

## **Badania wpływu klinów magnetycznych na pulsacje w maszynie elektrycznej z magnesami trwałymi**

**Streszczenie.** Artykuł prezentuje rezultaty badań symulacyjnych i eksperymentalnych obwodów magnetycznych maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi z zastosowaniem klinów magnetycznych. Podczas badań symulacyjnych zmieniano przenikalność magnetyczną klinów, a następnie wyznaczano współczynniki pulsacji. W modelu doświadczalnym użyto klinów magnetycznych wykonanych z mieszaniny żywicy epoksydowej i proszku magnetycznie miękkiego SMC. Badania eksperymentalne potwierdziły słuszność badań symulacyjnych.

**Abstract.** The article presents results of magnetic circuit in electrical machines with permanent magnets and magnetic wedges simulating and experimental researches. During researches first wedge's magnetic permeability have been changed and then pulsating factors value have been examined. In experimental model magnetic wedges made of epoxy resin and Soft Magnetic Composites (SMC) compound have been used. Experimental researches had confirmed simulating analyses rightness.  
(**Magnetic wedges influence of pulsation in electrical machine with permanent magnets**).

**Słowa kluczowe:** klin magnetyczny, moment zaczepowy, przenikalność, pulsacje momentu.  
**Keywords:** magnetic wedge, cogging torque, permeability, torque pulsations.

### **Wstęp**

Maszyny elektryczne ze stojanami ułożkowanymi charakteryzują się mniejszą szczeliną powietrzną i większym momentem elektromagnetycznym niż maszyny o strukturze bezłożkowej. Posiadają one jednak wadę, polegającą na występowaniu momentu zaczepowego, który jest głównym składnikiem pulsacji momentu elektromagnetycznego [1-6]. Są one przyczyną generowania wyższych harmonicznych, powodują powstawanie hałasu i drgań, wpływają niekorzystnie na trwałość łożysk i obniżają sprawność maszyny. Celem pracy jest przedstawienie sposobów ograniczenia pulsacji momentu elektromagnetycznego poprzez zastosowanie klinów magnetycznych o odpowiednich parametrach.

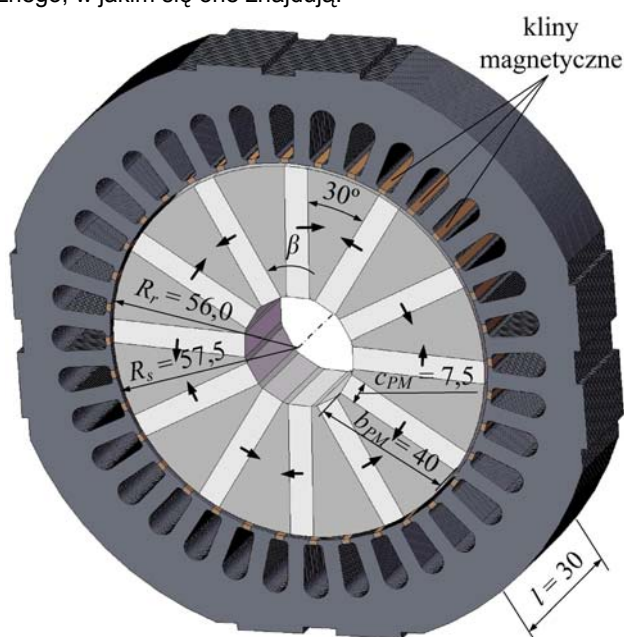
### **Modele matematyczne**

Badania teoretyczne obwodów magnetycznych maszyn elektrycznych ułożkowanych przeprowadzono w oparciu o model, w którym zastosowano kliny magnetyczne [7]. Badany model pokazano na rysunku 1. Badania symulacyjne prowadzono przy użyciu – opartego na metodzie elementów skończonych FEM (*ang. Finite Element Method*) – programu COMSOL. Przedstawiony na rysunku 1 badany obwód magnetyczny posiada wirnik składający się z odpowiednio namagnesowanych płaskich magnesów trwałych o wymiarach  $c_{PM} = 7,5$  mm i  $b_{PM} = 40$  mm, które ułożone są naprzemian z ferromagnetycznymi koncentratorami pola magnetycznego. Promień zewnętrzny wirnika wynosi  $R_r = 56,0$  mm. Założono, że stojan o promieniu wewnętrznym  $R_s = 57,5$  mm wykonany jest z pakietu blach ze stali krzemowej i ma 36 żłobków półotwartych z uzwojeniami, które zamknięte są klinami magnetycznymi. Grubość

szczeliny powietrznej wynosi  $\delta = 1,5$  mm, natomiast długość części aktywnych badanego modelu –  $l = 30$  mm.

