

**UNIVERSITATEA „ȘTEFAN CEL MARE” SUCEAVA
FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ ȘI ȘTIINȚA CALCULATOARELOR
DOMENIUL: INGINERIE ELECTRICĂ**

ing. Dumitru CERNUȘCĂ

**CONTRIBUȚII TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE
PRIVIND REALIZAREA UNOR
ACTUATOARE ȘI MOTOARE SPECIALE FOLOSIND
MATERIALE CU MEMORIA FORMEI**

REZUMAT

Conducător științific:

Prof. univ. dr. ing. Laurențiu Dan MILICI

Suceava – 2020

CUPRINS

Introducere	7	7
Capitolul 1		
Materiale inteligente. Caracteristici	11	11
1.1 Noțiuni generale privind materialele inteligente.....	11	11
1.2 Clasificarea materialelor inteligente	12	11
1.3 Obținerea aliajelor cu memoria formei	13	-
1.3.1 Obținerea aliajelor cu memoria formei	13	-
1.3.2 Obținerea aliajului Ti-Ni-Nb	15	-
1.4 Histerezisul termic de transformare și structura cristalină	16	12
1.5 Caracteristicile materialelor inteligente	18	-
1.5.1 Noțiuni de bază privind metalurgia fizică a transformărilor martensitice din oțeluri	18	-
1.5.2 Cinetica transformării martensitice din oțeluri	18	-
1.5.3 Martensite termoelastice	19	-
1.5.4 Condiții necesare producerii transformărilor martensitice termoelastice (TMT)	20	-
1.5.5 Martensita indusă prin tensiune (MIT)	22	-
1.6 Comportarea termomecanică a martensitelor termoelastice	23	12
1.6.1 Pseudoelasticitatea	23	12
1.6.2 Efectul simplu de memorie a formei EMF	27	-
1.6.3 Efect simplu de memorie a formei la Ni-Ti	28	13
1.6.4 Efectul de memorie a formei în dublu sens	29	-
1.6.5 Efectul de memorie a formei în dublu sens la Ni-Ti	29	13
1.7 Concluzii	31	14
Capitolul 2		
Stadiul actual pe plan mondial în domeniul actuatoarelor și mașinilor speciale ce folosesc materiale inteligente	32	15
2.1 Introducere	32	15
2.2 Primele aplicații ale aliajelor cu memoria formei	32	15
2.2.1 Cuplaje realizate din aliaje cu memoria formei	32	15
2.2.2 Utilizarea materialelor cu memoria formei la producerea lucrului mecanic	35	-
2.2.3 Aplicații pseudoelastice ale materialelor cu memoria formei	37	-
2.3 Tipuri de actuatoare cu nitinol întâlnite în aplicații	38	16
2.3.1 Supapă de control cu Ni-Ti prin efect de memorare a formei	38	16
2.3.2 Actuator liniar cu Ni-Ti	39	-
2.4 Tipuri de motoare cu nitinol întâlnite în literatura de brevete	40	17

2.4.1 Motor termic cu buclă de sârmă din Ni-Ti	40	-
2.4.2 Motor solar cu bandă din Ni-Ti	41	-
2.4.3 Motoare sincronizate cu arc din Ni-Ti	41	-
2.4.4 Motoare gravitaționale cu Ni-Ti	43	-
2.4.5 Motor liniar cu Ni-Ti	46	-
2.4.6 Motor cu elemente din Ni-Ti cu rotor excentric	46	-
2.5 Stadiul actual al aplicațiilor ce folosesc materiale inteligente realizate în cadrul Centrului de Cercetare EMAD	47	17
2.5.1 Actuator liniar-rotativ pe bază de aliaje cu memoria formei	47	-
2.5.2 Actuator liniar electric cu fire din Ni-Ti realizat în Centrul de Cercetare EMAD	48	-
2.5.3 Motor termic cu rotor excentric cu Ni-Ti - varianta 1	48	17
2.5.4 Motor termic cu rotor excentric cu Ni-Ti - varianta 2	50	18
2.5.5 Motor cu Ni-Ti și instalație experimentală realizată în cadrul Centrului de Cercetare EMAD	51	-
2.6 Concluzii	52	20

Capitolul 3

Proiectarea, realizarea și testarea unor standuri de încercări pentru materiale cu memoria formei

