



UNIVERSITATEA **POLITEHNICA** DIN BUCUREȘTI

Facultatea Inginerie Mecanică și Mecatronică
Departamentul Mecatronică și Mecanică de Precizie

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Cercetări pentru realizarea unor noi module senzoriale pentru sisteme pneutronice

Autor: Ing. Alina Popescu-Cuță

Conducător de doctorat: Prof.dr.ing. Octavian Donțu

București
2020

ACKNOWLEDGEMENT

Lucrarea a fost parțial elaborată cu sprijinul proiectului strategic POSDRU/159/1.5/S/137070 (2014) al Ministerului Educației Naționale, România, co-finanțat prin Fondul Social European – Investește în Oameni, din cadrul programului Operațional Sectorial pentru Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 – 2013.

Autoarea își exprimă recunoștința pentru susținerea oferită prin programul de cercetare PN-II-PT-PCCA-2013-4-1557, intitulat “Actuatori electromagnetici și electrodinamici obținuți prin tehnologii LIGA”

This work was partially supported by the strategic grant POSDRU/159/1.5/S/137070 (2014) of the Ministry of National Education, Romania, co-financed by the European Social Fund – Investing in People, within the Sectorial Operational Program Human Resources Development 2007-2013.

The author acknowledges the support offered through the PN-II-PT-PCCA-2013-4-1557 Research Grant, entitled "Electromagnetic and Electrodynamical Actuators Processed Through LIGA Technology".

CUPRINS

CAPITOLUL 1: OBIECTIVELE TEZEI	5
CAPITOLUL 2. STADIUL ACTUAL AL DEZVOLTĂRII ÎN DOMENIUL SISTEMELOR PNEUTRONICE	5
CAPITOLUL 3: CERCETĂRI PRIVIND OPTIMIZAREA TRADUCTOARELOR DE PRESIUNE PIEZOREZISTIVE DE TIP MEMS	8
3.1. INTRODUCERE	8
3.2. MODELUL MATEMATIC AL TRADUCTOARELOR DE PRESIUNE PIEZOREZISTIVE MEMS	8
3.3. CERCETĂRI PRIVIND INFLUENȚA GEOMETRIEI MEMBRANEI ELASTICE ASUPRA PERFORMANȚELOR TRADUCTOARELOR PIEZOREZISTIVE DE PRESIUNE, DE TIP MEMS.	11
3.3.1. Cercetări privind performanțele unui traductor piezorezistiv de presiune cu membrană circulară	11
3.3.2. Cercetări privind performanțele unui traductor piezorezistiv de presiune cu membrană pătrată	15
3.3.3. Influența geometriei membranei asupra sensibilității traductoarelor de presiune piezorezistive	16
3.4. REALIZAREA UNOR MODELE PARAMETRICE DE CALCUL PENTRU DETERMINAREA PARAMETRILOR OPTIMI AI MEMBRANELOR SENZORILOR DE PRESIUNE PIEZOREZISTIVI	19
3.4.1. Optimizarea grosimii membranelor	19
3.4.2. Optimizarea senzorilor de presiune cu membrană circulară și pătrată, din punct de vedere al poziției piezorezistoarelor	19
3.5. OPTIMIZAREA STRUCTURALĂ A MEMBRANELOR CIRCULARE, ÎN VEDEREA CREȘTERII SENSIBILITĂȚII SENZORILOR DE PRESIUNE	21
CAPITOLUL 4: CERCETĂRI PRIVIND MODELAREA ȘI SIMULAREA UNUI SENZOR DE PRESIUNE ELECTROMAGNETIC REZONANT	23
4.1. PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE AL SENZORULUI.....	23
4.2. MODELAREA SISTEMULUI PROPUȘ	24
4.2.2. Modelarea și simularea senzorului în varianta cu acționare electromagnetică, utilizând COMSOL Multiphysics	24
4.3 MODELUL MATEMATIC AL SISTEMULUI DINAMIC	28
4.4. MODELAREA ȘI SIMULAREA FUNCȚIONĂRII ÎN REGIM STATIC	31
4.4 DETERMINAREA INFLUENȚEI POZIȚIEI ȘI GROSIMII ELEMENTULUI MAGNETIC ASUPRA INDUCTANȚEI BOBINEI	33
4.4.1. Influența poziției elementului magnetic asupra inductanței bobinei	33
CAPITOLUL 5: REZULTATE EXPERIMENTALE	34

5.1. INFLUENȚA TEHNOLOGIILOR DE FABRICAȚIE ASUPRA PROPRIETĂȚILOR MECANICE ALE NICHELULUI CE INTRĂ ÎN STRUCTURA MICROSENZORULUI PROPUS.....	34
5.1.1. Introducere	34
5.1.2. Descrierea standului experimental utilizat.....	34
5.1.3. Descrierea probelor testate.....	37
5.1.4. Metoda de testare	37
5.1.5. Interpretarea rezultatelor	38
5.2. DETERMINAREA RĂSPUNSULUI ÎN FRECVENȚĂ A MAI MULTOR CONFIGURAȚII DE LAMELE MOBILE	40
5.3. DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A VARIAȚIEI INDUCTANȚEI BOBINEI CU DISTANȚA DINTRE BOBINĂ ȘI LAMELA CU MATRICEA DE MAGNEȚI.....	40
5.3.1. Standul experimental.....	41
5.3.2. Rezultatele obținute	41
5.3.3. Interpretarea rezultatelor experimentale	42
CAPITOLUL 6: CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE.....	43
6.1. CONCLUZIILE ACTIVITĂȚII DE CERCETARE.....	43
6.2. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE	43
6.3. CONTRIBUȚII PROPRII.....	44
6.4. LISTA DE LUCRARI	44

CAPITOLUL 1: OBIECTIVELE TEZEI

Cuvinte cheie: optimizarea senzorilor MEMS, COMSOL Multiphysics, analiza cu element finit

Tendențele de miniaturizare actuale manifestate în numeroase domenii tehnice și științifice au luat amploare și în cazul sistemelor pneutronice, deschizând astfel noi aplicații pentru acestea, în sfera microroboticii sau ingineriei biomedicale. Aceste aplicații necesită însă lucrul cu presiuni și debite mici, ceea ce a impus dezvoltarea de noi traductoare capabile de măsurarea precisă a mărimilor caracteristice fluidelor, chiar și când valorile acestor mărimi se află sub gama clasică de măsurare.

Primul obiectiv al acestei lucrări este realizarea unor modele parametrice de calcul numeric pentru simularea senzorilor de presiune piezorezistivi MEMS. Prin utilizarea acestor modele, se obțin micro sisteme cu performanțe optime, atât din punct de vedere al preciziei de măsurare, cât și al sensibilității traductoarelor.

Cel de al doilea obiectiv al lucrării a constat în propunerea unei metode de optimizare a performanțelor traductoarelor miniaturale de presiune statică ce funcționează pe baza principiului piezorezistiv. Această propunere a fost susținută prin realizarea unei analize numerice a soluției constructive propuse și comparația sensibilității acesteia cu cea a senzorilor construiți în variantă clasică.

Al treilea obiectiv al tezei se adresează unei probleme des întâlnite în sistemele pneumatice automate și anume măsurarea presiunii dinamice a fluidului. Lucrarea propune o nouă abordare de senzor electromagnetic rezonant, care măsoară presiunea dinamică și viteza aerului comprimat de pe traseul unui sistem pneutronic. Senzorul propus poate funcționa fie în regim static, bazându-se pe variația inductanței unei bobine, fie dinamic, prin măsurarea variațiilor frecvenței de rezonanță sub acțiunea unui fluid. Ambele principii de funcționare vor fi demonstrate prin modele numerice, iar modelul funcționării în regim static va fi validat experimental. De asemenea, vor fi testate diverse soluții constructive viitoare pentru senzorul propus, atât prin calcule numerice, cât și prin rezultate experimentale.

CAPITOLUL 2. STADIUL ACTUAL AL DEZVOLTĂRII ÎN DOMENIUL SISTEMELOR PNEUTRONICE

2.1. Considerații generale

O dată cu dezvoltarea domeniului microelectronicii și al echipamentelor senzoriale, performanțele sistemelor pneumatice inteligente au înregistrat îmbunătățiri semnificative, permițând accesul acestora în noi arii de aplicații [1]. Pe lângă echipamentele pneumatice standardizate, au fost dezvoltate și dispozitive de construcție specială, care permit integrarea elementelor senzoriale și a algoritmilor de reglare, pentru obținerea unui control cât mai precis al sistemelor.

Sistemele pneutronice reprezintă răspunsul pneumaticii la tendințele actuale de automatizare, prin integrarea electronicii și elementelor de programare în sistemele pneumatice clasice [2]. Rezultatul acestei îmbinări constă în dezvoltarea de noi sisteme inteligente, dotate cu toate elementele necesare controlului automat.

Deși structura sistemelor pneutronice poate varia în funcție de scopul și complexitatea acestora, majoritatea sistemelor pneumatice inteligente sunt compuse din câteva module de bază, printre care se numără: elementele de acționare pneumatică, elementele senzoriale (subsistemul informațional) și subsistemul de comandă [3]. Structura generală a sistemelor pneutronice este prezentată în fig. 2.1.

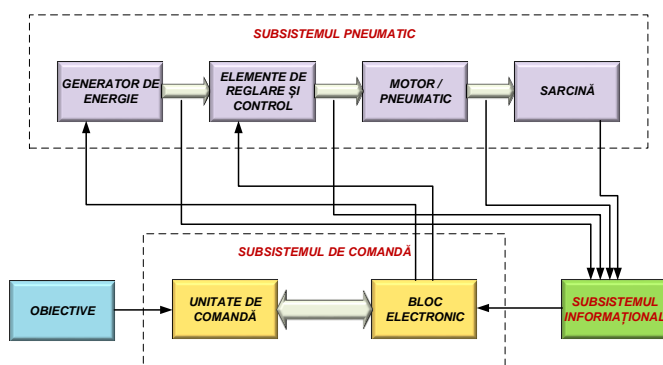


Fig. 2.1. Structura generală a sistemelor pneutronice [3]

La baza sistemelor pneutronice stau algoritmi avansați de reglare și control, pentru implementarea cărora este necesară achiziția în timp real a parametrilor specifici procesului pneumatic. Determinarea acestor parametri se realizează cu ajutorul senzorilor dedicați fiecărei mărimi, care transmit apoi informația către controllerul sistemului. Pe baza acestor informații, precum și a software-ului implementat, controllerul transmite comenzi actuatorilor sistemului, în scopul realizării procesului de reglare și control. În prezent există două posibilități de implementare a elementelor senzoriale în sistemele pneutronice: fie ca echipamente de sine stătătoare, fie integrate în structura celorlalte echipamente (cilindri, drosele etc.). În ambele cazuri, precizia de control și reglare a sistemului se află în strânsă legătură cu performanțele traductoarelor, motiv pentru care tendințele actuale în dezvoltarea sistemelor pneutronice se află în strânsă legătură cu optimizarea echipamentelor senzoriale.

Pentru evidențierea importanței elementelor senzoriale în cadrul sistemelor pneumatice inteligente, a fost realizat un studiu al echipamentelor și sistemelor pneutronice ce includ în structura lor senzori pentru principalele mărimi de proces (presiune, debit, temperatură, poziție etc.).

2.2. Sisteme și echipamente pneutronice cu traductoare integrate

2.2.1 Sisteme pneutronice cu traductoare pentru mărimile de proces

Sistemele pneutronice sunt utilizate într-o gamă largă de aplicații industriale, datorită numeroaselor avantaje pe care acestea le prezintă, printre care se numără: riscul scăzut de incendii, viteză mare de lucru și respectarea normelor igienico-sanitare datorită absenței scurgerilor de ulei sau substanțe toxice. Totuși, datorită compresibilității aerului, poziția sarcinii este dificil de reglat, prin urmare majoritatea acestor sisteme sunt controlate în buclă închisă, folosind o reacție de poziție dată de un traductor specific acestei mărimi. De asemenea, pentru ca aceste sisteme să funcționeze corespunzător este necesară asigurarea unei presiuni de lucru constantă, motiv pentru care măsurarea precisă a presiunii constituie un aspect de importanță majoră în proiectarea și realizarea sistemelor pneutronice.

2.2.2 Echipamente pneutronice cu traductoare integrate

Următoarea etapă în dezvoltarea sistemelor pneutronice a constat în integrarea elementelor senzoriale din sistem în structura echipamentelor pneumatice, obținându-se astfel

dispozitive complexe, cu performanțe ridicate, ce pot chiar constitui în unele cazuri un sistem automat de sine stătător.

Scopul introducerii traductoarelor în structura echipamentelor clasice este fie de a diminua histerezisul (în cazul distribuitoarelor proporționale), fie de a asigura controlul în buclă închisă al dispozitivului (în cazul reguletoarelor de presiune și al motoarelor de construcție specială) [9]. Reguletoarele de presiune sunt echipamente esențiale pentru funcționarea oricărui sistem pneumatic. În cazul sistemelor care funcționează cu aer comprimat, majoritatea reguletoarelor au o supapă de evacuare în atmosferă, însă construcțiile clasice sunt lente și nu asigură o reglare în timp real a presiunii din sistem.

2.3. Stadiul actual al dezvoltării traductoarelor utilizate în sistemele pneutronicice

Funcționarea eficientă a sistemelor pneutronicice presupune monitorizarea în timp real a mai multor mărimi fizice (presiune, temperatură, debit, deplasare, forțe, viteze, accelerații, momente) care constituie principalii parametri de proces ai acestor sisteme. Reglarea automată a sistemelor pneumatice de automatizare se bazează pe reglarea precisă, în timp real a acestor parametri, ceea ce implică o cunoaștere cât mai precisă a valorilor mărimilor fizice de proces enumerate anterior. În consecință, eforturile actuale de dezvoltare a domeniului sistemelor pneutronicice se concentrează în două direcții principale: îmbunătățirea caracteristicilor dispozitivelor de măsurare și dezvoltarea sistemelor de achiziție de date.

Capitolul are în vedere identificarea principalelor caracteristici ale traductoarelor utilizate în sistemele pneutronicice. Scopul acestui studiu este dezvoltarea unor metode de compensare a limitărilor diverselor elemente de măsurare pentru obținerea unor valori cât mai precise ale mărimilor fizice de proces.

Traductoarele cel mai des utilizate în sistemele pneumatice automate pot fi clasificate, conform [12], în funcție de mărimea măsurată, după cum urmează:

- a) Traductoare pentru mărimi mecanice:
 - Traductoare de deplasare
 - Traductoare de poziție
- b) Traductoare pentru mărimi caracteristice fluidului:
 - Traductoare de temperatură
 - Traductoare de debit
 - Traductoare de presiune.

2.4. Tendințe de miniaturizare în pneutronică

Introducerea elementelor senzoriale în sistemele pneumatice clasice a deschis posibilitatea funcționării acestor sisteme în regim automat, ceea ce permite utilizarea sistemelor pneumatice inteligente într-o gamă largă de aplicații.

Tendințele actuale de cercetare în domeniul sistemelor de acționare, reglare și măsurare, se concentrează asupra obținerii unor sisteme precise, modulare, de dimensiuni și costuri reduse. Noile echipamente pneutronicice pot atinge dimensiuni miniaturale și pot fi realizate cu ajutorul tehnologiilor de micro-fabricație, chiar și pe o singură plachetă de siliciu. Avantajele acestora sunt costurile reduse de fabricație și simplitatea constructivă, ceea ce mărește durata de viață a echipamentului prin absența unor componente mobile care se pot defecta cu ușurință.

Principala problemă în dezvoltarea microsistemelor pneutronicice, o reprezintă lucrul la presiuni și debite mici, caracteristice echipamentelor utilizate. Din acest motiv, a apărut necesitatea dezvoltării de noi traductoare, cu dimensiuni suficient de mici pentru a fi implementate cu succes în cadrul microsistemelor și care oferă o precizie de măsurare ridicată pentru presiuni și debite reduse.

Soluția pentru obținerea acestor noi echipamente de măsurare a apărut o dată cu dezvoltarea tehnologiilor MEMS (micro-electro-mechanical systems). Traductoarele de tip

MEMS sunt caracterizate prin dimensiuni reduse (de ordinul milimetrilor), simplitate constructivă (ceea ce reduce substanțial costul echipamentelor) și posibilitatea măsurării unor variații foarte mici ale mărimilor de proces. Din aceste motive, senzorii MEMS reprezintă răspunsul la necesitatea măsurării debitelor și presiunilor mici de lucru din cadrul sistemelor micropneutrice.

CAPITOLUL 3: CERCETĂRI PRIVIND OPTIMIZAREA TRADUCTOARELOR DE PRESIUNE PIEZOREZISTIVE DE TIP MEMS

3.1. INTRODUCERE

Capitolul studiază principalele aspecte legate de proiectarea și simularea funcționării traductoarelor MEMS de presiune piezorezistive, precum și modalitățile de optimizare a acestora. În acest scop am studiat intensiv fenomenele fizice care stau la baza funcționării acestor senzori și am realizat simulări ale comportamentului lor, cu scopul de a verifica posibilitățile de optimizare propuse. În cadrul capitolului am studiat două tipuri de membrane elastice: circulară și pătrată, acestea fiind specifice traductoarelor de presiune piezorezistive datorită ușurinței realizării lor prin procedee de corodare a siliciului monocristalin. Am determinat influența geometriei membranei asupra sensibilității senzorilor prin analiza semnalului de ieșire obținut în cazul fiecărei geometrii. De asemenea, am fost studiat variațiile tensiunilor Von Mises, ale deformațiilor specifice și ale semnalului de ieșire pentru fiecare structură și pentru diferite grosimi ale membranei elastice. În același timp, am determinat pozițiile ideale ale piezorezistoarelor pe suprafețele membranelor, cu scopul de a asigura o sensibilitate cât mai ridicată a traductoarelor. În cadrul aceluiași capitol, am dezvoltat și propus o posibilitate de optimizare a structurii traductoarelor de presiune piezorezistive cu membrană circulară, care să asigure o sensibilitate superioară a acestor echipamente

3.2. MODELUL MATEMATIC AL TRADUCTOARELOR DE PRESIUNE PIEZOREZISTIVE MEMS

Datorită proprietăților piezorezistive ale elementelor sensibile din structura traductoarelor de presiune, deformația indusă de aplicarea presiunii asupra membranei senzorilor produce o variație a rezistenței electrice a piezorezistoarelor. Conform [35], variația rezistenței electrice a unui piezorezistor este descrisă de ecuația:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

unde:

l = lungimea piezorezistorului,

A = suprafața secțiunii transversale a piezorezistorului

ρ = rezistivitatea materialului piezorezistorului

Într-un caz mai general, dacă se consideră starea plană de tensiuni mecanice dar fără neglijarea tensiunii mecanice de forfecare în plan, se obține o relație de forma:

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \tag{3.21}$$

unde, conform [40], dacă se ia în considerare și efectul tensiunilor mecanice transversale coeficienții piezoelectrice laterali și transversali pentru direcția <110> sunt:

$$\pi_l = \frac{\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44}}{2} \quad (3.22)$$

$$\pi_t = \frac{\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44}}{2}$$

Variația rezistenței electrice a elementelor piezorezistive depinde de tipul și valoarea tensiunilor mecanice la care acestea sunt supuse și deci, de dispunerea acestora pe membrana elastică a senzorului. Se disting astfel două cazuri: piezorezistoare orientate pe axa x (fig. 3.1) și piezorezistoare orientate pe axa y a membranei (fig. 3.2).

