

*maszyna tarczowa, magnesy trwałe, moment obrotowy,  
metody polowe, Flux3D, GOT-It, optymalizacja*

Piotr PAPLICKI\*

## **OPTYMALIZACJA MASZINY TARCZOWEJ Z MAGNESAMI TRWAŁYMI Z WYKORZYSTANIEM METOD POLOWYCH**

W artykule przedstawiono wybrane aspekty modelowania, symulacji oraz optymalizacji maszyn elektrycznych wzbudzanych od magnesów trwałych. Na przykładzie bezrdzeniowej maszyny tarczowej przedstawiono sposób tworzenia modelu polowego w programie Flux 3D oraz sprzęgnięcia modelu z programem GOT-It, CEDRAT New Optimization Tool. Przedstawiono wyniki optymalizacji jednokryterialnej z wykorzystaniem algorytmu adaptacyjnego. Analizie poddano wpływ parametrów geometrycznych na moment elektromagnetyczny maszyny. Przedstawiono model polowy maszyny tarczowej o optymalnych parametrach geometrycznych.

### **1. WSTĘP**

Nowoczesne techniki projektowania maszyn elektrycznych powszechnie wykorzystują dwu i trójwymiarowe metody polowe. Dzięki nim, często przy użyciu specjalistycznych, komercyjnych programów komputerowych, możliwa jest szczegółowa analiza procesów elektromagnetycznych występujących w analizowanych urządzeniach. Współczesne programy oferują szerokie możliwości symulacyjne i stają się często podstawowym narzędziem pracy naukowców, studentów i projektantów maszyn elektrycznych oraz specjalistów zajmujących się analizą, projektowaniem bądź optymalizacją komponentów, całych rząduń czy systemów napędowych. Dzięki nim udaje się poprawnie tworzyć i analizować modele maszyn dowolnej konstrukcji.

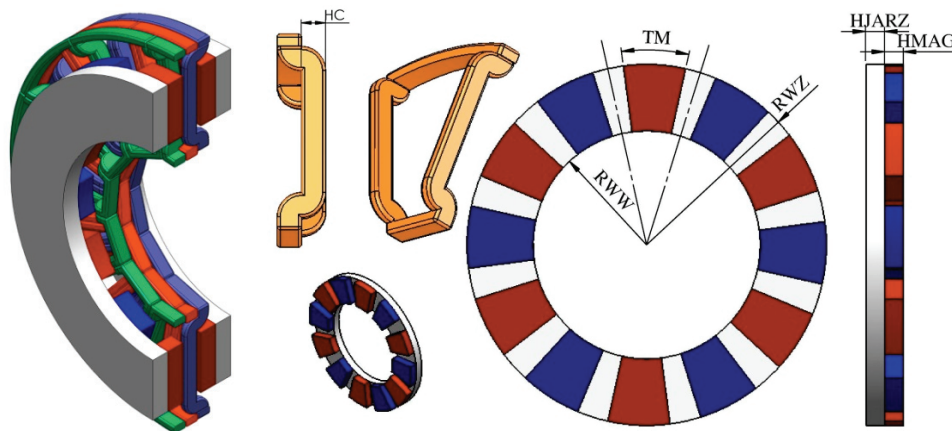
Na etapie projektowania obwodów magnetycznego i elektrycznego maszyn elektrycznych poszukuje się ich optymalnych geometrii, które pozwolą uzyskać, na przykład możliwie najwyższy współczynnik wyzyskania maszyny. Proces ten bywa często żmudny, wymagający tworzenia dużej ilości modeli, często od podstaw. Jednym

---

\* Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin.

ze sposobów na podniesienie efektywności pracy i skrócenie czasu na wykonanie zadania jest wykorzystanie parametrycznych modeli geometrycznych, które wymagają użycia więzów, opisujących związki funkcyjne między modelem i jego cechami.

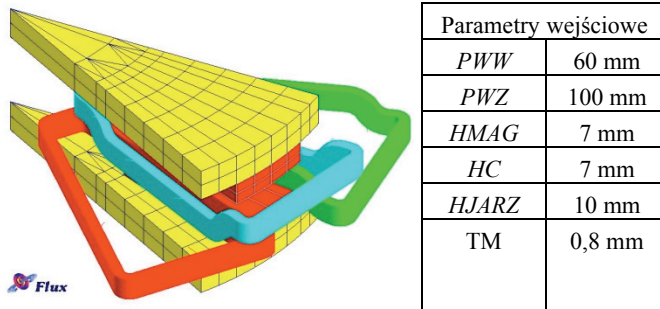
Na przykładzie 12 biegunowej, 3 fazowej, bezrdzeniowej maszyny tarczowej wzbudzonej magnesami trwałymi typu NdFeB na zewnętrznych tarczach wirnika, pokazanej na rys. 1, przedstawiono proces budowy modelu symulacyjnego w programie Flux3D, a następnie wybrane wyniki optymalizacji konstrukcji maszyny uzyskane w programie GOT-it, CEDRAT New Optimization Tool, ver. 1.0.1.