3.1 Noțiuni generale	53	21
3.2 Proiectarea standului de încercări	54	21
3.3 Realizarea experimentală a standului de încercări	54	-
3.4 Testarea materialelor inteligente	55	22
3.4.1 Testarea elementelor din material cu memoria formei - Varianta 1	55	22
3.4.2 Testarea elementelor din material inteligent - Varianta 2	57	-
3.5 Testarea rezistenței la oboseala a elementelor active din nitinol	61	24
3.5.1 Realizarea aplicației practice	61	24
3.5.2 Determinări experimentale și analiza datelor	63	24
3.6 Concluzii	67	26

Capitolul 4

Contribuții experimentale cu privire la sisteme de control pentru fluide

4.1 Noțiuni generale	69	27
4.2 Proiectarea, realizarea și testarea unui picurător acționat cu materiale inteligente	70	27
4.2.1 Proiectarea picurătorului acționat cu Ni-Ti.....	70	27
4.2.2 Realizarea picurătorului acționat cu Ni-Ti	71	28
4.2.3 Testarea prototipului experimental realizat în laborator	72	-
4.3 Proiectarea, realizarea și testarea unei micropompe acționată cu materiale cu memoria formei	76	29
4.3.1 Descrierea și realizarea prototipului experimental	76	29
4.3.2 Prezentarea datelor experimentale ale micropompei	78	31
4.4 Concluzii	82	32

Capitolul 5

Proiectarea, realizarea și testarea unui sistem de zăvorâre cu nitinol	83	33
5.1 Introducere	83	33
5.2 Proiectarea și descrierea sistemului de zăvorâre	83	33
5.3 Determinarea și analiza datelor experimentale	86	-
5.4 Modelarea în comsol multiphysics a elementului activ din nitinol	90	35
5.4.1 Realizarea modelului 3D a arcului din ninitol în programul de simulare Cmsol Mulipysics	91	35
5.5 Determinarea răspunsului indicial al arcului din nitinol	94	36
5.5.1 Considerații teoretice privind determinarea răspunsului indicial	94	-
5.5.2 Determinarea răspunsului indicial în cazul arcului din nitinol	96	36
5.6 Concluzii	98	38

Capitolul 6

Contribuții privind proiectarea, realizarea și testarea unei termocuple tip ambreiaj	99	39
6.1 Noțiuni generale	99	39
6.2 Proiectarea termocuplei tip ambreiaj	100	39
6.3 Realizarea termocuplei tip ambreiaj	101	40
6.3.1 Testarea experimentală a termocuplei tip ambreiaj	102	41
6.4 Concluzii	104	42

Capitolul 7

Concluzii generale	107	44
7.1 Contribuțiile teoretice ale lucrării	107	44
7.2 Contribuțiile experimentale ale lucrării	108	45
7.3 Direcții ulterioare de cercetare	110	47
Referințe bibliografice	111	48
Anexe	121	-

INTRODUCERE

[19], [33], [94], [97]

Se poate afirma cu certitudine că istoria aliajelor cu memoria formei (AMF) a început în urmă cu peste 60 de ani [33]. Nu a fost vorba despre descoperirea și prezentarea efectelor de memorie, ci a unei caracteristici legate de acestea, care este valabilă numai pentru o parte din aliajele cu memoria formei. „Aliajul lui Olander” (Au-Cd) a fost prezentat oficial în 1932 cu prilejul unei întruniri la Swedish Metallographic Society, ca o ciudățenie oarecare, la temperatura camerei, avea o elasticitate cu totul ieșită din comun de aproximativ 8%. Această trăsătură este tocmai caracteristica de mai sus, pe care Olander a numit-o „comportare tip cauciuc”. Astfel, aliajul Au-Cd a devenit primul aliaj cu memoria formei, însă studiul mai detaliat al proprietăților sale mecanice deosebite a fost efectuat abia în 1951 [19]. Începând cu deceniul al VI-lea, lista aliajelor cu memoria formei a început să crească vertiginos și acestea fiind următoarele [19]:

- 1953: In-Ti (M. W. Burkart și T. A. Read);
- 1956: Cu-Zn (E. J. Suoninen și alții);
- 1957: Cu-Al-Ni (C. W. Chen);
- 1963: Ni-Ti (W. J. Buehler și alții);
- 1970: Cu-Zn-Al (K. Otsuka și K. Shimizu);
U-Nb (J. N. Pridgeon);
- 1971: Ti-Nb (Baker);
Au-Cu-Zn (N. Nakanishi și alții);
Ni-Al (K. Enami și S. Nenno);
Fe-Pt (C. M. Wayman);
- 1972: Cu-Zn-Sn (J. D. Eisenwasser și L. C. Brown);
Cu-Zn-Si (D. V. Wield și E. Billam);
- 1973: Ag-Cd (R. V. Krishnan și L. C. Brown);
Cu-Sn (I. A. Arguzova);
- 1974: Cu-Zn-Ga (T. Saburi și S. Nenno);
- 1982: Ti-Pd-Ni (A. I. Lotkov și alții).

