

Studiul unui motor cu magnetostricțiune liniar

Yelda VELI¹, Alexandru M. MOREGA^{1,2}, Lucian PÎSLARU – DĂNESCU³,
Mihaela MOREGA¹, Marius POPA^{1,3}

¹Universitatea Politehnică din București – Facultatea de Inginerie Electrică

²Institutul de Statistică Matematică și Matematică Aplicată, Academia Română

³Institutul Național de Cercetare și Dezvoltare pentru Inginerie Electrică ICPE – CA

yelda.veli@upb.ro, amm@iem.pub.ro, lucian.pislaru@icpe-ca.ro, mihaela@iem.pub.ro,
marius.popa@icpe-ca.ro

Rezumat. Actuatoarele magnetostrictive sunt mașini electrice care utilizează un mediu magnetostrictiv ce se poate deforma sub acțiunea unui câmp magnetic extern. Câmpul magnetic de premagnetizare, necesar funcționării miezului magnetostrictiv, poate fi asigurat de magneți permanenți sau de înfășurări separate, prevăzute în acest scop. În această lucrare este analizată, prin modelare numerică, funcționarea unui motor magnetostrictiv liniar, simplificat, de mici dimensiuni, cu o înfășurare de magnetizare și o înfășurare de acționare dispuse coaxial cu bara din material magnetostrictiv, aici Terfenol-D. Ambele înfășurări sunt alimentate de la surse PWM, și este analizată funcționarea motorului alimentat fie în tensiune, fie în curent.

1. INTRODUCERE

Sub acțiunea unui câmp magnetic extern materialele magnetostrictive au proprietatea de a se deforma fie prin contracție, fie prin expansiune, păstrându-și același volum. Deformarea mecanică a materialului determină deplasarea părților constituente, specifice, ale dispozitivului [1–6]. Studii anterioare [2–4,6] au avut drept obiectiv simularea unor motoare liniare (actuatoare) magnetostrictive de mici dimensiuni ale căror înfășurări, de magnetizare și acționare, sunt alimentate în curent PWM, la aceeași frecvență de funcționare a semnalului, dar având factori de umplere diferiți. Datorită cvasi-simetriei pe care o prezintă un actuator axial, pentru modelare, domeniul de calcul utilizat a fost bidimensional, cu simetrie axială. Această simplificare introduce constrângeri asociate aplicării excitațiilor (de acționare și magnetizare) în curent, și nu în tensiune PWM, așa cum aceste dispozitive funcționează în realitate.

Constructiv, miezul magnetostrictiv, realizat din Terfenol-D este închis (magnetic) printr-o carcasă cilindrică construită din fier moale. Câmpul magnetic necesar deformării miezului este produs fie de o înfășurare de magnetizare, numită și de „bias” [2–4,6], împreună sau doar cu magneți permanenți [5]. Deformarea prin dilatare a barei din Terfenol-D sub acțiunea câmpului magnetic duce la deplasarea în direcție axială a tije de acționare, aflată în contact direct sau la o distanță mică față de aceasta.

Păstrând ipoteza simetriei axiale – constructivă și funcțională – în această lucrare este extinsă analiza motorului magnetostrictiv (MMS) la un model 3D, abordare ce permite simularea alimentării în tensiune și nu curent PWM. Sunt prezentate rezultate de modelare numerică FEM [7] pentru un motor magnetostrictiv de dimensiuni reduse, ale căror bobine de acționare, respectiv de magnetizare, sunt excitate în tensiune PWM, la o valoare de 5V. Comparativ, este modelată funcționarea MMS la alimentare în curent PWM. În ambele împrejurări, frecvență de alimentare este $f = 100$ Hz, iar factorul de umplere este $k = 30\%$ (din perioada semnalului).

2. MODELUL MATEMATIC

Figura 1 prezintă domeniul de calcul, modelul geometric simplificat, al MMS cu toate elementele constituente considerate.

