

## Oddziaływanie klinów magnetycznych na parametry maszyny elektrycznej z magnesami i regulacją strumienia

**Streszczenie.** Celem artykułu jest przedstawienie wybranych wyników badań symulacyjnych, otrzymanych przy użyciu programu Flux 3D, wpływu klinów magnetycznych o względnych przenikalnościach magnetycznych w zakresie 1÷16, zamykających żłobki stojana maszyny z magnesami trwałymi i regulacją strumienia wzbudzenia. Dla wybranych przenikalności magnetycznych klinów wyznaczono moment zaczepowy, moment elektromagnetyczny, pulsacje momentu, siłę elektromotoryczną rotacji indukowaną w uzwojeniach stojana oraz analizę harmoniczną SEM dla trzech stanów zasilania dodatkowej cewki regulującej wzbudzenie magnetyczne maszyny. Badania wykazały pozytywny wpływ zastosowania klinów magnetycznych, które powodują skuteczną redukcję momentu zaczepowego oraz pulsacji momentu użytecznego poprawiając tym samym własności ruchowe maszyny ECPSM przy zachowaniu jej momentu obrotowego.

**Abstract.** The aim of paper is to present selected results of simulation investigations concerning influence of the relative magnetic permeability of a magnetic wedges in range 1÷16 to closing slots of the stator machine with permanent magnets machine and excitation control coil, using the 3D-calculation code via Flux-3D. For the selected values of the relative magnetic permeability of magnetic wedges the cogging torque, the electromagnetic torque, ripple, electromotive force and FFT analysis, at three level supply of additional excitation control coil, were presented. This investigations uncovered positive influence of using the magnetic wedges to the cogging torque and ripple reduction efficiently with improved working operation of the ECPSM machine without decreasing its torque's value both. **(Influence of magnetic wedges on working electrical machine parameters with magnets and flux excitation adjustment)**

**Słowa kluczowe:** maszyna elektryczna z magnesami trwałymi, klin magnetyczny, regulacja wzbudzenia.

**Keywords:** permanent magnet electric machine, magnetic wedge, magnetic field control.

doi:10.12915/pe.2014.10.03

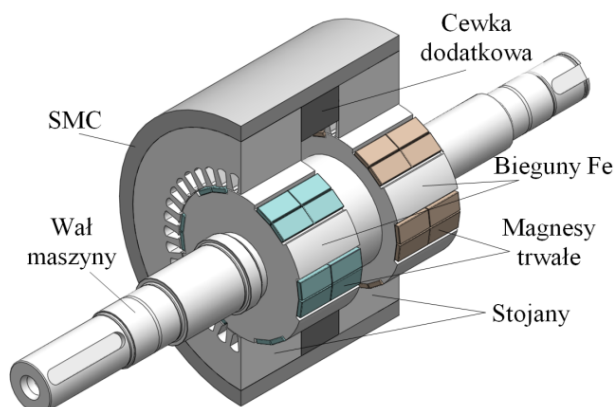
### Wstęp

Maszyny elektryczne z magnesami trwałymi posiadają wiele zalet, do których zalicza się m.in. wysoką dynamikę, wysokie współczynniki mocy oraz momentu do masy, małe straty oraz wysoką sprawność. Natomiast podstawową wadą, dla dużej grupy maszyn z magnesami rozmieszczonymi powierzchniowo na obwodzie wirnika, stanowi pulsacja momentu elektromagnetycznego wynikająca głównie z momentu zaczepowego, która ograniczana jest wieloma znanymi sposobami [1, 2, 4, 9-11]. Jedną z metod skutecznej minimalizacji wartości momentu zaczepowego jest stosowanie techniki zamykania żłobków klinem z materiału ferromagnetycznego o stosunkowo niewielkich względnych przenikalnościach magnetycznych rzędu  $\mu_{rk} = 5 \div 15$ .

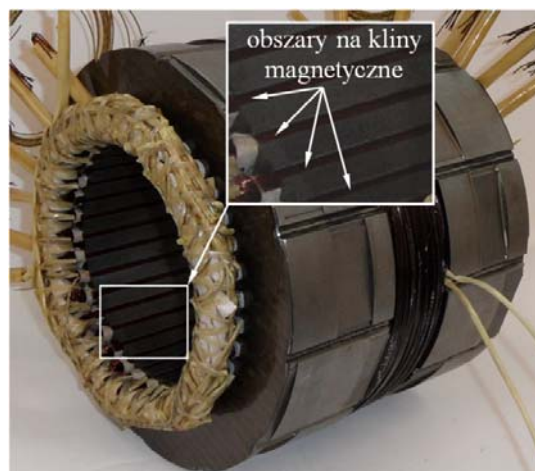
W pracy przedstawione zostały wybrane wyniki badań symulacyjnych, opartych na Metodzie Elementów Skończonych (MES), wpływu obecności klinów magnetycznych w żłobkach pakietowanych stojanów na parametry 12-biegunowej maszyny z magnesami trwałymi o mocy 20kW, posiadającej możliwość regulacji wzbudzenia (Electric Controlled Permanent Magnet Excited Synchronous Machine ECPSM).