La această listă care conține doar aliaje cu memoria formei mai intens studiate, se adaugă oțelurile cu memoria formei cum ar fi [4]:

- Fe-Mn-Cr (V. V. P. Kutumbarao și P. Romarao) în 1972;
- Fe-Mn-Si (A. Sato și alții) în 1984;
- Fe-Ni-C (S. Kajiwarra și T. Kikuchi) în 1990;
- Fe-Co-Ni-Ti (V. V. Kokorin și G. E. Monastyrsky) în 1993;
- Fe-Ni-Nb (Yu. N. Koval) în 1993.

Trebuie remarcat că, chiar dacă fenomenele de memorie a formei sunt studiate la nivel fundamental de peste șase decenii, termenul de „efect de memorie a formei” a fost introdus prin anul 1965. Tot în acel an s-au prezentat primele observații asupra *transformării de fază R* din aliajul Ni-Ti. Alte efecte caracteristice care apar la AMF sunt: efectul de pseudo-elasticitate sau

superelasticitate, studiat încă de la primele observații asupra aliajelor cu memoria formei și efectul de memorie a formei în dublu sens, descris în 1975 la primul simpozion internațional asupra efectelor și aplicațiilor memoriei formei [19], [97].

Dezvoltarea cercetării fundamentale a aliajelor cu memoria formei a fost inițial susținută numai de efectele lor spectaculoase, fără a avea o priză deosebită în industrie. Cercetătorii au ezitat să-și prezinte realizările, una dintre primele aplicații arătată marelui public fiind un dispozitiv ciclic de ridicare, construit pe baza unui monocristal de Au-Cd de D.S. Lieberman în 1957 și expus la Târgul Internațional de la Brussels în 1958 [19].

Interesul asupra fenomenelor de memorie a formei, care după treizeci de ani de la prima comunicare publică, păreau să fi intrat într-un impas, a crescut în mod vertiginos, începând cu 1963 când a fost descoperit Ni-Ti la Naval Ordnance Laboratory (NiTiNOL). *Nitinolul* avea o serie de caracteristici cu totul deosebite, chiar și în comparație cu alte aliaje cu memoria formei. Din acel moment, cercetarea fundamentală s-a intensificat încercând să găsească o explicație pentru comportarea cu totul aparte a nitinolului. Concomitent cu acesta, au apărut un număr tot mai mare de brevete de invenție bazate pe aliaje cu memoria formei, recordul fiind deținut în deceniul al IX-lea, când media brevetelor de invenție la nivel mondial, a fost de două pe zi [19], [94].

Multă vreme, din cauza unor rețineri pe care o manifestau metalurgii practicieni și odată cu ei și marile grupuri industriale față de introducerea în industrie a aliajelor cu memoria formei, acestea au fost considerate ca „o soluție care își caută problema” [19]. Problemele au început să apară pe măsură ce aliajele au devenit tot mai cunoscute, prin organizarea de simpozioane și conferințe internaționale, începând cu 1975, cum ar fi cele din: Guilin, China în 1986; Michigan State University, U.S.A. în 1988 și Barcelona, Spania în 1989. Din acele vremuri, se puseseră deja bazele proiectării anumitor elemente și dispozitive cu memoria formei iar cifra totală de afaceri bazate pe aliajele cu memoria formei se situa la 30 de milioane de dolari la nivel mondial, anticipându-se o creștere de 25% pe an [19].

Piața mondială a materialelor inteligente depășește 1 miliard USD anual dintre care 75% reprezintă materialele electrostrictive și piezoelectrice, câte 10% materialele cu memoria formei și cele magnetostrictive și restul de 5% materialele electro-reologice și magneto-reologice.

Lista aliajelor cu memoria formei (AMF) este impresionantă însă de uz comercial au devenit numai aliajele pe bază de Ni-Ti, Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni și Fe-Mn-Si. Domeniile și aplicațiile în care sunt utilizate materialele inteligente în prezent sunt numeroase: micromotoare, robotică, medicină (chirurgie – filtre și organe artificiale; ortopedie – implanturi; oftalmologie etc.), protecții la supracurent etc. Cele mai importante fenomene de memoria formei sunt: efectul pseudoelastic sau pseudoelasticitatea (PSE), efectul simplu de memoria formei (EMF), efectul de memoria formei în dublu sens (EMFDS) și efectul de amortizare a vibrațiilor (EAV).