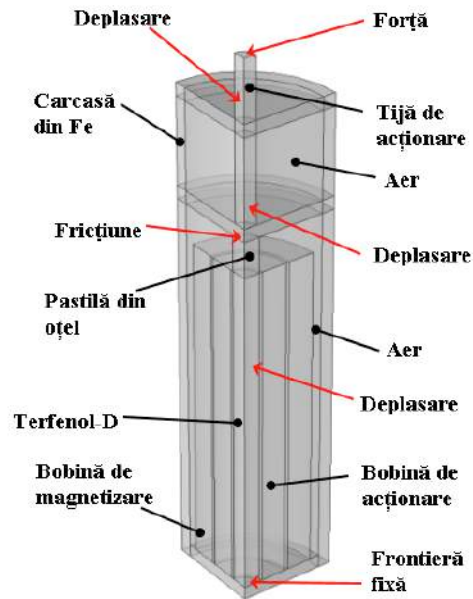


Fig. 1. Domeniul de calcul al actuatoarei magnetostrictive simplificate cu o bobină de acționare, respectiv o bobină de magnetizare.

Înfășurarea de acționare are 120 de spire, iar înfășurarea de magnetizare are de 80 de spire. Deplasarea tijei de acționare este datorată deformării miezului magnetostrictiv în câmpul magnetic rezultat. O piesă cilindrică, construită din oțel (Fig. 1), este în contact direct cu materialul magnetostrictiv și se deplasează în raport cu miezul magnetic (carcasa) dispozitivului. Miezul magnetostrictiv acționează tija de acționare prin intermediul acestei piese intermediare. Tensiunea de alimentare PWM este prezentată în Fig. 2.

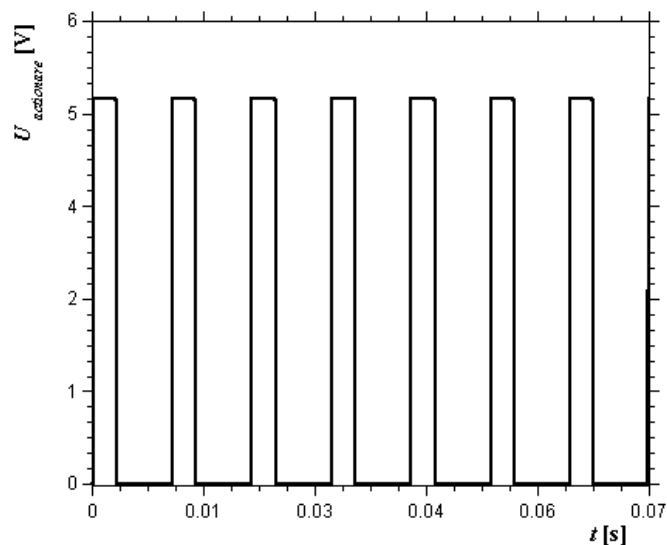


Fig. 2. Tensiunea de excitație PWM ale bobinelor de acționare, respectiv de magnetizare, cu frecvența $f = 100$ Hz și factorul de umplere, $k = 30\%$.

Câmpul electromagnetic este descris de legea inducției electromagnetice și legea circuitului magnetic:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}. \quad (2)$$

Aici \mathbf{E} [V/m] este intensitatea câmpului electric, \mathbf{B} [T] este inducția câmpului magnetic, \mathbf{H} [A/m] este intensitatea câmpului magnetic, \mathbf{J} [A/m²] este densitatea curentului electric de conducție. Legea constitutivă pentru miezul magnetostrictiv este [1–6]

$$\mathbf{B} = \mu_0 [\mathbf{H} + \mathbf{M}(\mathbf{H}, S_m) + \mathbf{M}_r], \quad (3)$$

unde \mathbf{M} [A/m] este magnetizația temporară, funcție de intensitatea câmpului magnetic \mathbf{H} și deformarea mecanică, S_m , iar \mathbf{M}_r [A/m] este magnetizația remanentă.

