

Universitatea Politehnica din București
Facultatea de Energetică

Actuatori magnetici

Studenti:

**Găină Andreea - Elena
Ghinea Răzvan – Alexandru**

Îndrumător:

As. dr. ing. Lucian Petrescu

Cuprins

1. Introducere

- Clasificare
- Principalele caracteristici de performanță
- Actuatori solenoidali

2. Calcul analitic

- Metoda reluctanței

3. Calcul numeric

- Analiza cu element finit

4. Grafice de variație

5. Concluzii

6. Bibliografie

1. Introducere

Automatizarea avansată și miniaturizarea, întâlnite azi în toate domeniile ingineriei, impun dezvoltarea continuă a unor varietăți de acționări sigure și compacte în componența sistemelor moderne. Viteza și precizia, cu care un proces sau un sistem mecanic poate fi controlat, reprezintă parametrii de o importanță deosebită. Actuatorii au devenit rapid elementele cheie pentru îmbunătățirea performanțelor generale ale produselor existente, adăugarea unor caracteristici suplimentare ale acestora, sau chiar pentru apariția unor produse noi ce nu se puteau realiza anterior.

Diversitatea fenomenelor fizice care stau la baza materializării constructive a actuatorilor deschide noi orizonturi în cercetările privind proiectarea, realizarea și utilizarea acestora, stimulează luarea în considerare a unor noi principii fizice și căutarea a noi materiale cu proprietăți deosebite prin intermediul cărora să se răspundă cerințelor de acționare din domeniul ingineriei mecanice.

Actuatorii sunt elemente de execuție controlabile care transformă energia de intrare (electrică, magnetică, termică, optică sau chimică) în lucru mecanic. Conversia energiei de intrare în energie utilă de ieșire se realizează prin intermediul câmpurilor electrice, magnetice, ca urmare a unor fenomene fizice: fenomenul piezoelectric, fenomenul magnetostrictiv, fenomenul de memorare a formei, ca urmare a dilatării corpurilor la creșterea temperaturii, a schimbărilor de fază, a efectului electro-reologic, electro-hidrodinamic, de diamagnetism. Mecanismul actuatorului transformă, amplifică și transmite mișcarea făcând acordul cu parametrii specifici scopului tehnologic.

Clasificarea actuatorilor

Există o mare varietate de actuatori care utilizează diverse surse de energie cum ar fi: electrică, mecanică, hidraulică, chimică sau radiații solare. Aceștia diferă mult din punct de vedere a performanțelor; în timp ce unii sunt capabili de curse și forțe mari alții au dimensiuni foarte reduse. Chiar și cei cu dimensiuni foarte reduse pot dezvolta puteri ridicate dacă aceștia sunt utilizați la frecvențe ridicate. Pentru a putea fi clasificați actuatorii, este necesară identificarea caracteristicilor de performanță ale acestora.

În funcție de semnalul de intrare folosit pentru deplasarea controlată a elementului activ, actuatorii din această categorie se împart, la rândul lor în:

- actuatori comandați termic (prin intermediul unui flux de căldură):
- actuatori pe bază de bimetale;
- actuatori pe bază de aliaje cu memoria formei;
- actuatori comandați electric (prin intermediul intensității câmpului electric):
- actuatori piezoelectrice, cu elemente active din piezocristale, piezoceramici sau piezopolimeri;

- actuatori comandați magnetic (prin intermediul inducției câmpului magnetic):
- actuatori comandați optic (optoelectric sau optotermic):
- actuatori piro - piezoelectrice;
- alte tipuri de actuatori, bazați pe alte fenomene fizice.

Principalele caracteristici de performanță ale actuatorilor sunt:

- Cursa specifică: reprezintă raportul dintre cursa maximă și lungimea actuatorului măsurată pe direcția cursei.
- Forța specifică: reprezintă raportul dintre forța maximă generată și secțiunea transversală a actuatorului.
- Densitatea: reprezintă raportul dintre greutatea actuatorului și volumul acestuia în forma inițială; se neglijează masa sursei și a dispozitivelor periferice.
- Eficiența: lucrul mecanic produs în timpul unui ciclu complet, raportat la energia consumată în acel ciclu.
- Rezoluția: cea mai mică deplasare controlată posibilă.
- Puterea volumetrică: puterea la ieșire raportată la volumul minim al actuatorului.
- Coeficientul cursei de lucru: raportul dintre cursa specifică și forța specifică.
- Coeficientul de putere pe ciclu: puterea maximă dezvoltată pe parcursul unui ciclu.