Rys. 1. Maszyna tarczowa z wirnikami zewnętrznymi  
Fig. 1. The outer rotor disc-type electrical machine

## 2. BUDOWA MODELU MASZYNY

Model połowy maszyny tarczowej powinien być opracowany w sposób umożliwiający szybkie formowanie komponentów modelu maszyny poprzez zmianę wartości dowolnego parametru geometrycznego z grupy:  $HJARZ$  (wymiar jarzma wirników w kierunku osiowym),  $HMAG$  (wymiar magnesów w kierunku osiowym),  $PWW$  (promień wirnika – wewnętrzny),  $PWZ$  (promień wirnika – zewnętrzny) oraz  $TM$  (względna szerokość kątowa magnesu), które są w związkach funkcyjnych z punktami tworzącymi geometrię wirnika oraz wyznaczającymi ścieżki dla uzwojeń stojana maszyny. Proces parametryzowania modelu maszyny tarczowej analizowanego typu szczegółowo przedstawiono w publikacjach [1, 2]. Widok przygotowanego modelu, w którym modelowano wycinek 1/12 maszyny (jeden biegun), opracowanego w programie Flux 3D ver.10.4.1, pokazano na rys. 2, wraz z siatką dyskretyzacyjną zawierającą 5911 węzłów.



Rys. 2. Model Flux3D – maszyna tarczowa  
Fig. 2. Model Flux3D – the disc-type electrical machine

### 3. OPTYMALIZACJA MASZYNY

Celem jest znalezienie optymalnej geometrii obwodu wirnika i stojana, przy której, w maszynie wytworzony zostanie statyczny moment elektromagnetyczny  $M_{el} = 12$  Nm, przy zatrzymanym wirniku i zasilaniu dwóch faz prądem stałym o wektorach zgodnych.

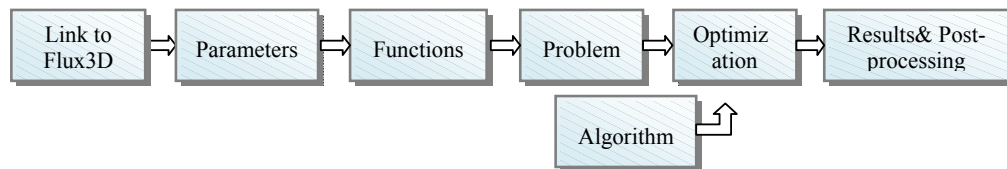
Przyjęto następujące założenia:  $RWZ = 100$  mm;  $RWW = (50-80)$  mm;  $HMAG = (5-10)$  mm;  $HC = (5-10)$  mm;  $HJARZ = (5-10)$  mm;  $TM = (0,75-0,95) \cdot \alpha_p$ , gdzie  $\alpha_p$  – podziałka biegunowa; szerokość cewki  $WC = (2 \cdot \pi \cdot PWW \cdot 0,75) / (NB \cdot 6)$ , gdzie  $NB$  – liczba biegunów. Założono również, że gęstość prądu w cewce  $j = 5$  A/mm<sup>2</sup> jest wartością stałą, stąd prąd płynący w uzwojeniach zależy od przekroju poprzecznego cewki czyli iloczynu  $HC$  i  $WC$ , ilości zwojów szeregowych  $N_s$  oraz współczynnika wypełnienia miedzią  $k_{cu}$ . Dla uproszczenia przyjęto  $N_s = 1$ ,  $k_{cu} = 1$ .

Przy tak przyjętych założeniach i poprawnie opracowanym połowym modelem maszyny tarczowej dokonano: sprzęgnięcia; parametryzacji; opisu funkcji; problemu i algorytmu optymalizacji; obliczeń oraz przedstawienia wyników badań, modelu Flux3D z programem do optymalizacji GOT-It, CEDRAT New Optimization Tool, zgodnie z procedurą pokazaną na rys. 3 [3, 4].