Analizowana maszyna ECPSM składa się z dwóch rdzeni twornika oddzielonych dodatkową cewką regulującą wzbudzenie od magnesów umieszczonych na wirniku [3, 5-8]. Proponowane rozwiązanie konstrukcyjne posiada grupę czterech magnesów tworzących biegun maszyny na jednej części wirnika oraz drugiej o magnesach spolaryzowanych przeciwnie. Pomiędzy magnesami, na każdej z części wirnika, występują bieguny ferromagnetyczne, których strumień magnetyczny kształtowany jest po części strumieniami od magnesów oraz dodatkowej cewki. Stojany umieszczone są wewnątrz tulei wykonanej, podobnie jak część wirnika (poza wałem), z mieszaniny proszku magnetycznego Somaloy S500 i żywicy epoksydowej. Dodatkowa cewka zastosowana jest w celu wzmocnienia lub osłabienia pola magnetycznego od magnesów trwałych. Przekrój części aktywnych stojana oraz widok wirnika proponowanej maszyny ECPSM, z zaznaczonymi zasadniczymi elementami konstrukcyjnymi,

przedstawiony został na rysunku 1. Ponadto na rysunku 2 przedstawiono fotografię stojana, na której zaznaczono strzałkami przykładowe żłobki, gdzie planowane jest umieszczenie klinów magnetycznych. Należy zaznaczyć, że kliny będą umieszczone we wszystkich żłobkach maszyny.

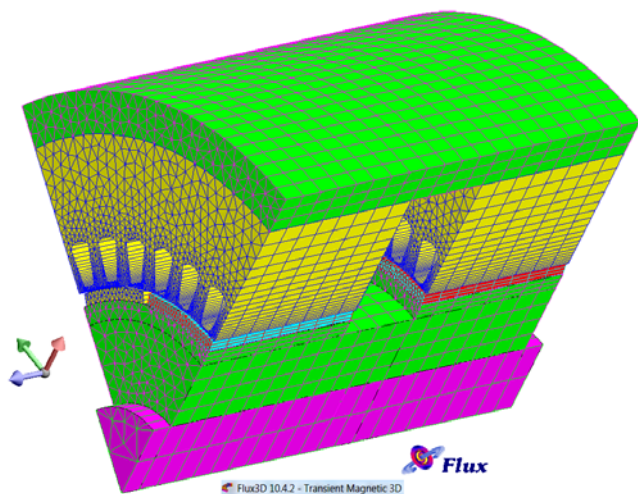


Rys. 1. Widok części aktywnych maszyny ECPSM

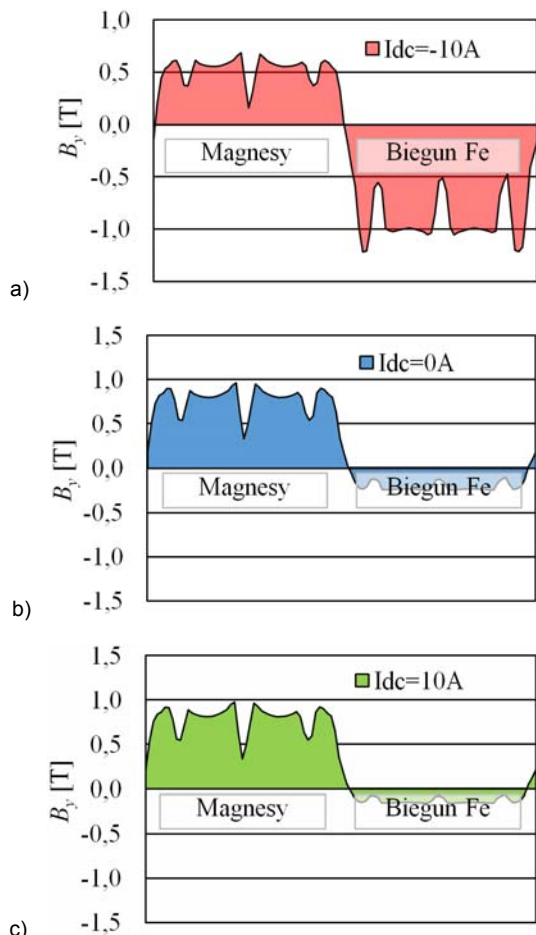


Rys. 2. Stojany i dodatkowa cewka maszyny ECPSM

Model, stanowiący 1/6 całej struktury analizowanej maszyny ECPSM przedstawiony na rysunku 3, uwzględnia nieliniowość materiałów ferromagnetycznych oraz parametry magnetyczne magnesów trwałych, które planowane są do zastosowania w modelu fizycznym.



