

# Silnik tarczowy z wirnikiem wewnętrznym

Tadeusz Glinka, Tomasz Wolnik

## 1. Wprowadzenie

Do najczęściej spotykanych maszyn elektrycznych należą maszyny cylindryczne, których projektowanie i produkcja zostały w bardzo dobrym stopniu opanowane na przestrzeni wielu dziesięcioleci. Oczywiście istnieje cały szereg różnego rodzaju silników i prądnic cylindrycznych (indukcyjne, synchroniczne, prądu stałego, z magnesami trwałymi czy reluktancyjne) różniących się między sobą sposobem (źródłem) zasilania, wykonaniem poszczególnych elementów obwodu elektromagnetycznego czy też zasadą działania, jednakże każda maszyna cylindryczna jest maszyną o strumieniu promieniowym. Determinuje to w znacznym stopniu układ obwodu elektromagnetycznego oraz gabaryty maszyny. Dla wybranych zastosowań alternatywą wobec powszechnie stosowanych maszyn cylindrycznych mogą być silniki tarczowe o strumieniu osiowym, które coraz częściej można spotkać na światowym rynku. Wszędzie tam, gdzie istotną rolę odgrywa na przykład długość osiowa maszyny, silniki tarczowe mogą okazać się lepszym rozwiązaniem niż silniki cylindryczne. Mogą one znaleźć zastosowanie między innymi jako napęd wolnobieżnych pojazdów elektrycznych, statków powietrznych, takich jak parolotnia, czy np. jako napęd wind, gdzie przestrzeń pomiędzy windą a ścianą można wykorzystać do zabudowy silnika. Moment elektromagnetyczny silnika tarczowego zależy głównie od wymiarów średnicy wewnętrznej i zewnętrznej stojana i wirnika, dlatego długość osiowa silnika tarczowego w porównaniu z silnikiem cylindrycznym może być w znacznym stopniu ograniczona. Maszyny tarczowe z magnesami trwałymi cechują się wysoką sprawnością oraz wysokimi współczynnikami gęstości mocy i gęstości momentu.

W niniejszym artykule przedstawiono silnik tarczowy z magnesami trwałymi, który jako silnik modelowy został wy-

konany w ramach projektu badawczego. Przedstawiony został model obliczeniowy silnika, jak również omówiono wyniki obliczeń analitycznych oraz obliczeń MES 3D. Wyniki te porównano z wynikami badań laboratoryjnych, a następnie na ich podstawie sporządzono wnioski i uwagi do wykonanego modelu silnika.

## 2. Projekt obwodu elektromagnetycznego silnika

### 2.1. Model obliczeniowy

Przed przystąpieniem do projektowania obwodu elektromagnetycznego założono następujące dane znamionowe silnika:

- moc znamionowa:  $P_n = 10$  kW;
- prędkość obrotowa:  $n_n = 2000$  obr/min;
- moment znamionowy:  $M_n = 47,8$  Nm;
- liczba biegunów:  $2p = 8$ .

Przedstawiony w artykule modelowy silnik można nazwać silnikiem tarczowym z wirnikiem wewnętrznym. Obwód elektromagnetyczny silnika zbudowany jest z dwóch rdzeni stojana oraz umieszczonego pomiędzy nimi wirnika z magnesami trwałymi [8].

Kształt żłóbka rdzenia stojana wybrano ze względu na techniczne możliwości wykonania modelu fizycznego. W celu zmniejszenia pulsacji momentu oraz poprawy rozkładu indukcji magnetycznej w szczelinie do zamknięcia żłóbka przewidziano zastosowanie klinów magnetycznych.

Jednym z najważniejszych parametrów silnika tarczowego jest stosunek średnicy wewnętrznej rdzenia do średnicy zewnętrznej, określanej współczynnikiem  $k_D$ . Okazuje się, że maksymalną wartość momentu elektromagnetycznego otrzymuje się, gdy współczynnik ten wynosi  $k_D = 0,58$  [5].