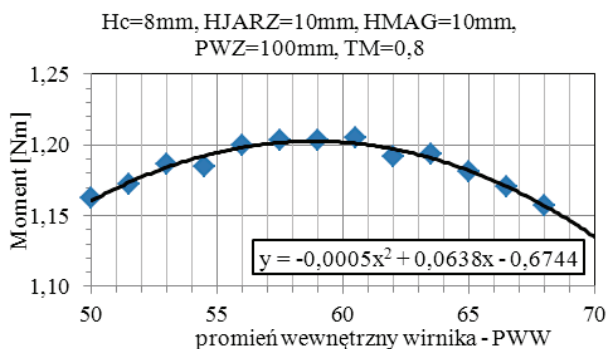
Tego typu sprzęgnięcie oraz odpowiednie ustawienia w programie GOT-It, pozwoliło sprawniej i szybciej, w porównaniu z tradycyjnym sposobem symulowania, przeprowadzić wstępną analizę wpływu parametrów  $HC$ ,  $TM$ ,  $HMAG$ ,  $PWW$  na moment elektromagnetyczny maszyny, której wyniki pokazano na rysunkach 4–6. Wartość momentu była wyznaczana dla jednego bieguna, co w tym przypadku stanowi 1/12 całkowitego momentu maszyny.

Na rysunku 4 analizowano wpływ zmiany promienia wewnętrznego wirnika  $PWW$  w granicach 50–70 mm na wartość momentu elektromagnetyczny przy stałych, zadanych, pozostałych parametrach. Maksymalny moment osiągniany jest przy  $PWW = 60$  mm

co daje, w tym przypadku stosunek, promienia wewnętrznego do zewnętrznego części czynnej wirnika równy 0,6. Do dalszej analizy przyjęto model o  $PWW = 60$  mm.

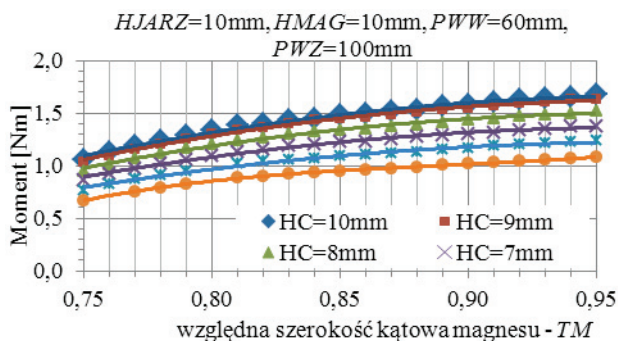


Rys. 3. Schemat kroków w procedurze optymalizacji  
Fig. 3. Diagram of steps in the procedure of optimizing



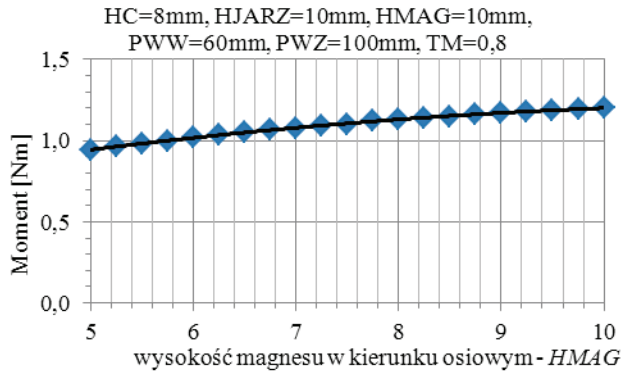
Rys. 4. Wpływ promienia wewnętrznego wirnika  $PWW$  na moment elektromagnetyczny  
Fig. 4. Influence of the internal radius of the rotor  $PWW$  on the electromagnetic torque

Na rysunku 5 przedstawiono wpływ względnej szerokości kątowej magnesu  $TM$  w granicach 0,75–0,95 (co odpowiada rozpiętości kątowej 22,5–28,5°) na moment elektromagnetyczny przy różnych wartościach parametru  $HC$ .



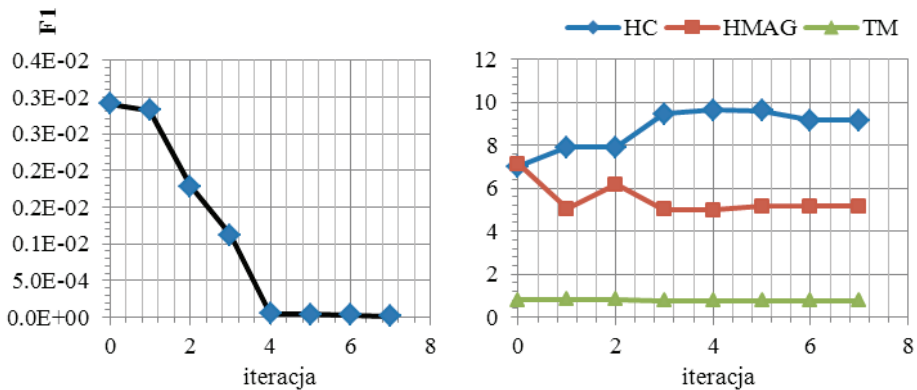
Rys. 5. Wpływ szerokości magnesu  $TM$  na moment elektromagnetyczny  
Fig. 5. Influence of PM width  $TM$  on the electromagnetic torque

