

Program PARTENERIATE - PN-II-PT-PCCA-2013-4

TITLUL PROIECTULUI:

**ACTUATORI ELECTROMAGNETICI SI ELECTRODINAMICI
PROCESATI PRIN TEHNOLOGIE LIGA**

DENUMIREA FAZEI:

Realizarea unui model functional pentru actuator

Activitatea 4.1 Proiectarea, simularea, execuția și testarea magneto-mecanică a unui actuator cu un grad de libertate. Diseminarea rezultatelor – Finalizare.

Activitatea 4.2 Testarea la vibrații a actuatorului cu un grad de libertate. Diseminarea rezultatelor.

Activitatea 4.3 Proiectarea, simularea, executia si testarea circuitelor electrice si programelor pentru actuatorul cu un grad de libertate (Partea 2)

Activitatea 4.4 Testarea actuatorului cu un grad de libertate impreuna cu sistemul de alimentare si comanda. Imbunatatiri software si hardware.

Activitatea 4.5 Studiu privind posibilitățile de standardizare a actuatorilor magnetici, inclusive a celor studiatăi cât și a metodelor de caracterizare.

Rezultate preconizate pentru atingerea obiectivului fazei

Realizarea unui model functional pentru actuatorul cu un grad de libertate

1. Activitatea 4.1

În această etapă au fost analizate, pe baza experienței anterioare acumulate, mai multe soluții constructive posibile, s-au realizat simulări și au fost realizate practic. S-a început cu o soluție bazată pe proiectele dezvoltate anterior, au fost identificate mai multe limitări în timpul testelor statice și dinamice, au fost propuse și realizate îmbunătățiri. Totodată a fost îmbunătățită tehnologia de fabricație a componentelor acuatorului: realizarea magneților, realizarea bobinelor, soluțiile de asamblare.

1.1 Structuri finale

În urma simulării numerice a soluțiilor îmbunătățite au rezultat patru tipuri de microactuatori

- microactuator cu magnet de NdFeB cu bobina plana in patru straturi
- microactuator cu magnet de NdFeB cu bobina tip solenoid cu miez feromagnetic
- microactuator cu magnet de NdFeB cu bobina tip solenoid fara miez feromagnetic
- microactuator cu magnet de NdFeB cu bobina tip solenoid fara miez feromagnetic, cu dublu cantilever

Desenele de ansamblu ale celor patru tipuri de microactuatori sunt in figurile 1..4.

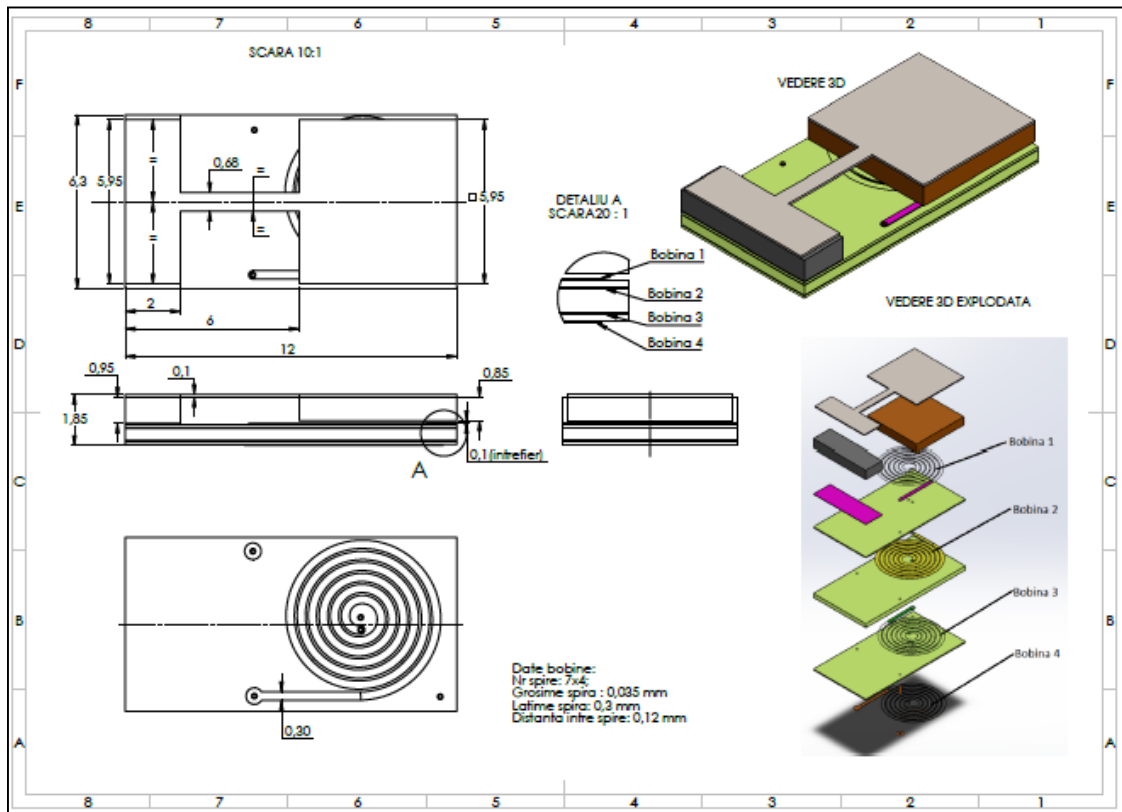


Fig. 1 Construcția actuatorului cu magnet permanent din NdFeB și bobina plană.

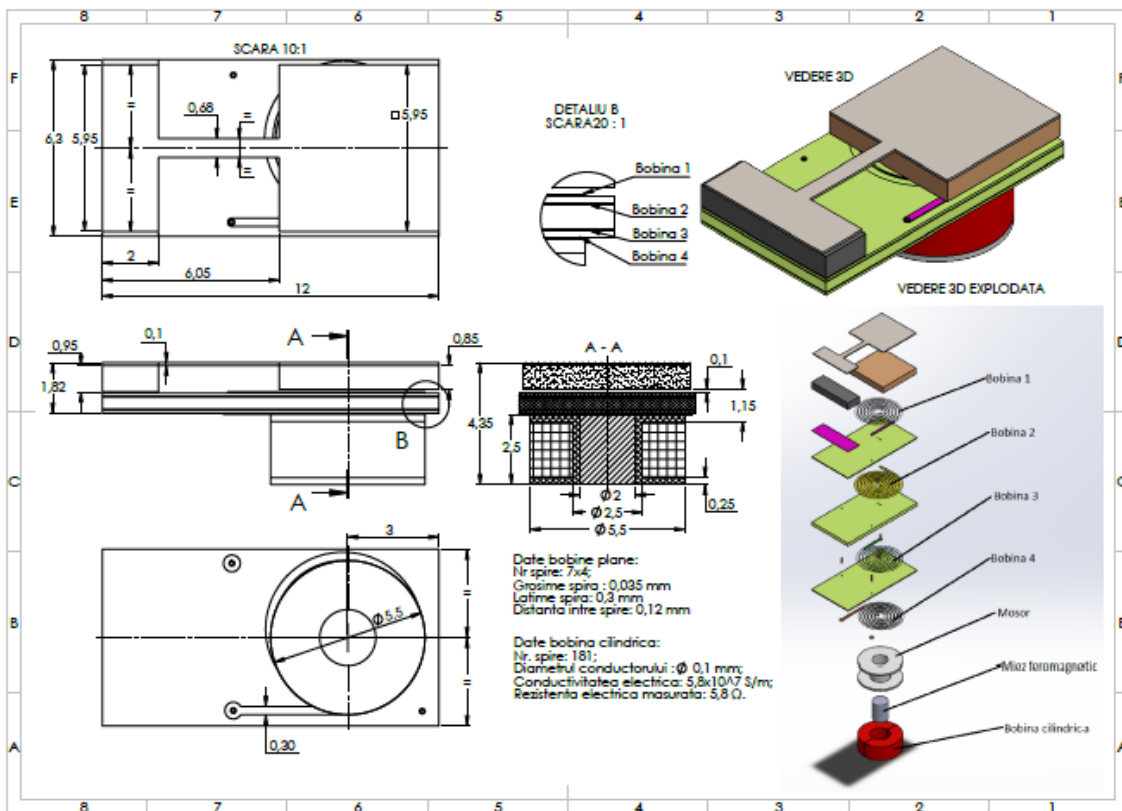


Fig. 2 Construcția actuatorului cu rețea de micromagneți și bobina cilindrică.

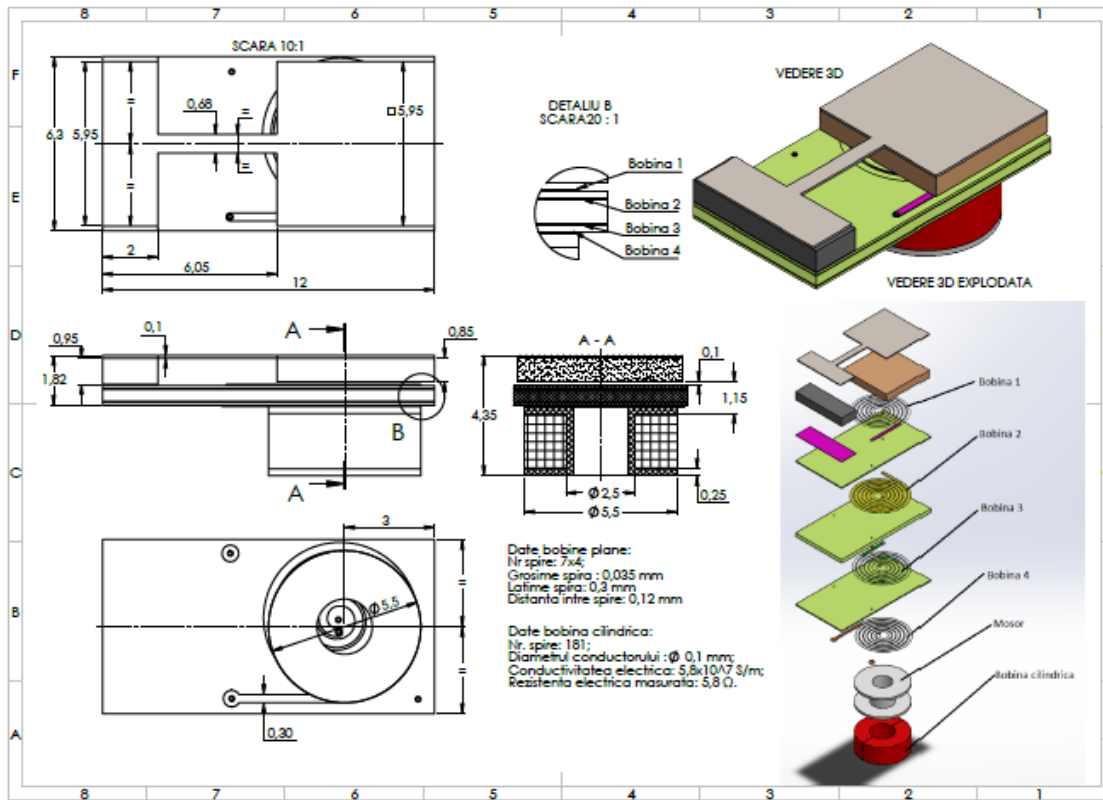


Fig. 3 Construcția actuatorului cu rețea de micromagneți și bobina cilindrică dar fără miez feromagnetic.

