

Jan Szczypior, Rafał Jakubowski
Instytut Maszyn Elektrycznych, Politechnika Warszawska

OPTIMALIZACJA MASZYNY DYSKOWEJ Z MAGNESAMI TRWAŁYMI I BEZRZDENIOWYM TWORNIKIEM Z UZWOJENIEM EWOLWENTOWO-PROMIENOWYM

OPTIMIZATION OF DISK MACHINE WITH PERMANENT MAGNET AND CORELESS ARMATURE WITH INVOLUTES-RADIAL WINDING

Abstract: In this paper, the construction of high speed disk machine with permanent magnet and coreless armature with involutes-radial winding was presented. Nominal, constructions and material parameters designing machine was defined. To solve magnetic circuit three-dimensional reluctant net method was used. Results of distribution of magnetic induction compare with results getting from finite element method. Method to calculations average and effective value of wire voltage in involutes-radial winding was presented. Thermal calculations for one winding bar was realized using substituted thermal net. Electromagnetic and thermal design calculations were formulated as an optimization problem. Economic criterion expressing cost effective material was assumed. Requirements imposed on design construction were formulated in the form of limitations optimization problem. To solve optimization task, ready procedure based on sequence square programming algorithm was used. Strategy of search of optimal construction was developed. Results of project calculations for different relation of material cost were presented.

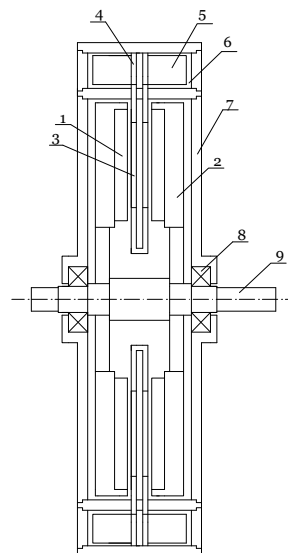
1. Wstęp

Przed współczesnym inżynierem konstruktorem stawia się dziś zadanie nie tylko zaprojektowania urządzenia o określonych parametrach, ale dodatkowo wymaga się, żeby zaprojektowana konstrukcja była optymalna pod względem przyjętego kryterium. Najczęściej kryterium tym jest koszt materiałów użytych do zbudowania projektowanej maszyny. W pracy przedstawiono obliczenia projektowe i proces optymalizacji konstrukcji wysokoobrotowej, tarczowej maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi i bezrdzeniowym twornikiem. Obliczenia projektowe obejmują obliczenia elektromagnetyczne – rozwiązanie obwodu magnetycznego maszyny, obliczenia napięć indukowanych i obliczenia cieplne.

2. Konstrukcja maszyny

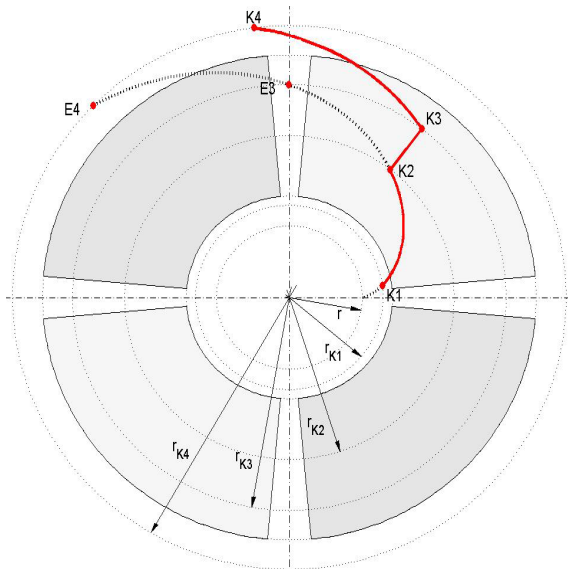
Konstrukcję maszyny tarczowej z magnesami trwałymi i bezrdzeniowym uzwojeniem przedstawiono na rysunku 1. Maszyna składa się z wirnika w postaci dwóch stalowych tarcz osadzonych na wale. Na wewnętrznych powierzchniach tarcz rozmieszczono symetrycznie magnesy o kształcie wycinków pierścienia. Polaryzacja magnesów leżących naprzeciw siebie, po obu stronach szczeliny jest taka sama. Bezrdzeniowy stojan maszyny, umieszczony pomiędzy tarczami wirnika składa się z części czynnej i wymiennika ciepła. Część czynną sto-