Rys. 3. Model MES maszyny ECPSM wraz z siatką dyskretyzacyjną zawierającą ok. 270 tys. węzłów

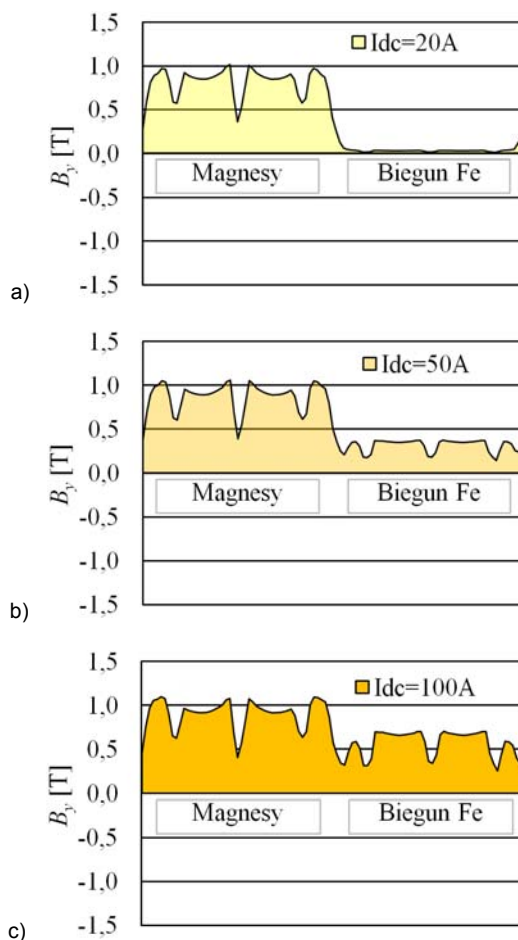


Rys. 4. Rozkład indukcji magnetycznej w szczeliny powietrznej maszyny ECPSM dla trzech stanów wzbudzenia prądem cewki dodatkowej

W celu przeprowadzenia wstępnej analizy oddziaływania strumienia od cewki dodatkowej w zaproponowanym rozwiązaniu konstrukcyjnym wyznaczono rozkład składowej radialnej indukcji magnetycznej w szczeliny powietrznej dla dwóch biegunów

(nad magnesem i biegunem żelaznym) jednej części maszyny. Na rysunku 4 przedstawiono charakter zmiany rozkładu i wartości indukcji dla trzech stanów zasilania cewki dodatkowej:  $I_{dc} = -10A$  (rys.4a, dowzbudzenie),  $I_{dc} = 0A$  (rys.4b) oraz  $I_{dc} = 10A$  (rys.4c, odwzbudzenie).

W celu oszacowania wartości prądu cewki dodatkowej, która spowoduje zmianę zwrotu wektora indukcji magnetycznej na przeciwny w obszarach biegunów żelaznych, wykonano dodatkowe obliczenia, których wyniki przedstawiono na rysunku 5. W wyniku badań zaobserwowano, że przy prądzie  $I_{dc} = 20A$  występuje zmiana biegunowości pod biegunami żelaznymi, a przy prądzie  $I_{dc} = 100A$  następuje silne ich domagnesowanie, co w konsekwencji pozwala na skuteczne odwzbudzenie maszyny. Ten stan magnetyczny wyjątkowo pożądany jest w sytuacjach awaryjnych, związanych z uszkodzeniem stojana, do kontroli prądów zwarć w uzwojeniach, szczególnie groźnych dla wysokoobrotowych maszyn z magnesami trwałymi.