W trakcie badań symulacyjnych zostały wyznaczone podstawowe wielkości: moment elektromagnetyczny  $T_e$ , moment zaczepowy  $T_z$  oraz rozkład indukcji magnetycznej  $B$  w szczelinie powietrznej. Wyznaczono krzywe momentu elektromagnetycznego  $T_e$  na szerokości jednej podziałki zębowej  $\tau_c$  (z krokiem równym 1/10 podziałki zębowej – w przypadku badanych struktur od  $\beta = 0^\circ$  do  $\beta = 10^\circ$  co  $1^\circ$ ) w funkcji gęstości prądu zasilania (od  $j = 0$  A/mm<sup>2</sup> do  $j = 7$  A/mm<sup>2</sup>), dla współczynnika wypełnienia żłobków o wartości  $k_w = 0,5$  oraz parametrycznie przyjętych wartości przenikalności magnetycznej klinów  $\mu_{k1} = 1$ ,  $\mu_{k2} = 2$ ,  $\mu_{k3} = 5$ ,  $\mu_{k4} = 10$ ,  $\mu_{k5} = 16$ ,  $\mu_{k6} = 20$ ,  $\mu_{k7} = 50$  i  $\mu_{k8} = 100$ .

W badaniach założono, że przenikalność magnetyczna klinów jest stała – niezależna od pola magnetycznego, w jakim się one znajdują.



Rys. 1. Badany model obwodu magnetycznego (wymiaru podano w milimetrach)

Na bazie uzyskanych rezultatów badań symulacyjnych wyznaczono niżej zdefiniowane wielkości, tj.:

$$p_T = \frac{T_{e \max} - T_{e \min}}{T_{e \text{av}}} \quad \text{współczynnik pulsacji momentu elektromagnetycznego}$$

$$p_B = \frac{B_{y \max} - B_{y \min}}{B_{y \text{av}}} \quad \text{współczynnik pulsacji indukcji magnetycznej}$$

$$t_{e \text{av}}(\mu_k) = \frac{T_{e \text{av}}(\mu_k)}{T_{e \text{av}}(\mu_k = 1)} \quad \text{względny parametr wartości średniej momentu elektromagnetycznego}$$

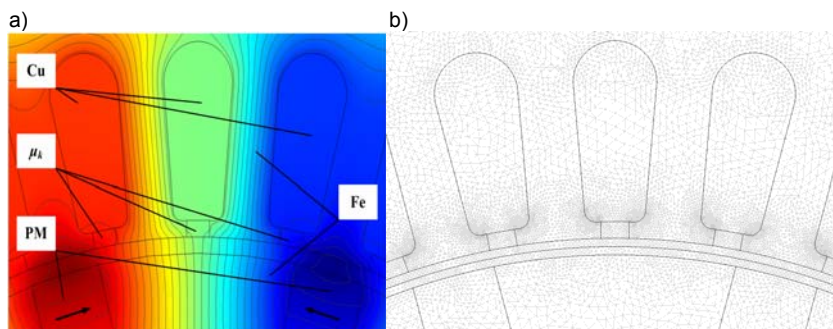
**VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010**

$t_{zav}(\mu_k) = \frac{T_{zav}(\mu_k)}{T_{zav}(\mu_k = 1)}$	względny parametr wartości średniej momentu zaczepowego
$t_{zmax}(\mu_k) = \frac{T_{zmax}(\mu_k)}{T_{zmax}(\mu_k = 1)}$	względny parametr wartości maksymalnej momentu zaczepowego
$p'_T(\mu_k) = \frac{p_T(\mu_k)}{p_T(\mu_k = 1)}$	względny parametr współczynnika pulsacji momentu elektromagnetycznego
$b'_y(\mu_k) = \frac{B_{yav}(\mu_k)}{B_{yav}(\mu_k = 1)}$	względny parametr wartości średniej indukcji magnetycznej
$p'_B(\mu_k) = \frac{p_B(\mu_k)}{p_B(\mu_k = 1)}$	względny parametr współczynnika pulsacji indukcji magnetycznej

