

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN BUCUREȘTI

ŞCOALA DOCTORALĂ DE INGINERIE ELECTRICĂ

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

INTERACȚIUNI ELECTROMECANICE ÎN DIMENSIONAREA ȘI CONSTRUCȚIA UNOR SISTEME DE ACȚIONARE CU INTEGRARE MICROELECTROMECANICĂ

ELECTROMECHANICAL INTERACTIONS IN THE SIZING AND CONSTRUCTION OF DRIVING SYSTEMS WITH MICROELECTROMECHANICAL INTEGRATION

Autor: Ing. Marius POPA

Conducător de doctorat: Prof. dr. ing. Alexandru Mihail MOREGA

BUCUREȘTI 2021

CUPRINS

CUPRINS		2
INTRODUCERE		3
CAPITOLUL 1.	ACTUATORI MAGNETOSTRICTIVI	5
1.1 MATERIALE	MAGNETOSTRICTIVE	5
1.2 Terfenol-I) - CARACTERISTICI DE MATERIAL	5
1.3 ACTUATOR N	MAGNETOSTRICTIV LINIAR	7
1.4 ACTUATOR N	MAGNETOSTRICTIV CU BOBINE PLANARE	8
1.5. ACTUATOR	MAGNETOSTRICTIV CU BOBINE CILINDRICE	9
1.6. REALIZARE	PRACTICĂ A UNOR ACTUATORI MAGNETOSTRICTIVI LINIARI	13
1.7. Optimizari	E STRUCTURALĂ (CONSTRUCTALĂ) A MODELULUI, REALIZARE ȘI TESTARE VARIANTĂ	
IMBUNĂTĂȚITĂ.	ÎNCERCĂRI EXPERIMENTALE	13
CAPITOLUL 2.	ACTUATORI ELECTROMECANICI	21
CAPITOLUL 3.	ACTUATORI PIEZOELECTRICI	26
CAPITOLUL 4.	TRANSFORMATOR FLYBACK PENTRU CONVERTOR DE RECOLTARE A	
ENERGIEI AMB	IENTALE	29
CAPITOLUL 5.	TEHNOLOGII DE FABRICAȚIE UTILIZATE PENTRU REALIZAREA	
ACTUATORILO	R	33
5.1. TEHNOLOGI	I DE REALIZARE A BOBINELOR SI MICROBOBINELOR	
5.2 TEHNOLOGI	, DE PROCESARE A MAGNETILOR PERMANENTI	
5.3. TEHNOLOGI	I DE REALIZARE A ACTUATORILOR MAGNETOSTRICTIVI ȘI PIEZOELECTRICI	
5.4. Tehnologi	I DE PROCESARE A REPERELOR MECANICE PRIN TEHNOLOGII NECONVENȚIONALE	41
CONCLUZII GE	NERALE, CONTRIBUȚII, PERSPECTIVE	44
BIBLIOGRAFIE	SELECTIVĂ	47

Cuvinte cheie:

actuator, electromecanic, acționare, MEMS, magnetostrictiv, Terfenol, bobină planară, piezoelectric, transformator, energie ambientală, flyback, tehnologie de fabricație, simulare numerică, metode numerice, premagnetizare, bias, tehnologii neconvenționale, electroeroziune, discretizare, formă de undă, optimizare constructală, încercări experimentale, element Peltier, actuator tip consolă, model structural, frecvențe proprii, nanofluid, electrodepunere.

INTRODUCERE

Sistemele microelectromecanice (MEMS, acronim pentru *Micro-Electro-Mechanical System*) reprezintă integrarea unor elemente mecanice, a senzorilor, actuatorilor și a electronicii aferente pe un substrat comun, procesate prin tehnologii de microfabricație. Domeniile beneficiare ale aplicațiilor MEMS sunt numeroase: industria automobilelor, sănătate, controlul proceselor, industria aerospațială și de apărare, energie / mediu, aplicații industriale / aparatură de siguranță, educație / cercetare etc. Produsele de larg consum constituie o piață importantă pentru microsenzori, care se extinde rapid.

În acest contect, studierea interacțiunilor electromecanice într-o serie de sisteme de acționare ce conțin elemente de microelectromecanică, cu identificarea de soluții tehnologice pentru realizarea practică, constituie un subiect de actualitate, subiect analizat în prezenta lucrare sub titlul "*Interacțiuni electromecanice în dimensionarea și construcția unor sisteme de acționare cu integrare microelectromecanică*".

Primul capitol al lucrării prezintă actuatorii magnetostrictivi. Se prezintă elemente generale legate de acești actuatori, se analizează materialele magnetostrictive cu aplicații practice, aprofundându-se caracteristicile pentru Terfenol-D. Se analizează actuatorii liniari apoi se particularizează analizele pentru actuatorii magnetostrictivi cu bobine planare și pentru cei cu bobine cilindrice. Se prezintă realizarea practică a unui actuator magnetostrictiv, testarea, optimizarea constructală și îmbunătățirea soluției inițiale.

Capitolul al doilea al tezei are ca scop analiza actuatorilor electromecanici. S-au studiat actuatorii electromecanici de tip consolă cu grindă, în mai multe variante constructive. Au fost determinate deformațiile structurale pentru modurile proprii structurale, utilizînd modele reduse datorită simetriei și modele complete.

Capitolul al treilea al tezei prezintă actuatorii piezoelectrici. Pornind de la modelul matematic, se prezintă deformarea unui cilindru piezoelectric, se analizează deformările structurale și deformări asociate modurilor proprii ale statorului.

Capitolul al patrulea este dedicat unui transformator *flyback* pentru un convertor de recoltare a energiei ambientale. Este prezentat un transformator hibrid, cu ferită și nanofluid magnetic, ce pornește de la modelul matematic, urmărește rezultatele simulărilor numerice și prezintă detalii de realizare practică și rezultate din măsurători, cu schema de testare.

Al cincilea capitol are ca obictiv analiza, selecția și optimizarea proceselor tehnologice implicate în realizarea actuatorilor prezentați în capitolele anterioare. Se analizează tehnologiile de fabricație a bobinelor și microbobinelor, într-un singur strat și multistrat, cu exemple practice.

Urmează tehnologiile de procesare a magneților permanenți, prin electroeroziune și prin depunere în câmp magnetic. Pentru realizarea actuatorilor magnetostrictivi și piezoelectrici se prezintă tehnologiile utilizate în două cazuri concrete. Ca un element comun multor aplicații se prezintă realizarea și controlul elementelor de cuplaj aplicabile în domeniul microsistelor.

În încheiere sunt prezentate concluziile generale ale tezei, contribuțiile originale și perspectivele de dezvoltare.

CAPITOLUL 1. ACTUATORI MAGNETOSTRICTIVI

Proiectarea și construcția sistemelor de actuație bazate pe efect magnetostrictiv este un domeniu de interes atât în România cât și în lume, interes reieșit din numărul mare de articole și comunicări.

Actuatorii realizați practic se bazează pe proprietățile magnetostrictive ale materialului Terfenol-D, folosind activarea magnetică (biasul magnetic) și tensionarea mecanică (biasul mecanic) pentru a asigura funcționarea într-o zonă cu deformări relative $\Delta L/L$ importante la încărcarea dorită (fig. 1). Aceste deformări pot fi aproximate liniar pe domenii relativ extinse ale curbei alungirii relative în funcție de intensitatea câmpului magnetic pentru materialul Terfenol-D și astfel să avem o variație proporțională cu câmpul magnetic aplicat.

1.1 Materiale magnetostrictive

Magnetostricțiunea este o proprietate a materialelor feromagnetice având ca principal efect dilatarea (magnetostricțiunea pozitivă) sau contracția (magnetostricțiunea negativă) unui miez supus acțiunii unui câmp magnetic orientat în direcția deformării. Efectul se manifestă preponderent în direcția câmpului magnetic (efect longitudinal), alungirea relativă $\Delta L/L$ prezentând o tendință de saturație.

Alungirea relativă $\Delta L/L$ la variația câmpului magnetic, numită coeficient magnetostrictiv λ , este măsurabilă la majoritatea materialelor feromagnetice dar la temperaturi uzuale efectul este redus. Prin alierea cu anumite elemente se poate realiza o magnetostricțiune "uriașă" (*giant magnetostriction - GMM*), sub acțiunea unor câmpuri magnetice exterioare mici. Aliajele conținând Fe, Dy și Tb, de tipul Tb_xDy_{1-x}Fe₂ sunt folosite pentru aplicații practice, Terfenol-D (*Ter -terbium, fe - ferrum, nol - Naval Ordonance Laboratory* și *D -dysprosium*) cu formula Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.9} fiind cel mai folosit material magnetostrictiv.

Aliajele de tip Galfenol prezintă un coeficient magnetostricitv moderat ($\lambda \sim 350$ ppm) la intensități ale câmpului magnetic reduse (8 kA/m), cu histerezis foarte scăzut și variații mici ale proprietăților magnetomecanice pentru temperaturi între -20 și 80° C, temperatură Curie de 675° C și rezistență bună la coroziune, putând lucra în medii dure. Materialele magnetostrictive (Terfenol, Galfenol, Alfenol) nu se fabrică industrial în țară, existând un număr mic de producători de astfel de materiale la nivel mondial.

1.2 Terfenol-D - caracteristici de material

Terfenolul-D sub formă de bară furnizează o dilatare (magnetostricțiune pozitivă) importantă, la intensități ale câmpului magnetic de 50-200 kA/m, dilatare influențată de pretensionarea (bias mecanic) aplicată conform graficului din fig. 1.1.



