

Timpul de Acționare al unui Electromagnet cu Armături Feromagnetice Neliniare

Marius Aurel COSTEA, George Marian VASILESCU*

Abstract

An efficient method applied for the electromagnets actuating time computation is presented in this paper. This method is based upon the dynamic equilibrium equation solution using a prediction-correction type procedure. Its application for an E-E electromagnet powered in DC is also emphasized, the execution time that is a very useful parameter for the design of this kind of devices, being determined. The magnetic force is precisely evaluated for a set of the air gap values from the maximum to the technological air gap, using a finite element program, in stationary state for nonlinear media.

Keywords: nonlinear media, actuating time, dynamic equilibrium

1. Introducere

Unul dintre cele mai utilizate efecte ale câmpului magnetic este cel mecanic, cu numeroase aplicații în tehnică: separație electrică și magnetică, convertoare electromecanice de putere, levitație electromagnetice.

Această lucrare tratează aspecte importante legate de convertoarele electromagnetice de putere și anume electromagneții. Aceștia sunt utilizați în construcția aparatelor electrice de comutație, a unor servomecanisme servind la ridicare și transport și la fixarea pe mașini-unelte ale unor piese care suferă prelucrări. În construcția aparatelor electrice, electromagneții sunt utilizați ca organ motor în construcția contactoarelor, cuptoarelor, releelor, declanșatoarelor, întreruptoarelor, servind la stabilirea sau întreruperea diferitelor circuite[1].

Sub forma cea mai simplă, un electromagnet poate fi construit din două armături, una fixă și una mobilă, fabricate dintr-un material feromagnetic (cu permeabilitatea magnetică mare). Pe armătura fixă este amplasată o bobină care, parcursă de curent electric, produce un câmp magnetic capabil să producă o forță asupra armăturii mobile.

Cursa electromagnetului este dată de valoarea maximă a întrefierului, care reprezintă distanța maximă dintre cele două

armături și este de ordinul milimetrilor. Astfel, timpul de acționare, adică timpul în care armătura mobilă parcurge cursa, este foarte mic, de ordinul milisecundelor[2].

Determinarea timpului de acționare cu o precizie cât mai bună este foarte utilă în studiul comportamentului dinamic al electromagneților având în vedere aplicațiile în care aceștia sunt folosiți. Acesta nu este ușor de evaluat, deoarece trebuie rezolvată o problemă complicată de analiză a mișcării sub acțiunea forțelor produse de câmpul magnetic în structuri cu medii neliniare. În cazul mediilor liniare, calculul forței de natură magnetică se poate face cu metode aproximative, prin care se obține o formulă analitică, cum ar fi teorema forțelor generalizate sau metoda aproximării liniilor de câmp [3]. Aceste metode oferă timpi de calcul mici, dar precizia este nesatisfăcătoare, mai ales pentru valori mari ale întrefierului.

De aceea, în cadrul procedurii propuse în această lucrare, pentru determinarea forței magnetice se va folosi un program de element finit comercial care rezolvă problema de câmp magnetic în regim staționar.

2. Metodologie

Mișcarea părții mobile este descrisă prin ecuația de echilibru dinamic[4]. Aceasta este o ecuație diferențială de ordinul doi, neomogenă. Soluționarea acesteia depinde de poziția și viteza armăturii mobile și de

* Marius Aurel COSTEA; George-Marian VASILESCU – UPB.

forța de natură magnetică, care, la randul ei, depinde de poziția armăturii mobile. Este deci necesară cuplarea rezolvării acestei ecuații cu soluționarea problemei de câmp magnetic.

Câmpul magnetic depinde de relațiile constitutive ale materialelor, de sursele de câmp și de poziția părții mobile.

În cazul de față, al corpurilor feromagnetice, relația constitutivă B-H este neliniară. Forța de natură magnetică nu se mai poate obține printr-o formulă analitică ca în ipoteza mediilor liniare, unde evoluția în timp a părții mobile poate fi modelată numeric cu mare ușurință. Deci trebuie rezolvată problema de câmp magnetic prin metodele cunoscute, cum ar fi metoda elementului finit.

O soluție ar fi ca, la fiecare iterație, corecția forței să se facă rezolvând o nouă problemă de câmp fapt ce conduce la o rezolvare a ecuației de mișcare extrem de neeficientă din cauza unui timp de calcul foarte mare.

