

Łukasz Cyganik, Emil Król
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice
Jerzy Baranowski, Tomasz Drabek, Tomasz Dziwiński, Paweł Piątek
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

KONCEPCJA BEZSZCZOTKOWEGO SILNIKA DO ZAKRĘTARKI ELEKTROMECHANICZNEJ

THE CONCEPT OF A BRUSHLESS ELECTRIC MOTOR FOR APPLICATION IN ELECTRIC TORQUE TOOL

Streszczenie: W artykule przedstawiono efekt prac koncepcyjno - projektowych nad silnikiem bezszczotkowym do zastosowania w zakrętarcie elektromechanicznej. Projekt realizowany wspólnie przez konsorcjum w którego skład wchodzi: Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL w Katowicach, Akademia Górniczo - Hutnicza w Krakowie oraz Zakład Budowy Maszyn OSSA w Tychach, ma na celu opracowanie silnika bezszczotkowego do zakrętarki elektromechanicznej, który umożliwi zastosowanie zakrętarki w środowiskach o wysokim zapyleniu oraz wilgotności, w których zastosowanie standardowej zakrętarki wyposażonej w silnik z komutatorem mechanicznym jest niemożliwe ze względów bezpieczeństwa. W wyniku prac koncepcyjnych opracowano silnik BLDC z magnesami trwałymi oraz silnik reluktancyjny SRM. Wg założeń projektowych silniki miały charakteryzować się momentem znamionowym o wartości 1 Nm, znamionową prędkością obrotową wynoszącą 10 000 obr./min oraz wymiarami stojana o wartościach: $\varnothing 70$ mm średnica zewnętrzna, 50mm długości. W ramach prac projektowych przeprowadzono obliczenia numeryczne silników oraz zaprojektowano konstrukcję silników w systemie CAD.

Abstract: This paper presents the conceptual - design works on the brushless electric motor for application in electric torque tool. The project is carried out jointly by a consortium that includes: Institute of the Electrical Drives and Machines KOMEL in Katowice, AGH University of Science and Technology in Krakow and OSSA Machinery Works Company in Tychy. The aim of the project is to develop a brushless electric motor for electric torque tool, which will allow for the application of electric torque tool in high humidity and dusty environments, where use of standard electric torque tool equipped with a commutator motor is impossible for security reasons. As a result of conceptual work it was decided to develop a BrushLess Direct-Current motor (BLDC) with permanent magnets and Switched Reluctance Motor – SRM. According to the design assumptions, the electric motors should be characterized by a rated torque value of 1 Nm, rated speed of 10 000 rpm, and the following dimensions of the stator: $\varnothing 70$ mm of outer diameter and 50 mm length. The design works included the numerical calculations of electric motors and designing in the CAD system.

Słowa kluczowe: silnik bezszczotkowy, zakrętarka elektromechaniczna, silnik BLDC, silnik reluktancyjny przelaczalny

Keywords: brushless motor, electric torque tool, BLDC motor, switched reluctance motor

1. Wstęp

Nowoczesne silniki bezszczotkowe z magnesami trwałymi charakteryzują się szeregiem zalet, które powodują, że coraz częściej wypierają one silniki prądu stałego z komutatorem mechanicznym. Do zalet tych zalicza się [1]:

- brak iskrzenia oraz duża niezawodność pracy w porównaniu do silników prądu stałego (spowodowana brakiem szczotek elektrycznych),
- wysoka sprawność w całym zakresie prędkości obrotowej,
- duża przeciążalność momentem,
- szeroki zakres prędkości obrotowej,

- mniejszy poziom zakłóceń elektromagnetycznych w porównaniu do silników prądu stałego. Zastosowanie bezszczotkowego silnika do napędu zakrętarki elektromechanicznej prowadzi do zwiększenia bezpieczeństwa oraz możliwości użytkowych zakrętarek, a co za tym idzie pozwala na ich zastosowanie w warunkach, w których do tej pory było to niemożliwe. Eliminacja węzła szczotkowego z napędu zakrętarki, umożliwi jej zastosowanie w warunkach wysokiego zapylenia oraz wilgotności, panujących w wielu gałęziach przemysłu (np. cementowniach, zakładach petrochemicznych,

kopalniach itp.). Dodatkowymi korzyściami płynącymi z zastosowania napędu bezszczotkowego jest wydłużenie czasu bezawaryjnej pracy silnika oraz redukcja poziomu zakłóceń elektromagnetycznych spowodowanych iskrzeniem szczotek. Dzięki temu, możliwe będzie wydłużenie okresów pracy i skrócenie czasów przeglądów.