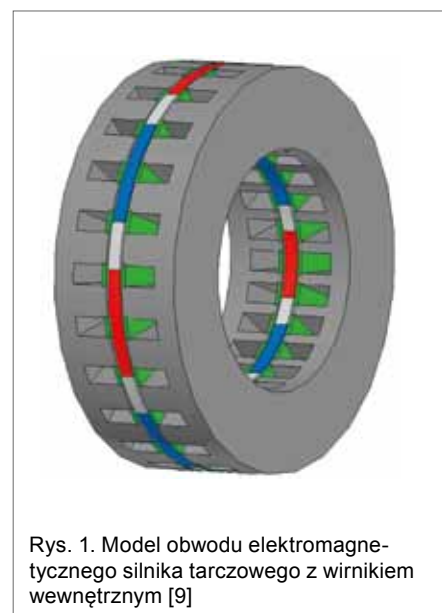
Dla omawianego modelu silnika średnica wewnętrzna rdzenia została dobrana ze względu na minimalną możliwą ilość żłobków oraz wartość indukcji w dol-

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono modelowy silnik tarczowy z wirnikiem wewnętrznym, którego konstrukcja cechuje się wysokim współczynnikiem gęstości mocy oraz gęstości momentu. Przedstawiono fizycznie wykonany model silnika, jak również omówiono obliczeniowy model obwodu elektromagnetycznego. Wyniki obliczeń analitycznych oraz wyniki trójwymiarowych obliczeń MES porównano z wynikami badań laboratoryjnych. Na podstawie uzyskanych wyników sporządzono wnioski i uwagi do wykonanego modelu silnika.

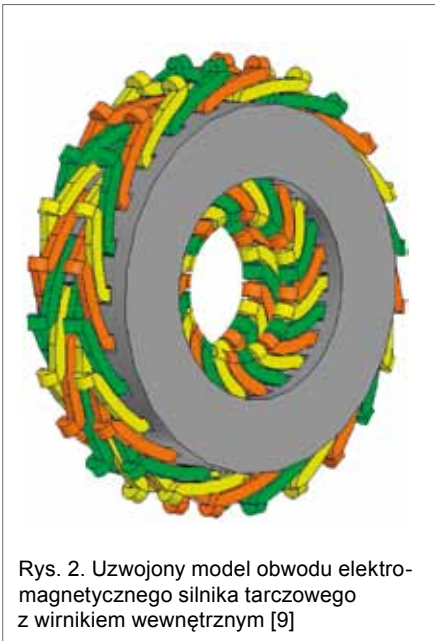
### DISK MOTOR WITH INNER ROTOR

**Abstract:** *The paper presents model disk motor with inner rotor. The design is characterised by high power and torque density coefficients. Physical model of the motor is demonstrated as well as electromagnetic circuit computation model. Results of analytical calculations and 3D FEM calculations have been compared with lab tests results. Observations have been made and conclusions drawn on the constructed model motor.*

nej części zęba dla dobranej objętości magnesu trwałego. Średnica zewnętrzna – zgodnie z wytycznymi dotyczącymi współczynnika  $k_D$  – była już wielkością wynikową. Po wykonaniu trójwymia-



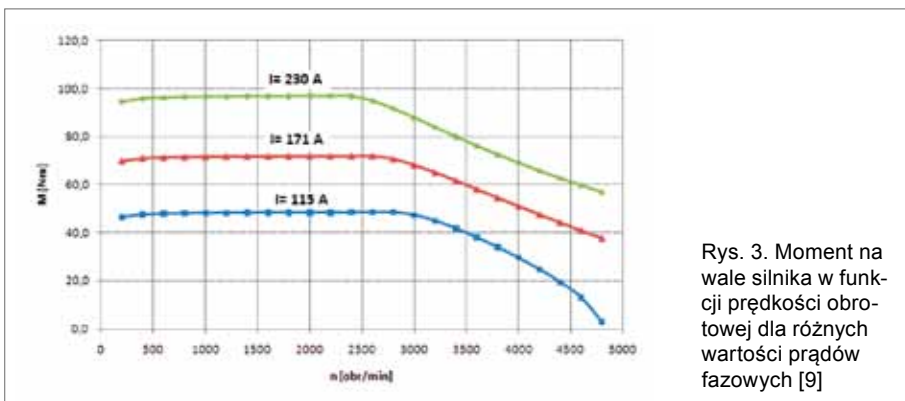
Rys. 1. Model obwodu elektromagnetycznego silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym [9]



