

Prądnica synchroniczna ze wzbudzeniem hybrydowym o zwiększonym zakresie nastawiania napięcia

Streszczenie. Praca dotyczy prądnic synchronicznych ze wzbudzeniem hybrydowym, zawierającym magnesy trwałe i uzwojenie wzbudzenia. Zaproponowano konstrukcje obwodu magnetycznego wirnika pozwalające na zwiększenie zakresu nastawiania napięcia prądnicy oraz porównano właściwości proponowanych rozwiązań z właściwościami prądnicy opartej na równoległym wzbudzeniu hybrydowym. Konstrukcje te zostały opisane matematycznie oraz przedstawiono odpowiadające im schematy zastępcze. Zaprezentowano wyniki analizy teoretycznej oraz badań eksperymentalnych.

Abstract. The paper deals with synchronous generators based on a hybrid excitation, including permanent magnets and field coil. The structures of rotor magnetic circuit allowing to expand the range of generator voltage adjustment are proposed. The properties of both the proposed solutions and the generator based on the parallel hybrid excitation are compared. The structures are described mathematically and their equivalent circuits are given. The results of theoretical analysis and experimental test are presented. (The synchronous generator based on a hybrid excitation with the extended range of voltage adjustment).

Słowa kluczowe: prądnica synchroniczna, wzbudzenie hybrydowe, nastawianie napięcia, obwody magnetyczne.

Keywords: synchronous generator, hybrid excitation, voltage adjustment, magnetic circuits.

Wprowadzenie

Podwyższanie sprawności maszyn elektrycznych jest ogólnosiłową tendencją związaną z działaniami na rzecz ochrony środowiska. W wyniku tych działań konwencjonalne maszyny, do których należy zaliczyć maszyny indukcyjne i synchroniczne wzbudzone elektromagnetycznie, coraz częściej są zastępowane maszynami wzbudzonymi magnesami trwałymi. W ostatnim czasie zainteresowanie tymi maszynami znacznie wzrosło z powodu spadku ich cen. Zastosowanie maszyn wzbudzanych magnesami trwałymi w urządzeniach wymagających niskich prędkości obrotowych pozwala wyeliminować przekładnię, która spręga 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 maszyny wzbudzone magnesami trwałymi najczęściej są wykorzystywane jako napędy okrętowe i generatory siłowni wiatrowych. [1-13]

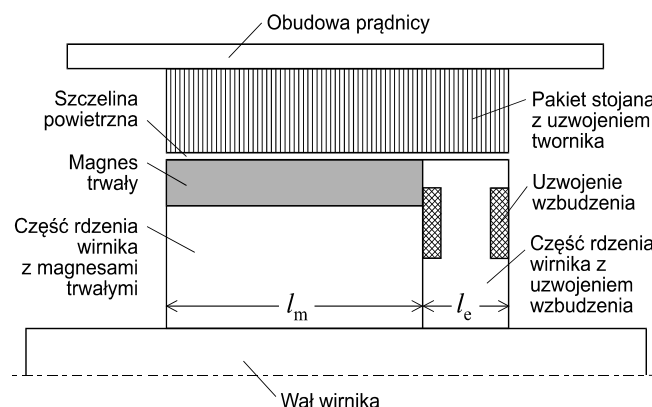
Jednym z istotnych wymagań stawianych prądnic synchronicznej pracującej indywidualnie jest utrzymanie stałej częstotliwości i stałego napięcia na zaciskach twornika przy zmianach obciążenia. W konwencjonalnych prądnicach wzbudzanych elektromagnetycznie takie warunki pracy realizuje się poprzez zastosowanie 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 współczynniku mocy i stałej prędkości obrotowej utrzymać stałe napięcie na zaciskach prądnicy. Prądnice synchroniczne wzbudzone magnetostatycznie (ang. permanent magnet synchronous generator – PMSG) nie mają możliwości regulacji wzbudzenia, a ich zmienność napięcia jest rzędu kilkudziesięciu procent.