Prace mające na celu opracowanie konstrukcji zakrętkarki elektromechanicznej napędzanej nieiskrzącym silnikiem bezszczotkowym są prowadzone w ramach projektu "Bezczotkowa wysokomomentowa zakrętkarka elektromechaniczna" przez konsorcjum: AGH w Krakowie, Instytutu Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL w Katowicach oraz Zakładu Budowy Maszyn OSSA w Tychach [2], [3].

2. Koncepcja silnika BLDC z magnesami trwałymi

Do napędu wysokomomentowej zakrętkarki elektromechanicznej (Rys.1.) zdecydowano się zaprojektować silnik BLDC z magnesami trwałymi. Podstawowe parametry napędu:

- śr. zewnętrzna stojana: 70 mm,
- dł. pakietu stojana: 50 mm,
- moment znamionowy: 1,4 Nm,
- znam. prędkość obrotowa: 9500 obr/min.

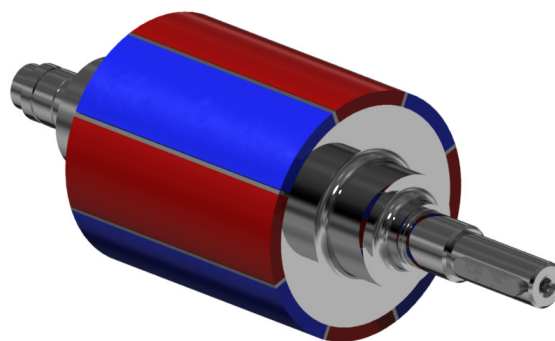
Silnik BLDC został wybrany ze względu na relatywnie proste sterowanie oraz możliwość uzyskania dużych prędkości obrotowych dla silników wielobiegunowych.



Rys. 1. Wysokomomentowa zakrętkarka elektromechaniczna

Silniki BLDC stosowane są w napędach urządzeń oraz pojazdów, gdzie prędkość obrotowa jest regulowana do prędkości bazowej, jest to zakres pracy przy stałym momencie obciążenia. W silnikach BLDC do pomiaru kąta pomiędzy wektorem strumienia wzbudzenia a uzwojeniem stojana najczęściej stosuje się hallotrony umieszczone w żłobkach stojana (ze względu na

cenę). Dla tego typu silników stosuje się również enkodery z wyjściem UVW jednak są one droższe od hallotronów. Na korzyść enkoderów przemawia fakt, że są one proste w montażu i konfiguracji oraz są odporne na zakłócenia powodujące nieprawidłowe działania hallotronów umieszczonych w żłobkach stojana pochodzące od prądu płynącego w uzwojeniu. Ponadto w wielu przypadkach nie można zamontować hallotronów w żłobku stojana, taki przypadek występuje dla silników, w których liczba żłobków na biegu i fazę jest parzysta. Optymalne sterowanie pracą silnika bezszczotkowego BLDC, wymaga prostokątnego (trapezowego) kształtu napięcia zasilającego. Algorytm sterowania silnika BLDC nie wymaga ciągłego pomiaru położenia wirnika względem stojana. W celu prawidłowej pracy silnika należy utrzymywać optymalne wartości przesunięcia kąтового strumienia wzbudzenia i siły elektromotorycznej stojana. Uzyskuje się to poprzez odpowiednie sterowanie przekształtnikiem energoelektronicznym (falownikiem). W silnikach BLDC rozkład pola magnetycznego narzuca optymalną budowę wirnika, taką aby uzyskać przebieg indukcji zbliżony do prostokątnego (w praktyce uzyskuje się przebieg trapezowy). Wirnik silnika BLDC ma całkowicie wypełnioną podziałkę biegunową magnesami trwałymi. Wirnik taki przedstawiono na rysunku poniżej.

