

Ewa PIOTROWSKA-KOKOT
Barbara ŚLUSAREK

ZASTOSOWANIE METOD OBLICZENIOWYCH DO PROJEKTOWANIA OBWODÓW MAGNETYCZNYCH Z DIELEKTROMAGNESAMI ND-FE-B PRZEZNACZONYCH DO NAPĘDÓW ELEKTRYCZNYCH

STRESZCZENIE *Obecnie dobór magnesu do obwodu magnetycznego napędu elektromagnetycznego z podtrzymaniem magnesem trwałym, odbywa się na drodze testowania modelu. Doświadczenie konstruktora i dostępne na rynku materiały mają wpływ na rodzaj konstrukcji obwodu magnetycznego w takim napędzie. Współczesna technologia pozwala na wytwarzanie dielektromagnesów o oczekiwanych przez konstruktora właściwościach. Dotyczy to zarówno właściwości fizycznych, takich jak właściwości magnetyczne, mechaniczne, elektryczne i termiczne, ale także kształtu geometrycznego jak i topografii biegunów magnetycznych.*

Opracowany w Instytucie Elektrotechniki program wyznaczania charakterystyk dynamicznych z użyciem programu MatLab, umożliwia

dr inż. Ewa PIOTROWSKA-KOKOT
e-mail: e.kokot@iel.waw.pl

Zakład Wysokich Napięć i Aparatury Rozdzielczej
Instytut Elektrotechniki
04-703 Warszawa, ul. Pożaryskiego 28,

dr hab. inż. Barbara ŚLUSAREK
e-mail: barbara@itr.org.pl

Instytut Tele- i Radiotechniczny
03-450 Warszawa, Ratuszowa 11

obliczanie złożonych obwodów magnetycznych napędów elektromagnetycznych. Program ten, wspomagany programem Flux2D, pozwala na wytypowanie magnesu trwałego o optymalnych dla danej konstrukcji właściwościach fizycznych, kształcie i konfiguracji biegunów magnetycznych. Ułatwia to i skraca proces projektowania napędów elektrycznych przeznaczonych dla konkretnych urządzeń. W artykule przedstawiono dobór dielektromagnesów Nd-Fe-B przeznaczonych do obwodu magnetycznego wytypowanego napędu elektrycznego.

1. WSTĘP

We współczesnych napędach elektromagnetycznych coraz częściej stosowane są magnesy trwałe. Związane jest to między innymi z rozwojem produkcji materiałów magnetycznie twardych i pojawieniem się szerokiej gamy magnesów trwałych o zróżnicowanych właściwościach, wymiarach, kształcie i oczywiście cenie.

Napędy elektromagnetyczne wykorzystywane są między innymi w wyłącznikach niskiego, średniego i wysokiego napięcia, w trakcji, w urządzeniach dźwigowych itp.

W napędach z podtrzymaniem magnesami trwałymi stosowane są obecnie spiekane magnesy trwałe ze stopów Sm-Co oraz Nd-Fe-B. Magnesy te charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami magnetycznymi, umożliwiającymi uzyskanie dobrych parametrów układu napędowego, ale wadą ich jest wysoka cena. Obecne technologie wytwarzania magnesów trwałych pozwalają uzyskać magnesy trwałe o gorszych od magnesów spiekanych typu Sm-Co czy Nd-Fe-B właściwościach magnetycznych, lepszych niż właściwości magnesów ferrytowych, ale tańszych od spiekanych magnesów z pierwiastkami ziem rzadkich. Takimi magnesami są dielektromagnesy Nd-Fe-B. Zaletami takich magnesów jest możliwość kształtowania zarówno ich właściwości fizycznych, jak i wytwarzania magnesów o skomplikowanych kształtach, wysokiej dokładności wymiarowej bez dodatkowej obróbki mechanicznej. Ich właściwości magnetyczne są wystarczające do wielu zastosowań.

Charakterystyka napędu elektromagnetycznego z zastosowaniem magnesów trwałych zależy zarówno od materiału, z którego wykonano magnes trwały, jak i jego kształtu, wymiarów, a także konfiguracji biegunów magnetycznych.