jana stanowi izolacyjny karkas w postaci pierścienia z wyfrezowanymi po jego dwóch stronach rowkami i umieszczonymi w nich prętami uzwojenia. Pręty mają kształt odcinka ewolwenty - uzwojenie ewolwentowe, lub składają się z dwóch odcinków ewolwenty i odcinka promieniowego - uzwojenie ewolwentowo-promieniowe.



Rys. 1. Przekrój poprzeczny maszyny tarczowej.
1 – magnes, 2 – jarzmo wirnika, 3 – część czynna pręta uzwojenia ewolwentowego, 4 – część bierna pręta, 5 – radiator – element opcjonalny, 6 – komora wymiany ciepła, 7 – korpus silnika, 8 – łożysko, 9 – wał.

Wymiennik ciepła to szczelny kanał z przepustami dla prętów i króćcami dla medium chłodzącego. Odpowiednio ukształtowane, fragmenty zewnętrznych połączeń czołowych uzwojenia są umieszczone w wymienniku ciepła. Pełnią one rolę radiatorów, lub ewentualnie mogą być zaopatrzone w dodatkowe radiatory, przez które ciepło wydzielane w przecie jest odprowadzane do medium chłodzącego. Na rysunku 2 przedstawiono kształt pręta ewolwentowo-promieniowego oraz punkty określające początek i koniec obu odcinków ewolwentowych i odcinka promieniowego.



Rys. 2. Pręt ewolwentowo-promieniowy i jego punkty charakterystyczne.

3. Obliczenia projektowe

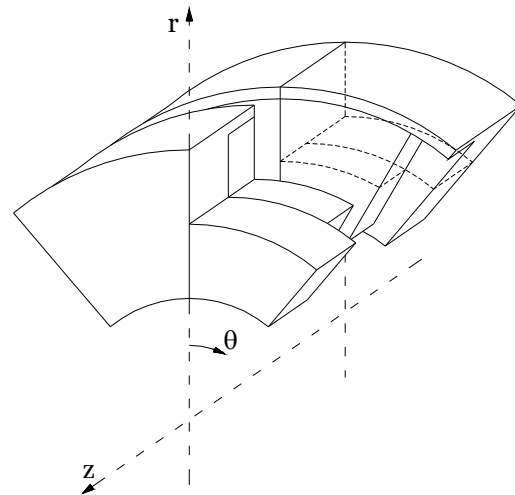
Na obliczenia projektowe składają się obliczenia elektromagnetyczne – rozwiązanie obwodu magnetycznego maszyny, obliczenia napięć indukowanych w pasmach uzwojenia maszyny i obliczenia cieplne.

3.1. Obliczenia elektromagnetyczne

Do obliczenia napięcia indukowanego w paśmie uzwojenia twornika wymagana jest znajomość rozkładu składowej B_z wektora indukcji magnetycznej w obszarze jednego bieguna, w szczelinie powietrznej pomiędzy magnesami wirnika. Do wyznaczenia rozkładu indukcji magnetycznej należy zamodelować i rozwiązać obwód magnetyczny maszyny. Przyjęto, że źródłem pola magnetycznego są tylko magnesy umieszczone na tarczach wirnika. Tym samym pominięto wpływ prądów twornika na rozkład obliczanej indukcji. Zało-

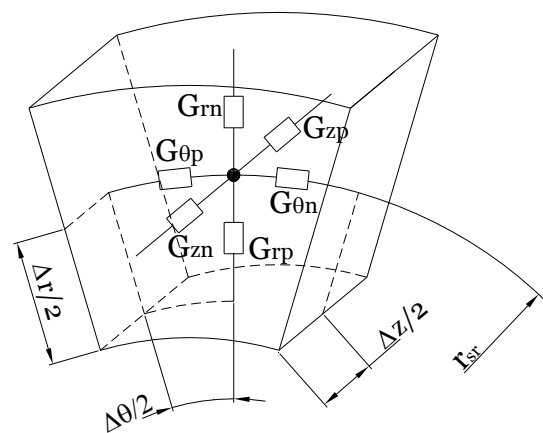
żenie to jest uzasadnione dużą grubością szczeliny na drodze zamykania się strumienia pochodzącego od prądów twornika.