Wybrane konstrukcje prądnic synchronicznych opartych na wzbudzeniu hybrydowym

Jedną z metod ograniczenia zakresu zmian napięcia prądnicy PMSG przy zmianach obciążenia jest zastosowanie stabilizacji samoistnej poprzez poprawę charakterystyki zewnętrznej prądnicy. Warunki takie uzyskuje się na przykład poprzez zaprojektowanie

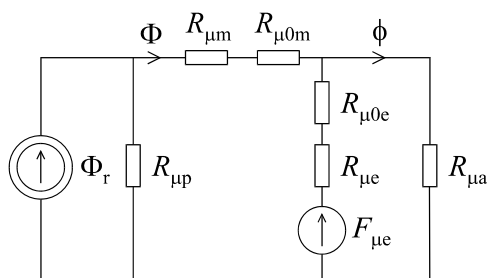
odpowiedniej konstrukcji wirnika, w której rezygnuje się ze stosunkowo prostego w praktycznej realizacji montażu magnesów trwałych na powierzchni wirnika, zastępując to rozwiązanie magnesami umieszczonymi wewnątrz wirnika, co pozwala zmniejszyć zmienność napięcia do około 10%.

Bardziej skuteczną stabilizację napięcia prądnicy zapewnia 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 z hybrydowym równoległym obwodem magnetycznym (rdzeniem) opartym na dwóch niezależnych częściach zamontowanych na wspólnym wale (rys. 1). W pracy [2] uwzględniono następującą zależność między długościami poszczególnych części wirnika: $l_m = 3l_e$.



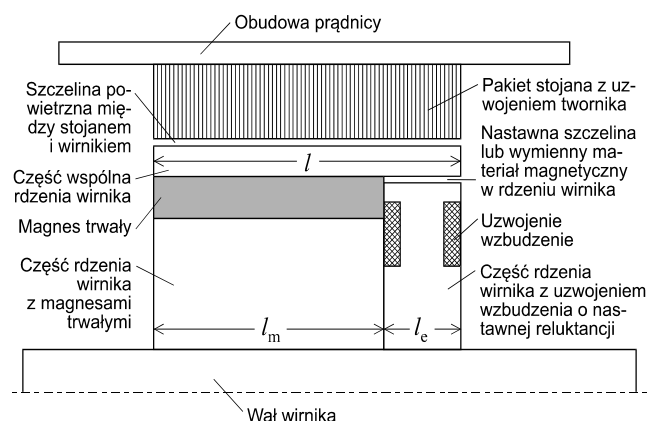
Rys. 1. Rysunek poglądowy przedstawiający prądnice synchroniczną opartą na równoległym wzbudzeniu hybrydowym zawierającym magnesy trwałe i uzwojenie wzbudzenia, gdzie $l_m = 3l_e$ [2]

Schemat zastępczy obwodu magnetycznego nieobciążonej prądnicy synchronicznej z równoległym wzbudzeniem hybrydowym (rys. 1) przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat zastępczy obwodu magnetycznego nieobciążonej prądnicy synchronicznej z równoległym wzbudzeniem hybrydowym (rys. 1), gdzie Φ_r – strumień magnetyczny odpowiadający remanencji magnesów trwałych, Φ – strumień magnetyczny w części obwodu magnetycznego wirnika zawierającej magnesy trwałe, ϕ – strumień magnetyczny wirnika przenikający przez rdzeń magnetyczny (pakiet) stojana, $F_{\mu e}$ – zastępcza siła magnetomotoryczna uzwojenia wzbudzenia, $R_{\mu p}$ – reluktancja zastępcza magnesów trwałych oraz drogi rozproszonego strumienia magnesów trwałych, $R_{\mu m}$ – reluktancja zastępcza rdzenia części obwodu magnetycznego wirnika z magnesami trwałymi oraz drogi jego strumienia rozproszonego, $R_{\mu 0m}$ – reluktancja szczeliny powietrznej pomiędzy częścią obwodu magnetycznego wirnika z magnesami trwałymi a stojanem, $R_{\mu e}$ – reluktancja zastępcza rdzenia części obwodu magnetycznego wirnika z uzwojeniem wzbudzenia oraz drogi jego strumienia rozproszonego, $R_{\mu 0e}$ – reluktancja szczeliny powietrznej pomiędzy częścią obwodu magnetycznego wirnika z uzwojeniem wzbudzenia a stojanem, $R_{\mu a}$ – zastępcza reluktancja rdzenia stojana zawierającego jarzmo i zęby oraz drogi jego strumienia rozproszonego.