Aplicațiile bazate pe memoria termică pot fi cu revenire liberă (medicină, inginerie – heliotrop autonom etc.), cu revenire reținută (cuplaje hidro-pneumatice, conectori electrici, dispozitive de fixare și aplicații spațiale) sau generatoare de lucru mecanic. Aplicațiile generatoare de lucru mecanic sunt utilizate preponderent în construcția dispozitivelor de acționare (actuatori), a senzorilor și a motoarelor termice. În funcție de modul în care este furnizată energia care se transformă în lucru mecanic, actuatorii pot fi termici sau electrici.

Cele mai cunoscute exemple de utilizare a actuatorilor termici cu memoria formei sunt: protecția împotriva incendiilor prin detecția unei temperaturi prestabilite (prin variația rezistivității), controlul temperaturii în instalațiile frigorifice, protecția termică a filtrelor de apă,

controlul aburului în instalațiile de încălzire etc. Actuatorii electrice cu memoria formei au doar funcția de a efectua lucru mecanic. În aplicații, ei înlocuiesc cu succes actuatorii convenționali, cum ar fi solenoizii electromagnetici, servomotoarele și motoarele electrice, pneumatice, sau hidraulice cărora le sunt superiori în ceea ce privește compactitatea, funcționarea mai silențioasă, simplitatea constructivă. Pe lângă robotică, unde s-au realizat cele mai reușite aplicații ale actuatorilor electrice cu memoria formei (micromanipulatoarele, crabi robotici submarini), aceștia au mai fost introduși și în alte domenii: industria de automobile, protecția circuitelor electrice la supraîncălzire, controlul proporțional etc.

Actuatorii cu memoria formei reprezintă o alternativă interesantă pentru înlocuirea actuatorilor convenționali. Avantajele lor creează un bun motiv pentru a reduce mărimea, greutatea și complexitatea sistemelor robotice. De asemenea, actuatorii cu memoria formei sunt deosebit de compacți și simpli iar raportul greutate – forță este remarcabil. Un avantaj demn de remarcat este și silențiozitatea de care dau dovadă în timpul funcționării.

Pe lângă toate aceste avantaje care îi recomandă în numeroase aplicații, există totuși și câteva dezavantaje printre care se numără și randamentul scăzut cu precizarea că, un actuator cu memoria formei reprezintă în fapt un motor termic unde materialul utilizat transformă energia termică în lucru mecanic. Un alt dezavantaj este reprezentat de elasticitatea relativ redusă (8,5 %) fapt care îi reduce semnificativ aria de utilizare. Un dezavantaj discutat frecvent în literatura de specialitate se referă și la dificultatea de a controla acești actuatori cu memoria formei datorită faptului că efectul de memoria formei reprezintă un fenomen cu o caracteristică puternic neliniară. O altă problemă în controlul materialelor cu memoria formei este justificată prin faptul că transformările care apar în structura internă a acestora se petrec la temperaturi apropiate de cele ale mediului ambiant. Nu în ultimul rând, ciclul de funcționare este destul de lent și direct dependent de modul cum se realizează transferul de căldură către material de la sursa caldă respectiv sursa rece. Însă principalul parametru care afectează ciclul de funcționare este temperatura mediului ambiant la care funcționează actuatorul. Funcție de condițiile de lucru ale actuatorului, disiparea căldurii poate fi considerată o problemă la un moment dat.

Teza de doctorat *„Contribuții teoretice și experimentale privind realizarea unor actuatore și motoare speciale folosind materiale cu memoria formei”* reprezintă un studiu ce continuă preocupările în domeniul materialelor inteligente realizate de colective din cadrul Centrului de Cercetare în Mașini, Aparate și Acționări Electrice (EMAD) de la Universitatea „Ștefan cel Mare” din Suceava.

Lucrarea este structurată pe șapte capitole, însoțite de introducere, o notă cu referințe bibliografice și anexele în care sunt prezentate elementele în detaliu în legătură cu comportarea materialelor cu memoria formei.

Capitolul 1 *„Materiale inteligente. Caracteristici”* oferă detalii cu privire la proprietățile materialelor inteligente ce se găsesc pe piață și tipurile de aliaje ce reacționează în diferite moduri fie sub influența temperaturii, fie controlate electric, dar și modul de obținere ale acestor aliaje. De asemenea, sunt prezentate caracteristicile și clasificările acestora. Este o sinteză bazată pe cele mai populare referințe bibliografice de specialitate.

