

## Materiały magnetyczne miękkie wykorzystywane w magnetowodach silników tarczowych

**Streszczenie.** W artykule omówiono wybrane rodzaje materiałów magnetycznych miękkich stosowanych do budowy tarczowych obwodów elektromagnetycznych. Opisano podstawowe własności każdego z nich oraz dokonano analizy wpływu ich zastosowania na właściwości i parametry elektromagnetyczne silników tarczowych indukcyjnych. W publikacji dla każdego z omawianych materiałów podano równania i współczynniki, pozwalające z dobrą dokładnością aproksymować najważniejsze z punktu widzenia obliczeń elektromagnetycznych charakterystyki tj. charakterystykę magnesowania oraz charakterystykę stratności.

**Abstract.** The article discusses selected types of soft magnetic materials used in the construction of disc electromagnetic circuits. The basic properties of each of them were described and was made an analysis of the impact of their use on the basic properties and electromagnetic parameters of the induction disc motors. In the publication for each of discussed materials were given an equations and coefficients, that allow with the good accuracy to approximate the most important from the electromagnetic calculations point of view characteristics i.e. the characteristic of the magnetization and the characteristic of losses. **Soft magnetic materials used in the construction of disc electromagnetic circuits**

**Słowa kluczowe:** materiały magnetyczne miękkie obwody magnetyczne, silniki tarczowe, silniki indukcyjne.

**Keywords:** soft magnetic materials, magnetic circuits, axial flux motors, induction motors.

### Wprowadzenie

W projektowaniu obwodów elektromagnetycznych nowoczesnych napędów elektrycznych dużą uwagę poświęca się zagadnieniom efektywności energetycznej. Napędami takimi z pewnością są maszyny tarczowe cechujące się ograniczoną długością osiową oraz wysokimi współczynnikami gęstości mocy i momentu. Odpowiednio zaprojektowany obwód elektromagnetyczny pozwalający uzyskać wysoki współczynnik sprawności maszyny, daje możliwość obniżenia kosztów jej eksploatacji, a tym samym przekłada się na wymierne korzyści finansowe użytkownika. W całym tym procesie jednym z głównych aspektów jest dobór odpowiednich materiałów magnetycznych. Ze względów elektromagnetycznych oczekuje się, aby stosowane materiały cechowały się:

- dużą przenikalnością magnetyczną względną,
- dużą wartością indukcji nasycenia,
- małą stratnością w szerokim zakresie częstotliwości.

Uzyskanie bardzo dobrych własności każdego z wymienionych parametrów jest trudne, a tego rodzaju materiały są bardzo kosztowne. Z tego też powodu na etapie projektowania silnika należy dobrze rozemniarować warunki jego pracy i ustalić, który z dostępnych na rynku materiałów będzie najbardziej odpowiedni z technicznego i ekonomicznego punktu widzenia.

W niniejszym artykule przedstawiono wybrane rodzaje materiałów magnetycznych miękkich (soft magnetic materials) wykorzystywanych do budowy magnetowodów maszyn tarczowych. Opisano podstawowe własności każdego z nich oraz dokonano analizy wpływu ich zastosowania na podstawowe właściwości i parametry elektromagnetyczne silnika tarczowego indukcyjnego.

Znajomość właściwości zastosowanych materiałów magnetycznych w różnych stanach pracy maszyny jest podstawą do analizy elektromagnetycznej danego obwodu. W przypadku projektowania obwodów elektromagnetycznych maszyn tarczowych, uznaje się, że obliczenia należy wykonywać korzystając z metody elementów skończonych na modelu trójwymiarowym. Obliczenia te są bardzo czasochłonne, dlatego też często wykorzystywane są metod zastępcze. Metodami takimi są najczęściej metody analityczne, dla których korzystnie jest, gdy właściwości materiałowe, będące funkcją zależną od kilku parametrów, opisane są za pomocą równań. Większość producentów materiałów magnetycznie miękkich

podaje ich charakterystyki w postaci tabelarycznej, toteż w publikacji na ich podstawie wyznaczono współczynniki aproksymacji odpowiednich równań pozwalających z dobrą dokładnością aproksymować najważniejsze z punktu widzenia obliczeń elektromagnetycznych charakterystyki tj. charakterystykę magnesowania oraz charakterystykę stratności.

### Taśma elektrotechniczna

Taśma elektrotechniczna zimnowalcowana o ziarnie nieorientowanym jest najpopularniejszym materiałem wykorzystywanym do budowy rdzeni magnetycznych [1,3]. Właściwości magnetyczne taśm nieorientowanych są w zasadzie jednakowe dla każdego kierunku przepływu strumienia magnetycznego. Podstawowym składnikiem blachy elektrotechnicznej jest żelazo (ok.93%), a jednym z głównych dodatków stopowych krzem, który zwiększa jej rezystywność. Dla blach izotropowych zawartość krzemu wynosi 0.5 - 3.25 % [3]. W zależności od składu stopowego taśmy elektrotechniczne charakteryzują się różnymi właściwościami. Zwiększenie zawartości krzemu powoduje ograniczenie stratności, nieznaczny spadek wartości indukcji nasycenia, wzrost twardości i kruchości (trudności w obróbce mechanicznej), ale jednocześnie ogranicza zjawisko magnetostrykcji [5].

W tabeli 1 zestawiono najczęściej wykorzystywane w procesie projektowania obwodów magnetycznych maszyn tarczowych właściwości wybranych gatunków taśm elektrotechnicznych.

Tabela 1. Podstawowe właściwości wybranych gatunków taśm elektrotechnicznych [6,7]

Materiał	Grubość [mm]	Gęstość [kg/dm <sup>3</sup> ]	Stratność dla 1.0T, 50Hz [W/kg]	Stratność dla 1.5T, 50Hz [W/kg]
M300-35A	0.35	7.7	1.20	3.00
M330-50A	0.50	7.7	1.35	3.30
M400-50A	0.50	7.7	1.70	4.00
M470-50A	0.50	7.7	2.00	4.70
M600-50A	0.50	7.7	2.60	6.00

Charakterystykę magnesowania materiału ferromagnetycznego można z dobrą dokładnością opisać następującą zależnością:

$$(1) \quad H(B) = (\alpha_1 \cdot B^{\beta_1} + \alpha_2 \cdot B^{\beta_2})$$

gdzie:  $H$  - natężenie pola magnetycznego [A/m],  $B$  - indukcja magnetyczna [T],  $\alpha_1, \alpha_2$  - współczynnik aproksymacji,  $\beta_1, \beta_2$  - wykładnicze współczynnik aproksymacji,