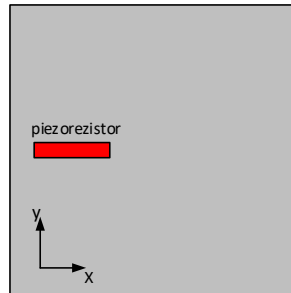


Fig. 3.1. Piezorezistor orientat pe direcția x a membranei

În fig. 3.1 este prezentată o membrană elastică a unui traductor MEMS, pe suprafața căreia acționează o presiune uniform distribuită. La aplicarea presiunii, asupra piezorezistorului acționează o tensiune radială σ_{rad} pozitivă, egală cu σ_l și o tensiune tangențială σ_{tan} , negativă, egală cu σ_t ($\sigma_{tan} < 0$, $\sigma_{rad} > 0$). Prin urmare, conform [7], valoarea tensiunii σ_{tan} este descrisă de ecuația 3.19, iar variația relativă a rezistenței electrice poate fi calculată folosind relația 3.24. În acest caz, rezistența electrică a elementului crește cu valoarea ΔR .

$$\sigma_{tan} = \sigma_{rad} \nu \quad (3.23)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = (\pi_l - \nu \pi_t) \sigma_{rad} \quad (3.24)$$

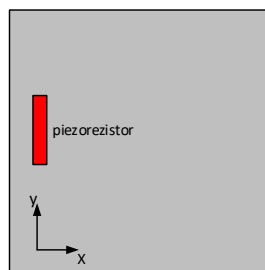


Fig. 3.2. Piezorezistor orientat pe direcția y a membranei

Piezorezistorul din fig. 3.2 este orientat pe direcția y a membranei, iar asupra sa acționează o tensiune tangențială σ_{tan} , pozitivă, cu valoarea σ_l și o tensiune radială σ_{rad} , negativă, egală cu σ_t . ($\sigma_{tan} > 0$, $\sigma_{rad} < 0$).

Prin urmare, conform [40], tensiunile transversale sunt descrise de ecuația 3.25, iar variația relativă a rezistenței electrice în funcție de stres poate fi calculată folosind relația 2.26. În acest caz, rezistența elementului scade.

$$\sigma_{rad} = \sigma_{tan} \nu \quad (3.25)$$

$$\frac{\Delta R}{R} = (\pi_t - \nu \pi_l) \sigma_{tan} \quad (3.26)$$

Pentru a fi posibilă măsurarea unor variații de rezistență cât mai mici, senzorii de presiune piezorezistivi MEMS au în structura lor patru elemente sensibile de dimensiuni egale, dispuse într-o punte Wheatstone (fig. 3.3).

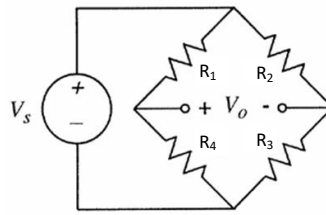


Fig. 3.3. Dispunerea piezorezistoarelor în punte Wheatstone [40]

Puntea Wheatstone este compusă din două serii de câte două rezistoare, legate în paralel. Utilizând legea lui Ohm și legile lui Kirchoff, se poate scrie relația dintre tensiunea de alimentare a punții și cea de ieșire, astfel:

$$V_0 = V_s \left(\frac{R_4}{R_1 + R_4} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) \quad (3.27)$$

În cazul în care nu acționează nici o presiune asupra membranei, puntea Wheatstone este echilibrată, iar $V_0 = 0$. Dacă $V_0 = 0$, utilizând relația 3.27 se poate scrie condiția de echilibru a punții Wheatstone:

$$V_0 = 0 \rightarrow \frac{R_4}{R_1 + R_4} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 0 \rightarrow \frac{R_4}{R_1} = \frac{R_3}{R_2} \quad (3.28)$$

Sub acțiunea unei presiuni pe suprafața membranei sensorului, fiecare element piezorezistiv înregistrează o creștere, respectiv o scădere a rezistenței electrice, în funcție de orientarea acestora în planul membranei și de tensiunile mecanice care acționează asupra lor.

În cazul senzorilor de presiune piezorezistivi, poziționarea elementelor sensibile se face astfel încât să se obțină o sensibilitate maximă a traductorului, deci o tensiune de ieșire cât mai mare pentru o valoare minimă a încărcării. Pentru aceasta, este necesară obținerea unui dezechilibru cât mai mare al punții Wheatstone, produs în cazul în care valoarea rezistenței a două elemente scade, iar a celorlalte două, crește, după cum se va demonstra în cele ce urmează.

În baza fig. 3.1 și 3.2, precum și a relațiilor 3.24 și 3.26, pentru a obține creșterea rezistenței unei perechi de elemente este necesară poziționarea lor pe direcția x-x, iar pentru a obține o scădere a acesteia, poziționarea elementelor se face pe direcția y-y. Se obține, astfel, configurația din fig. 3.4, în care elementele R_2 și R_4 înregistrează o scădere a rezistenței electrice, iar R_1 și R_3 o creștere a acesteia.

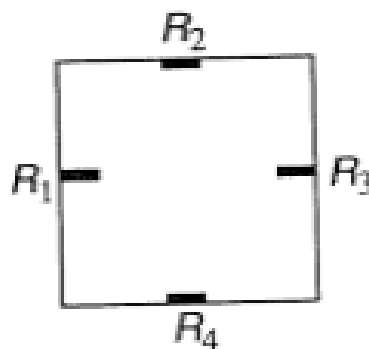


Fig. 3.4. Poziționarea piezorezistoarelor pe suprafața membranei unui senzor de presiune [40]

Datorită poziționării elementelor pe membrana flexibilă, alungirea transversală suportată de rezistoarele R_2 și R_4 este egală cu alungirea longitudinală suportată de rezistoarele R_1 și R_3 iar alungirea longitudinală suportată de rezistoarele R_2 și R_4 este egală cu alungirea transversală suportată de rezistoarele R_1 și R_3 . Datorită acestui aspect, precum și faptului că din punct de vedere dimensional elementele piezorezistive sunt identice, valoarea absolută a variației rezistenței electrice a acestora este egală pentru toate cele patru rezistoare, astfel:

$$R_1 = R_1 + \Delta R \quad (3.29)$$

$$R_2 = R_2 - \Delta R$$

$$R_3 = R_3 + \Delta R$$

$$R_4 = R_4 - \Delta R$$

Astfel, pentru configurația piezorezistoarelor din fig. 3.4, se obține folosind relația 3.27, tensiunea la ieșirea punții Wheatstone:

$$V_0 = V_s \left(\frac{\Delta R}{R} \right) \quad (3.30)$$

3.3. CERCETĂRI PRIVIND INFLUENȚA GEOMETRIEI MEMBRANEI ELASTICE ASUPRA PERFORMANȚELOR TRADUCTOARELOR PIEZOREZISTIVE DE PRESIUNE, DE TIP MEMS.

În cele ce urmează, am realizat modelarea și simularea a două tipuri de traductoare piezorezistive de presiune, de tip MEMS [38], ce diferă prin geometria membranei elastice: un traductor dispune de o membrană de formă circulară, iar celălalt de o membrană de formă pătrată. Pentru a evidenția influența geometriei membranei asupra performanțelor traductoarelor, ambii senzorii au aceeași arie a suprafeței și grosime a diafragmei, precum și aceeași dimensiune, poziție și orientare a piezorezistoarelor. De asemenea, materialele care intră în structura senzorilor sunt similare. Prin urmare, având în vedere că presiunea de intrare este aceeași pentru ambele traductoare, diferențele de performanță vor proveni strict din geometria membranei elastice.

3.3.1. Cercetări privind performanțele unui traductor piezorezistiv de presiune cu membrană circulară

Senzorul este realizat pe o plachetă din siliciu monocristalin dopat n, cu dimensiunea de 5 mm x 5 mm. Grosimea totală plachetei este de 500 μm, în care a fost corodată o membrană circulară, poziționată în centrul plachetei, cu grosimea de 30 μm. Membrana este încastrată pe margini de rama fixă a sensorului și, având o grosime mult mai mică decât restul plachetei, se va deforma sub acțiunea unei presiuni de intrare.

Modelul traductorului a fost realizat în întregime utilizând modulul de proiectare 2D și 3D, integrat în software-ul COMSOL Multiphysics. Pe membrana sensorului sunt depuse patru piezorezistoare, egale ca dimensiuni, realizate din siliciu dopat p și conectate într-o punte Wheatstone. Acestea măsoară 200 μm lungime, cu 50 μm lățime și au o grosime de 0.5 μm. În scopul diferențierii acestora, am reprezentat piezorezistoarele cu culoarea roșie și le-am atribuit notațiile R1, R2, R3 R4.

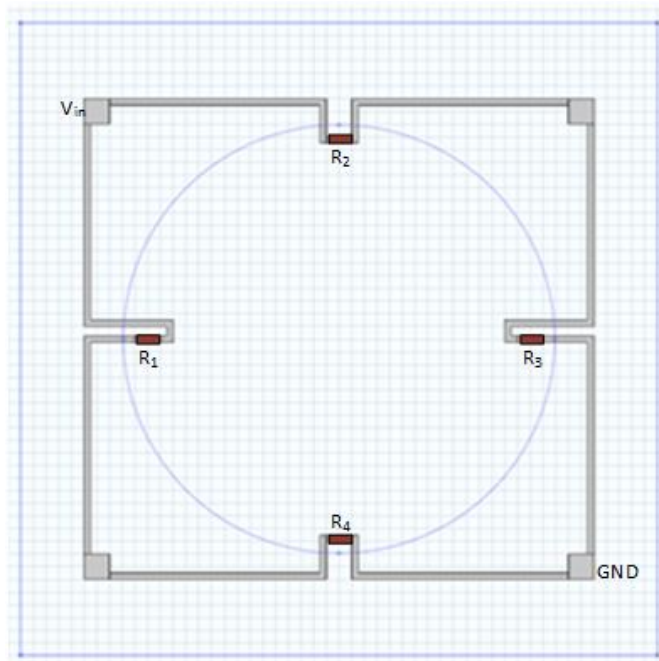


Fig. 3.6. Structura circuitului de detecție al senzorului

De asemenea, în figură au fost indicate și terminalul de alimentare al senzorului (notat V_{IN}) și masa acestuia, notată GND. Pentru a aplica o tensiune de 9V la bornele circuitului, am folosit o condiție de tip *Terminal*. Măsurarea tensiunii la ieșirea traductorului se realizează între terminalele opuse acestora două, pe diagonală.

Conform [40], rezistoarele R_1 și R_2 vor fi supuse unor tensiuni transversale, deci rezistența lor electrică va scădea cu ΔR_1 , respectiv ΔR_2 , iar R_3 și R_4 vor crește cu ΔR_3 , respectiv ΔR_4 , datorită tensiunilor longitudinale ce acționează asupra acestora. Utilizând relația (3.1), se poate scrie formula rezistenței electrice a fiecărei perechi de piezorezistoare, astfel:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \rho_1 \frac{l_1}{h_1 w_1} \\
 R_2 &= \rho_2 \frac{l_2}{h_2 w_2} \\
 R_3 &= \rho_3 \frac{l_3}{h_3 w_3} \\
 R_4 &= \rho_4 \frac{l_4}{h_4 w_4}
 \end{aligned}
 \tag{3.31}$$

unde:

$\rho_{1...4}$ = rezistivitatea materialului elementelor sensibile;

$l_{1...4}$ = lungimea elementelor sensibile;

$w_{1...4}$ = lățimea elementelor sensibile;

$h_{1...4}$ = grosimea elementelor sensibile;

În baza raționamentului prezentat anterior, rezistența perechii de elemente R_1 și R_3 va crește în urma deformării cu ΔR , iar rezistența perechii R_2 și R_4 va scădea cu ΔR , dezechilibrând astfel puntea Wheatstone și generând un semnal de ieșire proporțional cu deformația, deci cu presiunea aplicată.

În fig. 3.7 este prezentat modelul tridimensional al traductorului de presiune cu membrană circulară, pentru care am determinat variația semnalului de ieșire cu presiunea de intrare.

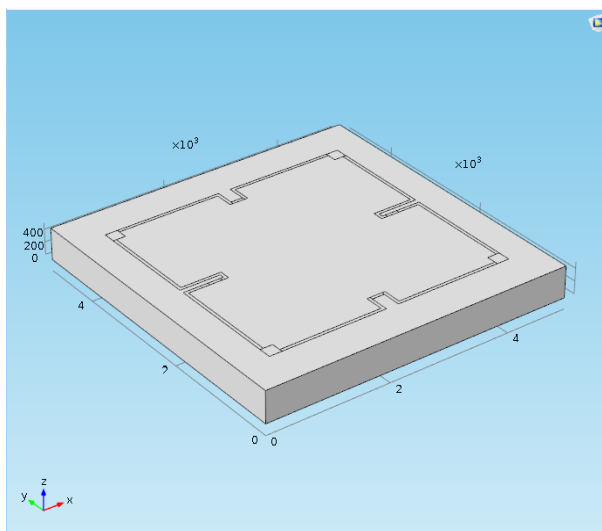


Fig. 3.7. Modelul tridimensional al senzorului studiat

Pentru simularea comportamentului traductorului de presiune, am utilizat modulul Piezoresistivity and Boundary Currents, care permite declararea proprietăților piezoresistive ale materialului din care sunt realizate cele patru rezistoare.

Pe fața opusă elementelor piezoresistive am aplicat o presiune uniform distribuită (fig. 3.8 a), ce variază între 0.5 și 10 kPa, iar rama senzorului am considerat-o fixă (fig. 3.8 b), pentru a simula comportamentul unei membrane încastate.

Pentru introducerea încărcării membranei, am utilizat opțiunea Boundary Load, ce permite aplicarea forței pe o suprafață selectată de către utilizator. Deși software-ul permite definirea sarcinii mecanice și ca forță punctiformă și ca forță uniform distribuită pe o direcție dată, am optat pentru declararea sarcinii ca presiune, deci ca forță distribuită uniform pe direcție normală la suprafața membranei, datorită corespondenței cât mai fidele cu realitatea. Pentru a varia presiunea de intrare într-un interval prestabilit, am declarat parametric valoarea acesteia, iar ulterior am optat pentru un studiu staționar de tip *Parametric Sweep*, impunând valorile inițială și finală ale gamei de presiuni dorite și pasul de variație al mărimii între valorile dorite.

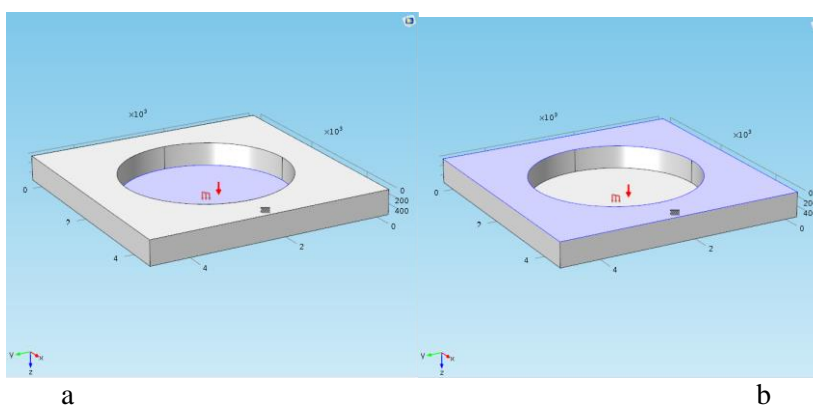


Fig. 3.8. Declararea condițiilor de frontieră: a – presiune, b – încastare

Având în vedere dimensiunile foarte mici ale structurii, forma și dimensiunile minime ale elementelor de discretizare au o influență semnificativă asupra rezultatelor studiului.

Se observă din fig. 3.9 că o dată cu reducerea dimensiunii rețelei, crește semnalul de iesire, pentru ca la valori mici ale dimensiunii rețelei sa se mențină valoarea semnalului de iesire.

Micșorarea dimensiunilor acestor elemente și implicit creșterea densității rețelei, au ca rezultat secundar un timp foarte lung de calcul și necesită utilizarea a cât mai multor resurse hardware. De aceea, obiectivul principal în realizarea calculului cu element finit îl reprezintă obținerea unui echilibru între precizia de calcul și timpul și resursele necesare desfășurării

studiului. Prin urmare, având în vedere că începând cu o dimensiune a elementului de 7 μm semnalul de ieșire rămâne neschimbat, am ales această valoare ca pas de discretizare pentru următoarele calcule. Această opțiune oferă cel mai bun raport resurse – precizie, rezultatul simulării fiind superior calitativ în comparație cu configurațiile cu elemente de dimensiuni mai mari, însă apropiat ca precizie de varianta cu dimensiunea minimă de 1 μm , ce a necesitat un timp de calcul îndelungat.

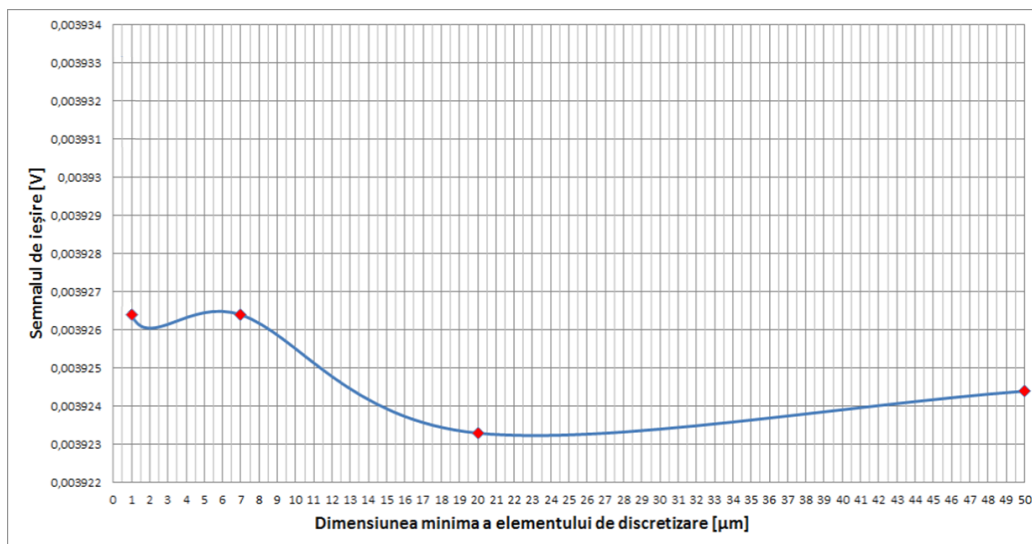


Fig. 3.9. Variația semnalului de ieșire al sensorului, în funcție de dimensiunea elementelor de discretizare

Prin urmare, a fost realizată o simulare a traductorului de presiune cu membrană circulară, utilizând o presiune de intrare ce variază între 0.5 și 10 kPa, din 0.5 în 0.5 kPa. În această configurație, piezorezistoarele au fost poziționate la 50 μm față de marginea membranei elastice. Semnalul de ieșire al traductorului este prezentat în fig, 3.10.

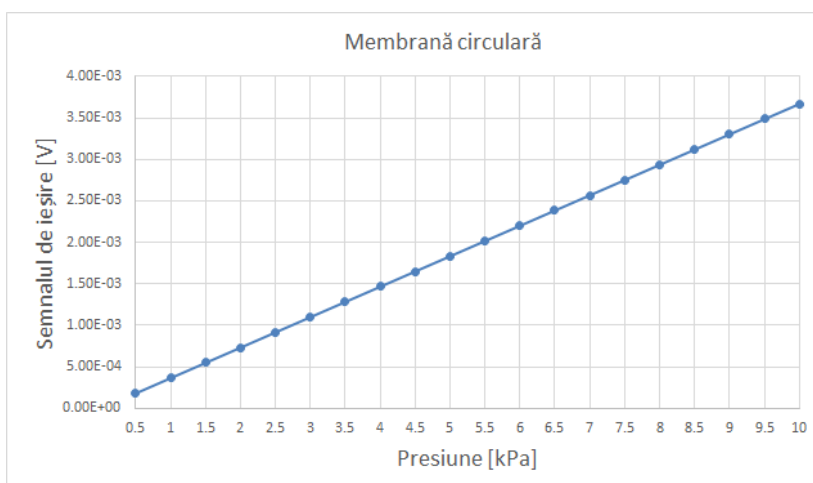


Fig. 3.10. Variația semnalului de ieșire al sensorului cu membrană circulară, în funcție de presiunea de intrare

3.3.2. Cercetări privind performanțele unui traductor piezorezistiv de presiune cu membrană pătrată

Configurația circuitului de detecție al senzorului de presiune cu membrană pătrată este prezentată în fig. 3.11. Au fost păstrate aceleași notații ca și în cazul senzorului cu membrană circulară, precum și același algoritm de realizare a modelului tridimensional.

Asemenea senzorului cu membrană circulară, modelului i s-a atribuit ca material siliciu dopat n, iar piezorezistoarelor, siliciu dopat p. În ambele configurații ale membranei, pentru realizarea circuitului electric între elementele rezistive am utilizat aluminiul, datorită proprietăților sale conductive foarte bune și posibilităților de microprelucrare.

