

Koncepcja i realizacja prądnicy synchronicznej ze wzbudzeniem magnetostaticznym i elektromagnetycznym

Streszczenie. W pracy zaprezentowano model fizyczny generatora synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi, zaprojektowany i wykonany przez autorów zgodnie z koncepcją domagnesowania obwodu magnetycznego magnesów trwałych za pomocą wzbudzenia elektromagnetycznego w celu kompensacji oddziaływania twornika. W proponowanym rozwiązaniu indukcja magnetyczna magnesów trwałych oraz napięcie indukowane w uzwojeniu twornika są określone zgodnie z charakterystyką od magnesowania magnesów trwałych przez wypadkowe pole magnetyczne, wynikające z zastosowanego domagnesowania elektromagnetycznego oraz od magnesowującego oddziaływania twornika.

Abstract. In the paper the physical model of permanent magnet synchronous generator is presented. The model was designed and made by the authors in accordance with the concept of the additional magnetization of permanent magnets' magnetic circuit using the electromagnetic excitation in order to compensate the armature reaction. In the proposed solution the flux density of permanent magnets as well as the back electromotive force induced in armature winding are determined by the resultant field in accordance with the demagnetization curve of permanent magnets. The resultant field is caused by the applied additional electromagnetic magnetization and the demagnetizing reaction of armature. **(The concept and realization of synchronous generator with magnetostatic and electromagnetic excitation)**

Słowa kluczowe: prądnica synchroniczna, magnes trwały, wzbudzenie elektromagnetyczne, charakterystyka magnesowania.

Keywords: synchronous generator, permanent magnet, electromagnetic excitation, magnetization curve.

doi:10.12915/pe.2014.12.67

Wprowadzenie

Podwyższanie sprawności maszyn elektrycznych jest ogólnosiątkową tendencją związaną z działaniami na rzecz ochrony środowiska naturalnego. W wyniku tych działań konwencjonalne maszyny, do których należy zaliczyć maszyny indukcyjne i synchroniczne wzbudzone elektromagnetycznie, coraz częściej są zastępowane maszynami wzbudzonymi magnesami trwałymi (magneto-statycznie). W ostatnim czasie zainteresowanie tymi maszynami znacznie wzrosło z powodu spadku ich cen. Zastosowanie maszyn wzbudzanych magnesami trwałymi (PMM – permanent magnet machines) w urządzeniach wymagających niskich prędkości obrotowych pozwala wyeliminować przekładnię, która sprzęga maszynę roboczą ze standardowym silnikiem indukcyjnym lub wolnoobrotową turbinę ze standardowym generatorem synchronicznym. Użycie przekładni jest kosztowne, zmniejsza sprawność urządzenia oraz wymaga konserwacji. Niska prędkość maszyn prądu przemiennego oznacza dużą ilość biegunów magnetycznych, a w konsekwencji znaczą średnicę tych maszyn. Obecnie PMM najczęściej są wykorzystywane jako napędy okrętowe i generatory siłowni wiatrowych.

Jednym z istotnych wymagań stawianych prądnicom synchronicznym pracującym indywidualnie jest utrzymanie stałej częstotliwości i stałego napięcia na zaciskach twornika przy zmianach obciążenia. W konwencjonalnych prądnicach wzbudzanych elektromagnetycznie takie warunki pracy realizuje się poprzez zastosowanie regulatorów prędkości i napięcia. Działanie regulatora napięcia określa charakterystyka regulacji prądnicy, która informuje w jaki sposób należy nastawiać prąd wzbudzenia, aby przy zmianach prądu obciążenia, stałym współczynnikiem mocy i stałej prędkości obrotowej utrzymać stałe napięcie na zaciskach prądnicy. Prądnice synchroniczne wzbudzone magnetostaticznie nie mają możliwości regulacji wzbudzenia, a ich zmienność napięcia jest rzędu kilkudziesięciu procent. Przykładowo, zmienność napięcia prądnic produkcji krajowej (KOMEL) w pełnym zakresie obciążenia wynosi 20-30% [1].