Actuatori solenoidali

Actuatorii solenoidali au un solenoid, care este o bobină de sârmă înfășurată într-o formă, de obicei, cilindrică. Toți actuatorii solenoidali au de asemenea o armătură din oțel, aceasta constituind partea mobilă. În actuatorii solenoidali, armătura se mișcă de-a lungul unei linii drepte și astfel produce o mișcare liniară.

Actuatori solenoidali cu armătură mobilă

Un actuator solenoidal cu o armătură mobilă funcționează similar unei mâini care aplaudă. Armătura se comportă ca o mână care este atrasă de forța magnetică către cealaltă mână. Deoarece cealaltă „mână” este staționară, este numită stator.

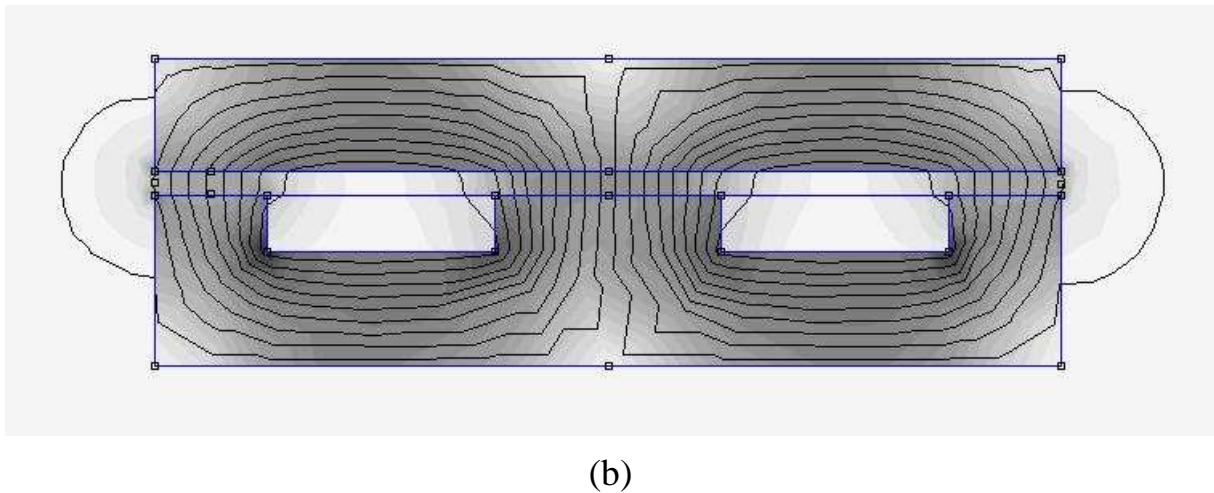
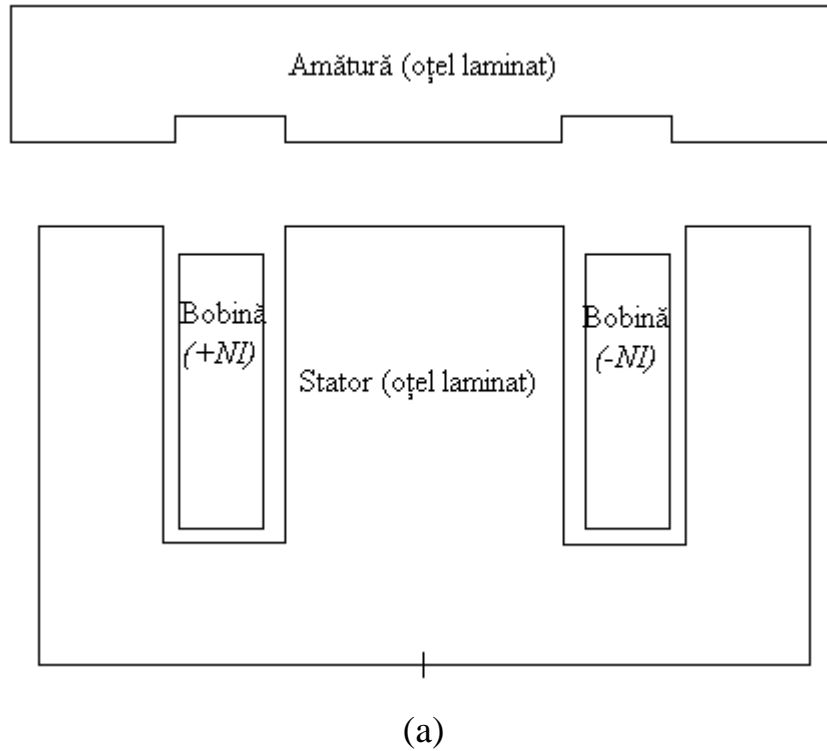


Figura 1 Actuator solenoidal cu armătură mobilă: (a) geometrie, unde oțelul este făcut din laminări subțiri ce se întind în planul paginii și sunt stivuite după direcția perpendiculară pe pagină; (b) liniile de flux obținute din analiza cu element finit.