Dependența neliniară a coeficientului magnetostrictiv față de câmpul magnetic și față de sollicitarea mecanică este dată de [1–6]

$$\lambda = \frac{3}{2} \lambda_s \left(\frac{M}{M_s} \right)^2, \quad (4)$$

unde λ este coeficientul de magnetostricțiune, $\lambda_s = 0,0012$ este constanta de magnetostricțiune [2], iar M_s [A/m] este magnetizația de saturație. Miezul magnetic (carcasa), realizat din fier moale, este izolat magnetic și asigură închiderea liniilor de câmp.

Înfășurările sunt alcătuite, se presupune, din spire concentrice, însă din motive de simplificare bobinele s-au considerat a fi mediu omogen. Alimentarea lor în tensiune sau curent PWM, este modelată prin condiții la limită și deoarece s-a considerat ipoteza simetriei, doar o pătrime din model fiind considerat în simularea numerică, înfășurările bobinelor nu formează geometric o buclă închisă necesar închiderii curentului, fapt ce a dus la tratarea acestora ca înfășurări „numerice” [7], specificând numărul de spire și aria secțiunilor acestora, precum și borna de alimentare (de intrare), respectiv cea de ieșire.

Condițiile pe frontieră pentru problema structurală (mecanică) sunt specificate în Fig. 1. Capătul liber al tije de acționare nu este încărcat mecanic. Baza barei de Terfenol-D este constânsă (imobilă). Deplasarea este axială, constrânsă în direcția Oz (axial) – sunt impuse unei deplasări nule în plan transversal (direcțiile Ox și Oy) pentru atelajul mobil: bara din material magnetostrictiv, tija de acționare și piesa intermediară, din oțel.

Pentru contactul dintre piesa intermediară și flanșa superioară a carcasei exterioare, se impune o condiție de tip alunecare cu frecare, cu un coeficient de frecare ipotetic, $\mu_f = 0,01$.

Pentru excitația în curent PWM s-au utilizat valorile maxime furnizate de rezolvarea numerică a modelului ale căror bobine sunt excitate în tensiune PWM, iar formele de undă sunt reprezentate în Fig. 3.

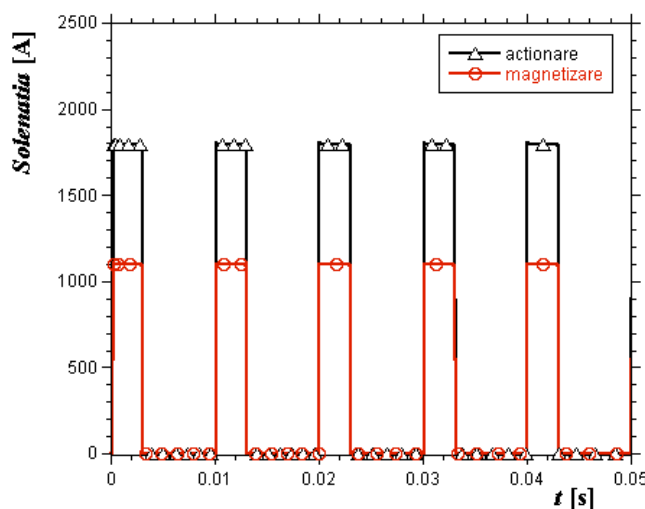
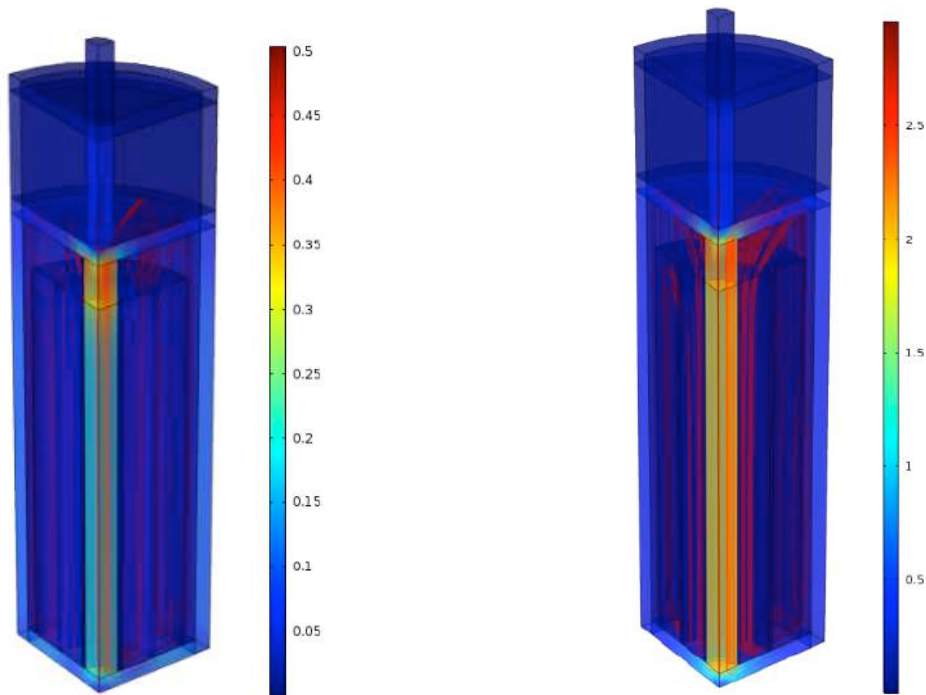