Wszystkie obliczenia projektowe są wykonywane w środowisku Matlab. Z tego powodu do modelowania obwodu magnetycznego zastosowano metodę przestrzennych sieci reluktancyjnych. Ze względu na symetrię, zamodelowano połowę bieguna magnetycznego maszyny. Obszar bieguna maszyny przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Biegun bezrdzeniowego silnika tarczowego z magnesami trwałymi.

Modelowany obszar bieguna magnetycznego podzielono w 3 płaszczyznach: $Z\theta$, RZ , $R\theta$, w wyniku tej operacji otrzymano n elementarnych objętości. W środku każdej elementarnej objętości umieszczono węzeł.



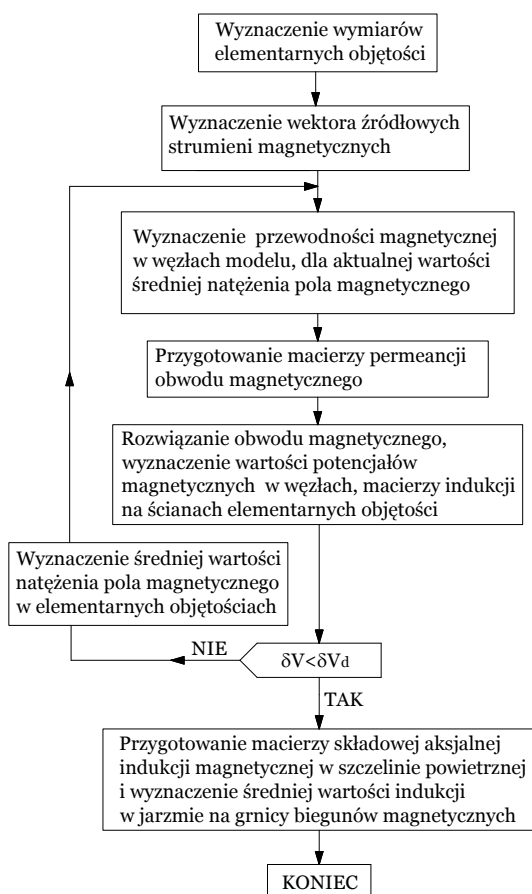
Rys. 4. Permeancje związane z węzłem elementarnej objętości. G_{xn} , G_{xp} – permeancja poprzeczna i następną po osi $0X$, $G_{\theta n}$, $G_{\theta p}$ – po kącie, G_{zn} , G_{zp} – po osi $0Z$.

Od węzła do ściany objętości w kierunkach $0Z$, $0R$, 0θ odchodzą elementarne permeancje

o przenikalności magnetycznej względnej μ_r związanej z elementarną objętością, co przedstawiono na rysunku 4. Wartość permeancji elementu o długości l , przekroju poprzecznym S i względnej przenikalności magnetycznej μ_r określa wyrażenie:

$$G = \frac{\mu_0 \mu_r \cdot S}{l} \quad (1)$$

Przestrzenną sieć z nieliniowymi permeancjami w obszarach ferromagnetycznych rozwiązano iteracyjnie, uaktualniając w kolejnych iteracjach wartości względnych przenikalności magnetycznych μ_r elementów nieliniowych na podstawie wypadkowej w elemencie indukcji magnetycznej obliczonej w poprzedniej iteracji. W k -tej iteracji obwód magnetyczny jest obwodem liniowym. Do rozwiązania sieci reluktancyjnej wykorzystano metodę potencjałów węzłowych. Algorytm formułowania i rozwiązania nieliniowego układu równań przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5. Algorytm rozwiązania nieliniowego obwodu magnetycznego maszyny.