Ca o mână care aplaudă, armătura atinge de obicei statorul în două zone. Într-o zonă, fluxul magnetic intră în armătură, în timp ce prin cealaltă zonă părăsește armătura, producând forțe magnetice utile în ambele zone. Deoarece fluxul magnetic trebuie întotdeauna să intre și să iasă din armătură (sau orice alt volum), armătura mobilă este deseori mai compactă decât alte modele. Armătura mobilă poate fi plată, ca o mână plată, sau poate avea creste, ca o mână făcută căuș. Bobina poate fi excitată fie de o tensiune (și curent) de curent continuu, fie de o tensiune (și curent) de curent alternativ.

Un exemplu de un solenoid cu armătură mobilă este afișat în Fig.1a. Este oarecum similar cu solenoidul Eaton Cutler-Hammer de curent alternativ. Liniile fluxului magnetic calculat de analiza cu element finit sunt afișate în Fig.1b.

Așa cum se observă din solenoidul din Fig.1, armătura mobilă și statorul pot fi făcute din oțel laminat. Laminarea oțelului minimizează curenții turbionari care reduc forța și cresc pierderile de putere. Dacă se folosește laminarea, tolele sunt de obicei stivuite astfel încât ele să formeze o geometrie bidimensională sau plană.

În locul unei forme plane, este foarte întâlnită și forma axisimetrică. Bobinele solenoidale sunt de obicei cilindrice și deci, axisimetrice. Dacă aceste bobine sunt înconjurate de oțel axisimetric, se obține un solenoid axisimetric. Cu toate acestea, deoarece formele axisimetrice nu se pot lamina la un preț redus, solenoizii axisimetrice sunt de obicei făcuți din oțel masiv.

Forța magnetică produsă de un actuator solenoidal variază în raport cu întrefierul și curentul prin bobină. Presupunem în scopul înțelegerii că permeabilitatea oțelului este infinită (și astfel reluctanța oțelului este nulă) și că cele două întrefieruri au fiecare lungimea g și poli de suprafețe egale. Teorema lui Ampere ne dă următoarea formulă pentru H în ambele întrefieruri:

$$H = \frac{N \cdot I}{2g} \quad (1)$$

și astfel inducția magnetică în ambele întrefieruri este:

$$B = \mu_0 \frac{N \cdot I}{2g} \quad (2)$$

Presiunea magnetică normală (perpendiculară) dată de tensorul tensiunilor lui Maxwell este egal cu pătratul inducției magnetice împărțit la de două ori permeabilitatea aerului. Presupunând ca valorile lui S ale suprafețelor celor doi poli sunt identice, forța magnetică totală este:

$$F = \left(\frac{\mu_0 \cdot N \cdot I}{2g} \right)^2 \cdot \frac{2S}{2\mu_0} = \frac{\mu_0 \cdot N^2 \cdot I^2 \cdot S}{4g^2} \quad (3)$$

Observați că această forță magnetică inerentă este invers proporțională cu pătratul întrefierului și astfel variază foarte mult cu respectivul întrefier. Este, de asemenea, proporțional cu pătratul curentului prin bobină astfel crește mult odată cu creșterea curentului. Când această forță este reprezentată pe axa x (poziția armăturii), se obține o curbă a atracției. Un set de curbe de atracție pentru diverse valori ale curentului trasate pe un singur grafic este folosit de designerii de actuatori și utilizatori.

În realitate, datorită curbelor $B-H$ reale ale oțelului și a formelor complexe ale oțelului și aerului, cei mai mulți actuatori solenoidali au curbe de atracție care nu urmăresc îndeaproape relația (3). Pentru majoritatea actuatorilor solenoidali, curbele de atracție sunt într-adevăr curbe, asta deoarece forța variază neliniar cu întrefierul și curentul.

2. Calcul analitic

Fluxuri și forțe pe solenoidul cu armătură mobilă de formă plană.

Figura 2. afișează un solenoid planar cu o armătură mobilă. Înfășurarea statorului are 200 de spire și are sensul curentului spre exteriorul miezului. Dimensiunile sunt $w = 10$ mm, $Al_1 = 5$ mm, $Al_2 = 30$ mm, $Al_3 = 5$ mm, $Sl_1 = 15$ mm, $Sl_2 = 30$ mm, $Sl_3 = 15$ mm, $g = 2$ mm.