Fig. 3. Solenațiile PWM de acționare, respectiv de magnetizare, la frecvența $f = 100$ Hz și $k = 30\%$.

Pentru alimentarea în curent, amplitudinile solenațiilor sunt alese ca valorile lor maxime (magnetizare și acționare) obținute pentru excitația în tensiune PWM: 1708 A, pentru înfășurarea de acționare, respectiv 1044 A pentru înfășurarea de magnetizare.

3. REZULTATELE SIMULĂRII NUMERICE

Figura 3 prezintă spectrul inducției magnetice pentru două momente de timp, care corespund pozițiilor limită (inferior și superior) ale tije de acționare. Distribuția inducției magnetice pe suprafața domeniului de calcul a fost reprezentată pentru cazul în care alimentarea bobinelor este în tensiune PWM, la 5V și frecvența de 100 Hz, tensiunea de excitație aplicată bobinei de acționare, respectiv de magnetizare, este prezentată anterior în Fig. 2.



a. Înainte de deplasarea tije de acționare.

b. După deplasarea tije de acționare.

Fig. 3. Inducției magnetice pentru diferite momente de timp. Valorile sunt în Tesla.

Solenațiile celor două înfășurări, de acționare și de magnetizare, la alimentarea în tensiune PWM sunt reprezentate în Fig. 4.