Piezorezistoarele au dimensiunile identice cu cele utilizate în cazul membranei circulare ($200 \times 50 \times 0,5 \mu\text{m}$), iar suprafețele și grosimile celor două membrane (circulară și pătrată) sunt egale. De asemenea, piezorezistoarele au fost poziționate la aceeași distanță față de marginea membranei ca și în cazul anterior ($50\mu\text{m}$) Astfel, din punct de vedere geometric, singura diferență între cele două modele este reprezentată de forma diferită a membranelor.

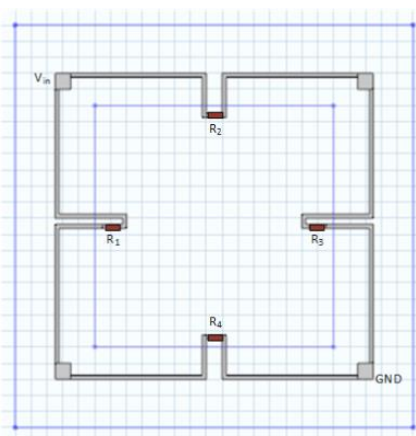


Fig. 3.11. Circuitul de detecție al senzorului cu membrană pătrată[38]

La fel ca și în cazul anterior, o presiune de intrare cu valori între $0,5 - 10 \text{ kPa}$ a fost uniform distribuită pe fața inferioară membranei, opusă piezorezistoarelor, iar marginea din jurul membranei a fost considerată fixă

Simularea comportamentului senzorului a fost realizată pentru aceeași gamă de presiuni ca și în cazul membranei circulare și urmând același algoritm prezentat anterior. Dependența semnalului de ieșire de al senzorului de presiunea de intrare este prezentată în fig. 3.13.

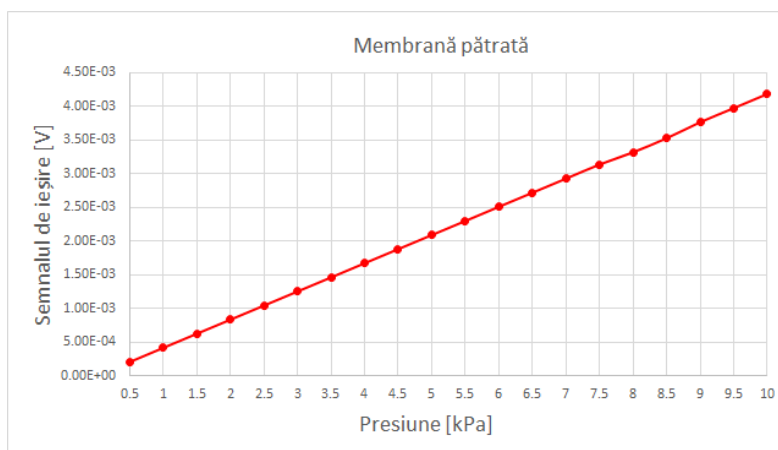


Fig. 3.13. Relația presiune de intrare – semnal de ieșire pentru un senzor cu membrană pătrată

3.3.3. Influența geometriei membranei asupra sensibilității traductoarelor de presiune piezorezistive

Pentru a determina influența geometriei membranei senzorilor piezorezistivi de presiune asupra sensibilității acestora, am realizat o comparație între semnalele de ieșire ale celor două tipuri de senzori, pentru aceleași valori ale presiunii de intrare. Având în vedere faptul că elementele sunt similare din punct de vedere dimensional și al materialelor, singura diferență dintre valorile celor două semnale este dată de geometria membranei. Comparația între cele două semnale obținute este prezentată în fig. 3.14.

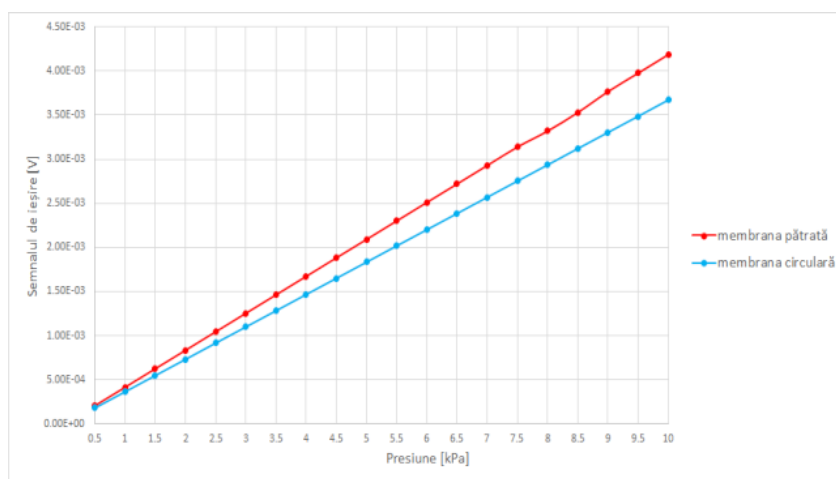


Fig. 3.14. Comparație între semnalele de ieșire produse de cei doi senzori [38]

În ambele cazuri de geometrii ale membranei elastice, se observă o dependență liniară a semnalului de ieșire de presiunea de intrare, însă semnalele de ieșire diferă pentru aceeași valoare a presiunii de intrare.

Conform [8], sensibilitatea unui senzor de presiune piezorezistiv se calculează utilizând relația:

$$S = \frac{\Delta V_0}{V_{in}} \frac{1}{\Delta P} \quad (3.32)$$

unde:

V_0 = semnalul de ieșire al senzorului produs de variația de presiune

V_{in} = semnalul de intrare al senzorului

ΔP = variația de presiune

Având în vedere că ambii senzori sunt alimentați la aceeași tensiune (9V), iar variația de presiune este aceeași în ambele modele, rezultă că diferența dintre semnalele de ieșire ale traductoarelor induce o diferență între sensibilitățile acestora.

Utilizând relația 3.32, au fost calculate sensibilitățile pentru membrana circulară, cât și pentru cea pătrată și diferența relativă între sensibilitățile senzorilor.

Sensibilitatea senzorului cu membrană circulară este:

$$S_c = 4,0777e - 5 \left[\frac{V}{bar} \right]$$

Conform aceluiași algoritm, s-a calculat sensibilitatea senzorului cu membrană pătrată:

$$S_p = 4,6488e - 5 \left[\frac{V}{bar} \right]$$

Diferența relativă a sensibilității senzorilor:

$$Dif_p = 14,05 \%$$

Analizând rezultatele obținute, am putut concluziona că membrana pătrată asigură o sensibilitate mai mare a senzorului de presiune, comparativ cu varianta circulară de membrană.

În capitolul 3.2 al lucrării, am evidențiat dependența dintre deformația specifică a unui material piezorezistiv și variația rezistenței electrice a acestuia, precum și relația dintre tensiuni

și deformații, descrisă de legea lui Hooke. În concluzie, răspunsul unui traductor piezorezistiv de presiune și, prin urmare, sensibilitatea acestuia, depind de tensiunile mecanice și deformațiile specifice produse în suprafața membranei pe care sunt montate elementele piezorezistive.

Având în vedere rezultatele obținute anterior și prezentate în fig. 3.14, care denotă o diferență relevantă de sensibilitate între senzorul cu membrană circulară și cel cu membrană pătrată, a fost necesară determinarea cauzelor care conduc la apariția respectivei diferențe, pentru a identifica posibilitățile de optimizare ale senzorilor. În acest scop, au fost determinate distribuția tensiunilor mecanice și a deformațiilor specifice în ambele membrane.

În fig. 3.15 sunt prezentate deformațiile specifice ale membranei circulare, pe axele O_x și O_y , precum și distribuția tensiunilor Von Mises pe suprafața membranei.

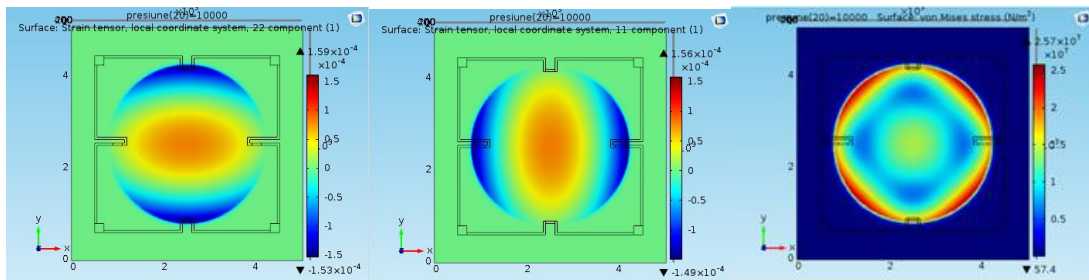


Fig. 3.15. Deformațiile specifice și distribuția tensiunilor Von Mises în membrana circulară

Pentru realizarea simulărilor a fost utilizat în continuare software-ul COMSOL Multiphysics, iar evaluările au fost realizate cu aceeași presiune de intrare în ambele cazuri (10 kPa), pentru a exclude influența oricărui alt parametru, în afara geometriei membranei, asupra rezultatelor studiului desfășurat.

În fig. 3.16 sunt prezentate deformațiile specifice ale membranei pătrate, pe axele O_x și O_y , precum și distribuția tensiunilor Von Mises pe suprafața membranei.

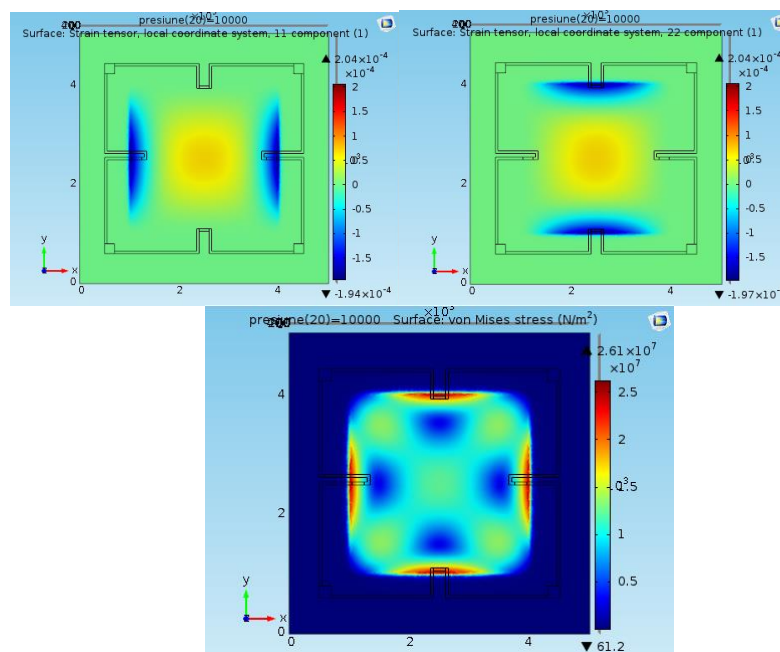


Fig. 3.16. Deformațiile specifice și distribuția tensiunilor Von Mises în membrana pătrată

Din fig. 3.15 se poate observa o modificare a profilului de distribuție a tensiunilor mecanice în dreptul piezorezistoarelor membranei circulare, ceea ce denotă că acestea, deși au o grosime de doar 0.5 μm , exercită un efect de rigidizare asupra membranei, care ar putea influența negativ performanțele senzorilor.

În sprijinul acestei afirmații, am realizat simulări ale ambelor tipuri de membrane, la aceeași presiune de intrare, de data aceasta fără elemente piezorezistive. Distribuția tensiunilor Von Mises în membrane este prezentată în fig. 3.17.

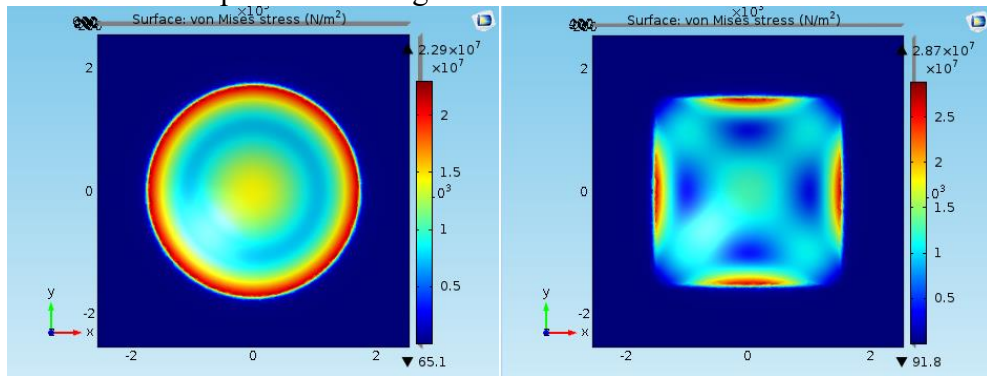


Fig. 3.17. Distribuția tensiunilor Von Mises în membrana circulară și pătrată [38]

Am concluzionat așadar că, pentru o membrană circulară simplă, tensiunile Von Mises ating valori maxime în jurul marginii încastrate. Prin comparație cu fig. 3.15, se poate observa că elementele piezorezistive influențează profilul de distribuție al tensiunilor Von Mises, în membranele circulare. Efectul de rigidizare produs de piezorezistoare devine problematic, deoarece valorile tensiunilor mecanice sunt maxime în afara suprafeței elementelor sensibile, iar în dreptul piezorezistoarelor tensiunile Von Mises ating valori minime.

Pentru a determina dacă aceasta este cauza diferenței de sensibilitate dintre cei doi senzori, este necesară analiza relației dintre variația rezistenței electrice și tensiunile Von Mises.

Conform [41], ecuația pentru tensiunile Von Mises în cazul stărilor plane de tensiuni este:

$$\sigma_{vonMises} = \sqrt{\frac{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + \sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2}{2}} \quad (3.33)$$

Rezultă:

$$\sigma_{vonMises} = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 - \sigma_{xx}\sigma_{yy}} \approx |\sigma_{xx} - \sigma_{yy}| \quad (3.34)$$

Relația 3.13 descrie dependența dintre tensiuni și deformațiile specifice. Prin urmare, utilizând relațiile 3.13 și 3.34, se poate scrie:

$$\sigma_{vonMises} \approx \left| \frac{E}{1 + \nu} (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}) \right| \quad (3.35)$$

Având în vedere că variația rezistenței electrice a elementelor sensibile este un rezultat al deformației membranei, iar valorile tensiunilor Von Mises depind, conform relației 3.35, de diferența dintre deformațiile pe cele două axe ale planului membranei, se poate concluziona că sensibilitatea sensorului de presiune depinde de valorile tensiunilor Von Mises la nivelul piezorezistoarelor.

Datorită faptului că piezorezistoarele modifică distribuția tensiunilor Von Mises în membrane, iar punctele în care tensiunile sunt maxime se află în afara elementelor sensibile în cazul membranei circulare, se produce o scădere a sensibilității acestui tip de senzor, comparativ cu modelul ce are membrana de formă pătrată.

3.4. REALIZAREA UNOR MODELE PARAMETRICE DE CALCUL PENTRU DETERMINAREA PARAMETRILOR OPTIMI AI MEMBRANELOR SENZORILOR DE PRESIUNE PIEZOREZISTIVI

După cum am demonstrat anterior, sensibilitatea traductoarelor de presiune piezorezistive de tip MEMS, este influențată de deformațiile specifice membranelor senzorilor și de distribuția tensiunilor mecanice care duc la apariția acestor deformații. Conform modelului matematic prezentat în subcapitolul 3.2, cu cât valorile tensiunilor mecanice apărute în membranele elastice sunt mai ridicate, cu atât semnalul de ieșire al traductoarelor are valori mai mari. Prin urmare, pentru a dezvolta un senzor sensibil la presiuni scăzute, este necesară determinarea valorii corespunzătoare a grosimii membranei elastice, astfel încât aceasta să se deformeze considerabil la cele mai mici valori ale presiunii de intrare, fără însă a ceda sub acțiunea tensiunilor mecanice. Suplimentar, pentru a asigura cea mai mare sensibilitate posibilă a senzorilor, este necesară poziționarea piezorezistoarelor în punctele în care tensiunile mecanice produse de presiunea de intrare ating cele mai înalte valori, astfel încât raportul dintre valoarea semnalului de ieșire și valoarea presiunii de intrare să fie maxim.

Modelele de calcul pe care le-am realizat și prezentat în acest subcapitol au fost definite parametric, astfel încât să poată fi adaptate în funcție de cerințele constructive ale fiecărei aplicații. Prin utilizarea unui astfel de model pentru simularea comportamentului senzorilor, se pot obține performanțe maxime ale acestor dispozitive, eliminând potențialele erori încă din faza de proiectare și crescând astfel productivitatea procesului de fabricație.

3.4.1. Optimizarea grosimii membranelor

Conform [42], tensiunea maximă admisibilă a siliciului prelucrat prin corodare anizotropică este de 300 MPa. Prin urmare, valorile maxime ale tensiunilor Von Mises dezvoltate în membranele senzorilor trebuie să se situeze sub această limită de rezistență.

Pentru determinarea grosimii optime a membranelor, am utilizat modelele cu diafragmă circulară, respectiv pătrată, dezvoltate anterior. Gama de presiune stabilită pentru senzorii propuși este 1...10 kPa. Prin urmare, încărcarea maximă la care membranele trebuie să reziste este de 10 kPa. În scopul de a determina grosimea optimă a membranei fiecărui senzor, am realizat un studiu al variației tensiunilor Von Mises pentru grosimi ale membranelor de la 6 la 30 μm , la valoarea maximă a presiunii de intrare.

S-a observat că membranele cu grosimea de 6, respectiv 9 μm cedează sub acțiunea unei presiuni de 10 kPa. Grosimea minimă a membranelor, care rezistă efortului, se află la intersecția dintre graficul tensiunilor Von Mises și cel al tensiunii maxime admisibile. Coordonata pe axa x a punctului de intersecție este determinată cu ajutorul software-ului Excel ca fiind de 12 μm . Prin urmare, pentru gama de presiuni dată (0-10 kPa), grosimea minimă a membranei circulare a senzorului este de 12 μm .

3.4.2. Optimizarea senzorilor de presiune cu membrană circulară și pătrată, din punct de vedere al poziției piezorezistoarelor

Am demonstrat anterior dependența semnalului de ieșire al senzorilor de presiune de variația tensiunilor Von Mises. Prin urmare, conform distribuției tensiunilor în membrana circulară și cea pătrată, sensibilitatea ridicată a senzorilor de presiune este asigurată de poziționarea piezorezistoarelor cât mai în apropierea marginii încastrate a membranei elastice.

Pentru a determina cu precizie cât mai ridicată poziția optimă a piezorezistoarelor, am efectuat simulări ale comportamentului senzorilor, variind poziția piezorezistoarelor, dinspre marginea spre centrul membranelor elastice. Toate simulările au fost efectuate la o presiune de intrare de 10 kPa, pentru grosimile optime ale membranelor, determinate anterior.

Poziția piezorezistoarelor pe cele două membrane a fost variată pe o distanță de la 50 la 1200 μm față de marginea încastrată, iar grosimea membranelor a fost stabilită la 12 μm .

Distribuția tensiunilor Von Mises în cele două membrane, sub acțiunea unei presiuni de intrare de 10 kPa, este prezentată în fig. 3.19. Se poate observa din figură că, în cazul unei membrane cu grosimea de 12 μm , tensiunile ating valori maxime în apropierea marginii încastrate.