Odpowiednim narzędziem do wyznaczania charakterystyk dynamicznych napędów elektromagnetycznych jest opracowany w Instytucie Elektrotechniki program wykonawczy w MATLAB. Wspomagany dwuwymiarowym programem

polowym Flux2D, program ten umożliwia wytypowanie magnesu trwałego o optymalnych dla danej konstrukcji właściwościach magnetycznych, kształcie i wymiarach oraz sposobie magnesowania.

2. WYBÓR MAGNESÓW TRWAŁYCH

Magnesami, które ze względu na swoje zalety mogą znaleźć zastosowanie w napędach elektromagnetycznych są magnesy wiązane ze stopów Nd-Fe-B czyli dielektromagnesy Nd-Fe-B [1]. Technologia tego typu magnesów trwałych pozwala na wytwarzanie, z szybkochłodzonej taśmy z tego stopu, dielektromagnesów o zróżnicowanych właściwościach magnetycznych dostosowanych do potrzeb konstruktorów obwodów magnetycznych. Możliwe jest wytwarzanie zarówno dielektromagnesów izotropowych jak i anizotropowych. Zaletą dielektromagnesów izotropowych jest możliwość magnesowania ich we wszystkich kierunkach. Z kolei magnesy anizotropowe w stosunku do magnesów izotropowych charakteryzują się większym strumieniem i większą remanencją przy takiej samej ilości materiału magnetycznego. Technologia tego typu magnesów trwałych, czyli prasowanie proszku Nd-Fe-B z żywicą epoksydową, pozwala na wytwarzanie różnorodnych kształtów magnesów. Mały skurcz materiału umożliwia wytwarzanie dielektromagnesów o dokładnościach wymaganych przez odbiorców. Przeprowadzone wcześniej badania pozwoliły stwierdzić, że możliwe i celowe jest stosowanie dielektromagnesów Nd-Fe-B w napędach elektromagnetycznych przeznaczonych do wyłączników energetycznych średnich i małych mocy [2].

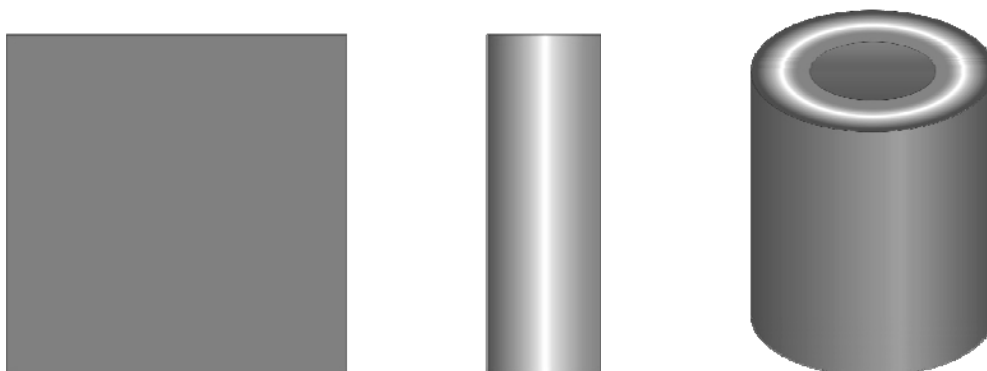
W prowadzonych badaniach wykonano izotropowe dielektromagnesy Nd-Fe-B o właściwościach magnetycznych przedstawionych w tabeli 1.

TABELA 1

Właściwości magnetyczne zastosowanych dielektromagnesów Nd-Fe-B.

| Rodzaj magnesu | B_r [T] | H_{cJ} [kA/m] | H_{cB} [kA/m] | $(BH)_{MAX}$ [kJ/m ³] | μ_{rev} |
|----------------|--------------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|-------------|
| Izotropowy | 0,64 | 1245 | 434 | 69,34 | 1,16 |

Parametry obwodu magnetycznego zależą od właściwości magnetycznych zastosowanych magnesów, a także od ich objętości, kształtu i topografii biegunów magnetycznych. Kształt i sposób namagnesowania dielektromagnesów przedstawiono na rys.1.



