

*silniki magnetoelektryczne,  
silniki o strumieniu osiowym*

Konrad DĄBAŁA\*  
Andrzej RUDENSKI\*

## **SILNIK MAGNETOELEKTRYCZNY TARCZOWY Z TWORNIKIEM BEZ RDZENIA FERROMAGNETYCZNEGO**

W pracy przedstawiono główne cechy silników magnetoelektrycznych o strumieniu osiowym i tworniku bez rdzenia ferromagnetycznego, zarys metody ich projektowania oraz wybrane wyniki obliczeń projektowych. Ponadto przedstawiono opis zastosowanej technologii wykonania silnika modelowego. Silnik prototypowy o odwróconej strukturze, tj. z zewnętrznym wirnikiem w postaci dwóch tarcz z magnesami trwałymi został zaprojektowany tak, aby mieścił się wewnątrz standardowej obręczy koła pojazdu o średnicy 15 cali. Twornik z trójfazowym uzwojeniem jednowarstwowym został zalany żywicą epoksydową w formie silikonowej.

### **1. WPROWADZENIE**

Opracowanie dotyczy silników o strumieniu osiowym i strukturze tarczowej z magnesami w wirniku o kształcie wycinków pierścienia oraz z uzwojeniem trójfazowym umieszczonym w stojanie, skojarzonym w gwiazdę, przy czym stojan silnika nie zawiera żadnych elementów ferromagnetycznych. Brak elementów ferromagnetycznych w tworniku powoduje, że nie występuje moment zaczepowy. Nie występują również straty w rdzeniu twornika, co powoduje zwiększoną sprawność maszyn, zwłaszcza przy zwiększonej częstotliwości zasilania. Mała indukcyjność uzwojeń twornika ułatwia komutację prądu w uzwojeniach przy zwiększonych częstotliwościach zasilania. Wadą takich silników jest duża grubość szczeliny powietrznej wraz z tarczą twornika umieszczoną pomiędzy magnesami, co wiąże się z koniecznością stosowania grubszych, a więc i droższych magnesów.

---

\* Instytut Elektrotechniki, ul. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa.

## 2. ZAŁOŻENIA KONSTRUKCYJNE I WYNIKI OBLICZEŃ PROJEKTOWYCH

Opracowany w Zakładzie Maszyn Elektrycznych Instytutu Elektrotechniki algorytm i program obliczeń projektowych składa się z następujących bloków [2, 3, 4]:

1. Wstępne obliczenia wymiarów maszyny, momentu, prądu,
2. Obliczenie obwodu magnetycznego i punktu pracy magnesu przy biegu jałowym;
3. Obliczenie liczby zwojów uzwojenia twornika oraz dobór drutu nawojowego;
4. Obliczenie obwodu magnetycznego i punktu pracy magnesu przy obciążeniu znamionowym;
5. Obliczenie rezystancji uzwojeń, składowych strat oraz sprawności;
6. Obliczenie współczynnika przeciążalności prądowej;
7. Obliczenia wytrzymałościowe tarcz jarzmowych wirnika.

Tabela 1. Zestawienie podstawowych wyników obliczeń  
Table 1. List of fundamental calculation results

Opis	Ozn.	Jedn.	Wartość
Znamionowe napięcie stałe	$U_N$	V	96
Moment na wale	$M_N$	Nm	50,7
Prąd fazowy twornika (wart. skuteczna)	$I_{ph}$	A	14,74
Sprawność	$\eta$	%	88,3
Średnica wewnętrzna twornika	$D$	mm	142
Średnica zewnętrzna twornika	$D_e$	mm	272
Grubość twornika	$b_a$	mm	13,2
Jednostronna grubość szczeliny powietrznej	$\delta$	mm	1,0
Grubość magnesu	$b_m$	mm	11,5
Kąt magnesu	$\beta_m$	°	27
Częstotliwość strumienia	$f$	Hz	32
Częstotliwość komutacji	$f_k$	Hz	96
Indukcja w szczelinie przy obciążeniu znamionowym	$B_\delta$	T	0,546
Indukcja w jarzmie wirnika przy obciążeniu znamionowym	$B_y$	T	1,428
Liczba zwojów szeregowych w paśmie fazowym twornika	$z_f$	–	168
Rezystancja pasma fazowego twornika w temperaturze 25°C	$R_f$	$\Omega$	0,2753
Współczynnik przeciążalności prądowej	$k_i$	–	3,24

Oprogramowanie umożliwiające interaktywne projektowanie obwodu magnetycznego silnika oraz uzwojeń zostało użyte do zaprojektowania silnika prototypowego. Przy projektowaniu przyjęto następujące założenia:

- liczba biegunów silnika  $2p = 12$ ;
- liczba boków zezwojów uzwojenia twornika  $S_t = 36$ . Ze względu na brak momentu zaczepowego liczba boków musi spełniać jedynie warunek symetrii uzwojenia przy wybranej liczbie par biegunów;

- napięcie znamionowe silnika  $U_N = 96$  V. Napięcie znamionowe silnika wynika z przyjętego napięcia baterii akumulatorów pojazdu;
- wymiary zewnętrzne ustalono takie, aby silniki mogły być zamontowane w felgach o średnicy 15". Ze względu na mały wymiar osiowy silników tarczowych jedynym ograniczeniem jest zewnętrzna średnica silnika, która musi być mniejsza od wewnętrznej średnicy obręczy koła. Przyjęto, że zewnętrzna średnica silnika będzie wynosiła  $D = 328$  mm. Pozostałe główne wymiary promieniowe, tj. średnice zewnętrzna i wewnętrzna czynnej części twornika, wynikają z konstrukcji silnika są powiązane z wymiarami konstrukcyjnymi zewnętrznego wirnika oraz konieczności zapewnienia miejsca na zewnętrzne połączenia czołowe twornika.

### 3. OPRACOWANIE KONSTRUKCYJNE SILNIKA PROTOTYPOWEGO

#### 3.1. ZASTOSOWANE MATERIAŁY

Zastosowano magnesy trwałe NdFeB w gatunku N42SH o dopuszczalnej temperaturze pracy 150 °C (litera S). Średnie wartości katalogowe parametrów tego gatunku magnesów to: remanencja  $B_r = 1,3$  T; koercja  $H_{cb} = 987$  kA/m; koercja dla magnetyzacji  $H_{ci} = 1592$  kA/m; gęstość energii magnetycznej  $BH_{\max} = 330$  kJ/m<sup>3</sup>.

Jarzma wirników o kształcie tarcz wykonano ze stali konstrukcyjnej podwyższonej jakości gatunku „45”. Jest to stal atestowana, co gwarantuje dotrzymanie przez producenta jej składu chemicznego i parametrów. Właściwości magnetyczne tej stali mają bowiem wpływ na wyniki obliczeń elektromagnetycznych silnika. Charakterystyki magnesowania dla tego gatunku stali podano w pracy [1]. Ze względu na bardzo duże siły promieniowe odrywające magnesy od powierzchni tarcz jarzmowych (w przypadku projektowanego silnika ok. 5600 N) zrezygnowano z klejenia magnesów do tarcz jarzmowych. Każdy z magnesów jest przykręcony do tarczy jarzmejowej za pomocą dwóch wkrętów mosiężnych. Duże siły promieniowe wymusiły także konieczność takiego zaprojektowania wirnika które umożliwiał bezpieczny montaż.

Bardzo istotną i zarazem trudną sprawą jest właściwy dobór żywicy użytej do zalewania uzwojeń twornika. Brak danych na ten temat w dostępnej literaturze, skłonił autorów do wykonania analizy własności dostępnych żywic epoksydowych i poliuretanowych pod kątem możliwości ich użycia do zalania twornika zaprojektowanego silnika modelowego.

Ze względu na małe napięcie znamionowe parametry dielektryczne żywic mają znaczenie drugorzędne. Bardziej istotne są właściwości mechaniczne oraz cieplne. Ze względu na dopuszczalne temperatury, które mogą wystąpić w uzwojeniu istotne jest, żeby zastosowana żywica wytrzymała takie temperatury. Drugą bardzo ważną właściwością jest przewodność cieplna żywicy. Jej wysoka wartość powoduje bowiem dobre odprowadzanie ciepła od jedynego źródła strat, jakim jest uzwojenie. Wartość tych parametrów zaważyła na wyborze żywicy epoksydowej RE22920 firmy Axson.

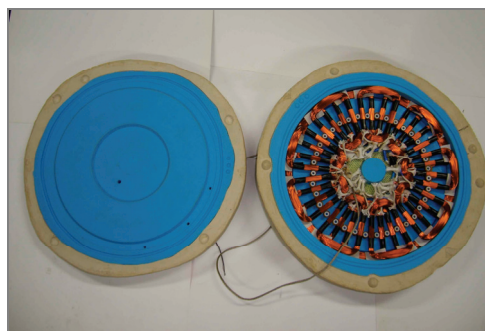
### 3.2. TECHNOLOGIA WYKONANIA TWORNIKA

W klasycznych silnikach magnetoelektrycznych uzwojenie twornika umieszczone jest w żłobkach rdzenia ferromagnetycznego składanego z blach elektrotechnicznych, który jest jednocześnie elementem konstrukcyjnym. W bezrdzeniowym silniku tarczowym uzwojenie twornika jest zalane materiałem elektroizolacyjnym. Kompletny twornik musi spełniać następujące wymagania:

- żywica użyta do zalewania musi trwale zespałać cewki uzwojenia spełniając jednocześnie rolę układu elektroizolacyjnego;
- musi być zachowany kształt cewek i ich dokładne rozmieszczenie na obwodzie;
- kompletny twornik musi być dostatecznie sztywny i wytrzymały mechanicznie oraz mieć dokładne wymiary wynikające z dokumentacji projektowej silnika.