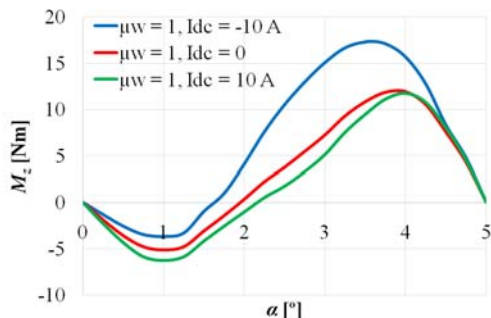
Rys. 5. Rozkład indukcji magnetycznej w szczeliny powietrznej maszyny ECPSM dla przypadków zmiany polaryzacji biegunów żelaznych

Wyniki te pokazały również istotne zwiększenie harmonicznym indukcji magnetycznej w szczeliny powietrznej, które wpływają na zwiększenie pulsacji momentu, głównie związanych ze wzrostem momentu zaczepowego.

#### Moment zaczepowy

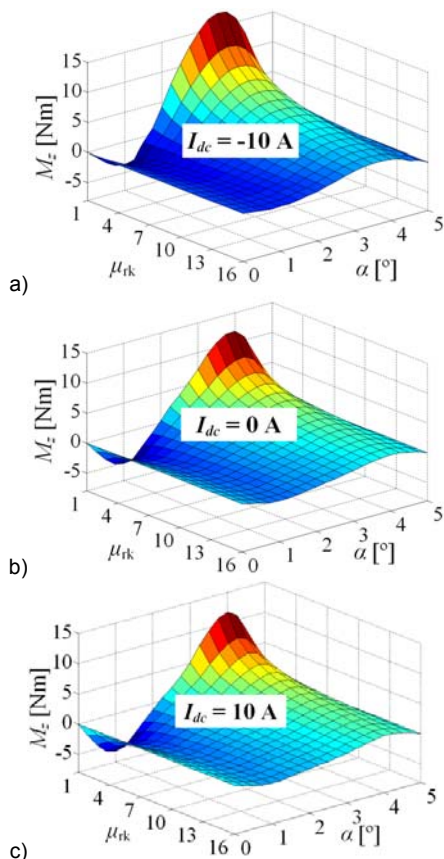
W analizowanej maszynie ECPSM przeprowadzono badania przebiegu oraz wartości momentu zaczepowego  $M_z$  (rys. 6) przy braku klinów magnetycznych tj. dla  $\mu_{rk} = 1$  w funkcji kąta obrotu wirnika  $\alpha$  o pół podziałki zębowej tj.  $5^\circ$  mechanicznych, dla trzech stanów wzbudzenia prądem

dotodkowej cewki:  $I_{dc} = -10\text{A}$  (dowzbudzenie),  $I_{dc} = 0\text{A}$  oraz  $I_{dc} = 10\text{A}$  (odwzbudzenie). Z przebiegów tych zauważyć można, oprócz dużych wartości szczytowych momentu zaczepowego sięgających 12 Nm przy braku prądu dodatkowej cewki, również silny związek jego wzrostu o ok. 5 Nm w stanie dowzbudzania maszyny.



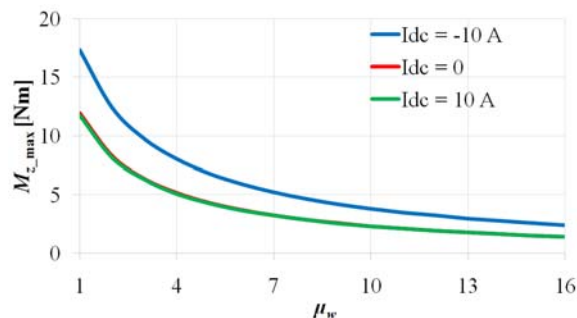
Rys. 6. Przebieg momentu zaczepowego przy  $\mu_{rk} = 1$

Na rysunku 7 przedstawiono przebieg momentu zaczepowego w zależności od kąta  $\alpha$  oraz przenikalności magnetycznej klinów w zakresie  $\mu_{rk} = 1 \div 16$  dla trzech stanów wzbudzenia prądem dodatkowej cewki:  $I_{dc} = -10\text{A}$  (rys. 4a),  $I_{dc} = 0\text{A}$  (rys. 4b) oraz  $I_{dc} = 10\text{A}$  (rys. 4c).



Rys. 7. Moment zaczepowy w funkcji przenikalności klinów i kąta położenia wirnika dla 3 stanów wzbudzenia prądem dodatkowej cewki

W celu wyznaczenia wpływu zastosowania klinów magnetycznych na wartość maksymalną momentu zaczepowego  $M_{z,max}$  sporządzono rysunek 8 oraz tabelę 1. W tabeli zamieszczono trzy kolumny z wartościami  $m_{z,max}$ , które ilustrują zmianę wartości maksymalnych momentu zaczepowego w odniesieniu do wartości momentu w przypadku braku klina magnetycznego i zerowym prądzie zasilania dodatkowej cewki ( $I_{dc} = 0$ ).