Capitolul 2 *„Stadiul actual pe plan mondial în domeniul actualelor și mașinilor speciale ce folosesc materiale inteligente”* are la bază un studiu bibliografic ce oferă detalii cu privire la primele aplicații dezvoltate odată cu descoperirea aliajului cu memoria formei, tipuri de actuatore utilizate în diferite domenii și motoare termice ce utilizează elemente active din

nitinol, unele fiind dezvoltate în cadrul Centrului de Cercetare și Dezvoltare EMAD al USV.

Capitolul 3 „*Proiectarea, realizarea și testarea unor standuri de încercări pentru materiale cu memoria formei*”, prezintă standuri de încercări realizate în laborator pentru aliaje cu memoria formei, memorate în diverse forme și dimensiuni, utilizate pentru determinarea comportării acestora sub influența temperaturii și a curentului electric, acestea fiind evidențiate prin caracteristicile ridicate în urma experimentelor și studiilor realizate. Aceste standuri au fost proiectate, realizate și evaluate experimental în cadrul laboratoarelor Universității din Suceava.

Capitolul 4 „*Contribuții experimentale cu privire la sisteme de control pentru fluide*”, conține noțiuni generale cu privire la elementele din aliaj cu memoria formei utilizate și descrierea a două standuri de control pentru fluide în care sunt utilizate elementele din nitinol sub formă de resort, controlate prin intermediul curentului electric, ce vor acționa asupra unor elemente destinate să dozeze lichide sau pentru crearea presiunii pozitive sau negative. Acestea au fost proiectate, realizate și testate în cadrul Laboratorului de inventică și transfer tehnologic al universității.

Capitolul 5, intitulat „*Proiectarea, realizarea și testarea unui sistem de zăvorâre cu nitinol*”, prezintă principul de funcționare al nitinolului cu rolul de a acționa un sistem de blocare, utilizat în special în industria automobilelor. Aici s-a realizat un studiu cu privire la un model matematic al elementului din nitinol dar și o comparație a comportării într-un mediu de simulare Comsol Multiphysics, rezultatele obținute în urma simulării și cele obținute experimental fiind similare.

În capitolul 6 „*Contribuții privind proiectarea, realizarea și testarea unei termocuple tip ambreiaj*”, s-a proiectat, realizat și testat o aplicație cu elemente din nitinol sub formă de sârmă, ce are rolul de a realiza cuplarea sau decuplarea a două sisteme rotative, cuplajul fiind dependent de temperatură. Aplicația a fost dezvoltată în cadrul Laboratorului de inventică și transfer tehnologic al Centrului integrat de cercetare, dezvoltare și inovare pentru Materiale Avansate, Nanotehnologii și Sisteme Distribuite de fabricație și control MANSID al USV.

Capitolul 7 prezintă concluziile generale și contribuțiile teoretice și experimentale cu privire la aplicațiile dezvoltate în cadrul lucrării, precum și sugestii pentru direcțiile viitoare de cercetare.

Teza de doctorat are în componență o bibliografie cu 171 de poziții dintre care 35 sunt publicații pe parcursul dezvoltării tezei de către colectivul de cercetare din care autorul a făcut parte.

Capitolul 1

MATERIALE INTELIGENTE. CARACTERISTICI

[5], [15], [16], [19], [21], [29], [35], [38], [40], [41], [50], [52], [59], [60], [62], [63], [84], [85],
[102], [109], [113], [132], [133], [134]

1.1 NOȚIUNI GENERALE PRIVIND MATERIALELE INTELIGENTE

Materialele inteligente fac parte din gama de vârf ce constituie descoperirile în știința materialelor, a aplicațiilor tehnice, sistemelor biomecanice precum și a celor de infrastructură și multe altele [5], [15], [16], [85].

Aliajele cu memoria formei constituie o parte din grupa materialelor inteligente ce au capacitatea de a răspunde la o serie de stimuli externi. Capacitatea aceasta constă în modificarea proprietăților sub acțiunea stimulului extern sau modificarea formei și revenirea acestuia la forma inițială după încetarea acțiunii stimulului. Modificarea formei cauzată de schimbarea temperaturii poartă denumirea de efect de memorie a formei indus termic.

Denumirea de aliaje cu memoria formei definește un set de materiale care au abilitatea de a reveni la forme predefinite atunci când este aplicată o anumită procedură termică. Materialele care își schimbă forma doar la temperaturi ridicate sunt cu efect de memorie într-un singur sens, denumit EMF (efect de memoria a formei). Sunt și materiale ce își pot schimba forma și la temperaturi joase prin efect EMFDS (efect de memorie în dublu sens) [15], [16].