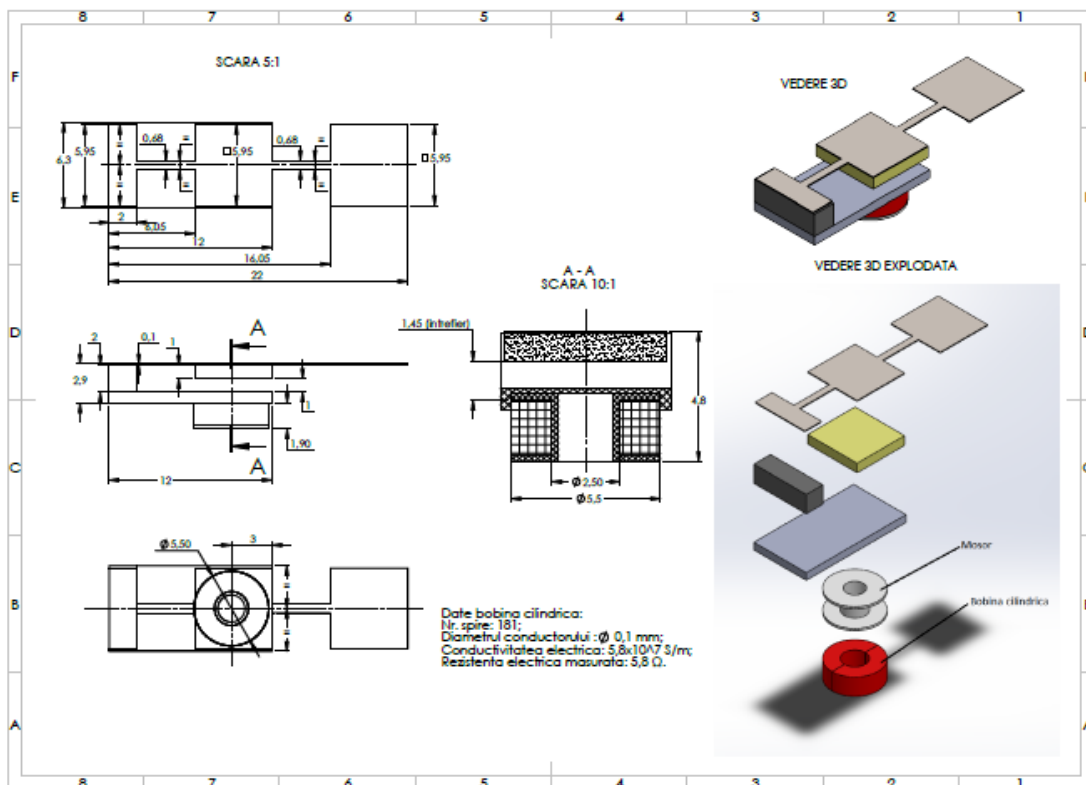


Fig. 4 Construcția actuatorului cu magnet masiv și bobina cilindrică cu dublu cantilever.

Realizarea acuatorilor a implicat mai multe etape, prezentate în continuare.

1.2 Realizarea magneților permanenți

Studiile anterioare au definitivat tehnologia de realizare a micromagneților aplicabilă cu baza tehnologică și de cunoștințe a ICPE-CA. S-au reproiectat magneții și au fost realizați (etape: realizarea formei și dimensiunilor propuse, magnetizarea și măsurarea magnetică a acestora).

Realizarea formei și dimensiunilor

Având în vedere problemele tehnologice apărute în fazele anterioare (structuri neomogene, dendritice, poroase și imposibil de magnetizat la performanțe ridicate) s-au înlocuit magneții realizați prin electrodepunere de NiCoMnP, cu magneți realizați din pământuri rare NdFeB, realizați prin operația de prelucrare prin electroeroziune cu fir. S-a folosit o masină de electroeroziune cu fir tip EDM Smart DEM, folosind fir de alamă producător DacoCut – Germania, diametru 0,25mm, 980N/mm². S-au realizat magneți în ambele configurații de magnetizare studiate anterior (perpendiculară pe microactuator sau orientată în lungul axei microactuatorului).

S-au realizat magneți permanenți monobloc, cu $L \times l = 5 \times 5$ mm în două variante de grosimi $H_1=0,85$ mm și $H_2=0,5$ mm (Figura 5), dar și rețea de magneți ca în figura 6.

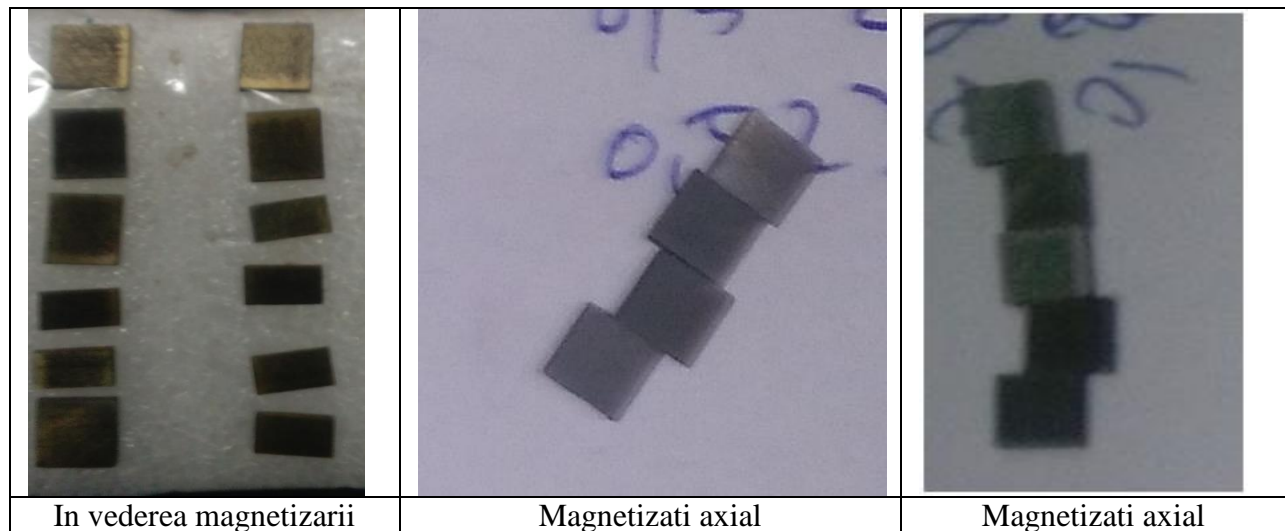


Fig. 5 Magneți permanenți monobloc NdFeB.

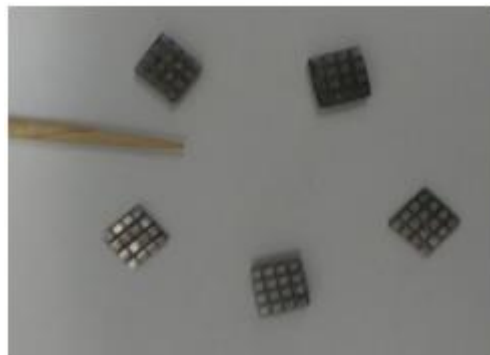
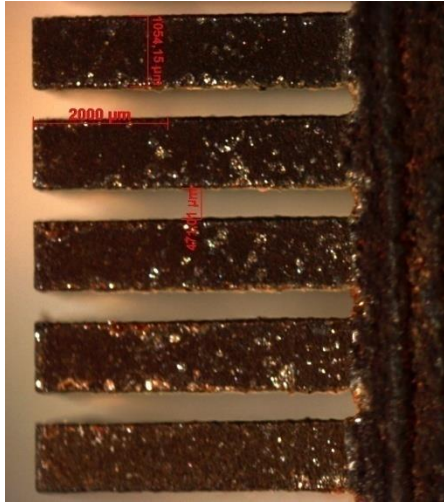


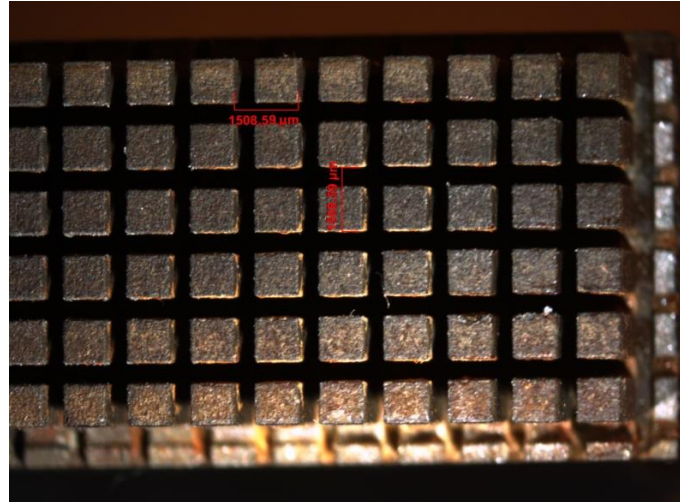
Fig. 6 Sisteme matriciale de magneți permanenți.

Realizarea matricilor de magneți permanenți a presupus, într-o primă variantă, realizarea dintr-un calup de NdFeB a unui semifabricat paralelipipedic. În acest semifabricat s-au tăiat folosind electroeroziunea cu fir lamele cu lățimea de 1mm, echidistante (distanța dintre lamele de aproximativ 0,5mm) - Figura 7.a. Semifabricatul a fost rotit cu 90°, obținându-se o matrice de

piloni echidistanți - Figura 7.b. Pe fața frontală a matricii s-a adezivat cu rășină lamela elastică. Spațiul dintre magneți a fost completat cu rășină (Figura 7.c). În figura 7.d. se prezintă un detaliu cu un micromagnet din matrice caracterizat dimensional.



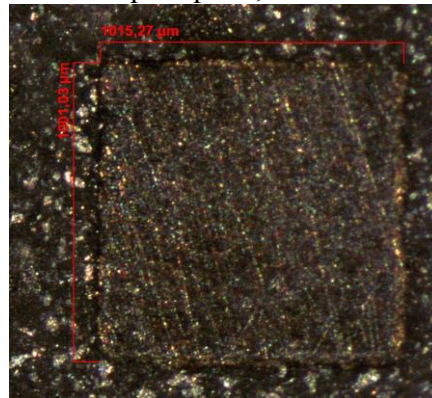
a. Realizare semifabricat ce conține lamele pentru matricea de magneți, Microscopie optică, 12,5x



b. Realizare semifabricat ce conține pilonii pentru matricea de magneți, Microscopie optică, 8x



c. Matrice de magneți permanenți pe suport, Microscopie optică, 10x



d. Detaliu cu un magnet din matrice, Microscopie optică, 50x

Fig. 7 Realizarea unei matrici de magneți permanenți.

O altă abordare de realizare a sistemelor matriciale, mult mai laborioasă a fost realizarea elementelor matriciei individual la dimensiunea 1x1x0,5 mm și montarea, sub microscop într-o matrice realizată din fotorezist SU8, prin litografiere, ca în figura 8.

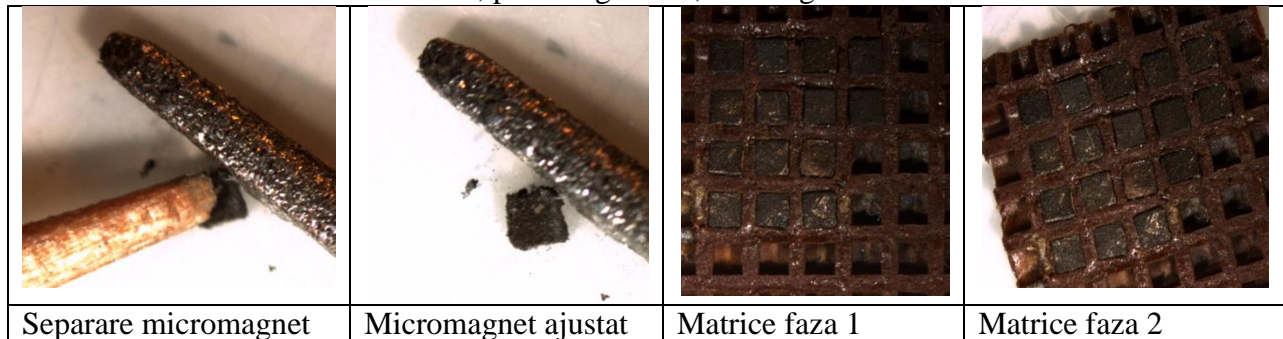


Fig. 8 Montarea micromagnetilor în matrice.