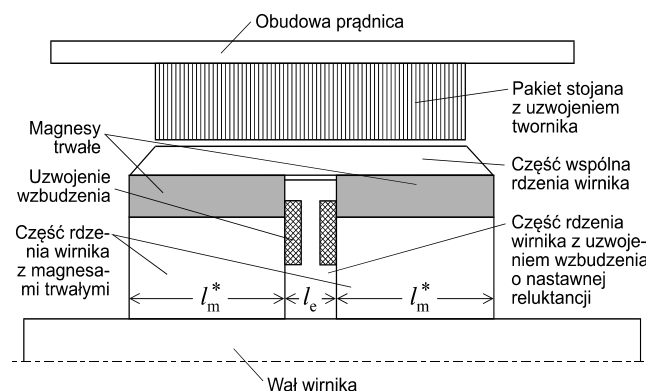
Na rysunku 3 przedstawiono prądnicę synchroniczną ze wzbudzeniem hybrydowym, zmodyfikowaną zgodnie z koncepcją autorów. W proponowanym rozwiązaniu konstrukcja wzbudzenia hybrydowego jest w pewnym zakresie analogiczna do wzbudzenia równoległego (rys. 1). Zasadnicza różnica polega na zastosowaniu dodatkowego elementu ferromagnetycznego, wspólnego dla obu równoległych części obwodu magnetycznego (rdzenia) wirnika, tj. części z magnesami trwałymi oraz części z uzwojeniem wzbudzenia.



Rys. 3. Rysunek poglądowy przedstawiający zmodyfikowaną prądnicę synchroniczną ze wzbudzeniem hybrydowym – wariant 1

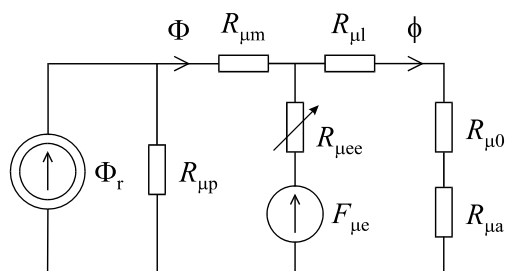
Na rysunku 4 przedstawiono inny wariant zmodyfikowanej prądnicy synchronicznej opartej na wzbudzeniu hybrydowym. W wyniku zwiększenia powierzchni roboczej magnesów trwałych o 50% ($l_m^* = 0,75 l_m$) podwyższono strumień magnetyczny w części obwodu magnetycznego wirnika z magnesami trwałymi do wartości $\Phi^* = 1,5\Phi$. W proponowanym rozwiązaniu uzyskano większy strumień w wyniku zwiększenia długości wirnika bez powiększania długości pakietu stojana. Podobny efekt można uzyskać

bez powiększania długości wirnika stosując magnesy trwałe o większej remanencji. Możliwe jest także zmniejszenie przekroju części rdzenia wirnika z uzwojeniem wzbudzenia ze względu na stosunkowo dużą wartość reluktancji tej części rdzenia. W konsekwencji długość przewodu nawojowego i jego rezystancja są mniejsze, co oznacza mniejsze straty mocy w uzwojeniu wzbudzenia.