Opis koncepcji i realizacji

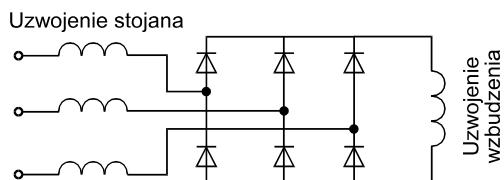
Jedną z metod ograniczenia zakresu zmian napięcia prądnicy synchronicznej wzbudzonej magnetostaticznie przy zmianach obciążenia jest zastosowanie stabilizacji

samoistnej poprzez poprawę charakterystyki zewnętrznej prądnicy. Warunki takie uzyskuje się na przykład poprzez zaprojektowanie odpowiedniej konstrukcji wirnika, w której rezygnuje się ze stosunkowo prostego w praktycznej realizacji montażu magnesów trwałych na powierzchni wirnika, zastępując to rozwiązaniem magnesami umieszczonymi wewnątrz wirnika, co pozwala zmniejszyć zmienność napięcia do około 10%.

Bardziej skuteczną stabilizację napięcia prądnicy zapewnią zastosowanie domagnesowania elektromagnetycznego. W rozwiązaniu tym główne wzbudzenie jest oparte na magnesach trwałych, co pozwala zachować wysoką sprawność prądnicy. Zadaniem dodatkowego wzbudzenia o charakterze elektromagnetycznym jest nastawianie napięcia prądnicy w pewnym zakresie, umożliwiającym kompensację spadku napięcia na skutek wzrostu obciążenia, za cenę niewielkiego pogorszenia sprawności prądnicy. Istnieją różne sposoby realizacji prądnic synchronicznych z zastosowaniem stabilizacji napięciowej. Jednym z tych rozwiązań jest zastosowanie wirnika hybrydowego [1], w którym wzbudzenie elektromagnetyczne jest umieszczone obok wzbudzenia magnetostaticznego wzdłuż osi wirnika, a wypadkowa siła magnetomotoryczna (MMF – magnetomotive force) wzbudzenia jest superpozycją MMF wzbudzeń składowych.

W niniejszej pracy zaprezentowano opracowany i wykonany przez autorów fizyczny model prądnicy synchronicznej wzbudzonej magnetostaticznie z zastosowaniem domagnesowania elektromagnetycznego w celu kompensacji od magnesowującego wpływu oddziaływania twornika. W proponowanym rozwiązaniu wypadkowa MMF w obwodzie magnetycznym prądnicy, a w konsekwencji napięcie indukowane w uzwojeniu twornika, wynikają z oddziaływania sumy pól, określonych od magnesowującym oddziaływaniem twornika i domagnesowującym działaniem wzbudzenia elektromagnetycznego, na magnesy trwałe zgodnie z ich charakterystyką od magnesowania. Kompensacyjne działanie zastosowanego uzwojenia wzbudzenia może być realizowane samoistnie, poprzez szeregowo połączenie z uzwojeniem twornika (konieczne jest zastosowanie prostownika zgodnie z rysunkiem 1, ponieważ w uzwojeniu twornika płynie prąd przemienny) lub z wykorzystaniem regulatora wartości skutecznej napięcia twornika.

Prototyp prądnicy modelowej oparto na elementach konstrukcyjnych stojana silnika indukcyjnego typu OKC2 – 2/12DK z pralki Polar PDE385 (rys. 2 lewy), z którego wykorzystano rdzeń, obudowę oraz ułożyskowanie wirnika, jak również na elementach konstrukcyjnych wirnika kłowego, zaadoptowanego z alternatora typu A115-34b stosowanego w samochodach FIAT 126. O wyborze takiego rozwiązania zdecydowały: dostępność wymienionych elementów konstrukcyjnych na rynku oraz relatywnie niska cena tych elementów w porównaniu z elementami wykonanymi na specjalne zamówienie w celu zbudowania prototypowej prądnicy synchronicznej.