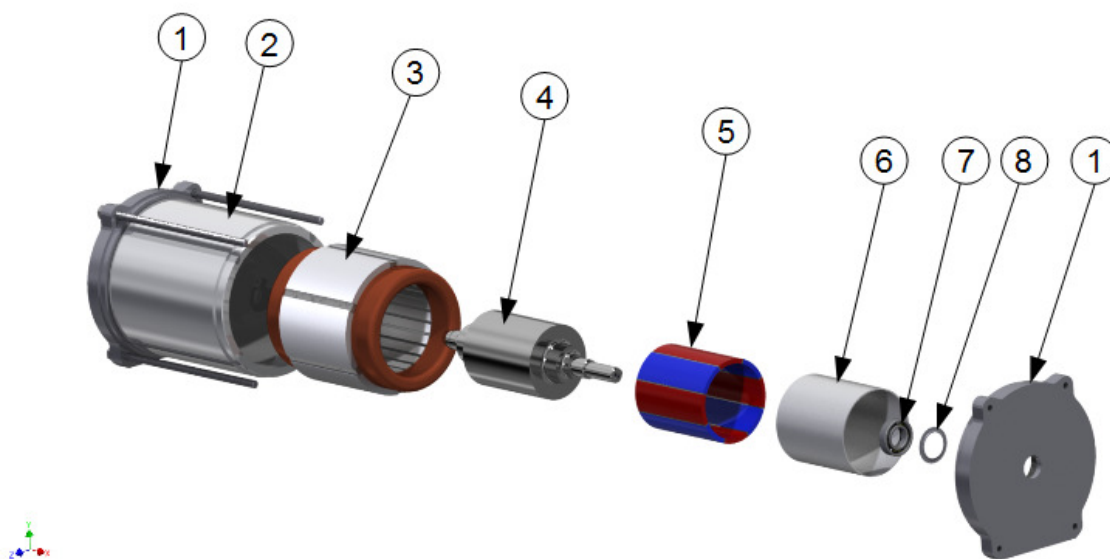


Rys. 2. Wirnik silnika BLDC do zakrętkarki elektromechanicznej

W konstrukcji silnika zastosowano wirnik z magnesami trwałymi rozmieszczonymi na powierzchni wałka (Rys. 2) oraz stojan w dwóch wersjach: ze skosem oraz bez skosu. Wirnik składa się z wału ze stali magnetycznej, na którego powierzchni rozmieszczono równomiernie 8 magnesów trwałych. Pomiędzy magnesami umieszczono przekładki z elastycznej taśmy dla osiągnięcia symetrycznego rozłożenia magne-

sów. Magnesy po naklejeniu na powierzchnię wału, owijane są taśmą dla zabezpieczenia magnesów przed oderwaniem w skutek działania siły odśrodkowej. Po przeciwległej stronie czopa wirnika wklejono w wałek aktuator RMH współpracujący z 8-biegunowym enkoderem RMC22UD12BAA10 umieszczonym na tarczy łożyskowej. W stojanie silnika o długości 50mm rozmieszczono 24 żłobki w dwóch wersjach: z żłobkami prostymi (bez skosu) oraz ze skosem żłobków o jedną podziałkę żłobkową. Szczelina powietrzna pomiędzy średnicą wewnętrzną stojana, a magnesami wirnika wynosi

Obliczenia projektowe wykonano, jako analityczne, w ramach realizacji pracy [4], w oparciu o pozycje [5]-[10]. Uzyskane z obliczeń wymiary obwodu magnetycznego maszyny posłużyły do stworzenia jej modelu numerycznego MES 2D, który był wykorzystywany do weryfikacji wyników projektowych obliczeń analitycznych i także jako punkt wyjściowy do dalszych modyfikacji konstrukcji. Model MES zaprojektowanego silnika przedstawia rysunek 4. Model MES 2D był źródłowo utworzony w środowisku pakietu *FEMM* (ver. 4.2). Posiada on 55000 węzłów, a jego elementy skończone



Rys. 3. Widok silnika BLDC w obudowie testowej na potrzeby badań. 1- tarcze łożyskowe obudowy, 2 - korpus silnika, 3- stojan uzwojony, 4- wał silnika, 5- magnesy trwałe, 6-taśma z tkaniny szklanej, 7- łożysko, 8- podkładka falista

1,2mm. Stojan wprasowano w kadłub, wykonany z rury aluminiowej EN AW 6063 T6 o średnicy $\varnothing 80$ mm. Całość zamknięto stalowymi tarczami łożyskowymi za pomocą szpilek gwintowanych M4 (Rys.3). Tego typu obudowa została zaprojektowana wspólnie ze stanowiskiem na potrzeby badań obydwu silników: SRM i BLDC.

