

Piotr Bogusz, Mariusz Korkosz, Jan Prokop, Piotr Wygonik
Politechnika Rzeszowska

PRACA GENERATOROWA BEZSZCZOTKOWEJ MASZyny Z MAGNESAMI TRWAŁYMI NAPĘDU HYBRYDOWEGO SAMOLOTU BEZZAŁOGOWEGO

THE ANALYSIS OF GENERATING OPERATION OF BRUSHLESS MACHINE WITH PERMANENT MAGNETS FOR HYBRID UNMANNED AERIAL VEHICLE

Streszczenie: W napędzie hybrydowym czas pracy maszyny elektrycznej ograniczony jest pojemnością zastosowanej baterii akumulatorów. Po wyczerpaniu się baterii akumulatorów maszyna może pełnić rolę generatora lub pozostawać w stanie w którym traktowana może być tylko jako element układu mechanicznego. W przypadku kiedy silnik spalinowy posiada niezbędny nadmiar mocy wyjściowej możliwa jest praca generatorowa maszyny elektrycznej. Narzuca to jednak pewne ograniczenia co do możliwości wydawania określonej mocy z generatora przy uwzględnieniu punktu pracy silnika spalinowego. Na bazie wykonanego prototypu zaprezentowano wybrane wyniki badań laboratoryjnych bezszczotkowej maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi. Zamieszczono wnioski dotyczące analizowanej pracy generatorowej.

Abstract: In a hybrid drive, an operation time of an electric machine is limited by capacity of accumulators. When an accumulator is unloaded, the electric machine can operate as a generator or can be only one of the elements of a mechanical system. In the case when a combustion engine has enough excess of output power, generating operation of electric machine is possible. However, it imposes some restrictions on a generation of output power at taking into account working point of a combustion engine. Based on the designed prototype, chosen results of laboratory tests of brushless electric machine with permanent magnets were presented. Finally, conclusions concerning analysed generating operation were drawn.

Słowa kluczowe: *bezczotkowa maszyna z magnesami trwałymi, praca generatorowa, sprawność ogólna*
Keywords: *brushless machine with permanent magnet, generator mode, overall efficiency*

1. Wstęp

Napędy hybrydowe w ostatnim czasie stają się coraz to bardziej popularne. Ta tendencja jest szczególnie zauważalna w motoryzacji. Większość liczących się producentów pojazdów aut osobowych posiada w swojej ofercie samochody z napędem hybrydowym. Wzrastająca funkcjonalność napędów hybrydowych pojazdów samochodowych spowodowała również, że zaczęto analizować możliwości ich stosowania w innych rodzajach obiektów, które poruszają się nie tylko po drogach, ale również po wodzie czy też w powietrzu. W przypadku lotnictwa dominują głównie małe samoloty bezzałogowe [1-3]. W przypadku napędów hybrydowych najchętniej stosowaną maszyną elektryczną jest bezszczotkowa maszyna z magnesami trwałymi. Za jej wyborem przemawiają głównie wysoka sprawność przetwarzania energii oraz bardzo korzystny stosunek mocy z jednostki objętości. Praca generatorowa maszyny

elektrycznej w układzie napędowym zazwyczaj stanowi niewielki procent ogólnego czasu pracy. Sytuacja ulega zmianie kiedy czas pracy generatorowej maszyny elektrycznej z różnych względów ulega istotnemu wydłużeniu. W literaturze można spotkać się z publikacjami które zajmują się problemem pracy generatorowej bezszczotkowej maszyny z magnesami trwałymi [4-6].

W niniejszej pracy zamieszczono wyniki badań laboratoryjnych pracy generatorowej bezszczotkowej maszyny z magnesami trwałymi. Koncepcję układu umożliwiającego ładowanie baterii akumulatorów oraz wyniki badań symulacyjnych zostały zaprezentowane w [6]. Badana maszyna została przez autorów zaprojektowana do napędu hybrydowego małego samolotu bezzałogowego. W trakcie lotu poziomego samolotu bezzałogowego maszyna elektryczna może znajdować się w stanie pracy silnikowej lub generatorowej. Dla zaprojektowanej konstrukcji w warunkach laboratoryjnych wyznaczono przebiegi czasowe

napięć i prądów, przykładowe charakterystyki zewnętrzne oraz sprawność ogólną. Wyznaczono zakres zmiany prędkości obrotowej przy pracy z określoną mocą wyjściową. Zamieszczono wnioski dotyczące pracy generatorowej w projektowanym napędzie hybrydowym małego samolotu bezzałogowego.