Materialul „vedetă” cu memoria formei este incontestabil aliajul Ni-Ti (nitinol), numit după locul în care a fost descoperit Naval Ordnance Laboratory. Acest aliaj prezintă în stare policristalină o serie de caracteristici excelente legate de fenomenele de memoria formei precum capacitatea de înmagazinare a energiei elastice la încălzirea izotermă (42 MJ/m^3) sau deformățiile care pot fi recuperate în cadrul memoriei mecanice (10%) sau termice (8%) [16].

1.2 CLASIFICAREA MATERIALELOR INTELIGENTE

Aliajele cu memoria formei sau materialele inteligente se pot clasifica după mai multe criterii. Un criteriu dintre acestea îl reprezintă elementul de bază al acestor aliaje [15], [60].

Un criteriu de clasificare al materialelor inteligente poate fi:

- aliaje ale metalelor neferoase;
- aliaje ale metalelor feroase.

Un alt criteriu de clasificare este reprezentat de costul acestor materiale:

- aliaje exotice: In-Ti, Cu-Zn-Ga, etc.;
- aliaje prețioase care au în compoziție: Au, Ag, Pt, Pd, etc.;
- aliaje cu fier: Fe-Pt, Fe-Ni, Fe-Mn, Fe-Mn-Si, Fe-Ni-Ti-Co, etc.;
- aliaje cu cupru: Cu-Al, Cu-Zn, Cu-Mn-Al, etc.

1.4 HISTEREZISUL TERMIC DE TRANSFORMARE ȘI STRUCTURA CRISTALINĂ

Ciclul de răcire / încălzire reprezintă histerezisul termic de transformare a Ni-Ti. Diferența de temperatură dintre cele două faze, austenită respectiv martensită, se datorează compoziției celor două metale și preciziei de prelucrare. Valoarea sa tipică este de aproximativ $(20 \div 50) ^\circ\text{C}$. În urma procesului de răcire, transformarea martensitică debutează la temperatura M_s (start martensită) și devine completă la temperatura M_f (final martensită). Primele cristale de austenită își fac apariția la A_s (start austenită), transformarea totală a structurii materialului având loc la temperatura A_f (final austenită).

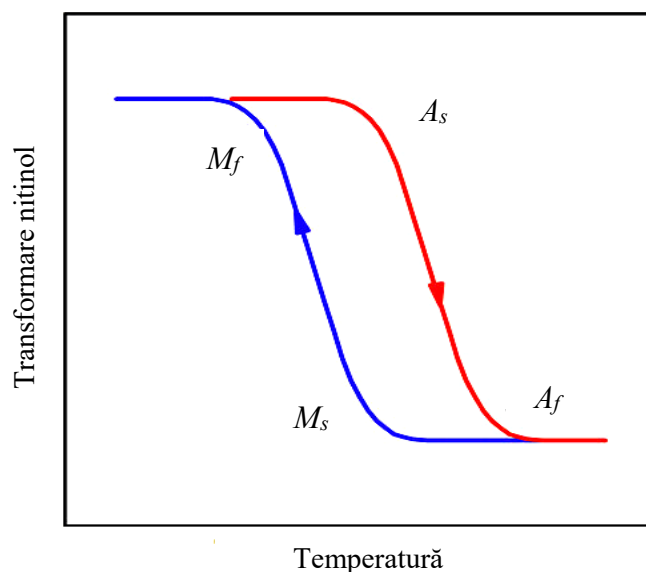


Fig. 1.3 Histerezis termic de transformare [59]

Transformările de fază nu au loc la o singură temperatură, ci într-un interval de temperaturi. În timp ce gama totală între începutul și finalul de transformare poate fi destul de mare, cele mai multe schimbări de fază se întâmplă într-o gamă mult mai restrânsă.

Prin răcire, are loc transformarea austenitei în martensită, materialul fiind din nou deformabil. Rețeaua cubică se „relaxează” la forma romboidală, specifică fazei martensitice, prin procesul de maclare [59].

1.6 COMPORTAREA TERMOMECHANICĂ A MARTENSITELOR TERMOELASTICE

1.6.1 Pseudoelasticitatea

Pseudoelasticitatea (PSE) poate fi considerată ca orice neliniaritate de pe curba tensiune – deformare în timpul descărcării. În funcție de procentul prin care se produce, pseudoelasticitatea poate fi de maclare sau de transformare [19].