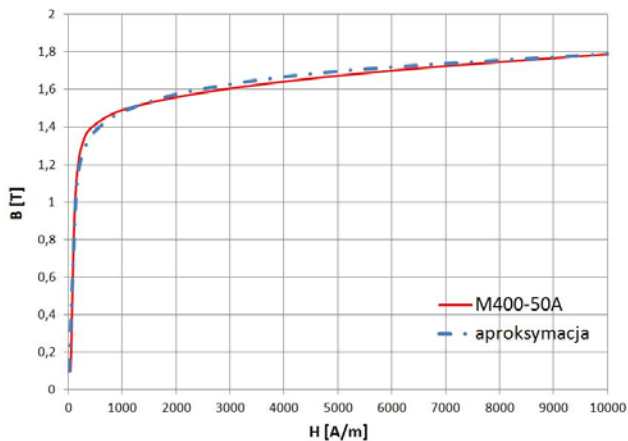
Najprostszym sposobem wyznaczenia współczynników aproksymacji równania (1) jest skorzystanie z tabelarycznej charakterystyki magnesowania podawanej przez producenta oraz empiryczny dobór poszczególnych współczynników aproksymacji, tak aby dopasować charakterystykę aproksymowaną do charakterystyki rzeczywistej.

Wartości wyznaczonych w ten sposób współczynników aproksymujących charakterystykę magnesowania wybranych taśm elektrotechnicznych zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Współczynniki aproksymacji magnesowania taśm elektrotechnicznych dla zależności (1)

Materiał	$\alpha_1$	$\beta_1$	$\alpha_2$	$\beta_2$
M300-35A	0.11	1	0.007	13
M330-50A	0.12	1	0.006	13
M400-50A	0.13	1	0.005	13
M470-50A	0.13	1	0.005	13
M600-50A	0.14	1	0.002	14

Na rysunku 1 przedstawiono porównanie charakterystyki magnesowania taśmy elektrotechnicznej typu M400-50A wyznaczonej za pomocą równania (1) z uwzględnieniem współczynników aproksymacji z tabeli 2 oraz charakterystykę wykreśloną na podstawie danych katalogowych jednego z producentów.



Rys.1. Porównanie charakterystyki magnesowania taśmy typu M400-50A wyznaczonej z danych katalogowych oraz z równania (1) uwzględniającego współczynniki aproksymacji z tabeli 2

Kolejną podstawową charakterystyką opisującą właściwości danego materiału wykorzystywaną podczas obliczeń elektromagnetycznych jest charakterystyka stratności. Najczęściej stratność wyrażana jest w W/kg dla określonych warunków pracy tj. dla określonej indukcji magnetycznej i częstotliwości zasilania. Ogólnie zależność na straty ferromagnetyczne można zapisać jako [3,8]:

$$(2) \quad \Delta P_{Fe} = P_h + P_c + P_e$$

gdzie:  $\Delta P_{Fe}$  - suma strat ferromagnetycznych,  $P_h$  - składowa strat zależnych od pętli histerezy,  $P_c$  - składowa strat zależnych od strat wirowych,  $P_e$  - składowa strat zależnych od strat nadmiarowych.

Dla danego rodzaju materiału poszczególne składowe występujące w zależności (2) są funkcją indukcji magnetycznej oraz częstotliwości przemagnesowywania. Według autorów [8,9] poszczególne składowe równania (1) można wyznaczyć korzystając z następujących zależności:

$$(3) \quad P_h = k_h \cdot B^2 \cdot f$$

$$(4) \quad P_c = k_c \cdot (B \cdot f)^2$$

$$(5) \quad P_e = k_e \cdot (B \cdot f)^{1.5}$$

gdzie:  $B$  - indukcja magnetyczna [T],  $f$  - częstotliwość zasilania [Hz],  $k_h$  - współczynnik strat ferromagnetycznych histerezowych,  $k_c$  - współczynniki strat ferromagnetycznych wirowych,  $k_e$  - współczynniki strat ferromagnetycznych nadmiarowych.

Korzystając z powyższych zależności, obliczenie strat ferromagnetycznych sprowadza się do wyznaczenia współczynników  $k_h, k_c$  oraz  $k_e$  pozwalających na aproksymację charakterystyk stratności dla różnych częstotliwości zasilania z bardzo dobrym przybliżeniem do wartości katalogowych. Podobnie jak w przypadku wyznaczenia współczynników aproksymacji równania (1), najprostszym sposobem wyznaczenia współczynników poszczególnych strat ferromagnetycznych jest dopasowanie charakterystyki aproksymowanej do charakterystyki rzeczywistej poprzez empiryczny dobór poszczególnych wartości współczynników. Do tego celu można wykorzystać różnego rodzaju arkusze kalkulacyjne posiadające szereg wbudowanych funkcji.

Wyznaczając poszczególne współczynniki strat ferromagnetycznych należy uwzględnić odpowiedni przedział częstotliwości. Wpływa to znacząco na zbieżność charakterystyk aproksymowanych z charakterystykami rzeczywistymi. Jeżeli współczynniki zostaną określone dla przedziału 50Hz - 400Hz, to obliczenie na ich podstawie, strat dla częstotliwości zasilania np. 1500 Hz może być obarczone dużym błędem obliczeniowym.

Przykładowe współczynniki pozwalające na aproksymację stratności wybranych gatunków taśm elektrotechnicznych w przedziale 50-400 Hz przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Współczynniki do wyznaczenia charakterystyki stratności według zależności (3-5) dla określonego typu taśm elektrotechnicznych dla przedziału częstotliwości 50Hz - 400Hz

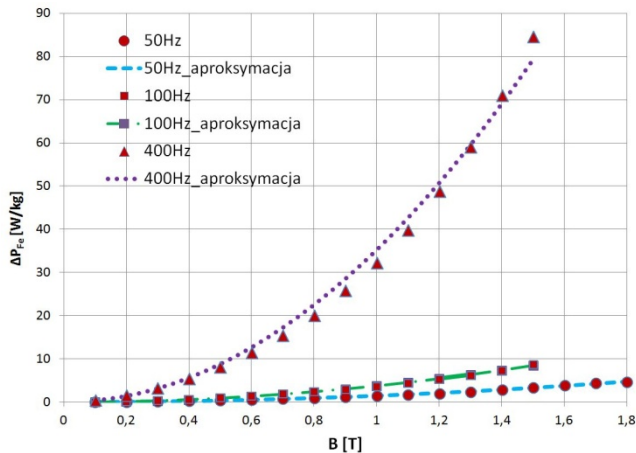
Materiał	$k_h$	$k_c$	$k_e$
M300-35A	0.0194	0.00006785	0.0000768
M330-50A	0.0206	0.000135	0
M400-50A	0.0212	0.000167	0
M470-50A	0.0257	0.000104	0.000782
M600-50A	0.0284	0.000104	0.00205

Na rysunku 2 przedstawiono porównanie charakterystyk stratności taśmy M400-50A obliczonych na podstawie zależności (3 - 5) z uwzględnieniem współczynników aproksymacji z tabeli 3 oraz wykreślonych w oparciu o dane katalogowe producenta.