2. Prototyp zaprojektowanej maszyny z magnesami trwałymi

Na rysunku 1 pokazano widok zaprojektowanej i wykonanej bezszczotkowej maszyny z magnesami trwałymi.



Rys.1. Prototyp bezszczotkowej maszyny z magnesami trwałymi 24/20

Prototyp konstrukcji z wirnikiem zewnętrznym posiada 24 żłobki stojana oraz 10 par biegunów (20 magnesów). Z uwagi na funkcję rozrusznika, wymiary konstrukcji maszyny były dobierane pod kątem uzyskania minimalnej wartości momentu rozruchowego, przekraczającego 8 N·m przy prądzie maksymalnym nie przekraczającym 200 A. W zakresie pracy silnikowej wymagane było uzyskanie mocy wyjściowej nie mniejszej niż 3500 W przy prędkości 8000 obr/min oraz napięciu zasilającym wynoszącym 52 V. W locie poziomym została przewidziana praca generatorowa zaprojektowanej maszyny elektrycznej. W tym stanie pracy napędu hybrydowego silnik spalinowy część swojej mocy wyjściowej przeznacza na napęd generatora. Przy dłuższym locie pozwoli to na doładowywanie rozładowanego pakietu baterii akumulatorów oraz pokrywanie potrzeb własnych. Szacowane zapotrzebowanie na moc wyjściową generatora nie powinno przekraczać 17% mocy znamionowej w zakresie pracy silnikowej.

W warunkach laboratoryjnych silnik spalinowy został zastąpiony inną maszyną elektryczną. Stanowisko laboratoryjne do badań testowanej pracy generatorowej prototypowej maszyny z

magnesami trwałymi zostało pokazane na rysunku 2.



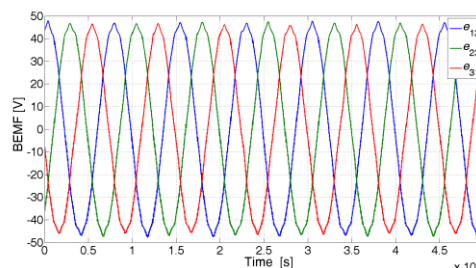
Rys.2. Stanowisko laboratoryjne do testowania pracy generatorowej bezszczotkowej maszyny z magnesami trwałymi

Do pomiaru mocy wejściowej zastosowano przetwornik momentu (Magtrol THMS 305). W układzie prostownika zastosowano diody Shotkiego. Wyjście prostownika było dołączone do obciążenia programowalnego o mocy 5 kW. Programowalne obciążenie umożliwiało pracę ze stałym prądem, stałym napięciem lub stałą mocą. Wszystkie dostępne parametry elektryczne i mechaniczne rejestrowano za pomocą wielokanałowego analizatora mocy z modułem silnikowym (Yokogawa WT1600).

3. Wyniki badań laboratoryjnych

3.1. Przebiegi czasowe napięć i prądów

Wybrane przebiegi czasowe napięć i prądów zostały zarejestrowane w różnych warunkach pracy. Przy braku obciążenia generatora zarejestrowane napięcia są jednocześnie napięciami indukowanymi. Na rysunku 3 pokazano przewodowe napięcia indukowane zarejestrowane przy prędkości 8000 obr/min.

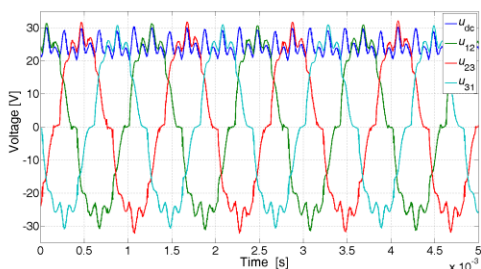


Rys.3. Przewodowe napięcia indukowane zarejestrowane przy prędkości 8000 obr/min

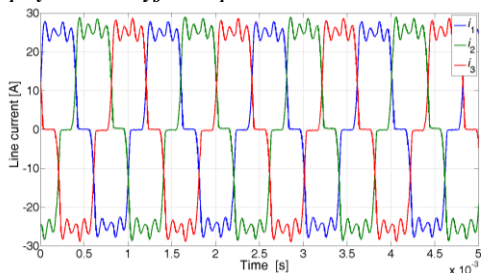
Amplituda uzyskanego napięcia indukowanego nie przekracza 49 V i jest zbliżona do minimalnej wartości do której dopuszcza się rozładowanie pakietu baterii akumulatorów. Konstrukcja spełnia zatem warunek, aby przy prędkości 8000 obr/min napięcie indukowane nie przekraczało minimalnej wartości

rozładowanego pakietu baterii [6]. Jest to jeden z warunków poprawnej pracy docelowego układu energoelektronicznego pełniącego funkcję ładowarki dla zastosowanych baterii akumulatorów.