Pseudoelasticitate de maclare

Acest tip de PSE apare la materialele metalice care se deformează prin maclare. Spre

deosebire de revenirea elastică normală de la descărcare, PSE de maclare se manifestă prin revenire elastică suplimentară de cca. 0,8%.

Termenul general sub care se întâlnește pseudoelasticitatea de maclare este *pseudo-maclare*. Trebuie reținut că un AMF pseudomaculat își pierde revenirea suplimentară, dacă este menținut în stare deformată datorită reordonării pseudomaclelor care sunt aduse în poziții mai stabile.

Pseudoelasticitatea de transformare

Denumită de cele mai multe ori „superelasticitate” PSE de transformare se datorează unei transformări martensitice induse prin tensiune și nu se poate produce la temperaturi superioare punctului critic M_d .

1.6.3 Efect simplu de memorie a formei la Ni-Ti

Nitinolul este pe departe cel mai reprezentativ aliaj cu memoria formei, caracterizat prin cea mai bună combinație a proprietăților de material în aplicațiile comerciale. Cea mai utilizată formă, sub care se găsește nitinolul comercial este de sârmă, cu diametre diferite, având compoziții ce oscilează în jurul concentrației echiatomice [133].

Din cauza înaltei reactivități a Ti, în special în stare topită, Nitinolul conține oxigen. Din acest motiv, pe lângă soluția solidă pe bază de NiTi (α – martensită sau β – austenită), în microstructura nitinolului apar în mod invariabil oxizi. Oxizii au o puternică influență asupra comportării aliajului. În primul rând, datorită stratului aderent și pasiv pe care îl formează la suprafața aliajului, oxizii, în special cel de Ti_4Ni_2O , imprimă o foarte ridicată rezistență la coroziune. În al doilea rând, oxigenul poate fi dizolvat interstițial fapt ce duce la apariția unor suprafețe ale așa numitului „suboxid”. Prezența suboxidului, ca rezultat al reactivității Ti în topitură sau al contaminării probelor, în urma încălzirii la temperatura de peste 200 °C, împreună cu cea a hidrogenului, sunt cauzele care duc la apariția unei variații anormale a rezistivității electrice, în funcție de temperatură, în domeniul premartensitic.

Cercetările au demonstrat că nu este vorba despre un efect premartensitic și nici într-un caz de o transformare de fază R.

1.6.5 Efectul de memorie a formei în dublu sens la Nitinol

La fel ca și PSE și EMF, EMFDS la aliajul NiTi reprezintă un exemplu de referință al comportamentului de memorie a formei. Din acest motiv, memoria dublă a nitinolului este prezentată de fiecare dată când se dorește exemplificarea EMFDS.

Ceea ce trebuie reținut, în legătură cu EMFDS, este că cele două forme *memorate* și reproduse spontan prin *educare*, nu sunt forma caldă și cea rece ci două forme „intermediare”. Una din condițiile obținerii unui EMFDS stabil și eficient, reprezintă creșterea numărului de cicluri de educare. Odată cu creșterea numărului de cicluri N se observă mai multe tendințe [113]:

1. temperatura M_s se deplasează spre valori mai ridicate (cca 20 °C după 100 cicluri);
2. alungirea totală crește cu aproximativ 0,25 % după 100 cicluri;
3. temperatura A_s crește foarte puțin (3 °C după 100 cicluri);
4. se obține o deformare permanentă cumulată ε_p tot mai mare și o deformare recuperabilă ε_{rec} tot mai mică.

Așadar, după 100 cicluri, se poate observa reducerea histerezisului termic, concomitent cu stabilizarea buclei de transformare. Dacă ciclajul termic se aplică în absența tensiunii, la probe apare o tendință de reducere a temperaturilor de transformare. Explicația acestor fenomene se bazează pe distribuția câmpurilor de tensiuni ale dislocațiilor produse prin cablaj termic. Ciclajul sub sarcină produce o rearanjare a configurației de dislocații, formate sub efectul tensiunii [85].

Prin ciclaj termic, câmpurile de tensiuni sunt relaxate, densitatea dislocațiilor nu mai crește iar transformarea martensitică este ușurată și se poate produce la o temperatură din ce în ce mai ridicată [85].

Un alt rol deosebit în obținerea EMFDS îl joacă metoda de educare. Deși metodele de educare sunt numeroase, s-au prezentat doar patru dintre procedurile principale de educare la care sarcina a fost aplicată în domeniul austenitic și menținută până la răcire sau a fost aplicată numai după efectuarea răcirii. Revenirea se poate realiza fie sub tensiune fie în absența acesteia.