Rys. 8. Zależność wartości maksymalnej momentu zaczepowego w funkcji przenikalności klinów dla trzech stanów wzbudzenia prądem dodatkowej cewki

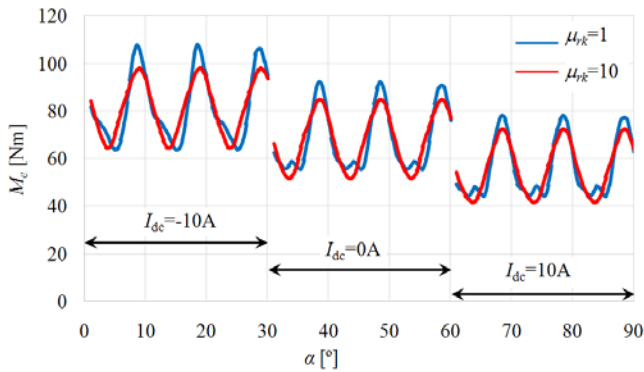
Tabela 1. Wyniki obliczeń wartości maksymalnej momentu zaczepowego w zależności od przenikalności klinów magnetycznych

$\mu_w$	$M_{z,max}$ [Nm]			$m_{z,max}$ [%]		
	$I_{dc} = -10\text{ A}$	$I_{dc} = 0$	$I_{dc} = 10\text{ A}$	$I_{dc} = -10\text{ A}$	$I_{dc} = 0$	$I_{dc} = 10\text{ A}$
1	17,30	11,93	11,74	145	100	98
2	12,38	8,27	8,13	104	69	68
3	9,72	6,36	6,27	81	53	53
4	8,01	5,16	5,09	67	43	43
5	6,80	4,32	4,28	57	36	36
6	5,90	3,71	3,68	49	31	31
7	5,21	3,24	3,22	44	27	27
8	4,65	2,87	2,85	39	24	24
9	4,20	2,56	2,55	35	21	21
10	3,82	2,31	2,31	32	19	19
11	3,50	2,10	2,10	29	18	18
12	3,22	1,92	1,92	27	16	16
13	2,98	1,76	1,77	25	15	15
14	2,77	1,63	1,63	23	14	14
15	2,58	1,51	1,51	22	13	13
16	2,42	1,40	1,41	20	12	12

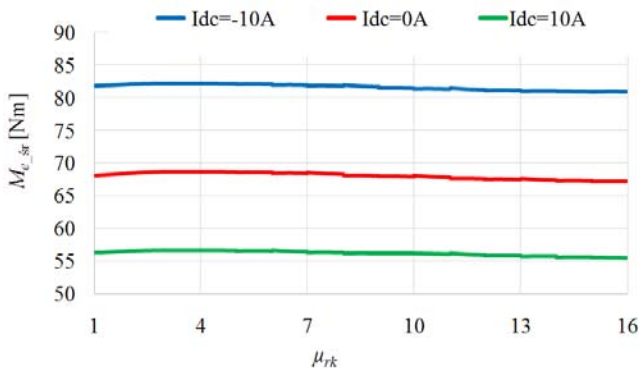
Z przeprowadzonych badań wynika, że kliny magnetyczne umożliwiają znaczne ograniczenie momentu zaczepowego. Już zastosowanie klinów o przenikalności  $\mu_{rk} > 4$  powoduje zmniejszenie wartości maksymalnej momentu zaczepowego o co najmniej o 50%. Należy również zauważyć, że na wartość maksymalną momentu zaczepowego duży wpływ ma prąd w dodatkowej cewce. W przypadku zasilania tej cewki prądem  $I_{dc} = -10\text{ A}$  jego wartość znacznie wzrasta.

### Moment elektromagnetyczny

Podczas badań maszyny ECPSM wyznaczony został przebieg momentu elektromagnetycznego  $M_e$  dla trzech stanów zasilania dodatkowej cewki, w zależności od przenikalności magnetycznej klinów, która przyjmowała wartości z zakresu  $\mu_{rk} = 1 \div 16$ . Na rysunku 9 przedstawiono przebieg momentu elektromagnetycznego dla dwóch wartości przenikalności magnetycznej klinów wynoszących  $\mu_{rk} = 1$  oraz  $\mu_{rk} = 10$  przy zasilaniu uzwojeń prądem sinusoidalnie zmiennym o wartości skutecznej twornika  $I_{a,sk} = 30\text{ A}$ , natomiast na rysunku 10 – wartość średnią momentu elektromagnetycznego w zależności od przenikalności klinów dla wybranych trzech stanów zasilania dodatkowej cewki.