### Taśma elektrotechniczna o wysokich wartościach indukcji nasycenia

Dla maszyn wobec których stawiane są wysokie wymagania, co do wartości współczynników gęstości mocy oraz gęstości momentu, do budowy rdzeni magnetycznych stojana można wykorzystać taśmy elektrotechniczne o wysokich wartościach indukcji nasycenia. Do tego rodzaju materiałów można zaliczyć na przykład materiał o nazwie Vacoflux. Materiały te charakteryzują się również

niską stratnością w szerokim zakresie częstotliwości przemagnesowywania, dlatego z powodzeniem mogą być wykorzystywane do budowy tarczowych obwodów elektromagnetycznych pracujących w warunkach zasilania wysokoczęstotliwościowego.



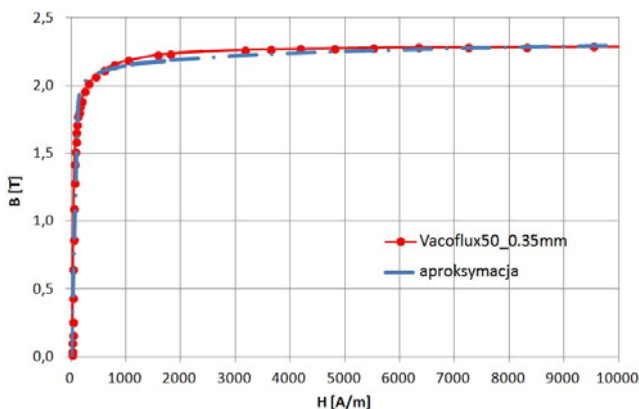
Rys.2. Porównanie charakterystyki stratności taśmy typu M400-50A wyznaczonej w oparciu o dane katalogowe oraz obliczonej na podstawie równań (3 - 5) z uwzględnieniem współczynników aproksymacji z tabeli 3

Na podstawie danych katalogowych producenta oraz korzystając z zależności (1) wyznaczono współczynniki aproksymacji charakterystyki magnesowania dla wybranych rodzajów materiałów Vacoflux. Wartości poszczególnych współczynników przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Współczynniki aproksymacji charakterystyki magnesowania materiałów typu Vacoflux dla zależności (1)

Material	$\alpha_1$	$\beta_1$	$\alpha_2$	$\beta_2$
Vacoflux48_0.1mm	0.065	1	$10^{-12}$	36
Vacoflux50_0.2mm	0.065	1	$10^{-12}$	36
Vacoflux50_0.35mm	0.065	1	$10^{-12}$	36

Na rysunku 3 przedstawiono charakterystykę magnesowania materiału Vacoflux50 o grubości 0.35mm wyznaczoną za pomocą równania (1) z uwzględnieniem współczynników aproksymacji z tabeli 4 oraz charakterystykę wyznaczoną na podstawie danych katalogowych producenta [10].



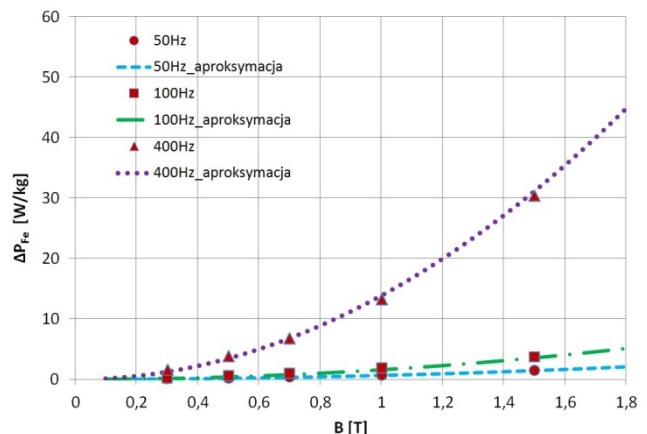
Rys.3. Porównanie charakterystyki magnesowania taśmy typu Vacoflux50 0.35mm wyznaczonej z danych katalogowych oraz z równania 1 uwzględniającego współczynniki aproksymacji z tabeli 4

Jak wspomniano wcześniej taśmy wykonane z materiału Vacoflux cechują się niską stratnością w szerokim zakresie częstotliwości przemagnesowywania. W tabeli 5 zestawiono wyznaczone empirycznie współczynniki, pozwalające na aproksymację charakterystyki stratności wybranych

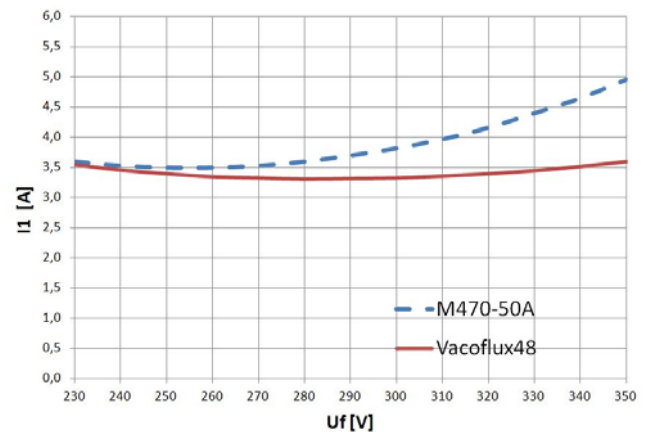
rodzajów materiałów Vacoflux zgodnie z zależnościami (3-5). Na rysunku 4 przedstawiono natomiast porównanie charakterystyk stratności materiału Vacoflux50 o grubości 0.35mm obliczonych na podstawie zależności (3-5) z uwzględnieniem współczynników aproksymacji z tabeli 5 oraz wykreślonych w oparciu o dane katalogowe producenta.