Wektor potencjałów magnetycznych \mathbf{V} w węzłach sieci reluktancyjnej modelu oblicza-

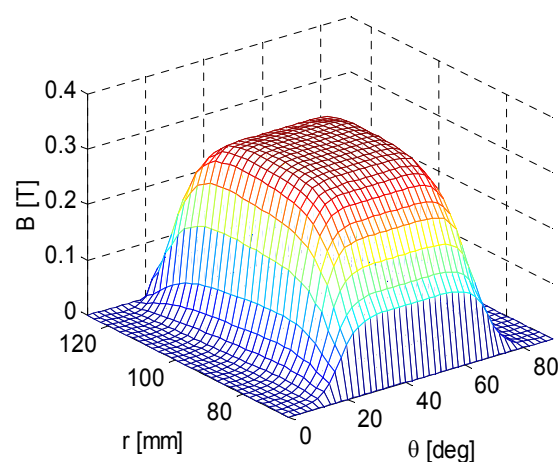
ny jest z równania

$$\mathbf{V} = \mathbf{G}^{-1} \cdot \Phi_z \quad (2)$$

gdzie: \mathbf{G} – macierz permeancji własnych i wzajemnych danego węzła, Φ_z – wektor strumieni źródłowych.

Wynikiem końcowym obliczeń według przedstawionego algorytmu jest macierz składowej aksjalnej indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej i średnia wartość indukcji magnetycznej w jarzmie na granicy biegunów magnetycznych.

Przykładowy rozkład indukcji pod biegunem maszyny dla wymiarów $r_{mw} = 60\text{mm}$, $r_{mz} = 115\text{mm}$, $h_m = 6.3\text{mm}$, $b_j = 8\text{mm}$, $\delta = 16\text{mm}$ przedstawiono na rysunku 6.



Rys.6. Rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie magnetycznej pod jednym biegunem maszyny.

Rozwiązanie sieci reluktancyjnej porównano z rozwiązaniem modelu za pomocą metody elementu skończonego, przy użyciu profesjonalnego programu Opera 3D. Maksymalne rocznice nie przekraczały 1%.

3.2. Obliczenia napięć indukowanych w pasmach uzwojenia maszyny

W tworniku omawianej maszyny nie występuje rdzeń ferromagnetyczny. Napięcie indukowane w prętach, jako napięcie rotacji pochodzące od wirującego pola magnetycznego obliczono z zależności:

$$U_{ip} = \int_0^{l_p} \vec{v}(r, \theta) \times \vec{B}(r, \theta) \cdot d\vec{l} \quad (3)$$

gdzie: U_{ip} – napięcie indukowane, $\vec{v}(r, \theta)$ – prędkość liniowa w punkcie (r, θ) prę-

ta, $\vec{B}(r, \theta)$ – indukcja w punkcie (r, θ) pręta, l_p – długość pręta. Sposób wyznaczania napięć indukowanych w prętach ewolwentowych i ewolwentowo-promieniowych oraz napięć indukowanych fazowych i przewodowych przedstawiono w [1].

3.3. Obliczenia cieplne

Istotnym ograniczeniem (ze względu na wybór klasy izolacji uzwojenia i dopuszczalne obciążenie maszyny) w obliczeniach projektowych jest maksymalna temperatura uzwojenia. Przy rozpatrywanym, bezpośrednim sposobie chłodzenia poszczególnych prętów uzwojenia zagadnienie sprowadza się do wyznaczenia maksymalnej temperatury w pręcie. Obliczenia cieplne pozwalające na wyznaczenie rozkładu temperatury wzdłuż długości pręta szczegółowo opisano w [2].

4. Sformułowanie zadania optymalizacji

Obliczenia elektromagnetyczne i cieplne silnika, z funkcją kryterialną określającą koszt materiałów czynnych i odpowiednim zbiorem ograniczeń zostały sformułowane w postaci zadania optymalizacji. Określenie takiego zadania optymalizacji polega na:

- określeniu zbioru zmiennych decyzyjnych jednoznacznie określających konstrukcję,
- zdefiniowaniu funkcji kryterialnej pełniące rolę kryterium oceny konstrukcji,
- określeniu zbioru ograniczeń definiujących zbiór dopuszczalnych rozwiązań konstrukcji.

Przyjęto następujący zbiór zmiennych decyzyjnych: $X = \{r_{wm}, r_{zm}, h_m, b_j, r, r_{Kl}, l_{pr}, l_{bp}, h_p, \alpha_e\}$ gdzie: r_{wm} – promień wewnętrzny magnesu, r_{zm} – promień zewnętrzny magnesu, h_m – wysokość magnesu, b_j – wysokość jarzma, r – promień bazowy okręgu ewolwentu, r_{Kl} – promień, od którego rozpoczyna się pręt, l_{pr} – długość części promieniowej pręta ewolwentowo – promieniowego, l_{bp} – długość części biernej – chłodzącej pręta, h_p – wysokość pręta, α_e – współczynnik wypełnienia bieguna magnesem.

Przyjęte zmienne decyzyjne pozwalają jednoznacznie określić konstrukcję silnika. Zmienne $r_{wm}, r_{zm}, h_m, b_j, \alpha_e$ definiują obwód magnetyczny, zmienne $r, r_{Kl}, l_{pr}, l_{bp}, h_p$ – twornik.

Jako kryterium oceny wariantów konstrukcji przyjęto koszt materiałów czynnych – koszt magnesu, uzwojenia i żelaza jarzma wirnika. Funkcję kryterialną określono wyrażeniem:

$$f(X) = \sum_{i=1}^3 c_i \cdot \gamma_i \cdot V_i(X) \quad (5)$$

gdzie: c_i – cena jednostkowa masy danego materiału, γ_i – masa właściwa, $V_i(X)$ – objętość, jako funkcja zmiennych niezależnych. Indeksy $i=1,2,3$ oznaczają kolejno: magnes, uzwojenie, żelazo wirnika.

Zbiory ograniczeń nałożone na zmienne X_{\min} i X_{\max} , definiujące dopuszczalne przedziały ich zmienności określono na podstawie zbioru ograniczeń technologiczno – gabarytowych. Ograniczenia nierównościowe są głównym narzędziem oddziaływania na tworzoną konstrukcję. Ich zadaniem jest ograniczenie zbioru rozwiązań dopuszczalnych do technicznie i technologicznie poprawnych i wykonalnych. Przyjęto następujący zbiór ograniczeń nierównościowych:

- ograniczenie na sprawność silnika i prądnicy. Aktywność ograniczenia zapewnia uzyskanie sprawności znamionowej. Ograniczenie to może być zdominowane ograniczeniem na maksymalną gęstość prądu lub ograniczeniem na maksymalną temperaturę pręta
- ograniczenie na oddziaływanie twornika. Ograniczenie zmusza procedurę do tego, aby w projektowanej konstrukcji nie wystąpiło zjawisko odmagnesowania magnesów, przy zadanym maksymalnym przeciążeniu maszyny.
- ograniczenie na średnią wartość indukcji w jarzmie na granicy biegunów. Ograniczenie to zapobiega przyjmowaniu zbyt małych wysokości jarzma ze względu na określoną wytrzymałość mechaniczną tarczy wirnika.
- ograniczenie na gęstość prądu w uzwojeniu. Ograniczenie zawęża obszar przeszukiwań, aby uzyskać realne wartości gęstości prądu w uzwojeniu.
- ograniczenie na maksymalną wartość temperatury w pręcie uzwojenia. Ograniczenie to jest zawsze aktywne, zapewnia uzyskanie konstrukcji o maksymalnej temperaturze pręta mniejszej od wartości dopuszczalnej.

Dodatkowo w zadaniu zdefiniowano podzbiór ograniczeń technologicznych i geometrycznych. Ograniczenia te zapewniają właściwe relacje pomiędzy poszczególnymi wymiarami oraz nieprzekraczanie przyjętych granicznych wartości technologicznych.