Magnetizarea magneților permanenți

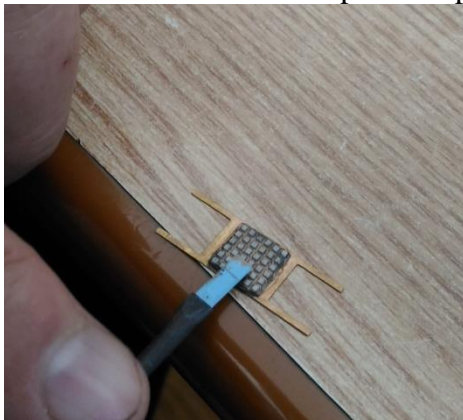
S-a realizat folosind magnetizorul dezvoltat la ICPE-CA, prin aplicarea unui impuls de 1450V timp de 2 ms, bobina HELMHOLTZ. Pentru a obține o valoare superioară a magnetizației s-a folosit un sistem de concentrare a câmpului magnetic, ca cel din figura 9.



Sistem de magnetizare pentru concentrare locală Montarea magnetului pentru magnetizare
Fig. 9. Magnetizarea magneților permanenți.

Caracterizarea magnetică a magneților permanenți

Măsurarea câmpului magnetic generat de magneți (atât în varianta monobloc dar și rețea) s-a realizat cu un sistem cu sonda de suprafață tip LakeShore 412 Gussmet, ca în figura 10.



Masurarea cu sonda lamelara



Masurarea cu sonda perpendiculara

Fig. 10 Măsurarea câmpului magnetic generat de magneți.

Valorile măsurate se regăsesc în tabelul 1, pentru mai multe loturi de magneți și la diferite distanțe de suprafața liberă a magneților

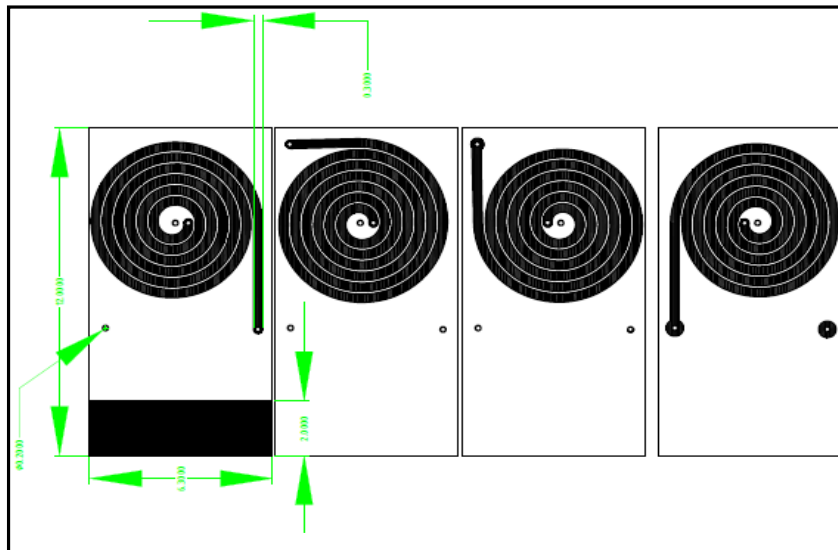
Tabel 1. Rezultate experimentale la caracterizarea câmpului magnetic produs de magneți.

Magneți monobloc				Sistem magnetic matricial	
Magnetizare axiala		Magnetizare perpendiculara		Magnetizare axiala	Magnetizare perpendiculara
H=0,85 mm	H=0,5 mm	H=0,85 mm	H=0,5 mm		
B [T]					
0,232	0,131	0,173	0,102	0,056	0,048
0,180	0,121	0,165	0,091	0,045	0,050
0,209	0,137	0,148	0,095	0,053	0,04
0,207	0,132	0,169	0,105		
0,229	0,143	0,171	0,099		

1.3 Realizarea bobinelor

Prima soluția studiată a fost cea a bobinelor plane, realizate prin tehnologia specifică circuitelor imprimate multistrat, de grosime standard 35μm. Curentul electric maxim este de 40mA la funcționarea timp îndelungat în regim permanent și se poate ajunge la 200mA pentru funcționarea în regim intermitent (un regim de funcționare care să permită răcirea). Creșterea lățimii spirelor, pentru creșterea curentului electric, nu este posibilă decât prin reducerea numărului de spire, ceea ce conduce la reducerea câmpului magnetic. Studiile experimentale pentru actuatorii cu bobine plane au indicat necesitatea creșterii câmpului magnetic generat de bobine pentru atingerea parametrilor inițiali de proiect. În consecință a fost studiată și posibilitatea utilizării unei bobine cilindrice. Au fost realizate două tipuri de bobine.

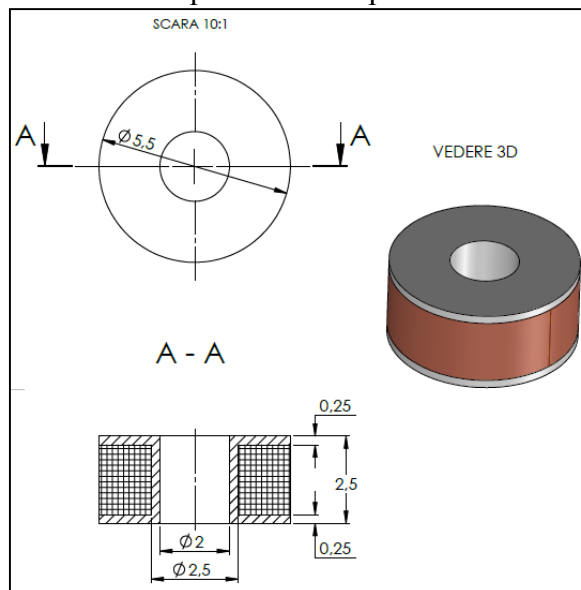
Microbobinele spirale plane au fost realizate de SADELEC Pascani, pe baza proiectului dezvoltat în cadrul contractului și indicat în figura 11.



Numărul spire: 7/ strat;
Grosimea spirei: 0,035 mm;
Lățimea spirei: 0,3 mm;
Distanța între spire: 0,12 mm.

Fig. 11 Ansamblu bobină spirală plană în patru straturi.

Microbobinele tip solenoid au parametrii indicați în figura 12.



nr. de spire = 181

diametru sarma $d=0,1$ mm

tip sarma: [sarma de bobinaj din cupru, dublu emailat - ET2, Ø 0.25mm](#)

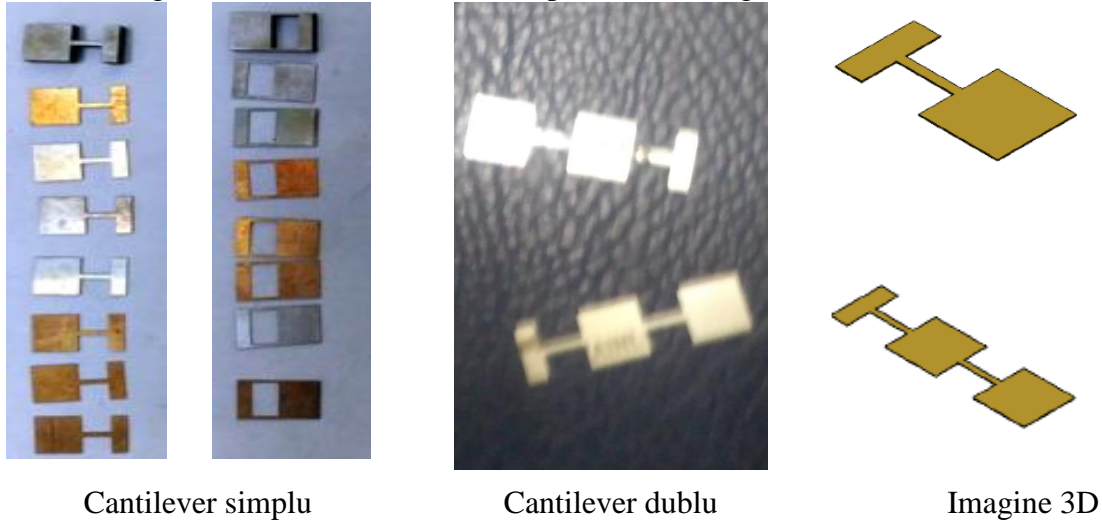
rezistența electrică: 5,8 Ω

Fig. 12 Ansamblu bobina tip solenoid.

1.4 Realizare elemente elastice (cantilever)

Realizarea elementului elastic s-a realizat prin decuparea formei dorite folosind electroeroziunea cu fir. S-au realizat diferite configurații, modificându-se geometria grinzii dar și materialul din care este construită. Modificarea materialului grinzii s-a făcut atât pentru a varia modulul de elasticitate al grinzii cât și pentru a modifica modul de închidere al liniilor de câmp. Prelucrarea a fost realizată pe o mașină de electroeroziune cu fir tip EDM Smart DEM, folosind fir de alamă producător DacoCut – Germania, diametru 0,25mm, 980N/mm².

Imagini cu structuri realizate sunt prezentate in figura 13.



Cantilever simplu

Cantilever dublu

Imagine 3D

Fig. 13 Cantilevere ezechutate.

S-a folosit tabla de BzBe (tip Cu 98Be2) cu grosimea de 0,2 mm și tabla de oțel inoxidabil (tip 1.4404-X2CrNiMo17-12-2), cu grosimea de 0,1 mm. Desenul de execuție pentru cantileverul din oțel inoxidabil este dat in figura 14.

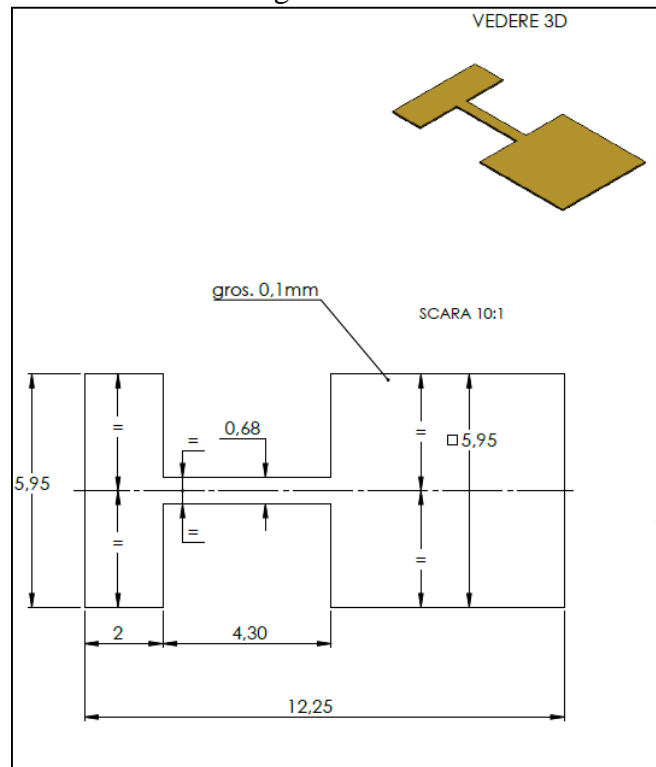


Fig. 14. Desen executie cantilever simplu .

În această etapă s-a analizat și posibilitatea îmbunătățirii designului folosind o soluție de amplificare mecanică, operabilă static dar mai ales dinamic. Soluția presupune dublarea zonei elastice, prima regiune având rolul de actuator iar cea de a doua fiind utilizată pentru scanare și având o depunere de Au. Desenul de execuție pentru cantileverul dublu este dat în figura 15.