Rys. 9. Moment elektromagnetyczny bez klinów magnetycznych ( $\mu_{rk} = 1$ ) oraz z klinem ( $\mu_{rk} = 10$ ) dla trzech stanów wzbudzenia prądem dodatkowej cewki



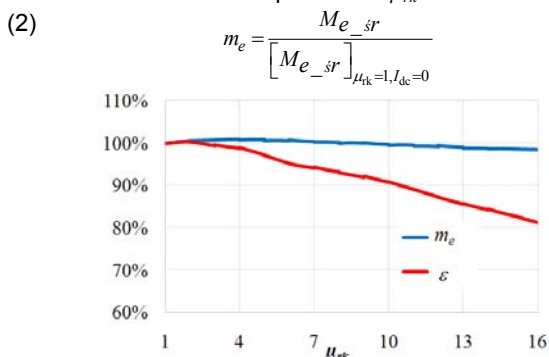
Rys. 10. Wartość średnia momentu elektromagnetycznego w funkcji względnej przenikalności magnetycznej klinów

Z przedstawionych rysunków wynika, że zastosowanie klinów nie powoduje zmniejszenia wartości średniej momentu elektromagnetycznego.

Podczas badań wyznaczony został również względny współczynnik pulsacji momentu elektromagnetycznego  $\varepsilon$ , który wyznaczono z zależności (1) [10].

$$(1) \quad \varepsilon = \frac{M_{e\_max} - M_{e\_min}}{M_{e\_sr}} \Bigg|_{\mu_{rk}=1, I_{dc}=0}$$

Na rysunku 11 przedstawiono wyniki obliczeń względnego współczynnika pulsacji  $\varepsilon$  oraz względnej wartości momentu elektromagnetycznego  $m_e$  wyznaczonego z zależności (2) dla stanu  $I_{dc} = 0A$  maszyny ECPSM w zależności od parametru  $\mu_{rk}$  klinów.



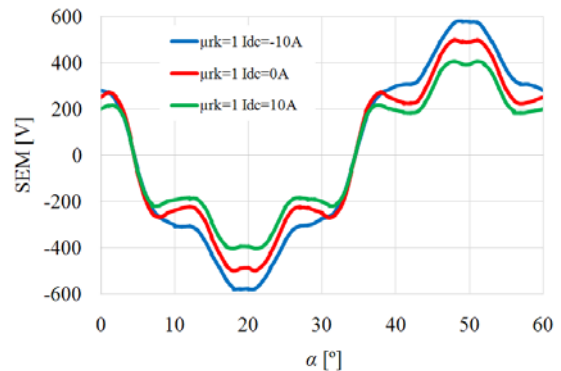
Rys. 11. Zmiana względnej wartości momentu elektromagnetycznego  $m_e$  i względnego współczynnika pulsacji momentu  $\varepsilon$  w funkcji przenikalności magnetycznej klinów  $\mu_{rk}$

Z przeprowadzonych analiz wynika, że zastosowanie w maszynie ECPSM klinów o względnej przenikalności

magnetycznej nie większej niż  $\mu_{rk} = 10$  pozwala zmniejszyć pulsacje momentu elektromagnetycznego o około 10% przy zachowaniu jego wartości średniej.

### Badania napięcia indukowanego

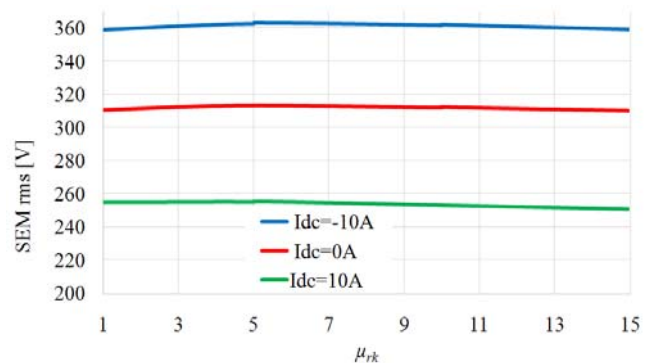
Podczas badań wyznaczono również przebiegi napięć indukowanych (SEM) w uzwojeniach fazowych maszyny przy prędkości obrotowej wirnika  $n = 3\,000$  obr/min. Na rysunku 12 przedstawiono przebieg SEM w przypadku braku klinów magnetycznych dla trzech stanów wzbudzenia prądem dodatkowej cewki.



