

Robert Rossa, Paweł Pistelok
BOBRME KOMEL, Katowice

TRÓJFAZOWY GENERATOR Z MAGNESAMI TRWAŁYMI W REŻIMIE PRACY JEDNOFAZOWEJ

TREE PHASE PERMANENT MAGNET GENERATOR ASSIGNED TO SINGLE-PHASE WORK

Abstract: The article presents the concept of an electromagnetic circuit generator with permanent magnets mounted on the surface rotor core designed for single phase work. Computation field-circuit model was shown. The spectrum of time course of voltages in the idle work was presented. The cross section with graphically presentation of magnetic induction in particular parts of electromagnetic circuits was presented. Distribution of magnetic induction at the rated load point for each phase were shown. The time course of voltages and currents for each phases for rated power were displayed. An analysis of laboratory results and measurement of load characteristics of the generator was discussed. The work deals with three electromagnetic circuits of generators with permanent magnet where output voltage characteristics versus rated power were expressed.

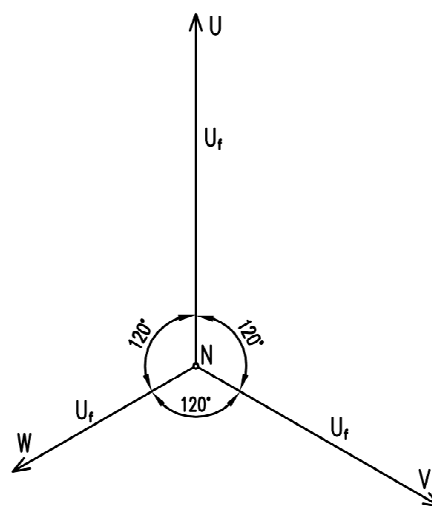
1. Wstęp

W dobie rozwijającej się gałęzi przemysłu w zakresie produkcji magnesów ziem rzadkich, ich zastosowanie znacząco wzrosło. Jednym z przykładowych obszarów zastosowań są synchroniczne maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi. W zależności od przeznaczenia maszyny te są projektowane i produkowane jako silniki lub generatory. Generatory wzbudzone magnesami trwałymi, w porównaniu do innych maszyn, charakteryzują się najwyższą sprawnością oraz największą gęstością mocy uzyskiwanej z jednostki objętości [1,2,3]. Maszyny te są powszechnie stosowane do specyficznych warunków pracy [4,5]. Jednym z takich zastosowań może być trójfazowy generator synchroniczny przeznaczony do pracy jednofazowej, który został przedstawiony w niniejszym artykule. W pracy zaprezentowano model obliczeniowy, wyniki symulacji oraz wyniki badań laboratoryjnych wykonanego generatora.

2. Założenia i specyfikacja projektowa

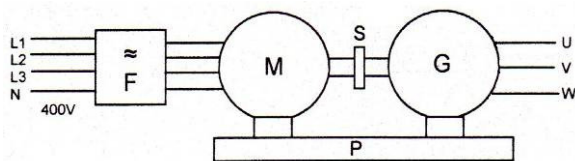
Pomimo, iż generator pracuje jako jednofazowy, został tak zaprojektowany aby każda z faz posiadała różne wartości znamionowe napięć fazowych. Wykres wektorowy tych napięć został zaprezentowany na rysunku 1. Wskazy poszczególnych faz zostały przedstawione proporcjonalnie do ich wartości i reprezentują rzeczywisty układ wirujących wektorów napięć fazowych w omawianym generatorze. Znamio-

nowe wartości napięć fazowych dla każdej z faz wynoszą $U_U=400$ V, $U_V=320$ V, $U_W=240$ V. Poszczególne wartości napięć wynikały ze specyficznych warunków pracy generatora, który pracując w układzie zaprezentowanym na rysunku 2, stanowi źródło napięcia dla transformatora probierczego. Wartości napięć fazowych zostały dobrane z uwagi na optymalną pracę układu badawczego.



Rys. 1. Wykres wektorowy napięć fazowych generatora w wykonaniu specjalnym

Podane wartości napięć zostały podyktowane specjalnym charakterem pracy układu w jakim generator został zamontowany. Na rysunku 2 zaprezentowano schemat poglądowy przedstawiający ideę pracy takiego układu.