(a) Se folosește metoda reluctanței, presupunând că nu există scăpări sau fluxuri de dispersie pentru a găsi valorile vectorilor \mathbf{B} și \mathbf{F} pe partea stângă a armăturii mobile pentru $I = 2$ A. Se găsește F în Newtoni pe metru adâncime a solenoidului în planul paginii.

(b) Se repetă (a) pentru a găsi vectorii \mathbf{B} și \mathbf{F} pe partea dreaptă a armăturii mobile.

(c) Se obțin rezultate cu programe de calcul cu element finit folosind materiale cu permeabilități mari (permeabilitatea relativă = 1404) în oțel.

(d) Se obține forța \mathbf{F} ca mai sus cu programul FEMM cu permeabilitatea relativă a oțelului = 10.000, și se explică de ce rezultatele diferă de cele obținute la punctul (c).

(e) Se repetă (d) pentru întrefier variind de la 4 la 0.5 mm cu pasul de 0.5 mm și curentul variind de la 2 la 4A cu pasul de 1A.

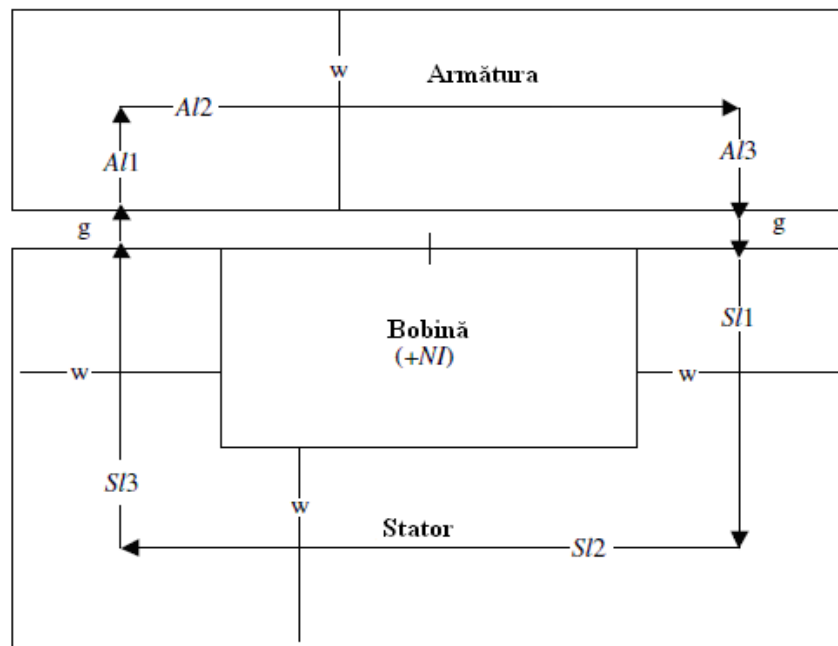


Figura 2. Exemplul unui actuator solenoidal cu armătură mobilă de formă plană.

Soluție

(a) Reluctanța totală este suma dintre reluctanța statorului R_S , reluctanța din stânga întrefierului R_{gL} , reluctanța armăturii R_a , și reluctanța din dreapta întrefierului R_{gR} . Fiecare se găsește din împărțirea lungimii la permeabilitate înmulțită cu aria și se obține:

$$R_s = \frac{S_{l1} + S_{l2} + S_{l3}}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot (w \cdot 1)} = \frac{(15 + 30 + 15) \cdot 10^{-3}}{1404 \cdot 12,57 \cdot 10^{-7} \cdot 10^{-2}} \cong 3.400 H^{-1}$$

$$R_{gL} = R_{gR} = \frac{g}{\mu_0 \cdot (w \cdot 1)} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{12,57 \cdot 10^{-7} \cdot 10^{-2}} = \frac{2 \cdot 10^5}{1,257} \cong 159.109 H^{-1}$$

$$R_a = \frac{A_{l1} + A_{l2} + A_{l3}}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot (w \cdot 1)} = \frac{(5 + 30 + 5) \cdot 10^{-3}}{1404 \cdot 12,57 \cdot 10^{-7} \cdot 10^{-2}} \cong 2.267 H^{-1}$$

Fluxul magnetic este atunci:

$$\varphi = \frac{N \cdot I}{R_{tot}} = \frac{N \cdot I}{R_s + R_{gL} + R_{gR} + R_a} = \frac{200 \cdot 2}{323.855} \cong 1,235 mWb$$