Pentru înlăturarea acestui mare dezavantaj, problema de câmp magnetic va fi rezolvată la început pentru un set de valori alese uniform în intervalul de mișcare, iar corecția forței se va face pentru fiecare iterație interpolând în funcție de valoarea poziției obținută iterativ și setul de valori forță-deplasare obținut la început. Prin aceasta tehnică se va obține un timp de calcul redus.

În lucrarea de față, se propune un algoritm numeric de determinare a traiectoriei armăturii mobile prin discretizarea în timp a mișcării. Pornim de la ecuația de echilibru dinamic al forțelor:

$$F_m(y) - F_g = m \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (1)$$

unde $F_m(y)$ este forța de natură magnetică, $F_g = mg$ este forța de greutate, iar m este masa piesei în mișcare.

$$\begin{cases} y|_{t=0} = \delta_{\max} \\ \frac{dy}{dt}|_{t=0} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

care dă poziția și viteza inițială a armăturii mobile. Ecuația (1) o putem scrie astfel:

$$F_m(y) = m \dot{v} + mg \quad (3)$$

unde:

$$\dot{v} = \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (4)$$

Integrând în timp, de la zero, la un moment de timp oarecare τ , obținem:

$$\int_0^\tau \dot{v} d\theta = \frac{1}{m} \int_0^\tau (F_m(y) - mg) d\theta \quad (5)$$

Astfel viteza la un moment de timp τ are forma:

$$v(\tau) = \frac{1}{m} \int_0^\tau (F_m(y) - mg) d\theta + v_0 \quad (6)$$

Știind că $\dot{y} = v$ și integrând în timp această egalitate, obținem poziția părții mobile la un moment de timp:

$$y(t) = \int_0^t v(\tau) d\tau + y_0 \quad (7)$$

Admițând că F , are variație liniară între doi pași de timp succesivi, o putem scrie sub forma:

$$F(\theta) = F(\theta_n) + \frac{F(\theta_{n+1}) - F(\theta_n)}{\theta_{n+1} - \theta_n} (\theta - \theta_n) \quad (8)$$

Integrând relațiile (6) și (7), ținând cont de relația (8) și notând:

$$I = \frac{1}{m} \int_0^\tau (F(\theta) - mg) d\theta \quad J = \int_0^t I d\tau \quad (9)$$

relațiile (6) și (7), vor arăta astfel:

$$v(t)|_{t=\theta_{n+1}} = I + v_0 \quad (10)$$

$$y(t)|_{t=\theta_{n+1}} = J + v_0 \cdot t + y_0 \quad (11)$$

unde I și J sunt:

$$I = \frac{1}{m} \left[(F(\theta_n) + mg - \frac{F(\theta_{n+1}) - F(\theta_n)}{\theta_{n+1} - \theta_n} \cdot \theta_n) \cdot t + \frac{F(\theta_{n+1}) - F(\theta_n)}{\theta_{n+1} - \theta_n} \cdot \frac{t^2}{2} \right] \quad (12)$$

$$J = \frac{1}{m} \left[(F(\theta_n) + mg - \frac{F(\theta_{n+1}) - F(\theta_n)}{\theta_{n+1} - \theta_n} \cdot \theta_n) \cdot \frac{t^2}{2} + \right.$$

$$+ \frac{F(\theta_{n+1}) - F(\theta_n)}{\theta_{n+1} - \theta_n} \cdot \frac{t^3}{6}] \quad (13)$$

Alegem pasul de timp $\theta_{n+1} = \theta_n + \Delta t$ și, știind că $v_0 = v(\theta_n)$ și $y_0 = y(\theta_n)$, obținem forma recurentă a ecuațiilor (10) și (11):

$$v(\theta_{n+1}) = I + v(\theta_n) \quad (14)$$

$$y(\theta_{n+1}) = J + v(\theta_n) \cdot \theta_{n+1} + y(\theta_n) \quad (15)$$

Deși ecuația propusă spre rezolvare este una neliniară, putem considera că are un comportament liniar în intervalul de timp dintre doi pași consecutivi, deoarece acest interval este foarte mic.

Având în vedere dependența neliniară dintre forță și deplasare, folosirea unui pas de timp necorespunzător produce implicații negative în obținerea corectă a soluției. Astfel pe porțiunea puternic neliniară de pe caracteristica forță-deplasare interpolarea liniară nu ar mai fi corectă. De aceea, în cadrul tehnicii propuse în această lucrare, am folosit un pas de timp suficient de mic pentru a elimina acest inconvenient. Prin aceasta, procedura se obține un foarte bun set de valori inițiale pentru fiecare pas de timp. Pentru rezolvare, folosim principiul predicție-corecție pentru variabila $F(\theta_{n+1})$ la fiecare iterație.