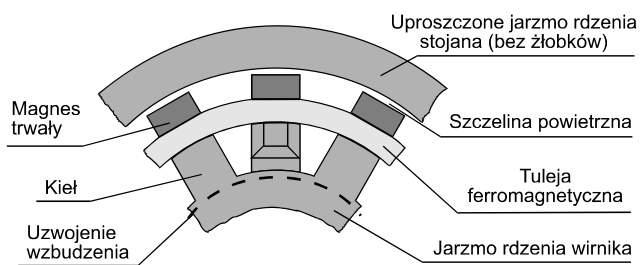


Rys. 1. Połączenie trójfazowego uzwojenia twornika prądnicy synchronicznej z domagnesowującym uzwojeniem wzbudzenia, umożliwiające samoistną kompensację od magnesowującego oddziaływania twornika

Obwód wzbudzenia prądnicy składa się z trzech części (rys. 2 prawy): magnesów trwałych N-38H naklejonych na powierzchni wirnika, tulei stalowej oddzielającej dwa wzbudzenia prądnicy oraz wirnika kłowego wyposażonego w fabryczne uzwojenie wzbudzenia.



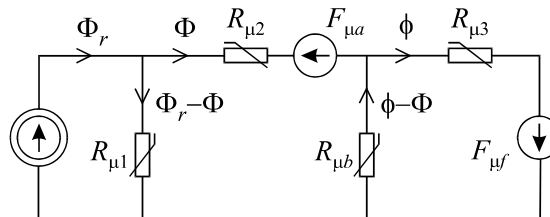
Rys. 2. Widok stojana z uzwojeniem trójfazowym oraz widok wirnika prądnicy z magnesami trwałymi, wykonanego na bazie wirnika kłowego ze wzbudzeniem elektromagnetycznym (opracowanie własne)



Rys. 3. Poglądowy rysunek przedstawiający wycinek przekroju poprzecznego prądnicy synchronicznej – wariant 1 (opracowanie własne)

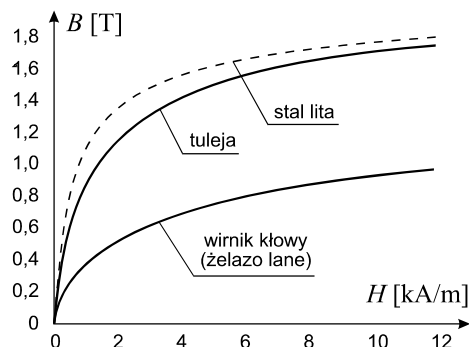
Na zewnętrznej powierzchni wirnika kłowego umieszczono tuleję stalową z niewielkimi ścięciami, na których nakleiono magnesy trwałe (rys. 3). Zastosowanie tulei stalowej, oddzielającej magnesy trwałe od wirnika kłowego ze wzbudzeniem elektromagnetycznym ma na celu zwiększenie permeancji na drodze strumienia magnetycznego pochodzącego od magnesów trwałych. Pominięcie tej tulei, czyli zamocowanie magnesów trwałych bezpośrednio na zewnętrznej powierzchni kłków wirnika, produkowanego jako odlew stalowy nasycający się już przy niewielkiej wartości indukcji magnetycznej, prowadziłoby do wzrostu całkowitej reluktancji obwodu magnetycznego, zależnej od składowych reluktancji wirnika, stojana i szczelin powietrznych. W konsekwencji zwiększyłoby się nachylenie charak-

terystryki magnesowania obwodu magnetycznego, skutkiem czego mogłoby być częściowe lecz trwałe rozmagnesowanie magnesów trwałych pod wpływem zewnętrznego pola oddziaływania twornika. Schemat zastępczy obwodu magnetycznego, odpowiadający konstrukcji prądnicy z rysunku 3, przedstawiono na rysunku 4.