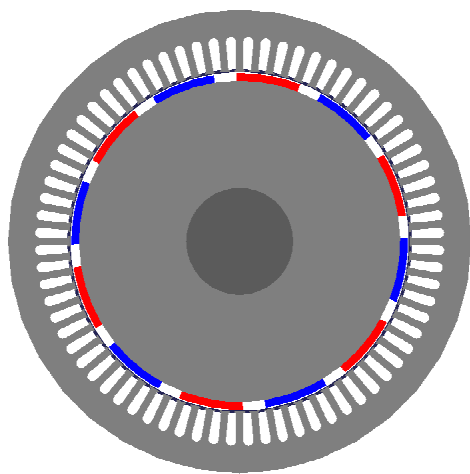


Rys. 2. Schemat poglądowy układu pracy generatora w wykonaniu specjalnym

Generator G jest napędzany silnikiem asynchronicznym M zasilanym z przemiennika częstotliwości F . Obydwie maszyny są ze sobą sprzężone za pomocą sprzęgła S , a cały układ został umieszczony na wspólnym posadowieniu P . Przemiennik częstotliwości zasilany jest z sieci trójfazowej 400 V, co umożliwia przeprowadzenie łagodnego rozruchu i regulację częstotliwości napięcia zasilania silnika asynchronicznego. Zakres regulacji częstotliwości napięcia zasilania silnika umożliwia pracę generatora do częstotliwości 150 Hz. Generator zamontowany w takim układzie pracuje obciążony jednofazowo, co narzuca konieczność rozpatrywania niesymetrycznych stanów obciążenia. Z uwagi na jednofazowy charakter pracy, model obliczeniowy generatora został opracowany w środowisku Maxwell 2D z wykorzystaniem zewnętrznych obwodów zasilających służących do modelowania (modyfikowania układów połączeń) różnych stanów pracy generatora.

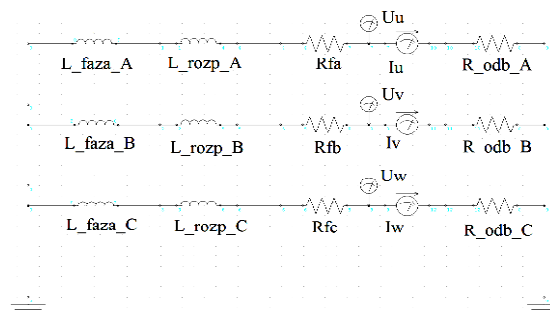
3. Model obliczeniowy

W celu przeprowadzenia obliczeń w środowisku Maxwell 2D został opracowany model połowy maszyny zaprezentowany na rysunku 3.



Rys. 3. Przekrój poprzeczny obwodu elektromagnetycznego generatora w wykonaniu specjalnym

W celu przeprowadzenia obliczeń analitycznych został opracowany schemat elektryczny (rys.4), za pomocą którego symulowano obciążenie jednej fazy generatora. W rozpatrywanym stanie obciążenia pozostałe dwie fazy nie były rozpatrywane, co zasymulowano dużą (rzędu 100 M Ω) rezystancją obciążenia.

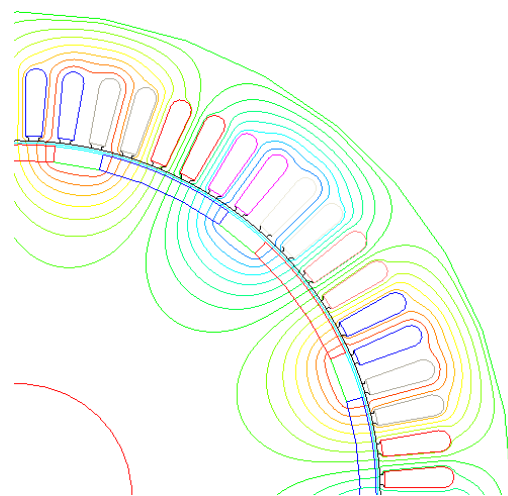


Rys. 4. Schemat elektryczny modelu obliczeniowego generatora w wykonaniu specjalnym dla biegu jałowego

Na rysunku 4 ograniczono się do zaprezentowania schematu dla biegu jałowego, gdyż w przypadku schematu dla stanu obciążenia poszczególnych faz należy zmienić jedynie rezystancję odbiornika dla badanej fazy. W celu pomiaru przebiegów napięć i prądów w schemacie umieszczono przyrządy pomiarowe, jak pokazano rysunku 4.