Figura 1.1 Variația alungirii relative în funcție de intensitatea câmpului magnetic, cu diverse pretensionări (bias mecanic)

Prin modificarea concentrațiilor elementelor componente ale Terfenol-D ($Tb_xDy_{1-x}Fe_{1,9...2}$) se obțin variante de Terfenol-D cu comportări diferite la temperaturi scăzute. Astfel, scăderea concentrației de Terbiu duce la alungiri relative reduse pentru temperaturi negative (fig. 1.2).



Figura 1.2 Variația alungirii relative la saturație în funcție de temperatură, pentru diverse variante de Terfenol-D

Coeficientul magnetostrictiv λ variază în funcție de intensitatea câmpului magnetic (pentru o prestrângere și o premagnetizare fixate), existând pe curba de variație $\Delta L/L$ funcție de intensitatea câmpului magnetic (fig. 1.1) o regiune unde panta este mare iar relația dintre deformare și intensitatea câmpului magnetic este cvasiliniară.

Câmpul de activare (bias) se poate asigura de către magneți permanenți și / sau de o solenație de bias, soluția fiind aleasă în funcție de specificul aplicației.

Pretensionarea mecanică (bias mecanic – aplicat prin intermediul unui arc cu constantă elastică cunoscută) se alege astfel încât să obținem deformările dorite cu o intensitate a câmpului magnetic de bias cât mai redusă.

1.3 Actuator magnetostrictiv liniar

În literatură sunt prezentate exemple de actuatori magnetostrictivi care se află la nivel de model experimental, dar există numeroase produse comerciale (fig. 1.3) care certifică interesul pentru astfel de produse.







a) DMA 100L

b) AMA 400

c) AMA 50

Figura 1.3 Actuator magnetostriciv direct (DMA) și actuatori magnetostrictivi cu amplificare (AMA) produși de firma Cedrat Technology [7]

Actuatorul magnetostrictiv direct produs de Cedrat Technologies denumit DMA 100L a fost creat pentru aplicații ce necesită exercitarea de presiuni înalte. Câmpul magnetic de bias poate fi ajustat de la 0 la 100 kA/m. Deasemenea pretensionarea se poate ajusta de la 0 - 40MPa.

Actuatorul magnetostrictiv cu amplificare AMA 400 sau AMA 50 dezvoltat de Cedrat Technologies conține o carcasă ce pretensionează tija magnetostrictivă și amplifică deplasarea. Această soluție este brevetată de Cedrat Technologies și folosită inițial pentru fabricarea actuatorilor pizoelectrici cu amplificare.

Principiul de funcționare

Funcționarea unui actuator magnetostrictiv (fig. 1.4) este următoarea: miezul magnetostrictiv (4) este prestrâns cu ajutorul arcului de pretensionare (2). Câmpul magnetic de bias este produs de magneți permanenți (1) sau / și de bobina de bias, curentul prin bobina de acționare (3) generând câmpul magnetic de excitație necesar alungirii controlate a miezului magnetostrictiv. Alungirea miezului se transmite elementului de execuție al actuatorului prin tija (5).



Figura 1.4 Structura simplificată a unui actuator magnetostrictiv [după 8]

magneți permanenți (1), arc de pretensionare (2), bobină de acționare (3), miez magnetostrictiv (4), tijă de acționare (5),

Pentru analiza actuatorilor magnetostrictivi se pornește de la structuri simplificate cum ar fi cea prezentată în fig. 1.4, în care nu apar traductori de temperatură, senzori de forță și alte elemente

constructive. Se analizează doar fenomenul de bază pentru a se permite o predimensioare și simularea numerică pentru a optimiza structura, urmând să se introducă elemente suplimentare pe măsură ce se identifică puncte sensibile.

1.4 Actuator magnetostrictiv cu bobine planare

O variantă nouă de microactuator magnetostrictiv este aceea care folosește bobine planare, bobine ce pot fi produse în serie mare la costuri reduse. În fig. 1.5 se prezintă schema de principiu a microactuatorului magnetostrictiv cu bobine planare [9]. Elementele componente sunt: bobinele de acționare (1), bobinele de premagnetizare (2), miezul magnetostrictiv (3), magneții de premagnetizare (4), elementul elastic de pretensionare (5), carcasa și capacul (6), și inelul de acționare (7).

Premagnetizarea este asigurată de bobinele de premagnetizare (bias), de magneții permanenți sau de combinația celor două elemente. Această soluție permite schimbarea cu uşurință a intensității câmpului magnetic generat de bias.





Bobină de acționare (1), bobină de premagnetizare (2), miez magnetostrictiv (3), magnet de premagnetizare (4), element elastic de pretensionare (5), carcasă și capac (6), inel acționare (7). Rezultate numerice:



a) Inducția magnetică.



b) Deplasarea inelului de acționare (max. 0,0868µm, mărită de 2592 ori).

Figura 1.6 Rezultate ale simulărilor numerice pentru modelul de microactuator cu bobine planare.

S-au obținut modificări de ordinul nanometrilor la deplasarea maximă, aceste bobine putând fi folosite pentru calibrarea microactuatorului.

Deoarece bobinele de acționare și cele de premagnetizare (bias) sunt alimentate cu un semnal PWM de 2kHz cu același factor de umplere - reglabil printr-un parametru, putem asimila bobinele de bias unor bobine de acționare. În regim dinamic, alimentând bobinele cu un semnal dreptunghiular (fig. 1.7a) obținem pentru inelul de acționare o deplasare de aproximativ 20nm cu frecvența de alimentare a bobinelor.



Figura 1.7 Funcționarea microactuatorului cu bobine planare în regim dinamic.

1.5. Actuator magnetostrictiv cu bobine cilindrice

Cerințele pentru un actuator liniar magnetostrictiv cu utilizare în domeniu spațial impun respectarea unor condiții specifice legate de funcționarea în spațiul cosmic: consum redus de energie, alimentarea din panouri solare (tensiuni de lucru în gama 18V_{CC}...32V_{CC}), fiabilitate crescută / imposibilitatea de a realiza mentenanță sau reparații, funcționarea în absența accelerației gravitaționale, radiații, lucrul într-o gamă extinsă de temperaturi (funcționare zi / noapte) și cu gradient mare de temperatură (fața însorită și fața umbrită).



Figura 1.8 Actuator liniar magnetostrictiv, schema constructivă

Schema constructivă a actuatorului magnetostrictiv este prezentată în fig. 1.8: 1- ax (tijă de acționare), 2 - bucșă ghidare, 3- carcasă, 4 - bobină bias magnetic, 5 - resort (bias mecanic), 6 - magnet permanent superior, 7 - tijă Terfenol-D, 8 - bobină acționare, 9 - magnet permanent inferior, 10 - capac.

Funcționarea unui astfel de actuator liniar magnetostrictiv se bazează pe modificarea dimensională a tijei (7) din material magnetostrictiv (Terfenol-D) – sub acțiunea cumulată a câmpului magnetic și a unui resort (5).

Dimensionari / Simulări.

s-a optat pentru o structură clasică, cu bobină cilindrică. S-a analizat influența frecvenței de acționare a bobinei cu un semnal PWM asupra deplasării.



a) Inducția magnetică.

b) Deplasarea tijei de acționare (mărită de 300 ori).

Figura 1.9 Rezultate ale simulărilor numerice pentru modelul clasic de microactuator

Pe măsură ce creste frecventa semnalului PWM excursia maximă a tijei scade, actuatorul magnetostrictiv nereuşind să răspundă excitației.



Figura 1.10 Deplasarea tijei în funcție de frecvența de acționare (log)

Rezultatele obținute la varierea factorului de umplere a semnaluli PWM arată un regim tranzitoriu diferit, de la 80µs pentru $K_U = 20\%$ la 20µs pentru $K_U = 80\%$.



a) $K_U = 20\%$

Figura 1.11 Deplasarea tijei de acționare la comenzi PWM cu factor de umplere K_U variabil (f=50Hz)

Pentru a analiza funcționarea microactuatorului în ipoteza în care există 2 bobine - o bobină de premagnetizare (bias) și una de comandă / acționare - pornind de la modelul anterior, s-a divizat bobina existentă în două părți cu secțiuni egale, fiecare bobină păstrând același curent de vârf prin spire.

Folosind un factor de umplere $K_{bias} = 80\%$ pentru semnalul de premagnetizare (bias) și un factor de umplere $K_{act} = 20\%$ pentru semnalul de acționare s-au obținut rezultatele prezentate în fig. 1.12. Plasarea bobinei de acționare la interior conduce la maximizarea deplasării.





b) bobina de bias la interior

Figura 1.12 Rezultate ale simulărilor numerice pentru modelul cu două bobine. Factor de umplere $K_{act} = 20\%$ pentru acționare și $K_{bias} = 80\%$ pentru bias (f = 15Hz)

Pentru ca actuatorul să poată fi folosit pentru o gamă largă de aplicații, este necesar un factor de umplere variabil în gama 10% - 90% și o frecvență de lucru în domeniul 20Hz - 12kHz. Pentru testarea răspunsului actuatorului peste aceste limite este necesar ca sistemul de control să poată asigura frecvențe de lucru superioare, de până la 20kHz. Diagrama de timp a semnalelor este cea din fig. 1.13.