Suntem pe intervalul de timp $[\theta_0, \theta_1]$ și vrem să aflăm valoarea lui y la momentul de timp θ_1 , inițial $v(\theta_0) = 0$, $y(\theta_0) = \delta_{\max}$, unde δ_{\max} reprezintă valoarea maximă a întrefierului. Știm pe $F(\theta_0)$, dar nu știm pe $F(\theta_1)$. La început, luăm $F(\theta_1) = F(\theta_0)$, apoi, conform relațiilor (12) și (13), obținem:

$$\begin{aligned} v^{(0)}(\theta_1) &= I^{(0)} + v(\theta_0) \\ y^{(0)}(\theta_1) &= J^{(0)} + v(\theta_0) \cdot \theta_1 + y(\theta_0) \end{aligned} \quad (14,a)$$

Se reevaluează $F^{(1)}$ prin interpolare liniară între noua valoare a întrefierului, $y^{(0)}(\theta_1)$, obținută la prima iterație și setul de valori (y_i, F_i) obținut prin rezolvarea problemei de câmp magnetic înainte de începerea iterațiilor. În continuare, se

recalculează $I^{(1)}$ și $J^{(1)}$ conform relațiilor (12) și (13).

$$\begin{aligned} v^{(1)}(\theta_1) &= I^{(1)} + v(\theta_0) \\ y^{(1)}(\theta_1) &= J^{(1)} + v(\theta_0) \cdot \theta_1 + y(\theta_0) \end{aligned} \quad (14,b)$$

Din nou se reevaluează $F^{(2)}$ și se recalculează $I^{(2)}$ și $J^{(2)}$.

$$\begin{aligned} v^{(j)}(\theta_1) &= I^{(j)} + v(\theta_0) \\ y^{(j)}(\theta_1) &= J^{(j)} + v(\theta_0) \cdot \theta_1 + y(\theta_0) \end{aligned} \quad (14,c)$$

etc.

Facem acest șir de iterații până când se îndeplinește condiția:

$$|F^{(j)} - F^{(j-1)}| < \varepsilon_F \quad (15)$$

unde ε_F reprezintă eroarea metodei.

Acest lucru înseamnă că la pasul (j) , am obținut poziția și viteza pe care o are armătura mobilă la momentul de timp θ_1 care vor deveni poziția și viteza inițială pentru următorul interval de timp $[\theta_1, \theta_2]$ astfel $y^{(j)} = y(\theta_1)$ și $v^{(j)} = v(\theta_1)$.

Procedăm pe toate intervalele de timp la fel ca pe intervalul $[\theta_0, \theta_1]$ până când:

$$y^{(j)} < \delta_{\min} \quad (16)$$

ceea ce înseamnă că armătura a ajuns la valoarea întrefierului tehnologic având viteza $v^{(j)}$.

Timpul total de mișcare al armăturii mobile are forma $t = k\Delta t$, unde k reprezintă numărul de intervale de timp de tipul $[\theta_{n-1}, \theta_n]$ parcurse, până când se îndeplinește condiția (16).

Viteza cu care se lovește armătura mobilă de cea fixă are valoarea vitezei obținută iterativ la iterația care îndeplinește condiția (16).

Pentru validarea metodei propuse de determinare a timpului de acționare în lucrare este prezentată și o instalație experimentală folosită pentru măsurarea timpului de acționare. Schema bloc a instalației este dată în fig. 1:

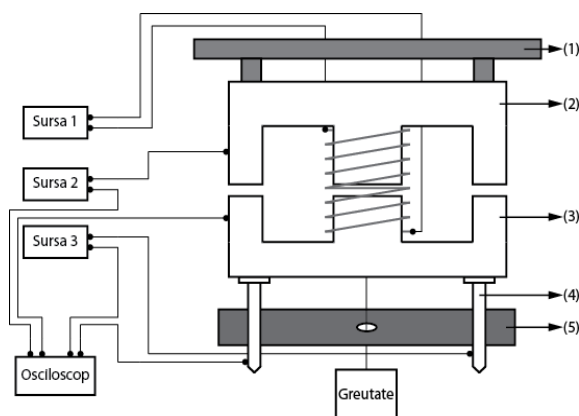


Figura 1. Schema bloc a instalației experimentale

Instalația are în componență următoarele:

- 1) suport susținere armatură fixă;
- 2) armatură fixă;
- 3) armatură mobilă;
- 4) șurub din material neferomagnetic;
- 5) suport susținere armatură mobilă.

Sursa 1 alimentează bobina electromagnetului, aceasta fiind o sursă de curent de maximum 5 A. Electromagnetul studiat absoarbe un curent de maxim 2 A, astfel a fost alimentat cu 1 A, apoi cu 1,5 A și în final cu 2 A.

Sursele 2 și 3 sunt tot surse de curent continuu, ambele fiind reglate să producă un semnal continuu de același fel. Semnalele produse de aceste surse vor fi vizualizate pe osciloscopul din schemă, acesta având două canale. Armătura fixă a electromagnetului este fixată în partea de sus, susținută de suportul de deasupra ei.

Armătura mobilă stă pe două șuruburi reglabile care se înfiletează pe suportul de jos. Scopul acestor șuruburi este de a regla valoarea întrefierului maxim. Pentru ca aceste șuruburi să nu intre în componența circuitului magnetic ele sunt confecționate din material neferomagnetic.

Greutatea de jos este prinsă cu o ață de armătura mobilă și fixată la jumătatea armăturii mobile, întotdeauna mai mare decât forța magnetică exercitată asupra armăturii mobile, astfel după alimentarea electromagnetului armătura mobilă să rămână în aceeași poziție.

După cum se observă în schema bloc, circuitele electrice formate între fiecare sursă în parte și osciloscop se închid prin armăturile electromagnetului. Astfel sursa 3 dă un semnal pe osciloscop al cărui circuit se închide prin armătura mobilă și șuruburi. Sursa 2 va da un semnal pe osciloscop, numai atunci când armătura mobilă se va lipi

de cea fixă. Pentru a măsura timpul de acționare, tăiem ața de care este legată greutatea atunci armătura mobilă se va deplasa. În același timp, pe osciloscop, semnalul dat de sursa 3 va dispărea, iar când armătura mobilă se va lipi de cea fixă, va apărea pe osciloscop semnalul dat de sursa 2.

Timpul de acționare se va determina citind de pe osciloscop intervalul de timp dintre dispariția semnalului dat de sursa 3, ce coincide cu momentul plecării armăturii mobile și cu semnalul dat de sursa 2, ce coincide cu momentul în care armătura mobilă se lipește de cea fixă, iar întrefierul ajunge la valoarea întrefierului tehnologic.

Măsurătoarea se bucură de o precizie foarte bună având în vedere ca s-a folosit un osciloscop cu eroare de ordinul nanosecundelor.

3. Rezultate

În urma simulării în FLUX2D, obținem un set de valori (y_i, F_i) ce reprezintă valoarea forței la diferite întrefieruri de la $y = \delta_{\max}$ la $y = \delta_{\min} = 0.1\text{mm}$ (întrefierul tehnologic).

S-a modelat un electromagnet de curent continuu, unde câmpul magnetic este produs de o bobină cu 470 spire absorbind un curent maxim de 2 A și având un întrefier maxim de 3 mm. Grosimea regiunii magnetice este de 12,2 mm, iar factorul de laminare de 0,92. I s-a determinat forța magnetică pentru diferite valori ale curentului și ale întrefierului modelarea făcându-se în programul FLUX2D[5]. Apoi, prin intermediul metodei prezentate anterior, s-a calculat timpul de acționare.

Materialul feromagnetic din care sunt construite armăturile are curba de magnetizare prezentată în fig. 2.

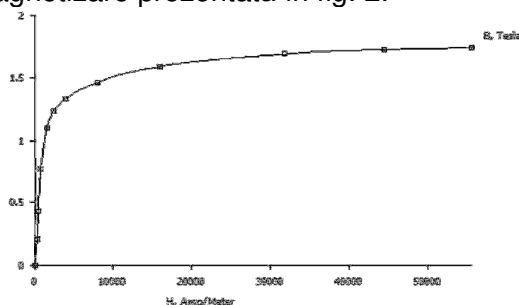


Figura 2. Caracteristica B-H a materialului armăturilor

Regiunile domeniului de calcul 2D sunt ilustrate în fig. 3 în care se evidențiază

armătura fixă, armătura mobilă, bobina și zona din jurul electromagnetului delimitată de domeniul închis.