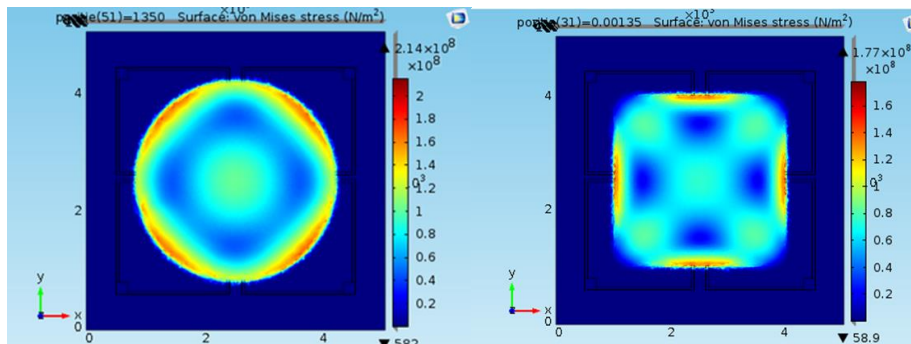
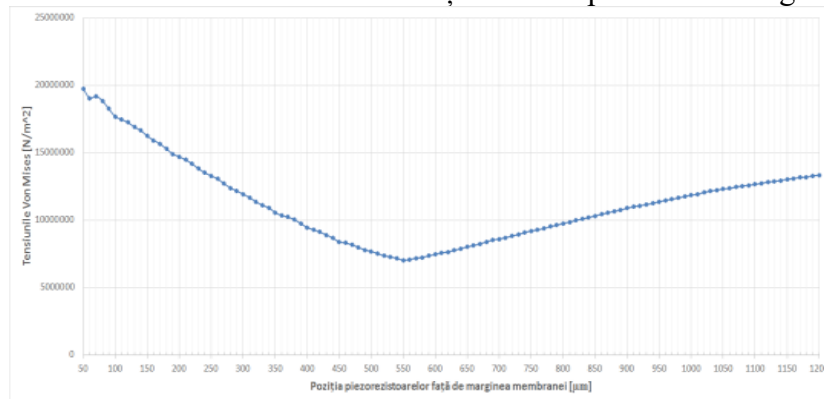
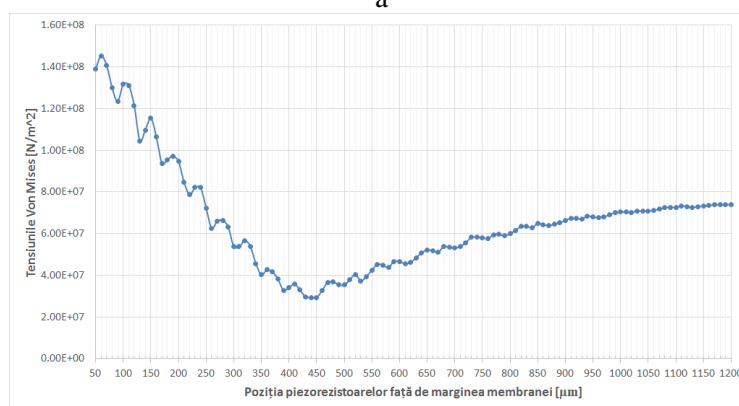


Fig. 3.18. Variația tensiunilor Von Mises în cele două membrane

Am evaluat apoi valorile maxime ale tensiunilor Von Mises la nivelul piezorezistoarelor, pentru diverse poziții ale acestora, precum și semnalul de ieșire al celor doi senzori pentru fiecare poziție a elementelor sensibile. Rezultatele obținute sunt prezentate în fig. 3.19 și 3.20.



a



b

Fig. 3.19. Variația tensiunilor Von Mises la nivelul piezorezistoarelor, în funcție de poziția acestora (a – membrana circulară, b – membrana pătrată) [38]

În fig. 3.19 se poate observa o scădere a tensiunilor Von Mises la nivelul piezorezistoarelor, o dată cu depărtarea acestora de marginea încastrată a membranei, după care o ușoară creștere a acestora în apropierea centrului membranei.

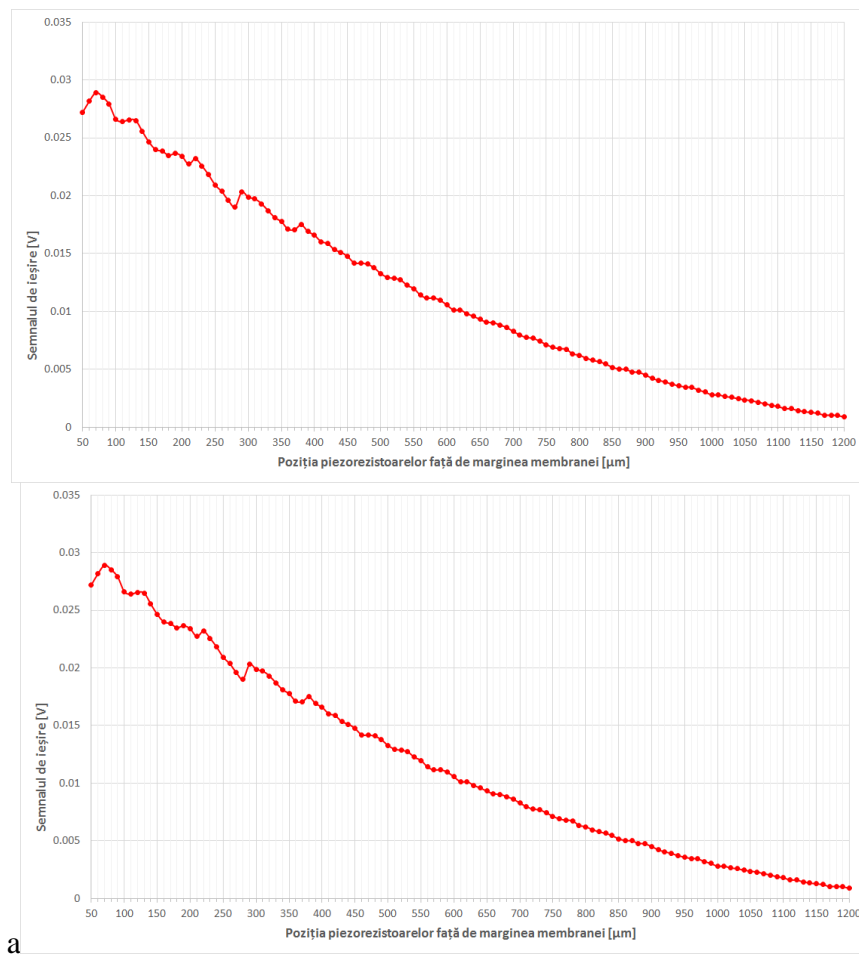


Fig. 3.20. Variația semnalului de ieșire al senzorilor, în funcție de poziția piezorezistoarelor pe membrana elastică (a – membrana circulară, b – membrana pătrată) [38]

Deoarece creșterea tensiunilor Von Mises către centrul membranei nu este suficient de semnificativă pentru a egala valorile inițiale, cele mai mari valori ale semnalelor de ieșire se obțin pentru piezorezistoarele poziționate în apropierea marginii membranei. Conform fig. 3.20, poziția optimă a piezorezistoarelor pentru o sensibilitate maximă a senzorilor este la 70 μm față de marginea încastrată a membranei.

3.5. OPTIMIZAREA STRUCTURALĂ A MEMBRANELOR CIRCULARE, ÎN VEDEREA CREȘTERII SENSIBILITĂȚII SENZORILOR DE PRESIUNE

În urma studiilor realizate în subcapitolul 3.3, am concluzionat că sensibilitatea traductoarelor de presiune cu membrană circulară este mai redusă comparativ cu senzorii care dispun de o membrană elastică pătrată, datorită variației distribuției tensiunilor Von Mises în suprafața membranei, produsă de efectul de rigidizare al piezorezistoarelor. Prin urmare, am dezvoltat o nouă abordare structurală a membranei circulare, care să asigure o creștere a sensibilității acestor senzori comparativ cu varianta lor clasică.

Până în prezent, senzorii de presiune piezorezistivi au fost concepuți cu o grosime uniformă a membranei elastice, indiferent de geometria acesteia. Soluția constructivă propusă implică realizarea unei trepte de grosime cu formă circulară, în suprafața membranei. Diametrul treptei a fost definit ca procent din diametrul membranei.

Am simulat mai multe variante ale senzorului, cu diverse adâncimi și diametre ale trepte de grosime, pentru a determina care configurație oferă cel mai bun raport între tensiunile mecanice maxime și semnalul de ieșire, precum și performanțe superioare membranei de grosime uniformă. Am calculat așadar folosind analiza cu element finit tensiunile Von Mises și semnalele de ieșire pentru diametre ale treptei între 10 și 95% din suprafața membranei și adâncimi de $h = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 20, 21 \mu\text{m}$. Toate simulările au fost realizate pentru o presiune de intrare de 10 kPa, iar valorile tensiunilor au fost comparate cu limita de rezistență menționată anterior [43].

În fig. 3.22 am prezentat variația tensiunilor Von Mises și a semnalului de ieșire pentru fiecare diametru al trepte de grosime și fiecare adâncime a acesteia.

Am observat o creștere semnificativă a valorilor tensiunilor Von Mises cu adâncimea trepte, pentru diametre de peste 40% din diametrul original al membranei. Totuși, valoarea semnalului de ieșire nu înregistrează o creștere până în momentul în care treapta ajunge în dreptul piezorezistoarelor, iar tensiunile mecanice sunt concentrate în zona activă a senzorului.

Deoarece treapta de 18 μm adâncime induce apariția unor tensiuni mecanice aflate mult sub nivelul de rezistență al senzorului, iar treapta cu adâncimea de 21 μm depășește limita de siguranță, adâncimea optimă a trepte este de 20 μm .

Pentru a valida soluția de optimizare propusă, a fost realizată o comparație între tensiunile Von Mises și semnalele de ieșire furnizate de o membrană cu grosimea uniformă optimă, la o presiune de intrare de 10 kPa și cele obținute cu noua variantă constructivă a membranei, la o adâncime a trepte de 20 μm , pentru aceeași valoare a presiunii de intrare. Deoarece valoarea semnalului de ieșire crește o dată cu diametrul membranei, conform fig. 3.22, comparația a fost efectuată pentru un diametru al trepte de 95% din valoarea diametrelui membranei.

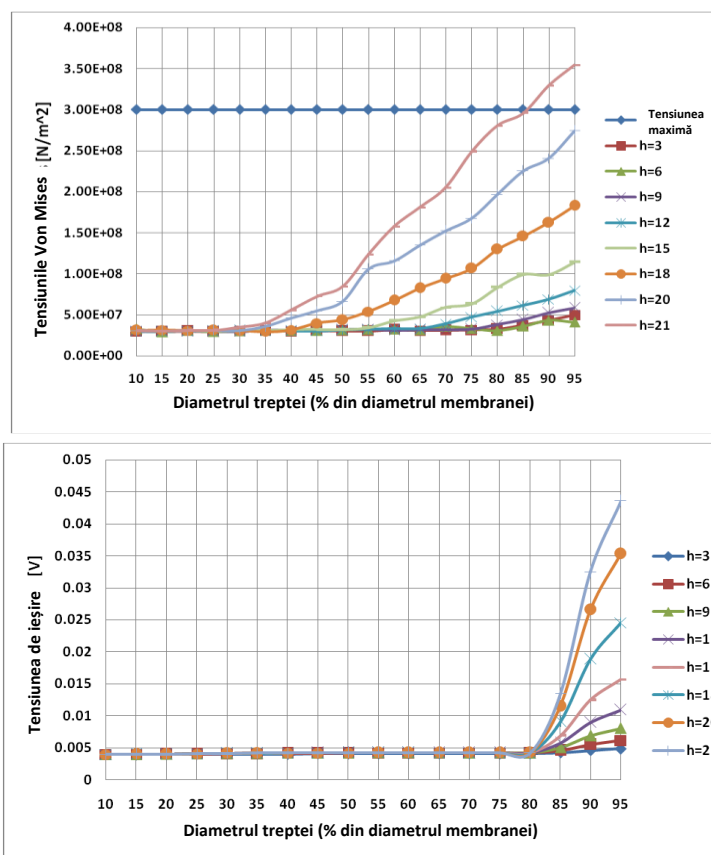


Fig. 3.22. Variația tensiunilor Von Mises și a semnalului de ieșire pentru fiecare diametru și adâncime a trepte de grosime [43]

Valorile maxime ale tensiunilor Von Mises și semnalul de ieșire pentru ambele configurații sunt prezentate în tabelul 1 [43].

Tabelul 1 – Comparație între tensiunile Von Mises și semnalul de ieșire obținut în varianta clasică de membrană, respectiv în variantă optimizată.

	Tensiunile Von Mises [N/m ²]	Semnalul de ieșire [V]
Membrana cu grosime uniformă optimă (12 μm)	2.74E+08	0.026350
Membrana cu treaptă de grosime (adâncime 20 μm diametru 95% din cel original)	2.74E+08	0.035338

Din tabelul 1 rezultă o diferență semnificativă între semnalele de ieșire furnizate de cele două tipuri de membrane, la aceeași presiune de intrare. Conform rezultatelor obținute, soluția constructivă propusă conferă o sensibilitate mai mare a acestor senzori, comparativ cu variantele clasice.

CAPITOLUL 4: CERCETĂRI PRIVIND MODELAREA ȘI SIMULAREA UNUI SENZOR DE PRESIUNE ELECTROMAGNETIC REZONANT

4.1. PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE AL SENZORULUI

Lucrarea prezintă o nouă variantă de senzor rezonant de presiune, ce poate fi utilizat în două modalități: cu acționare electromagnetică sau cu detecție electromagnetică a variației de presiune. Senzorul propus este alcătuit din două lamele în consolă, prevăzute la capetele libere cu o matrice de magneți permanenți, respectiv o bobină plană spiralată. Lamela la capătul căreia se află bobina este fixă, iar cea prevăzută cu magneți este flexibilă. Inducția remanentă a magneților este orientată după axa Ox, în planul xOy. Modelul tridimensional al senzorului dezvoltat a fost realizat folosind Solidworks 2015 și este prezentat în fig. 4.1.

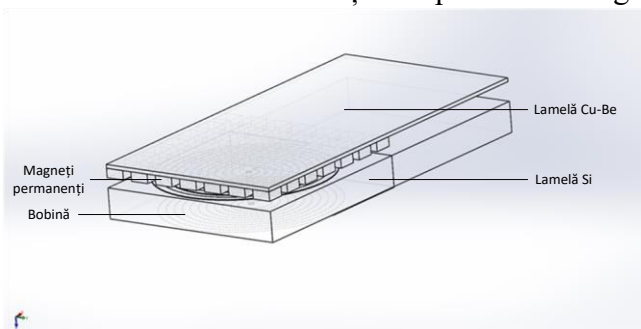


Fig. 4.1. Senzor de presiune rezonant cu acționare electromagnetică

Lamela flexibilă a senzorului este realizată dintr-un aliaj cupru-beriliu, placheta suport a bobinei este fabricată din siliciu, magneții din neodim dopat cu ioni de bor, iar bobina din cupru. Proprietățile materialelor utilizate sunt prezentate în Tabelul 1.

Tabelul 1 – Proprietăți de material [8]

Material	Modulul Young [GPa]	Constanta Poisson ν	Densitatea masă [kg/m ³]	Permeabilitatea magnetică relativă μ_r	Inducția remanentă [T]	Permitivitatea electrică ϵ_r	σ [S/m]
Cu-Be	102	0,3	8250	1	-	3,4	1163
Si	168	0,22	2329	1	-	12,1	-
Cu	117	0,35	8700	1	-	1	5,998e7
NdFeB	414	0,28	7000	1,1	1,3	1,05	0.66e6

În modul de funcționare cu acționare electromagnetică, în bobina spiralată se introduce un curent reglabil, obținându-se astfel un câmp electromagnetic care interacționează cu cel al magneților permanenți. În urma interacțiunii dintre cele două câmpuri, se produce o deflexie a lamelei flexibile. Pentru o eficiență maximă a sistemului, lamela flexibilă este adusă la frecvența de rezonanță prin introducerea unui semnal sinusoidal în bobină. În urma introducerii ansamblului într-o curgere de aer, presiunea exercitată asupra lamelei flexibile va induce o variație a frecvenței de rezonanță a acesteia. Variația frecvenței de rezonanță a lamelei indică, astfel, valoarea presiunii absolute a aerului din incintă.

Cel de al doilea mod de funcționare al sensorului este static și se bazează pe variația inductanței unei bobine cu câmpul electromagnetic al acesteia [10]. Ambele lamele ale sensorului se află în repaus, iar sistemul este introdus într-o curgere de aer. Presiunea dinamică a aerului provoacă o deformare a lamelei cu matricea de magneți permanenți, ce are drept consecință o variație a fluxului magnetic în bobină, datorită modificării distanței dintre cele două lamele ale sensorului. Rezultatul este o variație a inductanței bobinei, care poate fi detectată cu ajutorul unui circuit oscilant.

4.2. MODELAREA SISTEMULUI PROPUȘ

Modelarea numerică a sistemului s-a realizat folosind metoda elementelor finite și software-ul COMSOL Multiphysics. Realizarea modelului sensorului rezonant propus, implică rezolvarea mai multor probleme care se desfășoară pe domenii de calcul 3D. A fost propus un model simplificat al sistemului, în care acțiunea fenomenelor fizice a fost considerată unidirecțională: distribuția curentului electric în bobină nu este influențată de câmpul magnetic, iar câmpul magnetic nu variază cu deformațiile structurale apărute. Prin urmare, este necesară inițial modelarea sistemului în regim staționar și rezolvarea problemelor de câmp electric și magnetic, cu scopul determinării forței electromagnetice de interacțiune dintre bobină și matricea de magneți permanenți.

4.2.2. Modelarea și simularea sensorului în varianta cu acționare electromagnetică, utilizând COMSOL Multiphysics

După realizarea modelului tridimensional și definirea condițiilor inițiale, s-a trecut la rezolvarea problemei de electromagnetism, structurată în mai multe etape. Prima etapă a modelării constă în determinarea distribuției densității de curent în bobină, după care este rezolvată problema de câmp magnetic, respectiv determinarea forței electromagnetice. Deformația indusă de acțiunea forței asupra lamelei cu magneți permanenți este determinată inițial în regim staționar, după care se realizează o analiză modală a sistemului, calculând valorile frecvențelor de rezonanță pentru primele șase moduri de vibrație ale lamelei flexibile. Ulterior, este evidențiată variația frecvențelor de rezonanță sub acțiunea unui fluid și este calculată legea de variație a frecvenței cu presiunea de intrare. De asemenea, am alcătuit un model modal al sistemului.

4.2.2.1. Importarea modelului CAD și definirea parametrilor inițiali

Datorită opțiunii *Livelink for Solidworks*, implementată în software-ul COMSOL 5.0, importarea modelului CAD realizat anterior a fost posibilă utilizând comanda *Geometry – Import -3D CAD File* (fig. 4.2). Spațiul de lucru a fost setat pe 3D, iar lungimile în mm.

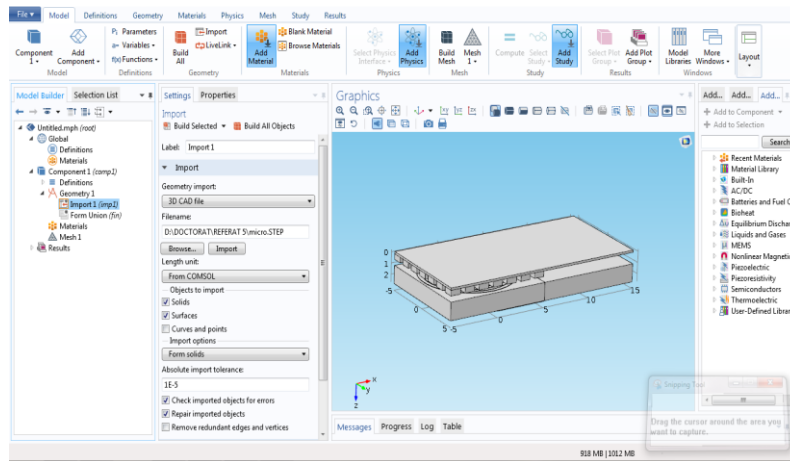


Fig. 4.2. Importarea modelului CAD din Solidworks

Suplimentar față de geometria senzorului, a fost adăugată o sferă circumscrisă acestuia, căreia i s-a atribuit ca material aerul și care este necesară pentru delimitarea liniilor de câmp magnetic.

După importarea modelului au fost declarate mărimile parametrice inițiale. Într-o primă etapă, folosind comanda *Definitions – Parameters – Add parameter*, a fost definită valoarea tensiunii electrice la bornele bobinei ($U_b = 0,022 \text{ V}$), necesară pentru rezolvarea problemei de câmp electrocinetic (fig. 4.4). Toți ceilalți parametri inițiali utilizați ulterior în simularea sistemului pe parcursul acestei lucrări, au fost definiți prin aceeași metodă.