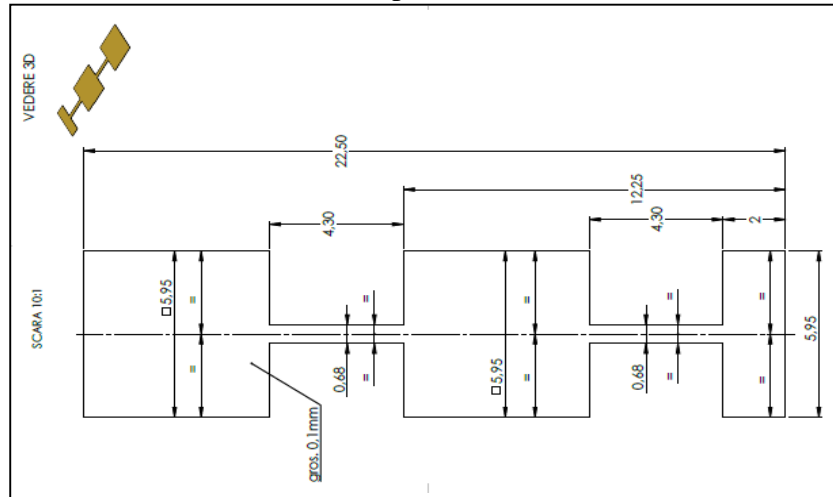


Fig. 15. Desen execuție dublu cantilever.

Obținerea cantileverului prin operația de electroeroziune cu fir are dezavantajul că se pot obține structuri doar din materiale conductoare electric. Deoarece s-a dorit utilizarea unor structuri tip cantilever din materiale care nu conduc curentul electric s-a realizat o mini-ștanță care a permis executarea cantileverului și din materiale plastice tip hostafan sau F-DMD. Ștanța a fost executată din oțel rapid de scule pe mașina de electroeroziune cu fir.

1.5 Realizarea și utilizarea unui stand pentru testarea performanțelor actuatorului.

Pentru caracterizarea actuatorului ca scanner optic s-a construit un stand optic de dimensiunile 900 x 1200 mm, de mare stabilitate. Standul optic este construit pe o masă cu structură tip “fagure de miere”, pentru eliminarea vibrațiilor și asigurarea stabilității mecanice a sistemului. Pe acest stand optic s-au plasat componentele sistemului așa cum se vede în fig. 16.

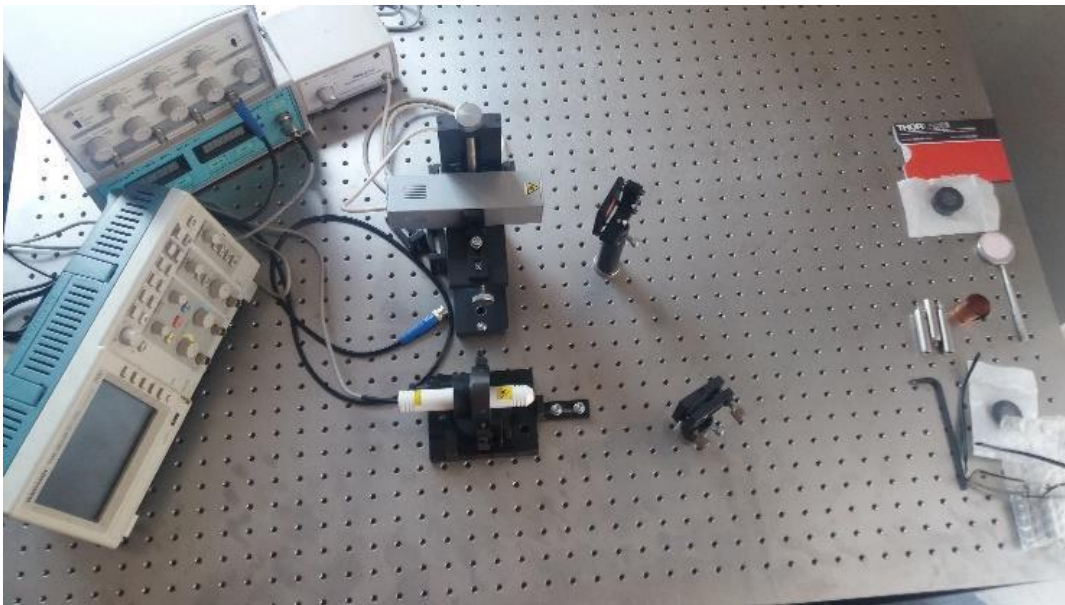


Fig. 16 Stand optic de mare stabilitate.

Structura standului este explicată în figura 17.

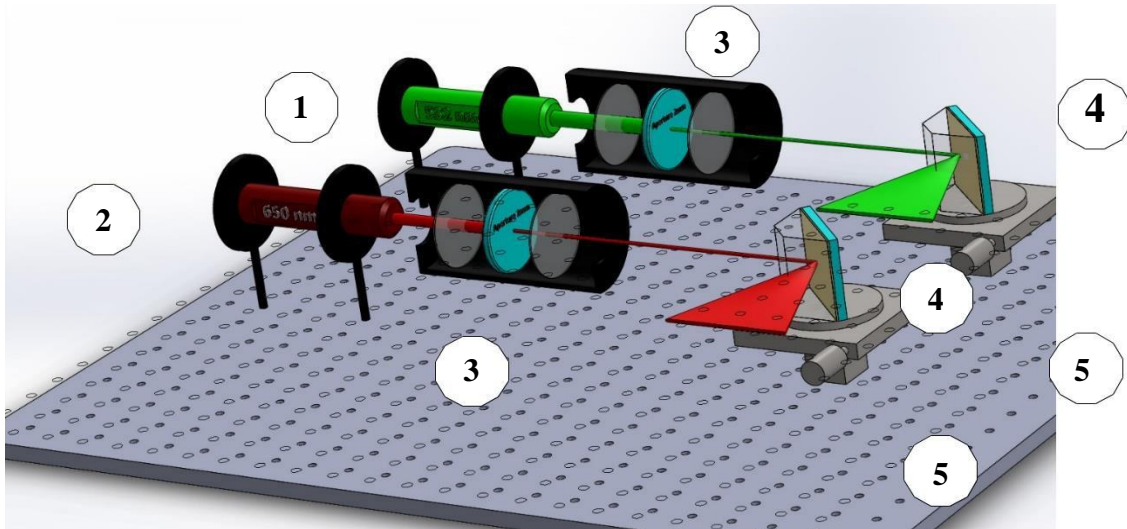


Fig. 17 Structura standului optic: 1. Sursa laser DPSS 532nm/100; 2. Sursa laser DTL 650nm/40; 3. Filtru spațial; 4. Oglinda MEMS; 5. Dispozitiv de rotație.

Pentru verificarea standului s-a testat un scanner optic ultraminiatural având o oglindă ce reflectă fasciculul laser și care se deplasează sub acțiunea unui actuator electromagnetic. Scannerul este de tip MEMS produs de către compania Hamamatsu, cod S12237-03P. MEMS este format dintr-o bobină metalică depusă pe un substrat de siliciu cu rol de oglindă și un având un magnet plasat sub oglinda. Unghiul maxim de deflexie optică este de +/- 18 grade arc pentru un curent de comandă de +/- 20 mA.

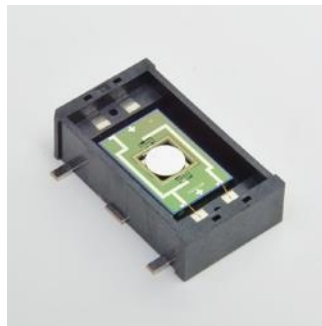


Fig. 18 Oglinda MEMS pentru scanare laser.

Prin utilizarea standului au fost regasiți parametrii comunicați în fișă tehnică a scannerului de compania Hamamatsu, ceea ce confirmă concepția standului.

Diseminare

Îmbunătățirile constructive ale structurii mecanice au fost desemniate prin articolul:

Comeaga, C.D., Gheorghe, V. - A MEMS electro-mechanical device for scanning and energy-harvesting based on moving magnets matrix, AVMS Conference 2017, 23-25 May 2017, Timisoara, Romania (Proceedings indexat ISI)

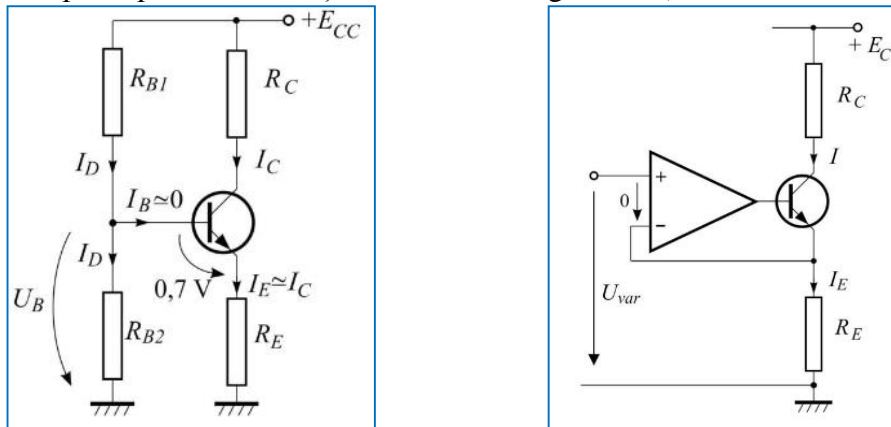
2. Activitatea 4.3

2.1 Concepția circuitului

În primul pas a fost realizată o simulare a circuitului, în programul PSpice, pe baza schemei preliminare dezvoltate în etapele anterioare. Etapele simulării au fost:

1. Determinarea punctului static de funcționare stabilă PSF, care se obține prin alimentarea circuitului în c.c., din analiza .DC. Soluția de c.c. conține două seturi de rezultate :
 - DC BIAS SOLUTION care furnizează valorile tuturor potențialelor nodurilor în secțiunea fișierului de ieșire intitulată SMALL SIGNAL BIAS SOLUTION (SSBS) la analiza .DC, sau INITIAL;
 - TRANSIENT SOLUTION (ITS) la analiza .TRAN; OPERATING POINT INFORMATION (OPI) cuprinzând informații legate de PSF : curenți, tensiuni de laturi, conductanțele elementelor modelului echivalent de semnal mic, calculate numai pentru elementele neliniare de circuit. Aceste date sunt listate numai dacă acest lucru este cerut printr-o declarație .OP, cu excepția cazului când în fișierul de intrare nu există nici o cerere de analiză.
2. Dacă se urmărește efectuarea unei analize de semnal mic .AC se face liniarizarea elementelor de circuit neliniare. Analiza se face pentru semnale sinusoidale de mică amplitudine, astfel încât circuitul să poată fi considerat liniar.
3. Analiza de semnal mare, .TRAN, ține seama de toate neliniaritățile circuitului, fiind precedată de determinarea condițiilor inițiale (ITS), cu excepția cazului când aceasta este dezactivată explicit cu declarația UIC (Use Initial Conditions), care specifică valorile inițiale ale potențialelor unor noduri sau ale tuturor tensiunilor la bornele condensatoarelor sau curenților în bobine.

Schema de principiu utilizată inițial este cea din figura 19 a).



a) Generator de curent constant cu tranzistor bipolar b) Convertor tensiune - curent cu AO

Fig. 19 Soluții inițiale de convertor tensiune-curent.

Un circuit ca cel din figura 1a) este cel mai simplu generator de curent constant. Cu aproximațiile marcate pe desen, rezultă imediat relația (1):

$$U_B = E_C \frac{R_{B2}}{R_{B2} + R_{B1}} = 0,7 + R_E I_C \quad (1)$$

Observând ultima egalitate se poate spune și că, deoarece toate celelalte mărimi sunt constante, și curentul I_C este constant. Trebuie precizat că situația este valabilă doar pentru cazul în care tranzistorul este în regiunea activă (RAN) și circuitul este ales astfel încât $I_C \gg I_B$.

Rezultă de asemenea că, dacă se poate neglija tensiunea de deschidere a tranzistorului, $U_{BE} = 0,7V$, atunci circuitul simplificat din Fig. 19a) este un convertor tensiune – curent și se poate scrie (2):

$$U_{var} = I_E R_E = I R_E \quad (2)$$

Eroarea produsă de U_{BE} este însă semnificativă.

Deoarece tensiunea dintre intrările unui amplificator operational (AO) este mult mai mică decât U_{BE} , un circuit ca cel prezentat în figura 19b) a eliminat această eroare. Este valabilă aceeași relație (2) iar curentul este direct proporțional cu tensiunea variabilă de comandă, rămânând eroarea cauzată prin neglijarea I_B . Aceasta la rândul ei poate fi micșorată sensibil dacă se utilizează tranzistoare în conexiune Darlington sau tranzistoare cu efect de câmp.