Na rysunku 6 przedstawiono wpływ wysokości magnesu w kierunku osiowym maszyny *HMAG* w granicach 5–10 mm na moment elektromagnetyczny przy zadanych, stałych, pozostałych parametrach podanych na rysunku.

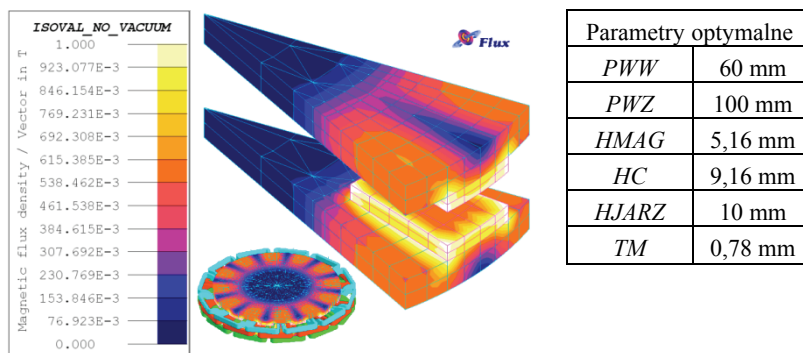


Rys. 6. Wpływ wysokości magnesu *HMAG* na moment elektromagnetyczny  
Fig. 6. Influence of PM height *TM* on the electromagnetic torque

Na rysunku 7 przedstawiono wyniki optymalizacji jednokryterialnej na modelu, w procesie iteracyjnym, z wykorzystaniem adaptacyjnego algorytmu SSO (Sequential Surrogate Optimizer) [4] przy użyciu minimalizacji funkcji celu  $F1 = \text{abs}(\text{abs}(\text{moment\_FEM} - M_{ref}))$ , gdzie: *moment\_FEM* jest wartością momentu elektromagnetycznego otrzymywaną z analizy polowej w Flux3D,  $M_{ref}$  – oczekiwana wartość momentu. Optymalizacja zakończono po siódmej iteracji. Czas jednej iteracji wynosił ok. 40 min na komputerze klasy PC (Intel Core 2\CPU 6300\1,86 GHz\3 GB RAM).



Rys. 7. Wyniki kolejnych iteracji w procesie optymalizacji modelu  
Fig. 7. Results of the subsequent iterations during optimization



Rys. 8. Model zoptymalizowany  
Fig. 8. Optimized model

Na podstawie otrzymanych wyników optymalizacyjnych wygenerowano model połowy maszyny tarczowej, który pokazano na rys. 8 wraz z siatką dyskredytacyjną, rozkładem pola magnetycznego i wartościami poszczególnych parametrów. W modelu tym udało się uzyskać moment elektromagnetyczny  $M_{el} = 11,76$  Nm.

*Praca została sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki – grant N N510 508040 (2011–2013).*

#### LITERATURA

- [1] PAPLICKI P., *Bezrdzeniowa maszyna tarczowa z magnesami trwałymi-modelowanie 3D*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 87, nr 11, 2011, s. 106–110, ISSN 0033-2097.
- [2] PAPLICKI P., *Maszyna tarczowa z magnesami trwałymi – wybrane aspekty budowy parametrycznych modeli geometrycznych 3D*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, nr 93, 2011, s. 167–171.
- [3] CEDRAT, *User Guide – Flux3D*.
- [4] GOT-It, *Actuator optimization*, Technical example, Cedrat 2011.

#### DISC-TYPE PERMANENT MAGNET MACHINE OPTIMIZATION BY USING FEM TECHNIQUE

The paper presents some aspects of modeling, simulation and optimization of the electrical machines excited by permanent magnets. For example the coreless disc-type machine a FEM model was created in Flux 3D, which was then coupled with the GOT-IT program, CEDRAT New Optimization Tool. The results of the mono-objective optimization using the adaptive algorithm were achieved. Analyzed the influence of geometrical parameters on the electromagnetic moment of the machine. The FEM optimized model of the disc-type PM machine by optimum geometrical parameters was presented.