 U_{act} – tensiunea la bornele bobinei de acționare,

Ubias – tensiunea la bornele bobinei de bias magnetic,

 $K_{act} = 10\% \div 90\%$, tipic 40% - factorul de umplere pentru tensiunea U_{act},

 $K_{bias} = 15\% \div 95\%$, tipic 50% - factorul de umplere pentru tensiunea U_{bias},

$$f_{act} = f_{bias} = 20$$
Hz $\div 20$ kHz.



Figura 1.14 Schema pentru comanda în punte a bobinelor de acționare și de activare (bias magnetic)

Pentru acționarea bobinelor s-a conceput și realizat, o placă de comandă ce permite alimentarea bobinelor modulat în frecvență. Puntea prezintă două intrări logice de activare (V_{en1} și V_{en2}) și un curent maxim (valoare de vârf) de 4A.

1.6. Realizare practică a unor actuatori magnetostrictivi liniari

Pentru a valida soluțiile obținute în urma simulărilor numerice, am realizat practic un actuator magnetostrictiv de mici dimensiuni cu care am realizat teste.



Figura 1.15 Actuator magnetostrictiv liniar: *1* capac, *2* tijă, *3* arc pentru pretensionare, *4* cilindru din Terfenol-D, 5 bobină de polarizare (bias), 6 bobină de activare, 7 element de poziționare inferior, *8* carcase, *9* mosor (suport) pentru bobina de activare, *10* mosor (suport) pentru bobina de polarizare, *11* magnet permanent pentru polarizare. Elemente componente realizate fizic

Motorul liniar magnetostrictiv este acționat de către blocurile electronice de comandă și control.

Bobina de bias magnetic asigură - împreună cu magneții permanenți - punctul static de funcționare al motorului liniar. Bobina de acționare asigură câmpul magnetic necesar efectuării deplasării de către materialul activ al actuatorului în mod controlat.

1.7. Optimizare structurală (constructală) a modelului, realizare și testare variantă imbunătățită. Încercări experimentale.

Materialul magnetostrictiv (Terfenol–D) este în cantitate finită. O primă etapă de optimizare pentru această variantă de actuator se referă la cantitatea de magnet permanent pentru care, la o excitație dată, deplasarea liniară a axului actuatorului este maximă. O a doua etapă de optimizare se referă la distribuția optimă a materialului magnetic (magnet permanent) și a materialului magnetostrictiv în coloana centrală a circuitului magnetic al actuatorului.

Pentru optimizarea cantității de material magnetic și a ditribuției sale optime în coloana centrală a actuatorului magnetostrictiv s-a folosit un design simplificat, care reține doar componentele strict necesare în funcționarea și dimensionarea sa. Modelul matematic utilizat este modelul simplificat, 2D axial–simetric, ce utilizează simetria axială a dispozitivului și permite reducerea

efortului numeric de rezolvare, inclusiv a timpului de calcul necesar.

Dezavatajul acestei abordări este faptul că excitația electrică trebuie introdusă prin curent și nu prin tensiune – actuatorul fizic fiind controlat prin pulsuri de tensiune modulate (PWM). Această dificultate este (parțial) înlăturată prin introducerea unor curenți cu forme de undă similare celor înregistrate în cursul încercărilor actuatorului realizat fizic.



a) Tensiunea și curentul de acționare.



b) Curentul de acționare, semnal digitizat.

c) Curentul de acționare utilizat în simulare.

Figura 1.16 Curentul de acționare, f = 100 Hz, $k_{act} = 70\%$.

Pentru a obține o simulare apropiată de condițiile experimentale, s-au utilizat forme de undă ale curentului achiziționate de la un actuator realizat fizic și testat.

Simulările au folosit un volum total de materialul magnetic activ de aprox. 600 mm³ (189π mm³) – magnet permanent și material magnetostrictiv (Terfenol–D).

Deoarece curentul de activare (bias) trebuie să premagnetizeze (să activeze magnetic), materialului magnetostrictiv, factorul de umplere al acestui curent, k_{bias} , trebuie să acopere (temporal) factorul de umplere al curentului de acționare, k_{act} . Prezentăm rezultatele obținute pentru valori fixate ale factorilor de umplere: $k_{act} = 70\%$ (acționare) și $k_{bias} = 80\%$ (bias). Folosind curenți PWM crenel sa obținut deplasarea tijei de acționare cu un maxim cvasistaționar de 4,850µm, ca în fig. 1.17.



Figura 1.17 Deplasarea tijei de acționare, f = 100 Hz, $k_{act} = 70\%$, curent treaptă (crenel).

Pentru a evalua o comportare apropiată de situația reală a actuatorului, s-au utilizat formele de undă în care intervalul "on" al curentului de bias începe în avans și se termină întârziat, cu 0,5 ms, față de intervalul "on" al curentul de acționare.

Cu aceste date de intrare s-a obținut deplasarea tijei de acționare cu un maxim de 4,353 μ m (fig. 1.18). Trebuie remarcat că analiza comportării actuatorului la curent treaptă (ideal) este pur teoretică, conducând la rezultate supraevaluate pentru deplasarea tijei de aționare.



Figura 1.18. Deplasarea tijei de acționare, f = 100 Hz, $k_{act} = 70\%$, curent real (măsurat).

Pentru o primă iterație în ceea ce privește optimizarea raportului volumetric între magnetul permanent și materialul magnetostrictiv din coloana activă, am generat geometrii în care volumul de magnet permanent a fost segmentat axial și segmentele astfel rezultate au fost intercalate în coloana de Terfenol–D divizată corespunzător. Înălțimea segmentelor de magnet permanent a fost între 1 mm și 10 mm (volumele fiind între 9π mm³și 90π mm³).



Figura 1.19 Deplasarea tijei de acționare în funcție de înălțimea magnetului permanent.

Optimizarea raportului volumetric între magnetul permanent și materialul magnetostrictiv din coloana activă prin variația înălțimii magnetului permanent între 1 mm și 10 mm (volume între 9π mm³și 90π mm³) a condus la deplasări maxime ale tijei de acționare între 3,984 µm și 4,353 µm. Se observă maximul care apare pentru înălțimea de 4 mm a magnetului permanent.

Pentru optimizarea distribuției volumului de magnet și a celui de material magnetostrictiv în coloana activă am generat geometrii în care volumul de magnet permanent de 36π mm³ a fost debitat în două, trei și patru volume egale. Deasemenea, volumul de Terfenol–D de 153π mm³ a fost debitat în trei, patru și respectiv cinci volume egale, fiind intercalate cu volumele de magnet permanent.



Figura 1.20 Deplasarea tijei de acționare în funcție de numărul de magneți (volum total constant).

Pentru volumul de magnet permanent întreg și apoi împărțit în două, trei și patru volume (segmente) s-au opținut deplasări maxime ale tijei de acționare de 4,353 μ m, 4,368 μ m, 4,372 μ m și respectiv de 4,373 μ m.

Se observă că maximul încă nu a fost atins, dar dificultățile tehnologice nu justifică debitări de magneți permanenți cu înălțime sub 1 mm.

A fost extinsă analiza actuatorului magnetostrictiv la un model 3D, abordare ce a permis simularea alimentării în tensiune și nu curent PWM.

Solenațiile celor două înfășurări (acționare și premagnetizare) la alimentarea PWM în tensiune sunt reprezentate în fig. 1.21.



Figura 1.21. Solenațiile de acționare și premagnetizare pentru alimentarea PWM în tensiune

(5V, f = 100 Hz, k = 30%).

Simulările au pornit de la starea inițială de repaos (condiții ințiale nule), deplasarea tijei mobile la două momente de timp fiind prezentată în fig. 1.22, evidențiind deformarea înainte și după atingerea regimului cvasistaționar.



a. La începutul deformării.

b. După atingerea regimului cvasistaționar.

Figura 1.22. Deplasarea tijei de acționare (mm) pe direcția Oz la două momente de timp.

Alimentarea bobinelor de acționare și de premagnetizare ale actuatorului în tensiune treaptă determină o variație neliniară a curentului, de natură inductivă, în conformitate cu funcționarea reală.

O posibilitate de optimizare a actuatorului o reprezintă optimizarea geometrică, în ceea ce privește factorul de formă (numit și rată de aspect, reprezentând raportul înălțime / rază = L/R). Plecând de la o valoare inițială a raportului L/R, ca referință (Fig. 1.23) și păstrând constant volumul de material magnetostrictiv pe care proiectantul decide să-l folosească, se determină deplasarea pentru diferite valori L/R. Figura 1.23 prezintă deformările pentru două variante: modelul de referință și modelul cu factorul de formă optimizat, cu deformările (marcate cu roșu) amplificate pentru o vizualizare mai bună.



Figura 1.23. Actuatori magnetostrictivi - model de referință și model cu factorul de formă optimizat (volumul de material magnetostrictiv constant). (a) pentru L/R = 4, maximul deplasării este de 2.8μm. (b) pentru actuatorul cu factorul de formă optimizat (L/R = 8.1), maximul deplasării este 4,7μm. (c) optimizarea deplasării în funcție de factorul de formă geometric și volumul de material magnetostrictiv

Creșterea înălțimii și scăderea razei tijei de material magnetostrictiv determină creșterea deplasării maxime, până la apariția saturației magnetice.

Pentru testarea modelului funcțional de actuator magnetostrictiv a fost necesară realizarea etajelor electronice de comandă și control. Astfel s-au realizat circuite imprimate pentru modulul electronic de comanda și control al bobinelor, pentru modulul de putere, pentru modulul de comandă al elementelor Peltier precum și modulele necesare pentru alimentare și stabilizare a tensiunilor. Ca exemplu, modulul electronic de putere pentru acționarea bobinelor actuatorului liniar magnetostrictiv este prezentat în figura 1.24.