Rys.1. Przykładowe dielektromagnesy Nd-Fe-B stosowane w prowadzonych badaniach.

3. OBLICZENIA OBWODÓW MAGNETYCZNYCH

W związku z możliwością wytwarzania magnesów trwałych o bardzo dobrych i zróżnicowanych właściwościach magnetycznych istnieje obecnie możliwość opracowania napędów elektromagnetycznych przeznaczonych do różnych zastosowań, a w związku z tym o zróżnicowanych charakterystykach i konstrukcji.

Opracowano założenia konstrukcyjne napędów elektromagnetycznych z zastosowaniem dielektromagnesów Nd-Fe-B przeznaczonych do styczników i wyłączników średnich napięć i dużych mocy wyłączalnych.

Program MATLAB pozwala na symulację metodą obwodową charakterystyk dynamicznych napędu z uwzględnieniem zjawiska histerezy. Analizę stanów dynamicznych uzupełniono obliczeniami w programie Flux2D. Wymaga on określenia punktu pracy magnesu trwałego na krzywej odmagnesowania, co wynika z charakteru pracy napędu elektromagnetycznego.

Opracowano założenia konstrukcyjne napędów elektromagnetycznych z dielektromagnesami Nd-Fe-B w kształcie pierścienia i w kształcie prostopadłościanu.

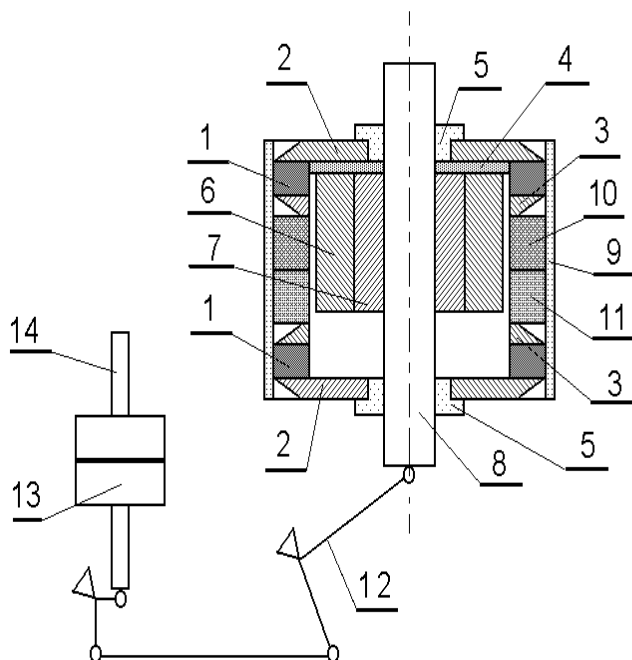
Na podstawie doświadczeń z prowadzonych wcześniej prac [3, 4, 5] do obliczeń przyjęto trzy rodzaje konstrukcji napędów elektromagnetycznych:

- bezjarmowy napęd cylindryczny do styczników,
- bezjarmowy modułowy napęd cylindryczny do wyłączników dużej mocy wyłączalnych,
- napęd z prostopadłościennym układem magnetycznym.

PRZYKŁADY ROZWIĄZAŃ KONSTRUKCYJNYCH NAPĘDÓW ELEKTROMAGNESOWYCH Z PODTRZYMANIEM MAGNESEM STAŁYM

a). Bezjarmowy napęd cylindryczny

Schemat napędu elektromagnetycznego, cylindrycznego, bez jarmza, z magnesami trwałymi, przedstawiono na rys.2.