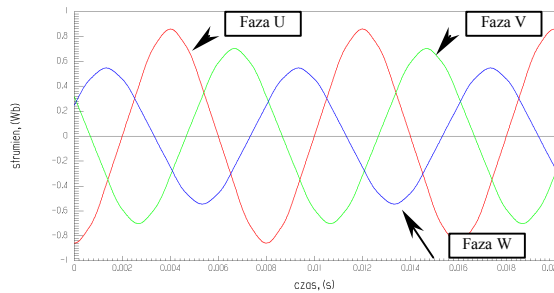
4. Wyniki obliczeń – bieg jałowy

Po przeprowadzeniu obliczeń biegu jałowego uzyskano rozkład strumienia magnetycznego w rdzeniu maszyny, który zaprezentowano na rysunku 5.

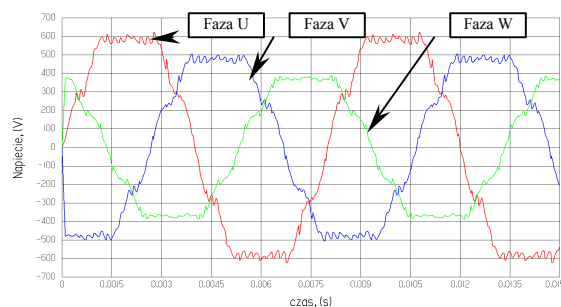


Rys. 5. Linie strumienia magnetycznego w przekroju poprzecznym generatora w wykonaniu specjalnym

Z rozkładu linii strumienia magnetycznego w przekroju poprzecznym wynika, iż model obliczeniowy został wykonany poprawnie. W celu zobrazowania wartości chwilowych strumienia magnetycznego na rysunku 6 zaprezentowano przebiegi czasowe strumienia magnetycznego dla każdej fazy z osobna.

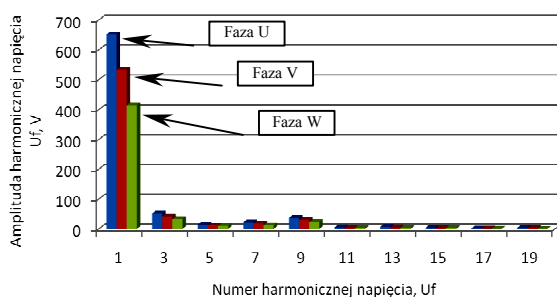


Rys. 6. Przebiegi czasowe strumieni skojarzonych z poszczególnymi fazami generatora w wykonaniu specjalnym

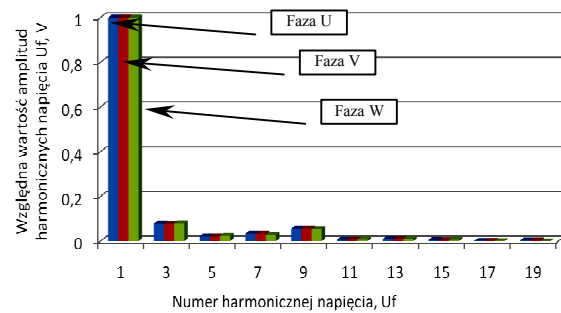


Rys. 7. Przebiegi chwilowe napięć dla każdej z faz generatora w wykonaniu specjalnym

Jak wynika z rysunku 6 i 7, wartości chwilowe strumieni magnetycznych i napięć fazowych różnią się amplitudą w zależności od wybranej fazy, co świadczy o poprawnym zaprojektowaniu uzwojenia maszyny. W celu weryfikacji współczynników zawartości wyższych harmonicznych w indukowanym napięciu na rysunku 8 i 9 zaprezentowano widmo przebiegów czasowych napięcia na biegu jałowym omawianego generatora.