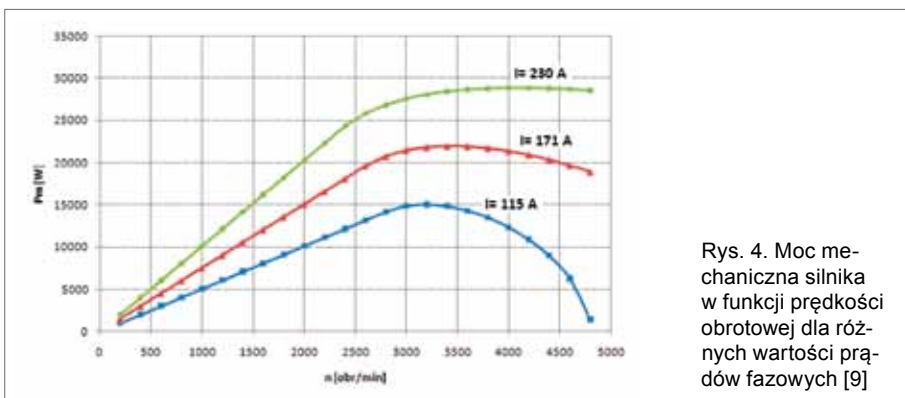
Rys. 2. Uzwojony model obwodu elektromagnetycznego silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym [9]

rowych obliczeń MES zaprojektowano również kształt magnesów trwałych tak, aby moment zaczepowy, który w silniku z otwartymi żłobkami może stanowić znaczny udział w pulsacjach momentu elektromagnetycznego, miał wartość minimalną. Uzwojenie stojana jest uzwojeniem trójfazowym i składa się z dwóch odrębnych uzwojeń umieszczonych w rdzeniach. W modelu fizycznym silnika przewidziano wyprowadzenie początków i końców faz każdego z uzwojeń, co pozwoli na przeprowadzenie badań dla różnego sposobu połączeń. Masa zaprojektowanego modelu obwodu elektromagnetycznego silnika wynosi ok. 12,8 kg.

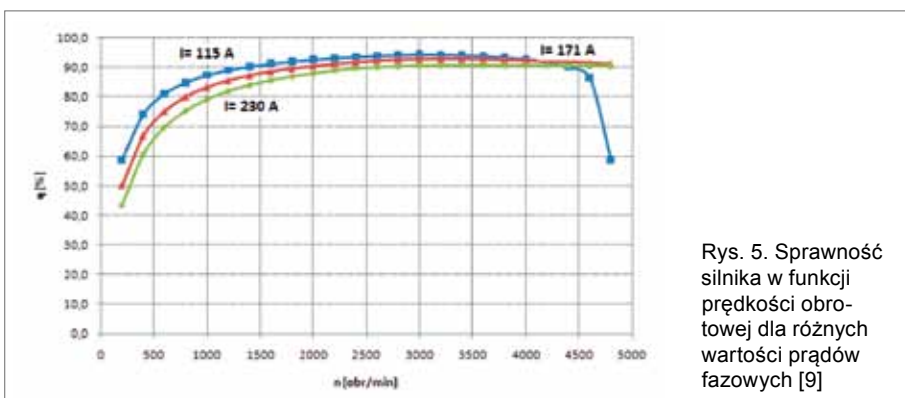
Na rys. 2 przedstawiono uzwojony komputerowy model obwodu elektromagnetycznego silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym.



Rys. 3. Moment na wale silnika w funkcji prędkości obrotowej dla różnych wartości prądów fazowych [9]



Rys. 4. Moc mechaniczna silnika w funkcji prędkości obrotowej dla różnych wartości prądów fazowych [9]



Rys. 5. Sprawność silnika w funkcji prędkości obrotowej dla różnych wartości prądów fazowych [9]

## 2.2. Obliczenia elektromagnetyczne

W celu zaprojektowania obwodu elektromagnetycznego silnika tarczowego przeprowadzono obliczenia analityczne oraz obliczenia metodą elementów skończonych MES 3D. Obliczenia analityczne wykonano przy pomocy algorytmu do obliczeń silników tarczowych z wirnikiem wewnętrznym, opracowanego w BOBRME Komel w ramach projektu badawczego. Wykonanie obliczeń analitycznych miało na celu określenie wstępnych gabarytów oraz danych nawojowych silnika. Dalsze obliczenia optymalizacyjne przeprowadzono przy pomocy programu Maxwell 3D. Wykonano między innymi obliczenia magnetostatyczne, umożliwiające dobór kształtu magnesów trwałych oraz obrazujące rozkład indukcji magnetycznych w poszczególnych elementach obwodu elektromagnetycznego, obliczenia dla pracy prądnicowej oraz obliczenia dla pracy silnikowej. Wynikami tych obliczeń są przebiegi indukowanych napięć, momentu elektromagnetycznego oraz strat mocy.

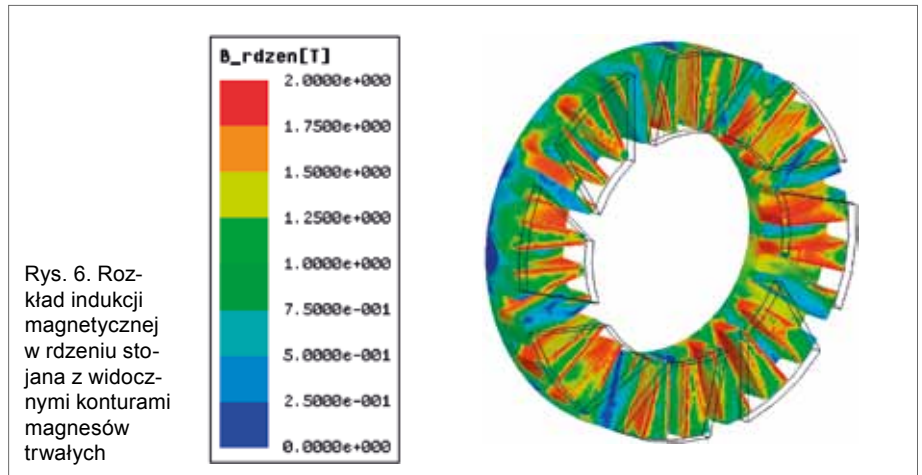
**Obliczenia analityczne:** Na rys. 3–5 przedstawiono wyniki obliczeń analitycznych dla różnych wartości prądów fazowych w zakresie prędkości obrotowej silnika od 200 do 4800 obr/min. Można zauważyć, że do pewnej prędkości obrotowej silnika moment na wale jest stały, a następnie maleje. Moment jest stały do chwili, w której napięcie zasilania silnika nie osiągnie maksymalnej wartości, narzuconej przez źródło zasilania. Aby możliwa była praca silnika w zakresie wyższych prędkości obrotowych, musi być realizowane tzw. odwzbudzenie, czyli osłabianie strumienia magnetycznego magnesów trwałych [6]. Maleje wówczas moment elektromagnetyczny silnika, jednakże silnik może pracować przy wyższych prędkościach obrotowych. Obliczenia przeprowadzono przy założeniu napięcia zasilania z baterii  $U_b = 130$  V oraz kąta wektora prądu  $\beta = 90^\circ$ .

**Obliczenia MES 3D:** Przeprowadzone obliczenia magnetostatyczne umożliwiły wyznaczenie rozkładu indukcji w poszczególnych elementach obwodu oraz zbadanie wpływu geometrii magnesów trwałych na wartość momentu zaczepowego. Na etapie projektowania maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi wartość momentu zaczepowego można ograniczyć na kilka sposobów, między innymi poprzez odpowiednio zaprojektowany kształt magnesów trwałych. Obliczona maksymalna wartość momentu

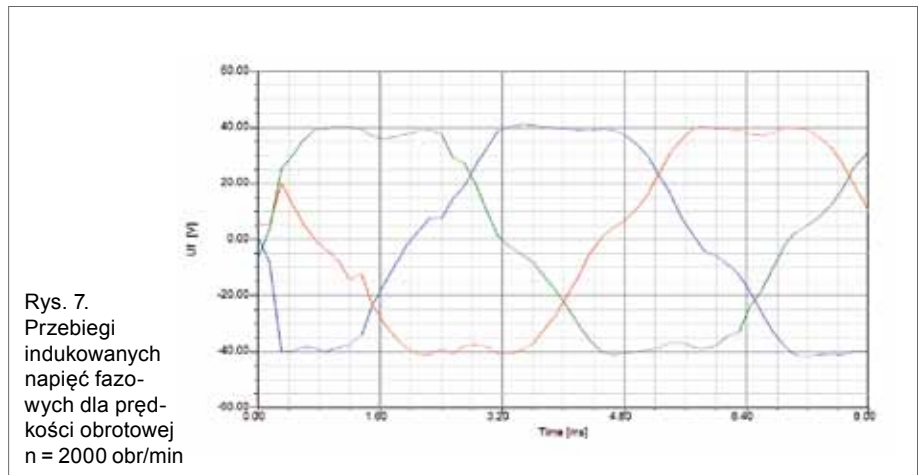
zaczepowego wynosiła 1,4 Nm, co stanowi 3% wartości momentu znamionowego. Z uwagi na szerokie otwarcie żłobka rdzenia stojana pod uwagę wzięto zamknięcie żłobka klinem wykonanym z materiału o określonej względnej przenikalności magnetycznej. W *solverze magnetostatic* zbadano więc wpływ przenikalności magnetycznej klina żłobkowego na rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej oraz wartości momentu zaczepowego i momentu elektromagnetycznego dla omawianego modelu silnika tarczowego. Obliczenia przeprowadzono dla przenikalności magnetycznych względnych klina w przedziale od 2 do 22 oraz dla klinów stalowych. Z analizy otrzymanych wyników należy wnosić, że zastosowanie klinów magnetycznych o wyższej przenikalności magnetycznej (w pewnym zakresie) nie powoduje obniżenia momentu elektromagnetycznego, ograniczając jednocześnie wartość momentu zaczepowego [9]. Na rys. 6 przedstawiono rozkład indukcji magnetycznej od magnesów trwałych w rdzeniu stojana dla nieobciążonego silnika.

Obliczenia dla pracy prądnicowej przeprowadzono w celu wyznaczenia przebiegów indukowanych napięć. Otrzymane wyniki dla prędkości obrotowej  $n = 2000$  obr/min dla zaprojektowanego modelu silnika przedstawiono na rys. 7.

Obliczenia MES 3D dla pracy silnikowej przeprowadzono w *solverze transient* programu Maxwell 3D. Po zdefiniowaniu właściwości materiałowych modelu silnika i uzwojenia zadano stałą prędkość obrotową wirnika  $n = 2000$  obr/min oraz wymuszenia prądowe. Obliczenia, podobnie jak obliczenia analityczne, przeprowadzono dla kilku wartości prądów fazowych. Wymuszenia prądowe zadano w ten sposób, że dla chwili czasowej równej 0 przepływ pola stojana w osi fazy A jest maksymalny, tzn.  $I_a = \max$ ,  $I_b = I_c = 0,5I_a$ . Następnie przed przystąpieniem do obliczeń wirnik modelu silnika ustawiono odpowiednio względem nieruchomego uzwojenia stojana zgodnie z zakładanym kątem  $\beta$ . W naszym przypadku kąt  $\beta$  powinien wynosić  $90^\circ$ , a zatem dla zadanych przebiegów prądów fazowych oś magnesów trwałych (oś d) powinna być przesunięta o  $90^\circ$  elektrycznych względem osi fazy A (oś q) uzwojenia (rys. 8). Dla zadanej stałej prędkości obrotowej wirnika oraz sinusoidalnych wymuszeń prądowych kąt pomiędzy osią przepływu stojana a wirnika jest stały.



Rys. 6. Rozkład indukcji magnetycznej w rdzeniu stojana z widocznymi konturami magnesów trwałych

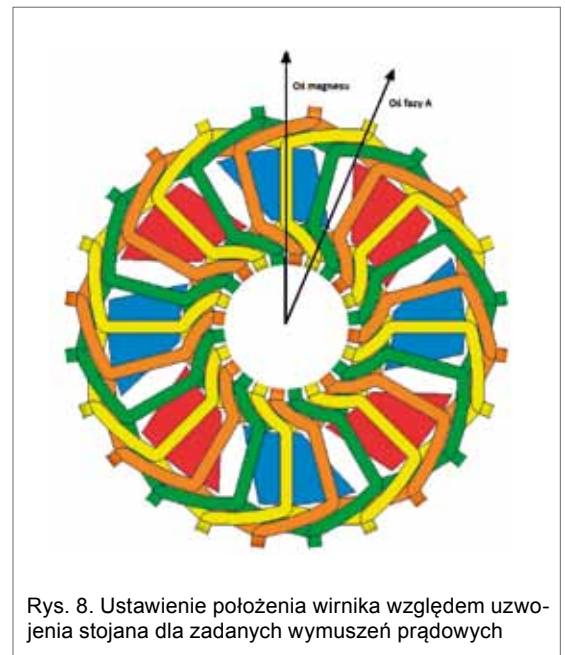


Rys. 7. Przebiegi indukowanych napięć fazowych dla prędkości obrotowej  $n = 2000$  obr/min

Wynikami obliczeń trójwymiarowych są między innymi moment elektromagnetyczny, straty w żelazie i straty w uzwojeniu. Na podstawie tych wyników obliczyć można moc silnika i sprawność dla zadanej wartości prędkości obrotowej i założonych strat mechanicznych. Ponadto dla każdej chwili czasowej można przedstawić rozkład pola magnetycznego w elementach obwodu elektromagnetycznego silnika.

### 3. Silnik modelowy

Po przeprowadzeniu szeregu obliczeń elektromagnetycznych opracowano dokumentację konstrukcyjną do wykonania fizycznego modelu silnika tarczowego z wirnikiem wewnętrznym. Silnik ten – zgodnie z opisanym modelem obliczeniowym – zbudowany jest z dwóch rdzeni stojanów, będących elementami zewnętrznymi obwodu elek-



Rys. 8. Ustawienie położenia wirnika względem uzwojenia stojana dla zadanych wymuszeń prądowych

tromagnetycznego oraz umieszczonego pomiędzy nimi wirnika. Widok modelu fizycznego silnika przedstawiony został na rys. 9 i 10.

Stojany przymocowane są do tarcz łożyskowych, a następnie przykręcone do



Rys. 9. Modelowy silnik tarczowy z wirnikiem wewnętrznym – widok z przodu



Rys. 11. Uzwojony rdzeń stojana silnika tarczowego zamocowany na tarczy łożyskowej



Rys. 10. Modelowy silnik tarczowy z wirnikiem wewnętrznym – widok z boku



Rys. 12. Wirnik przedstawionego silnika tarczowego

kadłuba. Rdzenie stojanów w celu ograniczenia strat w żelazie wykonane są jako zwijka z taśmy prądnicowej, w której wykonano żłobki. Stojan silnika tarczowego przedstawiono na rys. 11.

Wirnik z magnesami trwałymi połączony jest mechanicznie z wałem i umieszczony w środku między stojanami. „Tarcza” wirnika maszyny składa się z magnesów magnesowanych w kierunku osiowym. Przestrzeń pomiędzy magnesami różnoimiennych biegunów magnetycznych wypełniona jest materiałem niemagnetycznym, który jednocześnie tworzy sztywną strukturę wytrzymałą mechanicznie.

#### 4. Wyniki badań laboratoryjnych

W celu weryfikacji obliczeń elektromagnetycznych oraz opracowanego algorytmu do obliczeń silników tarczowych z wirnikiem wewnętrznym przeprowadzono badania laboratoryjne wykonane go modelu silnika tarczowego.

Badania przeprowadzono zarówno dla pracy prądnicowej, jak i pracy silnikowej. W przypadku pracy prądnicowej zarejestrowano przebiegi indukowanych napięć

fazowych oraz międzyfazowych maszyny. Wyniki przedstawiające przebieg indukowanego napięcia fazowego dla prędkości obrotowej 2000 obr/min przedstawiono na rys. 14.

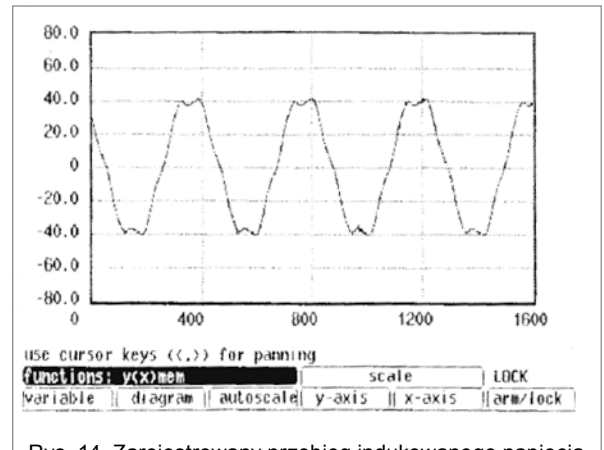
Badania dla pracy silnikowej modelu silnika tarczowego przeprowadzono przy sterowaniu maszyny z przemiennika częstotliwości zasilanego ze źródła napięcia stałego. Utrzymując stałą prędkość obrotową silnika, obciążano go coraz większą wartością momentu, rejestrując jednocześnie kolejne punkty pomiarowe. Wyniki badań dla pracy silnikowej, jak również wyniki obliczeń analitycznych oraz obliczeń metodą elementów skończonych dla obciążenia znamionowego, przedstawiono w tabeli 1. Ponadto w tabeli zamieszczono zmierzoną oraz obliczoną maksymalną wartość momentu zaczepowego.

#### 5. Podsumowanie

Modelowy silnik tarczowy z wirnikiem wewnętrznym został zaprojektowany, a następnie wykonany w ramach projektu badawczego mającego na celu zbadanie różnego rodzaju obwodów elek-



Rys. 13. Silnik tarczowy z wirnikiem wewnętrznym na stanowisku badawczym



Rys. 14. Zarejestrowany przebieg indukowanego napięcia fazowego dla biegu jałowego pracy prądnicowej przy prędkości obrotowej 2000 obr/min

tromagnetycznych silników tarczowych. Analizując otrzymane wyniki badań laboratoryjnych omawianego silnika, można stwierdzić, że są one zbliżone z wynikami zarówno obliczeń analitycznych, jak również obliczeń MES 3D. Świadczy to o poprawności algorytmu do obliczeń analitycznych oraz trójwymiarowych modeli obliczeniowych opracowanego w ramach projektu. Wartości obliczonego i zmierzonego maksymalnego momentu zaczepowego są zgodne, a więc kształt magnesu trwałego został zaprojektowany poprawnie. Patrząc na wyniki zamieszczone w tabeli 1, można zauważyć różnicę pomiędzy wartościami obliczonymi a zmierzonymi jedynie dla napięcia zasilania silnika. Wynika to z faktu, że obliczenia przeprowadzone były dla podstawowej harmonicznej napięcia zasilania, natomiast model fizyczny silnika zasilany jest z przemiennika częstotliwości generującego cały szereg wyższych harmonicznych, czego wynikiem jest wyższa wartość skuteczna napięcia zasilania silnika. Zmierzona wartość podstawowej harmonicznej napięcia zasilania była na tym samym poziomie co wartość obliczona.

Powodem nieco mniejszej, niż wynika to z obliczeń, sprawności silnika są wyższe w stosunku do obliczonych straty w żelazie oraz straty mechaniczne.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009–2011 jako projekt badawczy N N510 224737.

## Literatura

[1] GLINKA T., KRÓL E., BIAŁAS A., WOLNIK T.: *Silniki tarczowe z magnesami trwałymi*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” nr 87/2010.

Tabela 1. Porównanie wyników obliczeń z wynikami badań laboratoryjnych dla znamionowego punktu pracy silnika

Parametr	Obliczenia analityczne	Obliczenia MES 3D	Badania laboratoryjne
Moment mechaniczny [Nm]	48,3	50,3	50,8
Prąd fazowy [A]	115	115	124
Prędkość obrotowa [obr/min]	2000	2000	2004
Moc mechaniczna [W]	10114	10537	10659
Sprawność [%]	92,6	92,6	88,7
Napięcie zasilania [V]	57,4	58,4	80,3
Napięcie fazowe b. jałowego – praca prądnicowa [V]	32,3	29,6	30,5
Maksymalny moment zaczepowy [Nm]	–	1,4	1,6

[2] GLINKA T., KRÓL E., WOLNIK T.: *Model polowy bezrdzeniowej maszyny tarczowej*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” nr 86/2010.

[3] GIERAS J., WANG R., KAMPER M.: *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London 2004.

[4] ŁUKANISZYN M., WRÓBEL R., JAGIEŁA M.: *Komputerowe modelowanie bezszczotkowych silników tarczowych wzbudzanych magnesami trwałymi*. „Studia i monografie”, Politechnika Opolska, Opole 2002.

[5] PARVIAINEN A.: *Design of Axial-Flux Permanent Magnet low-speed machines and performance comparison between radial flux and axial – flux machines*. Lappeenranta teknillinen yliopisto, Digipaino 2005.

[6] ROSSA R., KRÓL E.: *Dwustrefowa regulacja prędkości obrotowej w nowoczesnych napędach elektrycznych opartych na silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” nr 81/2009.

[7] WOLNIK T.: *Modelowanie polowe silnika bezszczotkowego tarczowego do napędu pojazdów samochodowych*. Praca dyplomowa magisterska, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Zakład Maszyn i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie, Gliwice 2009.

[8] GLINKA T., KRÓL E., BIAŁAS A., WOLNIK T.: *Silniki tarczowe z magnesami trwałymi jako napęd pojazdów wolnobieżnych*. „Przegląd Elektrotechniczny” nr 3/2011.

[9] GLINKA T., KRÓL E., WOLNIK T.: *Silnik tarczowy z wirnikiem wewnętrznym – obliczenia obwodu elektromagnetycznego*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne”, nr 92/2011.

prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka,  
mgr inż. Tomasz Wolnik – Branżowy  
Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn  
Elektrycznych KOMEL, Katowice;  
e-mail: tadeusz.glinka@polsl.pl;  
t.wolnik@komel.katowice.pl