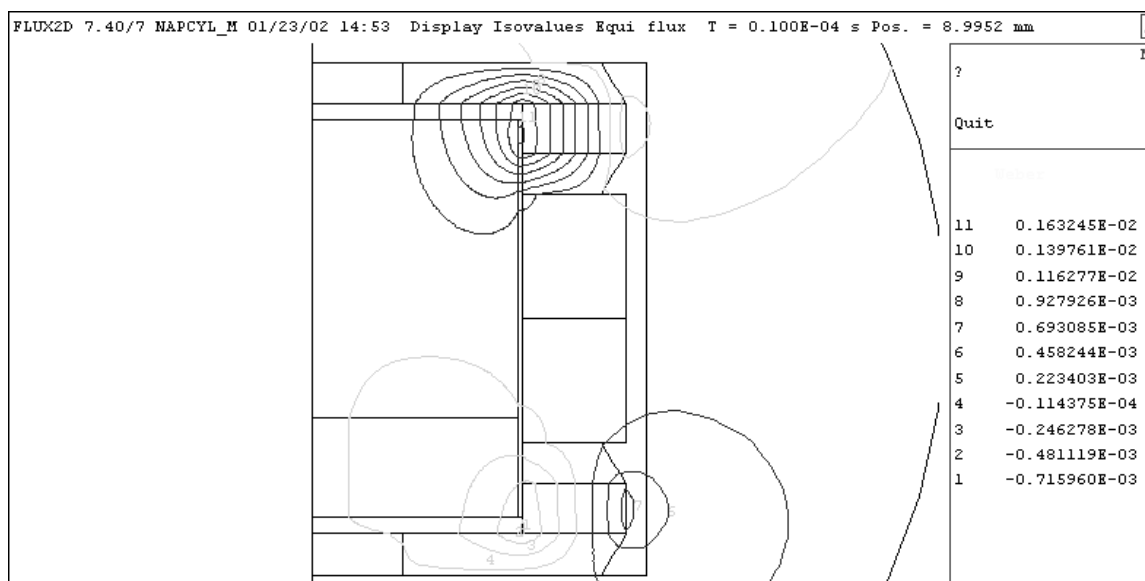
Rys.2. Widok napędu w przekroju.

Oznaczenia:

1 – magnes trwały, 2 – nakładka magnetyczna, 3 – podkładka magnetyczna, 4 – elastyczna przekładka magnetyczna, 5 – wkładka teflonowa, 6 – zwora, 7 – trzpień, 8 – wałek, 9 – tulejka, 10 – cewka górna, 11 – cewka dolna, 12 – układ cięgien i dźwigni, 13 – styk ruchomy, 14 – styk nieruchomy.

Układ składa się z dwóch pierścieniowych magnesów trwałych, pierścieniowej zwory magnetycznej zamocowanej ruchomo pomiędzy dwoma położeniami stabilnymi i elementu do przestawiania zwory z jednego położenia stabilnego w drugie. W pierwszym położeniu stabilnym elementy napędu tworzą pierwszą część obwodu magnetycznego o dużej reluktancji i drugą część obwodu o małej reluktancji. W drugim położeniu stabilnym elementy napędu tworzą pierwszą część obwodu o małej reluktancji i drugą część obwodu magnetycznego o dużej reluktancji. Opracowany układ charakteryzuje się tym, że w odróżnieniu od dotychczasowych rozwiązań posiada profilowane powierzchnie boczne nakładek i profilowane powierzchnie boczne podkładek.

Siła naciągu magnetycznego w tym układzie wynosi 507 N.



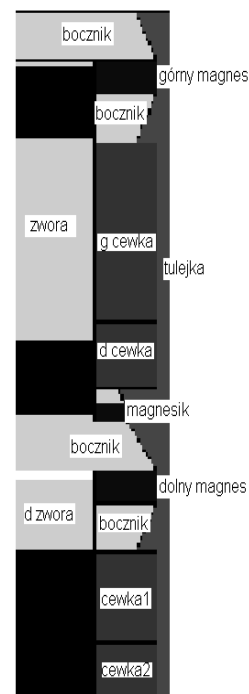
Rys.3. Schemat napędu z uwidocznioną połową przekroju poprzecznego. Linie pola magnetycznego w stanie bezprądowym. Siła naciągu magnetycznego: 507N.

Wykonany w Instytucie Elektrotechniki bezjarzmowy napęd elektromagnetyczny cylindryczny [6] różni się od dotychczasowych rozwiązań tym, że między zworą i nakładką umieszczono przekładkę z elastycznego materiału magnetycznego o względnej przenikalności magnetycznej większej od 1,1. Założenia konstrukcyjne prezentowanego napędu umożliwiają stosowanie magnesów trwałych o różnych własnościach magnetycznych [5].

b). Bezjarzmowy modułowy napęd cylindryczny

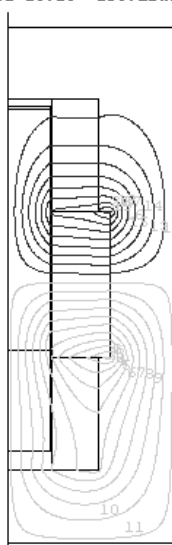
Rys.4. Schemat napędu z cylindrycznym układem magnetycznym wraz z układem zasilania.

Zasada działania urządzenia schematycznie przedstawionego na rys.4. jest taka sama, jak bezjarzmowego napędu cylindrycznego (rys.2, 3). Zwora składa się z dwóch części: górnej i dolnej, osadzonych na tym samym wałku. Modułowy układ magnetyczny umożliwia uzyskanie podwojonej siły naciągu magnetycznego ($2 \times 2000\text{N}$) w górnym położeniu górnej części zwory z wykorzystaniem dolnej pałapki magnetycznej dla dolnej części zwory. Prezentowany rodzaj napędu zasadniczo różni się od dotychczas stosowanych rozwiązań konstrukcyjnych.



c). Napęd z prostopadłościennym układem magnetycznym

FLUX2D 7.40/7 PROTOTYP7_10MAC 11/27/01 13:13 Isovalues Equi flux T = 0.008 s Pos. = 23.6866 mm



| ? | M |
|------|---------------|
| Quit | |
| ---- | 7 |
| 15 | 0.926835E-03 |
| 14 | 0.682272E-03 |
| 13 | 0.437708E-03 |
| 12 | 0.193145E-03 |
| 11 | -0.514186E-04 |
| 10 | -0.295982E-03 |
| 9 | -0.540545E-03 |
| 8 | -0.785109E-03 |
| 7 | -0.102967E-02 |
| 6 | -0.127424E-02 |
| 5 | -0.151880E-02 |
| 4 | -0.176336E-02 |
| 3 | -0.200793E-02 |
| 2 | -0.225249E-02 |
| 1 | -0.249705E-02 |

Rys.5. Linie pola magnetycznego podczas otwierania. Pole magnetyczne aktywnej cewki prądowej przeciwdziała sile przyciągania zwory (3000N) do górnej części jarzma wytworzonej przez magnes trwały.

Prezentowany rodzaj napędu stwarza możliwości wykonania go w postaci cylindrycznej. Jak wykazano w [9] magnes podtrzymujący (środkowy) izotropowy magnesowany promieniowo pozwala na uzyskanie odpowiedniej siły naciągu magnetycznego. Taką konstrukcję można wykonać wyłącznie w oparciu o produkcję krajową.

ZASADY WYZNACZANIA CHARAKTERYSTYK DYNAMICZNYCH Z UWZGLĘDNIENIEM ZJAWISKA HISTEREZY [13]

Zakładając brak strumienia rozproszenia można przyjąć, że strumień indukcji wytworzony przez magnesy stałe zamyka się w obwodzie magnetycznym poprzez komory powietrzne po obu stronach zwory (rys.3):

$$\Phi_m = \Phi_1 + \Phi_2$$

a siłę naciągu magnetycznego określa wyrażenie:

$$F = \frac{S_s}{2 \cdot \mu_0} \left(\left(\frac{\Phi_1}{S_s} \right)^2 - \left(\frac{\Phi_2}{S_s} \right)^2 \right)$$

Wyrażenie dla strumienia skojarzonego Ψ , w obwodzie o zmiennej reluktancji magnetycznej (rys. 4) wyznacza się z układu równań:

$$\begin{bmatrix} \Phi_m \\ \Phi_1 \\ \Phi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ \frac{l_m}{\mu_0 \cdot S_m} + \frac{l_d}{\mu_0 \cdot S_d} & \frac{z}{\mu_0 \cdot S_s} & 0 \\ \frac{l_m}{\mu_0 \cdot S_m} + \frac{l_d}{\mu_0 \cdot S_d} & 0 & \frac{l-z}{\mu_0 \cdot S_s} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{J(H) \cdot (l_m + l_d)}{\mu_0} \\ N \cdot i + \frac{J(H) \cdot (l_m + l_d)}{\mu_0} \end{bmatrix}$$

gdzie:

- Φ_m – strumień indukcji w magnesie trwałym ,
- Φ_1, Φ_2 – strumienie indukcji w komorach,
- l_m – długość drogi strumienia Φ_m w magnesie ,
- l_d – długość drogi strumienia indukcji w szczeliny górnej,
- z – długość drogi strumienia Φ_1 w powietrzu z lewej strony zwory,

- $l - z$ – długość drogi strumienia Φ_2 w powietrzu z prawej strony zwory,
- l – długość komory powietrznej gdy zwora przylega do jarzma,
- S_m – powierzchnia czynna magnesu trwałego,
- S_d – czynna powierzchnia górna zwory,
- S_s – czynna powierzchnia boczna zwory,
- N – ilość zwojów,
- I – prąd w obwodzie sterowania,
- $J(H)$ – polaryzacja materiału magnetycznie twardego modelowana w [8].

Wprowadzając do w/w układu równań parametryczno-katalogowy (**P-K**) model histerezy [1], wyznaczono przy użyciu programu DERIVE, wyrażenia analityczne na pochodne strumienia $\Psi=N\cdot\Phi_2$, które funkcjonują w MATLABie w postaci podprogramów [10]. Wynikiem obliczeń rozkładów linii sił pola magnetycznego wykonanych programem FLUX2D są wykresy przedstawione na rys.2, 3 i 4 z uwidocznioną konstrukcją napędów.

4. WNIOSKI

W artykule zaprezentowano trzy rozwiązania konstrukcyjne napędów elektromagnetycznych. Bezjarzmowy układ magnetyczny napędu cylindrycznego (a) konstruowano w oparciu o anizotropowe magnesy cylindryczne magnesowane osiowo. Konstrukcja tego napędu jest chroniona zastrzeżeniem patentowym [5]. Układy magnetyczne o konstrukcji przedstawionej w (a) zbudowano w oparciu o magnesowane promieniowo izotropowe magnesy cylindryczne. Taka konstrukcja wymaga stosowania jarzma zamykającego obwód magnetyczny. Układ magnetyczny prostopadłościenny składa się z kilkunastu magnesów prostopadłościennych ustawionych w środkowej części jarzma biegunami jednoimiennymi naprzeciw siebie. Przedstawione konstrukcje mogą być modyfikowane poprzez stosowanie magnesów o różnych właściwościach magnetycznych.

LITERATURA

1. Ślusarek B: "Dielektromagnesy dla maszyn elektrycznych małej mocy" – rozprawa doktorska Politechnika Warszawska, Warszawa 1997.
2. Piotrowska-Kokot E., Ślusarek B.: Projektowanie wysokoenergetycznych układów magnetycznych z magnesami trwałymi, VII Konferencja Naukowo-Techniczna "Zastosowanie Komputerów w Elektrotechnice" Poznań/Kiekrz 22-24 kwietnia 2002, Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej, str.549-594.