Pentru simulare, ținând cont de faptul că testele inițiale privind excitarea actuatorilor realizați în proiect au în vedere funcționalitatea și determinarea inițială a unor caracteristici dinamice și statice, s-a considerat că este suficientă abordarea unei scheme pornind de la principiul din figura 1b).

Schema concretă utilizată pentru simulare, cu componente reale, modelate pe baza parametrilor disponibili la firmele producătoare, este redată în figura 20.

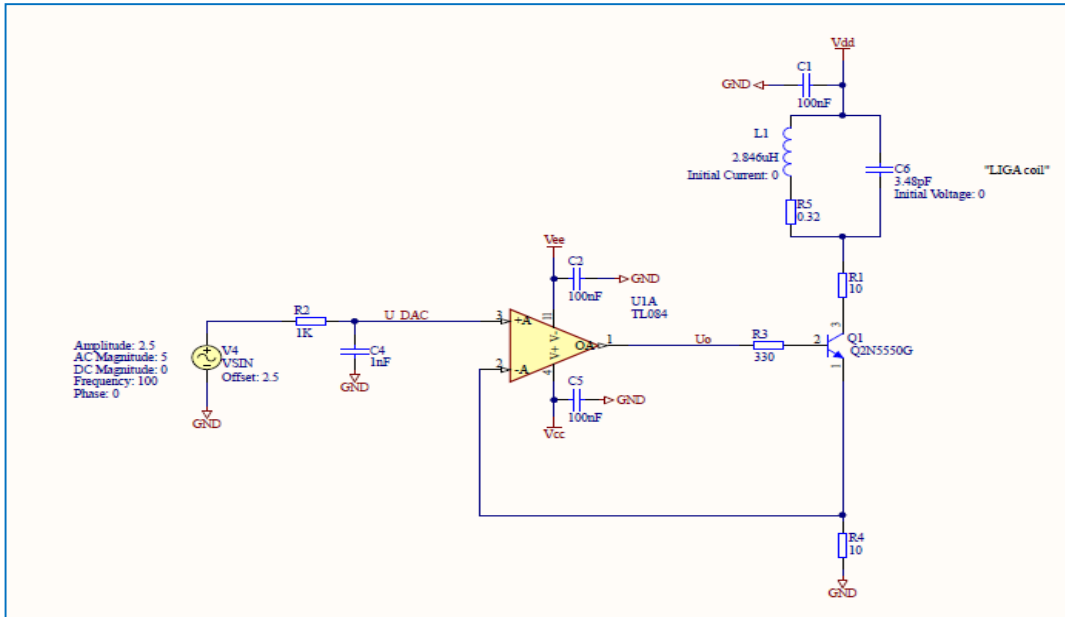


Fig. 20 - Schema generatorului utilizata la simulare.

2.2 Simularea răspunsului în frecvență

Analiza la semnal mic a.c. a avut ca scop determinarea răspunsului în frecvență sub formă de diagrama Bode a transconductanței I/U globale a circuitului. Curba obținută este prezentată în figura 21 și evidențiază o caracteristică de tip FTJ cu frecvența de tăiere la 3dB de 900Hz, optimă pentru actuator.

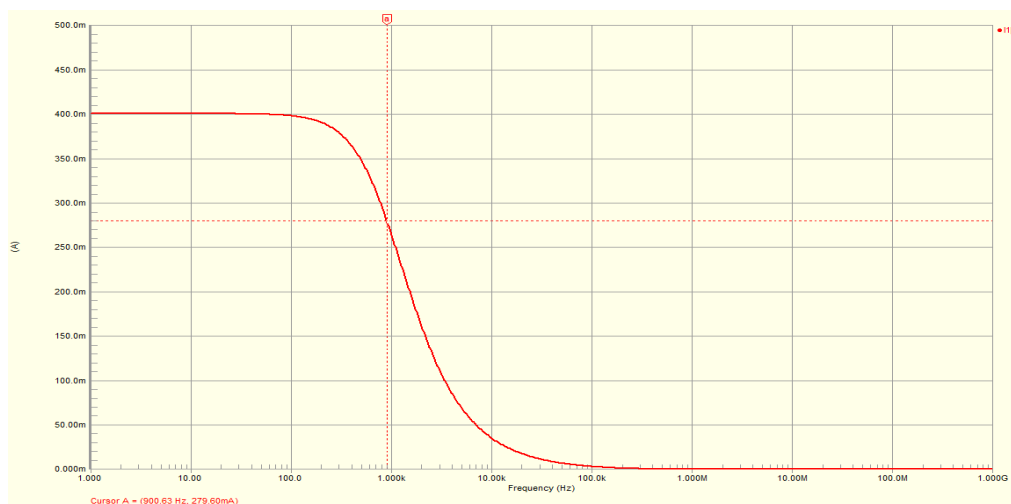


Fig. 21 – Caracteristica de frecvență a transconductanței I/U.

Pe baza schemei simulate și modelate cu parametrii reali ale unor componente și elemente de circuit comerciale, s-a trecut la realizarea unui model experimental funcțional cu schema electrică din figura 22.

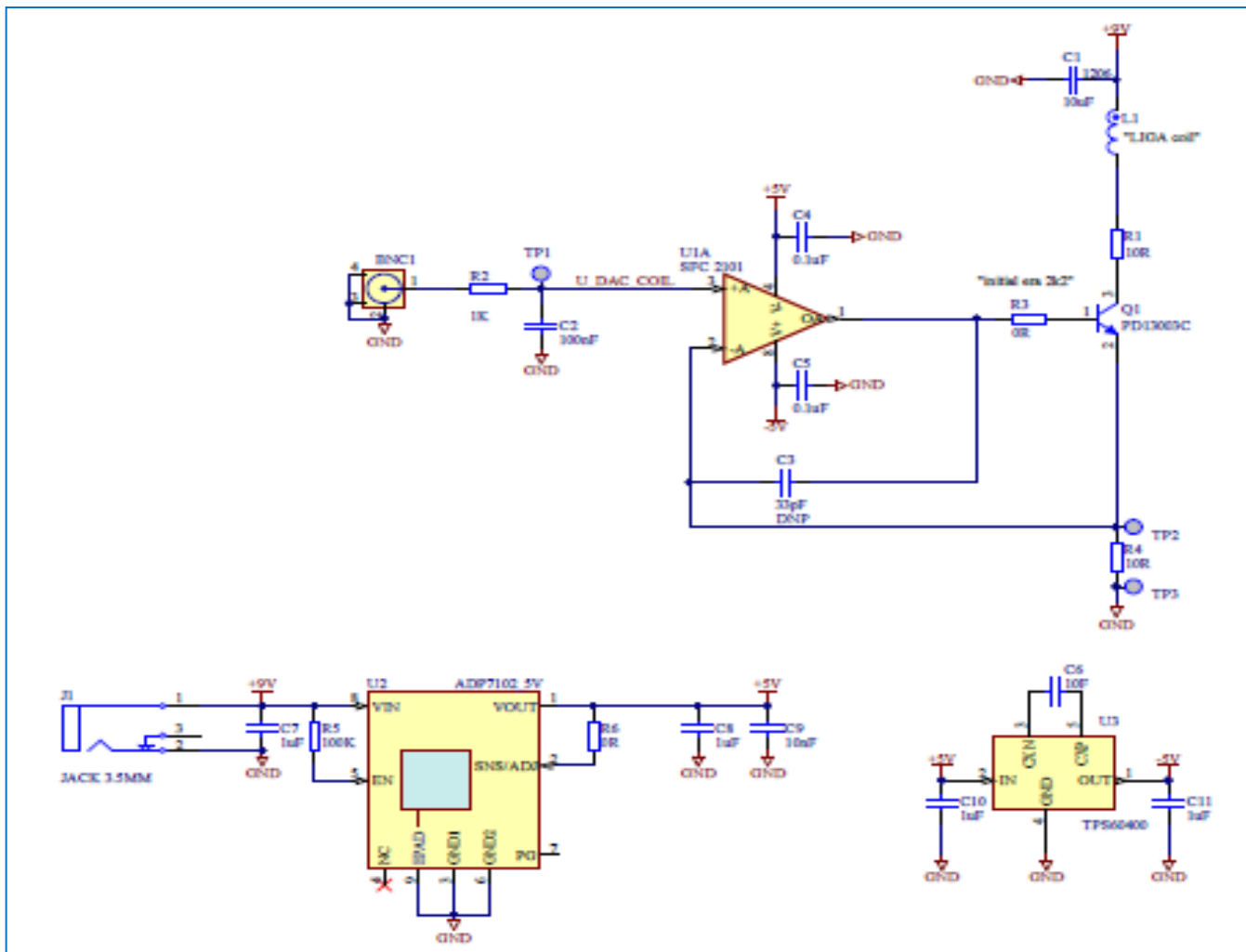


Fig. 22 Schema generatorului de curent constant realizat.

2.3 Standul experimental

Schema bloc a standului experimental folosit pentru realizarea de experimente în vederea determinării caracteristicilor de transfer specific tipurilor de actuatori studiați este compusă din:

- Sistem de calcul având instalat programul de generare forme de unda și curenți programabili dezvoltat în limbajul LabView -2013;
- Unitate de achiziție multi I/O cu ieșire de tensiune, tip Ni-USB-6211 National Instruments;
- Generatorul de curent constant realizat cu circuite electronice discrete (amplificatoare operaționale) pe o placă experimentală;
- Traductorul testat.

Diseminare

Studiul sistemului de comandă electric a fost prezentat la o conferință internațională:

Sergiu, D., Anghel, C., Comeaga, C.D., Morega, A.M. - Modelling and Simulation of MEMS Electro-magnetic Scanner Control, Proceedings of „2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering” IEEE Conference, 19-21 May 2017, Sankt Petersburg, Rusia.

3. Activitatea 4.2 și Activitatea 4.4

Odată cu realizarea actuatorului și schemei electrice de comandă s-a procedat la realizarea testelor pentru structurile de actuator. Pe durata testelor s-au propus mai multe îmbunătățiri, evidențiate în continuare și care au condus la modificări structurale. Deoarece actuatorul poate fi utilizat atât pentru aplicații cvasi-stactice (în micro și nanotehnologii, micro-biologie, optică) dar și în aplicații dinamice (sisteme de scanare folosite în realitatea virtuală și augmentată, microscanere pentru aplicații medicale, microscanere pentru detecție celulară sau analiza suprafețelor), s-au analizat experimental ambele cazuri.

Testarea statică a actuatorului electromagnetic

În această etapă a fost analizată experimental soluția constructivă dezvoltată, din punct de vedere al răspunsului cvasi-static. Mărimea de comandă este un current electric produs cu o sursă de current Rhode&Scwartz tip HMP 4030. Determinarea deplasării capătului liber s-a realizat cu ajutorul unui interferometru cu lumină albă de tip Mireau, cod WYKO NT 1100, produs de compania Veeco. În cazul actuatorului studiat a fost necesară montarea lui pe o placă de referință și atașarea de această placă a unei cale, cu rol de suprafață de referință fixă.

O imagine a sistemului de măsurare (interferometrul) din timpul testării este indicată în figura 23, împreună cu o imagine a sistemului de comandă, ce generează semnalul pentru actuatorul inclus în analizor, achiziția imaginilor și prezentarea lor pe un display separat, procesarea imaginii franjelor și determinarea profilelor.



Fig. 23 Sistemul de măsurare interferometrică folosit.

O imagine de tipul celor achiziționate de camera este prezentată în figura 24, putându-se observa suprafața calei de referință și cea a actuatorului, împreună cu un ecran al aplicației ce generează datele rezultate în urma procesării imaginilor și post procesării metricii de puncte.