Rys. 8. Widmo przebiegów czasowych napięć fazowych wszystkich faz generatora

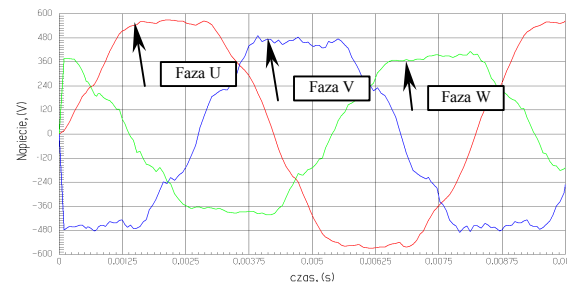


Rys. 9. Widmo przebiegów czasowych napięć fazowych wszystkich faz generatora w wartościach względnych

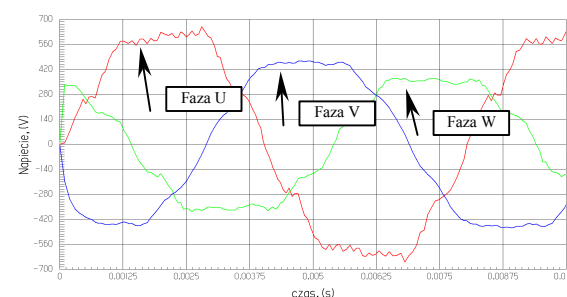
Jak można zauważyć na rysunku 9, w widmie czasowego przebiegu napięcia zawartość wyższych harmonicznych w odniesieniu do pierwszej harmonicznej jest taka sama dla każdej z prezentowanych faz. Fakt ten świadczy o takich samych warunkach pracy każdej fazy prądnicy. Obliczeniowe współczynniki zawartości wyższych harmonicznych czasowych przebiegów napięć każdej z faz zostały przedstawione w tabeli 1.

5. Wyniki obliczeń – stan obciążenia

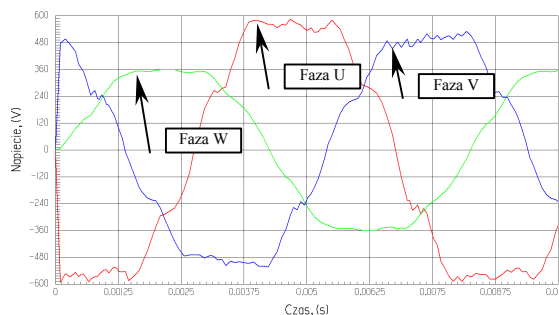
W wyniku przeprowadzenia obliczeń polowobwodowych otrzymano szereg charakterystyk przebiegów czasowych napięć i prądów pokazanych w zestawieniu na rysunkach 10-15.



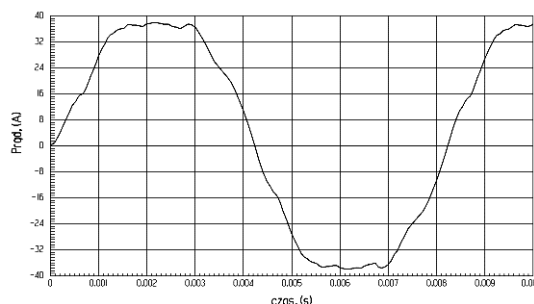
Rys. 10. Przebiegi czasowe napięć w stanie obciążenia fazy U generatora w wykonaniu specjalnym



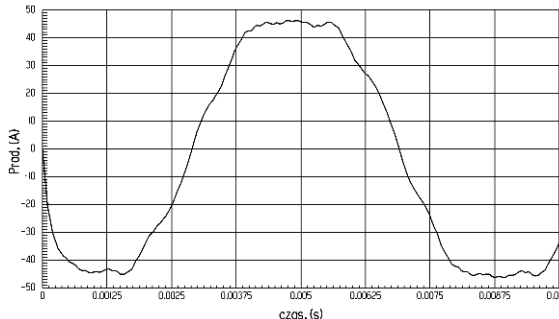
Rys. 11. Przebiegi czasowe napięć w stanie obciążenia fazy V generatora w wykonaniu specjalnym