W modelu polowym przedstawionym na rysunku 2a), stanowiącym fragment badanego obwodu magnetycznego, zaznaczono obszary o różnych właściwościach odpowiednich dla materiałów, z jakich wykonane są poszczególne elementy aktywne maszyny; symbolem PM oznaczono magnesy trwałe, na których zaznaczono wektor ich namagnesowania, Cu – uzwojenia miedziane, Fe – stal krzemowa oraz  $\mu_k$  – kliny magnetyczne. Na rysunku 2b) przedstawiono fragment siatki dyskretyzacyjnej modelu, która składa się z ok. 157 tys. elementów.

W tabeli 1 zestawiono wartości współczynników pulsacji oraz względnych parametrów pulsacji w zależności od przenikalności klinów magnetycznych oraz gęstości prądu w uzwojeniach. W tabeli tej kolorem szarym zaznaczono obszary, w których pulsacje momentu elektromagnetycznego zostały zredukowane przynajmniej o 50% w stosunku do wielkości pulsacji przy braku klinów magnetycznych. Z tabeli tej wynika, że zastosowanie klinów magnetycznych o względnej przenikalności  $\mu_k \geq 20$  powoduje zmniejszenie pulsacji momentu elektromagnetycznego o więcej niż 50%.

W tabeli 2 zamieszczone zostały wartości średnie momentu elektromagnetycznego oraz względne parametry wartości średnich momentu elektromagnetycznego.



Rys. 2. Model polowy badanego obwodu magnetycznego: rozkład linii pola magnetycznego – a), siatka dyskretyzacyjna – b).

Tab. 1. Współczynnik pulsacji momentu elektromagnetycznego  $p_T$ , względny parametr współczynnika pulsacji momentu elektromagnetycznego  $p'_T$

$\mu_k$	$p_T$				$p'_T$			
	$j=1A/mm^2$	$j=3A/mm^2$	$j=5A/mm^2$	$j=7A/mm^2$	$j=1A/mm^2$	$j=3A/mm^2$	$j=5A/mm^2$	$j=7A/mm^2$
1	8,38	3,21	1,98	1,39	100%	100%	100%	100%
2	7,22	2,72	1,66	1,17	86%	85%	84%	84%
5	6,02	2,16	1,33	0,92	72%	67%	68%	66%
10	5,16	1,85	1,12	0,77	62%	58%	57%	56%
16	4,38	1,55	0,93	0,65	52%	48%	47%	47%
20	4,01	1,41	0,85	0,59	48%	44%	43%	43%
50	2,83	1,01	0,60	0,38	34%	31%	30%	28%
100	2,31	0,85	0,49	0,28	28%	27%	25%	20%

Tab. 2. Średnia wartość momentu elektromagnetycznego  $T_{eav}$ , względny parametr wartości średniej momentu elektromagnetycznego  $t_{eav}$

$\mu_k$	$T_{eav}$ [Nm]				$t_{eav}$			
	$j=1A/mm^2$	$j=3A/mm^2$	$j=5A/mm^2$	$j=7A/mm^2$	$j=1A/mm^2$	$j=3A/mm^2$	$j=5A/mm^2$	$j=7A/mm^2$
1	2,73	7,30	11,8	16,50	100%	100%	100%	100%
2	2,67	7,18	11,7	16,48	98%	98%	99%	100%
5	2,49	6,83	11,2	15,69	91%	94%	95%	95%
10	2,29	6,47	10,7	15,04	84%	89%	90%	91%
16	2,16	6,27	10,44	14,68	79%	86%	88%	89%
20	2,14	6,22	10,3	14,56	78%	85%	87%	88%
50	2,03	6,06	10,1	14,19	74%	83%	85%	86%
100	1,98	6,00	10,0	14,04	72%	82%	85%	85%