Rys. 12. Przykładowy przebieg napięcia indukowanego dla  $\mu_{rk} = 1$  przy prędkości wirnika  $n=3000$  obr/min dla trzech stanów wzbudzenia prądem dodatkowej cewki

Każdy ze stojanów zawiera po 36 cewek ułożonych dwuwarstwowo w układzie trójfazowym skojarzonych w gwiazdę. Dwanaście zezwojów każdej z faz połączonych jest w sześć gałęzi równoległych po dwa zezwoje szeregowo. Natomiast odpowiednie uzwojenia fazowe obydwu stojanów połączone są szeregowo.

W wyniku przeprowadzonych badań symulacyjnych wyznaczono wartości skuteczne napięcia indukowanego (rys. 13) na zaciskach maszyny w zależności od przenikalności magnetycznej klinów dla analizowanych trzech stanów zasilania dodatkowej cewki.

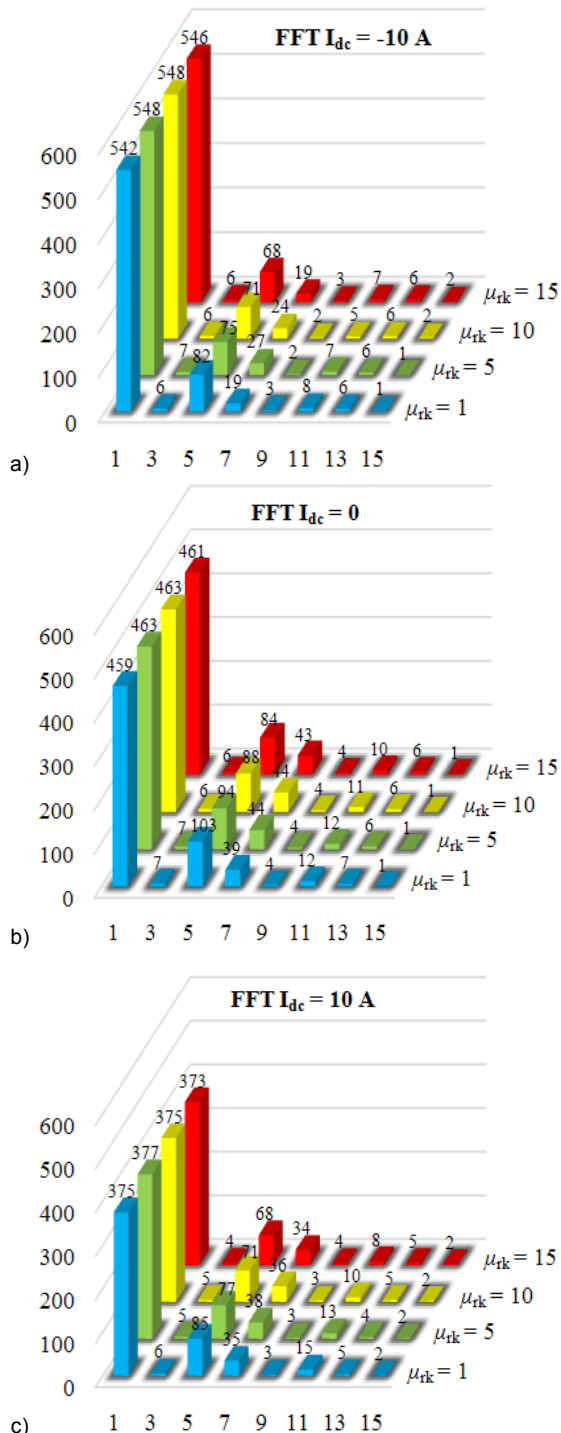


Rys. 13. Zależność wartości skutecznej SEM w zależności od przenikalności magnetycznej klinów oraz prądu zasilania dodatkowej cewki

Ponadto analizie poddano zawartości wyższych harmonicznych w napięciach indukowanych (do 15-tej harmonicznej), które przedstawiono na rysunku 14. Podane wartości oznaczają amplitudy poszczególnych harmonicznych w zależności od parametrów  $I_{dc}$  oraz  $\mu_{rk}$ .

Z przeprowadzonych badań wynika, że zastosowanie klinów magnetycznych o badanych parametrach wpływa jedynie w niewielkim stopniu na wartość średnią napięcia indukowanego. Ma natomiast wpływ na zmniejszenie udziału szczególnie piątej harmonicznej napięcia również w stanach odwzbudzenia i dowzbudzenia maszyny.