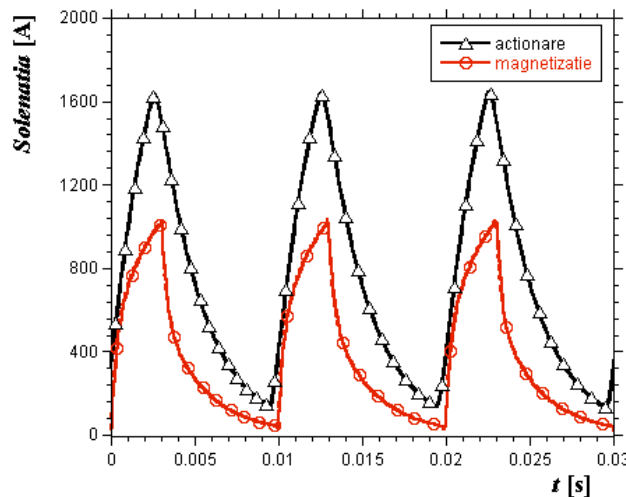
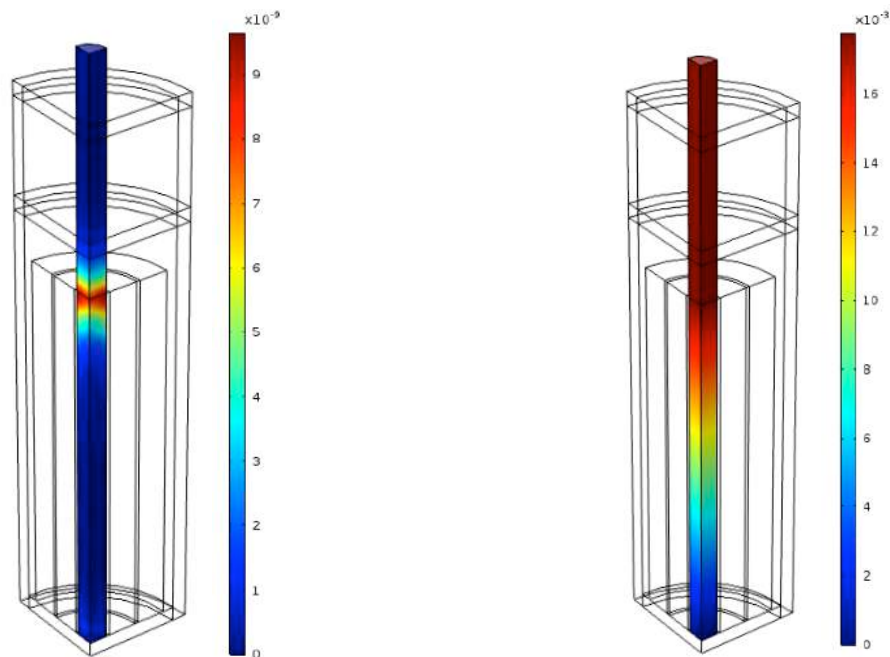


Fig.4. Solenațiile de acționare și magnetizare pentru alimentarea în tensiune PWM, 5V, $f = 100$ Hz, $k = 30\%$.

Starea inițială este de repaos (condiții inițiale nule). Deplasarea tijei mobile la două momente de timp remarcabile este prezentată în Fig. 5, evidențiindu-se deformarea înainte și după atingerea regimului cvasistaționar.



a. La începutul deformării.

b. După atingerea regimului cvasistaționar.

Fig. 5. Deplasarea tijei de acționare pe direcția Oz la două momente de timp. Valorile sunt în mm.

Figura 6 prezintă graficul deplasării tijei de acționare pentru ambele moduri de excitație a bobinelor, prin curent PWM, respectiv tensiune PWM. Se evidențiază comparativ deplasarea în funcție de cele două moduri de excitație, tensiune, respectiv curent.