Tab. 3. Moment zaczepowy i indukcja

$\mu_k$	$T_{zav}$ [Nm]	$t_{zav}$	$T_{zmax}$ [Nm]	$t_{zmax}$	$B_{yav}$ [T]	$b_y$	$p_B$	$p'_B$
1	7,93	100%	11,75	100%	1,08	100%	0,360	100%
2	6,52	82%	10,12	86%	1,10	102%	0,252	70%
5	4,93	62%	7,84	67%	1,13	104%	0,206	57%
10	3,79	48%	6,18	53%	1,15	106%	0,176	49%
16	2,95	37%	4,98	42%	1,16	107%	0,158	44%
20	2,74	35%	4,45	38%	1,17	108%	0,134	37%
50	1,79	23%	2,85	24%	1,20	111%	0,094	26%
100	1,40	18%	2,19	19%	1,21	112%	0,081	23%

Kolorem szarym zaznaczono przypadki, dla których zastosowanie klinów magnetycznych spowodowało zmniejszenie momentu elektromagnetycznego nie więcej niż o 3% w porównaniu do  $T_{eav}$  przy braku klinów magnetycznych. Z tabeli tej wynika, że w badanej strukturze wartość średnia momentu elektromagnetycznego zostanie zmniejszona nie więcej niż o 3% tylko w przypadku zastosowania klinów magnetycznych o względnej przenikalności  $\mu_k \leq 2$ .

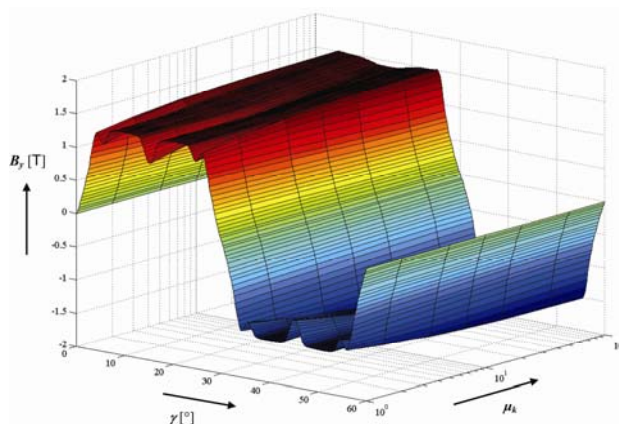
Tabela 3 przedstawia natomiast wyniki obliczeń wartości średniej i maksymalnej momentu zaczepowego, wartości średniej indukcji magnetycznej i współczynnika pulsacji indukcji magnetycznej oraz odpowiednich względnych

## VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

współczynników. Podobnie jak w tabeli 1, kolorem szarym zaznaczono w niej przypadki, w których pulsacje zostały zmniejszone przynajmniej o 50% poprzez zastosowanie klinów magnetycznych.

Z badań symulacyjnych wynika, że wprowadzenie wirnika w ruch (stan, w którym  $T_e > T_z$ ), w przypadku braku klinów magnetycznych, wymagałoby zasilenia silnika prądem o gęstości przekraczającej  $j = 3 \text{ A/mm}^2$ , natomiast zastosowanie klinów o przenikalności np.  $\mu_k = 20$  – nieco ponad  $j = 1 \text{ A/mm}^2$ .

Na rysunku 3 w postaci wykresu trójwymiarowego zamieszczono rozkłady indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej w funkcji przenikalności magnetycznej klinów na szerokości dwóch podziałek biegunowych. Badany model posiada ferromagnetyczne koncentratory pola magnetycznego, dzięki którym w szczelinie powietrznej występuje wysoka indukcja, sięgająca nawet 1,5 T. Na rysunku tym widać również wpływ obecności klinów magnetycznych – im większa jest przenikalność klinów, tym mniejsze są pulsacje indukcji magnetycznej, której rozkład jest praktycznie taki sam jak kształt napięcia indukowanego w uzwojeniach maszyny. Zatem obniżenie pulsacji indukcji magnetycznej powoduje zmniejszenie zawartości wyższych harmonicznych napięcia indukowanego.