W przedstawianych w literaturze wykonanych silnikach tarczowych [5, 6] uzwojenie twornika jest zalewane żywicą w metalowych formach. Ze względu na zapewnienie możliwości wyjęcia twornika po utwardzeniu żywicy, forma musi być wykonana bardzo dokładnie, mieć „zbieżności” oraz być zaopatrzona w układ wypychaczy. Wykonanie takiej formy jest bardzo pracochłonne i kosztowne i jest opłacalne dopiero przy przewidywanej seryjnej produkcji tworników – dla wykonań jednostkowych takie rozwiązanie jest nieopłacalne. Autorzy postanowili dokonać próby wykonania twornika przy użyciu formy silikonowej. Ze względu na łatwość oddzielenia żywicy epoksydowej lub poliuretanowej od silikonowej formy, rozwiązanie takie jest powszechnie stosowane przy wykonywaniu odlewów elementów elektroinstalacyjnych, replik rzeźb, medali itp.

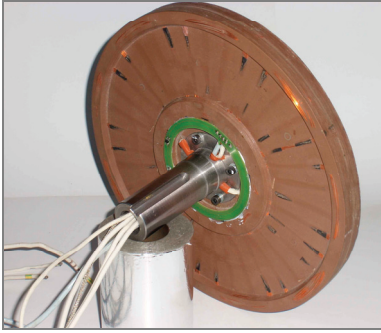
Nawinięte w szablonie cewki uzwojenia twornika po uformowaniu umieszczono w przyrządzie montażowym. Po wykonaniu połączeń, umieszczeniu pomiędzy cewkami przekładek izolacyjnych, dystansowych oraz ostatecznym uformowaniu, uzwojenie przełożono do formy silikonowej (rys. 1). Po zamknięciu formę wypełniono żywicą.



Rys. 1. Kompletnie uzwojenie twornika umieszczone w formie silikonowej

Fig. 1. Complete armature winding in silicon mould

Na rysunku 2 przedstawiono widok kompletnego twornika, na rys. 3 widok pojedynczej tarczy jarzmowej wirnika z przykręconymi magnesami, a na rys. 4 widok prototypowego silnika tarczowego po zmontowaniu.



Rys. 2. Widok kompletnego twornika po zalaniu  
Fig. 2. Sight of complete armature after filling



Rys. 3. Tarcza jarzmowa z przykręconymi magnesami  
Fig. 3. Yoke disc with screwed magnets



Rys. 4. Kompletny silnik tarczowy  
Fig. 4. Complete disc motor

#### LITERATURA

- [1] CICHY J., DĄBROWSKI M., *Badanie własności magnetycznych stali konstrukcyjnych*, Archiwum Elektrotechniki, tom XXIV, Zeszyt 92, 1975, 329–343.
- [2] DĄBROWSKI M., RUDENSKI A., *Opracowanie metody i programu obliczeń bezszczotkowych silników prądu stałego o magnesach trwałych*, Dokumentacja I.El. nr 20/2008.
- [3] DĄBROWSKI M., RUDENSKI A., *Opracowanie metody obliczeń i programu do syntezy silników magnetoelektrycznych tarczowych*, Dokumentacja I.El. nr 27/2010.
- [4] DĄBROWSKI M., RUDENSKI A., *Synthesis and CAD of permanent magnet DC brushless motors*, Archives of Electrical Engineering, 2010, Vol. 59 (1–2), 87–98.

- [5] GIERAS J.F., *Permanent Magnet Motor Technology*, III Edition, CRC Press Taylor Francis Group, New York 2009.
- [6] GIERAS J.F., *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*, Second Edition, Springer Science, 2008.

#### MAGNETOELECTRIC DISC MOTOR WITH ARMATURE WITHOUT FERROMAGNETIC CORE

In the paper the main features of the magneto-electric disc motors with axial flux and armature without ferromagnetic core and outline its design method and selected design calculations results are presented. Moreover is presented description of workmanship technology of the prototype motor. The prototype motor with inverted structure i.e. with outer rotor made up two shields with permanent magnets was designed in that way to fit in a standard rim 15" diameter. It was poured the armature with three-phase winding over epoxy resin in a silicon mould.