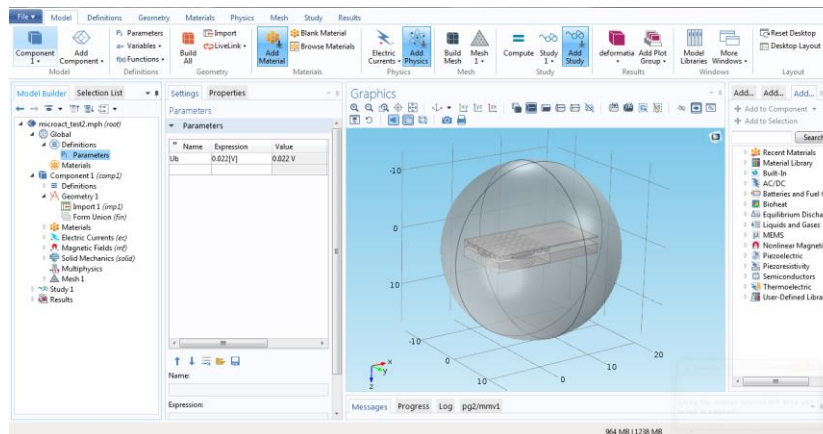


Fig. 4.4. Declararea parametrilor inițiali

4.2.2.2. Atribuirea materialelor

Adăugarea materialelor în modelarea sistemului electromagnetic se realizează cu comanda *Materials – Add material*. Fiecare material este atribuit apoi domeniului corespunzător (fig. 4.5), iar proprietățile acestora corespund tabelului 1.

COMSOL oferă posibilitatea utilizării unor materiale cu proprietăți predefinite, disponibile în biblioteca de materiale proprie, precum și a unor materiale ale căror proprietăți sunt integral definite de către utilizator. În cazul utilizării unui material predefinit, oricare dintre proprietățile acestuia este editabilă, fără a afecta restul constantelor caracteristice. Dacă se dorește, în schimb, folosirea unui material inexistent în baza de date COMSOL, ale căror caracteristici sunt cunoscute de către utilizator, este recomandabilă folosirea comenzii *Materials – Add blank material*.

4.2.2.3. Rezolvarea problemei de câmp electric

Problema de câmp electrocINETIC are ca scop determinarea densității de curent în bobină. Pentru aceasta, este utilizat modulul *Electric Currents*, definit pe toate domeniile modelului 3D. Declararea tensiunii electrice pe bobină s-a realizat adăugând o condiție de tip *Electric Potential* la unul din terminalele bobinei și o condiție de tip *Ground* ($V = 0$) la celălalt. Valoarea potențialului electric la bornele bobinei este declarată prin condiția *Electric Potential*, utilizând parametrul U_b , definit în prima etapă a simulării

Pentru rezolvarea tuturor celor trei probleme (electrocINETICă, magnetică și structurală), a fost utilizat un studiu de tip *Stationary*, considerând toate mărimile declarate și calculate ca fiind constante în timp. În urma rezolvării problemei de câmp electrocINETIC, a rezultat densitatea curentului în bobină, prezentată în fig. 4.8.

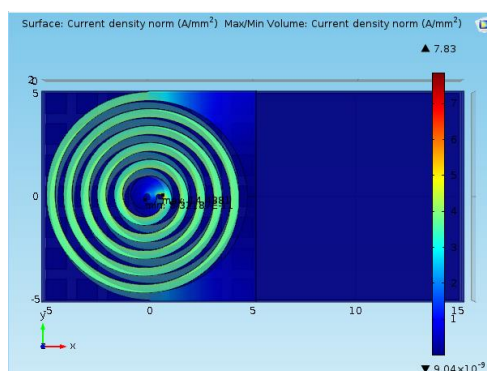


Fig. 4.8. Densitatea de curent în bobină

4.2.2.4. Rezolvarea problemei de câmp magnetic

Rezolvarea problemei de câmp magnetic are ca scop determinarea inducției magnetice și a forței electromagnetice de interacțiune dintre bobină și matricea de magneți permanenți. Determinarea forței electromagnetice este necesară pentru rezolvarea problemei structurale, aceasta fiind responsabilă pentru deformarea lamei mobile.

Definirea problemei magnetice se realizează folosind modulul *Magnetic fields (mf)*, introdus cu ajutorul comenzii *Add physics – Magnetic fields (mf)*.

Problema de magnetism este definită pe toate domeniile modelului, delimitarea liniilor de câmp fiind realizată cu ajutorul sferei din aer.

Definirea magneților se realizează cu o condiție de tip *Ampere's Law*, aplicată pe domeniul matricei de elemente. În cadrul aceiași condiții este specificată și orientarea inducției remanente a magneților, B_r , în planul xOy , pe direcția Ox

Închiderea câmpului este obținută prin declararea unei condiții de izolație magnetică pe conturul sferei. Condiția este accesată din meniul *Physics – Boundaries – Magnetic Insulation*.

Pentru rezolvarea problemei de magnetism, este necesară introducerea densității de curent în bobină, cu ajutorul unei condiții *External Current Density*, aplicată pe domeniul bobinei. Valorile densității de curent pe direcțiile Ox , Oy și Oz , rezultate din problema de câmp electric sunt specificate în cadrul condiției.

Componentele densității de curent pe cele trei axe sunt preluate din secțiunea *Results – Expression – Electric currents – Currents and charge – Current density (Spatial)*, iar numele variabilelor (ec.Jex, ec.Jey, ec.Jez) sunt introduse în condiția din fig. 4.12.

Calculul forței electromagnetice care va produce deformarea lamei mobile, se realizează prin aplicarea unei condiții de tip *Force Calculation* pe domeniul bobinei. Având în vedere că lamela prevăzută cu bobina este fixă, forța electromagnetice de interes este cea exercitată de conductor asupra lamei prevăzute cu magneți. Direcția pe care acționează forța este specificată în câmpul *Torque Axis*, cu ajutorul căruia forței i s-a stabilit direcția Oz .

Datorită diametrului foarte redus al conductorului electric, bobina a fost discretizată folosind o mărime mai mică a elementului finit, comparativ cu restul sistemului. Având în vedere structura spiralată a bobinei, precum și grosimea redusă a acesteia, a fost utilizată o discretizare de tip *Swept*, folosind elemente triunghiulare cu dimensiunea maximă de 0.3 mm..

Rezultatele problemei de câmp magnetic constau în afișarea liniilor de câmp magnetic (fig. 4.16) și determinarea forței electromagnetice de interacțiune dintre bobină și magneți, prezentată în fig. 4.17.

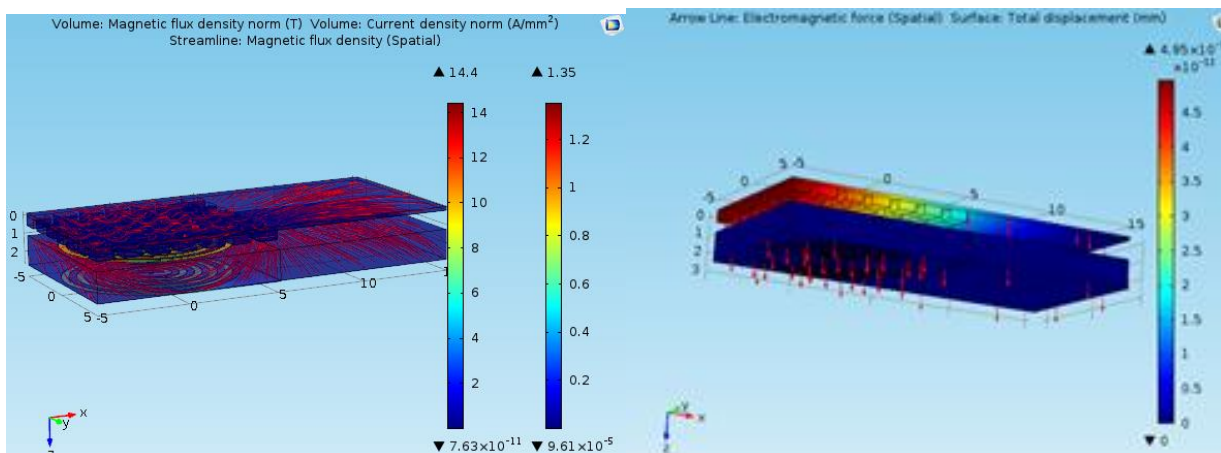


Fig. 4.16. Liniile de câmp magnetic

Fig. 4.17. Forța electromagnetică

4.2.2.5. Rezolvarea problemei structurale

Senzorul propus funcționează în regim dinamic, prin urmare este necesară determinarea a deformațiilor lamelei mobile pentru mai multe frecvențe de rezonanță, respectiv mai multe moduri de vibrație.

Au fost determinate inițial primele șase moduri de vibrație și frecvențele de rezonanță ale lamelei mobile, în absența oricărei încărcări. În acest scop, a fost necesară utilizarea modulului *Solid Mechanics*, împreună cu un studiu de tip *Eigenfrequency*.

Lamela prevăzută cu bobină a fost considerată fixă, împreună cu baza lamelei mobile, folosind o condiție de tip *Fixed Constraint*

Următoarea etapă a problemei structurale, a constat în determinarea influenței presiunii unei curgeri de aer, asupra frecvențelor de rezonanță ale lamelei mobile.

Pentru realizarea modelului, a fost necesară introducerea forței electromagnetice ca forță de volum ce acționează asupra magneților permanenți și a presiunii aerului, exercitată asupra lamelei mobile. După rezolvarea problemei structurale, se va determina legea de variație a frecvenței de rezonanță a lamelei în funcție de valoarea presiunii de intrare.

Valorile forței electromagnetice pe direcțiile O_x , O_y și O_z au fost obținute în urma rezolvării problemei de câmp magnetic. A fost necesară definirea a trei funcții de interpolare (denumite *fortax*, *fortay* și *fortaz*), pentru componentele forței electromagnetice pe cele trei axe spațiale.

Forța electromagnetică este definită apoi ca încărcare pe domeniul magneților, folosind o condiție de tip *Body load*. Componentele forței pe cele trei axe sunt declarate folosind denumirea funcțiilor de interpolare corespondente.

Presiunea exercitată de curgerea de aer este declarată apoi folosind o condiție de tip *Boundary load*, pe toată suprafețele libere ale lamelei mobile, lamela prevăzută cu bobina fiind considerată fixă. Valoarea presiunii aerului a fost declarată parametric.

Următoarea etapă a simulării a constat în realizarea unui studiu parametric de tip *Prestressed Analysis – Eigenfrequency*, pentru a determina variațiile frecvenței de rezonanță a lamelei sensorului, sub acțiunea simultană a forței electromagnetice și a unei presiuni exterioare.

Primele șase frecvențe proprii ale lamei mobile au fost determinate pentru valori ale presiunii de intrare între 1 și 10 kPa, cu un pas de 0.5 kPa.

În fig. 4.23 este reprezentată grafic variația primelor șase frecvențe de rezonanță ale lamei mobile, în funcție de presiunea de intrare.

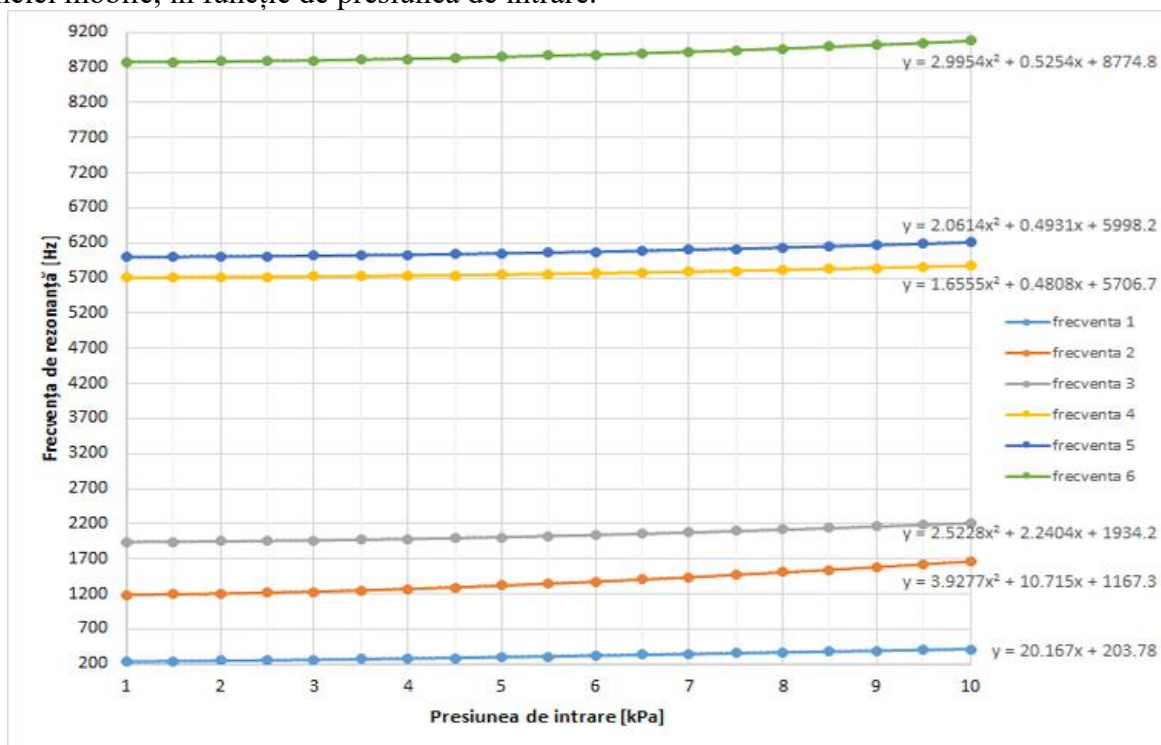


Fig.4.23. Variația frecvențelor de rezonanță în funcție de presiunea de intrare

Legea variației fiecărei frecvențe cu presiunea de intrare este prezentată în dreptul fiecărei curbe de pe graficul din fig. 4.23. Singurul caz în care variația frecvenței de rezonanță cu presiunea de intrare are loc după o lege liniară este pentru primul mod de vibrație, la o frecvență de 236, 51 Hz.

4.3 MODELUL MATEMATIC AL SISTEMULUI DINAMIC

Având în vedere funcționarea în regim dinamic a senzorului, a fost necesară determinarea parametrilor modali pentru modul de vibrație de interes al elementului mobil. Acești parametri (masa, constanta elastică și amortizarea) sunt apoi utilizați pentru a dezvolta modelul modal al senzorului.

Senzorul studiat se încadrează în categoria sistemelor cu un singur grad de mobilitate (fig. 4.24), unde x este deplasarea lamei mobile a senzorului, iar x_b , deplasarea bazei).

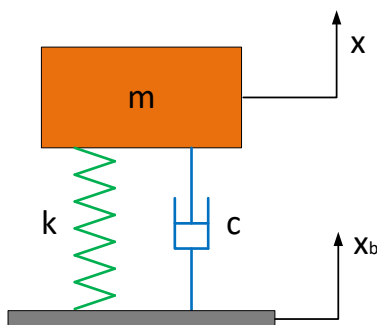


Fig. 4.24. Modelul unui sistem cu un singur grad de libertate

Ecuția de echilibru a unui sistem cu un singur grad de libertate este [58]:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = f(t) \quad (4.1)$$

Unde:

m = masa modală a sistemului,

c = amortizarea,

k = constanta elastică,

$f(t)$ = forțele exterioare care acționează asupra sistemului,

După aplicarea principiului lui d'Alambert, conform căruia suma forțelor este zero în orice moment de timp, se obține forma omogenă a ecuației (4.15):

$$m\ddot{x}(t) = -c\dot{x}(t) - kx(t) \quad (4.16)$$

Modelul sistemului în frecvență reprezintă un element de legătură între modelul de calcul și rezultatele experimentale și se bazează pe funcția de transfer care reprezintă raportul forță-deplasare al sistemului [58]:

$$X(\omega) = H(\omega) \cdot F(\omega) \quad (4.17)$$

Prin aplicarea unei transformate Fourier relației (4.15), se obține forma algebrică a ecuației diferențiale inițiale, astfel:

$$(-m\omega^2 + j\omega c + k) \cdot X(\omega) = F(\omega) \quad (4.18)$$

Unde:

$$-m\omega^2 + j\omega c + k = B(\omega) \quad (4.19)$$

$B(\omega)$ = impedanța sistemului.

Din relațiile (4.17), (4.18) și (4.19), rezultă:

$$B(\omega) = \frac{1}{H(\omega)} \quad (4.20)$$

Și:

$$H(\omega) = \frac{1}{-m\omega^2 + j\omega c + k} \quad (4.21)$$

În cadrul procesului de testare, senzorul a fost amplasat pe un actuator piezoelectric, comandat cu un semnal sinusoidal în tensiune. În absența unei a doua referințe de măsurare la baza lamelei, pentru sistemul măsurat se pot scrie relațiile:

$$m\ddot{x} = -k(x - x_b) - c(\dot{x} - \dot{x}_b) \quad (4.22)$$

$$\frac{\dot{x}}{U} = \frac{\dot{x}}{x_b} \cdot \frac{x_b}{U}$$

Unde:

x = deplasarea vârfului lamelei senzorului,

x_b = deplasarea bazei lamelei.

U = tensiunea de intrare

Din (4.22) rezultă:

$$x(-m\omega^2 + j\omega c + k) = x_b(k + j\omega c) \quad (4.23)$$

Relația (4.23) se poate scrie și ca:

$$\frac{x}{x_b} = \frac{k + j\omega c}{-m\omega^2 + j\omega c + k} \quad (4.24)$$

Funcția de transfer a sistemului se poate scrie sub forma:

$$H(\omega) = \left| \frac{\dot{x}}{\dot{x}_b} \right| = \frac{\sqrt{k^2 + \omega^2 c^2}}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + \omega^2 c^2}} \quad (4.25)$$

Din ecuațiile (4.22) și (4.26), rezultă:

$$H(\omega) = \frac{\dot{x}}{U} / \frac{\dot{x}_b}{U} \quad (4.26)$$

Viteza lamelei și a bazei încastrate a acesteia au fost determinate experimental, utilizând vibrometria laser și standul experimental descris pe larg în cap. 5. (fig. 4.25)

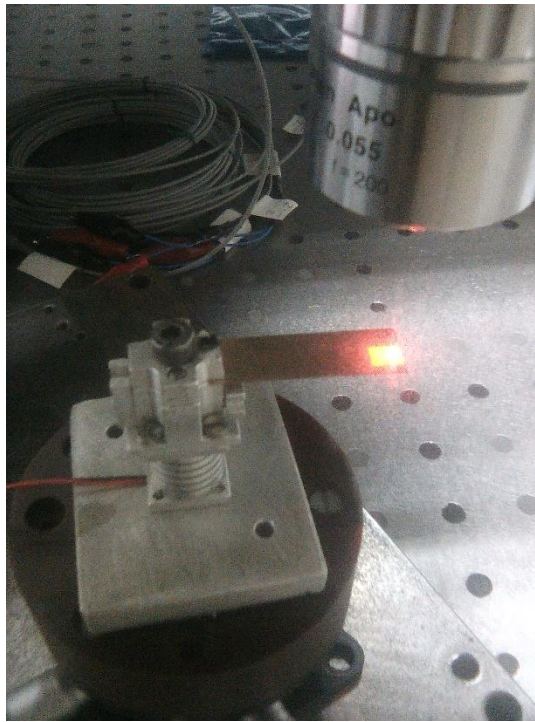


Fig. 4.25. Măsurarea vitezei bazei și vârfului lamelei

Prin raportul celor două mărimi s-a obținut graficul funcției de transfer a sistemului, prezentat în 4.26.