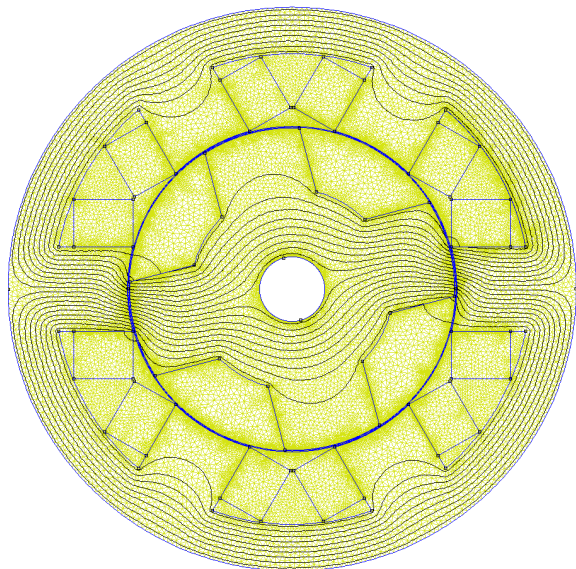
3. Koncepcja silnika reluktancyjnego SRM

Trójfazowy, przełączalny silnik reluktancyjny o 6 zębach na stojanie i 4 zębach wirnika (SRM 6/4) powstał wg tych samych założeń projektowych, jak silniki z magnesami trwałymi:

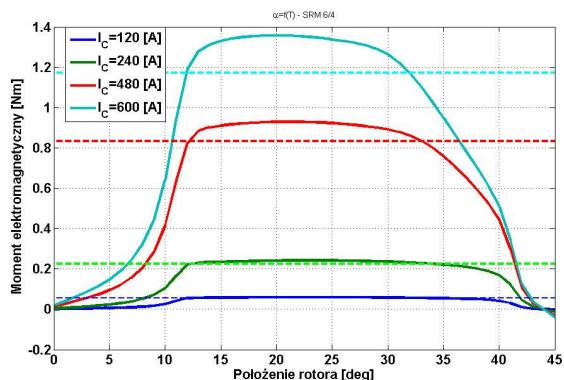
- śr. zewnętrzna stojana: 70 mm,
- dł. pakietu stojana: 50 mm,
- moment znamionowy: 1 Nm,
- znam. prędkość obrotowa: 10000 obr/min.

są trójkątne i liniowe. Używany był do obliczeń statycznych, przede wszystkim momentu elektromagnetycznego silnika powstającego przy zasileniu jednej fazy różnymi prądami, dla położenia wirnika zmienianych w zakresie 45° , tj. w zakresie $\frac{1}{2}$ podziałki zębowej wirnika. Uzyskane przebiegi kątowe momentu elektromagnetycznego przedstawia rysunek 5, dla różnych wartości amperozwojów cewki stojana. Wykonane obliczenia miały na celu wyznaczenie wartości amperozwojów cewki, powyżej której dalsze zwiększanie ich wartości skutkuje wzrostem momentu elektromagnetycznego wolniejszym niż liniowy, skutkiem rosnącego nasycenia obwodu magnetycznego maszyny. Na podstawie takiej analizy przyjęto, że wartość amperozwojów $I_c=600$ A może być uznana za znamionową, przy liczbie zwojów wynikającej z wymaganego napięcia zasilania silnika ($320 V_{DC}$). Uzwojenie stojana zaprojektowano,

jako 6 cewek skupionych, umieszczonych na 6 zębach stojana, połączonych w 3 fazy naprzeciwległe. Każda cewka posiada 75 zwojów, a wartość skuteczna znamionowego prądu fazowego wynosi 4.6A (wartość szczytowa wynosi 8A).



Rys. 4. Model MES 2D zaprojektowanego silnika SRM 6/4, wraz z elementami skończonymi i wynikowymi liniami pola magnetycznego w sytuacji zasilania jednej fazy prądem znamionowym



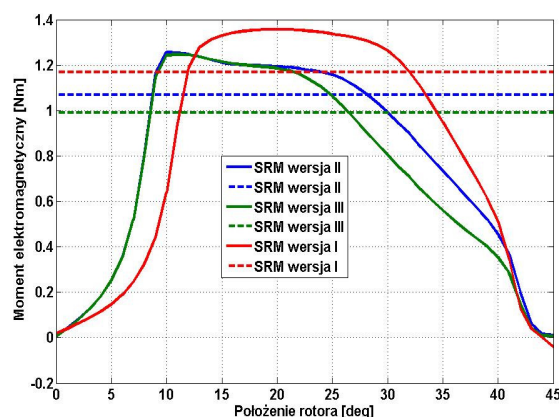
Rys. 5. Obliczeniowy rozkład kątowy momentu elektromagnetycznego zaprojektowanego silnika SRM, dla różnych amperozwojów I_c cewki stojana linią przerywaną zaznaczono wartości średnie momentów za 30° kąta obrotu rotora, tj. za kąt zasilania fazy silnika SRM 6/4 podczas jego normalnej pracy