Figura 1.24. Circuitul imprimat al modulului electronic de putere pentru acționarea bobinelor, proiect CAD și realizarea practică echipată cu componente electronice.

Testarea modelului funcțional al actuatorului liniar magnetostrictiv

Pentru determinarea forțelor dezvoltate de către actuatorul liniar magnetostrictiv, acesta a fost testat în cadrul Laboratorului de Încercări din cadrul SC STRAERO SA. Metoda de încercare a constat în generarea și măsurarea forței dezvoltate de actuatorul liniar magnetostrictiv.



Figura 1.25. Echipamentul de testare cu actuatorul montat - elemente componente și configurația utilizată practic.

Se prezintă în continuare un exemplu cu semnalul reprezentând forța dezvoltată de actuatorul liniar magnetostrictiv, pentru tensiunea de alimentare de 18 V_{CC} .



Figura 1.26. Forța dezvoltată de actuatorul liniar magnetostrictiv în funcție de tensiunea de alimentare la frecvența de acționare de 111,5 Hz

Pentru determinarea amplitudinii vârf la vârf a oscilației mecanice realizate de către echipamentul mobil al actuatorului liniar magnetostrictiv s-a utilizat un sistem de măsurare ce utilizeaza interferometru Agilent 5529B.

Se prezintă variația amplitudinii oscilatiei mecanice realizate de către miezul magnetostrictiv funcție de timp pentru f = 100 Hz, (figura 1.27), amplitudinea vârf la vârf a oscilației mecanice este de $A_{100} = 30 \ \mu m$.



Figura 1.27. Deplasarea miezului magnetostrictiv funcție de timp, pentru tensiuni PWM cu $f = 100 \text{ Hz}, U = 32 \text{ V}_{vv}$, factorul de umplere pentru bobina de activare k = 70 % și k = 40 %, pentru bobina de bias magnetic.

Pentru determinarea curentului absorbit la borne de către actuatorul liniar magnetostrictiv, pentru diferite regimuri de functionare, s-au efectuat măsurători pentru o funcționare în gama de frecvențe $f = 10Hz \div 21kHz$, alimentat la 18 V_{vv} și având factorul de umplere de k = 50 %, k = 70% și k = 80% aplicat tensiunii bobinei de activare și o tensiune continuă de alimentare de 28 V_{cc} aplicată bobinei de bias magnetic. În continuare este prezentat un exemplu.



Figura 1.28. Curentul absorbit de către actuatorul liniar magnetostrictiv. f=10Hz ÷ 21kHz, U = 18 V_{vv}, k = 70 %, pentru bobina de activare. U2 = 28 V_{cc}, k = 100 % pentru bobina de bias magnetic.

CAPITOLUL 2. ACTUATORI ELECTROMECANICI

Actuatorii electromagnetici de tip consolă (cu grindă) sunt dispozitive alcătuite din părți structurale, materiale magnetice și bobine electrice care interacționează. Actuatorul strudiat este prevăzut cu un magnet la capătul liber al unei console (grindă) din poliamidă. Magnetul interacționează cu o bobină spirală plană situată pe un substrat rigid cu rol de suport (Fig. 2.1). Suprafața superioară a elementului mobil este tip oglindă și permite devierea controlată a unui fascicul de lumină incident, deviere proporțională cu unghiul de înclinare al oglinzii. Controlul pentru reglarea unghiul de înclinare este asigurat prin valoarea curentului electric injectat în bobină. În această variantă nu există senzor de poziție pentru elementul mobil și buclă de reacție.



a. Actuator electromagnetic de tip consolă cu*b.* Actuator electromagnetic de tip consolă cu două grinzi laterale.

Figura 2.1 Actuatori electromagnetici de tip consolă – schiță CAD. Dimensiuni aproximative pentru actuatorul nealimentat (în repaus): 2,5 mm \times 1,25 mm \times 0,45 mm.

Deoarece simularea numerică este efectuată pe domenii de calcul tridimensionale, este utilă simplificarea modelelor pentru a reduce timpul de calcul. Astfel am înlocuit bobina plană cu spire dreptunghiulare, concentrice (Fig. 2.2). A fost utilizată simetria dată de planul median xOy pentru a reduce la jumătate domeniile de calcul. Valabilitatea rezultatelor poate fi verificată ulterior prin comparație cu modelele complete.



Figura 2.2 Domeniile de calcul pentru actuatorul electromagnetic de tip consolă cu o grindă centrală: a) utilizând simetria, cu bobina constituită din spire concentrice; b) fără a utiliza simetria, cu bobină spirală.

Devierea oglinzii și primele șase moduri proprii de deformare structurală sunt evaluate calitativ pentru două variante de actuator, obținute prin utilizarea unor modele simplificate și complete (Fig. 2.2).

În ceea ce privește actuația, fig. 2.3 prezintă, prin hărți de culoare, deformările pentru patru puncte de funcționare.



o grindă centrală, A = 2, deformarea cu două grinzi laterale, A = 2, deformarea maximă = 1,876 mm.



c) Actuator electromagnetic de tip consolă cu d) Actuator electromagnetic de tip consolă grindă centrală, 0 maxima = 1,295 mm.



a) Actuator electromagnetic de tip consolă cu b) Actuator electromagnetic de tip consolă maxima = 1,280 mm.



deformarea cu două grinzi laterale, deformarea maxima = 1,511 mm.

Figura 2.3 Deformările elementului mobil în condiții staționare. Rezultatele pentru a) și b) sunt scalate cu 2

Unghiurile de deviere (în grade), sunt calculate utilizând deformarea maximă în direcție verticală (Oy) și prezentate în Tabelul I. Lungimea grinzii în poziție de repaus este de 2 mm.



Tabelul I Unghiul de deflexie

10	6,45°	7,02°	6,03°	7,98°
5	12,67°	13,87°	11,31°	15,92°
2	27,60°	29,03°	22,26°	35,42°
1	49,06°	55,81°	52,60°	69,55°

La modelele complete oglinda este depusă pe o foaie de poliamidă suplimentară, având dimensiuni similare.

În ceea ce privește analiza structurală (modală), utilizînd modelele simplificate (Fig. 2.2a) cu $\mu_r =$ 1, 2, 5, 10, $B_r = 0.37$ T, și $J_n = 6$ A/mm², în fig. 2.4 se prezintă calitativ deviația elementului mobil și a oglinzii pentru primele șase moduri proprii structurale. Datorită limitărilor impuse, deformările păstrează simetria modelelor.





Figura 2.4 Deformările pentru primele șase moduri proprii structurale. Rezultatele pentru coloana stângă (consolă cu o grindă centrală) sunt scalate cu 2,5 iar pentru coloana dreaptă (consolă cu două grinzi laterale) cu 2.

Utilizând structura completă a actuatorului și structura spirală a bobinei plane, rezultatele apar ca în figura 2.5.





Figura 2.5 Deformările pentru primele șase moduri proprii structurale. Rezultatele pentru coloana stângă (consolă cu o grindă centrală) sunt scalate cu 6,25 iar pentru coloana dreaptă (consolă cu două grinzi laterale) cu 4,5.

Analizând comparativ rezultatele obținute pentru modelele reduse și cele complete (Fig. 2.4 vs Fig. 2.5) în aceleași condiții de lucru, observăm că deformările obținute pe modelul complet se îndepărtează (cu excepția primului mod) de simetria cu privire la planul xOy. Cu excepția primului mod propriu, deformările se îndepărtează de simetrie în jurul planului xOy. Acest rezultat implică utilizarea unei reprezentări complete a actuatorului când se analizează comportarea structurală.

CAPITOLUL 3. ACTUATORI PIEZOELECTRICI

Motoarele piezoelectrice rotative sunt motoare care obțin cuplu folosind forța de frecare dintre un cilindru, inel sau disc din material piezoelectric compozit și un inel metalic ce constituie rotorul. Acționarea acestor motoare se face prin intermediul unei unde călătoare, undă obținută prin excitarea adecvată a rotorului. Pentru obținerea de amplitudini mari ale undei călătoare, statorul este excitat în zona frecvenței de rezonanță. La baza funcționării stă efectul piezoelectric invers, efect ce produce mișcarea de rotație prin încovoierea statorului datorată unei unde călătoare, undă obținută prin superpoziția a două unde în cuadratură. Unda călătoare (,,*traveling wave*") produce o mișcare eliptică a suprafeței statorului și transmite mișcarea prin contact direct cu rotorul.

Pentru studiul prin modelare numerică a funcționării motorului piezoelectric rotativ s-a modelat cilindrul activ piezoelectric (PZ), cilindru ce constitue statorul motorului piezoelectric rotativ.



Figura 3.1 Domeniul de calcul pentru cilindrul piezoelectric PZT (PIC255) – poziționarea electrozilor.

Condițiile la limită care închid problema sunt specificate în Fig. 3.1, care prezintă domeniul de calcul: potențiale electrice impuse, defazate succesiv cu $\pi/4$ rad (unghi electric) pentru electrozii de pe suprafața laterală exterioară a piesei față de suprafața laterală interioară a piesei (care este la potențial zero, masă), izolație (densitate de sarcină electrică zero) pentru spațiile dintre electrozi și fețele orizontale superioară și inferioară; suprafața orizontală ineferioară este fixată, iar celelalte suprafețe sunt cu alunecare. Se impune analiza 3D a funcționării cilindrului piezoelectric. Regimul tranzitoriu este delimitat convenabil încât starea cvasistaționară să fie atinsă.