Rys. 4. Rysunek poglądowy przedstawiający zmodyfikowaną prądnicę synchroniczną ze wzbudzeniem hybrydowym – wariant 2

Schemat zastępczy obwodu magnetycznego nieobciążonej zmodyfikowanej prądnicy synchronicznej ze wzbudzeniem hybrydowym, odpowiadający obu wariantom modyfikacji (rys. 3 i 4), przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat zastępczy obwodu magnetycznego nieobciążonej zmodyfikowanej prądnicy synchronicznej ze wzbudzeniem hybrydowym (rys. 3 i 4), gdzie $R_{\mu e}$ – nastawna reluktancja części obwodu magnetycznego wirnika z uzwojeniem wzbudzenia, $R_{\mu l}$ – reluktancja wspólnej części obwodu magnetycznego wirnika, $R_{\mu 0}$ – reluktancja całkowitej szczeliny powietrznej między stojanem i wirnikiem

Nastawianie szczeliny powietrznej lub zmiana materiału magnetycznego w części obwodu magnetycznego wirnika z uzwojeniem wzbudzenia (rys. 3 i 4) skutkuje zmianą reluktancji $R_{\mu e}$ (rys. 5).

Analiza prądnic synchronicznych ze wzbudzeniem hybrydowym

Analizie poddano prądnice synchroniczne ze wzbudzeniem hybrydowym przedstawione w poprzedniej części pracy. W analizie założono, że obwody magnetyczne prądnic są nienasycone. Wiadomo, że w konsekwencji znacznych różnic w przenikalności magnetycznej ferromagnetyków i powietrza zachodzą następujące relacje pomiędzy poszczególnymi reluktancjami: $R_{\mu 0} \gg R_{\mu e}$, $R_{\mu 0} \gg R_{\mu m}$, $R_{\mu 0} \gg R_{\mu a}$ oraz $R_{\mu 0} \gg R_{\mu l}$. Zatem reluktancje ferromagnetycznych części obwodów magnetycznych prądnic mogą zostać w rozważaniach pominięte, tzn. $R_{\mu e} \approx 0$, $R_{\mu m} \approx 0$, $R_{\mu a} \approx 0$, $R_{\mu l} \approx 0$. Powyższe założenia upraszczające prowadzą do następujących zależności między strumieniem magnetycznym wirnika przenikającym przez pakiet stojana ϕ a strumieniem

magnetycznym w części obwodu magnetycznego wirnika z magnesami trwałymi Φ oraz siłą magnetomotoryczną uzwojenia wzbudzenia $F_{\mu e}$:

a) w przypadku schematu zastępczego prądnicy synchronicznej z równoległym wzbudzeniem hybrydowym (rys. 2)

$$(1) \quad \phi = \Phi + \frac{F_{\mu e}}{R_{\mu 0e}}$$

gdzie: $R_{\mu 0e} = R_{\mu 0} \frac{l_e + l_m}{l_e} = 4R_{\mu 0}$,

b) w przypadku schematu zastępczego zmodyfikowanej prądnicy synchronicznej ze wzbudzeniem hybrydowym (rys. 5)

$$(2) \quad \phi = \frac{R_{\mu ee} \Phi + F_{\mu e}}{R_{\mu ee} + R_{\mu 0}}$$

Powyższe zależności mogą mieć prostszą formę oraz lepiej przedstawiać właściwości prądnicy jeśli do rozważań zostaną wprowadzone wielkości bezwymiarowe: $\phi^r = \phi / \Phi$, $\Phi^r = 1$, $\Phi^{*r} = 1,5$, $F_{\mu e}^r = F_{\mu e} / R_{\mu 0} \Phi$, $R_{\mu 0e}^r = R_{\mu 0e} / R_{\mu 0}$, $R_{\mu ee}^r = R_{\mu ee} / R_{\mu 0}$. Wówczas zależności między względnym strumieniem magnetycznym wirnika przenikającym przez pakiet stojana ϕ^r a względnym strumieniem magnetycznym w części obwodu magnetycznego wirnika z magnesami trwałymi Φ^r lub Φ^{*r} oraz względną siłą magnetomotoryczną uzwojenia wzbudzenia $F_{\mu e}^r$ są następujące:

a) w przypadku prądnicy synchronicznej z równoległym wzbudzeniem hybrydowym (rys. 1)

$$(3) \quad \phi^r = 1 + \frac{F_{\mu e}^r}{R_{\mu 0e}^r} = 1 + \frac{F_{\mu e}^r}{4}$$

b) w przypadku pierwszego wariantu zmodyfikowanej prądnicy synchronicznej ze wzbudzeniem hybrydowym (rys. 3)