Tabela 5. Współczynniki do wyznaczania charakterystyki stratności według zależności (3-5) dla określonego typu taśmy Vacoflux dla przedziału częstotliwości 50 Hz - 400 Hz

Material	$k_n$	$k_c$	$k_e$
Vacoflux48_0.1mm	0.00531	0	0.000521
Vacoflux50_0.2mm	0.00556	0	0.000910
Vacoflux50_0.35mm	0,00948	0,00006217	0,00001541



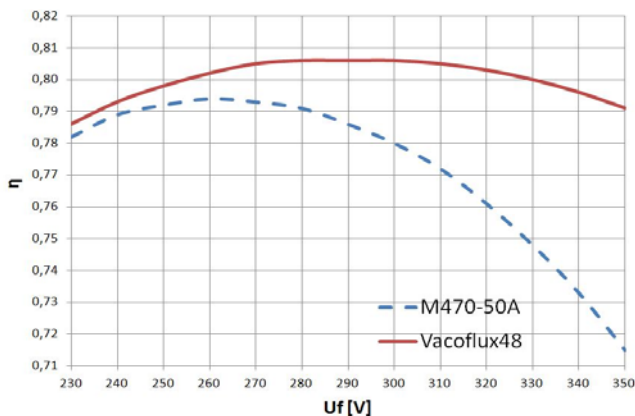
Rys.4. Porównanie charakterystyki stratności taśmy Vacoflux50\_0.35mm wyznaczonej w oparciu o dane katalogowe oraz obliczonej na podstawie równań (3-5) z uwzględnieniem współczynników aproksymacji z tabeli 5



Rys.5. Charakterystyki prądu fazowego silnika tarczowego indukcyjnego o mocy 1.5 kW w funkcji napięcia zasilania dla stałej częstotliwości 50 Hz dla taśmy typu M470-50A oraz taśmy Vacoflux48\_0.35mm.

Zastąpienie twornika wykonanego z klasycznej taśmy elektrotechnicznej np. M470-50A twornikiem wykonanym z taśmy o wysokich wartościach indukcji nasycenia ma znaczący wpływ na parametry i charakterystyki indukcyjnego silnika tarczowego. W oparciu o opracowany w ramach projektu algorytm obliczeń analitycznych silników tarczowych indukcyjnych, dokonano analizy wpływu takiej zmiany na charakterystyki silnika. Istnieje możliwość dwójakiego podejścia do niniejszego zagadnienia. W pierwszym następuje bezpośrednie zastąpienie materiału rdzenia stojana, bez zmiany geometrii obwodu

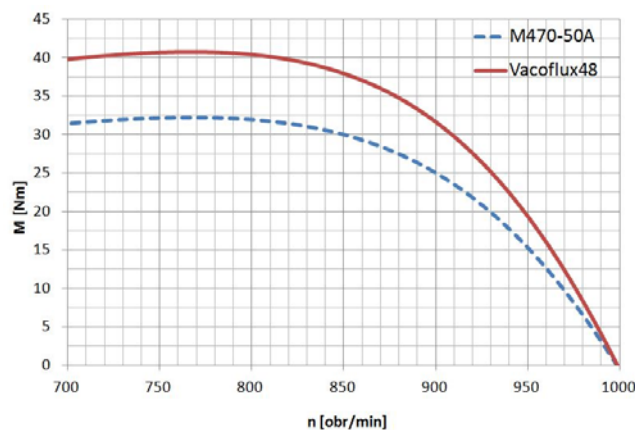
magnetycznego i danych nawojowych silnika. Zmiany wynikające z zastosowania różnych materiałów magnetycznych w takim przypadku można zauważyć wykreślając poszczególne charakterystyki w funkcji zmieniającego się napięcia zasilania. Charakterystyki obrazujące wpływ takiej zmiany zostały przedstawione na rysunkach 5-6.



Rys.6. Charakterystyki sprawności silnika tarczowego indukcyjnego o mocy 1.5 kW w funkcji napięcia zasilania dla stałej częstotliwości 50 Hz dla taśmy typu M470-50A oraz taśmy Vacoflux48\_0.35mm

Przedstawiony powyżej sposób analizy wpływu zmian materiału magnetycznego rdzenia twornika zasadny jest jedynie w celach badawczych. W celu prawidłowego porównania dwóch silników z różnymi materiałami rdzenia stojana należy już na etapie projektowania obwodu elektromagnetycznego zdefiniować interesujący nas efekt końcowy i dla każdej z maszyn zaprojektować inny obwód elektromagnetyczny, zachowując niezmiennie wybrane wielkości fizyczne jako punkt odniesienia. Można przyjąć następujące założenia: parametry zasilania, dane nawojowe wirnika oraz geometria magnetowodu stojana i wirnika są jednakowe dla obu maszyn, a zmianom ulegają dane nawojowe stojana.

Charakterystyki obrazujące wpływ zmiany materiału twornika przy tego rodzaju założeniach przedstawiono na rysunkach 7-8.



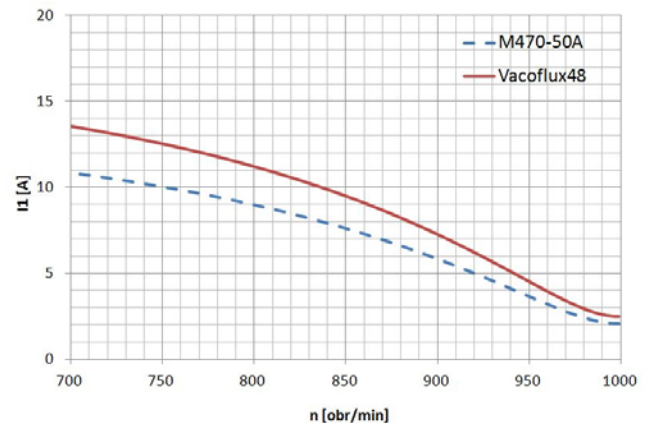
Rys.7. Charakterystyki momentu na wale silnika tarczowego indukcyjnego o mocy 1.5 kW w funkcji prędkości obrotowej dla taśmy typu M470-50A oraz taśmy Vacoflux48\_0.35mm

Z przeprowadzonej w projekcie badawczym analizy oraz na podstawie przedstawionych wykresów 5 - 8 można stwierdzić, że:

- bezpośrednie zastąpienie tradycyjnej taśmy elektrotechnicznej M470-50A, taśmą o wysokich indukcjach nasycenia Vacoflux48 do budowy rdzenia stojana silnika tarczowego, bez zmian geometrii i danych nawojowych

stojana, powoduje ograniczenie wartości prądu biegu jałowego przy wzroście wartości  $U/f$ , ograniczenie wartości prądu fazowego przy wzroście wartości  $U/f$ , wyższy współczynnik mocy  $\cos\phi$  przy wzroście wartości  $U/f$ , wyższą sprawność przy wzroście wartości  $U/f$ .