Simulările numerice au fost realizate pentru frecvența de lucru de 30 kHz și valoarea de vârf a tensiunii de alimentare de 50 V. În figura 3.2 se prezintă deplasarea punctului material P(x,y,z) (figura 3.1), cuplul de antrenare (orientat în direcția verticală) și forța de antenare în plan orizontal – calculate la nivelul suprafeței de antrenare a rotorului (planul *xOy*, suprafața superioară).



Figura 3.2. Dinamica rotorului piezoelectric.

Deformarea tubului PZ sub acțiunea undei călătoare este redată, în figura 3.3, la patru momente de timp reprezentând o cvasiperioadă de antrenare.



a) t = 1.227 ms.

b) t = 1.232 ms.



Figura 3.3 Dinamica deformării tubului PZ, redată în hartă de culoare.

Pentru a vizualiza modurile proprii de deformare ale cilindrului piezoelectric s-a realizat analiza modală ce a permis determinarea primelor 6 frecvențe proprii (amortizate), structurale, ale cilindrului piezoelectric și a deformărilor asociate (Figura 3.4).



Figura 3.4 Rezultate de analiză structurală modală, primele 6 frecvențe proprii.

Analiza modală a condus la identificarea frecvențelor proprii, în jurul frecvențelor tensiunii de alimentare care, în condițiile electrice și mecanice stabilite, prezintă deformări semnificative.

CAPITOLUL 4. TRANSFORMATOR *FLYBACK* PENTRU CONVERTOR DE RECOLTARE A ENERGIEI AMBIENTALE

Creșterea constantă a cererii pentru surse neconvenționale, surse care "recoltează" energie ambientală, a condus la dezvoltarea de componente electronice și electromecanice de mici dimensiuni ce captează, convertesc și eventual stochează energie din vibrații, căldură, curenți de aer, lumină (inclusiv lumină ambientală). Aceste dispozitive convertesc în energie electrică utilă o altă altă formă de energie, energie utilizată pentru alimentarea dispozitivelor electronice de putere mică.

Un sistem cheie utilizat pentru recoltarea energiei ambientale este sursa în comutație tip *flyback*, componenta principală fiind transformatorul de mică putere cu rolul de adaptare a parametrilor energetici obținuți prin recoltare la cerințele sarcinii.

Se prezintă un transformator hibrid neconvențional, multistrat, cu bobine planare miniaturale destinat să deservească convertorul *fly-back* pentru recoltareade energie. Circuitul magnetic utilizat în transformator este circuit hibrid, ce conține ferită și un nanofluid magnetic. Dacă un nanofluid magnetic cu 60-70 G este utilizat preponderent pentru îmbunătățirea răcirii, nanofluidul cu concentrație mare de particule magnetice asigură 500-1000 G și îl fac adecvat pentru includerea în circuitul magnetic.



Figura 4.1.Componentele transformatorului hibrid, cu ferită și nanofluid magnetic.

Transformatorul cu bobine plane, miniatural, cu circuit magnetic hibrid (figura 4.1) conține două înfășurări plane, identice - primarul și secundarul, formate fiecare din patru bobine plane, de câte 20 de spire fiecare (1a și 1b), conectate în serie. Circuitul magnetic hibrid este format din piese de ferită (4a și 4b) și nanofluid magnetic. Componentele de ferită tip 3F3 (4a și b) constituie partea solidă a circuitului magnetic.

Partea fluidă a circuitului magnetic este un nanofluid magnetic cu magnetizația de saturație ridicată (500 – 1000 G), care umple carcasa de ferită și scaldă înfășurările bobinelor plane. Componentele sunt închise într-o carcasă rezervor (6) prin intermediul capacului, (7), ambele executate din aliaj de duraluminiu 7075-T6, etanșate cu garnitura (8). Șurubul central (9) fixează carcasa de ferită cu bobine. Capacul (7) conține bornele înfășurării primare și a celei secundare realizate pe placa de conexiuni (10) și sistemul de alimentare cu nanofluid (11). Nanofluidul ocupă tot spațiul disponibil și contribuie la îmbunătățirea cuplajului magnetic prin eliminarea golurilor de aer, prezente în transformatoarele clasice și, astfel, reduce pierderile magnetice. Au fost utilizate două tipuri de nanofluid magnetic: MNF-UTR-500 și MNF-UTR-1000.

Imagini din timpul realizării practice a transformatorului prototip sunt prezentate în figura 4.2.





a)



b)

Figura 4.2. Transformator hibrid prototip. (a) bobină plană, spirală. (b) bobine montate în interiorul miezului de ferită. (c) elementele constitutive ale transformatorului. (d) transformator hibrid asamblat.

Înfășurările au fost modelate ca folii, densitatea de curent electric prin spiră fiind înlocuită cu o densitate de curent de suprafață echivalentă. Această simplificare afectează calculul rezistenței de curent continuu.

Simulările numerice au fost efectuate utilizînd metoda elementelor finite. Rețeaua de discretizare a fost realizată din aprox. 6400000 elemente tetraedrice. Pentru a reduce resursele software / hardware necesare, carcasa nemagnetică și elementele adiacente nu au fost incluse în model, condițiile pe frontieră fiind aplicate pe suprafața exterioară a carcasei de ferită.

Figura 4.3 prezintă inducția magnetică pentru diferite scheme echivalente de alimentare.







O înfășurare activă, cealaltă este lăsată în gol, $B_{max} \sim 15 \text{ mT}$

Ambele înfășurări active, solenațiile sunt adiționale, $B_{max} \sim 10 \text{ mT}$

Ambele înfășurări active, solenațiile sunt diferențiale, $B_{max} = 3.6 \times 10^{-2} \text{ mT.}$

Figura 4.3. Inducția magnetică pentru mai multe scheme de alimentare. Nivelurile de gri (gri deschis: mare; gri închis: mic) sunt proporționale cu magnitudinea locală.

Simulând comportamentul transformatorului la 300 kHz, pentru cele două scheme convenționale de alimentare: circuit deschis (primar pornit, secundar în gol) și scurtcircuit (primar pornit, secundar scurtcircuitat) obținem rezultatele din fig. 4.4.



A.Primar pornit, secundar în gol.



b.Primar pornit, secundar scurtcircuitat.

Figura 4.4. Inducția magnetică la 300 kHz, curent alternativ, prin tuburi de flux fascicular. Nivelul de gri (gri deschis = mare, gri închis = mic) și dimensiunea sunt proporționale cu magnitudinea locală. $B_{max} = 8$ mT.

Tensiunea în primar poate fi mai mică decât tensiunea nominală specificată pentru prototip deoarece mediile electromagnetice (cupru, ferită, nanofluid magnetic) au proprietăți liniare, care asigură scalabilitatea rezultatelor și invarianța parametrilor circuitului, la frecvența de lucru.

În condiții de lucru cvasistaționare, densitatea curentului electric este distribuită inegal între spirele bobinelor, ceea ce duce la creșterea rezistenței electrice în comparație cu condițiile de curent continuu.



Figura 4.5 Forme de undă pentru tensiunea din înfășurarea secundară a transformatorului cu nanofluid MNF_UTR500 (curbe superioare) și formele de undă de referință, generate de generatorul de semnal (curbe inferioare).

Formele de undă la ieșirea înfășurării secundare ale transformatorului, obținute cu un osciloscop Tektronix TDS 2014B, sunt prezentate în Fig. 4.5 a, b, c.

Utilizarea nanofluidelor magnetice ca parte a circuitului magnetic în transformatoare contribuie la îmbunătățirea cuplării magnetice prin eliminarea golurilor de aer și, prin urmare, la reducerea pierderilor magnetice.

Simulările și testele efectuate pe transformatoul *flyback* cu nanofluid MNF_UTR500 arată un comportament adecvat pentru utilizarea sa în convertoarele DC / DC. Rezultatele experimentale au arătat că, utilizînd nanofluidul MNF_UTR500 în locul unui ulei de transformator, factorii de calitate ai înfășurărilor primare și secundare cresc și se înregistrează un comportament în frecvență mai bun.

CAPITOLUL 5. TEHNOLOGII DE FABRICAȚIE UTILIZATE PENTRU REALIZAREA ACTUATORILOR

Toate eforturile de proiectare și simulare pentru realizarea actuatorilor nu pot avea succes fără o cunoaștere și o adaptare la procesele tehnologice care să permită realizarea practică a dispozitivelor analizate.

Pentru a ilustra principalele procese tehnologice ce sunt utilizate pentru realizarea fizică a unui actuator, voi exemplifica cu descrirea realizării unor microactuatori electromagnetici de tip consolă, cu grindă (actuatori de mici dimensiuni), care permit devierea controlată a unui fascicul laser.

Solutia tehnică aleasă pentru această clasă de actuatori este prezentată in figura 5.1.



Actuator electromagnetic - vedere de ansamblu Actuator electromagnetic - vedere expandată

Figura 5.1 Actuator electromagnetic cu grilă cu căi de curent paralele 1- raza laser, 2- suprafața oglindă, 3- micromagneți, 4- grilă cu căi de curent paralele, 5-grindă, 6- suport rigid.

Actuatorul este compus dintr-o rețea de magneți permanenți (3) solidară cu grinda (5), care interacționează cu căile de de curent (4), realizate pe un suport rigid (6) pe care se afla un element de cuplare.

