wartości maksymalnej (ustalonej na podstawie prób cieplnych) do takiej, przy której współczynnik mocy był większy niż 0,8. Wyniki obliczeń zestawiono z wynikami pomiarów na rys. 6 i 7.



Rys. 6. Krzywe V dla obu prędkości obrotowych silnika przy 10-ciu czynnych biegunach wirnika



Rys. 7. Krzywe V dla obu prędkości obrotowych silnika przy 8-miu czynnych biegunach wirnika

W obliczeniach współczynnik mocy $\cos \varphi$ wyznaczono z przesunięcia fazowego podstawowych harmonicznych napięcia i prądu twornika. Porównanie obliczonych oraz pomierzonych krzywych V wykazuje, że różnice wyników nie są większe niż 5%.

W tabeli 4 zestawiono obliczone wartości współczynników mocy dla maksymalnej dopuszczalnej wartości prądów wzbudzenia.

Tabela 4. Maksymalne wartości współczynnika mocy obliczone dla obciążonego

n obr/min	czynnych biegunów	$\cos \varphi$	I_f A
600	10	1	195
600	8	0,98 ind..	250
500	10	0,88 ind.	240
500	8	0,92 ind.	240

Wyniki obliczeń i pomiarów wartości współczynników mocy dla różnych wartości prądów wzbudzenia dla obu prędkości obrotowych obciążonego wentylatorem silnika zestawiono w tabelach 5 i 6.

Tabela 5. Porównanie obliczonych i pomierzonych wartości współczynnika mocy – praca z 10 biegunami

10 bieg. I_f A	obliczenia		pomiar	
	$\cos \varphi$			
	600	500	600	500
obr/min				
120	0,83i	-	-	-
160	0,95i	0,78i	0,95i	0,8i
180	0,98i	0,83i	-	-
200	0,99p	0,84i	0,96p	0,86i
220	0,96p	0,8i	-	-
240	0,94p	0,87i	0,92p	0,9i
260	0,92p	0,87i	-	-

Tabela 6. Porównanie obliczonych i pomierzonych wartości współczynnika mocy – praca z 8 biegunami

8 bieg. I_f A	obliczenia		pomiar	
	$\cos \varphi$			
	600	500	600	500
	obr/min			
160	0,75i	0,8i	-	-
180	0,85i	0,83i	0,86i	0,85 i
200	0,87i	0,86i	0,88i	0,88i
220	0,89i	0,9i	0,9i	0,91i
240	0,96i	0,92i	0,97i	0,92i
260	0,98i	0,93i	0,98i	-

Z zestawionych wyników wynika, że podczas pracy przy większej prędkości obrotowej z 8 aktywnymi biegunami wirnika silnik nie może kompensować mocy biernej systemu.

5. Wnioski

Opracowany i opisany model polowo-obwodowy umożliwia symulowanie zjawisk i obliczanie charakterystyk silników synchronicznych w stanach ustalonych oraz przejściowych. Weryfikacja pomiarowa wielkości wyznaczonych za pomocą opracowanego modelu pozwala sądzić, że może być wykorzystany do symulowania i obliczania innych wielkości w maszynach o niekonwencjonalnych strukturach np. drgań występujących podczas pracy dwubiegowych silników synchronicznych.

6. Literatura

- [1]. Antal L., Bialik J., Zawilak J., *Polowo-obwodowy model dwubiegowego silnika synchronicznego*, Zeszyty Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Politechniki Wrocławskiej, Nr 56, Studia i Materiały, Nr 24, Wrocław, 2004, s. 43-54
- [2]. Antal L., Zawilak J., *Moment dwubiegowego silnika synchronicznego o przełączalnych uzwojeniach twornika i wirnika*, XLI Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, SME 2003, Gdańsk–Jurata, czerwiec 9–11, 2003, s. 104-112.
- [3]. Antal L., Zawilak J., Zawilak T., *Badania dwubiegowego silnika synchronicznego*, XVI Międzynarodowa Konferencja Maszyn Elektrycznych ICEM'04 Kraków, wrzesień 5-8, 2004, s.793-799
- [4]. Bialik J., Zawilak J., *Drgania oraz siły pochodzenia elektromagnetycznego dwubiegowych silników synchronicznych dużej mocy*, XLI Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, SME 2003, Gdańsk–Jurata, June 9–11, 2003, pp. 10
- [5]. Dubicki B., *Elektryczne maszyny*, część III, Warszawa, PWN, 1964.
- [6]. Sergeev P. S., Vinogradov N. V., Gorjanov F. A., *Projektowanie Električeskich Mašin*, Energija, Moskva 1969
- [7]. Zhou P., Stanton S., Cendes Z. J., *Dynamic Modeling of Electric Machines*, www.ansoft.com.

Autorzy

Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-372 Wrocław

e-mail: janusz.bialik@pwr.wroc.pl
jan.zawilak@pwr.wroc.pl

Praca naukowa finansowana ze środków KBN w latach 2004-2006 w ramach projektu badawczego nr 3T10A005 26