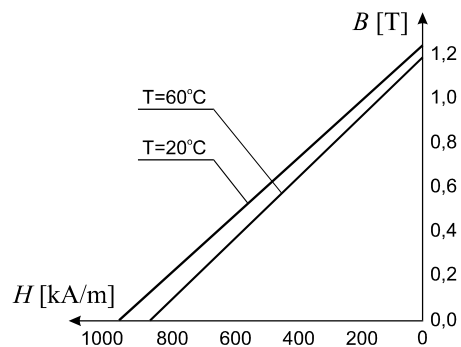


Rys. 4. Schemat zastępczy obwodu magnetycznego zaprojektowanej prądnicy – wariant 1, gdzie: Φ_r – strumień magnetyczny określony indukcją remanencji magnesu trwałego, Φ – strumień w obwodzie magnetycznym magnesów trwałych i stojana, ϕ – strumień w obwodzie magnetycznym wzbudzenia elektromagnetycznego i wirnika, $F_{\mu a}$ – siła magnetomotoryczna oddziaływania twornika, $F_{\mu f}$ – siła magnetomotoryczna domagnesowania elektromagnetycznego; $R_{\mu 1} = R_{\mu m} \parallel R_{\mu \sigma}$, przy czym $R_{\mu m}$ – reluktancja magnesu trwałego, $R_{\mu \sigma}$ – reluktancja drogi strumienia rozproszonego magnesu trwałego [2]; $R_{\mu 2} = R_{\mu \delta} + R_{\mu r} + R_{\mu \gamma a}$, przy czym $R_{\mu \delta}$ – reluktancja szczeliny powietrznej, $R_{\mu r}$ – reluktancja zębów stojana, $R_{\mu \gamma a}$ – reluktancja jarzma rdzenia stojana; $R_{\mu b}$ – reluktancja drogi strumienia w tulei; $R_{\mu 3} = R_{\mu c} + R_{\mu \gamma f}$, przy czym $R_{\mu c}$ – reluktancja kłków wirnika, $R_{\mu \gamma f}$ – reluktancja jarzma rdzenia wirnika

Pomiary wykazały, że charakterystyka magnesowania zastosowanej tulei jest zbliżona do charakterystyki stali litej, przy czym rozważany ferromagnetyk cechuje się nieco niższą indukcją nasycenia, podczas gdy charakterystyka magnesowania wirnika kłowego, wchodzącego w skład wirnika prądnicy, jest zbliżona do charakterystyki żelaza lanego. Charakterystyki te pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Charakterystyki magnesowania materiałów magnetycznych użytych do budowy rdzenia wirnika zaprojektowanej prądnicy

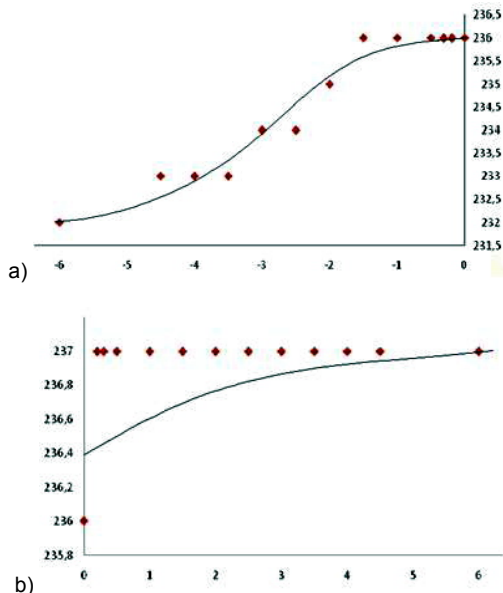


Rys. 6. Charakterystyki odmagnesowania magnesów trwałych użytych do budowy prądnicy

Magnetostacyjne wzbudzenie prądnicy zostało zrealizowane z zastosowaniem magnesów trwałych N-38H o wymiarach 30/20/10. Na rysunku 6 pokazano charakterystyki odmagnesowania zastosowanych magnesów trwałych zgodnie z danymi producenta. Wartości zmiennych na charakterystykach zostały podane w jednostkach odpowiadających układowi SI.

