

Piotr PAPLICKI<sup>1</sup>, Ryszard PAŁKA<sup>1</sup>,  
Marcin WARDACH<sup>1</sup>

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny,  
Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych (1)

## Przegląd koncepcji maszyn wzbudzanych hybrydowo do zastosowania w napędzie samochodów

**Streszczenie.** Obecnie maszyny elektryczne z magnesami trwałymi są coraz bardziej popularne i konstruowane w wielu wariantach. Ich popularność związana jest mocno z ciągłym wzrostem parametrów magnesów trwałych, które są w nich stosowane, dotyczy to głównie magnesów typu NdFeB. Jednym z problemów związanych z zastosowaniem maszyn z magnesami trwałymi w pojazdach samochodowych, jest występowanie wysokiego napięcia indukowanego przy wysokich obrotach wirnika, która wymusza konieczność stosowania skomplikowanych algorytmów sterowania. W literaturze coraz częściej spotyka się nowe struktury maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi, w których, w celu regulacji pola wzbudzenia, stosuje się hybrydowe obwody wzbudzenia. W niniejszym artykule dokonano przeglądu najczęściej spotykanych struktur oraz przedstawiono na tym tle rozwiązanie, które jest przedmiotem badań w Katedrze Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych Wydziału Elektrycznego ZUT.

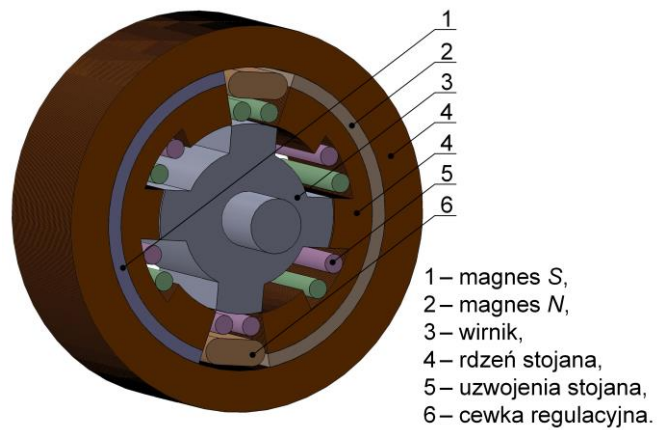
**Słowa kluczowe:** maszyna elektryczna, wzbudzenie hybrydowe, magnesy trwałe, cewka wzbudzająca.

### Wstęp

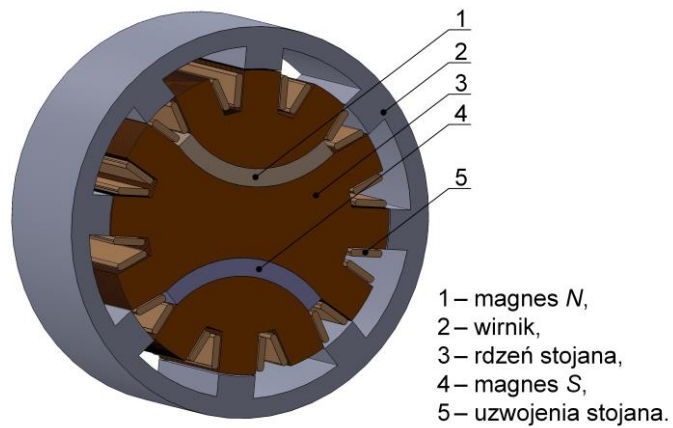
Regulację strumienia w szczelinie powietrznej maszyn z magnesami trwałymi ogólnie można realizować na dwa sposoby: sposobem sterowania lub poprzez odpowiednią modyfikację topologii maszyny. Konwencjonalne maszyny z magnesami trwałymi posiadają stały, nieregulowalny strumień wzbudzenia, który ogranicza możliwości napędu i staje się istotnym jego ograniczeniem. W przypadku realizacji sterowania  $U/f = \text{const.}$ , ze względu na ograniczone napięcie źródła zasilania oraz ograniczoną wytrzymałość napięciową izolacji uzwojeń, uzyskanie wyższych prędkości obrotowych wymaga osłabiania pola wzbudzenia, w celu zmniejszenia napięcia indukowanego. Tradycyjną metodą osłabiania pola jest zmniejszanie strumienia za pomocą prądu w osi  $d$ . Taka strategia generuje zwiększenie strat w układzie zasilania oraz powoduje powstanie ryzyka trwałej demagnetyzacji magnesów trwałych, w konsekwencji maleje wypadkowy moment obrotowy maszyny [1-3].

### Maszyny z magnesami trwałymi i regulowanym strumieniem wzbudzenia

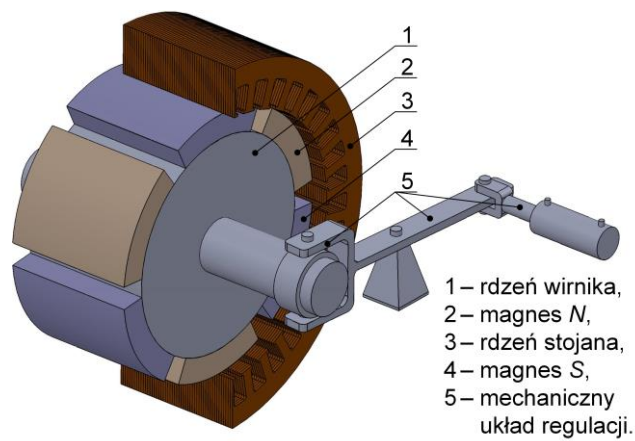
W celu regulacji pola wzbudzenia/napięcia indukowanego maszyny z magnesami trwałymi stosowane są również metody wymagające zmian konstrukcyjnych. W przypadku maszyn reluktancyjnych spotykana jest konstrukcja z dwoma wydatnymi magnesami trwałymi (z ang. *Double Salient Permanent Magnet – DSPM*). Maszyny DSPM realizowane są w konstrukcjach z wewnętrznym (rys. 1.), jak i zewnętrznym wirnikiem [4-5], przy czym rozwiązanie z wirnikiem zewnętrznym, które przedstawiono na rysunku 2. nie posiada dodatkowej cewki regulującej strumień wzbudzenia w szczelinie powietrznej. Zaletą tych maszyn jest mała ilość użytych magnesów trwałych, a więc i niski koszt produkcji.



Rys. 1. Maszyna DSPM z wirnikiem wewnętrznym.



Rys. 2. Maszyna DSPM z wirnikiem zewnętrznym.

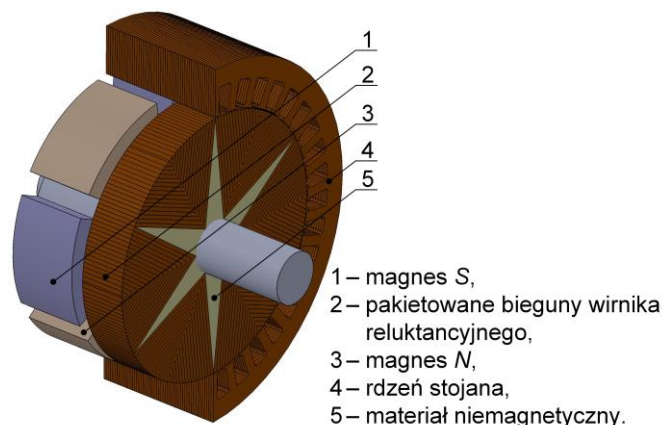


Rys. 3. Konstrukcja maszyny elektrycznej z przemieszczającym się wirnikiem.

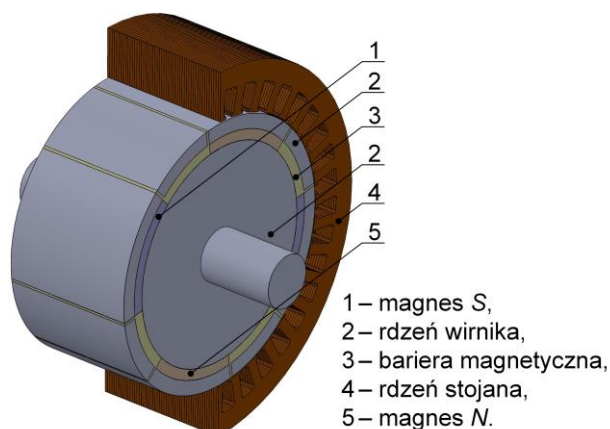
### IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

Inną metodą konstrukcyjnej regulacji napięcia indukowanego jest zastosowanie ruchomego wirnika w maszynie z magnesami trwałymi o konstrukcji cylindrycznej, który – przy wyższych prędkościach obrotowych – przemieszcza się w kierunku osiowym, wychodząc swoim fragmentem poza obszar stojana [6]. Takie rozwiązanie (rys. 3.) bardzo skutecznie realizuje zmniejszenie napięcia indukowanego, jednak jego wadą jest bardzo skomplikowana konstrukcja oraz brak możliwości zwiększenia strumienia wzbudzenia, bardzo korzystnego przy rozruchu maszyny.

Spotykane są również konstrukcje z podwójnym wirnikiem, w których na wspólnym wale umieszczone są dwie topologie wirnika: konwencjonalny wirnik z magnesami trwałymi oraz pakietowany wirnik reluktancyjny. Rozwiązanie to pozwala na uzyskanie, już na etapie projektowania, maszyny o wymaganym stosunku indukcyjności  $L_d/L_q$  [7]. Dzięki temu skuteczna jest regulacja napięcia indukowanego przy pomocy prądu w osi  $d$ . Przykład tego typu konstrukcji przedstawia rysunek 4. Podobną właściwość uzyskuje się przy zastosowaniu odpowiednio usytuowanych barier magnetycznych [8] – rys. 5. W literaturze spotykane są również konstrukcje maszyn tarczowych z regulacją pola.



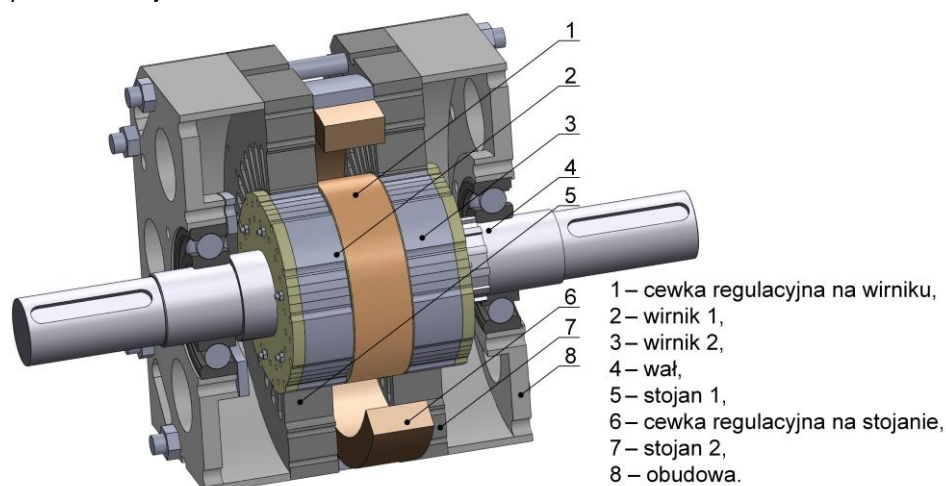
Rys. 4. Konstrukcja maszyny elektrycznej z wirnikiem o dwóch topologiach.



Rys. 5. Konstrukcja maszyny elektrycznej z wirnikiem posiadającym bariery magnetyczne.

### Maszyna ECPMSM

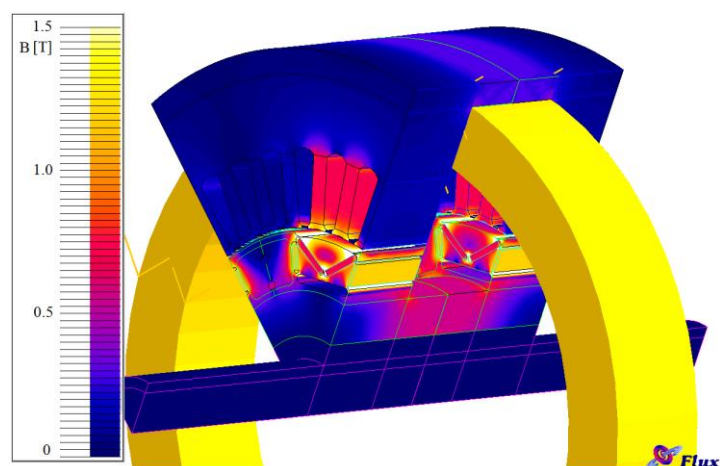
W Katedrze Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych Wydziału Elektrycznego ZUT prowadzone są badania nad synchroniczną maszyną z magnesami trwałymi ECPMSM (z ang. **E**lectric **C**ontrolled **P**ermanent **M**agnet **S**ynchronous **M**achine) zawierającą dodatkową cewkę regulującą strumień wzbudzenia, której konstrukcję przedstawia rysunek 6.



Rys. 6. Maszyna ECPMSM.

### Wyniki badań symulacyjnych maszyny ECPMSM

Trójwymiarowy model symulacyjny przygotowany w programie Flux3D przedstawiony jest na rysunku 7. Podczas tych badań do regulacji strumienia magnetycznego w szczeliny powietrznej użyta była cewka na stojanie (6 na rys. 6.), której ilość zwojów wynosiła 1000. Uzwojenie stojana jest dwuwarstwowe, w związku z czym w każdym żłobku stojana maszyny znajdują się gałęzie dwóch zezwojów, każdy po 90 zwojów.

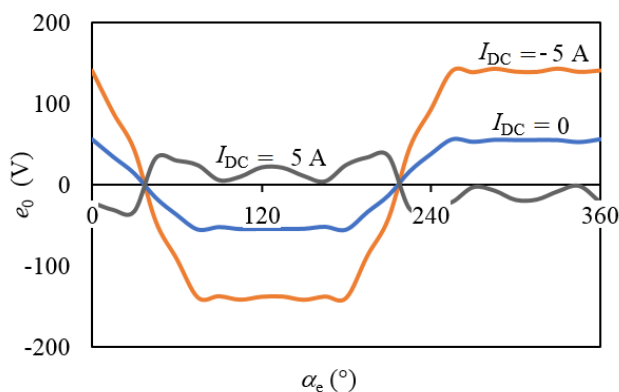


Rys. 7. Rozkład pola magnetycznego w modelu polowym maszyny ECPMSM.

### IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016

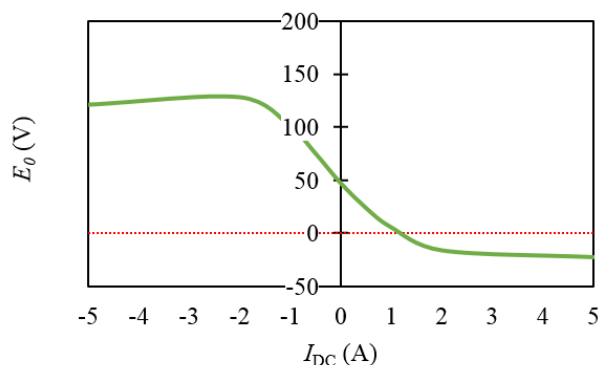
Rysunek 8 przedstawia kształty napięć indukowanych na zaciskach jednej fazy maszyny przy założeniu, że wszystkie zezwoje połączone są równoległe, prędkość obrotowa wirnika wynosi  $n = 1\ 000$  obr/min, a cewka dodatkowa była zasilana prądem stałym w trzech przypadkach:

1.  $I_{DC} = -5$  A,
2.  $I_{DC} = 0$ ,
3.  $I_{DC} = 5$  A.



Rys. 8. Kształty napięć indukowanych w uzwojeniach fazowych przy stałej prędkości 1 000 obr/min dla trzech prądów  $I_{DC}$ : -5, 0, 5 A.

Na rysunku 9 zamieszczono wykres obrazujący zależność wartości skutecznej napięcia indukowanego  $E_0$  w zależności od wartości prądu w cewce dodatkowej w zakresie od  $I_{DC} = -5$  A do  $I_{DC} = 5$  A. Wykres ten potwierdza bardzo skuteczną regulację napięcia indukowanego, które zmienia się od ok. -20 V do ok. 125 V. Ponadto zasilając cewkę dodatkową prądem o wartości zaledwie  $I_{DC} = 1,1$  A można zredukować napięcie indukowane do zera.

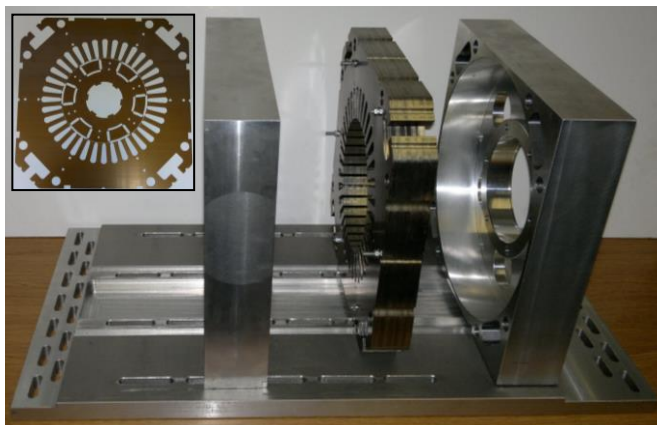


Rys. 9. Charakterystyka napięcia indukowanego  $E_0$  w uzwojeniach fazowych w funkcji prądu  $I_{DC}$ .

### Podsumowanie

Otrzymane wyniki badań symulacyjnych potwierdziły skuteczność regulacji napięcia indukowanego w proponowanym modelu elektrycznej maszyny hybrydowej. Na

podstawie badań zostały opracowane elementy konstrukcyjne modelu eksperymentalnego maszyny ECPMSM, który jest aktualnie w trakcie budowy. W dalszym etapie badań zostaną przeprowadzone gruntowne badania eksperymentalne w celu potwierdzenia wyników symulacji. Na rysunku 10 przedstawiono pierwsze, już wykonane części maszyny; tarcze łożyskowe, podstawę, jeden z pakietowanych rdzeni stojana oraz blachy stojana i jednej z wersji wirnika w widoku z przodu.



Rys. 10. Elementy konstrukcyjne modelu eksperymentalnego maszyny ECPMSM.

Praca finansowana w ramach środków Narodowego Centrum Nauki, projekt nr 2015/17/B/ST8/03251

#### Literatura

1. T. M. Jahns, *Flux-weakening regime operation of an interior permanent-magnet synchronous motor drive*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.23, No.4, July/August 1987, pp.681-689.
2. P. Di Barba, M. Bonislowski, R. Palka, P. Paplicki, and M. Wardach, *Design of Hybrid Excited Synchronous Machine for Electrical Vehicles*, IEEE Trans. Magn., 51, No. 8, Aug. 2015.
3. P. Paplicki, M. Wardach, M. Bonislowski, R. Palka, *Simulation and experimental results of hybrid electric machine with a novel flux control strategy*, Archives of Electrical Engineering, 64(1), 2015, 37-51.
4. A. Shakal, Y. Liao, and T. A. Lipo, *A permanent magnet AC machine structure with true field weakening capability*, IEEE International Symposium on Industrial Electronics Conference Proceedings, 1993, pp.19-24.
5. J. Luo, *Axial flux circumferential current permanent magnet electric machine*, PhD Thesis, University of Wisconsin-Madison, 1999.
6. P. Lawrence, *Brushless PM motor or alternator with variable axial rotor/stator alignment to increase speed capability*, World Intellectual Property Organization: WO 03/077403 A1, 2003.
7. B. J. Chalmers, R. Akmeşe, L. Musaba, *Design and fieldweakening performance of permanent-magnet/reluctance motor with two-part rotor*, IEE proceedings, Vol.145, No.2, March 1998, pp.133-139.

**Autorzy:** dr inż. Piotr Paplicki, prof. dr hab. inż. Ryszard Palka, dr inż. Marcin Wardach; Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, e-mail: [piotr.paplicki@zut.edu.pl](mailto:piotr.paplicki@zut.edu.pl), [rpalka@zut.edu.pl](mailto:rpalka@zut.edu.pl), [marwar@zut.edu.pl](mailto:marwar@zut.edu.pl)