Inducția magnetică în fiecare întrefier (și în oțelului) se obține prin împărțirea fluxului magnetic la aria secțiunii ($w \cdot 1$):

$$B = \frac{\varphi}{w \cdot 1} = \frac{1,235 \cdot 10^{-3}}{10^{-2}} = 0,1235 T$$

Conform regulii mâinii drepte, direcția lui B în stânga întrefierului este în direcția lui $-y$. Presiunea pe fiecare întrefier este așadar:

$$P = \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{0,1235^2}{25,14 \cdot 10^{-7}} = 6.067 Pa, \text{ care, înmulțită cu suprafața întrefierului de } 0,01$$

m^2 , oferă o forță în stânga întrefierului: $F_m = 60,67 N$. Forța este întotdeauna de atracție, și astfel forța armăturii este în direcția $-y$.

(b) Prin simetrie, B are sensul invers, dar forța F este aceeași pe partea dreaptă a armăturii mobile. Așadar, forța totală prin metoda reluctanței este 121,34 N. Pentru o adâncime a solenoidului de d metri în pagină, forța trebuie înmulțită cu d .

(c) Pentru întrefierul prezentat de 2 mm, un model a fost făcut rapid folosind Finite Element Method Magnetics (FEMM) cu pașii de modelare ce vor fi descriși în capitolul 3. Forța calculată pe armătură pentru $I = 2 A$ este 103,39 N pe metru adâncime. Aceasta este mai mică decât forța estimată prin metoda reluctanței, parțial datorită faptului că metoda reluctanței nu ține cont de dispersia din apropierea polilor.

(d) Permeabilitatea mai mare crește forța calculată cu FEMM. Creșterea este mică deoarece reluctanța oțelului este mică în comparație cu reluctanța întrefierului pentru spațiul de 2 mm.

(e) Curbele de forță obținute sunt afișate în figura 3. Aceste curbe de atracție arată că forța este foarte neliniară (chiar și cu presupunerea unei curbe liniare B-H a oțelului de permeabilitate constantă), crescând mult cu un spațiu mic și curent mare.

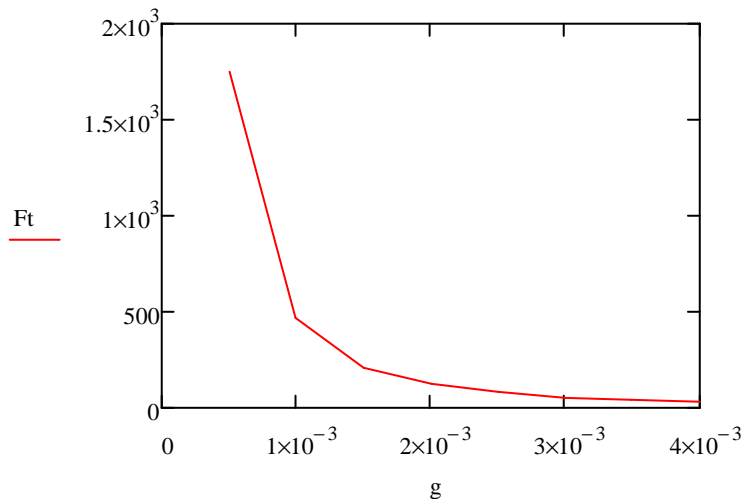


Figura 3. Dependența dintre forța magnetică și întrefier

3. Calcul numeric

Pentru calculul numeric s-a folosit programul de calcul FEMM (Finite Element Method Magnetics).

Prima etapă pentru analiza cu element finit o reprezintă definirea problemei. Pentru aceasta este necesară definirea unei frontiere în care să se realizeze simularea. Următorul pas a fost acela de a defini geometric actuatorul și apoi definirea materialelor tuturor elementelor ce compun simularea. Zona din exteriorul actuatorului și întrefierul se consideră din aer (având permeabilitatea relativă $\mu_r=1$ H/m), statorul și armătura mobilă din oțel (având $\mu_r=1404$ H/m), iar înfășurarea bobinei din cupru cu diametrul de 1mm ($\mu_r = 1$ H/m) având o densitate a curentului de 2 MA/m^2 .