- odpowiednie zaprojektowanie silnika z rdzeniem stojana wykonanym z taśmy o wysokiej indukcji nasycenia, przy zasilaniu  $U=400V$ , 50Hz pozwala, w stosunku do taśmy M470-50A, na uzyskanie wyższej wartości momentu znamionowego oraz momentu maksymalnego przy zachowaniu niezmienniej masy i gabarytów maszyny, uzyskanie wyższej krotności momentu rozruchowego oraz uzyskanie wyższej sprawności silnika.



Rys.8. Charakterystyki prądu fazowego silnika tarczowego indukcyjnego o mocy 1.5 kW w funkcji prędkości obrotowej dla taśmy typu M470-50A oraz taśmy Vacoflux48\_0.35mm

#### Taśma amorficzna

W silnikach zasilanych napięciem o wysokiej częstotliwości, w celu ograniczenia strat, do budowy rdzeni magnetycznych można wykorzystać taśmę amorficzną. Taśma ta ma postać szkła metalicznego o strukturze amorficznej i grubości rzędu 25  $\mu m$ . Otrzymywana jest ze stopów żelaza i kobaltu w procesie bardzo szybkiego schładzania. Technologia wykonania rdzenia z tego rodzaju materiału jest następująca - w pierwszej kolejności rdzenie zwijane są w postaci pierścieni, następnie poddawane są obróbce cieplnej i w ostatnim procesie sklepane za pomocą specjalnej żywicy. Obróbka cieplna znacznie poprawia właściwości magnetyczne taśm amorficznych [2]. Na rysunku 9 przedstawiono fotografie obrazujące rdzeń wykonany z taśmy amorficznej.



Rys.9. Rdzeń toroidalny wykonany z taśmy amorficznej o grubości 25 $\mu m$ : a) po sklejeniu żywicą, b) przed klejeniem

Do produkcji magnetowodów wykorzystywane są dwa gatunki taśm amorficznych: 2605SC oraz 2605S-2 [2]. Podstawowe własności obu stopów przedstawiono w tabeli 6.

Korzystając z katalogowej, tabelarycznej charakterystyki magnesowania taśmy amorficznej, empirycznie wyznaczono współczynniki równania (1) pozwalającego aproksymować charakterystykę magnesowania materiału typu

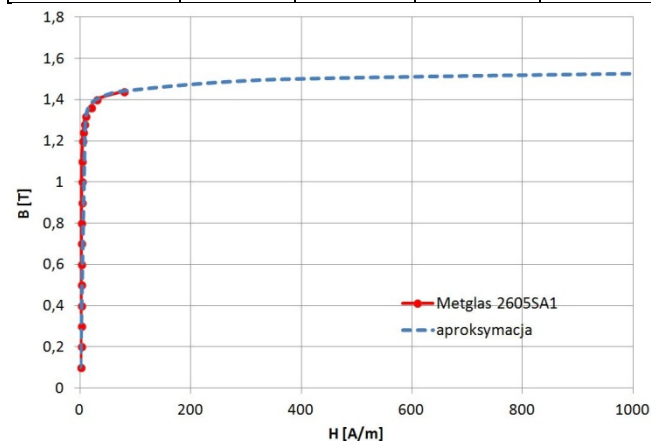
Metglas 2605SA1. Materiał ten należy do stopów grupy 2605 S-2. W tabeli 7 zamieszczono wyznaczone współczynniki aproksymacji, natomiast na rysunku 10 przedstawiono porównanie obu charakterystyk - aproksymowanej i rzeczywistej. Należy zwrócić uwagę, że dla tego rodzaju materiału indukcja nasycenia jest znacznie niższa niż indukcja nasycenia klasycznych blach M400-50A i wynosi zaledwie 1.56T. Wprowadza to więc pewne ograniczenia, co do możliwości efektywnego wykorzystania objętości obwodu elektromagnetycznego silnika w celu uzyskania wysokich wartości momentu elektromagnetycznego.

Tabela 6. Podstawowe właściwości taśm amorficznych wykorzystywanych do budowy magnetowodów [2,4,11]

	2605SC	2605 S-2
Indukcja nasycenia [T]	1.63	1.56
Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	7.33	7.18
Temperatura Curie [°C]	395	364
Rezystywność [μΩm]	1.2	1.3
Twardość [HV]	900	900

Tabela 7. Współczynniki aproksymacji charakterystyki magnesowania taśmy amorficznej METGLAS 2605SA1 dla zależności (1)

Materiał	$\alpha_1$	$\beta_1$	$\alpha_2$	$\beta_2$
METGLAS 2605SA1	0.007	1	$10^{-8}$	43



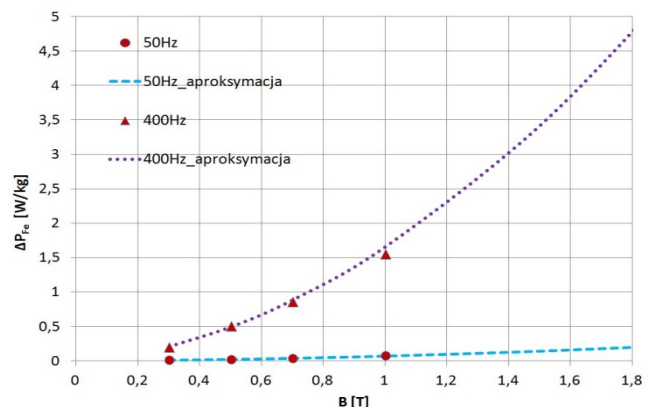
Rys.10. Porównanie charakterystyki magnesowania taśmy amorficznej METGLAS 2605SA1 wyznaczonej z danych katalogowych oraz z równania 1 uwzględniającego współczynniki aproksymacji z tabeli 7.