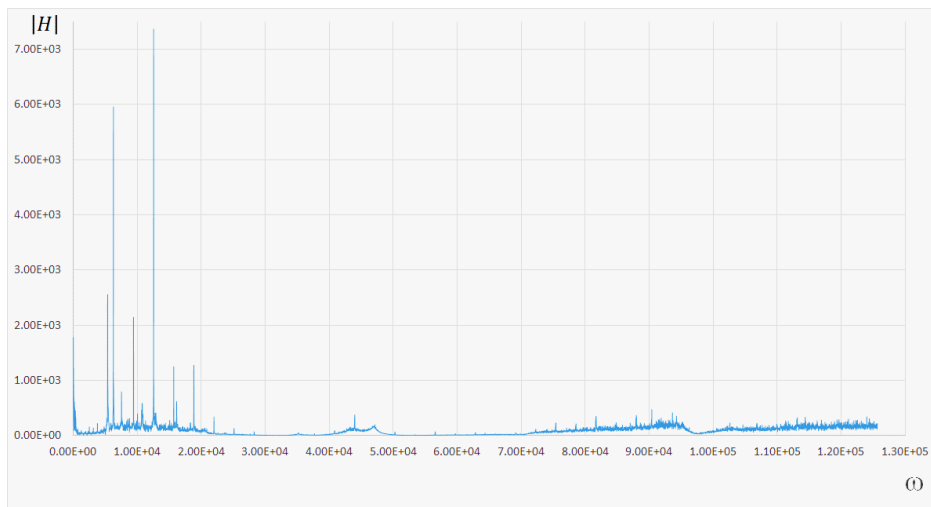


Fig. 4.26. Funcția de transfer a sistemului

Pentru a determina ω_{max} se aplică relația:

$$H'(\omega) = 0 \rightarrow -\frac{m\omega_{max}(c^2m\omega_{max}^4 + 2k^2m\omega_{max}^2 - 2k^3)}{\sqrt{c^2\omega_{max}^2 + k^2}((k - m\omega_{max}^2)^2 + c^2\omega_{max}^2)^{\frac{3}{2}}} = 0 \quad (4.2)$$

Rezultă:

$$\omega_{max} = \sqrt{\frac{\sqrt{k^3m(2c^2 + km)} - k^2m}{c^2m}} \quad (4.2)$$

Valoarea maximă a amplitudinii R_{max} , corespunde pe graficul din fig. 4.26., valorii lui ω_{max} .

Prin urmare:

$$H(\omega_{max}) = R_{max} \quad (4.3)$$

Rezultă valoarea amplitudinii maxime:

$$R_{max} = \sqrt{\frac{c^4 \sqrt{k^3 m (2c^2 + km)}}{2m^3 k^4 + (c^4 - 2kc^2 - 2k^2 m) \sqrt{k^3 m (2c^2 + km)}}} \quad (4.3)$$

Pentru calculul amortizării este necesară determinarea lăţimii de bandă care corespunde unei atenuări de 3dB sub valoarea maximă a amplitudinii. Segmentul din graficul din fig. 4.26. care corespunde amplitudinii maxime a fost mărit, pentru a putea observa lăţimea de bandă necesară.

Determinarea lăţimii de bandă este prezentată în 4.27.

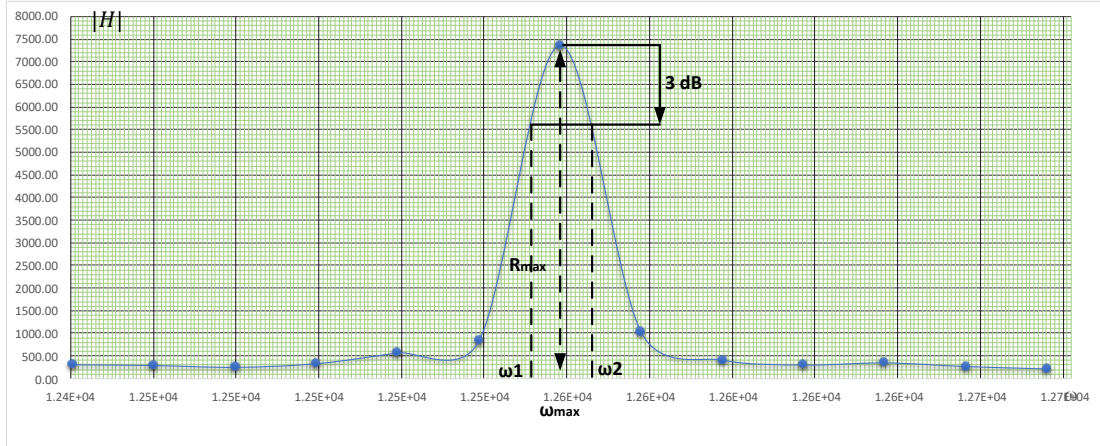


Fig. 4.27. Determinarea lăţimii de bandă

Atenuarea de 3 dB este aproximativ egală cu $\frac{\sqrt{2}}{2}$ din valoarea maximă a amplitudinii. Prin urmare, poate fi scrisă relaţia care determină abscisele lăţimii de bandă, ω_1 şi ω_2 :

$$\frac{\sqrt{k^2 + \omega^2 c^2}}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + \omega^2 c^2}} = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\frac{c^4 \sqrt{k^3 m (2c^2 + km)}}{2m^3 k^4 + (c^4 - 2kc^2 - 2k^2 m) \sqrt{k^3 m (2c^2 + km)}}} \quad (4.3)$$

ω_1 şi ω_2 sunt cele două soluţii reale şi pozitive ale ecuaţiei 4.32.

4.4. MODELAREA ŞI SIMULAREA FUNCŢIONĂRII ÎN REGIM STATIC

Funcţionarea în regim static a senzorului propus se bazează pe variaţia inductanţei bobinei, în funcţie de modificarea fluxului magnetic în spirele acesteia. Relaţia de calcul a inductanţei unei bobine plane spiralate este de forma:

$$L = N \frac{\Phi}{I} \quad (4.3)$$

Unde:

N = numărul de spire al bobinei,

Φ = fluxul magnetic prin bobină

I = intensitatea curentului electric

Inductanţa bobinei senzorului a fost mai întâi determinată folosind metoda elementului finit şi software-ul COMSOL Multiphysics. În acest scop, a fost necesară realizarea unui model modificat al senzorului, în care terminalele liniare de alimentare a bobinei au fost extinse până la limita corpului de aer care închide câmpul magnetic. Această modificare a fost necesară pentru a putea utiliza o condiţie de tip *Terminal* la frontiera aer – bobină (fig. 4.28).

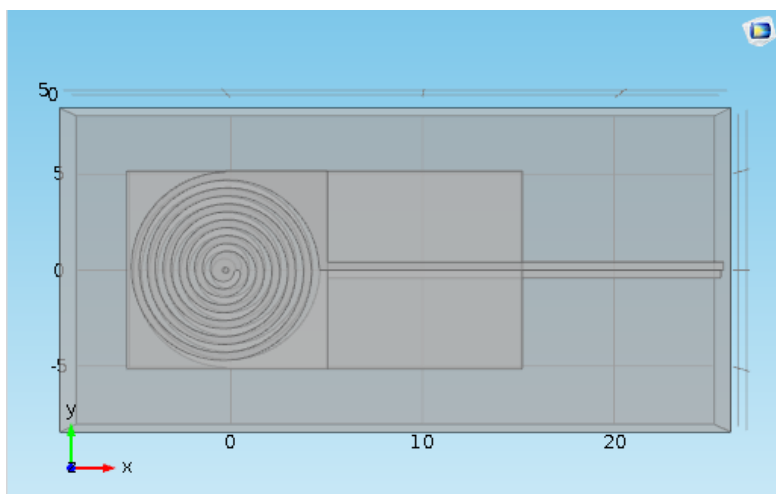


Fig. 4.28. Modelul modificat al bobinei

La terminalele bobinei a fost aplicată o tensiune $V = 0.22 \text{ V}$, iar mediul de lucru utilizat a fost Magnetic and Electric Fields. Utilizarea unui alt modul de lucru a fost necesară pentru determinarea inductanței bobinei, această opțiune nefiind disponibilă în toate modulele de electromagnetism.

Fiecare subdomeniu al ansamblului studiat a fost discretizat separat, folosind elemente de dimensiuni diferite, în funcție de geometria fiecărui subansamblu. Acest tip de discretizare a asigurat obținerea unor rezultate precise, într-un timp de lucru relativ scurt.

Distribuția câmpului electromagnetic al bobinei, precum și inductanța acesteia sunt prezentate în fig. 4.29.

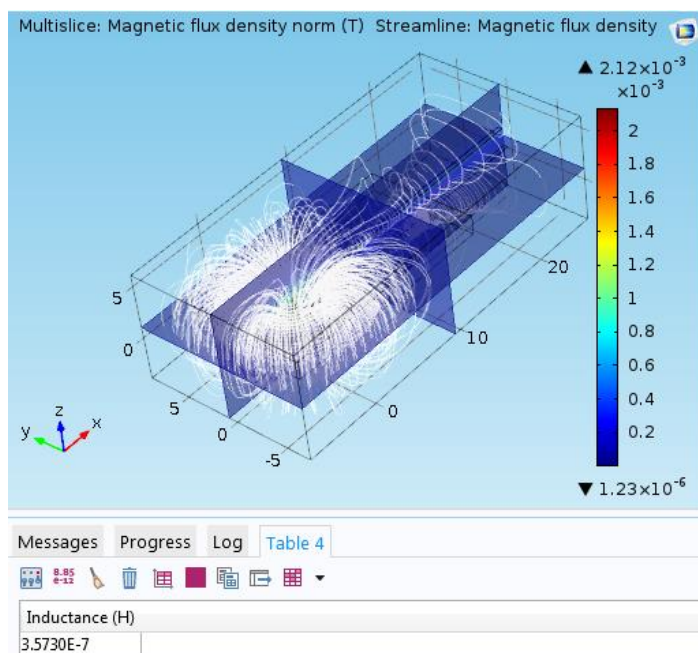


Fig. 4.29. Distribuția câmpului electromagnetic și inductanța bobinei

4.4 DETERMINAREA INFLUENȚEI POZIȚIEI ȘI GROSIMII ELEMENTULUI MAGNETIC ASUPRA INDUCTANȚEI BOBINEI

4.4.1. Influența poziției elementului magnetic asupra inductanței bobinei

Pentru a demonstra funcționalitatea senzorului inductiv, a fost realizat un model de calcul numeric cu ajutorul căruia este determinată influența poziției plăcuței magnetice a senzorului asupra inductanței bobinei de detecție. În cadrul aceluiași studiu a fost determinată și influența grosimii elementului magnetic asupra inductanței bobinei, precum și legea de variație corespunzătoare ambilor parametri.

Modelul 3D al sistemului studiat a fost realizat utilizând software-ul SolidWorks 2015. Inițial, grosimea plăcuței magnetice a fost definită cu valoarea de 1 mm, urmând a se varia distanța dintre plăcuța magnetică și bobina de detecție, incremental, cu un pas de 0.5 mm

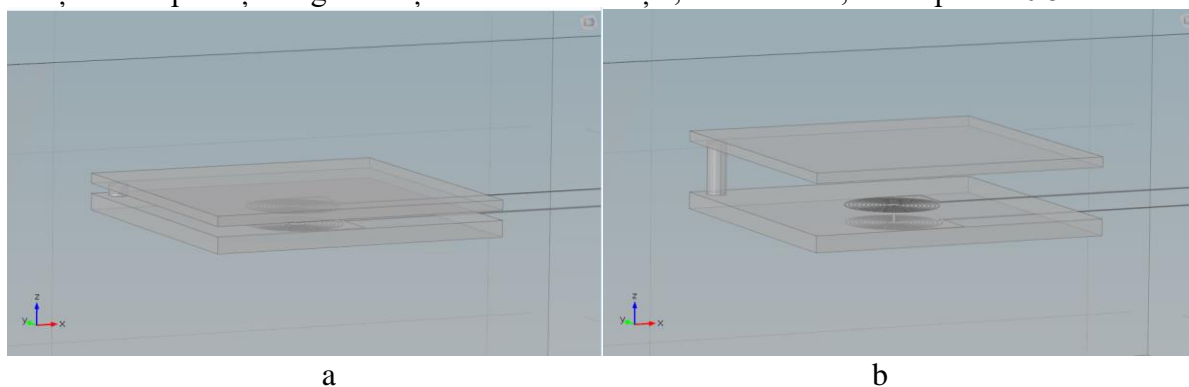


Fig. 4.30. Interstițiu de 0.5 mm (a), respectiv de 5 mm (b)

Suplimentar față de geometria senzorului, a fost adăugat un paralelipiped circumscris acestuia, căruia i s-a atribuit ca material aerul și care este necesar pentru delimitarea liniilor de câmp magnetic

Variația inductanței bobinei în funcție de distanța dintre aceasta și elementul magnetic este prezentată în graficul din fig. 4.33.

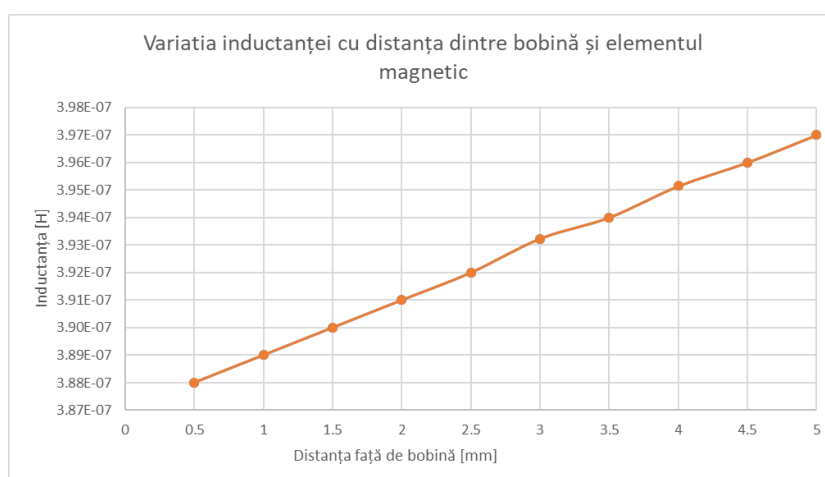


Fig. 4.33. Variația inductanței

CAPITOLUL 5: REZULTATE EXPERIMENTALE

5.1. INFLUENȚA TEHNOLOGIILOR DE FABRICAȚIE ASUPRA PROPRIETĂȚILOR MECANICE ALE NICHELULUI CE INTRĂ ÎN STRUCTURA MICROSENZORULUI PROPUS

5.1.1. Introducere

Obiectivul studiului a fost determinarea modului de elasticitate dinamic al nichelului prelucrat prin electrodepunere, pentru a se obține o caracterizare cât mai precisă a comportamentului lamelei mobile ce intră în componența microsenzorului MEMS. Pentru atingerea obiectivului propus, s-a optat pentru o determinare analitică a parametrului studiat, folosind ecuația care descrie frecvența de rezonanță a microgrinzilor în consolă de formă rectangulară, existentă în literatura de specialitate. În acest sens, au fost determinate experimental frecvențele proprii ale mai multor microgrinzi ce fac parte dintr-o plăcuță realizată prin electrodepunerea nichelului pe un suport de siliciu aurit. Rezultatele obținute au fost introduse în modelul analitic, determinând astfel modulul de elasticitate al nichelului electrodepus și evidențiindu-se, în paralel, variația valorii acestuia pe axele x și y ale plăcuței de nichel, datorată influenței parametrilor tehnologici.

5.1.2. Descrierea standului experimental utilizat

Vizualizarea microscopică și analiza statică și dinamică reprezintă aspecte cheie ale procesului de dezvoltare și testare a structurilor MEMS. Acestea sunt indispensabile pentru validarea calculelor cu element finit și măsurarea deformației suprafețelor. Analizorul de microsisteme MSA 500 (fig. 5.1) a fost proiectat pentru combinarea mai multor tehnici de măsurare în scopul caracterizării suprafețelor studiate, precum și al determinării deplasărilor în plan și în afara planului structurii studiate.



Fig. 5.1. Analizorul de microsisteme MSA 500 (Polytec)[52]

Echipamentul Polytech MSA 500 utilizează tehnici optice de măsurare non-contact a formelor și deplasărilor structurilor pe cele 3 axe: vibrometrie Laser-Doppler pentru măsurătorile în afara planului, microscopia video stroboscopică pentru deplasarea în plan, interferometria cu

lumină albă pentru topografia de înaltă rezoluție. Prin integrarea tuturor acestor tehnologii în același dispozitiv de măsurare, MSA 500 a devenit instrumentul standard la nivel mondial pentru caracterizarea dinamică a MEMS.

În proiectarea și fabricația microsistemelor, este necesară o verificare precisă a topografiei suprafețelor funcționale, pentru a asigura atingerea standardelor de calitate și performanță. Datorită rezoluției sale spațiale excelente, atât în planul structurii cât și în afara planului, unitatea de măsurare a topografiei, din componența MSA 500, este ideală pentru analiza profilului tridimensional al structurilor.

Principiul de măsurare se bazează pe interferențele rezultate în urma suprapunerii a două fascicule luminoase monocromatice. O sursă de lumină de tip LED, emite un fascicul care este ulterior împărțit în două raze distincte, cu ajutorul unei prisme optice. Raza de referință este îndreptată spre o suprafață de referință, iar raza de măsurare este direcționată către suprafața studiată. Lumina este reflectată apoi de ambele suprafețe și, în funcție de diferențele apărute se obțin franje de interferență, detectate cu ajutorul unei camere.

Prin această metodă pot fi determinate planeitatea, paralelismul, razele de curbura, unghiurile, volumele, înălțimea și rugozitatea probei.

Vibrometrul propriu-zis este un traductor optic de înaltă precizie, utilizat pentru determinarea frecvențelor de vibrație și a deplasărilor probelor. Funcționarea acestuia se bazează pe detecția variației frecvenței unei radiații luminoase, reflectate de suprafața studiată. În timpul deplasării, proba reflectă fasciculul luminos direcționat anterior asupra ei, iar variația Doppler a frecvenței este utilizată pentru a măsura viteza de deplasare de-a lungul axei razei de măsurare.

Generatorul intern de semnal excită periodic componenta cu un semnal sinusoidal sau în impulsuri. Un "generator de model" folosește o diodă LED cu lumină verde pentru a genera flash-uri ultra-scurte de lumină (<80 ns) sincronizate cu poziția fazei semnalului de excitație. Se obține astfel un grad ridicat de acuratețe al fazei, chiar și în cazul excitațiilor la frecvențe înalte. Diafragma camerei este, la rândul său, sincronizată cu excitația.

Această procedură garantează o precizie de măsurare înaltă și o analiză vizuală în timp real. Sistemul este setat să funcționeze în benzile de frecvență selectate în urma măsurătorilor vibrațiilor în afara planului.

Schema procedurii de măsurare este prezentată în fig. 5.4.

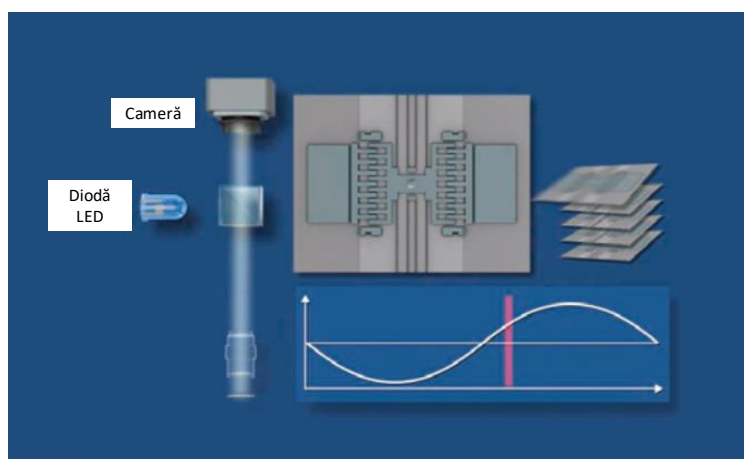


Fig. 5.4. Măsurarea prin metoda microscopiei video stroboscopice [53]

Pentru plasarea structurii în câmpul de măsurare, este utilizată o măsuță de poziționare cu trei grade de libertate (fig. 5.5), în scopul de a asigura un reglaj corespunzător al poziției microgrinzii în care să se obțină o reflectivitate cât mai bună a razei laser pe suprafața studiată.

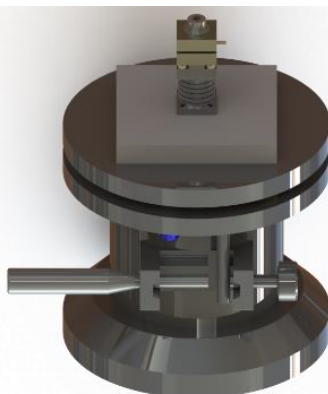


Fig. 5.5. Sistemul de poziționare a probelor

În timpul efectuării măsurătorilor, s-a constatat că obținerea unei reflectivități bune pe suprafața structurii este relativ dificil de realizat, datorită reglajului inexact al mesei pe cele trei axe. Pentru eliminarea acestei probleme, s-a proiectat un nou sistem de poziționare (fig. 5.6), a cărui precizie de reglare va fi asigurată cu ajutorul șuruburilor micrometrice.