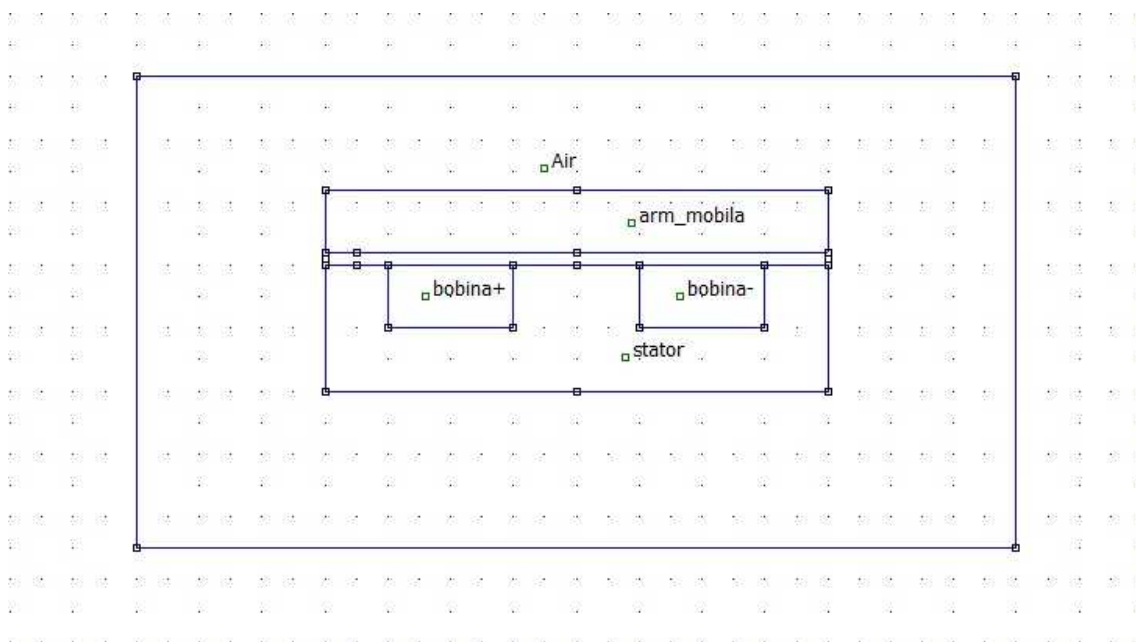


Figura 4. Problema introdusă în FEMM pentru efectuarea analizei cu element finit

Urmează apoi rularea simulării și afișarea rezultatelor. Figura 5. înfățișează rezultatele obținute cu FEMM. În zona întrefierului se obține o valoare medie aproximativă a inducției magnetice în întrefier de 0,114 T. Observăm că eroarea relativă între valorile calculate prin cele două metode este de 7,7%. Această eroare nu este mare dacă ținem cont de faptul că cele două metode impun ipoteze simplificatoare diferite și au algoritmi de calcul diferiți.

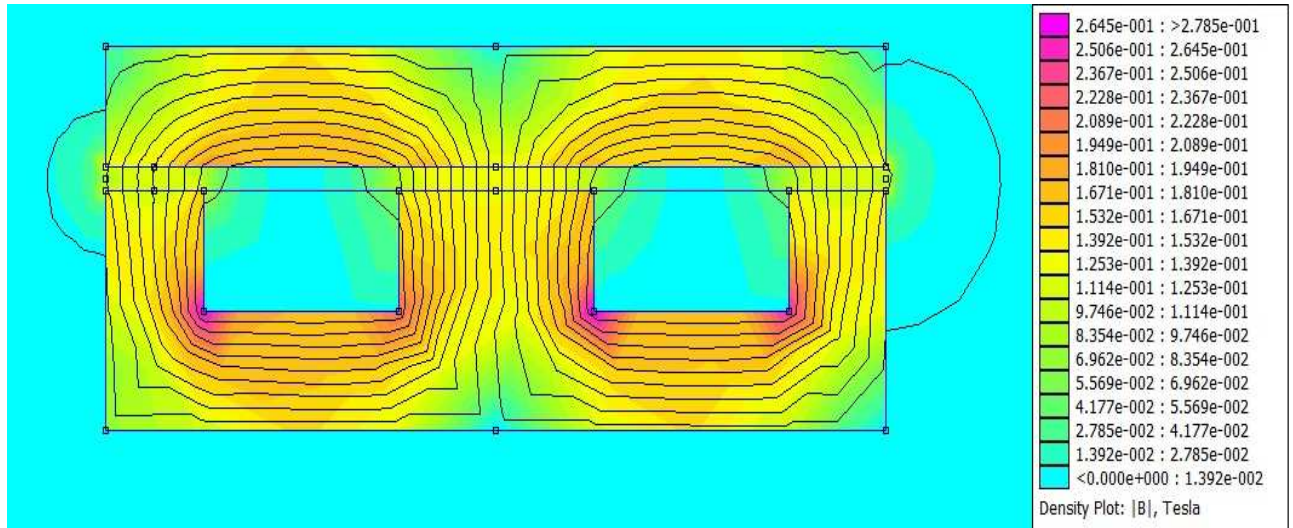
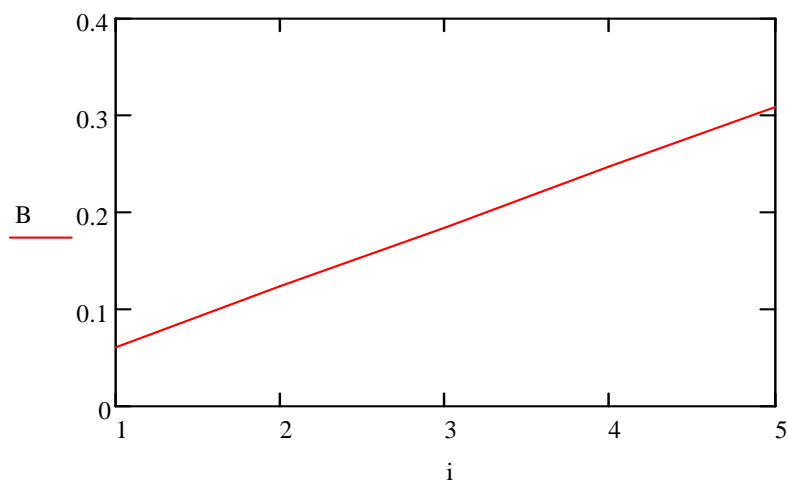