Z badań tych wynika również, że na wartość średnią napięcia indukowanego bardzo duży wpływ ma prąd w cewce dodatkowej, bowiem zasilenie cewki prądem  $I_{dc} = -10A$  powoduje wzrost napięcia indukowanego o około 49V (co w stosunku do wartości średniej napięcia indukowanego w przypadku  $I_{dc} = 0$  wynoszącego 312V daje wzrost o 16%), natomiast dla prądu  $I_{dc} = 10A$  – zmniejszenie o 58 V (o 19%).



Rys. 14. Rozkład wyższych harmonicznych napięcia indukowanego

### Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań symulacyjnych wynika, że zastosowanie w maszynie ECPSM klinów magnetycznych o względnej przenikalności magnetycznej w zakresie  $\mu_{rk}=5\div 10$  znacznie poprawia jej własności ruchowe. Dzięki klinom magnetycznym możliwe jest zmniejszenie pulsacji

momentu elektromagnetycznego oraz zmniejszenie momentu zaczepowego nawet o 50%.

Ponadto z badań wynika, że obecność klinów magnetycznych w maszynie z magnesami trwałymi z regulacją strumienia wzbudzenia nie spowoduje zmniejszenia wartości średniej momentu użytecznego oraz nie zakłóci znacząco zachodzących w niej procesów elektromagnetycznych, a poza tym wpłynie na zmniejszenie zawartości wyższych harmonicznych w napięciu indukowanym.

Otrzymane wyniki badań stanowią podstawę do dalszych prac nad technologią wykonania klinów o optymalnych parametrach magnetycznych i mechanicznych, a także nad konstrukcją, optymalizacją i badaniami budowanej maszyny ECPSM.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki, nr projektu N 510 508040 (2011-2013).

### LITERATURA

- [1] Fei W., Luk P. C. K.: Cogging torque reduction techniques for axial-flux surface-mounted permanent-magnet segmented-armature-torus machines, Proc. ISIE, 2008, pp. 485–490
- [2] Hemmati S., ShokriKojoori Sh., Ghobadi R., Ghiasi M. I.: A practical approach to cogging torque reduction in a permanent magnet synchronous motor using non-dominated sorting genetic algorithm, Proc. Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), 2013, pp. 88 – 92
- [3] Kosaka T., Sridharbabu M., Yamamoto M., Matsui N.: Design studies on hybrid excitation motor for main spindle drive in machine tools. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, no. 11/2010, pp. 3807–3813
- [4] Lee G. C., Jung T. U.: Cogging torque reduction design of dual stator radial flux permanent magnet generator for small wind turbine, Proc. TENCON Spring Conference, 2013 IEEE, p. 85 – 89
- [5] May H., Pałka R., Paplicki P., Szkolny S., Wardach M.: Comparative research of different structures of a permanent-magnet excited synchronous machine for electric vehicles. Electrical Review, R. 88 NR 12a/2012, pp.53-55
- [6] Pałka R., Paplicki P., Piotuch R., Wardach M.: Maszyna z magnesami o regulowanym wzbudzeniu - wybrane wyniki prac projektowych. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. 32/2012, s.128-133
- [7] Putek P., Paplicki P., Słodička M., Pałka R., Van Keer R.: Application of topological gradient and continuum sensitivity analysis to the multi-objective design optimization of a permanent-magnet excited synchronous machine. Przegląd Elektrotechniczny, R. 88, nr 7a (2012), pp. 256-260
- [8] Putek P., Słodička M., Paplicki P., Pałka R.: Minimization of cogging torque in permanent magnet machines using the topological gradient and adjoint sensitivity in multi-objective design. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics Vol. 39, nr 1-4 (2012), pp. 933-940
- [9] Wardach M., Paplicki P., Pałka R., Cierzniewski P., Wpływ konstrukcji wirnika na parametry maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi, Przegląd Elektrotechniczny, R. 87 nr 11/2011, str. 131-134
- [10] Wardach M.: Badania wpływu klinów magnetycznych na pulsacje w maszynie elektrycznej z magnesami trwałymi. Przegląd Elektrotechniczny, Nr 6/2010, s. 163-166
- [11] Wu L. J., Zhu Z. Q., Staton D. A., Popescu M., Hawkins D.: Comparison of Analytical Models of Cogging Torque in Surface-Mounted PM Machines, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, p. 2414 – 2425

### Autorzy:

prof. dr hab. inż. Ryszard Pałka, e-mail: rpałka@zut.edu.pl; dr inż. Piotr Paplicki, e-mail: paplicki@zut.edu.pl; dr inż. Marcin Wardach, e-mail: marwar@zut.edu.pl; Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin