

# Maszyna elektryczna z dwoma twornikami wzbudzanymi magnesami trwałymi

Jakub Bernatt, Tadeusz Glinka

## Wstęp

Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi mają strumień wzbudzenia o wartości stałej. Maszyny te stosowane jako prądnice nie mają możliwości regulacji napięcia, a jako silniki nie mogą pracować przy odwzbudzeniu, to jest w strefie regulacji prędkości obrotowej przy stałej mocy. Dlatego stosowane są maszyny ze wzbudzeniem hybrydowym, to jest połączonym wzbudzeniem magnesami trwałymi i elektromagnetycznym. Znane są prądnice ze wzbudzeniem hybrydowym szeregowym, równoległym i szeregowo-równoległym. Wzbudzenie hybrydowe w każdym wariantcie rozwiązania ma wirujące uzwojenie wzbudzenia, a więc wirnik ma pierścienie ślizgowe, na które to uzwojenie jest wyprowadzone, i szczotki. Z tego powodu jest to rozwiązanie mało korzystne. W Katedrze Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego opracowano maszynę elektryczną wzbudzaną hybrydowo do zastosowania w napędzie samochodów i w elektrowniach wiatrowych. Warianty rozwiązań maszyny są zastrzeżone patentami [2] i są opisane w publikacjach [3]. Jest to maszyna elektryczna z dwoma twornikami. Każdy z tworników jest wzbudzany magnesami trwałymi, a między jarzmami tworników jest umieszczone dodatkowe nieruchome uzwojenie wzbudzenia w formie cewki. Dodatkowa cewka służy do regulacji strumienia wzbudzenia w twornikach maszyny. Nazwa maszyny w języku angielskim *Electric Controlled Permanent Magnet Synchronous Machine* – ECPMSM. Układ wzbudzenia maszyny ECPMSM jest hybrydowy. Jego zaletą jest nieruchome uzwojenie wzbudzenia, zatem nie ma pierścieni ślizgowych i szczotek. Inne rozwiązanie maszyny elektrycznej ze wzbudzeniem magnesami trwałymi i nieruchomą cewką wzbudzenia jest zastrzeżone patentem [4]. W tym rozwiązaniu wirnik jest jawnobiegunowy o liczbie par biegunów  $p \geq 2$ , magnesy trwałe jednoimienne są umieszczone na co drugim biegunie, a cewka wzbudzająca jest umieszczona przy tarczy łożyskowej i wzbudza twornik maszyny strumieniem unipolarnym.

## 2. Maszyna z dwoma twornikami

W artykule przedstawiona jest maszyna elektryczna z dwoma twornikami wzbudzanymi magnesami trwałymi i nasycanym dławikiem o kształcie toroidu, łączącym oba jarzma tworników. Na rysunku 1 przedstawiono poglądowo przekrój osiowy obwodu magnetycznego maszyny z dwoma twornikami połączonymi toroidem.

Maszyna elektryczna z magnesami trwałymi i dwoma twornikami ma jarzma tworników dwuczęściowe: część pakietowaną

**Streszczenie:** Maszyna elektryczna z magnesami trwałymi i dwoma twornikami ma umieszczony między jarzmami rdzeń dławika. Rdzeń o kształcie toroidu jest uzwojony. Boki zwojów dławika są umieszczone w żłobkach promieniowych: w jarzmach tworników bądź w rdzeniu dławika. Wirnik, z zamocowanymi magnesami trwałymi, dla obydwu maszyn jest wspólny. Strumień wzbudzenia  $\Phi$  każdego z tworników zawiera dwie składowe: składową obwodową  $\Phi_1$  i składową osiową  $\Phi_2$ . Uzwojenie dławika zasilane jest prądem stałym. Wartość prądu determinuje nasycenie rdzenia i zmienia reluktancję rdzenia dla strumienia  $\Phi_2$ . Zwiększając zatem prąd, zwiększa się reluktancję w obwodzie strumienia  $\Phi_2$ , strumień  $\Phi_2$  zmienia się i tym samym zmniejsza się strumień wzbudzenia  $\Phi$  każdego z tworników.

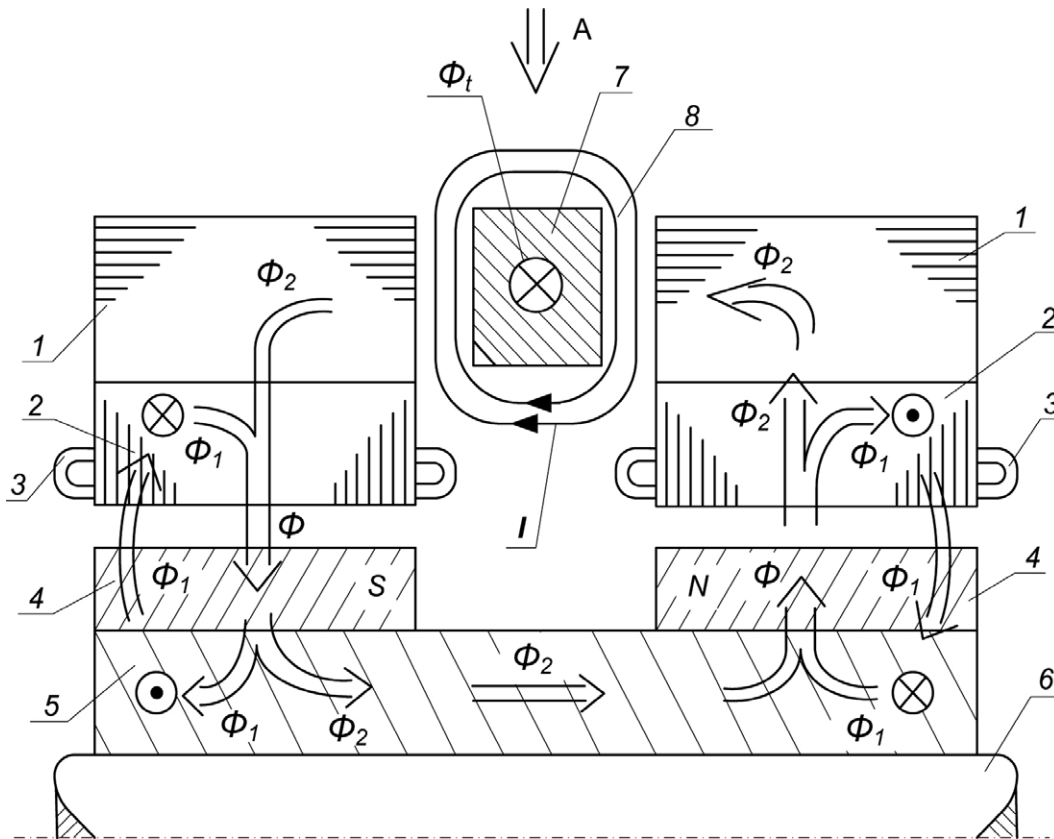
Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, magnesy trwałe, dławik nasycony, regulacja strumienia magnetycznego

## 🇬🇧 ELECTRIC MACHINE WITH TWO ARMATURES EXCITED WITH PERMANENT MAGNETS

**Abstract:** *The permanent magnet electric machine with two armatures has a choke core located between the yokes. The toroid-shaped core is wound. The sides of the throttle coils are located in radial slots: in the armature yokes or in the throttle core. The rotor, with permanent magnets attached, is common to both machines. The excitation flux of each armature contains two components: a peripheral component and an axial component. Choke winding powered by DC. The current value determines the saturation of the core and changes the core's reluctance for the flux. Therefore, by increasing the current, the reluctance in the flux circuit increases, the flux changes, and thus the excitation flux of each armature decreases.*

Keywords: *electric machines, permanent magnets, saturated choke, magnetic flux regulation*

radialnie (2) i część pakietowaną obwodowo (1). W części pakietowanej radialnie (2) są umieszczone, w żłobkach, uzwojenia tworników (3), a między jarzmami pakietowanymi obwodowo (1) jest umieszczony toroid (7). Wirnik (5) obydwu maszyn jest wspólny, przy czym na jarzmie wirnika bądź wewnątrz jarzma wirnika, pod twornikami, są umieszczone magnesy trwałe (4) w ten sposób, że w płaszczyźnie osi wału (5) i osi magnesów trwałych (4) pod jednym twornikiem jest biegun N, a pod drugim twornikiem biegun S. Wymiar promieniowy



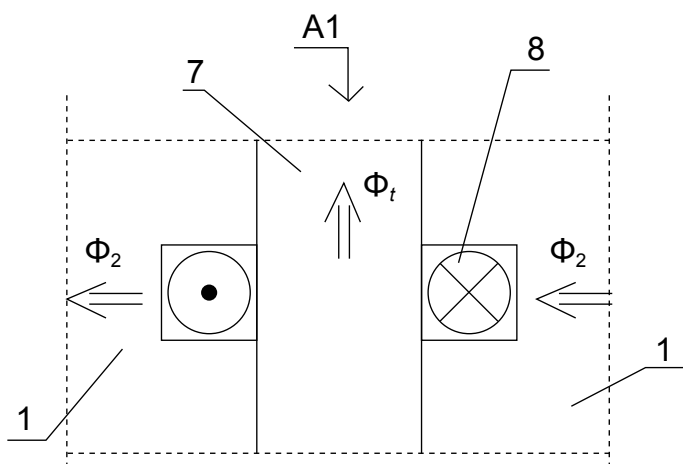
Rys. 1. Przekrój osiowy obwodu magnetycznego maszyny dwutwornikowej wzbudzonej magnesami trwałymi z umieszczonym między jarzmami dławikiem nasycanym (rysunek poglądowy)

rdzenia toroidu (7) jest równy wymiarowi promieniowemu jarzm zewnętrznych (1) twornika.

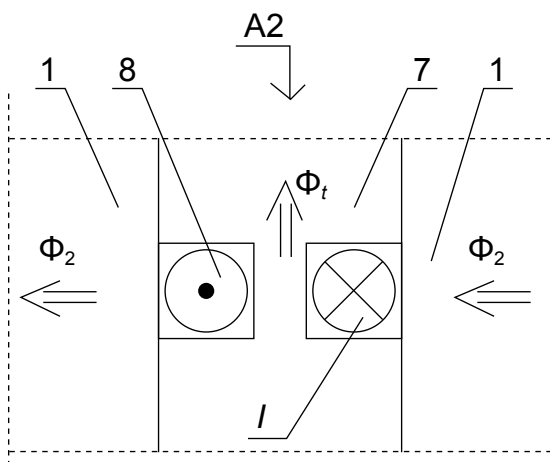
Strumień magnetyczny  $\Phi$  wytwarzany przez magnesy trwałe w jarzmach stojanów obydwu maszyn rozdziela się na dwie składowe  $\Phi_1$  i  $\Phi_2$ , jak to pokazano na rysunku 1. Składowa obwodowa  $\Phi_1$  zamyka się w obwodzie magnetycznym każdej z maszyn: biegun N, szczelina, jarzmo pakietowane radialnie (2), szczelina, biegun S, jarzmo wirnika i biegun N. Składowa strumienia  $\Phi_2$  zamyka się w obwodzie magnetycznym dwu maszyn. W maszynie prawej: biegun N, szczelina, jarzmo pakietowane radialnie (2), jarzmo pakietowane obwodowo (1), rdzeń toroidu (7) i następnie w maszynie lewej: jarzmo pakietowane obwodowo (1), jarzmo pakietowane radialnie (2), szczelina, biegun S, jarzmo wirnika i biegun N maszyny prawej. Uzwojenie (8) toroidu (7) zasila się prądem stałym  $I$ . Siła magnetomotoryczna  $N_t I$  wzbudza w rdzeniu toroidu strumień magnetyczny  $\Phi_t$ , który zmienia stan nasycenia rdzenia toroidu 7.  $N_t$  oznacza liczbę zwojów uzwojenia (8) toroidu (7). Stan nasycenia rdzenia toroidu (7) zmienia reluktancję obwodu magnetycznego składowej  $\Phi_2$  strumienia. Jeśli nasycenie wzrasta, składowa  $\Phi_2$  zmniejsza się. Ponieważ rdzeń toroidu (7) jest zamknięty, to przy stosunkowo małym prądzie  $I$  rdzeń nasycy się i reluktancja dla strumienia  $\Phi_2$  wzrasta, strumień  $\Phi_2$  maleje. Zmniejsza się także strumień całkowity  $\Phi$  wzbudzenia maszyny lewej i prawej.

W celu wyeliminowania szczelin między rdzeniem toroidalnym dławika i jarzmami twornika uzwojenie toroidalne dławika należy umieścić w żłobkach promieniowych pakietów blach tworników bądź toroidu. Patrząc od strony zewnętrznej na uzwojony toroid (rys. 1, widok A), widzimy boki uzwojenia toroidu w żłobkach i rdzeń toroidu przylegający do jarzm tworników. Na rysunku 2 przedstawiono rozwiązanie (widok A1), w którym boki cewek uzwojenia toroidu są umieszczone w żłobkach jarzm tworników. Na rysunku 3 przedstawiono rozwiązanie (widok A2) z bokami cewek uzwojenia toroidu umieszczonymi w żłobkach rdzenia toroidu. Na rysunku 4 przedstawiono rozwiązanie (widok A3) z bokami uzwojenia toroidu umieszczonymi w żłobkach pakietu blach tworników, a częściowo w żłobkach toroidu. W przedstawionych rozwiązaniach rdzeń toroidu przylega do jarzm tworników maszyn, brak jest szczelin powietrznych wprowadzających dodatkową reluktancję dla strumienia  $\Phi_2$ .

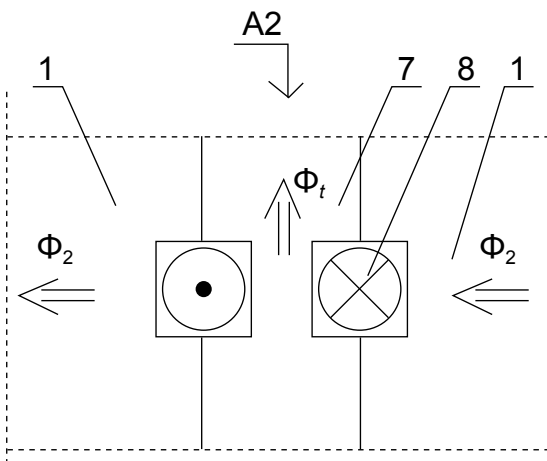
W rozwiązaniu przedstawionym na rys. 2 w jarzmach zewnętrznych (1) obydwu tworników, w płaszczyznach tarczowych od strony toroidu (7), są żłobki promieniowe dla boków cewek uzwojenia (8) toroidu (7). W drugim rozwiązaniu, przedstawionym na rys. 3, w obydwu płaszczyznach tarczowych rdzenia toroidu (7) są żłobki dla boków cewek uzwojenia (8) toroidu (7). W trzecim rozwiązaniu, przedstawionym na rys. 4, płytsze



Rys. 2. Uzwojenie magnesujące (8) rdzeń toroidu (7) jest umieszczone w żłobkach promieniowych jarzm (1) tworników



Rys. 3. Uzwojenie magnesujące (8) rdzeń toroidu (7) jest umieszczone w żłobkach w rdzeniu toroidu (7)



Rys. 4. Uzwojenie magnesujące (8) rdzeń toroidu (7) jest umieszczone w żłobkach promieniowych jarzm (1) tworników i rdzeniu (7) toroidu

żłobki promieniowe są w jarzmach (1) i w rdzeniu (7) toroidu, w których są umieszczone boki uzwojenia (8) magnesującego.

Zaletą rozwiązania maszyny elektrycznej według przedstawionego na rys. 1 rozwiązania jest regulacja strumienia wzbudzenia  $\Phi$  w granicach  $\Phi_1 + \Phi_2 \leq \Phi < \Phi_1$ . Maszyna z dwoma twornikami i rdzeniem nasycającym nie ma pierścieni i szczotek. Straty mocy ( $RI^2$ ) w uzwojeniu (8) dławika o rezystancji  $R$  są niewielkie, gdyż rdzeń (7), wykonany z blachy transformatorowej bez szczeliny powietrznej, nasyci się już przy natężeniu pola magnetycznego równym około 50 A/m.


### Podsumowanie

Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi w stosunku do innych maszyn elektrycznych mają wiele zalet, lecz mają stałą wartość strumienia wzbudzenia, który ogranicza zakres ich stosowania. Regulacja strumienia wzbudzenia realizowana jest w maszynach elektrycznych ze wzbudzeniem hybrydowym. Znanych jest szereg takich rozwiązań.

W artykule przedstawiono maszynę elektryczną, w której jest regulowana reluktancja obwodu magnetycznego poprzez zmianę nasycenia dodatkowego rdzenia ferromagnetycznego w obwodzie magnetycznym. W tym celu maszyna ma dwa tworniki, a między twornikami umieszczono toroid z rdzeniem nasycanym. Strumień wzbudzenia  $\Phi$  każdego z tworników zawiera dwie składowe: składową obwodową  $\Phi_1$  i składową osiową  $\Phi_2$ . Poprzez zmianę nasycenia rdzenia dławika reguluje się wartość składowej obwodowej strumienia  $\Phi_2$ , zmieniając tym samym strumień wzbudzenia  $\Phi$  każdego z tworników.

### Literatura

- [1] BERNATT J., GLINKA T.: *Maszyna elektryczna z magnesami trwałymi i dwoma twornikami*. Patent RP nr 231390 z dnia 19.10.2018 r.
- [2] PAPLICKI P., WARDACH M., PAŁKA R.: *Wirnik maszyny elektrycznej o wzbudzeniu hybrydowym*. Patenty RP nr: 226574, 226575, 226576, 226577.
- [3] PAPLICKI P., WARDACH M.: *Przegląd koncepcji maszyn wzbudzanych hybrydowo do zastosowania w napędzie samochodów*. Proc. Conference: Innovative Materials and Technologies in Electrical Engineering i-MITEL, Łagowo 2016.
- [4] WRÓBLEWSKI J., WRÓBLEWSKA-SWARCEWICZ K.: *Bezszcotkowa maszyna synchroniczna*. Patent RP Nr. 189591 z 2005 r.

 Jakub Bernatt, Tadeusz Glinka  
Sieć Badawcza Łukasiewicz  
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL

artykuł recenzowany