Istotnym ograniczeniem w zadaniu jest ograniczenie równościowe na napięcie indukowane

maszyny. Jest ono dołączane do zadania w końcowej fazie projektu podczas dobierania najtańszej konstrukcji z kilku optymalnych o różnej liczbie prętów.

W zadaniu projektowym oprócz zmiennych decyzyjnych i danych związanych z ograniczeniami wykorzystano zbiór danych dodatkowych, traktowanych, jako parametry. Ich wartości nie ulegały zmianie podczas obliczeń.

5. Algorytm poszukiwania optymalnej konstrukcji

W celu zaprojektowania optymalnej konstrukcji maszyny na zadane napięcie znamionowe, rozwiązuje się serię zadań optymalizacji z różną zadaną liczbą prętów na biegun i fazę. Podczas tych obliczeń zbiór ograniczeń stanowią tylko ograniczenia nierównościowe. Z uzyskanych rozwiązań wybiera się dwie konstrukcje optymalne o wartościach średniego przewodowego napięcia indukowanego rotacji, mniejszej i większej zakładanego napięcia. Dla takich dwóch konstrukcji uruchamia się procedurę optymalizacyjną z aktywnym ograniczeniem równościowym na napięcie indukowane. Pozwala to na znalezienie konstrukcji zaprojektowanej na założone napięcie znamionowe U_N . Ostatecznie konstrukcją optymalną jest rozwiązanie, dla którego wartość funkcji kryterialnej jest mniejsza.

6. Prezentacja wyników obliczeń projektowych

W celu zaprezentowania możliwości opracowanego programu zaprojektowano następujące warianty maszyn:

a) – z uzwojeniem ewolwentowo – promieniowym o optymalnej długości części promieniowej,

b) – z uzwojeniem ewolwentowym.

W obliczeniach przyjęto następujące dane znamionowe i parametry: $P_N = 25\text{kW}$, $n_N = 20000\text{obr/min}$, $U_N = 400\text{V}$, $P_m = 500\text{ W}$ - straty mechaniczne, $\eta_{ds} = 94\%$ - zadana sprawność silnika, $\eta_{dp} = 94\%$ - zadana sprawność prądnicy, $T_{\max d} = 100^\circ\text{C}$, $p = 2$ - liczba par biegunów, $m = 3$ - liczba faz uzwojenia, $\delta_m = 1\text{ mm}$ - szerokość szczeliny pomiędzy, twornikiem a magnesem, $b_i = 2\text{ mm}$ - grubość karkasu, $k_p = 2$ - współczynnik przetężenia, $k_{dCu} = 1.3$ - wsp. powiększenia straty w miedzi, $k_w = 0.65$ - wsp. wypełnienia pręta miedzią, $\gamma_{Fe} = 7650\text{ kg/m}^3$ - gęstość żelaza, $\gamma_{Cu} = 8900\text{ kg/m}^3$ - gę-

stość miedzi, $\gamma_M = 7500\text{ kg/m}^3$ - gęstość magnezu, c_{Fe} - cena jednostki masy żelaza, c_{Cu} - cena

miedzi, c_M - cena magnezu, $Br = 1.32\text{ T}$ - indukcja remanencji magnezu, $Hc = 1000\text{ kA/m}$ - natężenie koercji magnezu.

Obliczenia wykonano przy dwóch relacjach cen materiałów $c_{Fe} - c_{Cu} - c_M$ odpowiednio:

wariant 1 $c_{Fe} - c_{Cu} - c_M = 1 - 4 - 50$,

wariant 2 $c_{Fe} - c_{Cu} - c_M = 1 - 4 - 30$

Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 1.