Przykładowe przebiegi czasowe napięć i prądów pokazano na rysunkach 4-5 zarejestrowane przy prędkości 5000 obr/min i mocy wyjściowej 600 W.



Rys.4. Przebiegi czasowe napięć przewodowych i napięcia na wyjściu prostownika

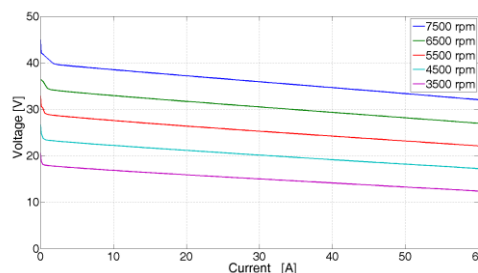


Rys.5. Przebiegi czasowe prądów przewodowych

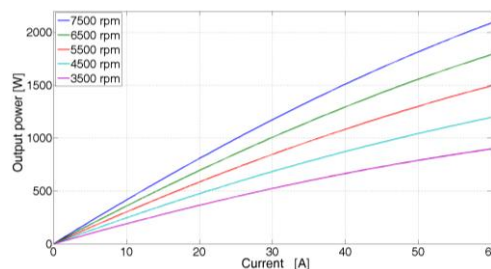
Napięcie na wyjściu prostownika jest pomniejszone o spadek napięcia na prostowniku. Duże tętnienia napięcia na wyjściu prostownika wynikają z charakteru napięć indukowanych.

3.2. Charakterystyki zewnętrzne

Charakterystyki zewnętrzne generatora wyznaczano przy pracy obciążenia programowalnego w układzie regulacji prądu. Wyjście prostownika obciążano prądem do wartości około 60 A. Rodzinę wyznaczonych charakterystyk zewnętrznych badanego generatora pokazano na rysunku 6. Otrzymane charakterystyki są typowymi dla pracy generatorowej bezszczotkowej maszyny z magnesami trwałymi. Zależność mocy wyjściowej generatora P_{out} w funkcji prądu obciążenia I_{dc} generatora pokazano na rysunku 7.



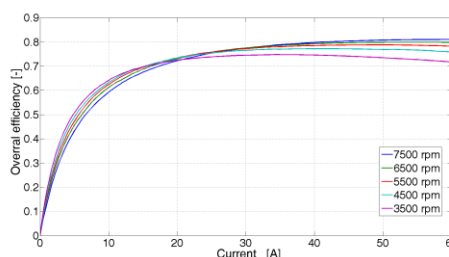
Rys.6. Charakterystyki zewnętrzne badanego generatora



Rys.7. Zależność mocy wyjściowej w funkcji prądu obciążenia

Badana maszyna została obciążona w testowych warunkach mocą wynoszącą około 2200 W. Nie jest to jednak moc maksymalna jaką można obciążyć maszynę w zakresie pracy generatorowej. Przy prądzie obciążenia wynoszącym około 90 A i prędkości obrotowej 8000 obr/min maszynę można obciążyć mocą przekraczającą 3000 W.

Sprawność ogólną generatora w zależności od prądu obciążenia pokazano na rysunku 8.



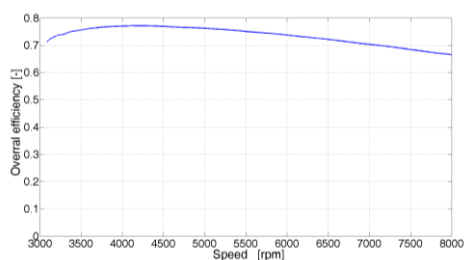
Rys.8. Zależność sprawności ogólnej w funkcji prądu obciążenia

Uzyskana sprawność maksymalna w danych warunkach pracy nie przekracza 81.5 % i jest znacznie niższa niż w zakresie pracy silnikowej. Nie jest to wynik który można uznać za bardzo dobry. Wraz ze spadkiem mocy wyjściowej czy też prędkości obrotowej następuje spadek efektywności pracy maszyny w zakresie pracy generatorowej.

3.3. Praca generatorowa ze stałą mocą

Pokazane w podrozdziale 3.2 charakterystyki mają charakter poglądowy. W układzie

docelowym maszyna ma pracować w zakresie pracy generatorowej z mocą wynoszącą około 600 W. Podczas tych badań obciążenie programowalne pracowało w trybie stałej mocy. Prędkość obrotową zmieniano w przewidywanym zakresie pracy generatora. Na rysunku 9 pokazano sprawność ogólną generatora w funkcji prędkości obrotowej przy stałej mocy 600 W.