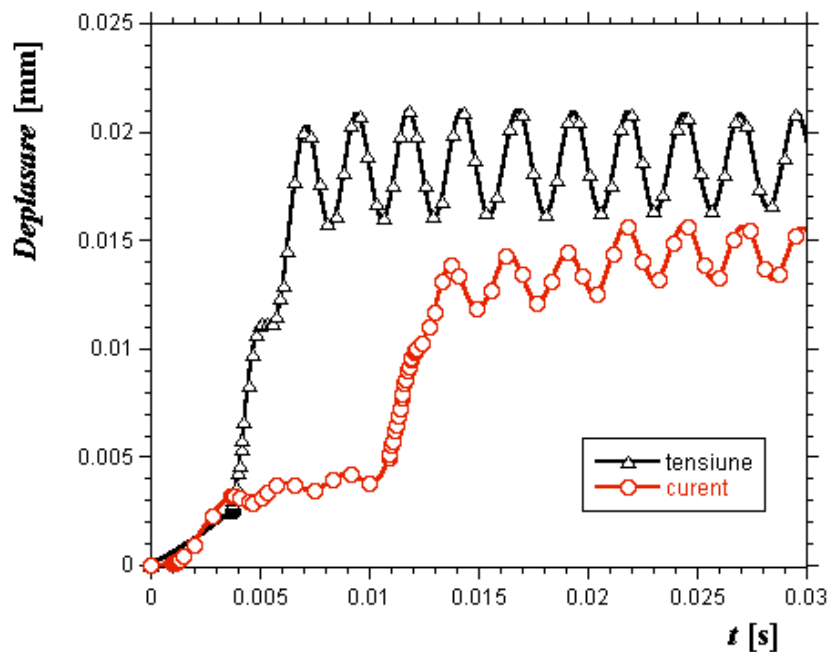


Fig. 6. Deplasarea tijei de acționare pentru alimentarea în tensiune, respectiv în curent PWM, la $f = 100$ Hz și $k = 30\%$. Frecarea este neglijată.

Figura 7 prezintă graficul deplasării tijei de acționare la excitație tensiune, când frecarea este considerată, respectiv neglijată. Coeficientul de frecare $\mu_f = 0,01$.

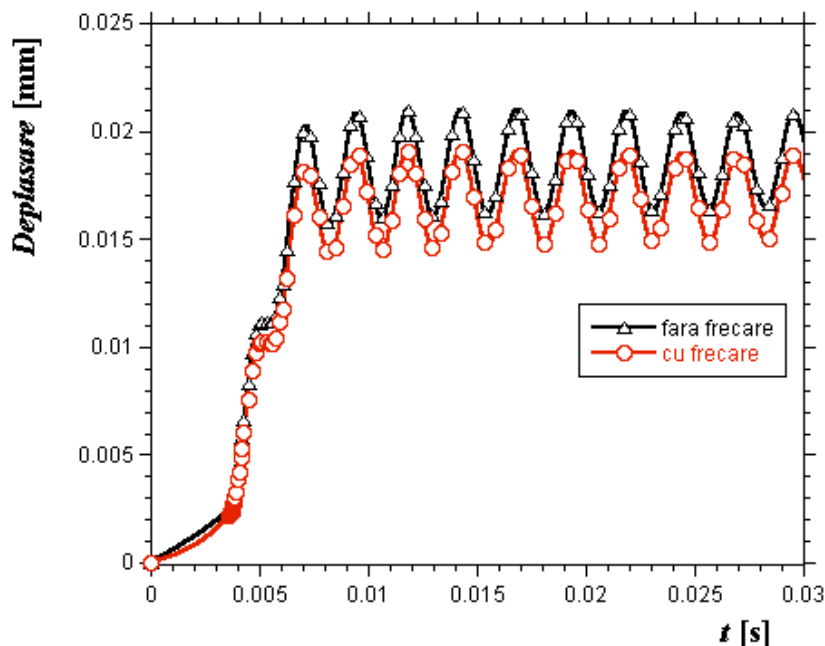


Fig. 7. Deplasarea tijei de acționare la tensiune PWM, $f = 100$ Hz și $k = 30\%$, cu și fără frecare.

Pentru alimentare în tensiune PWM, deplasarea maximă este $d = 0,022$ mm, însă cu un timp oarecare de stabilizare, pornind din condiții inițiale nule. Excitația în curent a bobinelor are ca rezultat o valoare a deplasării ușor mai scăzută, $d = 0,015$ mm.

Așa cum este de așteptat, neglijarea frecării la nivelul piesei intermediare din oțel are ca rezultat valori ușor mai ridicate față de cazul când este considerată. Un impact mai accentuat îl poate avea însă asupra transferului de căldură, studiu care va face obiectul cercetărilor viitoare. Coeficientul de frecare utilizat în simulare numerică este $\mu_f = 0,01$.

4. CONCLUZII

Câmpul magnetic necesar deformării materialului magnetostrictiv este furnizat de bobinele de acționare și de magnetizare. Alimentarea acestora în tensiune treaptă determină o variație neliniară, de natură inductivă, care confirmă că modelarea în excitație tensiune reprezintă mai bine funcționarea reală.