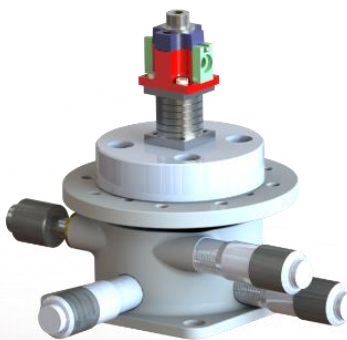


Fig. 5.6. Sistemul nou de poziționare utilizat

În scopul minimalizării efectelor unei prinderi defectuoase a structurii asupra rezultatelor măsurătorii, pentru fixarea probelor pe masa de poziționare a fost utilizată o menghină de construcție specială (fig. 5.7). Obiectivele principale urmărite în proiectarea și realizarea dispozitivului de prindere au constat în obținerea unei prinderi cât mai eficiente a probelor și menținerea paralelismului menghinei în vederea atingerii celui mai înalt nivel de reflectivitate a razei laser pe suprafață. Ca atare, suprafețele de prindere ale menghinei au fost realizate prin procedee de așchiere de mare precizie, urmate de un proces de lepuire și de riguroase verificări metrologice.

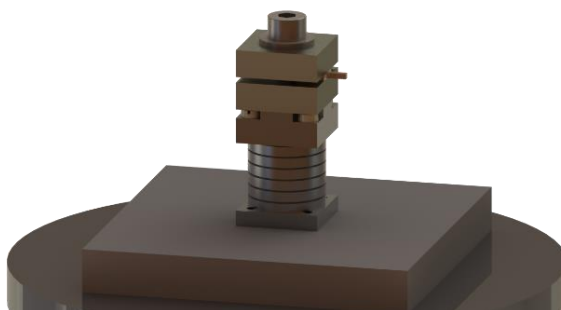


Fig. 5.7. Dispozitivul de prindere a probelor și actuatorul piezoelectric utilizat

S-a constatat că deși dispozitivul de prindere a probelor întrunește condițiile enumerate anterior, fixarea corespunzătoare a pieselor este un procedeu relativ dificil și inexact, care poate introduce eventuale erori în rezultatele măsurătorilor. În scopul compensării acestui dezavantaj, a

fost proiectat un nou dispozitiv de prindere (fig. 5.8), care asigură, pe lângă o stabilitate crescută și o fixare adecvată a probelor.

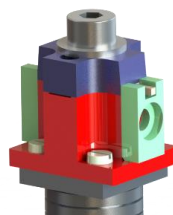


Fig. 5.8. Sistemul nou de prindere a probelor

5.1.3. Descrierea probelor testate

Pentru obținerea probelor de test, a fost realizată o plăcuță de Ni prin electrodepunerea metalului pe un suport de siliciu aurit. Suportul a fost realizat prin tehnologia LIGA cu fascicul laser, aceasta având aceleași rezultate calitative ca și procedeul bazat pe raze UV, însă cu costuri mult mai reduse.

Microgrinzile studiate au fost debitate din placa de Ni astfel obținută, printr-un procedeu de electroeroziune cu fir. S-a preferat obținerea tuturor microstructurilor din aceeași placă de Ni, pentru a evita posibilele variații ale proprietăților mecanice ale materialului induse de utilizarea unor matrițe individuale.

Pentru a studia variația pe suprafața plachetei a modulului de elasticitate dinamic al nichelului depus, un set de probe a fost orientat de-a lungul axei x a plachetei și un altul de-a lungul axei y. Forma bazei microgrinzilor în consolă diferă în funcție de orientarea lor, pentru a facilita identificarea acestora. Pentru a verifica dacă variația acestui parametru apare chiar și în cazul în care probele orientate pe x și pe y au poziții apropiate pe plachetă, a fost creat un set suplimentar de probe, în care microgrinzile x și y alternează în cadrul aceluiași șir (fig. 5.11).

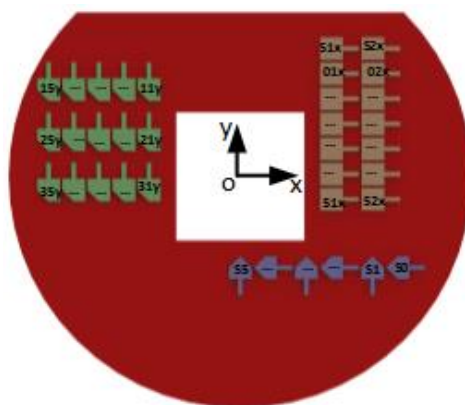


Fig. 5.11. Poziția probelor studiate, pe placheta de Ni

5.1.4. Metoda de testare

Frecvența de rezonanță a microgrinzilor în consolă a fost determinată utilizând analizorul de micro sisteme Polytech MSA 500, prin metoda vibrometriei laser – Doppler. Interferometrul generează două raze laser: una de referință, poziționată în câmpul microscopului cu ajutorul software-ului dedicat și una de măsurare, care în timpul procesului de achiziție a datelor scanează o rețea de puncte, stabilită inițial de către utilizator.

După aducerea vibrometrului în parametrii optimi de funcționare prin reglarea cât mai precisă a poziției structurii raportat la raza laser emisă, cu ajutorul software-ului specializat este generată o rețea de puncte de măsurare. În cazul structurilor studiate, a fost aleasă o rețea de puncte de formă rectangulară, corespunzătoare geometriei structurii (fig. 5.12). Densitatea

punctelor de măsurare este aleasă de către utilizator, și se recomandă a avea o valoare suficient de mare pentru obținerea unei măsurători precise. Ulterior, în timpul procesului de măsurare, raza laser va scana fiecare dintre aceste puncte, în scopul obținerii benzii de frecvență și a formelor modurilor de vibrație ale microstructurilor.

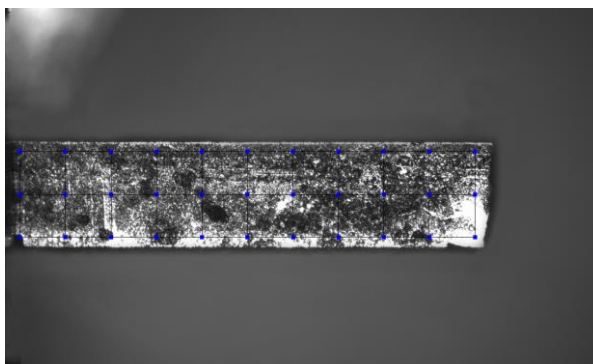


Fig. 5.12. Rețeaua punctelor de măsurare pentru una dintre microgrinzile studiate

Pentru excitația probelor a fost utilizat un actuator piezoelectric prezentat în fig. 5.6. Acesta a fost acționat folosind un semnal pseudo-aleator, cu o amplitudine de 0.5 și o frecvență de 50 kHz.

În figura 5.13 sunt prezentate forma primului mod de vibrație al uneia dintre structurile studiate, împreună cu spectrul frecvențelor. Cursorul indică frecvența de rezonanță a microgrinzii, a cărei valoare este prezentată în fereastra din dreapta.

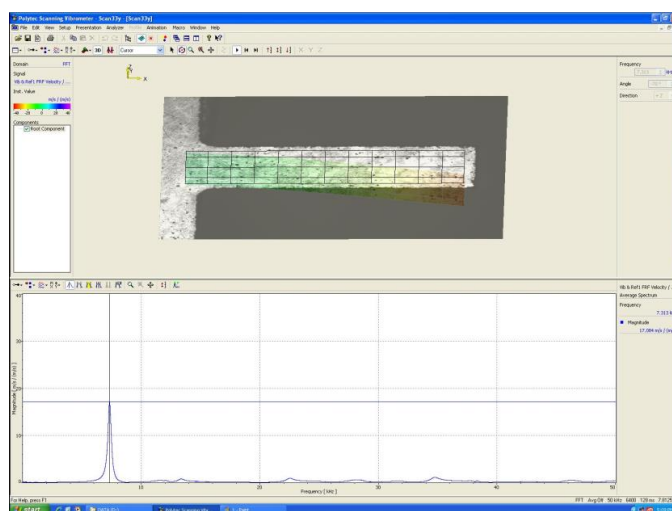


Fig. 5.13. Rezultate experimentale

5.1.5. Interpretarea rezultatelor

Determinarea modulului de elasticitate dinamic al Ni depus s-a realizat prin introducerea valorilor determinate experimental în formula utilizată în literatura de specialitate pentru a descrie algoritmul de calcul al frecvențelor de rezonanță ale microgrinzilor rectangulare.

Valorile modulului lui Young determinate conform algoritmului descris au fost împărțite la o constantă E_E , reprezentând valoarea modulului de elasticitate dinamic al unei structuri similare de dimensiuni mai mari, obținute prin același procedeu tehnologic.

Pe baza rezultatelor obținute, a fost realizată o comparație între valorile raportului E/E_E pentru microgrinzile studiate, în raport cu poziția acestora pe placheta de Ni. Comparația a avut rolul de evidenția variația pe suprafața plachetei a modulului lui Young al materialului depus, iar rezultatele acestea sunt prezentate în fig. 5.14.

Axa x a graficelor corespunde poziției probelor pe plachetă, unde 0 reprezintă centrul plachetei, iar modulul de elasticitate dinamic este reprezentat pe axa y.

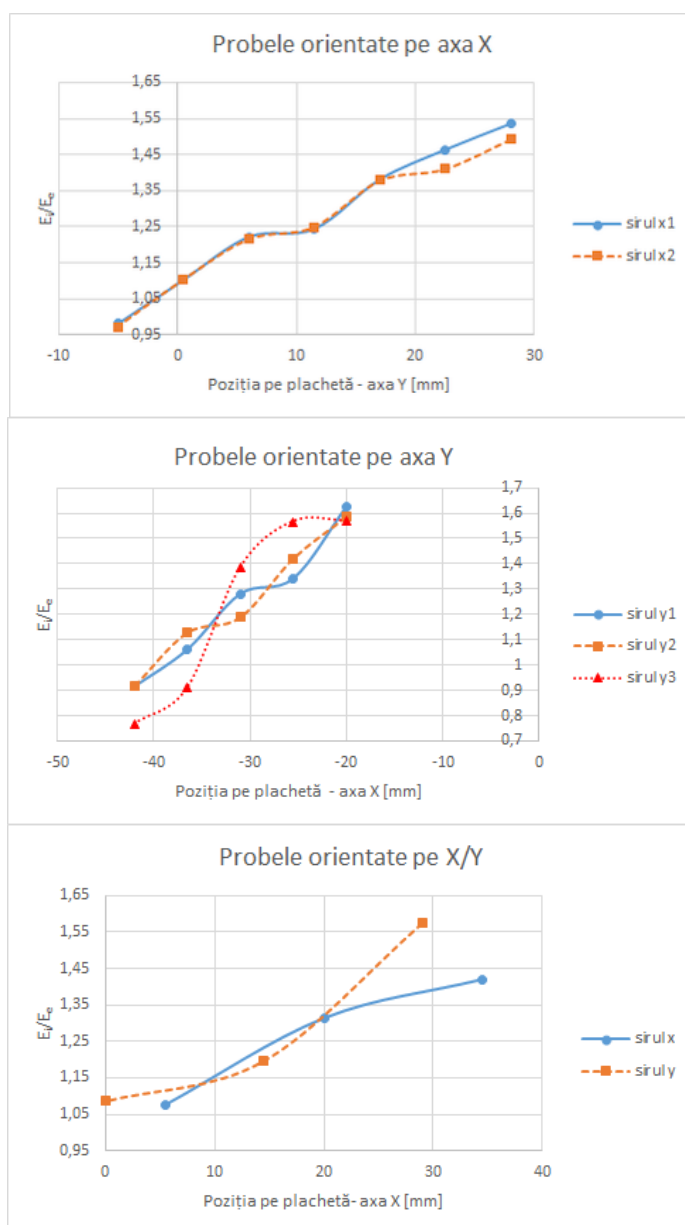


Fig. 5.14. Variația modului lui Young în funcția de poziția microgrinzilor pe placă

Se poate observa că pentru microgrinzile orientate pe axa x, între cele două șiruri de probe nu apar diferențe majore. Raportul E_d/E_E crește o dată cu distanța dintre centrul plachetei și proba studiată, pe direcția OY.

În cazul probelor orientate pe direcția y, raportul E_d/E_E scade pornind de la centrul plachetei, pe direcția OX. Cea mai mare variație se înregistrează pentru șirul de probe 11y-15y. Analiza variației grosimii plachetei a indicat existența unei relații între acest parametru și valoarea modului de elasticitate dinamic. Astfel, modulul lui Young are valori mai mari în cazul probelor de grosime redusă. Acest aspect se explică prin faptul că probele de grosime mai mare au rezultat în urma unei densități mai mari a curentului de electroliză, ceea ce a dus la obținerea unor zone cu structură spongioasă, de rigiditate scăzută.

În ceea ce privește probele orientate alternativ pe x și y, se poate observa că diferențele dintre valorile fiecărui set de probe sunt mici, iar raportul E_d/E_E crește o dată cu distanța față de centrul plachetei.

5.2. DETERMINAREA RĂSPUNSULUI ÎN FRECVENȚĂ A MAI MULTOR CONFIGURAȚII DE LAMELE MOBILE

Pentru realizarea ulterioară a versiunii miniaturale a senzorului propus, au fost testate mai multe configurații ale lamelei flexibile, pentru a determina configurația optimă a acesteia. Piesele de test sunt realizate din alamă, cu dimensiuni variate.

Primul set de piese (1-7) au masa inerțială atașată de marginea fixă a lamelei prin două elemente de prindere, iar al doilea set (8-14), utilizează un singur element de prindere. Imaginea la microscop a unei secțiuni din ambele tipuri de piese este prezentată în fig. 5.16.

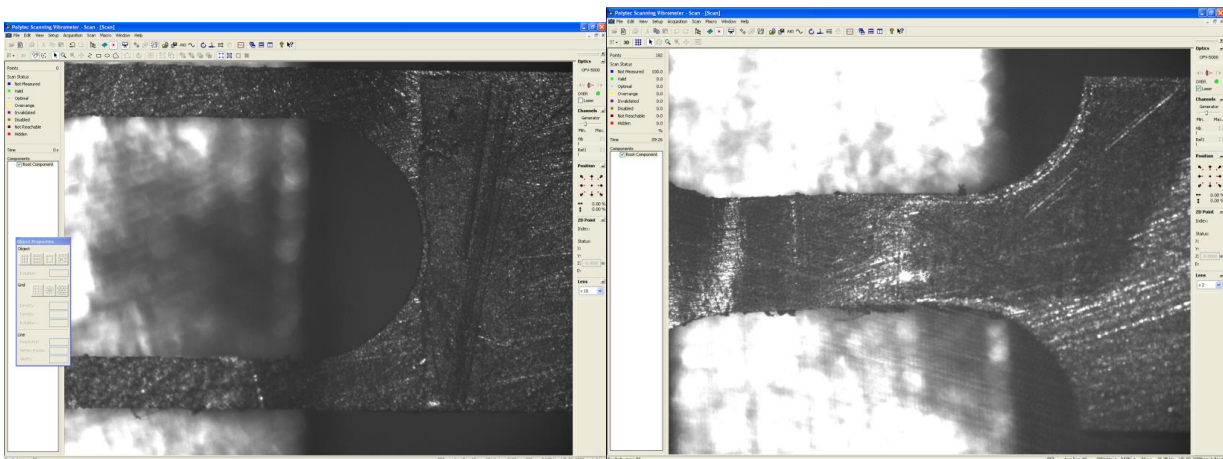


Fig. 5.16. Imagine la microscop cu ambele tipuri de piese

Am determinat frecvențele de rezonanță ale fiecărei piese, utilizând un model numeric realizat cu ajutorul software-ului COMSOL Multiphysics. Frecvențele de rezonanță și modurile de vibrație obținute au fost comparate apoi cu cele determinate experimental, folosind același stand descris în cap. 5.1.

În fig. 5.17 este prezentat un exemplu de validare a modelului numeric de calcul al frecvențelor de rezonanță prin comparația cu rezultatele experimentale.

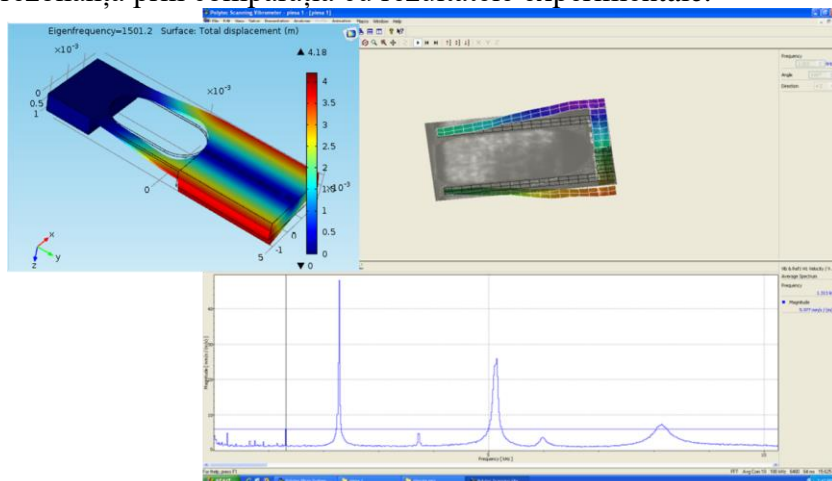


Fig. 5.17. Validarea modelului de calcul al frecvenței de rezonanță prin rezultate experimentale

5.3. DETERMINAREA EXPERIMENTALĂ A VARIAȚIEI INDUCTANȚEI BOBINEI CU DISTANȚA DINTRE BOBINĂ ȘI LAMELA CU MATRICEA DE MAGNEȚI

Funcționarea în regim static a senzorului presupune introducerea ansamblului bobină – lamelă mobilă într-o curgere de fluid, a cărei presiune de impact va determina deformația lamelei mobile a senzorului. În urma deformației, distanța dintre magneți și bobină se modifică, ceea ce

determină o variație a fluxului magnetic în bobină. În urma diferenței de flux magnetic, inductanța bobinei va înregistra la rândul ei o variație. Curba de răspuns a bobinei în raport cu distanța dintre lamele a fost determinată experimental, în scopul de a valida modelul numeric realizat în capitolul anterior.

5.3.1. Standul experimental

Pentru detecția variației inductanței bobinei, produsă de apropierea respectiv distanțarea matricei de magneți permanenți, a fost utilizat un circuit LDC 1614, produs de Texas Instruments și placa de dezvoltare dedicată

Acest circuit pe bază de proprietate a unor materiale de a induce o modificare a câmpului electromagnetic generat de un inductor. Un inductor, laolaltă cu un capacitor formează un circuit rezonator L-C, folosit pentru crearea unui câmp electromagnetic. În cazul unui rezonator L-C, o perturbație a câmpului electromagnetic va produce o modificare a inductanței bobinei ducând la o modificare a frecvenței de rezonanță. Circuitul integrat LDC 1614, ce este un convertor al inductanței în semnal digital ce măsoară oscilația frecvenței unui rezonator L-C. Dispozitivul electronic va genera o valoare digitală proporțională cu frecvența rezonatorului, iar frecvența măsurată poate fi convertită într-o inductanță echivalentă.

Standul de măsurare utilizat este prezentat în fig. 5.20.

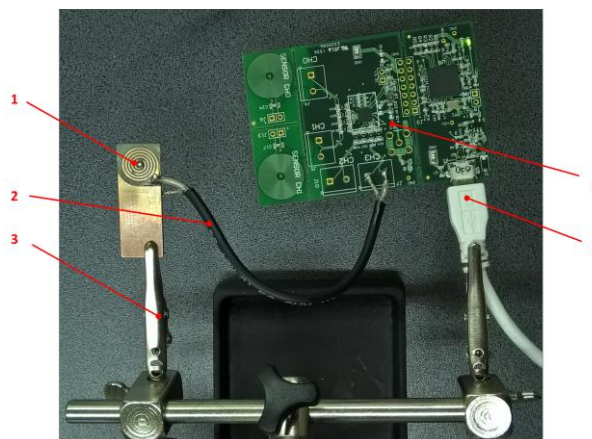


Fig. 5.20. Standul experimental

Elementul sensibil (bobina) (1) este conectat electric la placa LDC 1614 EVM (4) prin intermediul cablului ecranat (2). Datele sunt colectate de către un PC prin intermediul conexiunii (5). Tot ansamblul electronic este susținut de către suportul (3).