Figura 4. Liniile câmpului magnetic obținute din analiza cu element finit

4. Grafice de variație

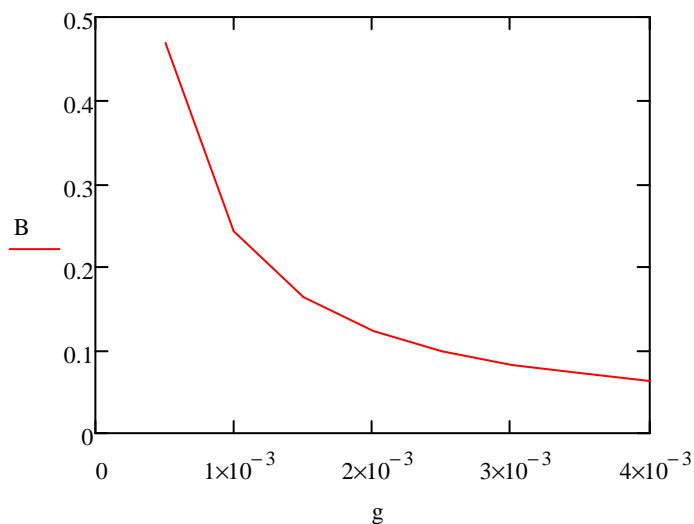
Utilizând aceleași formule ca în cazul calculului analitic și introducându-le într-un program de calcul se obține variația inducției magnetice și a forței magnetice pentru diferite valori ale intensității curentului electric, ale grosimii întrefierului sau ale permeabilității magnetice relative a statorului și a armăturii mobile.

Primul grafic trasat a fost cel al inducției magnetice în funcție de intensitatea curentului electric prin bobină. Curentul electric a luat valori între 1 și 5 A cu pasul de 1 A.

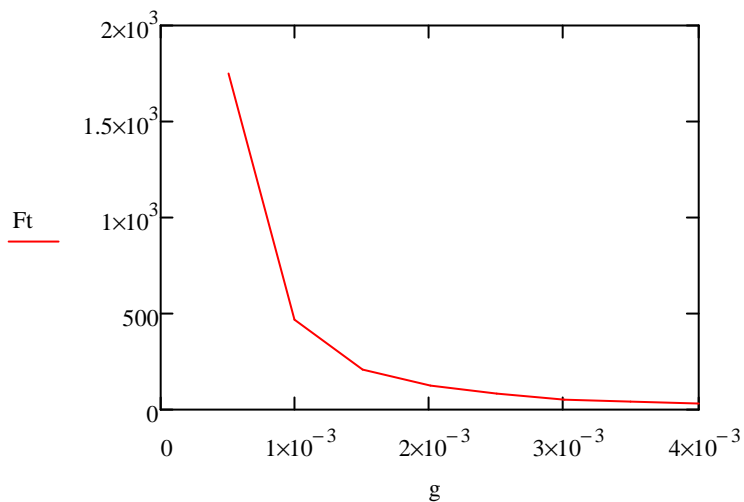


Graficul de dependență al inducției magnetice în funcție de intensitatea curentului prin bobină