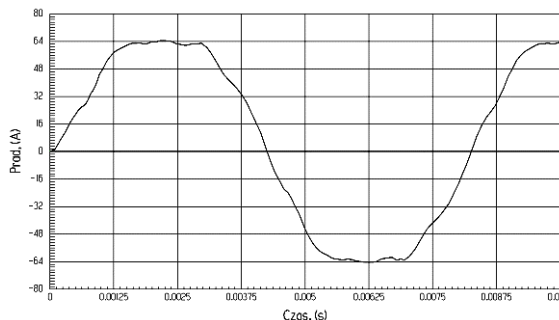
Rys. 12. Przebiegi czasowe napięć w stanie obciążenia fazy W generatora w wykonaniu specjalnym



Rys. 13. Przebiegi czasowe prądów w stanie obciążenia fazy U generatora w wykonaniu specjalnym

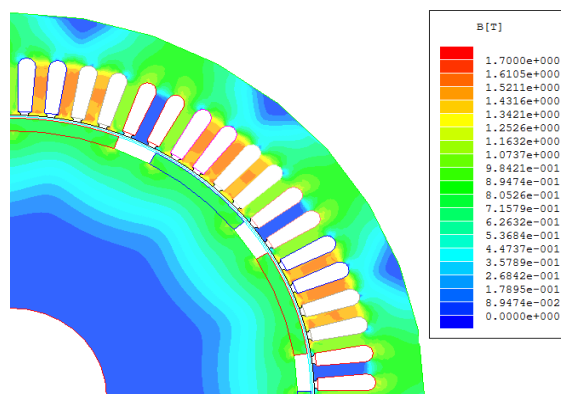


Rys. 14. Przebiegi czasowe prądów w stanie obciążenia fazy V generatora w wykonaniu specjalnym

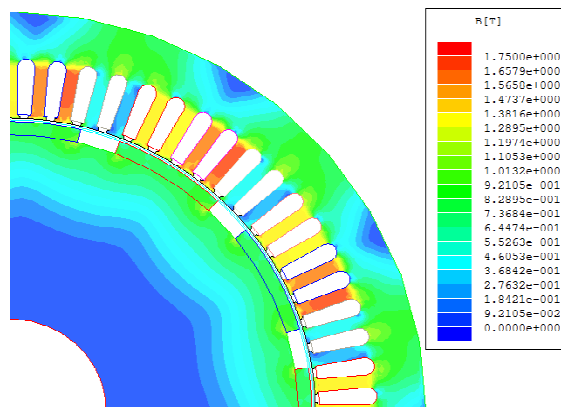


Rys. 15. Przebiegi czasowe prądów w stanie obciążenia fazy W generatora w wykonaniu specjalnym

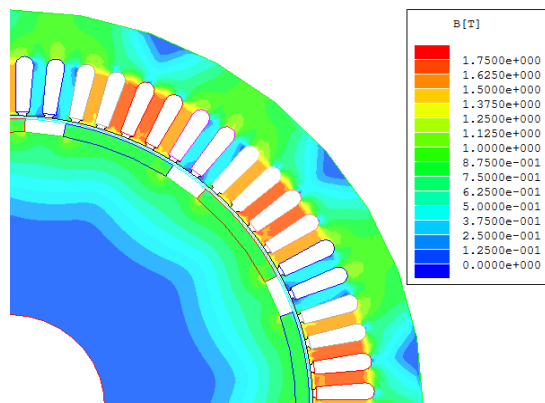
W celu zobrazowania wartości poziomów nasycenia magnetycznych w poszczególnych częściach obwodu elektromagnetycznego, na rysunkach 16-18 zaprezentowano wizualizację graficzną rozkładu indukcji magnetycznej w przekroju poprzecznym generatora w wykonaniu specjalnym dla trzech stanów obciążenia (obciążenie fazy U, V oraz W).



Rys. 16. Rozkład indukcji magnetycznej generatora – obciążenie fazy U



Rys. 17. Rozkład indukcji magnetycznej generatora – obciążenie fazy V



Rys. 18. Rozkład indukcji magnetycznej generatora – obciążenie fazy W

Analizując otrzymany poziom nasycen w rdzeniu generatora można stwierdzić, iż wartość indukcji magnetycznej nie przekracza wartości 1,7 T. Otrzymany rozkład indukcji (rys.16-18) świadczy o optymalnym wykorzystaniu części czynnych rdzenia generatora.