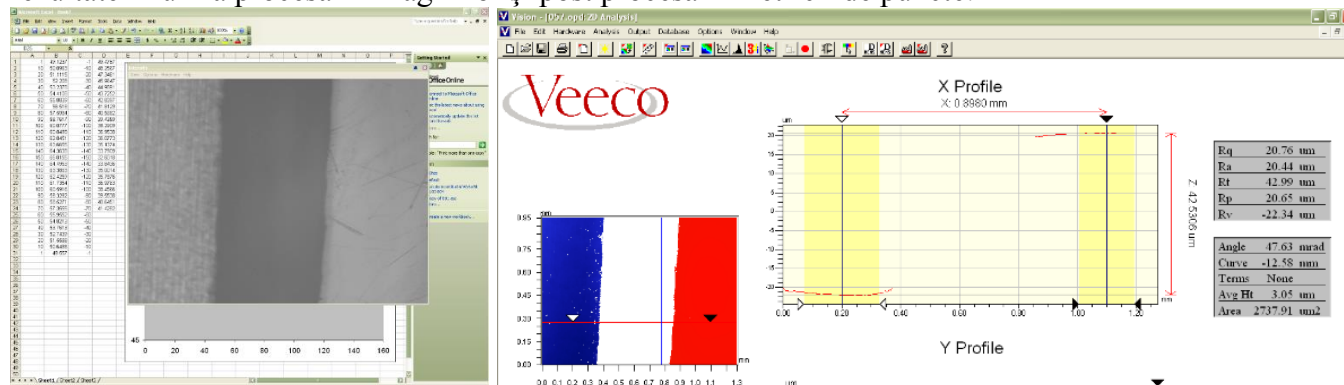


Fig. 24 Postprocesarea datelor în vederea determinării poziției relative a actuatorului și imagine achiziționată de camera CCD a microscopului în timpul testării.

Bobina plană; magnet tip rețea de micromagneți

Prima soluție constructivă analizată este cea conținând o bobină plană, multistrat, realizată cu tehnologia de fabricație a PCB-urilor multistrat.

Dependența curent electric-tensiune electrică de comandă este indicată în figura 25 (sursa de curent indică și tensiunea electrică generată, care a condus la obținerea curentului programat).

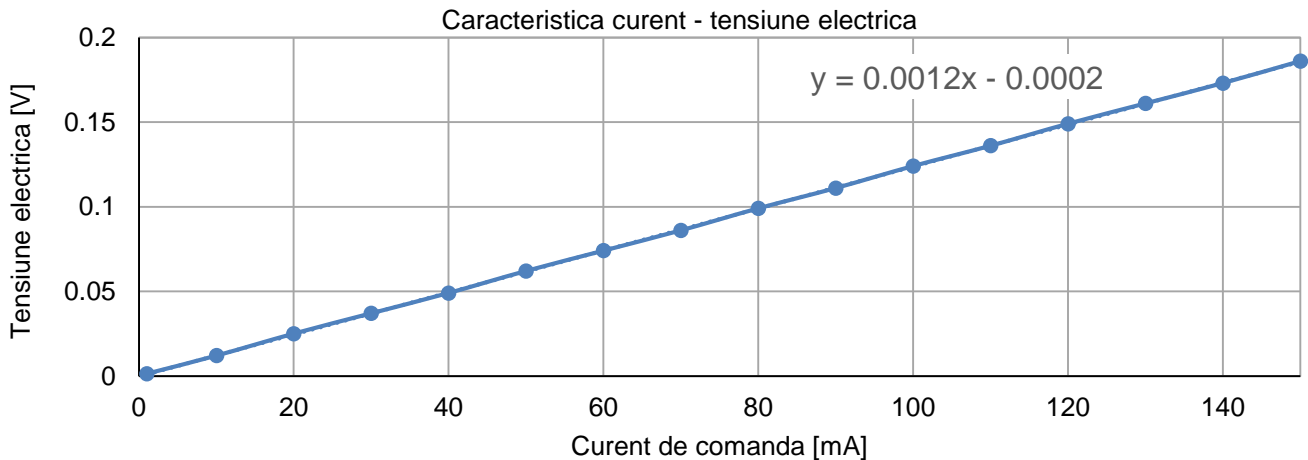


Fig. 25 Caracteristica de răspuns electric.

Datele din figura 25 corespund unui circuit electric cu o rezistență electrică de $0,83\Omega$.

Caracteristica curent – deplasare a actuatorului (măsurată la capătul liber și raportată la poziția corespunzătoare unui curent nul aplicat bobinei) este indicată în figura 26, având o foarte bună liniaritate.

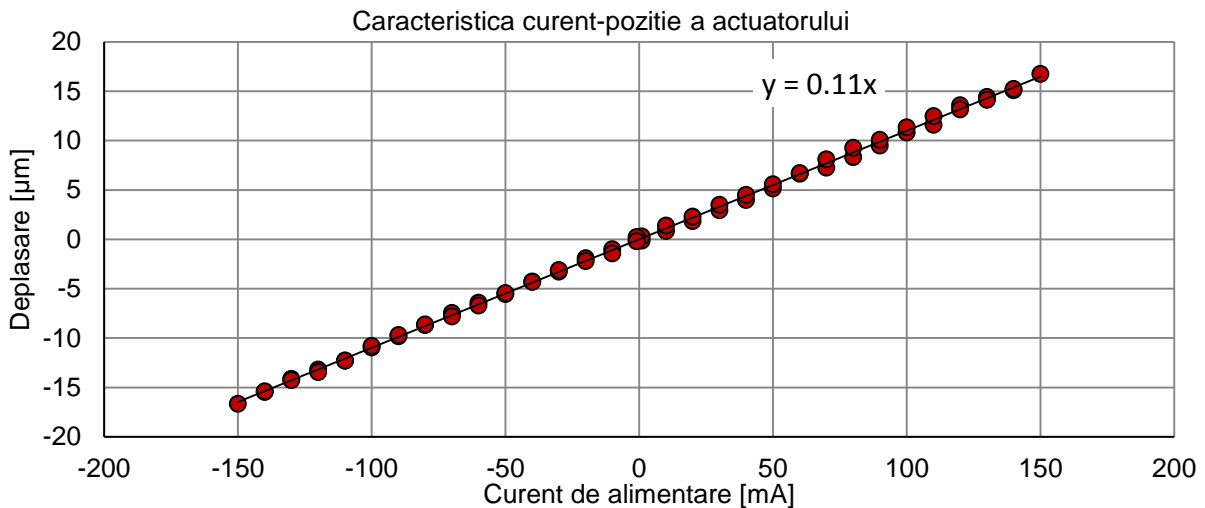


Fig. 26 Răspunsul electro-mecanic al actuatorului.

Se observă că se obține o caracteristică mecanică liniară, element foarte important în practică, dar deplasările sunt mici, de cca. $1,1\mu\text{m}/10\text{mA}$. Ținând cont că limita de curent pe durată îndelungată este de cca 40mA , se deduce că deplasarea utilă a actuatorului este de $4,5\mu\text{m}$, suficientă pentru utilizare în domenii cum sunt nanotehnologia, manipularea genetică, etc., dar insuficient pentru aplicații de scanare.

O soluție posibilă este creșterea curentului prin bobină, dar impune creșterea grosimii bobinei (creșterea lățimii spirei conduce la o dimensiune totală în plan foarte mare iar menținerea dimensiunii totale odată cu creșterea lățimii conduce la număr mic de spire, implicit la un câmp magnetic slab și scăderea performanțelor). Grosimea de $35\mu\text{m}$ este impusă de standardele din domeniul PCB uzuale, conducând la necesitatea dezvoltării unor noi tehnologii pentru realizarea de bobine plane multistrat.

Bobina cilindrică cu miez; magnet tip rețea de micromagneți

Pentru îmbunătățirea performanțelor s-a înlocuit bobina plană cu o bobină cilindrică.

Bobina cilindrică este lipită pe placa PCB ce conține bobina plană (intenția este de a utiliza bobina cilindrică pentru control grosier iar cea plană pentru control fin sau de a utiliza bobina cilindrică pentru control iar bobina plană ca element senzorial).

Interstițiul total este egal cu grosimea zonei de PCB (cca. 0.8mm) plus interstițiul dintre bobina plană și magneți (cca. 0,1mm); distanța totală bobina-magnet este 0,9mm.

Caracteristica de comandă a actuatorului este indicată în figura 26 iar cea electrică în figura 27. Rezistența electrică aproximativă este de 6,30 Ω (valorile pornesc de la 6,3 Ω , la curenți mici, și cresc până la 7 Ω la curenți de 150mA), mai mare decât cea din proiect datorită conductorilor de alimentare.

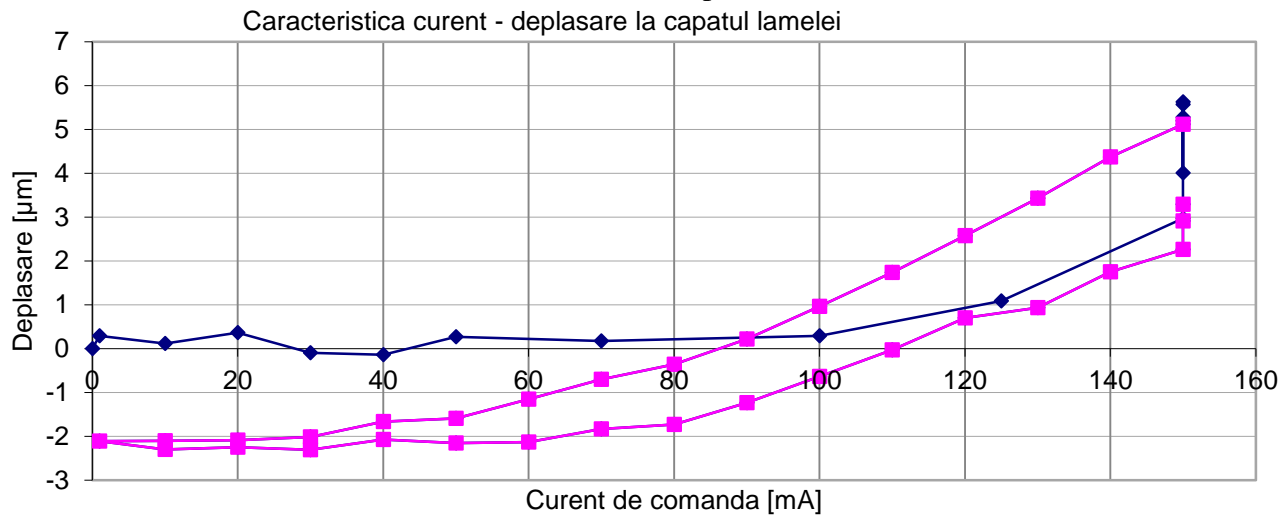


Fig. 27 Caracteristica de răspuns electro-mecanic pentru actuatorul cu bobină cilindrică cu miez.

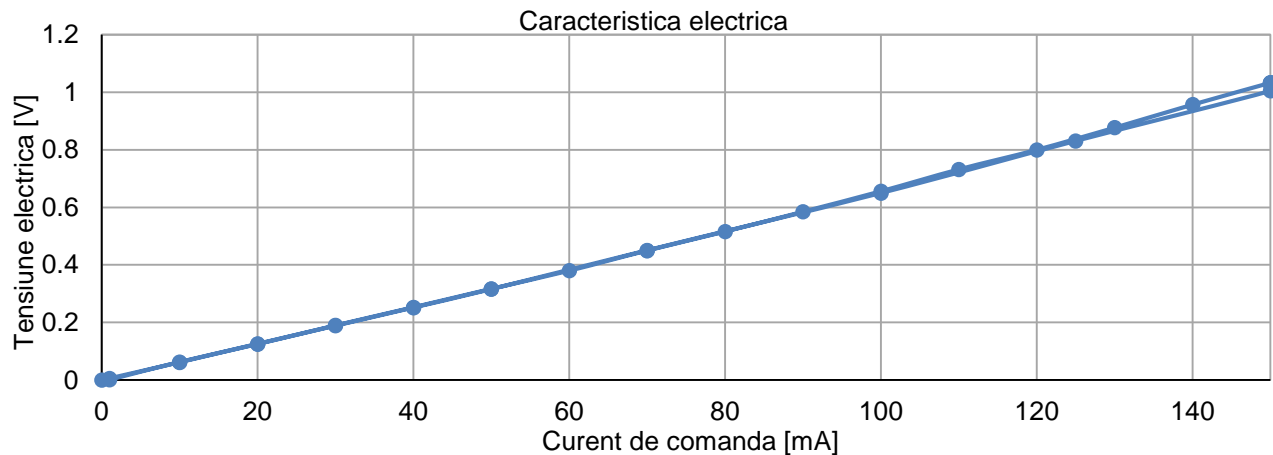


Fig. 28 Caracteristica de răspuns electric pentru actuatorul cu bobină cilindrică cu miez.