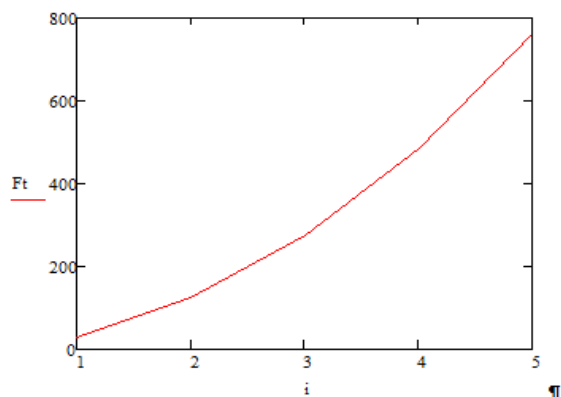
Următorul grafic trasat este cel al inducției magnetice în funcție de grosimea întrefierului, care a luat valori de la 0,5 până la 4 mm (cu pas de 0.5 mm).



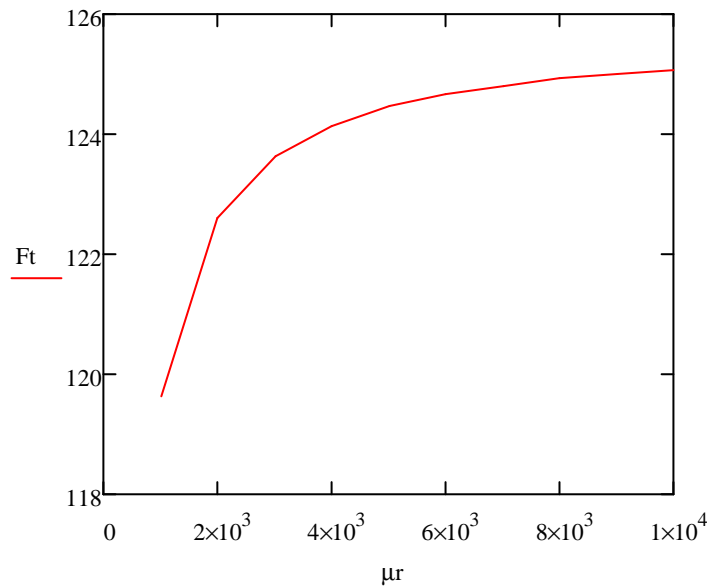
Având valorile inducției magnetice în funcție de grosimea întrefierului, se poate calcula și reprezenta grafic variația forței în funcție de întrefier.



Aceeași situație se întâlnește și în cazul variației forței magnetice în funcție de intensitatea curentului.



Calcululele se reiau, de data aceasta variindu-se permeabilitatea relativă a statorului și a armăturii mobile. Se obține graficul de variație a forței magnetice în funcție de permeabilitatea relativă.



5. Concluzii

În cadrul acestui proiect s-a calculat forța care se poate obține într-un actuator solenoidal cu armătură mobilă de formă plană modificând diferiți parametri. Am observat că forța obținută crește semnificativ odată cu mărirea intensității curentului prin circuit. O creștere mai puțin importantă a forței se observă atunci când se crește permeabilitatea relativă a armăturii mobile și statorului. Aceasta se datorează faptului că reluctanța oțelului este mult mai mică decât reluctanța întrefierului.

Pentru obținerea unei forțe cât mai mari, reluctanțele trebuie să scadă, în mod special cea a întrefierului deoarece aceasta are ponderea cea mai mare. Acest lucru se realizează micșorând întrefierul. Variația întrefierului este parametrul care influențează cel mai mult forța magnetică. Dacă pentru un întrefier de 0,5 mm se obține o forță de peste 1500 N, observăm că pentru cazul studiat în care întrefierul are 2 mm, obținem o forță de puțin peste 100 N.

Aceste tipuri de actuatori sunt folosiți în practică, în diverse sisteme de comandă și control. Un exemplu sugestiv al fi acela al releului. Acesta nu funcționează cu intensități mari ale curentului sau cu forțe magnetice mari. Viteza de comutație este o caracteristică importantă a releului, o valoare bună a acesteia obținându-se cu intensități și forțe mici. Acest lucru este important deoarece tendința actuală este de miniaturizare a acestor elemente de comandă.

Bibliografie

1. L. Dumitriu, „*Curs de Bazele Electrotehnicii*”
2. John R. Brauer, „*Magnetic Actuators and Sensors*”, IEEE PRESS, 2006
3. Lawrence J. Kamm, „*Understanding electro-mechanical engineering:an introduction to mechatronics*”, IEEE PRESS, 1996
4. Stephen Beebay, „*MEMS Mechanical Sensors*”, ARTECH HOUSE, 2004