Wyniki badań laboratoryjnych i analiza

Wybrane wyniki przeprowadzonych badań laboratoryjnych zaprojektowanej i wykonanej prądnicy synchronicznej wzbudzanej magnetostacyjnie i elektromagnetycznie przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Charakterystyka biegu jałowego $U_{ph} = f(I_f)$ zaprojektowanej prądnicy przy (a) przeciwnych, (b) zgodnych kierunkach MMF (opracowanie własne)

Z charakterystyk biegu jałowego (rys. 7) wynika nieznaczny wzrost napięcia indukowanego w uzwojeniu twornika pod wpływem zgodnego magnesowania elektromagnetycznego i bardziej znaczący spadek tego napięcia pod wpływem magnesowania przeciwnego.

Właściwości regulacyjne rozważanej prądnicy można określić na podstawie schematu zastępczego obwodu magnetycznego (rys. 4). Definiując napięcia magnetyczne (1) oraz pomijając oddziaływanie twornika (prądnica na biegu jałowym: $F_{\mu a} = 0$)

$$(1) \quad U_{\mu m} = R_{\mu 1}(\Phi_r - \Phi), \quad U_{\mu b} = R_{\mu b}(\phi - \Phi)$$

powyższy schemat zastępczy można opisać następującymi równaniami, przy czym zależność (2.1) odpowiada charakterystyce odmagnesowania magnesu trwałego (rys. 6).

$$(2.1) \quad \Phi = f(U_{\mu m})$$

$$(2.2) \quad \Phi = \frac{1}{R_{\mu 2}}(U_{\mu m} + U_{\mu b}) \Leftrightarrow F_{\mu a} = 0$$

$$(2.3) \quad \phi = \frac{U_{\mu b}}{R_{\mu b}} + \Phi$$

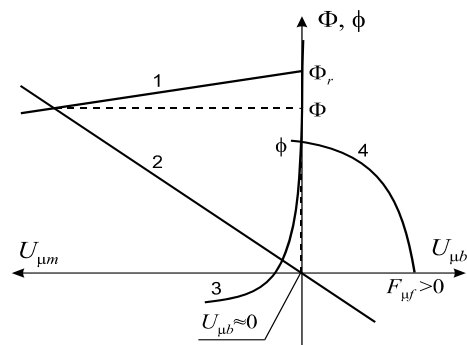
$$(2.4) \quad \phi = \frac{1}{R_{\mu 3}}(F_{\mu f} - U_{\mu b})$$

Na rysunkach 8, 9 i 10 zaprezentowano krzywe opisane równaniami (2.1) do (2.4) dla różnych wartości MMF wzbudzenia elektromagnetycznego, przy czym do określenia

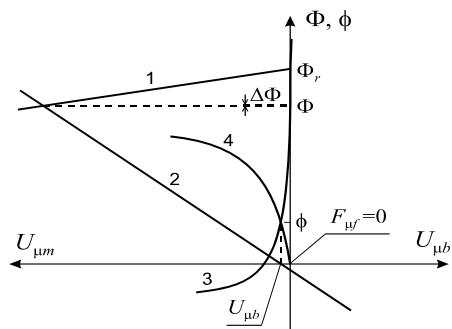
strumienia magnesu trwałego i napięcia magnetycznego $U_{\mu m}$ zastosowano zależności przybliżone (3)

$$(3) \quad \Phi \approx B_m S_m, \quad U_{\mu m} \approx H_m l_m$$

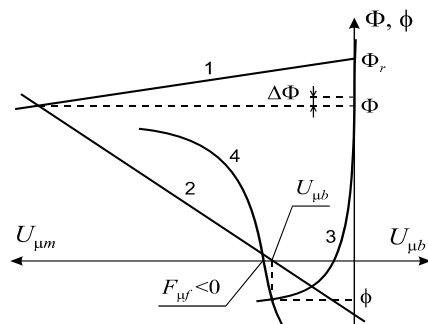
gdzie: S_m – pole powierzchni podstawy magnesu trwałego (20/30), l_m – wysokość magnesu (10). Strumień w obwodzie magnetycznym wzbudzenia elektromagnetycznego oraz pozostałe napięcia magnetyczne (na drodze strumienia w szczelinie powietrznej, tulei i wirnika kłowym) określono analogicznie. W rozważaniach pominięto reluktancje drogi strumienia w jarzmie i zębach stojana oraz histerezę magnetyczną rdzenia wirnika i tulei. Poszczególne charakterystyki na rysunkach 8, 9 i 10 zostały ponumerowane zgodnie z numeracją równań (2.1) do (2.4).