6. Wyniki badań laboratoryjnych

W celu końcowej weryfikacji zaprojektowanej maszyny w tabeli 1 zestawiono wybrane parametry prądnicy. Po wykonaniu maszyny (z uwagi na uwarunkowania techniczne) została ona przebadana przy obniżonej prędkości obrotowej, która wyniosła 1000 obr/min. Znamionowa prędkość, na którą generator został zaprojektowany wynosi 1250 obr/min. Moc znamionowa dla każdej fazy prądnicy została wyznaczona na poziomie 10 kW. W celu porównania wyników badań (tab.1) wartości obliczeniowe parametrów przeliczono dla niższej prędkości obrotowej.

Tabela 1. Wybrane parametry generatora w wykonaniu specjalnym dla 1000 obr/min.

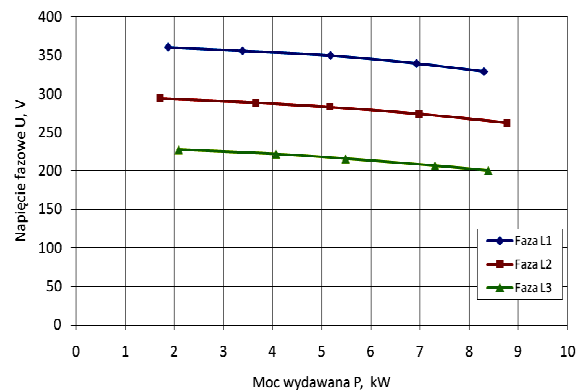
Parametr	Jednostka	Obliczenia	Pomiary
Faza L1			
U_{fbj}	V	370,1	364,3
R_{f20}	m Ω	209,4	213,5
cos φ	-	1,0	0,83
U_f	V	320	339,3
I_f	A	25,0	24,5
$P_{elekt.}$	kW	8,0	7,0
THD _U	%	10,6	9,17
Faza L2			
U_{fbj}	V	302,7	298,1
R_{f20}	m Ω	133,3	137,0
cos φ	-	1,0	0,83
U_f	V	256,0	274,1
I_f	A	31,2	30,5
$P_{elekt.}$	kW	8,0	7,0
THD _U	%	10,6	9,17
Faza L3			
U_{fbj}	V	234,4	231,9
R_{f20}	m Ω	84,8	88,6
cos φ	-	1,0	0,83
U_f	V	192,0	206,5
I_f	A	41,7	42,5
$P_{elekt.}$	kW	8,0	7,3
THD _U	%	10,5	9,14

Gdzie: U_{fbj} – napięcie fazowe biegu jałowego generator, R_{f20} – rezystancja fazowa w 20^o C, cos φ - współczynnik mocy, U_f – napięcie fazowe podczas obciążenia generatora, I_f – znamionowy prąd fazowy, $P_{elekt.}$ – moc wydawana z generatora, THD_U – współczynnik zawartości wyższych harmonicznych w przebiegu napięcia. Na rysunku 19 zaprezentowano stanowisko pomiarowe, na którym zaprojektowana maszyna została przebadana.

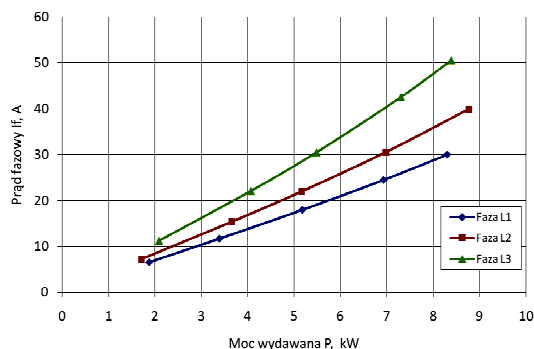


Rys. 19. Stanowisko pomiarowe generatora w wykonaniu specjalnym w laboratorium maszyn elektrycznych BOBRME KOMEL

Z uwagi na różnice w wartościach współczynników mocy (dla pomiarów i obliczeń) moc wydawana z generatora jest mniejsza od mocy obliczeniowej. Po uwzględnieniu tej różnicy można stwierdzić, iż generator osiągnął założony poziom mocy znamionowej. Na rysunku 20 zaprezentowano charakterystyki napięcia fazowego w funkcji obciążenia każdej fazy generatora.