$$(4) \quad \phi^r = \frac{R_{\mu ee}^r + F_{\mu e}^r}{R_{\mu ee}^r + 1}$$

c) w przypadku drugiego wariantu zmodyfikowanej prądnicy synchronicznej ze wzbudzeniem hybrydowym (rys. 4)

$$(5) \quad \phi^r = \frac{1,5R_{\mu ee}^r + F_{\mu e}^r}{R_{\mu ee}^r + 1}$$

Napięcie (siła elektromotoryczna) indukowane w uzwojeniu twornika zależy od zmiennego strumienia magnetycznego przenikającego pakiet stojana:

$$(6) \quad e = N \frac{d\phi}{dt}$$

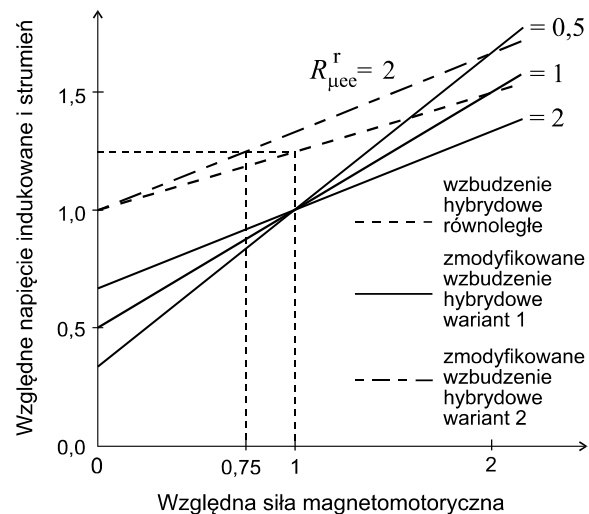
gdzie N – liczba zwojów uzwojenia twornika. W przypadku sinusoidalnego przebiegu strumienia magnetycznego wartość skuteczna napięcia indukowanego w uzwojeniu twornika jest dana zależnością:

$$(7) \quad E = 4,44Nf\phi$$

gdzie f – częstotliwość napięcia indukowanego. Zależność między względnym napięciem indukowanym a względnym strumieniem magnetycznym jest zatem następująca:

$$(8) \quad E^r = \phi^r$$

Na podstawie wyprowadzonych zależności (3), (4), (5) i (8) można sporządzić wykresy względnego napięcia indukowanego w uzwojeniu twornika E^r (względnego strumienia magnetycznego ϕ^r) w funkcji względnej siły magnetomotorycznej uzwojenia wzbudzenia $F_{\mu e}^r$ przyjmując różne wartości nastawnej reluktancji $R_{\mu ee}^r$ części obwodu magnetycznego wirnika z uzwojeniem wzbudzenia (rys. 6).

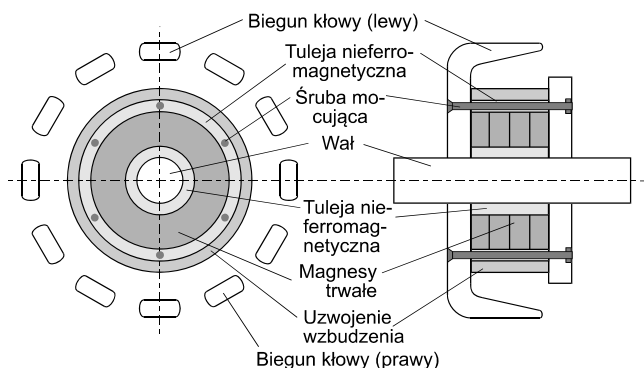


Rys. 6. Wykresy względnego napięcia indukowanego w uzwojeniu twornika E^r (względnego strumienia magnetycznego ϕ^r) w funkcji względnej siły magnetomotorycznej uzwojenia wzbudzenia $F_{\mu e}^r$, gdzie $R_{\mu ee}^r$ – nastawna reluktancja części obwodu magnetycznego wirnika z uzwojeniem wzbudzenia