Główną korzyścią zastosowania taśmy amorficznej do budowy magnetowodu stojana jest możliwość ograniczenia strat powstających w rdzeniu stojana na skutek prądów wirowych. W tabeli 8 przedstawiono wyznaczone w oparciu o dane katalogowe producenta oraz równania (3-5) współczynniki aproksymacji charakterystyki stratności materiału amorficznego Metglas2605SA1. Na rysunku 11 przedstawiono natomiast porównanie charakterystyk stratności aproksymowanych i rzeczywistych.

Można zauważyć znaczącą różnicę w wartości stratności taśmy amorficznej, w stosunku do taśmy M400-50A dla częstotliwości 50Hz i indukcji 1.0T. W przypadku taśmy elektrotechnicznej M400-50A wynosi ona 1.7 W/kg, natomiast dla taśmy amorficznej 0.05 W/kg.

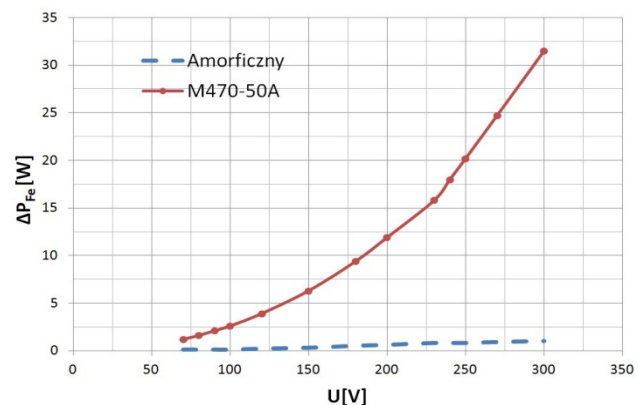
Tabela 8. Współczynniki do wyznaczania charakterystyki stratności według zależności (3-5) dla taśmy amorficznej METGLAS 2605SA1 dla przedziału częstotliwości 50 Hz - 400 Hz

Materiał	$k_h$	$k_c$	$k_e$
METGLAS 2605SA1	0.000482	0.00000444	0.0000942



Rys.11. Porównanie charakterystyki stratności materiału amorficznego Metglas 2605SA1 wyznaczonej w oparciu o dane katalogowe oraz obliczonej na podstawie równań (3 - 5) z uwzględnieniem współczynników aproksymacji z tabeli 8

Korzystając z opracowanego algorytmu do analitycznych obliczeń silników tarczowych indukcyjnych przeprowadzono analizę porównawczą silnika z rdzeniem twornika wykonanym z taśmy M470-50A oraz taśmy amorficznej. Porównywanym parametrem były straty ferromagnetyczne w rdzeniu twornika w funkcji napięcia zasilającego przy stałej wartości częstotliwości 50 Hz. Wyniki analizy przedstawiono na rysunku 12.



Rys.12. Charakterystyki strat ferromagnetycznych silnika tarczowego indukcyjnego o mocy 1.5 kW w funkcji napięcia zasilania dla stałej częstotliwości 50 Hz dla taśmy typu M470-50A oraz taśmy amorficznej METGLAS2605SA1.

Można zauważyć, że wraz ze wzrostem napięcia zasilania silnika przy stałej wartości częstotliwości (wzrasta główny strumień magnetyczny) straty ferromagnetyczne w silniku z rdzeniem wykonanym z taśmy amorficznej rosną znacznie wolniej, niż w tym samym silniku z rdzeniem twornika wykonanym z klasycznej taśmy M470-50A.

Podsumowując zagadnienie dotyczące zastosowania taśmy amorficznej do budowy tarczowych rdzeni magnetycznych można stwierdzić, że w przypadku maszyn pracujących w warunkach zasilania wysokimi częstotliwościami istnieje duże uzasadnienie do wykorzystania tego rodzaju materiału do budowy podzespołów tarczowego obwodu elektromagnetycznego.

Jak wynika z przedstawionych charakterystyk stratności, zastosowanie taśmy amorficznej znacznie ogranicza straty ferromagnetyczne w magnetowodzie maszyny. Nie mniej jednak należy pamiętać o stosunkowo niskich wartościach indukcji nasycenia taśmy amorficznej, co w przypadku konieczności uzyskania wysokich współczynników gęstości momentu silnika może stanowić istotne ograniczenie do zastosowania tego rodzaju materiału.

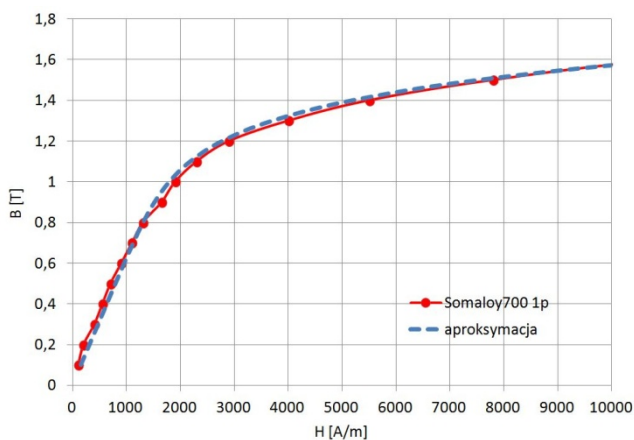
## Materiały kompozytowe

W wielu przypadkach geometria rdzenia magnetycznego maszyn tarczowych wymaga zastosowania skomplikowanego i kosztownego procesu technologicznego do jego wykonania (zwijanie taśmy, obróbka elektroerozyjna itp.). Alternatywą do stosowanych taśm elektrotechnicznych mogą być magnetyczne kompozyty proszkowe SMC (Soft Magnetic Composite), wytwarzane przy użyciu technologii metalurgii proszków. Kompozyt SMC składa się z magnetycznie miękkiego proszku (najczęściej proszku żelaza) oraz dielektryku izolującego i wiążącego cząsteczki tego proszku [12,13]. W celu maksymalizacji gęstości oraz uzyskania pożądanego kształtu, mieszanina proszku i dielektryka prasowana jest pod wysokim ciśnieniem (nawet do 1000 MPa). Właściwości magnetyczne kompozytów SMC są umiarkowane, a największą ich zaletą jest możliwość wykonywania podzespołów magnetycznych o różnych kształtach w jednej operacji technologicznej [12]. Należy mieć jednak na uwadze, że technologia prasowania pod wysokim ciśnieniem, pomimo szerokiej możliwości wykonywania rozmaitych kształtów geometrycznych, ma również ograniczenia i nie każdy zaprojektowany przez konstruktora kształt rdzenia jest możliwy do wykonania.