Bobina este realizată pe o plăcuță de circuit imprimat dublu strat, distanța dintre straturi fiind de 1,524mm.

Preluarea semnalului de la bobină pentru minimizarea interferențelor se realizează printr-un cablu ecranat ce este atașat la unul de canalele de intrare ale circuit integrat specializat LDC1614 de conversie ale inductanței în semnal digital ce posedă o rezoluție de 28biți.

5.3.2. Rezultatele obținute

Prima etapă a testelor a constat în determinarea inductanței bobinei în absența matricei de magneți permanenți și compararea valorii obținute cu modelul de calcul numeric.

Valoarea inductanței bobinei este de 0.385 μH , ceea ce validează astfel modelul de calcul numeric din fig. 4.29, în care s-a obținut o valoare a inductanței de 0.387 μH .

Următoarea etapă a testării a constat în introducerea lamelei cu magneți permanenți, care a fost poziționată pe rând la distanțe între 1,4 și 3 mm de bobină, cu pas de 0.1 mm, și a fost măsurată inductanța bobinei în fiecare caz. Pentru reglarea precisă a poziționării lamelei mobile

în raport cu bobina, a fost utilizat un sistem de poziționare cu șurub micrometric. Standul experimental utilizat este prezentat în fig. 5.22.



Fig. 5.22. Sistemul de poziționare al lamei cu magneți

5.3.3. Interpretarea rezultatelor experimentale

După măsurarea inductanței în fiecare poziție, a fost determinată curba de răspuns a bobinei în funcție de distanța dintre aceasta și elementul mobil. Variația inductanței cu interstițiul dintre elemente este prezentată în fig. 5.23.

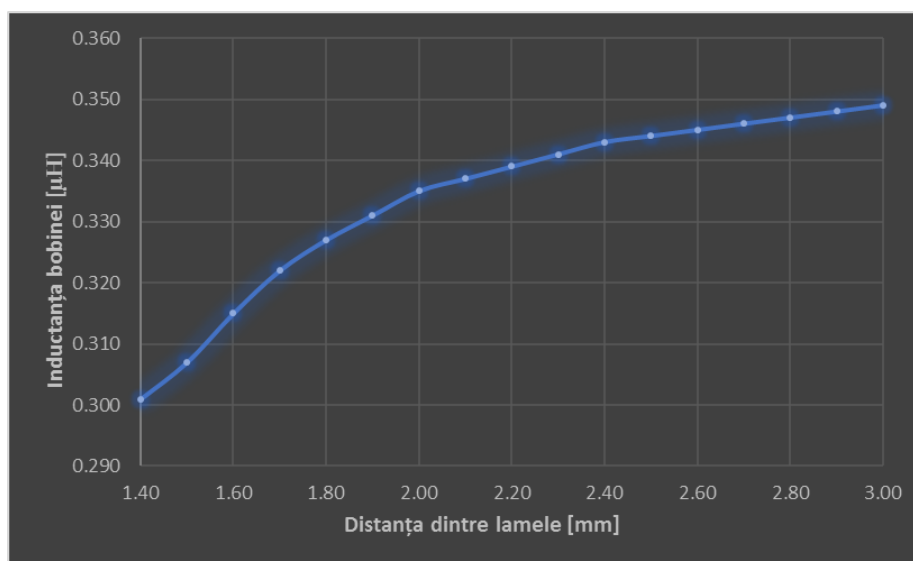


Fig. 5.23. Curba de răspuns a senzorului

Din fig. 5.22 se poate observa o scădere a inductanței bobinei cu apropierea elementului magnetic de aceasta, ceea ce demonstrează principiul de funcționare al senzorului propus.

CAPITOLUL 6: CONCLUZII, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

6.1. CONCLUZIILE ACTIVITĂȚII DE CERCETARE

Domeniul de interes al tezei de doctorat constă în studiul, optimizarea, dezvoltarea și testarea unor elemente senzoriale de măsurare a presiunii din sistemele pneuonice de dimensiuni reduse. Tema a fost aleasă în urma unui studiu al literaturii de specialitate și al ultimelor direcții de cercetare în domeniul sistemelor pneumatice inteligente, în urma căruia am concluzionat că tendința principală de dezvoltare a sistemelor pneuonice se axează pe miniaturizarea acestor sisteme pentru încadrarea lor într-un număr cât mai variat de aplicații.

În urma îndeplinirii primului obiectiv al lucrării și anume modelarea și simularea unor construcții de traductoare de presiune de tip MEMS cu configurații clasice, am determinat influența geometriei membranei acestor senzori asupra sensibilității lor. Cu scopul de a optimiza răspunsul traductoarelor piezorezistive, am dezvoltat mai multe modele de calcul care permit determinarea parametrilor constructivi optimi ai acestor senzori. De asemenea, am dezvoltat o nouă variantă constructivă a senzorilor de presiune piezorezistivi de tip MEMS care permite creșterea sensibilității traductoarelor cu membrană circulară.

Un alt obiectiv al lucrării a constat în modelarea, simularea și testarea unei noi soluții constructive de senzor de presiune electromagnetic, cu funcționare în regim dinamic sau static. Senzorul propus este destinat măsurării presiunii dinamice a aerului comprimat, iar funcționarea acestuia a fost modelată atât analitic cât și numeric, folosind metoda elementelor finite și software-ul COMSOL Multiphysics. În urma simulărilor efectuate s-a constatat o funcționare eficientă a senzorului în regim dinamic, în special în cazul în care acesta este utilizat la prima sa frecvență de rezonanță, deoarece în primul mod de vibrație, variația frecvenței proprii cu presiunea fluidului are o caracteristică liniară.

Funcționarea statică a senzorului a fost testată inclusiv prin măsurători experimentale ale variației inductanței bobinei cu distanța dintre lamelele senzorului. În urma comparației rezultatelor obținute prin testarea principiului cu cele determinate prin metoda elementului finit, a fost afirmată corectitudinea modelelor realizate și s-a confirmat funcționalitatea soluției constructive propuse.

Având în vedere că obiectivul lucrării îl constituie preponderent senzorii miniaturali, în cadrul capitolului 5 a fost determinată experimental influența tehnologiilor de microfabricație asupra proprietăților mecanice ale materialelor specifice traductoarelor MEMS. Tehnologia studiată a fost electrodepunerea și s-a constatat că uniformitatea proprietăților materialelor pe direcțiile planului plachetei se află în strânsă legătură cu densitatea de curent utilizată în electrodepunere.

6.2. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Printre direcțiile viitoare de cercetare se numără testarea senzorului propus într-un sistem pneuonic simplu și validarea rezultatelor obținute cu ajutorul unui ansamblu suplimentar de traductoare.

De asemenea, cercetările ulterioare vor fi direcționate către realizarea modelului MEMS al senzorului electromagnetic propus, prima etapă a procesului de miniaturizare fiind deja parcursă prin determinarea experimentală a frecvențelor de rezonanță a unor noi soluții constructive pentru lamela mobilă a senzorului.

6.3. CONTRIBUȚII PROPRII

Printre contribuțiile proprii ale autoarei la realizarea tezei de doctorat se numără:

Realizarea unui model de calcul numeric pentru determinarea influenței geometriei traductoarelor de presiune piezorezistive asupra sensibilității acestora,

Realizarea unor modele de calcul numeric destinate optimizării constructive a traductoarelor de presiune piezorezistive, din punct de vedere al grosimii membranei elastice și al poziționării elementelor sensibile,

Conceperea și simularea unei noi soluții constructive de traductor de presiune piezorezistiv de tip MEMS, cu performanțe superioare soluțiilor clasice,

Propunerea unui nou tip de traductor electromagnetic destinat măsurării presiunii dinamice dintr-un sistem pneumatic,

Realizarea modelului matematic al sensorului propus, în cazul funcționării acestuia în regim dinamic, cu determinarea parametrilor modali (m, c, k).

Determinarea prin analiză cu element finit a frecvențelor de rezonanță ale sensorului propus și a variației acestora sub acțiunea unui fluid,

Realizarea unui model de calcul numeric pentru determinarea inductanței bobinei sensorului propus,

Proiectarea 3D a unor noi sisteme de poziționare și prindere a elementelor testate prin metoda vibrometriei laser,

Determinarea experimentală a influenței densității de curent utilizată în procesul de electrodepunere asupra proprietăților mecanice ale materialelor,

Determinarea experimentală și numerică a frecvențelor de rezonanță a unor lamele din alamă destinate realizării modelului miniatural al sensorului propus,

Testarea experimentală a funcționării traductorului electromagnetic propus și studiat în cadrul activității doctorale.

6.4. LISTA DE LUCRARI

1. Popescu-Cuță, A., Gheorghe V., Comeagă C.D., (2019) Dispozitiv de fixare a structurilor mecanice de mici dimensiuni pentru măsurarea modului de elasticitate prin vibrometrie laser, *nr. A/00761/2019* (Cerere de brevet)

2. Udrea, I., Kraus, V.F., Popescu-Cuță, A. (2020) Facility Management Platform Sensors Monitoring for Improving Workplace Services, 36th IBIMA International Conference, Granada, Spain (ISBN: 978-0-9998551-5-7) (ISI)

3. Udrea, I., Gheorghe, V.I., Avram, M., Petrache, S., Popescu-Cuță, A., Popa, R.T. (2020) Solution for controlling a hydraulic motor using cloud data, E3S Web of Conferences 180, 02013 – 2020 (ISI)

4. Popescu-Cuță A., Comeagă C.D., Donțu O. (2020), Structural optimization of a MEMS piezoresistive pressure sensor with circular membrane, UPB Scientific Bulletin, Mechanical Engineering Section – in curs de publicare

5. Moraru, E., Donțu O., Besnea, D., Rizescu, C., Rizescu, D., Popescu-Cuță, A. (2019) Experimental Researches Regarding Mechanical Behaviour of Dental Prototypes realized by Additive Technologies, MATEC Web of Conferences. 290. 03011. (ISI)

6. Popescu-Cuță, A., Gheorghe, G., Gheorghe, V., Comeagă, C. D., & Donțu, O. (2016). Optimization Of Pressure Transducers With Silicon Membrane, Regarding Piezoresistors Position. Mecahitech

7. Popescu-Cuță, A., Donțu O., Comeagă C.D., Gheorghe V. (2016) Design and optimization of a low cost MEMS piezoresistive pressure transducer for pneumatic systems, International Conference on Intelligent Computing, Mechanical and Production Processes, Pattaya (Thailand)
8. Gheorghe V., Popescu-Cuță, A., Comeagă C.D., Ilie C. (2015) Determining The Young Modulus Of Electroplated Ni Using Modal Analysis, 7th International Conference on Innovations, Recent Trends and Challenges in Mechatronics, Mechanical Engineering and New High-Tech Products Development MECAHITECH 2015
9. Avram, M., Donțu O., Bucșan, C., Popescu-Cuță, A. (2014) Multi-sensorial Module for Pneumatic and Hydraulic Systems – Concept and Functioning, 6th International Conference on Innovations, Recent Trends and Challenges in Mechatronics, Mechanical Engineering and New High-Tech Products Development MECAHITECH 2014.
10. Avram, M., Popescu-Cuță, A., Bucșan, C., Apostolescu, T.C. (2014) Aspects Regarding The Integration Of Sensors And Transducers In The Construction Of The Hydraulic And Pneumatic Equipment For Automation, 6th International Conference on Innovations, Recent Trends and Challenges in Mechatronics, Mechanical Engineering and New High-Tech Products Development MECAHITECH 2014.
11. Popescu-Cuță, A., Donțu O., Ionașcu G., Avram, M., Comeagă C.D., Manea, E. (2014) Modal analysis of a MEMS cantilever, Advanced Concepts in Mechanical Engineering I, Vol. 658, ISBN-13: 978-3-03835-271-6
12. Avram, M., Bucșan, C., Duminiță, D., Popescu-Cuță, A. (2014) Advanced Concepts in Mechanical Engineering I, Vol. 658, ISBN-13: 978-3-03835-271-6

Bibliografie

1. Krivts, I. L., & Krejnin, G. V. (2016). Pneumatic actuating systems for automatic equipment: structure and design. Crc Press.
2. Avram, M., Banu, V., Bucșan, C., Duminiță, D., Gheorghe, V., & Bogatu, L. (2009). Original Solutions of Linear and Rotary Pneutronic Units, 1ST International Conference on Innovations, Recent Trends and Challenges in Mechatronics, Mechanical Engineering and New High Tech Products Development.
3. Avram, M. (2014). Hidronica și pneutronică. UPB DMMP.
4. Smaoui, M., Brun, X., & Thomasset, D. (2006). A study on tracking position control of an electropneumatic system using backstepping design. Control Engineering Practice, 923–933.
5. Thomas, B., Maul, G., & Jayawiyanto, E. (2005). A novel, low-cost pneumatic positioning system. Journal of manufacturing systems, 24(4), 377–387.
6. Avram, M., & Bucșan, C. (2009). Pneutronic Positioning Unit Part 1: Design And Working Principle. Romanian Review of Precision Mechanics, Optics and Mecatronics, 36(19).
7. Avram M., Duminiță D., Udrea C., Gheorghe V., (2008). Hidronica si pneutronică - Aplicații, Editura Universitară, București
8. Zeljko, S., Zilie, T., & Essert, M. (2007). High speed solenoid valves in pneumatic servo applications. Control & Automation, MED'07.
9. Avram, M., Bucșan, C., Duminiță, D., & Spânu, A. (2013). On Integrating Sensors Within Pneumatic Equipment. Romanian Review Precision Mechanics, Optics & Mecatronics, (44).

10. Kato, T., Kawashima, K., Funaki, T., Tadano, K., & Kagawa, T. (2010). A new, high precision, quick response pressure regulator for active control of pneumatic vibration isolation tables. *Precision Engineering*, 34(1), 43-48.
11. Lineaire aandrijving met wegmeetsysteem. (n.d.). din https://www.festo.com/cat/nl-be_be/products__82552.
12. Dolga, V. (2015). Senzori și sisteme senzoriale. Universitatea Politehnica Timișoara.
13. Zet, C. (n.d.). Senzori și traductoare - Lucrare de laborator. Din <http://iota.ee.tuiasi.ro/~czet/Lucrari%20de%20laborator/SenzTrad/L6%20TRADDEPLREZ.pdf>.
14. Cenuse, L. (n.d.). Suport de curs: Tipuri de traductoare. Din <https://portal.ctcnvk.ro/suporturi-de-curs/Arhiva/cenuse-lavineta-suporturi-de-curs> Colegiul tehnic de comunicații Nicolae Vasilescu Karpen
15. Tan, K. K., & Putra, A. S. (2010). *Drives and control for industrial automation*. Springer Science & Business Media.
16. AzoSensors. (2012, May 5). An Introduction to Hall Effect Sensors. Din <https://www.azosensors.com/article.aspx?ArticleID=16>.
17. Traductoare Hall si utilizarea lor la autoturisme. (n.d.). Din <http://www.creeaza.com/tehnologie/electronica-electricitate/Traductoare-Hall-si-utilizarea138.php>.
18. Lion Precision. (n.d.). Eddy Current Sensors. Din <http://www.lionprecision.com/eddy-current-sensors/>.
19. Vornicu, L. (n.d.). Curs senzori și traductoare. Din http://ep.etc.tuiasi.ro/site/Senzori_si_Traductoare/Cursuri/senzori_4.pdf. Universitatea Tehnica Gheorghe Asachi din Iasi.
20. Thermocouples-What is a thermocouple-Types of thermocouples. (n.d.). Din <http://www.thermocoupleinfo.com/>.
21. NTC thermistor | Resistor types | Resistor Guide. (n.d.). Din <https://eepower.com/resistor-guide/resistor-types/ntc-thermistor/>.
22. Fraden, J. (2004). *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. Springer Science & Business Media
23. <http://ime.upg-ploiesti.ro/attachments/article/102/EA%20cap3.pdf>.
24. Haron, S., Sulaiman, H. (2014). *Process instrumentation*, University of technology Malaysia
25. http://www.workaci.com/pdf/technotes/pressure_technical_notes.pdf
26. Yu, L., Kim, B. J., & Meng, E. (2014). Chronically implanted pressure sensors: challenges and state of the field. *Sensors*, 14(11), 20620-20644.
27. <http://electronicdesign.com/>
28. <http://www.kulite.com/>
29. <http://www.sensormag.com/>
30. <http://www.columbia.edu/cu/fowlerlab/fops.html>
31. Luque, A., & Quero, J. M. (2005). Modeling and numerical simulation of a MEMS pneumatic valve. In *Conference on Electron Devices, 2005 Spanish* (pp. 489-493). IEEE.
32. <http://nfpahub.com/events/wp-content/uploads/sites/2/2015/10/7-1-Hargus-UMN-MEMS-Pneumatic-Valve.pdf>
33. Gorissen, B., Donose, R., Reynaerts, D., & De Volder, M. (2011). Flexible pneumatic micro-actuators: analysis and production. *Procedia Engineering*, 25, 681-684.
34. Anderas, E. (2012). *Advanced MEMS pressure sensors operating in fluids*. Acta Universitatis Upsaliensis Uppsala.
35. https://en.wikipedia.org/wiki/Piezoresistive_effect
36. https://en.wikipedia.org/wiki/Hooke%27s_law
37. Lin, L., & Yun, W. (1998). Design, optimization and fabrication of surface micromachined pressure sensors. *Mechatronics*, 8.5, 505-519.

38. Popescu-Cuță, A., Gheorghe, G., Gheorghe, V., Comeagă, C. D., & Donțu, O. (2016). Optimization Of Pressure Transducers With Silicon Membrane, Regarding Piezoresistors Position. Mecahitech.
39. http://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/mat_mechanics/hooke_plane_stress.cfm
40. Johns, G. K. (2006). Modeling piezoresistivity in silicon and polysilicon. Journal of Applied Engineering Mathematics.
41. <https://studylib.net/doc/18349828/piezoresistive-pressure-sensors>
42. <http://www.learnengineering.org/2012/12/what-is-von-mises-stress.html>
43. Popescu-Cuță A., Gheorghe Gh., Gheorghe V., Comeagă C.D., Donțu O. (2020), Structural optimization of a mems piezoresistive pressure sensor with circular membrane, Buletinul științific UPB (în review)
44. Necula, C., Gheorghe, G., Gheorghe, V., Comeaga, D. C., & Dontu, O. (2016). Electromagnetic Multifunctional Stand For MemS Applications. Mecahitech.
45. J.K. Luo, A.J. Flewitt, S.M. Spearing, N.A. Fleck, Milne, W.I., Young's modulus of electroplated Ni thin film for MEMS applications.
46. Spearing, S. M. (2000). Materials issues in microelectromechanical systems (MEMS). Acta Materialia, 48.1, 179–196.
47. <http://www.hysen.com/>
48. Polytech MSA 500 User Manual
49. Reitz, J., Milford, F., & Christy, R. (2008). Foundations of electromagnetic theory. Addison-Wesley Publishing Company.
50. COMSOL AC/DC Module User Guide
51. Ivas, S. (2003). Teoria macroscopică a câmpului electromagnetic. Editura Fundației Universitare “Dunărea de Jos.”.
52. <http://www.matweb.com/search/AdvancedSearch.aspx>
53. Greenwood, J. C. (1984). Etched Silicon Vibrating Sensor. J. Phy. E. Sci. Instrum., 17, 650–652.
54. Kinnell, P. K., Ward, M. C. L. , Craddock, R. (2004) Physical characterisation of selective stress coupling for resonant pressure sensors Sensors and Actuators A: Physical 115.2: 230-234.
55. Greenwood, J. C. (1988). Miniature silicon resonant pressure sensor. IEE Proceedings D-Control Theory and Applications, 135(5).
56. <http://www.sensorland.com/HowPage007.html>
57. Luo, Z. et al. (2014) A High-Q Resonant Pressure Microsensor with Through-Glass Electrical Interconnections Based on Wafer-Level MEMS Vacuum Packaging, Sensors 14.12: 24244-24257.
58. <http://mech.vub.ac.be/avrg/publications/ModalAnalysis.pdf>