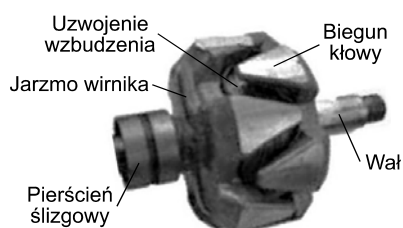
Z powyższych wykresów wynika, że zaproponowana modyfikacja obwodu magnetycznego wirnika (rys. 3 i 4) przyczyniła się do zwiększenia zakresu nastawiania napięcia prądnicy synchronicznej, odpowiednio: (a) 33% w przypadku $R_{\mu ee}^r = 2$, (b) 50% w przypadku $R_{\mu ee}^r = 1$ oraz (c) 67% w przypadku $R_{\mu ee}^r = 0,5$, podczas gdy zakres nastawiania napięcia prądnicy synchronicznej z równoległym wzbudzeniem hybrydowym (rys. 1) wynosi 25%. Rozwiązanie przedstawione na rysunku 4 pozwala uzyskać przy $F_{\mu e}^r = 0$ (prąd wzbudzenia równy zero) tę samą wartość napięcia indukowanego co w przypadku prądnicy synchronicznej z równoległym wzbudzeniem hybrydowym (rys. 1). Jednak większy zakres nastawiania napięcia w przypadku rozwiązania przedstawionego na rysunku 4 pozwala uzyskać tę samą wartość napięcia indukowanego przy $F_{\mu e}^r = 0,75$ co w przypadku prądnicy synchronicznej z równoległym wzbudzeniem hybrydowym przy $F_{\mu e}^r = 1$ (por. na rys. 6). Przyczynia się to do redukcji strat mocy w uzwojeniu wzbudzenia prawie o połowę.

Wyniki badań eksperymentalnych

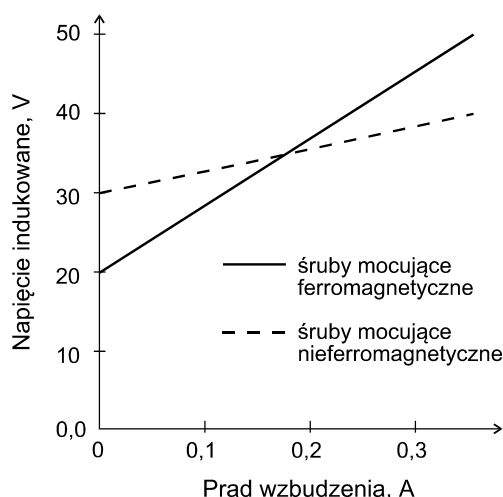
W celu przeprowadzenia badań eksperymentalnych wykonano model fizyczny prądnicy synchronicznej opartej na wzbudzeniu hybrydowym (rys. 7). Modelową prądnicę synchroniczną oparto na elementach konstrukcyjnych stojana silnika indukcyjnego, z którego wykorzystano rdzeń, obudowę oraz ułożyskowanie wirnika, jak również na elementach konstrukcyjnych wirnika kłowego (rys. 8), zaadaptowanego z alternatora samochodowego. O wyborze takiego rozwiązania zadecydowały: dostępność wymienionych elementów konstrukcyjnych na rynku oraz relatywnie niska cena tych elementów w porównaniu z elementami wykonanymi na specjalne zamówienie. Wykonanej konstrukcji odpowiada schemat zastępczy pokazany na rysunku 5.



Rys. 7. Rysunek poglądowy przedstawiający fizyczny model prądnicy synchronicznej ze zmodyfikowanym wzbudzeniem hybrydowym (przekrój poprzeczny i osiowy)



Rys. 8. Wirnik kłowy



Rys. 9. Wykresy napięcia indukowanego w uzwojeniu twornika w funkcji prądu wzbudzenia modelowej prądnicy synchronicznej ze zmodyfikowanym wzbudzeniem hybrydowym

Do zmiany reluktancji części rdzenia wirnika z uzwojeniem wzbudzenia R_{mcc} wykorzystano śruby mocujące o różnej przenikalności magnetycznej. Wykonano wykresy napięcia indukowanego w funkcji prądu wzbudzenia uzwojenia wzbudzenia (rys. 9) odpowiadające następującym przypadkom: (a) ferromagnetyczne śruby mocujące i (b) nieferromagnetyczne śruby mocujące. Wyniki testu potwierdziły wnioski z przeprowadzonej analizy.