Se observă un comportament atipic. În urma mai multor teste, dar și a simulărilor, s-a ajuns la concluzia ca acesta este explicabil prin:

- în absența curentului prin bobină magneții interacționează cu miezul și apare o forță asupra părții mobile ce îi conține, ce conduce la lipirea magneților pe textolit; în plus apare o magnetizare a miezului;
- în prezența curentului prin bobină se va produce o forță de repulsie (la alegerea corectă a direcției curentului electric) asupra magneților; actuatorul începe să se deplaseze atunci când această forță depășește forța de interacțiune magneți-întrefier; deoarece această ultimă forță nu variază liniar cu

deplasarea, nici variația deplasării actuatorului (aflat sub acțiunea acestei forțe neliniare și a celei liniare dintre bobină și magneți) nu va fi liniară;

- dacă se crește curentul și apoi se așteaptă, de observă că deplasarea continuă să crească lent, ceea ce indică o scădere a forței de interacțiune dintre magneți și întrefier, apoi se stabilizează. Se consideră că aceasta este rezultatul demagnetizării întrefierului sub acțiunea câmpului generat de bobină;

- la variația curentului spre zero și apoi spre valoarea maximă se obțin curbe neliniare, histerezis ridicat și deriva valorii deplasării la curent electric mare constant, ca urmare a combinării factorilor de mai sus.

Acest tip de actuator neliniar și cu deplasări mici nu este util.

Bobina cilindrică fără miez; magnet tip rețea de micromagneți

Pentru îmbunătățirea performanțelor s-a eliminat miezul bobinei.

Caracteristica de comandă a actuatorului este indicată în figura 29 iar cea electrică în figura 30. Rezistența electrică este cca. 6,3Ohm (are comportare similară cazului anterior).

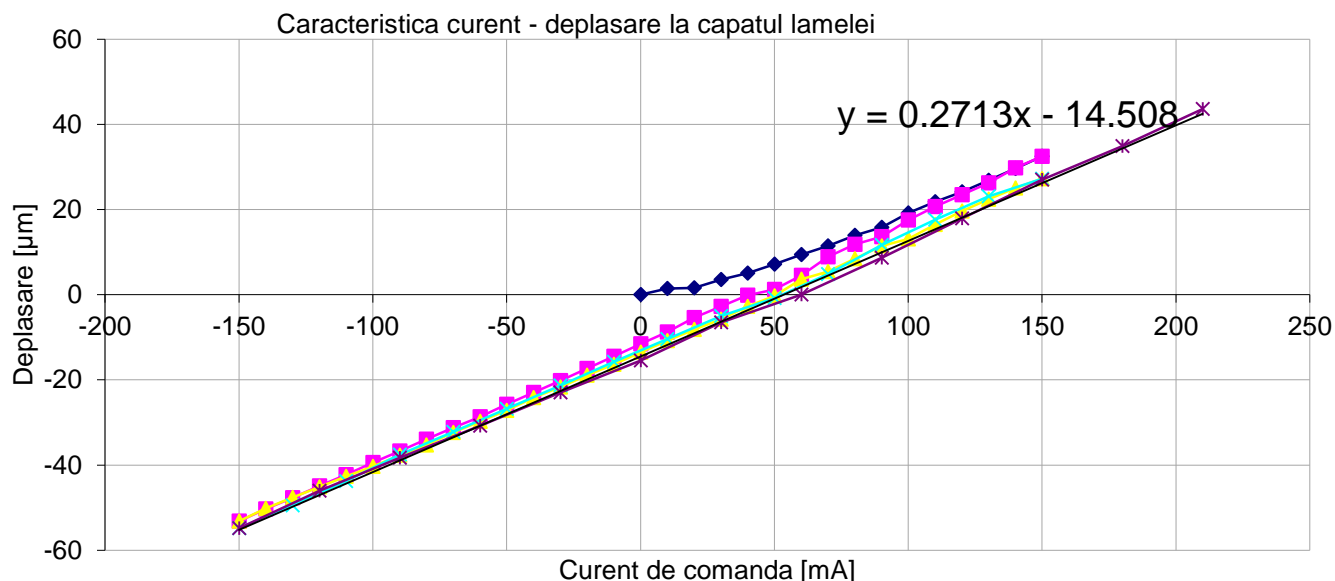


Fig. 29 Caracteristica electro-mecanică a actuatorului cu bobină cilindrică fără miez.

Se observă o primă caracteristică neliniară, pentru a cărei explicare sunt necesare studii suplimentare, urmată de o comportare liniară, repetabilă.

Deplasarea este de cca. 2,7µm/10mA, superioară celei obținută cu bobină plană, de 1,1 µm/10mA.

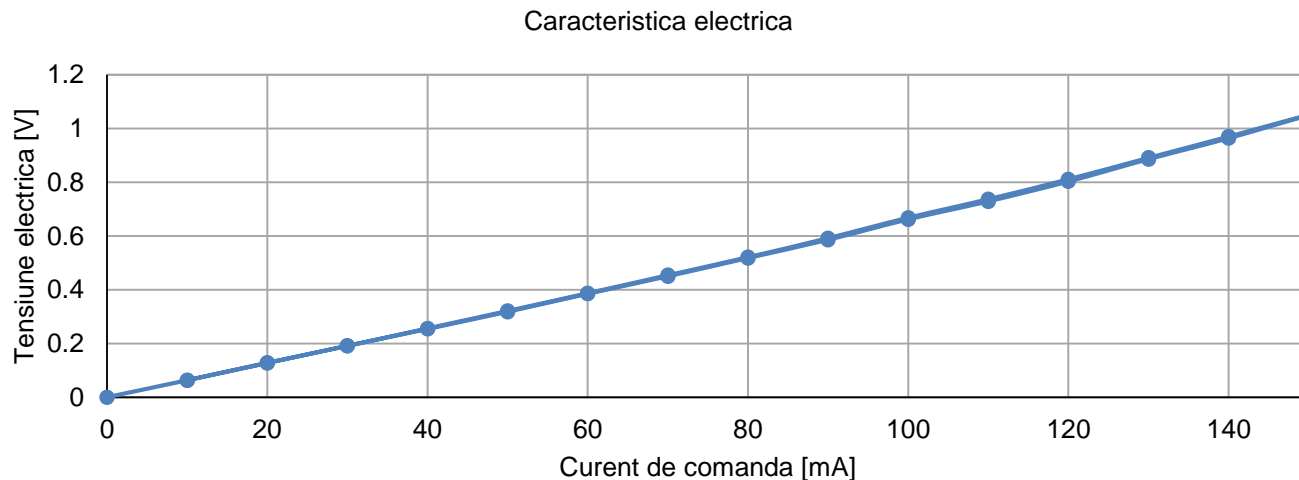


Fig. 30 Caracteristica de răspuns electric pentru actuatorul cu bobină cilindrică cu miez.

Bobină cilindrică fără miez și fără textolit; magnet masiv

Interstițiul dintre bobină și magnet este redus prin frezarea zonei de textolit 1,2mm. În plus, s-a modificat actuatorul adăugând o prelungire zonei ce poartă magnetul.

Caracteristica electro-mecanică a actuatorului este indicată în figura 31 pentru deplasarea măsurată la capătul lamei actuatorului (în aceeași poziție ca și în cazurile anterioare) și în figura 32 pentru deplasarea măsurată la capătul zonei adăugate.

Se observă o deplasare a capătului actuatorului de cca $11,8\mu\text{m}/10\text{mA}$, de peste 4 ori mai mare decât în cazul anterior și de 10 ori mai mare decât în cazul bobinei plane, și peste $25\mu\text{m}/10\text{mA}$ pentru capătul zonei adăugate. Capătul zonei adăugate are o caracteristică ușor neliniară deoarece la actuator apare încovoiere doar pentru zona dintre încastrare și magnet, apoi rămânând drept și apărând un mecanism similar celor de arc-tangentă din mecanica de precizie. Neliniaritatea deplasării capătului zonei libere este foarte mică, sub 5%, și poate fi neglijată.

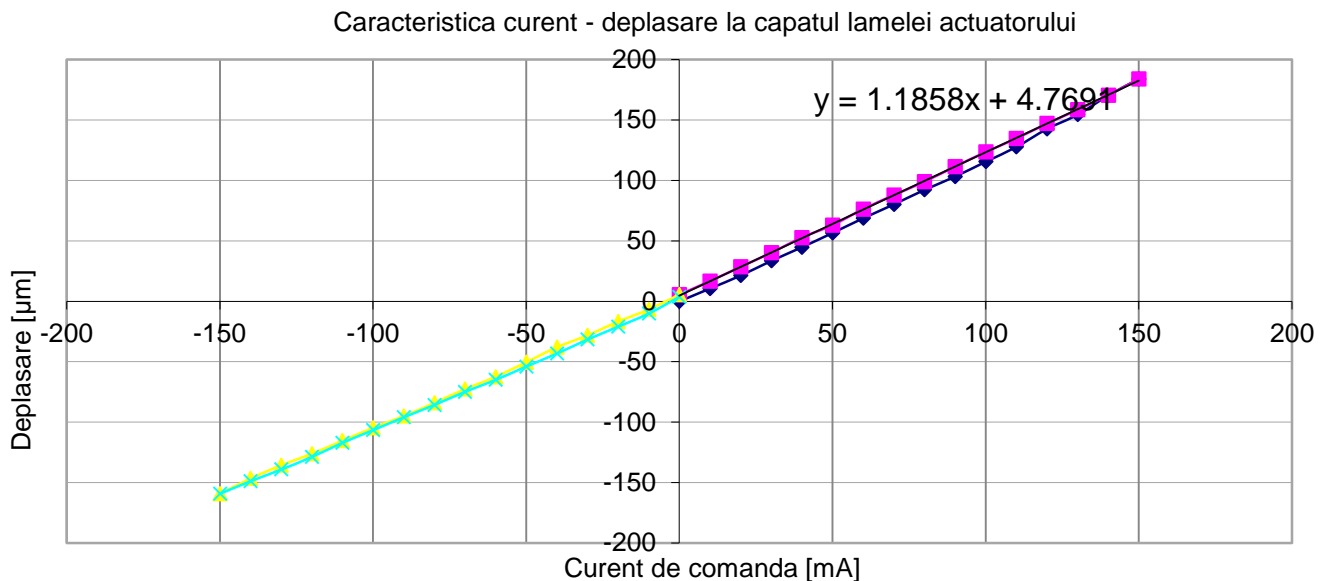


Fig. 31 Caracteristica electro-mecanică a actuatorului cu oglindă adițională.