Deplasarea tijei de acționare la excitația înfășurărilor în curent este ușor redusă față de deplasarea tijei când înfășurările sunt alimentate în tensiune, cu observația că valorile necesare curentului au fost deduse din solenațiile furnizate de dispozitivul alimentat în tensiune.

Se poate observa din Fig.6 că variația deplasării la alimentarea în tensiune PWM se stabilizează mult mai rapid, după aproximativ o perioadă, iar timpul necesar atingerii unei deplasări stabilizate crește pentru excitarea bobinelor în curent.

Pentru rezultate cât mai aproape de realitate, frecarea nu trebuie neglijată. Valorile coeficientului de frecare au impact asupra valorilor deplasării tijei de acționare, însă prezența coeficientului de frecare nu modifică calitativ deplasarea, păstrându-și aceleași valori ale amplitudinii vârf-la-vârf.

Deoarece alimentarea se face de la un semnal PWM, deplasarea trebuia să revină la poziția inițială ca urmare a precomprimării tijei de acționare, o explicație ar putea să rezide din faptul că durata de timp necesară tijei de a reveni nu este suficient de mare, astfel încât înainte ca aceasta să se comprime începe o nouă perioadă *on – off* a semnalului PWM.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Slaughter, J.: “Multiphysics Models and Magnetostrictive Transducer Design”, ETREMA Products, Inc., Ames, IA, USA, COMSOL Confernce, 2013, Boston, USA.
- [2] Pîslaru-Dănescu L., Morega A.M., Morega M.: “A novel magnetostrictive injection actuator based on new giant magnetostrictive materials”, International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, Bucharest, 2011.
- [3] Popa M., Morega A.M., Pîslaru-Dănescu L., Morega M.: “Actuator magnetostrictiv – o analiză bidimensională”, Simpozionul de Mașini Electrice SME’16, București, 2016.
- [4] Pîslaru-Dănescu L., Morega A.M., Morega M.: “Electronic Drive System of a Linear Magnetostrictive Motor Designed for Outer Space Applications”, International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, Bucharest, 2015.
- [5] Popa M., Morega A.M., Pîslaru-Dănescu L., Morega M., Veli Y. “*Optimizarea materialului magnetic activ într-un actuator magnetostrictiv prevăzut cu bias electric suplimentar*”, Simpozionul de Mașini Electrice SME’18, București, 2018.
- [6] Morega A.M., Popa M., Morega M., Pîslaru-Dănescu L., “Shape and structure optimization of a magnetostrictive cored actuator”, Constructal Law & Second Law Conference 2015, CLC 2015, 18-19 May 2015, Parma (Italy).
- [7] Comsol Multyphysics User Guide, V. 5.3a.

The study of a linear magnetostriction motor

Yelda VELI¹, Alexandru M. MOREGA^{1,2}, Lucian PÎSLARU – DĂNESCU³,
Mihaela MOREGA¹, Marius POPA^{1,3}

¹University POLITEHNICA of Bucharest – Faculty of Electrical Engineering, Bucharest,
Romania

²Institute of Statistical Mathematics and Applied Mathematics, Romanian Academy

³National Institute for Research and Development in Electrical Engineering ICPE – CA,
Bucharest, Romania

yelda.veli@upb.ro, amm@iem.pub.ro, lucian.pislaru@icpe-ca.ro, mihaela@iem.pub.ro,
marius.popa@icpe-ca.ro

Abstract. Magnetostrictive actuators are electrical machines that uses a magnetostrictive media which can be displaced under the action of an external magnetic field. The magnetic field of premagnetization, necessary for the magnetostrictive core expansion, can be ensured by permanent magnets or by separate windings, provided for this purpose alone. In this paper a small dimension, linear, simplified, magnetostrictive motor is analyzed by means of numerical simulation, having a magnetization winding and a drive winding placed coaxial with the Terfenol – D magnetostrictive material bar. Both windings are PWM excited and the functioning either by voltage or by current excitation is analyzed.