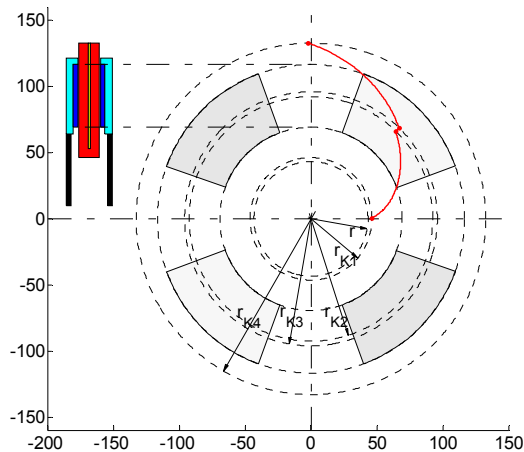
Tabela 1. Wyniki obliczeń projektowych

| Wielkość jednostka | Warianty | | | |
|--------------------------|----------|-------|-------|-------|
| | 1a | 1b | 2a | 2b |
| k_c [ju] | 57,86 | 57,87 | 42,45 | 42,97 |
| k_{Fe} [ju] | 3,02 | 3,14 | 2,83 | 3,03 |
| k_{Cu} [ju] | 18,21 | 18,30 | 15,43 | 16,31 |
| k_M [ju] | 36,62 | 36,42 | 40,30 | 39,36 |
| m_c [kg] | 8,31 | 8,45 | 7,45 | 7,90 |
| m_{Fe} [kg] | 3,02 | 3,14 | 2,83 | 3,03 |
| m_{Cu} [kg] | 4,55 | 4,57 | 3,86 | 4,08 |
| m_M [kg] | 0,73 | 0,73 | 0,81 | 0,79 |
| P_c [W] | 1095 | 1096 | 1093 | 1091 |
| P_{Cu} [W] | 595,4 | 596,2 | 593,4 | 591,7 |
| $B_{\delta_{\max}}$ [T] | 0,33 | 0,33 | 0,36 | 0,37 |
| B_{jsr} [T] | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,8 |
| r_{wm} [mm] | 69,2 | 71,1 | 60,4 | 68,9 |
| r_{zm} [mm] | 116,5 | 118,1 | 107,2 | 111,1 |
| h_m [mm] | 3,2 | 3,1 | 3,7 | 3,7 |
| b_j [mm] | 5,6 | 5,7 | 5,8 | 6,3 |
| r [mm] | 43,3 | 44,9 | 38,7 | 42,0 |
| r_{Kl} [mm] | 46,2 | 47,6 | 41,1 | 43,4 |
| l_{pr} [mm] | 3,4 | 0 | 4,8 | 0 |
| l_{bp} [mm] | 23,0 | 23,4 | 21,3 | 21,6 |
| h_p [mm] | 6,8 | 6,6 | 7,0 | 6,6 |
| α_e [-] | 0,558 | 0,561 | 0,585 | 0,589 |
| S_p [mm ²] | 7,7 | 7,75 | 7,1 | 7,3 |
| l_{cp} [mm] | 189,7 | 189,9 | 174,1 | 179,1 |
| n_p [l.szt.] | 13 | 13 | 13 | 13 |
| T_{\max} [°C] | 100 | 100 | 100 | 100 |
| j [A/mm ²] | 8,1 | 8,1 | 8,8 | 8,5 |
| η_S [%] | 95,7 | 95,7 | 95,7 | 95,7 |
| η_P [%] | 95,7 | 95,7 | 95,7 | 95,7 |

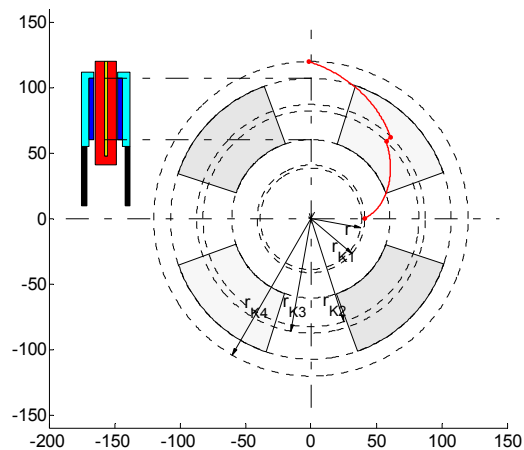
k_c – koszt całkowity, k_{Fe} – koszt żelaza, k_{Cu} – koszt miedzi, k_M – koszt magnezu, m_c – masa całkowita, m_{Fe} – masa żelaza, m_{Cu} – masa miedzi, m_M – masa magnezu, P_c – straty mocy całkowite, P_{Cu} – straty mocy w miedzi, r_{wm} – promień wewnętrzny magnezu, r_{zm} – promień zewnętrzny magnezu, h_m – wysokość magnezu, b_j – szerokość jarzma, r – promień okręgu bazo-