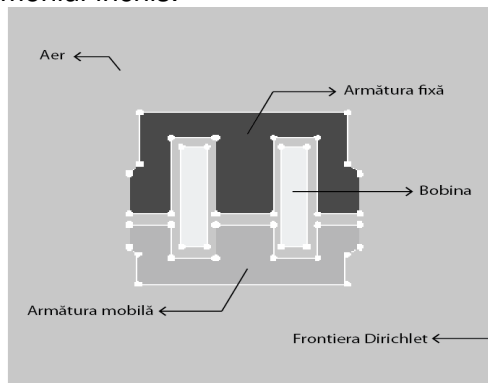


Figura 3. Regiunile domeniului de calcul

Pentru un calcul mai precis al forței, s-a făcut o discretizare foarte fină în zona întrefierului, elementele de discretizare prin metoda elementului finit fiind prezentate în figurile următoare.

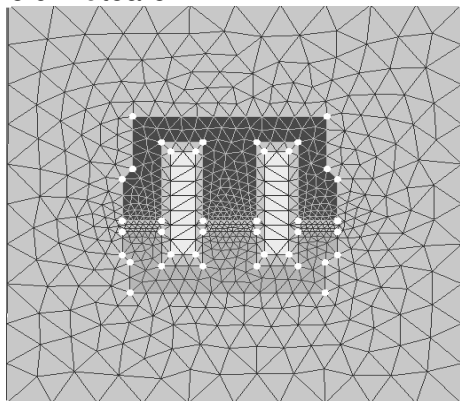


Figura 4. Rețeaua de discretizare a domeniului de calcul

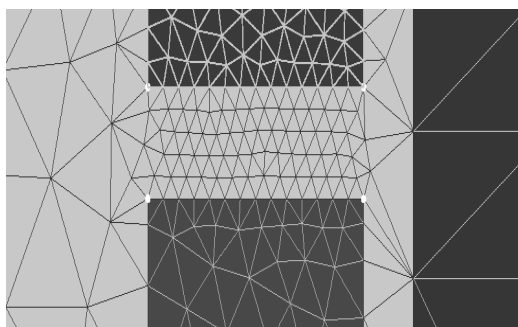


Figura nr. 5. Detaliu din zona întrefierului

Rezultatele obținute, precum și comparația dintre valorile măsurate și cele calculate sunt prezentate în graficele care urmează:

În fig. 6 sunt prezentate rezultatele obținute prin modificarea întrefierului maxim de la 3 la 0,6 milimetri, apoi s-a calculat și măsurat timpul până când întrefierul a ajuns la valoarea întrefierului minim pentru diferiți

curenți de alimentare ai electromagnetului.

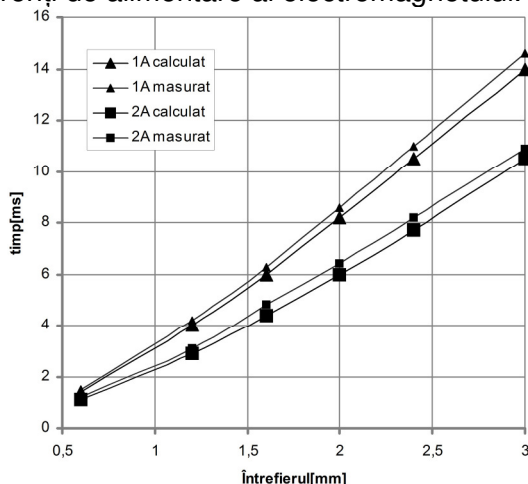


Figura 6. Variația timpului de acțiune în funcție de întrefier pentru diferiți curenți

În fig. 7, pentru un întrefier de 3 mm folosind mai mulți curenți de excitație, s-a modificat masa totală a armăturii mobile (compusă din masa proprie și alte greutateți atașate armăturii mobile) evaluându-i timpul de acțiune.