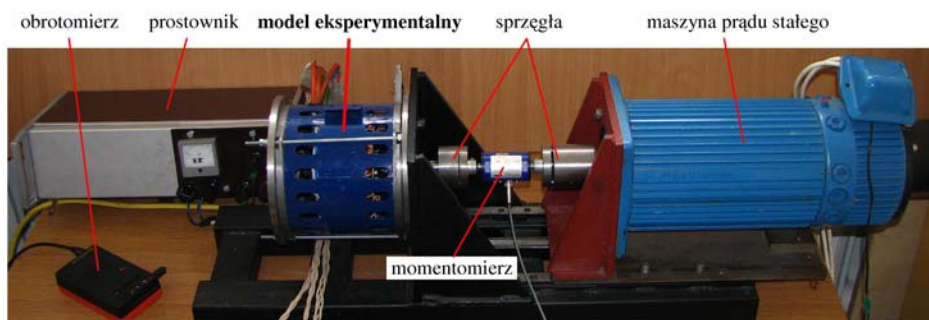


Rys. 3. Rozkłady indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej przy różnych wartościach względnych przenikalności magnetycznej klinów  $\mu_k$

### **Model fizyczny**

Obiektem badań eksperymentalnych był model fizyczny, odpowiadający wcześniej badanemu modelowi symulacyjnemu, zbudowany na bazie maszyny elektrycznej z 36 żłobkami półtwardymi z uzwojeniem miedzianym oraz wirnikiem wewnętrznym z promieniowo ułożonymi płaskimi spiekami magnesami neodymowymi  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  i ferromagnetycznymi koncentratorami pola magnetycznego. Model fizyczny został wykonany na wzór użłobkowanej maszyny BLDC z klinami niemagnetycznymi oraz z klinami magnetycznymi wykonanymi z mieszaniny proszków ferromagnetycznych stosowanych w technologii SMC (*ang. Soft Magnetic Composites*) i żywicy epoksydowej. W celu pominięcia wpływu źródła zasilania badania przeprowadzono w reżimie generatorowym. Dla dwóch modeli – z klinami magnetycznymi i bez nich – wyznaczono statyczny moment zaczepony, kształty napięcia na zaciskach modelu przy następujących prędkościach obrotowych wirnika: 200, 400, 600, 800 i 1000 obr/min. Następnie przeprowadzono pomiary kształtu krzywych momentu na wale

modelu eksperymentalnego w funkcji czasu, dla stałej prędkości obrotowej i dwóch przypadków stałego obciążenia (symetryczne obciążenie prądowe wynosiło  $I_f = 0$  A oraz  $I_f = 8$  A). Dla przebiegów tych wyznaczono współczynniki pulsacji momentu na wale. Przeprowadzono również pomiary napięcia fazowego na zaciskach maszyny w stanie bezprądowym dla wybranych prędkości obrotowych wirnika. Na rysunku 4 pokazano stanowisko do badań eksperymentalnych.

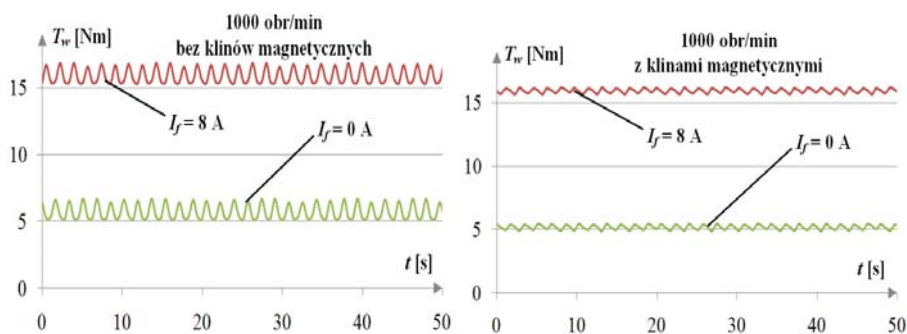


Rys. 4. Stanowisko do badań doświadczalnych



Rys. 5. Klin magnetyczny

Kliny magnetyczne (rys. 5.) o długości  $l = 30$  mm do zastosowania w modelu eksperymentalnym wykonane zostały jako odlew z mieszaniny proszku magnetycznego i żywicy epoksydowej w stosunku objętościowym 2 : 1 (dwie jednostki objętości proszku : jedna jednostka objętości żywicy). Metodą oscylograficzną wyznaczono względną przenikalność magnetyczną materiału, z którego wykonano kliny. Przenikalność ta wynosi  $\mu_k = 16$ .