3. Dzierżyński A., Piotrowska-Kokot E., Sibilski H.: Nowoczesne wyłączniki niskiego napięcia z napędem elektromagnetycznym z podtrzymaniem magnesem stałym – wyniki obliczeń, Komitet Elektrotechniki PAN Sekcja "Wielkich Mocy i Wysokich Napięć" Seminarium Naukowe 22 listopada 2001.
4. Dzierżyński A., Piotrowska-Kokot E., Sibilski H.: Napęd elektromagnetyczny bistabilny z magnesem trwałym. Zgłoszenie patentowe nr P 351 981.(2002)
5. Piotrowska-Kokot E., Dzierżyński A., Sibilski H.: Napęd elektromagnetyczny cylindryczny z magnesami trwałymi. Zgłoszenie patentowe nr P 352 117. (2002)
6. Piotrowska-Kokot E., Dzierżyński A.: Propozycja konstrukcji bezjarzmowego układu magnetycznego napędu stycznika, Konferencja: "Łączniki 02" Pieczyska k/Koronowa, 20 - 22 Maj 2002, Materiały Konferencji, str.45-53.
7. Piotrowska-Kokot E.: Simulation of Magnetizing Process with Hysteresis Phenomenon Modelling for Permanent Magnet, INTERNATIONAL XII SYMPOSIUM ON MICROMACHINES AND SERVODRIVES MIS'2000, Kamień Śląski, 10-14 September 2000.
8. Piotrowska-Kokot E.: Simulation of Magnetizing Process with Hysteresis Phenomenon Modelling for Permanent Magnet, INTERNATIONAL XII SYMPOSIUM ON MICROMACHINES AND SERVODRIVES MIS'2000, Kamień Śląski, 10-14 September 2000, Materiały Konferencji, str.118-125.
9. Piotrowska-Kokot E.: Wybrane aspekty symulacji procesu magnesowania magnesów, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, NR 4, 20001, str.100-102.
10. Piotrowska-Kokot E.: Symulacja przebiegów prądowych w uzwojeniu magnesującym magnes trwały, PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, NR 209 ,2001, str.51-61.
11. Dzierżyński A., Piotrowska-Kokot E., Sibilski H.: Napęd elektromagnetyczny z podtrzymaniem magnesem trwałym, VII Konferencja Naukowo-Techniczna "Zastosowanie Komputerów w Elektrotechnice" Poznań/Kiekrz 22-24 April 2002, Materiały Konferencji Naukowo-Technicznej, str.591-594.
12. Piotrowska-Kokot E., Dzierżyński A.: Propozycja konstrukcji bezjarzmowego układu magnetycznego napędu stycznika, Konferencja: "Łączniki 02" Pieczyska k/Koronowa, 20 - 22 Maj 2002(ref.).
13. Dzierżyński A., Piotrowska-Kokot E.: Komputerowa metoda doboru parametrów elektromagnetycznego napędu bistabilnego z magnesami trwałymi do szybkich układów napędowych, DOKUMENTACJA TECHNICZNA Nr 6086/NWR/01, Zakład Wysokich Napięć, Instytut Elektrotechniki, Warszawa 2001.

Rękopis dostarczono, dnia 21.10.2002 r.

Opiniował: Maria Dems, Krzysztof Kluszczyński

APPLICATION OF MATHEMATICAL METHODS
TO DESIGN MAGNETIC CIRCUITS
WITH ND-FE-B DIELECTROMAGNETS
FOR ELECTRICAL DRIVES

Ewa PIOTROWSKA-KOKOT¹⁾
Barbara ŚLUSAREK²⁾

ABSTRACT *Presently the permanent magnet's selection for magnetic circuit of electromagnetic drive are performed by model testing. Designer's experience and materials accessible on the market decide of the construction of magnetic circuit in projected drive. Today's technology allows to produce dielectromagnets with properties requested by designer. Such possibility concern both physical properties of dielectromagnets as magnetic, mechanical, electrical and thermal properties and also shape and dimensions and magnet's poles configuration.*

Designed in Electrotechnical Institute computer programme with MatLab programme utilisation is intended to calculate the complicated magnetic circuits of electromagnetic drives. Such programme supported with Flux2D allows to select permanent magnet with physical properties, shape and poles configuration optimal for specific construction. It makes easier and cut short designing process of electric drives for specific devices.

The papers present the selection of Nd-Fe-B dielectromagnets for magnetic circuit of some electrical drives.

¹⁾ Ph. D. Eng., Electrotechnical Institute, 04-703 Warsaw, 28 Pożaryskiego Str, Poland, tel. (22) 812 34 74, e-mail: e.kokot@iel.waw.pl

²⁾ D. Sc, Tele & Radio Research Institute, 03-450 Warsaw, 11 Ratuszowa Str, Poland tel. (22) 619 22 41 w. 265, e-mail: barbara@itr.org.pl