Rys. 8. Określenie strumienia Φ , indukującego napięcie w uzwojeniu twornika, przy zgodnym magnesowaniu elektromagnetycznym $F_{\mu f} > 0$ (opracowanie własne)



Rys. 9. Określenie strumienia Φ , indukującego napięcie w uzwojeniu twornika, przy braku magnesowania elektromagnetycznego $F_{\mu f} = 0$ (opracowanie własne)



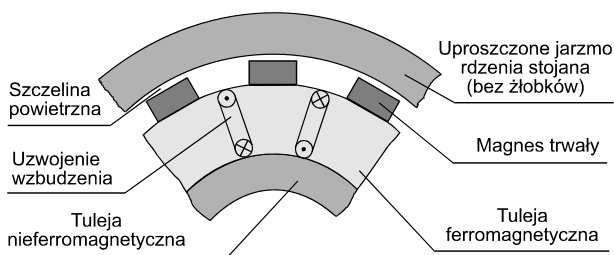
Rys. 10. Określenie strumienia Φ , indukującego napięcie w uzwojeniu twornika, przy przeciwnym magnesowaniu elektromagnetycznym $F_{\mu f} < 0$ (opracowanie własne)

Porównanie wykresów pokazanych na rysunkach 8 i 9 potwierdza niewystarczający wpływ zgodnego magnesowania elektromagnetycznego na strumień indukujący napięcie w uzwojeniu twornika (nieznaczny przyrost strumienia w porównaniu z brakiem magnesowania), natomiast z porównania wykresów pokazanych na rysunkach 9 i 10

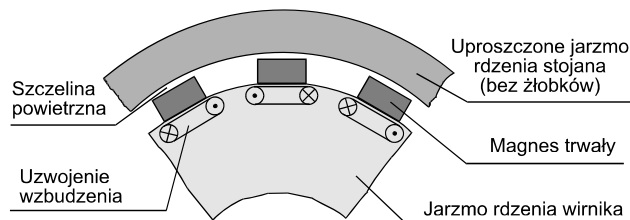
wynika większy wpływ przeciwnego magnesowania elektromagnetycznego na ten strumień, co wcześniej stwierdzono na podstawie zmierzonych charakterystyk biegu jałowego (rys. 7).

Zastosowanie tulei stalowej, oddzielającej oba wzbudzenia, skutkuje rozbudową obwodu magnetycznego zaprojektowanej prądnicy. Linie pola magnetycznego wytworzonego przez magnesy trwałe przenikają szczelinę powietrzną i poprzez zęby rdzenia stojana docierają do jego jarzma, gdzie po rozdzieleniu rozchodzą się w kierunku sąsiednich magnesów. Po pokonaniu kolejnej szczeliny powietrznej przenikają przez te magnesy i w znacznej większości zamykają się poprzez wycinki tulei odpowiadające sąsiadującym magnesom. Niewielka część strumienia wytworzonego przez magnesy trwałe może przeniknąć przez tuleję i kły do rdzenia wirnika. Z drugiej strony, przez te same wycinki tulei zamykają się linie pola wytworzonego przez wzbudzenie elektromagnetyczne i tylko niewielka część tych linii przenika przez tuleję do obwodu magnetycznego magnesów trwałych, o czym świadczy niewielki wpływ wzbudzenia elektromagnetycznego na wypadkową siłą elektromotoryczną indukowaną w uzwojeniu stojana (rys. 7). Rozważany obwód magnetyczny zaprojektowanej prądnicy jest zatem obwodem rozgałęzionym składającym się z dwóch oczek (rys. 4), z których jedno należy do wzbudzenia magnetostatycznego, a drugie do wzbudzenia elektromagnetycznego. Takie rozbudowanie obwodu magnetycznego z jednej strony przyczynia się do poprawy warunków pracy magnesów trwałych (zapobiega ich częściowemu rozmagnesowaniu), z drugiej jednak strony sprawia, że znaczna część strumienia wytworzonego przez wzbudzenie elektromagnetyczne zamyka się w tulei zamiast w obwodzie głównym, zwiększając w istotny sposób całkowity strumień rozproszony.