wego ewolwentu, r_{K1} – promień, na którym leżą początki prętów, l_{pr} – długość części promieniowej pręta, l_{bp} – długość części biernej pręta, α_e – współczynnik wypełnienia bieguna magnesem, S_p – przekrój pręta, l_{cp} – długość części czynnej pręta, n_p – liczba prętów w grupie, T_{max} – maksymalna temperatura w przecie uzwojenia, j – gęstość prądu w przecie, η_s – sprawność silnika, η_p – sprawność prądnicy.

Szkice zaprojektowanych wybranych wariantów konstrukcji maszyny pokazano na rys. 7, wariant 1a), i na rys. 8 wariant 2a).



Rys. 7. Wariant 1a), $c_{Fe} - c_{Cu} - c_M = 1 - 4 - 50$



Rys. 8. Wariant 2a), $c_{Fe} - c_{Cu} - c_M = 1 - 4 - 30$

7. Podsumowanie

Przedstawiony w pracy sposób sformułowania zadania projektowego w postaci zadania optymalizacji umożliwia skuteczne projektowanie optymalnych konstrukcji maszyn dyskowych z magnesami trwałymi i bezrdzeniowym twornikiem. Do zaprojektowania optymalnej konstrukcji maszyny należy rozwiązać serię zadań optyma-

lizacji z odpowiednio kształtowanym zbiorem ograniczeń.

W optymalnej konstrukcji maszyny pręt ma kształt ewolwentowo - promieniowy. Jednakże długość części promieniowej jest niewielka w porównaniu do całkowitej długości pręta.

Wymuszenie w konstrukcji optymalnej łatwiejszego do wykonania ewolwentowego zamiast ewolwentowo - promieniowego kształtu pręta powoduje bardzo niewielkie (poniżej 1 %) zwiększenie kosztu i masy maszyny (większe, gdy magnes jest tańszy).

Koszt całkowity i masa materiałów czynnych maszyny jest mniejsza, gdy magnes jest tańszy.

Mniejsza cena magnesu powoduje w optymalnej konstrukcji maszyny zwiększenie masy magnesu, zwieszenie wysokości magnesu i zmniejszenie średnicy zewnętrznej i wewnętrznej magnesu. Zatem przy tańszym magnesie maszyna jest grubsza, ale ma mniejszą średnicę zewnętrzną.

8. Literatura

[1] Szczypior J., Kamiński G., Smak A.: *Analiza kształtu zwojów uzwojeń tworników bezrdzeniowych w maszynach do kinematycznych magazynów energii*. Przegląd Elektrotechniczny R. 81 NR 10/2005, s.7-14.

[2] Szczypior J., Jakubowski R.: *Obliczenia cieplne w bezrdzeniowej maszynie dyskowej z magnesami trwałymi o chłodzeniu bezpośrednim*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 83, 2009, wyd. BOBRME Komel, s. 59-66.

[3] Koziej E., Kamiński G., Szczypior J.: *Sformułowanie obliczeń elektromagnetycznych bezszczotkowych silników z magnesami trwałymi w postaci zadania optymalizacji*. Proceedings of 33rd International Symposium of Electrical Machines SME'97, Poznań-Kiekrz 9-12 June 1997 pp. 151-156

Artykuł współfinansowany z pracy ECO-Mobilność WND-POIG.01.03.01-14-154/09.



INNOWACYJNA
GOSPODARKA
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI



UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Praca współfinansowana ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

Autorzy

dr inż. Jan Szczypior, tel. 22 234 74 06

E-mail: J.Szczypior@ime.pw.edu.pl

mgr inż. Rafał Jakubowski, tel. 22 234 74 59

E-mail: rafaljakub@poczta.fm

Institut Maszyn Elektrycznych, Politechnika Warszawska, 00-662 Warszawa, Plac Politechniki 1

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Ryszard Pałka