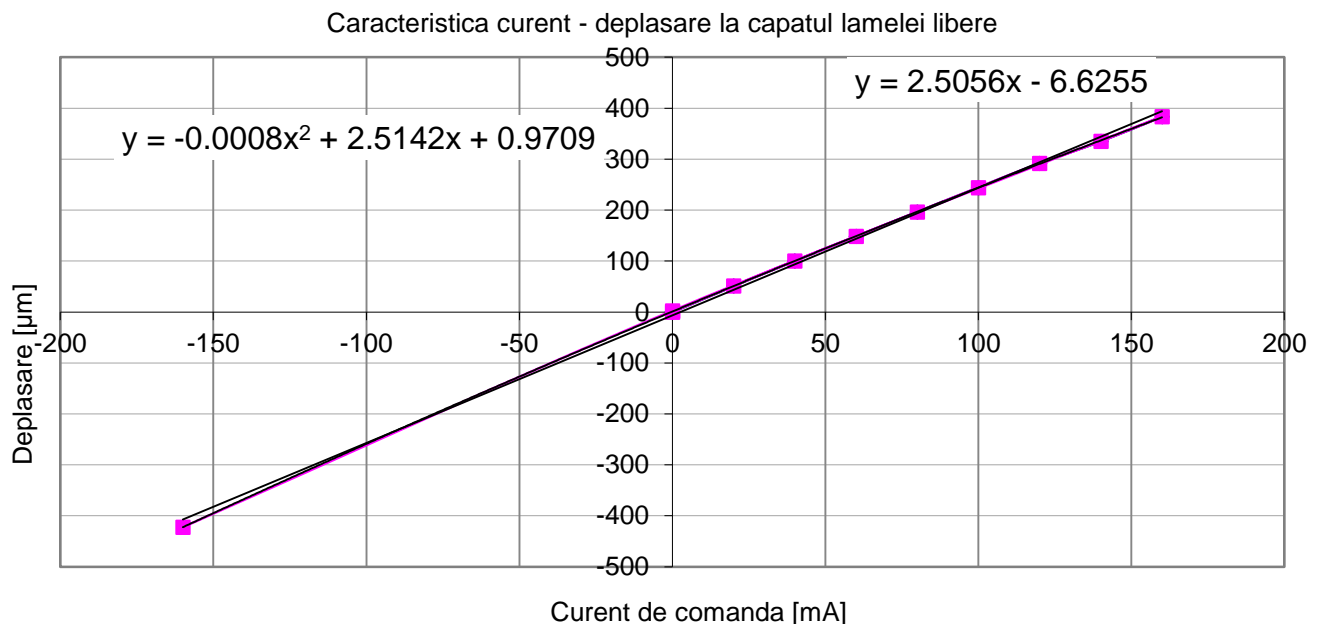


Fig. 32 Caracteristica electro-mecanică a actuatorului cu oglindă adițională.

Testarea dinamică a actuatorului electromagnetic

În această etapă a fost analizat răspunsul dinamic al actuatorului pentru diferite configurații (cu bobină plană, cu bobină cilindrică; cu rețea de micro-magneți sau su magnet masiv; doar în structura de bază a actuatorului dar și în cazul adăugării unui sistem suplimentar). Testarea s-a realizat cu un sistem bazat pe un microscop combinat cu cameră video și un interferometru laser diferențial, încorporate într-un ansamblu cu posibilități de poziționare mecanică multiplă, tip MSA-400 Polytec GmbH.

Bobina plană; magnet tip rețea de micromagneți

Răspunsul în deplasare al actuatorului este indicat în figura 33. Se observă existența celor două maxime corespunzătoare primelor două moduri de vibrație de încovoiere

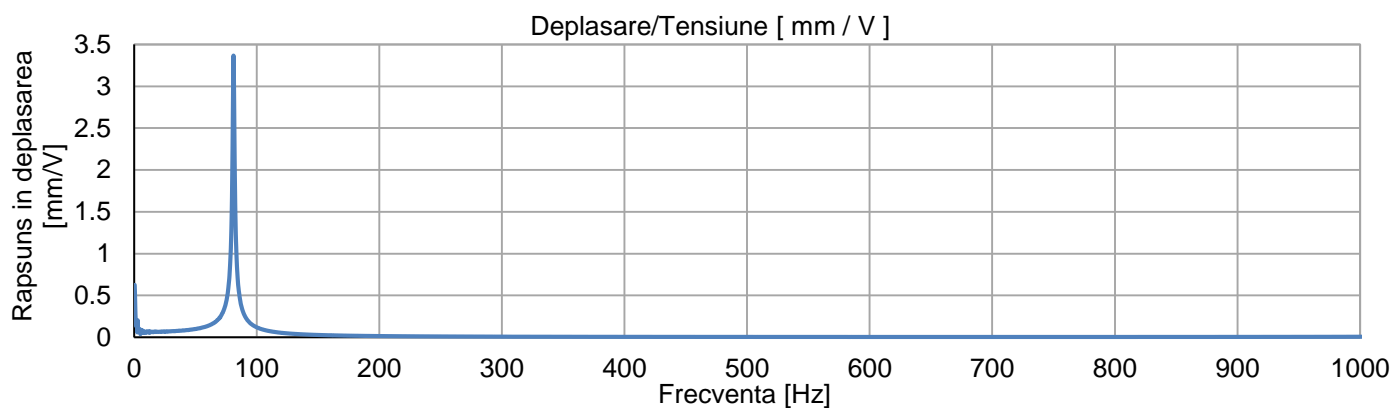


Fig. 33 Funcția de răspuns în deplasare a actuatorului [mm/V].

Amplitudinea răspunsului deplasării este destul de redusă. În practică este limitată de doi factori – interstițiul dintre magnet și bobină, de cca 0,1mm în cazul de față, și curentul maxim prin bobină, de cca 100-120mA la funcționare de scurtă durată și cca 40-50mA la funcționare de lungă durată. Studii ulterioare au indicat că este posibilă creșterea interstițiului la cca 0,8-1mm fără o reducere a performanțelor ci chiar o îmbunătățire a lor. Creșterea interstițiului nu se poate face foarte mult deoarece scade inducția câmpului magnetic. În consecință, ca și măsurătorile cvasi-stactice, rămâne limitarea din punct de vedere electric, ce poate fi rezolvată doar prin creșterea secțiunii bobinei.

Bobina cilindrică fără miez ; magnet tip rețea de micromagneți – interstiiu mărit

Primele teste realizate cu interstițiul de 0,1mm descris la testarea statică au indicat un răspuns dinamic în deplasare doar cu 5% mai ridicat comparativ cu bobina plană. S-a studiat influența interstițiului și s-a observat că se pot obține performanțe mult mai bune prin mărirea interstițiului. În figura următoare este indicat răspunsul deplasării vibrației în raport cu tensiunea de comandă, pentru interstițiul optim. Răspunsul dinamic în deplasare este dublu comparativ cu bobina plană.

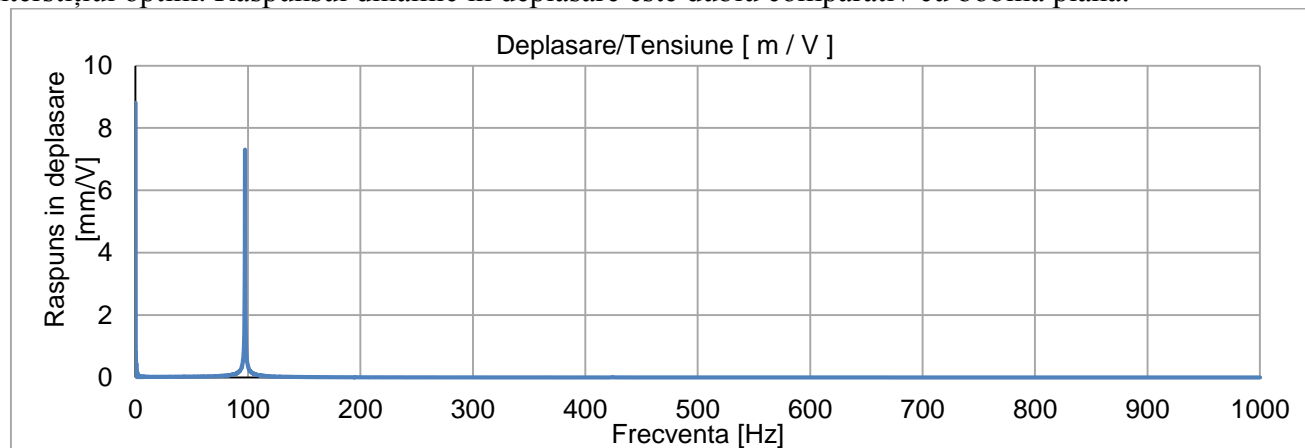


Fig. 34 Răspunsul deplasării zonei de acționare pentru sistemul cu bobină cilindrică.

Bobina cilindrică fără miez și fără textolit; magnet monobloc.

Studiile cvasi-stactice au arătat o îmbunătățire semnificativă a răspunsului dacă se înlocuiește rețeaua de magneți cu un magnet paralelipipedic monobloc și se elimină zona de textolit cu bobine.. Rezultatele studiilor dinamice, pentru sistemul descris anterior pentru cazul cvasi-static sunt indicate în figurile următoare, indicând o îmbunătățire semnificativă a răspunsului. Interstițiul total este de 1,2mm, bobina fiind montată într-o frezare din placa de PCB.

Se observă o dublare a răspunsului în deplasare pentru cazul sistemului mobil adițional format doar dintr-o dublare a zonei elastice.

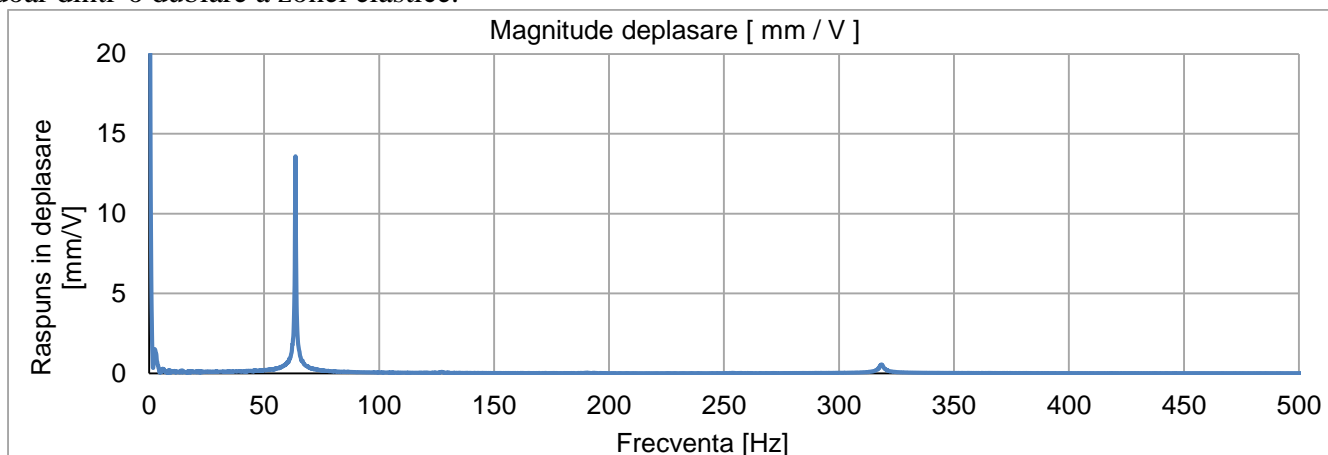


Fig. 35 Răspunsul deplasării pentru sistemul cu bobină cilindrică și interstițiu redus

CONCLUZII FINALE

Consortiul proiectului a realizat obiectivele propuse:

- Dezvoltarea unei tehnologii de fabricație a micromagneților în structură matriceală, folosind matrice obținută prin tehnologie LIGA;
- Dezvoltarea unui model numeric de simulare pentru actuator;
- Construcția electromagnetului electromagnetic;
- Dezvoltarea unei metodologii de testare și validare a subansamblelor (magneți, structură mecanică, bobine) și a sistemului de ansamblu (stand optic, metode de testare cvasi-statică bazate pe interferometrie cu lumină albă, metode de testare dinamică bazate pe vibrometrie laser).

În final, a fost realizat un micro-scanner electromagnetic a cărui funcționalitate este prezentată în filmele existente pe platforma WEB a proiectului.

Rezultatele au post prezentate prin articole la conferințe și în jurnale.

Ultimele rezultate experimentale și soluțiile conceptuale îmbunătățite vor face subiectul a încă 3 lucrări științifice, publicate pe plan internațional.

Au fost identificate mai multe direcții de îmbunătățire a sistemului (creșterea grosimii bobinelor plane și reproiectarea lor, optimizarea procesului tehnologic de realizare a magneților prin electro-depunere; optimizarea structurii mecanice prin acordarea zonei de acționare și celei aditionale).