5.1. Tehnologii de realizare a bobinelor și microbobinelor

Execuția bobinelor și microbobinelor poate fi realizată utilizând mai multe tehnologii, în funcție de dimensiunile, numărul de spire și numărul de straturi dorit. Pentru bobinele clasice se bobinează sârmă de cupru emailat pe un mosor suport. Pentru bobine de mici dimensiuni se execută bobine plane, într-un strat sau multistrat, prin depunere sau prin îndepărtare de material conductor.

Procesul de fabricație al bobinelor plane utilizând tehnologia LIGA și corodarea chimică

Procesul de fabricație a pornit de la o placă rigidă din fibră de sticla (2) (sticlotextolit), acoperită cu un strat de cupru (1), care la rândul său este acoperit cu un strat subțire de fotorezist (3). În

stratul de fotorezist a fost configurată forma viitoare a căii de curent (bobină plană sau grilă cu căi de curent paralele) prin expunerea la radiație UV.



Figura 5.2 Procesul tehnologic pentru obtinerea bobinelor plane (1- strat de cupru de 35 μm grosime; 2- placă de sticlotextolit; 3- strat subtire de fotorezist, 4- fotorezist expus)



Figura 5.3 Bobină plană și grilă cu căi de curent paralele – desene de execuție

Bobinele plane au următoarele caracteristici: număr de spire – 7, grosimea spirei - 0,035 mm, lățimea spirei - 0,22 mm, distanța între spire: 0,22 mm. Grilele de curent cu căi paralele au următoarele caracteristici: numărul căilor de curent – 17, grosimea spirei - 0,035 mm, lățimea spirei - 0,12 mm, distanța între spire - 0,12 mm. Dimensiunile de gabarit fiind asemănătoare, structurile au fost realizate în matrice de 5x5 elemente, rezultând 25 de piese.

Procesul de fabricație al bobinelor plane utilizând măști și corodarea chimică

Utilizînd aceeași tehnologie, plecând de la un semifabricat dublu placat cu cupru, se pot realiza bobine în două straturi, bobine cu teminale pe a doua față sau bobine cuplate / transformatoare. Aceste bobine pot fi realizate utilizînd scrierea directă sau măști de expunere la UV. Utilizând un substrat de sticlotextolit dublu placat, cu grosimea stratului de cupru de 0,105mm au fost realizate bobine cu 4 și 8 spire, ca in figura de mai jos (fig. 5.4).





b) Detaliu bobină cu 8 spire

Figura 5.4 Bobine cu 4 și 8 spire realizate utilizând măști, microscopie optică 6,5x

Utilizînd 2 plăcuțe cu terminale împreună cu plăcuțe cu câte 2 bobine cu 4 spire și plăcuțe cu câte 2 bobine cu 8 spire se obține o structură de transformator cu bobine plane (primar și secundar, cu conexiuni de ieșire).

Procesul de fabricație al bobinelor plane în strat multiplu

Pentru a utiliza mai mult de două bobine pe un substrat este necesar să utilizăm tehnologia de realizare a cablajelor multistrat.

Procesul de fabricație al bobinelor plane prin prelucrare mecanică

O tehnologie alternativă la cele prezentate anterior o constituie prelucrarea mecanică pe mașini cu comandă numerică, utilizînd operațiile de frezare și găurire.

Realizarea bobinelor plane a pornit de la semifabricatul de sticlotextolit simplu și dublu placat cu cupru. Obținerea spirelor s-a realizat prin prelucrare mecanică (frezare). Detalii cu bobine realizate prin această tehnologie sunt prezentate în figura 5.5.





a. Bobină plană pe suport, microscopie optică, 10x
b. Măsurători pe o bobină plană, microscopie optică 50x
Figura 5.5 Realizarea bobinelor plane prin frezare

5.2 Tehnologii de procesare a magneților permanenți

Procesarea magnetilor permanenti implică realizarea magnetilor în forma și dimensiunile proiectate și magnetizarea lor.

Prelucrarea prin electroeroziune a matricilor de magneți permanenți

Procesarea matricii cu magneti pornește de la un semifabricat realizat din pământuri rare NdFeB.

Realizarea matricilor de magneți permanenți a presupus, într-o primă fază, realizarea dintr-un calup de NdFeB a unui semifabricat paralelipipedic. În acest semifabricat s-au tăiat folosind electroeroziunea cu fir lamele cu latimea de 1mm, echidistante (distanta dintre lamele de aproximativ 0,5mm), fig. 5.6.a. Semifabricatul a fost rotit cu 90°, s-au tăiat lamele cu aceeași parametri obținându-se o matrice de piloni echidistanți - micromagneți, ca în fig. 5.14.b. Pe fața frontală a matricii s-a adezivat cu rășină lamela elastică, lamela fiind aliniată cu matricea de magneți. Micromagneții au fost debitați la înălțimea dorită.





pentru matricea de magneti, microscopie optică, 12,5x

a. Semifabricat ce conține lamele b. Semifabricat ce conține pilonii pentru matricea de magneți, microscopie optică, 8x

Fig. 5.6 Realizarea unei matrici de magneti permanenți

Magnetizarea magnetilor permanenti s-a realizat prin aplicarea unui impuls de 1450V timp de 2 ms pe bobina Helmholtz. Pentru concentrarea câmpului magnetic în vederea obținerii magnetizației impuse se utilizează un sistem dedicat, concentrator de câmp ca cel din figura 5.7.



Figura 5.7. Concentrator de câmp, (1a) miez feromagnetic, (1b) bobină, (1c) tălpi polare, (1d) întrefier

La aplicarea unui impuls de curent de mare intensitate se obține magnetizarea magnetului plasat în întrefier.

Obținerea prin electrodepunere a matricilor de magneți permanenți. Depunerea de NiCoMnP în câmp magnetic

Pentru realizarea electrodepunerii în câmp magnetic a matricilor de micromagneți se pornește cu pregătirea suportului, urmată de realizarea șablonului din SU8 și continuând cu electrodepunerea în câmp magnetic.

În figura 5.8 sunt prezentate imagini cu structuri din timpul procesului pentru determinarea parametrilor de lucru.



a. Rețea 2mm x2 mm, microscopie optica x40



b. Şabloane din SU8 pentru structuri de probă cu elemente de cuplare,microscopie optica x6,5



Pentru structurile lamelare cu lățimea de 200 µm, distanțate la 80 µm, s-au utilizat aceeași parametri tehnologici, rezultând structuri din figura 5.9.





Structuri lamelare 5mm x5mm, microscopie optică x10

Rețea lamelară 4mm x 4mm, microscopie optică x6,5

Figura 5.9. Șabloane pentru structuri lamelare

Pentru **depuneri de NiCoMnP în câmp magnetic** este necesară optimizarea conținutului băilor și a condițiilor de operare prin electroliză în câmp magnetic, pentru a obține coercivitatea aliajelor magnetice NiCoMnP peste dublu față de ce se obține prin electrodepunere fără câmp magnetic extern. Cuva de electroliză va fi placată cu plăci magnetice astfel încât câmpul magnetic extern să fie perpendicular pe suprafața substratului. Depunerea galvanostatică, în care se aplică un curent constant, fără controlul potentialului, este tehnica frecvent utilizată pentru electrodepunerea de aliaje pe baza de NiCo. Metoda nu necesita echipamente complexe și electrozi de referință, utilizînd o baie de depunere cu un catod standard și o sursă de curent continuu stabilizat.

S-au obținut straturi groase de NiCOMnP de aproximativ 100µm după o depunere de 24h.

După optimizarea parametrilor s-au executat electrodepuneri în sablon din fotorezist SU8, exemple cu structurile rezultate fiind prezentate în figura 5.10 (structuri matriciale) și figura 5.11 (structuri lamelare).



a) matrice 5mm x4mm, microscopie optică x12,5

b) magneți 200µm x200µm, microscopie optică x12,5



Depunerea de NiCoMnP în câmp magnetic în tipar de fotorezist SU8 s-a obținut lucioasă, uniformă, în interiorul tiparului, cu câteva dendrite pe margini.



a) matrice 6x6, microscopie optica x12,5

b) Detaliu, microscopie optica x50

Figura 5.11. Micromagneți în structură lamelară

Băile electrolitice care conțin clorură de cobalt și clorură de nichel au putere de pătrundere și stabilitate mare și au fost folosite pentru electrodepunerea filmelor nanocristaline și netede de NiCoMnP.

5.3. Tehnologii de realizare a actuatorilor magnetostrictivi și piezoelectrici

Actuatorul liniar magnetostrictiv a fost realizat practic (fig. 5.12).



Figura 5.12 Actuator liniar magnetostrictiv - realizare practică

Realizarea și testarea actuatorului liniar magnetostrictiv a confirmat analizele teoretice, dimensionările analitice și calculele numerice efectuate, dar concomitent s-au obținut și date pentru îmbunătățirea soluției constructive.