Podsumowanie

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. Prądnice synchroniczne wzbudzone magnetostatycznie nie mają możliwości regulacji wzbudzenia, a ich zmienność napięcia jest rzędu kilkudziesięciu procent. Skuteczną stabilizację napięcia takiej prądnicy zapewnia zastosowanie domagnesowania elektromagnetycznego.

W niniejszej pracy zaproponowano rozwiązania konstrukcyjne prądnicy synchronicznej ze zmodyfikowanym obwodem magnetycznym wirnika, pozwalające zwiększyć zakres nastawiania napięcia prądnicy przy jednoczesnej redukcji strat mocy w uzwojeniu wzbudzenia. Wyniki przeprowadzonej analizy teoretycznej oraz testu potwierdziły korzystne właściwości proponowanych rozwiązań.

Autorzy: dr hab. inż. Andrzej Popenda prof. nadzw., mgr inż. Sławomir Chwalba słuchacz studiów doktoranckich 2016-2018, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: popenda@el.pcz.czest.pl.

LITERATURA

- [1] Popenda A., Chwalba S., Koncepcja i realizacja prądnicy synchronicznej ze wzbudzeniem magnetostatycznym i elektromagnetycznym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 12, 265-268
- [2] Gawron S.A., Metody stabilizacji napięcia wyjściowego w prądnicach z magnesami trwałymi, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 12, 299-302
- [3] Kolehmainen J., Ikäheimo J., Motors With Buried Magnets for Medium-Speed Applications, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23 (2008), nr 1, 86-91
- [4] Amara Y., Vido L., Gabsi M., Hoang E., Hamid Ben Ahmed A., Lecrivain M., Hybrid Excitation Synchronous Machines: Energy-Efficient Solution for Vehicles Propulsion, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58 (2009), nr 5, 2137-2149
- [5] Lin H., Liu X., Zhu Z. Q., Fang S., Analysis and control of a dual-stator hybrid excitation synchronous wind generator, *IET Electr. Power Appl.*, (2011), nr 5, 628-635
- [6] Vido L., Gabsi M., Homopolar and bipolar hybrid excitation synchronous machines, *Conf. IEEE-IEMDC*, San Antonio USA, 15-18 May 2005, 1212-1218
- [7] Patin N., Vido L., Monmasson, E., Louis, J.P., Gabsi, M., Lecrivain M., Control of a hybrid excitation synchronous generator for aircraft applications, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 55 (2008), nr 10, 3772-3783
- [8] Naoe N., Trial production of a hybrid excitation type synchronous machine, *Conf. IEEE-IEMDC*, Cambridge, Massachusetts, UK, 17-20 June 2001, 545-547
- [9] Tomas F., Kay H., Study and geometry optimization of hybrid excited synchronous alternators for automotive applications, *Conf. IEEE-IEMDC*, Antalya Turkey, 3-5 May 2007, 124-128
- [10] Tapia J.A., Leonardi F., Lipo T.A., Consequent-pole permanent magnet machine with extended field-weakening capability, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 39 (2003) nr 6, 1704-1709
- [11] Zhang Z.R., Yan Y.G., Yang S.S., Zhou B., Principle of operation and feature investigation of a new topology of hybrid excitation synchronous machine, *IEEE Trans. Magn.*, 44 (2008), nr 9, 2174-2180
- [12] Liu C.H., Chau K.T., Jiang J.Z., Jian L.N., Design of a new outer rotor permanent magnet hybrid machine for wind power generation, *IEEE Trans. Magn.*, 44 (2008), nr 6, 1494-1497
- [13] Liu X.P., Lin H.Y., Zhu Z.Q., Yang C.F., Fang S.H., Guo J., A novel dual-stator hybrid excited synchronous wind generator, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 41 (2009), nr 3, 947-953