Pojawia się dylemat, ponieważ z jednej strony zastosowanie tulei jest konieczne z uwagi na warunki pracy magnesów trwałych, jednak z drugiej strony przyczynia się do zmarginalizowania wpływu wzbudzenia elektromagnetycznego na wypadkowy strumień wzbudzenia i w konsekwencji na wartość napięcia indukowanego w uzwojeniu twornika. Rozwiązaniem problemu jest uproszczenie struktury obwodu magnetycznego prądnicy, polegające na zastąpieniu obwodu rozgałęzionego obwodem nierozgałęzionym, ale to wymaga poprawy właściwości magnetycznych materiału wirnika lub zmiany konstrukcji samego wirnika.



Rys. 11. Poglądowy rysunek przedstawiający wycinek przekroju poprzecznego prądnicy synchronicznej – wariant 2 (opracowanie własne)



Rys. 12. Poglądowy rysunek przedstawiający wycinek przekroju poprzecznego prądnicy synchronicznej – wariant 3 (opracowanie własne)

Na rysunkach 11 i 12 pokazano kolejne dwa warianty konstrukcji wirnika prądnicy synchronicznej, pozwalające na uproszczenie obwodu magnetycznego, a w konsekwencji na zwiększenie wpływu domagnesowania elektromagnetycznego na strumień i napięcie indukowane w uzwojeniu twornika. Poprzez odpowiedni dobór wymiarów geometrycznych tulei ferromagnetycznej w konstrukcji prądnicy zrealizowanej według wariantu 2 istnieje możliwość uzyskaniażądanego strumienia domagnesowującego przy mniejszym przepływie uzwojenia wzbudzenia elektromagnetycznego. Możliwości wpływania na strumień domagnesowujący poprzez wymiary geometryczne jarzma rdzenia wirnika prądnicy zrealizowanej według wariantu 3 są ograniczone z powodu bliskiego sąsiedztwa kolejnych zezwojów uzwojenia wzbudzenia.

Wnioski

Zaletą proponowanych rozwiązań w porównaniu z [1] jest brak konieczności zwiększenia długości boków uzwojenia stojana (w rozwiązaniu [1] długość boków wzrosła o 1/3), a w konsekwencji straty w tym uzwojeniu i wymiary prądnicy są mniejsze, natomiast wadą jest ograniczony zakres nastawiania napięcia indukowanego z uwagi na niebezpieczeństwo częściowego, lecz trwałego rozmagnesowania magnesów trwałych przy odmagiesowaniu lub możliwość wystąpienia nasycenia magnesów trwałych przy domagnesowaniu. Przeprowadzone badania laboratoryjne prądnicy modelowej wykazały konieczność kontynuowania badań i analiz w celu ulepszenia jej konstrukcji.

LITERATURA

- [1] Gawron S., Możliwości regulacji napięcia wyjściowego prądnicy synchronicznej z magnesami trwałymi, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, Nr 77/2007, 227-232
- [2] Życki Z., Charakterystyka magnesów trwałych w obwodach magnetycznych, *Prace Instytutu Elektrotechniki*, Nr 16, Warszawa 1991
- [3] Glinka T., *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*, Wyd. Pol. Śląskiej, Gliwice 2002
- [4] Kolehmainen J., Ikäheimo J., Motors With Buried Magnets for Medium-Speed Applications, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 23, No. 1, March 2008, 86-91
- [5] Miksiewicz R., Sikora A., Obliczenia i pomiary przebiegów prądów i napięć w alternatorze kłowym w stanie obciążenia, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, Nr 82/2009, 253-258

Autorzy: dr hab. inż. Andrzej Popena prof. PCz, inż. Sławomir Chwalba, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektrotechniki Przemysłowej, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: popenda@el.pcz.czest.pl.