W tabeli 9 podano współczynniki aproksymacji charakterystyki magnesowania kompozytu typu Somaloy700 1p wyznaczone z danych katalogowych producenta [16]. Na rysunku 13 przedstawiono natomiast porównanie obu charakterystyk.

Tabela 9. Współczynniki aproksymacji charakterystyki magnesowania kompozytu Somaloy 7001p dla zależności (1)

Materiał	$\alpha_1$	$\beta_1$	$\alpha_2$	$\beta_2$
Somaloy700 1p	1.6	1	0.2	8



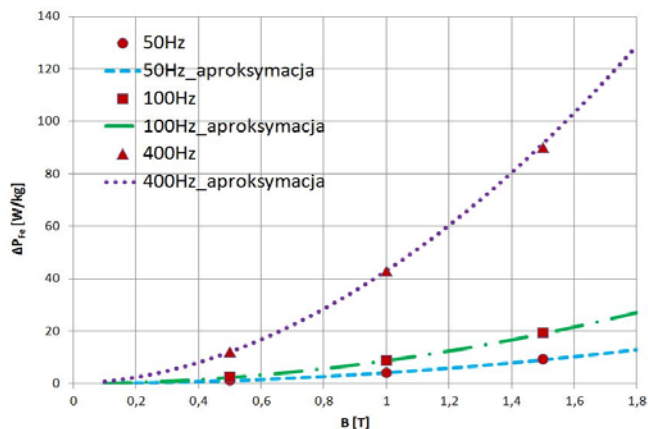
Rys.13. Porównanie charakterystyki magnesowania kompozytu Somaloy700 1p wyznaczonej z danych katalogowych oraz z równania 1 uwzględniającego współczynniki aproksymacji z tabeli 9

Materiały SMC charakteryzują się niskimi stratami od prądów wirowych (0.5 -1 W/kg dla 1T i 50 Hz), którym jednak towarzyszy znaczna wartość strat histerezowych (6-8 W/kg dla 1T i 50 Hz [12,13,14]). Na podstawie danych katalogowych oraz zależności (3-5) wyznaczono współczynniki aproksymacji charakterystyk stratności, które przedstawiono w tabeli 10. Na rysunku 14 przedstawiono porównanie charakterystyk katalogowych i aproksymowanych.

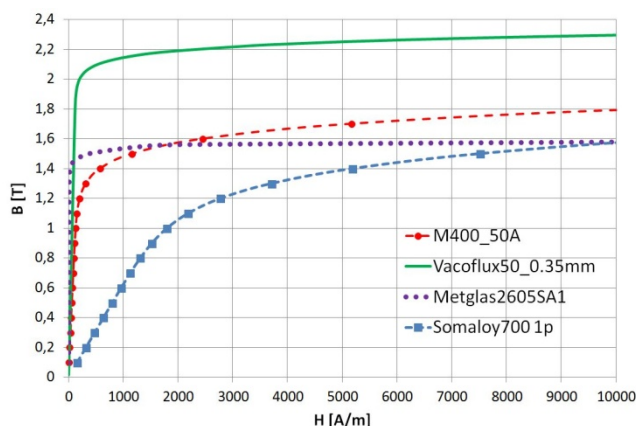
Tabela 10. Współczynniki do wyznaczania charakterystyki stratności według zależności (3-5) dla materiału Somaloy 7001p dla przedziału częstotliwości 50 Hz - 400 Hz

Materiał	$k_h$	$k_c$	$k_e$
Somaloy700 1p	0.067	0.0000937	0.00241

Analizując zgromadzone materiały można stwierdzić, że zastosowanie kompozytów SMC do budowy tarczowych magnetowodów może być alternatywą do klasycznych taśm elektrotechnicznych jedynie w przypadku, gdy głównym kryterium jest koszt wykonania lub znaczące ograniczenia technologiczne w stosunku do wykonania podzespołu z taśmy elektrotechnicznej. Innymi słowy zastosowanie kompozytów SMC do budowy tarczowych obwodów magnetycznych jest atrakcyjne dopiero dla seryjnie produkowanych maszyn jako suma: materiał, dobry projekt i technologia wytwarzania.



Rys.14. Porównanie charakterystyki stratności kompozytu Somaloy700 1p wyznaczonej w oparciu o dane katalogowe oraz obliczonej na podstawie równań (3-5) z uwzględnieniem współczynników aproksymacji z tabeli 10

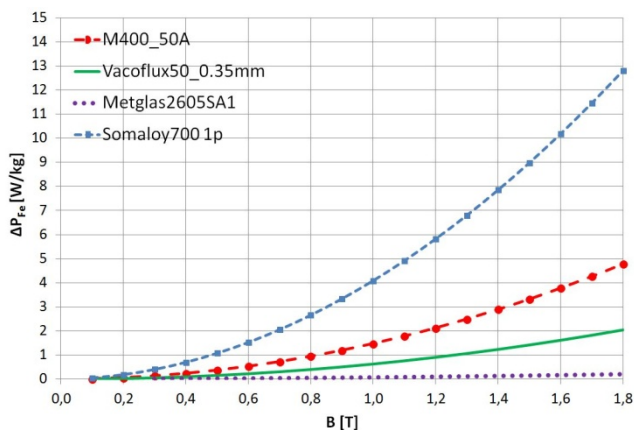


Rys.15. Porównanie charakterystyk magnesowania wybranych materiałów magnetycznych miękkich w oparciu o zależność (1) oraz współczynniki aproksymacji przedstawione w publikacji

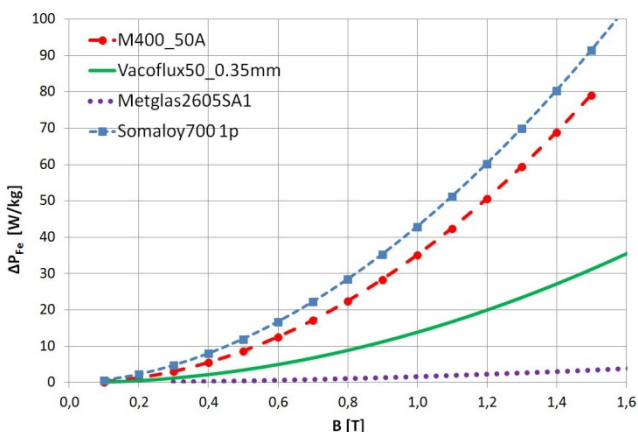
## Podsumowanie

W artykule omówiono wybrane rodzaje materiałów magnetycznie miękkich stosowanych do budowy tarczowych obwodów elektromagnetycznych. Opisano podstawowe własności każdego z nich oraz dla wybranych dokonano analizy wpływu ich zastosowania na właściwości i parametry elektromagnetyczne indukcyjnego silnika tarczowego. W publikacji dla każdego z omawianych materiałów podano równania i współczynniki, pozwalające z dobrą dokładnością aproksymować najważniejsze, z punktu widzenia obliczeń elektromagnetycznych, charakterystyki tj. charakterystykę magnesowania oraz charakterystykę stratności dla częstotliwości 50-400 Hz.