Îmbunătățirea soluției constructive s-a realizat prin: realizarea ambelor bobine (bias și acționare) pe un singur mosor (detalii în fig. 5.13 b,c), prin perforarea flanșelor mosorului (superioară și inferioară) și umplera acestor spații cu rășină, prin realizarea unui radiator pentru disiparea căldurii care să permită funcționarea eficientă a celor două mecanisme posibile în lipsa unui fluid care să spele radiatorul: conducție și radiație. Acest radiator a fost prevăzut cu mici piramide care să permită transferul de căldură prin radiație către suprafața ecran a modulului electronic.



a. model inițial b. model îmbunătățit - varianta A c. model îmbunătățit - varianta B

Figura 5.13 Actuator liniar magnetostrictiv - Model inițial și variante îmbunătățite 1. mosor pentru bobina de acționare, 2. mosor pentru bobina de bias magetic, 1+2. mosor pentru ambele bobine (acționare și bias magnetic) 3. zona elementelor Peltier, 4. radiator, 5. inel izolator termic

În fig. 5.14 sunt prezentate imagini cu realizările practice ale radiatorului modificat (varianta B) și a mosorului cu bobine (acționare și bias magnetic) cu orificiile pentru îmbunătățirea transferului termic.



a. Radiator - Varianta B



b. Mosor cu bobine - Varianta B



Realizarea unui prototip de motor piezoelectric rotativ a presupus realizarea părților componente utilizând tehnologii clasice (frezare, strunjire, găurire, filatare) și microprelucrări (frezare și găurire cu scule de mici dimensiuni, funcționînd la turații ridicate.

În figura 5.15 sunt prezentate o secțiune prin motorul piezoelectric rotativ – proiect (a) și imaginea prototipului motorului asamblat (b).





În figura 5.16 este prezentat ansamblul rotor montat pe placa stator, înainte de asamblarea finală. Componentele metalice au fost executate prin strunjire, găurire și filetare pe mașini cu comandă numerică.



a) vedere dinspre ax

b) detaliu de prelucrare

Figura 5.16. Ansamblu rotor montat pe placa stator. Detalii de prelucrare ale cilindrului piezoelectric

Cilindrul piezoelectric a fost achiziționat la dimensiunile dorite, cu acoperire de argint cu grosimea de 35 µm și a fost divizat prin înlăturarea mecanică a acoperirii (prin microfrezare).

5.4. Tehnologii de procesare a reperelor mecanice prin tehnologii neconvenționale

O metodă de execuție a reperelor mecanice pentru actuatori o reprezintă microprelucrarea pe mașini unelte cu comandă numerică, mașini ce permit prelucrarea la turații ridicate și cu scule de dimensiuni reduse.

Imagini din timpul prelucrării și programării sunt prezentate în figura 5.17.



a) Programare structură cu grindă dublă



b) Detaliu de prelucrare a structurilor

Figura 5.17. Programare și prelucrare microstructuri utilizând KERN Micro

O metoda alternativă de realizare a structurii elastice (mobilă) pentru microactuator, este prelucrarea prin electroeroziune cu fir. Imagini din timpul procesului de debitare sunt prezentate în figura 5.18.



Figura 5.18. Debitarea structurilor de test utilizând electroeroziunea cu fir

Pentru experimentări s-au realizat două lățimi de grinzi, de 0,75mm și de 0,35 mm, unele rezultate fiind prezentate în fig. 5.19.



a) 12mm x5mm, grinzi de 0,75mm



b) 12mm x5mm, grindă de 1,5mm



c) 12mm x 6mm, grinzi de 0,75mm

Figura 5.19. Structuri de test realizate prin electroeroziune cu fir din BzBe și oțel inoxidabil

Asamblarea microactuatorilor electromagnetici de tip consolă (cu grindă) s-a făcut sub microscop. Pentru microactuatorii cu bobina tip solenoid s-a adaugat operația de lipire bobină pe suprafața inferioară a plăcuței suport.

Analizând microactuatorul compus dintr-o parte inferioară fixă (pe care este situată bobina plana) și o parte superioară mobilă (matricea cu magneți permanenți și grinda / grinzile de legătură) s-a concluzionat că cele două subansamble trecuiesc cuplate între ele cu preluarea unor grade de libertate. O buna poziționare, care să asigure repetabilitate, se poate obtine folosind elemente de cuplare precis realizate și mai simplu de produs. Structurile tip mamă realizate sunt cele din figura 5.20.



Figura 5.20. Elemente de cuplare tip mamă

Din punct de vedere al funcționalității lor deosebim structuri închise, care preiau toate gradele de libertate din plan (cerc, opt, triunghi și pătrat) și structuri deschise, care permit deplasarea axială a componentelor (pană și val).

Realizarea structurilor de cuplare a presupus efectuarea operațiilor caracteristice tehnologiei LIGA. S-au realizat structuri bidimensionale din fotorezist SU8 (negativ). În figura 5.21 se prezintă imagini cu structurile realizate, după developare, uscare și coacere postexpunere.



Figura 5.21. Structuri de asamblare, șablon realizat în fotorezist SU8

Pentru a determina calitatea și precizia de realizare a structurilor de asamblare, s-au făcut măsurători comparative ale structurilor mamă-tată, folosind interferometrul *Veeco*, ca în figura 5.22.





Structură 3D, cerc tip mamă



Determinarea diametrului pentru elementul de cuplaj cerc tip mamă

Figura 5.22. Măsurători ale structurilor de cuplaj prin interferometrie

După determinări se observă o bună corelație între dimensiuni, rezultând un interstițiu sub $0.2 \ \mu m$.

CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII, PERSPECTIVE

Teza de doctoratcu titlul "*Interacțiuni electromecanice în dimensionarea și construcția unor sisteme de acționare cu integrare microelectromecanică*" tratează interacțiuni electromecanice într-o serie de sisteme de acționare ce conțin elemente de microelectromecanică, cu prezentarea de variante ce au fost analizate și, în urma simulărilor numerice, cu soluțiile tehnologice adoptate, cu realizările practice și cu testările efectuate pentru validarea soluțiilor.

Primul capitol al lucrării analizează câteva variante de actuatori magnetostrictivi. După o analiză generală a materialelor magnetostrictive cu aplicații practice, s-a identificat și analizat materialul magnetostrictiv denumit comercial Terfenol-D. S-au analizat actuatorii liniari produși industrial cunoscuți în literatura de specialitate și au fost propuse câteva designuri originale de actuatori: actuator magnetostrictiv cu bobine planare și actuatori cu una sau două bobine cilindrice. Variantele validate în urma simulărilor au fost executate practic, testate și îmbunătățite. S-au efectuat optimizări constuctale ale modelului în ceea ce privește factorul de formă al tijei de material magnetostrictiv și al raportului material magnetostrictiv / magnet permanent pentru un volum impus. S-au realizat practic blocurile electronice necesare pentru comanda și controlul actuatorului și s-au făcut teste pentru determinarea practică a caracteristicilor actuatorului, rezultând posibilitatea de utilizare a acestuia în domeniul aerospațial. Soluțiile identificate sunt originale, ele fiind cuprinse în cererea de brevet A/00879/17.11.2014 "Motor liniar magnetostrictiv".

Capitolul al doilea al tezei prezintă actuatori electromecanici bazați pe interacțiuni dintre materiale magnetice și bobine electromagnetice. S-au identificat mai multe soluții constructive și s-au studiat actuatorii electromecanici de tip consolă cu grindă. Au fost determinate deformările structurale pentru modurile proprii structurale, utilizînd modele reduse datorită simetriei și modele complete.

Capitolul al treilea al tezei prezintă actuatorii piezoelectrici. S-a identificat modelul matematic adecvat și s-a determinat deformarea unui cilindru piezoelectric, analizându-se deformările structurale și deformări asociate modurilor proprii ale statorului. Soluțiile identificate sunt originale, ele fiind cuprinse în cererea de brevet A/00874/23.11.2015 "Motor piezoelectric rotativ cu dublu contact".

Capitolul al patrulea este dedicat studiului unui transformator *flyback* pentru un convertor de recoltare a energiei ambientale. Este identificată o soluție constructivă de transformator hibrid, cu ferită și nanofluid magnetic. Pentru această variantă constructivă pornind de la modelul matematic, s-a simulat funcționarea utilizând metodele numerice, s-au identificat procesele tehnologice necesare și s-a realizat practic un asemenea transformator, care a fost testat pentru validare. Simulările și testele efectuate pe transformatoul *flyback* cu nanofluid MNF_UTR500 arată un comportament adecvat pentru utilizarea sa în convertoarele DC / DC. Soluțiile identificate sunt originale, ele fiind cuprinse în cererea de brevet A/00713, 07.10.2016 "Transformator planar cu nanofluid magnetic" [50].

Al cincilea capitol identifică, particularizează și descrie procesele tehnologice principale implicate în realizarea practică a actuatorilor studiați. S-au analizat tehnologiile de fabricație ale bobinelor și microbobinelor, într-un singur strat și multistrat și s-au realizat practic mai multe variante constructive. S-au identificat, s-au particularizat și s-au utilizat practic tehnologiile de

procesare a magneților permanenți, prin electroeroziune și prin depunere în câmp magnetic. Aceste tehnologii având aplicabilitate preponderent la actuatorii electromagnetici, s-a realizat testarea cvasistatică a acestora. Pentru realizarea actuatorilor magnetostrictivi și piezoelectrici sau identificat și s-au particularizat pentru aplicațiile concrete tehnologiile neconvenționale. S-au realizat practic două variante de actuator liniar magnetostrictiv și o variantă de actuator piezoelectric rotativ. Deoarece este un element comun multor elemente de actuație, s-au realizat și verificat o familie de elemente de cuplaj aplicabile în domeniul microsistelor.