Ze względów technologicznych w projekcie silnika wprowadzono pewne zmiany:

- zwiększono powierzchnię żłobków stojana, przez zmniejszenie średnicy wirnika z 40

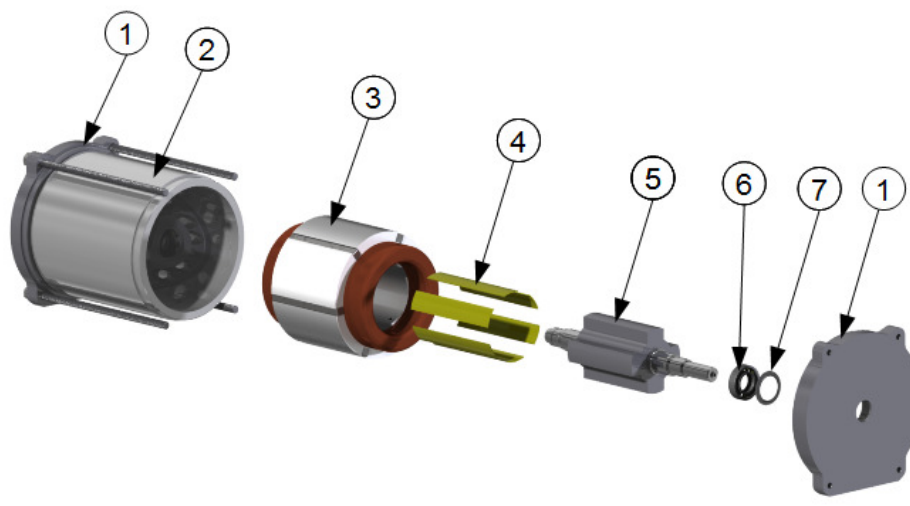
do 36 mm (w konsekwencji wydłużeniu uległy zęby stojana),

- wyoblono przejścia zęb stojana – jarzmo stojana,
- wprowadzono w zębach stojana rowki, przeznaczone do mocowania klinów żłobkowych,
- przewidziano wycięcia w jarzmie stojana, umożliwiające zespolenie blach zewnętrznymi kłami,
- powiększono średnicę wału do 12 mm,
- zamieniono blachy ferromagnetyczne typu M350-50A na M270-35A.



Rys. 6. Porównanie kątowych rozkładów momentu elektromagnetycznego różnych wersji projektowanego silnika SRM, dla $I_c = 600A$; linią przerywaną zaznaczono wartości średnie momentów za 30° kąta obrotu rotora

Do obliczeń statycznych zmodyfikowanej maszyny stworzono jej model MES 2D. Podobnie jak model maszyny wyjściowej, posłużył on przede wszystkim do wyznaczenia kąto-prądowych charakterystyk momentu elektromagnetycznego. Rysunek 6 przedstawia wyliczony rozkład momentu elektromagnetycznego zmodyfikowanej maszyny (SRM wersja II) dla wartości amperozwojów cewki $I_c = 600A$, na tle rozkładu momentu maszyny wyjściowej (SRM wersja I) i drugiej badanej maszyny zmodyfikowanej (SRM wersja III), w której dodatkowo zmniejszono grubość jarzma stojana, celem dalszego zwiększenia powierzchni żłobków. Ta modyfikacja spowodowała jednak dalszy spadek wartości rozwijanego momentu, skutkiem nadmiernego nasycania się jarzma stojana. Dlatego finalnie zrezygnowano z tej wersji silnika. Przyjęta ostatecznie do realizacji wersja II charakteryzuje się momentem średnim mniejszym od momentu średniego maszyny wyj-



Rys. 7. Widok silnika reluktancyjnego SRM - wersja II. 1 - tarcze łożyskowe, 2 - korpus silnika, 3 - stojan uzwojony, 4 - wkładki tekstolitowe, 5 - wirnik silnika, 6-łożysko, 7 - podkładka falista

ściowej o ok. 10%, proporcjonalnie do stopnia zmniejszenia średnicy wirnika.