W celu jednoznacznego porównania przedstawionych w publikacji materiałów magnetycznie miękkich, na rysunkach 15-17 zestawiono charakterystyki magnesowania oraz charakterystyki stratności każdego z nich, wyznaczone w oparciu o podane w publikacji równania i współczynniki aproksymacji.



Rys.16. Porównanie charakterystyk stratności wybranych materiałów magnetycznych miękkich dla częstotliwości 50 Hz, wyznaczonych w oparciu o zależności (3-5) oraz odpowiednie współczynniki aproksymacji przedstawione w publikacji



Rys.17. Porównanie charakterystyk stratności wybranych materiałów magnetycznych miękkich dla częstotliwości 400 Hz, wyznaczonych w oparciu o zależności (3-5) oraz odpowiednie współczynniki aproksymacji przedstawione w publikacji

Dobór materiałów magnetycznie miękkich w magnetowodach silników tarczowych zależy od rodzaju pracy, zasilania oraz oczekiwanych parametrów eksploatacyjnych maszyny. Od nowoczesnych napędów elektrycznych, oczekuje się jak najwyższych wartości współczynników mocy, momentu oraz sprawności. Odpowiedni dobór materiałów znacząco wpływa na wymienione wyżej parametry.

Jak wynika z przedstawionych na rysunku 15 charakterystyk magnesowania, największą wartością indukcji nasycenia, a tym samym możliwością uzyskania najwyższych wartości współczynników gęstości mocy i momentu cechuje się materiał typu Vacoflux. Dla tego rodzaju materiału również stratność w szerokim zakresie indukcji magnetycznej jest znacznie mniejsza niż dla typowych taśm elektrotechnicznych typu M400-50A.

W przypadku maszyn pracujących z wysokimi częstotliwościami przemagnesowywania, najlepszym ze względu na stratność materiałem magnetycznie miękkim jest taśma amorficzna. Przy zasilaniu napięciem o częstotliwości 400 Hz stratność taśmy amorficznej, dla indukcji 1.5T jest ok. 25 razy mniejsza niż stratność

tradycyjnej taśmy M400-50A oraz ok. 10 razy mniejsza od materiału Vacoflux.

Najgorszymi właściwościami z przedstawionych w niniejszej publikacji materiałów, cechuje się materiał typu Somaloy700 1p. Posiada on niższą w stosunku do pozostałych materiałów względną przenikalność magnetyczną w całym zakresie natężenia pola magnetycznego H (co wynika z charakterystyk przedstawionych na rysunku 15) oraz najwyższą stratność zarówno dla zasilania o częstotliwości 50Hz, jak i 400Hz.

„Praca naukowa finansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki jako projekt badawczy UMO-2012/07/B/ST8/04099”

**Autor:** mgr inż. Tomasz Wolnik  
**E-mail:** [t.wolnik@komel.katowice.pl](mailto:t.wolnik@komel.katowice.pl)  
**Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL,**  
**Al. Roździeńskiego 188, 40-203 Katowice**

#### LITERATURA

- [1] A. Parviainen, Design of axial-flux permanent-magnet low-speed machines and performance comparison between radial-flux and axial flux machines, Digipaino: Lappeenranta teknillinen yliopisto, 2005.
- [2] S. Wiak i H. Welfle, Silniki tarczowe w napędach lekkich pojazdów elektrycznych, Łódź: Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2001.
- [3] T. Śliwiński, Metody obliczania silników indukcyjnych t.1 Analiza, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2008.
- [4] J. Gieras, R. Wang i M. Kamper, Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines, Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [5] W. Wilczyński, Wpływ technologii na właściwości magnetyczne rdzeni maszyn elektrycznych, Warszawa: Instytut Elektrotechniki, 2003.
- [6] PN-EN 10106:1998, Blacha i taśma stalowa elektrotechniczna walcowana na zimno o ziarnie niezorientowanym w stanie pełni przetworzonym.
- [7] Cogent Power Catalog - Electrical Steel Non Oriented Fully Processed, Cogent Power Ltd.
- [8] J. Germishutzen, A. Jockel i M. Kamper, „Numerical calculation of iron and pulsation losses on induction machines with open stator slots,” w Proc.16th Southern African Univ. Power Eng. Conf., SAUPEC, 2007.
- [9] C. Yicheng i P. Pragasen, An improved formula for lamination core loss calculations in machines operating with high frequency and high flux density excitation, IEEE, 13-18 October 2002, p.759-766, Industry Applications Conference .
- [10] Soft Magnetic Materials and Semi-finished Products, Vacuumschmelze.
- [11] Karta katalogowa Metglas2605SA1, [www.metglas.com](http://www.metglas.com), październik 2015.
- [12] B. Węgliński, „Rozwój magnetycznych kompozytów proszkowych w Politechnice Wrocławskiej,” Prace naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, nr 58, 2005.
- [13] Y. Zhou, „Modelling and experimental analysis of core losses of SMC components,” Paper presented at World Congress PM2014, Orlando, 22 May 2014.
- [14] T. Wolnik, „Porównanie współczynnika gęstości momentu silnika tarczowego oraz silnika cylindrycznego z magnesami trwałymi,” Przegląd Elektrotechniczny, nr 1/2014, pp. 5-9, Styczeń 2014.
- [15] T. Glinka, Maszyny elektryczne z magnesami trwałymi, Gliwice: Politechnika Śląska, 1998.
- [16] L. Hultman, O.Andersson: "Advances in SMC Technology"; Hoganas AB, paper presented at Powder Metallurgy EURO PM2009, Copenhagen, Denmark on October 13, 2009.