Rys.9. Zależność sprawności ogólnej w funkcji prędkości obrotowej przy pracy ze stałą mocą wynoszącą 600 W

Generator wydaje wymaganą moc 600 W w zakresie zmiany prędkości obrotowej od około 3000 obr/min do 8000 obr/min (ograniczenie prędkości maksymalnej układu napędowego). Sprawność ogólna wynosi od 65% do około 78% (przy prędkości około 4200 obr/min).

4. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano wybrane wyniki badań laboratoryjnych bezszczotkowej maszyny z magnesami trwałymi. Zaprojektowana maszyna do napędu hybrydowego została przebadana w zakresie pracy generatorowej. Wymagany minimalny moment rozruchowy oraz moc znamionowa dla pracy silnikowej przy prędkości 8000 obr/min ustalają warunki pracy maszyny. W projektowanym układzie napędowym maszyna elektryczna będzie pokrywała zapotrzebowanie na moc elektryczną w całym zakresie przewidywanej regulacji prędkości obrotowej. Wymagana moc wyjściowa generatora jest stosunkowo niewielka i stanowi zaledwie około 17% mocy znamionowej dla pracy silnikowej. Powoduje to, że maszyna elektryczna w zakresie pracy generatorowej pracuje z relatywnie niezbyt wysoką sprawnością ogólną (65-78%). Sprawność maksymalna generatora nie przekracza 81.5 % i jest znacznie niższa niż w przypadku pracy silnikowej (87 %). W docelowym układzie energoelektronicznym przeznaczonym do prototypowej

bezczotkowej maszyny z magnesami trwałymi zastosowano układ podnoszący napięcie do wartości napięcia baterii akumulatorów oraz kontrolujący jej prąd ładowania. Wyniki badań pracy generatorowej z układem docelowym będą tematem następných prac badawczych.

5. Literatura

- [1]. R. R. Glassock, J. Y. Hung, L.F. Gonzalez and R.A: Walker, "Multimodal hybrid Powerplant for Unmanned Aerial Systems (UAS) Robotics", *Twenty-Fourth Bristol International Unmanned Air Vehicle Systems Conference*, Bristol, United Kingdom, 2009.
- [2]. F.G. Harmon, A.A. Frank and J.J. Chattot, "Conceptual Design and Simulation of a Small Hybrid-Electric Unmanned Aerial Vehicle", *Journal of Aircraft*, vol. 43, pp. 1490-1498, 2006.
- [3]. M. Barczyk; A. F. Lynch, "Invariant Observer Design for a Helicopter UAV Aided Inertial Navigation System", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 21, Issue:3, pp.791-806, 2013.
- [4]. R.C. Becerra, M. Ehsani, T.M. Jahns, "Four-Quadrant Brushless ECM Drive with Integrated Current Regulation", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, no. 4, pp. 833-841, 1992.
- [5]. S.M.N. Hasan, I. Husain, R.J. Veillette, J.E. Carletta, "A PM Brushless DC Starter/Generator System for a Series-Parallel 2x2 Hybrid Electric Vehicle", *42nd IAS Annual Meeting IEEE Industry Applications Conference*, pp. 1686-1693, 2007.
- [6]. P. Bogusz, M. Korkosz, A. Powrozek, J. Prokop, P. Wygonik "An Analysis of Operation of Brushless DC Machine Used in Unmanned Aerial Vehicle Hybrid Drive", *The 18th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics EDPE 2015, Tatranská Lomnica (Slovakia)*, pp.402-408, 2015.

Autorzy

dr inż. Piotr Bogusz*, pbogu@prz.edu.pl
 dr hab. inż. Mariusz Korkosz*, mkosz@prz.edu.pl
 dr hab. inż. Jan Prokop*, jprokop@prz.edu.pl
 dr inż. Piotr Wygonik**, piowyg@prz.edu.pl
 Politechnika Rzeszowska

*Wydział Elektrotechniki i Informatyki

ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów

**Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa

ul. Al. Powstańców Warszawy12, 35-959 Rzeszów

Informacje dodatkowe

Badania finansowane z projektu badawczego "Technologie hybrydowego zespołu napędowego lekkich lub bezałogowych statków powietrznych" - DZP/INNOLOT-1/2020/2013 oraz działalności statutowej Zakładu Elektrodynamiki i Systemów Elektromaszynowych Politechniki Rzeszowskiej