Konstrukcję silnika reluktancyjnego SRM przedstawia rysunek 7. Stojan silnika składa się z pakietu blach M270-35A o długości 50mm, połączonych klamrami. Cewki stojana osadzone na zębach, zabezpieczono je przed osunięciem z zębów za pomocą wkładek tekstolitowych, wsuniętych we wcięcia boczne wykonane na końcach zębów stojana. Poszczególne cewki oraz żłobki odizolowano od siebie za pomocą izolacji żłobkowej. Wirnik silnika o 4 zębach składa się z wału, na którego średnicę $\varnothing 12\text{mm}$ wprasowano pakiet blach wirnika wykonany, podobnie jak pakiet stojana z blach M270-35A. Na wale, na średnicy $\varnothing 10\text{mm}$ umieszczono łożyska kulkowe jednorzędowe, zabezpieczone od strony przeciwnapędowej pierścieniami Segera, a od strony napędowej podkładką falistą. Po przeciwległej stronie czopa wirnika wklejono w wałek aktuator RMH współpracujący z 4 - biegunowym enkoderem RMC22UB12BAA10, umieszczonym na tarczy łożyskowej.

4. Podsumowanie

Opracowane koncepcje silników bezszczotkowych BLDC oraz SRM będą podlegać dalszemu rozwojowi w toku realizacji projektu. W następnych etapach powstaną modele silników, które poddane badaniom laboratoryjnym pozwolą na weryfikację poprawności założeń konstrukcyjnych oraz zgodności osiąganych parametrów pracy silników z obliczeniami numerycznymi. Wyniki badań pozwolą na wprowadzenie

na rynek zupełnie nowego produktu oraz na zastosowanie zakrętarek elektromechanicznych w branżach przemysłowych, w których do tej pory było to niemożliwe. Opracowany produkt będzie się charakteryzował m. in.:

- zwiększonym bezpieczeństwem użytkownika, poprzez brak iskrzących elementów w konstrukcji silnika,
- większą dokładnością sterowania, poprzez zmniejszenie poziomu zakłóceń elektromagnetycznych wywoływanych iskrzeniem szczotek,
- wydłużony czas bezawaryjnej pracy silników w stosunku do obecnie stosowanych silników prądu stałego.

Projekt jest współfinansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Badań Stosowanych nr PBS3/B4/13/2015.

5. Literatura

- [1]. E. Król, R. Rossa: "Silniki z magnesami trwałymi o dużej przeciążalności momentem," *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe.*, nr 81, str. 27–31, 2009.
- [2]. S. Gawron, J. Baranowski, P. Piątek, J. Ossa: "Bezczotkowa wysokomomentowa zakrętarka elektromechaniczna Brushless electric torque tool," *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 2 (106), str. 113–116, 2015.
- [3]. "Wniosek o projekt badawczo-rozwojowy pt.: 'Bezczotkowa wysokomomentowa zakrętarka elektromechaniczna - Brushless electric torque tool,' ID 247287.
- [4]. T. Wolf; „Projekt silnika reluktancyjnego do napędu elektronarzędzi”, Praca Dyplomowa magisterska, AGH, 2015.

- [5]. T. Wichert: „Design and Construction Modification of Switched Reluctance Machines”, Ph.D. Thesis, Warsaw 2008.
- [6]. R. Krishnan: „Switched Reluctance Motor Drives”, CRC Press LLC, Boca Raton, Florida 2001.
- [7]. S. Azarewicz, B. Węgliński: „Parametry wybranych blach prądnicowych przy podwyższonej częstotliwości przemagnesowania”, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 80, str. 19-22, 2008.
- [8]. P. Bogusz, M. Korkosz, J. Prokop: „Analiza właściwości silnika reluktancyjnego przełączalnego z niesymetrycznym obwodem magnetycznym”, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 83, str. 145-150, 2009.
- [9]. P. Bogusz, M. Korkosz, J. Prokop: „Wpływ danych nawojowych na właściwości eksploatacyjne silnika reluktancyjnego przełączalnego o budowie niesymetrycznej”, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 83, str. 151-156, 2009.
- [10]. M. Majchrowicz, W. Jażdżyński: „Wybrane aspekty optymalizacji silnika reluktancyjnego przełączalnego (SRM) przeznaczonego do napędu samochodu elektrycznego”, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 84, str. 147-150, 2009.