Rys. 6. Przebiegi momentu na wale badanego modelu doświadczalnego dla  $n = 1000$  obr/min

## VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

Zgodnie z przeprowadzonymi badaniami maksymalny moment zaczepowy przy braku klinów magnetycznych wynosi  $T_{zmax}(\mu_k = 1) = 9,65$  Nm, a z klinami magnetycznymi –  $T_{zmax}(\mu_k = 16) = 4,47$  Nm, a więc zmalał o ok. 54%. Natomiast wartości średnie momentów zaczepowych wynosiły odpowiednio  $T_{zav}(\mu_k = 1) = 5,38$  Nm – bez klinów i  $T_{zav}(\mu_k = 16) = 2,57$  Nm – z klinami. W związku z tym wartość średnia momentu zaczepowego, dzięki zastosowaniu klinów magnetycznych o przenikalności  $\mu_k = 16$ , zmalała o ok. 52%.

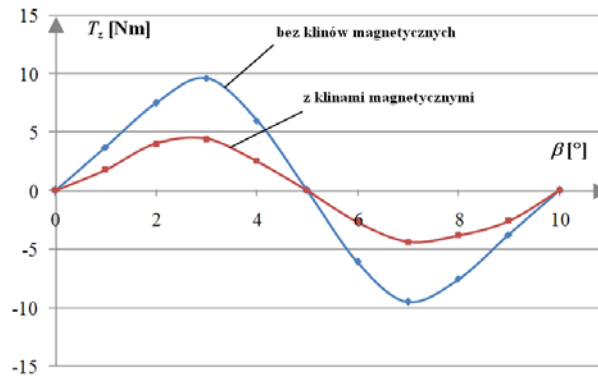
W kolejnym etapie badań w reżimie generatorowym przeprowadzono pomiar kształtu krzywej momentu na wale modelu eksperymentalnego w funkcji czasu, dla stałej prędkości obrotowej i stałego obciążenia. Przebiegi dla prędkości obrotowej  $n = 1000$  obr/min przedstawione zostały na rysunku 6. Na rysunku tym zaznaczono przebiegi momentu na wale w stanie bezprądowym oraz przy symetrycznym obciążeniu prądowym o wartości  $I_f = 8$  A. W tabeli 4 umieszczono obliczone współczynniki pulsacji momentu na wale modelu dla wszystkich badanych prędkości przy braku klinów magnetycznych  $p_{T1}$  i z klinami magnetycznymi  $p_{T16}$ .

Tab. 4. Wyniki obliczeń współczynnika pulsacji momentu na wale

Lp.	$I$ [A]	$n$ [obr/min]	$p_{T1}$ (dla $\mu_k = 1$ )	$p_{T16}$ (dla $\mu_k = 16$ )	$p_{T16}/p_{T1}$
1.	0	200	0,983	0,217	22%
2.		400	0,699	0,147	21%
3.		600	0,408	0,138	34%
4.		800	0,351	0,116	33%
5.		1000	0,262	0,105	40%
-----					
6.	8	200	0,308	0,093	30%
7.		400	0,234	0,064	28%
8.		600	0,177	0,050	28%
9.		800	0,120	0,040	33%
10.		1000	0,093	0,033	36%

Otrzymane rezultaty zamieszczone w tabeli 4 pokazują, że kliny magnetyczne znacznie ograniczyły pulsacje momentu na wale maszyny – od 60% do 79% – w zależności od prądu zasilania oraz prędkości obrotowej  $n$ . Należy zauważyć, że współczynniki pulsacji są tym mniejsze, im większa jest prędkość obrotowa maszyny, poza tym wpływ klinów magnetycznych zmniejsza się wraz ze wzrostem prędkości obrotowej wirnika. Wynika to, oczywiście, z wpływu momentu bezwładności wirnika. Zauważona zależność potwierdza słuszność tezy, że w układach napędowych o wysokiej prędkości obrotowej, a także stosunkowo dużym momencie bezwładności, pulsacje momentu nie stanowią istotnego problemu. Natomiast w napędach o niskiej prędkości obrotowej, głównie w urządzeniach precyzyjnych, pulsacje momentu negatywnie wpływają na pracę całego układu [8, 9].