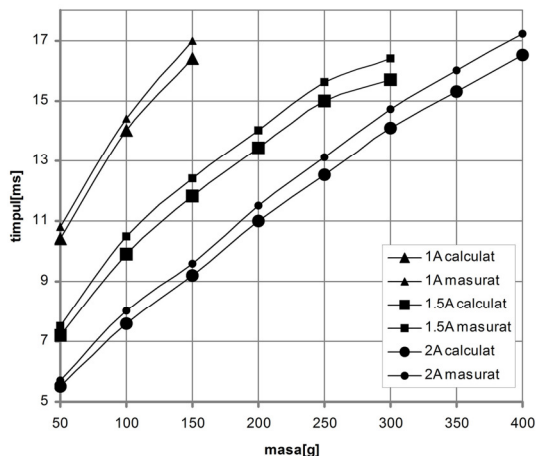


Figura 7. Variația timpului de acțiune la un întrefier de 3mm, pentru diferiți curenți de excitație în funcție de greutatea armăturii mobile

4. Discuții

Avem în vedere domeniul foarte larg al utilizării electromagneților, studierea lor, numai prin caracteristica statică, forța maximă dezvoltată la întrefier minim și cursa devine insuficientă.

Pentru o corectă utilizare a unui electromagnet trebuie cunoscut timpul de acțiune și viteza de deplasare a armăturii mobile, determinarea acestor timpi făcându-se prin studierea regimului dinamic.

Prin regimul dinamic al unui electromagnet, se înțelege comportarea

acestui de la momentul în care armătura se află la întrefierul maxim, până când ajunge la întrefierul tehnologic, acest lucru producându-se după momentul alimentării bobinei electromagnetului. În considerarea regimului dinamic intervin atât mărimi electrice și magnetice, cât și mărimi mecanice.

Comportarea în regim dinamic a unui electromagnet se consideră cunoscută atunci când se cunoaște variația următoarelor mărimi:

- forța electromagnetului în funcție de poziție;
- întrefierul în funcție de timp;
- timpul de acționare.

Regimul dinamic se modelează prin ecuația de echilibru dinamic, iar determinarea timpului de acționare se face prin rezolvarea acestei ecuații. Acest lucru presupune cuplarea mărimilor de câmp magnetic cu cele ale mișcării, astfel obținându-se un sistem de ecuații rezolvate numeric.

În ipoteza cuplării ecuației de circuit electric cu cea a circuitului magnetic folosind în calculul forței teorema forțelor generalizate, poziția armăturii mobile se determină ca funcție de inductanța care, la rândul ei, din ecuația circuitului electric se poate obține ca funcție de timp. Astfel se determină evoluția poziției în timp. Valoarea vitezei se obține prin derivata poziției în timp.

Totuși, având în vedere aproximările făcute legate de fluxul de dispersie și de tehnica tratării neliniarității materialului armăturilor, aceste metode folosite pentru determinarea comportamentului dinamic al electromagneților nu se bucură de o precizie bună. De aceea, în această lucrare, se folosește pentru rezolvarea problemei de câmp magnetic analiza în element finit cu ajutorul programului FLUX2D.

Rezultatele obținute în urma simulărilor,

comparându-le cu cele măsurate dau mare încredere metodei propuse pentru calculul timpului de acționare, ea putând fi utilă atât pentru electromagneții de curent continuu cât și pentru cei de curent alternativ.

5. Concluzii

A fost determinat timpul de acționare al unui electromagnet ținând seama de neliniaritatea curbei $B-H$ a materialului armăturilor. Calculul forței magnetice a fost făcut pentru un set de poziții ale armăturii mobile.

Tratarea neliniarității dependenței forță-deplasare luată în considerare având un comportament liniar pe intervale foarte mici de timp s-a dovedit a fi foarte eficientă în metoda propusă folosită în estimarea poziției armăturii mobile.

Metoda necesită un timp de calcul foarte mic. Datele obținute din simulări reproduc cu mare precizie datele măsurate dând o mare încredere metodei propuse. Micile diferențe dintre aceste valori se datorează parțial modelării bidimensionale a electromagnetului.

Resurse bibliografice

- [1] Hortopan G., *Aparate Electrice. Principii și aplicații*, Editura Didactică și pedagogică, București, 1984, 325 p.
- [2] Shuhua F. și Lau S., „Magnetic Field Analysis and Dynamic Characteristic Prediction of AC Permanent-Magnet Contactor”, în *IEEE Trans. Mag.*, vol.45, no.7, pp. 2990-2995, 2009.
- [3] Hantila F., Leuca T. și Ifrim C., *Electrotehnică Teoretică*, Editura Electra, București, 2002, 179 p.
- [4] Oprică M. și Nicoreștianu F., *Mecanică Teoretică*, Editura LIVPRESS, București, 2002, 209 p.
- [5] ***, *Flux 9.3.2, Guide d'utilisation*, 2006.