Rys. 20. Zmierzone napięcie fazowe w funkcji mocy obciążenia każdej z faz generatora dla prędkości 1000 obr./min.



Rys. 21. Zmierzony prąd fazowy w funkcji mocy obciążenia każdej z faz generatora dla prędkości 1000 obr./min.

Otrzymane charakterystyki pomiarowe potwierdzają poprawność zaprojektowania maszyny.

7. Podsumowanie i wnioski końcowe

Celem niniejszej pracy było zaprezentowanie generatora wzbudzanego magnesami trwałymi przeznaczonego do pracy jednofazowej. Każda z faz generatora posiada inną wartość napięcia fazowego co powoduje, iż z jednego generatora można zasilac jednofazowe odbiorniki o różnych wartościach napięcia znamionowego. Każda z faz generatora w wykonaniu specjalnym jest w stanie wygenerować 10 kW mocy czynnej (przy $\cos \varphi=1$). Zaprezentowane w artykule przebiegi czasowe strumieni magnetycznych skojarzonych i napięć (rys. 6, 7) w stanie biegu jałowego maszyny, świadczą o poprawnym zaprojektowaniu uzwojenia generatora w którym każda z faz posiada inną wartość napięcia fazowego. Przedstawione czasowe przebiegi napięć i prądów (rys. 10-15) w stanie obciążenia świadczą o prawidłowych osiągniętych parametrach maszyny co potwierdzają wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych. Rozkłady indukcji magnetycznych w rdzeniu maszyny dowodzą o optymalnym wykorzystaniu czynnym rdzenia. Różnice w przedstawionych wynikach badań i obliczeń wynikają głównie z [6]:

- charakterystyki magnesowania blachy,
- rozbieżności parametrów magnesów założonych w projekcie, co wpływa m.in. na wartość napięcia biegu jałowego,
- założonej (w obliczeniach) temperatury pracy magnesów, co przekłada się na charakterystyki zewnętrzne generatora.

Pomimo osiągnięcia założonych parametrów wykonana prądnica, jak wykazały pomiary, posiada stosunkowo wysoki współczynnik zawartości wyższych harmonicznych, który sięga wartości 9%. Odkształcenia indukowanych napięć na zaciskach generatora zaprezentowano na rysunkach 7, 10, 11 i 12. Zaprojektowany i wykonany generator w wykonaniu specjalnym stanowi jednofazowe źródło napięcia o trzech różnych wartościach napięć. W zależności od potrzeby można odpowiednio dobrać częstotliwość pracy generatora, co stanowi dobre rozwiązanie zasilania układów badawczych lub stanowisk służących analizie zjawisk zachodzących w generatorze synchronicznym wzbudzonym magnesami trwałymi.

Literatura

- [1]. GLINKA T.: „Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi” Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [2]. BERNATT J.: „Obwody elektryczne i magnetyczne maszyn elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi” Wydawnictwo BOBRME KOMEL, Katowice 2010.
- [3]. BERNATT J.: „Wykorzystanie prądnic synchronicznych do budowy małych elektrowni wiatrowych” Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, Nr 68/2004, Wydawnictwo BOBRME KOMEL, Katowice 2004.
- [4]. ROSSA R., KRÓL E.: „Modern electric machines with permanent magnet”. Przegląd Elektrotechniczny nr 12/2008.
- [5]. GAWRON S.: „Prądnice synchroniczne z magnesami trwałymi o niskiej zmienności napięcia wyjściowego” XLV International Symposium of Electrical Machines – Krańcizyn 2009, Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, Nr 84/2009.
- [6]. BERNATT J., GAWRON S.: „Nowe Rozwiązania konstrukcyjne dwubiegunowej prądnicy synchronicznej z magnesami trwałymi”. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, nr 88/2010.

Autorzy

Dr inż. Robert Rossa

e-mail: r.rossa@komel.katowice.pl

Mgr inż. Paweł Pistelok

e-mail: p.pistelok@komel.katowice.pl

Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych „KOMEL”,
40-203 Katowice, al. Roździeńskiego 188