Na kolejnym rysunku 7 pokazano pomierzone w stanie statycznym przebiegi momentu zaczepowego w funkcji kąta obrotu wału dla klinów niemagnetycznych i magnetycznych.



Rys. 7. Przebieg momentu zaczepowego  $T_z$  w funkcji kąta obrotu wału  $\beta$

### Podsumowanie i wnioski

Z otrzymanych rezultatów teoretycznych i eksperymentalnych wynika, że zastosowanie klinów magnetycznych pozwala na znaczne zmniejszenie maksymalnego momentu zaczepowego, redukcję pulsacji napięcia indukowanego oraz redukcję współczynnika pulsacji momentu na wale maszyny.

Z badań symulacyjnych wynika, że im większa jest przenikalność magnetyczna klinów, tym moment zaczepowy i pulsacje są mniejsze. Wraz ze wzrostem przenikalności magnetycznej klinów maleją również pulsacje indukcji magnetycznej, a w konsekwencji zmniejsza się zawartość wyższych harmonicznych w napięciach indukowanych w maszynie.

Na podstawie badań studialnych obwodów magnetycznych maszyn uźłobkowanych wynika, że we wszystkich strukturach zastosowanie klinów magnetycznych korzystnie wpływa na zmniejszenie pulsacji momentu. Każda struktura wymaga jednak przeprowadzenia oddzielnych badań optymalizacyjnych w celu określenia dla niej najbardziej racjonalnych parametrów klinów magnetycznych.

Badania doświadczalne pozwoliły sformułować generalny wniosek, że zastosowanie klinów magnetycznych o niewielkiej nawet względnej przenikalności magnetycznej znacznie zmniejsza moment zaczepowy i pulsacje przy zachowaniu średniego momentu elektromagnetycznego.

### LITERATURA

- [1] Azarewicz S., Śniegoń S., Węgliński B., Wpływ zamknięcia żłobków stojana klinami magnetycznymi na parametry silnika pracującego w ciekłym azocie, *Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne* nr 63, 2006, wyd. BOBRME Komel, s. 185-188
- [2] Dudzikowski I., Gierak D., Pulsacje momentu elektromagnetycznego i ich ograniczanie w silnikach magnetoelektrycznych prądu stałego, *Proc. of XL SME'2004*, Hajnówka (2004), s. 406-414
- [3] Dudzikowski I., Gierak D., Sposoby ograniczania pulsacji momentu elektromagnetycznego w silnikach prądu stałego wzbudzanych magnesami trwałymi, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, Nr 56, Seria: Studia i Materiały Nr 24, Wrocław 2004, s. 17-30
- [4] Jahns T. M., Song W. L., Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drives – A Review, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 43, No. 2, April 1996, pp. 321-330
- [5] Keyahani A., Murthy S. K., Studer C. B., Sebastian T., Study of Cogging Torque in Permanent Magnet Machines, *Electric Machines and Power Systems*, 27, 1999, pp. 665-678



### **VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010**

- [6] Łukaniszyn M., Wróbel R., Jagieła M., Moment elektromagnetyczny silników prądu stałego wzbudzanych magnesami trwałymi, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej* Nr 1501, Seria: Elektryka z.177, Gliwice 2001, s. 247-254
- [7] Wardach M., Minimization of torque pulsation in slotted PM machines with magnetic wedges, *Przegląd Elektrotechniczny*, Nr 11/2007, s. 118-120
- [8] Blecharz K., Wpływ kształtu biegunów magnetycznych silnika prądu stałego z magnesami stałymi na wielkość pulsacji momentu generowanego na wale, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne* Nr 66/2003, s. 17-20
- [9] Ciurys M., Dudzikowski I., Analiza wpływu wymiarów i kształtu magnesów trwałych na moment elektromagnetyczny bezszczotkowego silnika prądu stałego, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, Nr 58, Seria: Studia i Materiały Nr 25, Wrocław 2005

**Autor:** dr inż. Marcin Wardach, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Instytut Elektroenergetyki, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, E-mail: [marwar@zut.edu.pl](mailto:marwar@zut.edu.pl);