Contribuțiile originale aduse de autor în domeniul inginerie electrică referitor la problematica abordată sunt:

- Studiu documentar privind stadiul actual și analiza comparativă referitoare la materialele magnetostrictive, cu detalierea materialului Terfenol-D,
- Studiu documentar privind actuatorii magnetostrictivi liniari,
- Concepție și dimensionarea unui actuator magnetostrictiv cu bobine planare și studiu asupra acestuia, în principal prin modelare numerică,
- Concepție actuator magnetostrictiv cu bobine cilindrice și studiu asupra acestuia, în principal prin modelare numerică,
- Studiu privind optimizarea constructală a actuatorului magnetostrictiv, în principal prin modelare numerică,
- Concepție variantă de actuator electromagnetic de tip consolă, cu studiu asupra tehnologiilor de realizare practică și asupra deformațiilor pentru modurile proprii structurale prin modelare numerică,
- Studiu privind dinamica deformării unui rotor piezoelectric, în principal prin modelare numerică,
- Soluție tehnică și studiu asupra tehnologiilor de realizare practicăa unui transformator hibrid, cu ferită și nanofluid magnetic,
- Soluție tehnică de realizare a bobinelor și microbobinelor,
- Soluție tehnică de realizare a matricilor de magneți permanenți prin electroeroziune și a șablonului pentru realizarea matricilor prin depunere,
- Soluție tehnică de realizarea a răcirii și a îmbunătățirii transferului termic pentru actuatorul magnetostrictiv,
- Soluție tehnică de realizarea a divizării cilindrului activ piezoelectric,
- * Participare la identificarea elementelor brevetabile pentru trei propuneri de brevet de invenție,
- Participare la diseminarea rezultatelor cercetării prin publicarea în volumele unor conferințe și în reviste de specialitate indexate în baze de date internaționale, unele cotate ISI,
- Participare la diseminarea cunoștințelor referitoare la tehnologii de realizare pentru componente de mici dimensiuni prin publicarea unei căți.

Având în vedere interesul pentru studierea interacțiunilor electromecanice într-o serie de sisteme de acționare ce conțin elemente de microelectromecanică perspectivele de dezvoltare sunt numeroase, printre cele mai importante fiind:

- Miniaturizarea actuatorului liniar magnetostrictiv,
- * Integrarea sistemului de comandă și control al actuatorului magnetostrictiv,
- Extinderea modelării actuatorului liniar magnetostrictiv pentru a modela comportamentul termic în aplicații terestre și aerospațiale,
- Dezvoltarea unui sistem de control cu buclă de reacție pentru actuatorul electromagnetic de tip consolă,
- Miniaturizarea actuatorului rotativ piezoelectric, în special în ceea ce priveşte blocurile de comandă și control,
- Dezvoltarea și integrarea într-un singur sistem, realizat utilizând tehnologii de fabricație microelectromecanice, a transformatorului hibrid pentru a obține un sistem miniatural de conversie a energiei recoltate din mediul ambiant.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [1] C. Ilie, **M. Popa**, N. Tănase, *Componente și sisteme micromecanice fabricate prin tehnologia LIGA*, Editura ELECTRA, București, 2020, ISBN 978-606-507-127-8.
- [2] M. Popa, A. M. Morega, L. PÎSLARU-DĂNESCU *Microactuator magnetostrictiv*, Simpozionul de Maşini Electrice SME '15, 2013, Universitatea Politehnica din Bucureşti, CD Proceedings, pg. 1-6, ISSN: 1843-5912
- [3] ∴, Noi tipuri de actuatori specifici aplicațiilor spațiale ACTOSPACE, Contract 88/2013 Raport știintific și tehnic,
- [4] M. Popa, A. M. Morega, Mihaela MOREGA, Optimizarea unui actuator magnetostrictiv, Simpozionul de Maşini Electrice SME'14, 2014, Universitatea Politehnica din Bucureşti, CD Proceedings, pg. 1-7, ISSN: 1843-5912
- [5] L. Pîslaru-Dănescu, A.M. Morega, M. Morega, F. Bunea, **M. Popa**, C. A. Băbuțanu, *A new type of linear magnetostrictive motor*, Springer Electr. Eng (2017) 99:601-613,
- [6] M. Popa, A.M. Morega, L. PÎSLARU-DĂNESCU, M. MOREGA, Actuator magnetostrictiv o analiză bidimensională, Simpozionul de Maşini Electrice SME'16, 2016, Universitatea Politehnica din Bucureşti, CD Proceedings, pg. 1-7, ISSN: 1843-5912
- Y. Veli, A.M. Morega, L. Pislaru-Danescu, M. Morega, M. Popa, *Studiul unui motor cu magnetostricțiune liniar*, *Simpozionul de Maşini Electrice*, *SME'19*, ediția a XVa, 15 Noiembrie, 2019, Facultatea de Inginerie Electrică, UPB, ASTR, IEEE-Romania, ISSN, ISSN-L: 843-5912.
- [8] L. Pîslaru-Dănescu, A. M. Morega, M. Morega, R Chihaia, M. Popa and L. Flore, *Electronic Drive System of a Linear Magnetostrictive Motor Designed for Outer Space Applications* THE 9TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING (ATEE), 2015, 978-1-4799-7514-3/15/\$31.00
- [9] A. M. Morega, N. Tănase, M. Popa, M. Morega and J. B. Dumitru, *Numerical simulation of an electromagnetic bending-mode cantilever microactuator*, 2013 8TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING (ATEE), 2013, pp. 1-6, doi: 10.1109/ATEE.2013.6563478.
- [10] ∴, Actuatori electromagnetici şi electrodinamici procesaţi prin tehnologie LIGA, Contract 249/2014, Raport ştiintific şi tehnic
- [11] A.M. Morega, G. Robello, M. Morega, L. Pîslaru-Dănescu, Numerical Study of the Stator Motion in a Piezoelectric Ultrasonic Motor, The 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, May 7-9, 2015, Bucharest, Romania.
- [12] A. M. Morega, M. Morega, L. Pîslaru-Dănescu, M. Popa Simularea funcționării rotorului unui motor piezoelectric cu undă călătoare, Simpozionul de maşini electrice SME'15 – 23 Octombrie, 2015
- [13] L. Pîslaru-Dănescu1, A. M. Morega, J. B. Dumitru, M. Morega, N. C. Popa, F. D. Stoian, D. Susan-Resiga, S. Holotescu, M. Popa- *Miniature Planar Spiral Transformer with Hybrid, Ferrite and Magnetic Nanofluid Core,* IEEE Transactions on Magnetics – 4600614, october 2018, volume 54, numeber 10, ISSN 0018-9464

- [14] ∴, Componente și sisteme microelectromecanice (MEMS) realizate prin tehnologii specifice cu aplicații în medicină, microfluidică și în realizarea de micromotoare și microactuatori - TSMEMS, Contract Nucleu 09350101/2009, Raport știintific și tehnic
- [15] C. Ilie, M. Popa, P. Prioteasa, I. Chiriță, N. Tănase, Application of LIGA Technology for the Development of Micromechanical Systems, U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 73, Iss. 2, 2011, Bucuresti, ROMANIA, ISSN 1454-2358
- [16] C. Ilie, M. Popa, P. Prioteasa, I. Chiriță, N. Tănase, Application of LIGA Technology for the Development of Micromechanical Systems, U.P.B. Sci. Bull., Series D, Vol. 73, Iss. 2, 2011, Bucuresti, ROMANIA, ISSN 1454-2358
- [17] P. Barbu; M.M. Codescu, M Iordoc, V. Marinescu, E. Manta, C. Ilie, M. Popa, *Electrodeposition of CoNiMnP Thick Films for Micromachined Magnetic Device Applications*, REVISTA DE CHIMIE, Volume: 69 Issue: 6 Pages: 1355-1362, Published: JUN 2018
- [18] F.T. Tănăsescu, Ghe. Ștefănescu, C. Ilie, **M. Popa**, S. Dumitru, Încercări de performanță pentru caracterizarea unui dispozitiv MEMS, Buletinul AGIR nr. 4/2015 oct.-dec. pag. 97-102
- [19] L. Pîslaru-Dănescu, M.Popa, F. Bunea, A.M. Morega, M. Morega, D. Gabor, L. Flore, I. Popescu Motor liniar magnetostrictiv. Cerere de brevet A/00879/17.11.2014
- [20] C. Ilie, C.D. Comeaga, O. Dontu, M. Popa, Micro Parts Errors to Precision Manufacturing using UV-LIGA Technology Advanced Materials Research Vols. 816-817 (2013) pp 237-241
- [21] M. Popa., C.Ilie, D. Lipcinski, I. Chirita, N. Tănase, S. Apostol (2018) Coupling and Assembly Elements Using Microfabrication Technologies. In: Gheorghe G. (eds) Proceedings of the International Conference of Mechatronics and Cyber-MixMechatronics - 2017. ICOMECYME 2017. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 20. Springer
- [22] Pîslaru-Dănescu Lucian, Popa Marius, Băbuțanu Corina-Alice, Chihaia Rareş-Andrei, Morega Alexandru-Mihail, Morega Mihaela, Fuiorea Ion, Flore Lică, Gabor Dumitrița, *Motor piezoelectric rotativ cu dublu contact*. Cerere de brevet: A/00874/23.11.2015
- [23] Pîslaru-Dănescu Lucian, Popa Marius, Ilie Cristinel Ioan, Chihaia Rareş-Andrei, Băbuțanu Corina-Alice, Nicolaie Sergiu, Bunea Florentina, Stoian Floriana Daniela, Holotescu Sorin, Marinică Oana-Maria, Morega Alexandru-Mihail, Morega Mihaela, Dumitru Jean-Bogdan, Popa Nicolae-Călin. *Transformator planar cu nanofluid magnetic* Cerere de brevet: A/00713, 07.10.2016.