1.7 CONCLUZII

1. Aliajele cu memoria formei fac parte din latura materialelor inteligente și au capacitatea de a-și modifica proprietățile fizice sub acțiunea unor stimuli și totodată își pot modifica forma sau pot reveni la starea inițială după încetarea acțiunii stimulului.

2. În general, forma și proprietățile aliajelor cu memoria formei sunt puternic influențate de temperatură, temperatura de transformare fiind mică sau mai mare. *Temperatura de transformare* reprezintă o valoare a temperaturii pe care aliajul o capătă în funcție de compoziția chimică a metalelor componente.

3. Există multe aliaje ce au ca proprietate efectul de memorie a formei dar cel mai folosit rămâne Nitinolul datorita prețului dar și a multiplelor avantaje ce decurg din caracteristicile sale.

4. Aliajul cu memoria formei studiat în lucrare, este compus din Nichel și Titan, denumit Nitinol, are compoziția chimică de $(49 \div 51) \% \text{ Ni}$, restul fiind Ti și un domeniu al temperaturilor de transformare cuprins între -50°C și 110°C . În funcție de temperatura de transformare necesară, se stabilesc procente de aliere ale metalelor la care se mai pot atribui și alte metale în compoziție foarte mică pentru a crește rezistența la coroziune, stabilitatea punctelor critice, ductilitatea, etc.

5. Nitinolul are proprietăți mult deosebite față de alte materiale metalice obișnuite. Dintre acestea, se poate menționa capacitatea de a-și schimba forma geometrică la trecerea de la o temperatură scăzută la una ridicată. În anumite condiții, schimbarea de formă poate fi reversibilă, astfel încât aliajul poate memora două forme geometrice respectiv o formă la cald și o altă formă la temperatura joasă, sub pragul temperaturii de transformare.

6. În funcție de comportarea termodinamică a aliajelor cu memoria formei acestea pot fi pseudoelastice (PSE), cu efect simplu de memorie a formei (EMF) și cu efect dublu de memorie a formei (EMFDS).

7. Efectul de memorie în dublu sens, fiind în general cel mai utilizat, presupune efectuarea unui număr de peste 100 de cicluri de educare a elementului utilizat, fapt ce duce la un efect de memorie stabil și contribuie la reducerea histerezisului termic.

Capitolul 2

STADIUL ACTUAL PE PLAN MONDIAL ÎN DOMENIUL ACTUATOARELOR ȘI MAȘINILOR SPECIALE CE FOLOSESC MATERIALE INTELIGENTE

[5], [12], [14], [16], [19], [27], [31], [32], [39], [66], [82], [91], [96], [98], [103], [105], [112],
[115], [122], [124], [125], [127], [128], [140], [141], [151]

2.1 INTRODUCERE

Actuatorii și aplicațiile realizate cu materiale inteligente au în structură unul sau mai multe elemente active, cu deformație limitată și controlată, determinată de manifestarea efectului de memorare a formei.

Domeniile și aplicațiile în care sunt utilizate materialele inteligente în prezent sunt numeroase: micromotoare, robotică, medicină (chirurgie - filtre și organe artificiale, ortopedie - implanturi, oftalmologie etc.), protecții la supracurent etc.

În cele ce urmează, sunt prezentate câteva aplicații, modele de actuatoare și motoare termice ce folosesc ca element de acționare aliaje NiTi, pe care le regăsim astăzi în câteva modele de jucării și diferite aplicații [32], [82], [96], [105], [115], [127].

2.2 PRIMELE APLICAȚII ALE ALIAJELOR CU MEMORIA FORMEI

Aplicațiile cu aliaje cu memoria formei (AMF) au apărut prin anii '70, odată cu descoperirea nitinolului. În funcție de rolul pe care îl joacă, aplicațiile aliajelor cu memoria formei se împart în patru categorii importante și anume [19]:

- cu revenire liberă;
- cu revenire reținută;
- cu producere de lucru mecanic (actuatori);
- cu pseudoelasticitate.

2.2.1 Cuplaje realizate din aliaje cu memoria formei

Dintre cuplajele electrice sunt exemplificate două variante și anume Cryotact și Cryocon [27]. Acestea se caracterizează prin forța de conectare zero, în poziția deschis și prin generarea unor forțe mari de reținere, în timpul cuplării. Cuplajul conține o fișă dintr-un material conducător electric, o mufă dintr-un material elastic care are rolul de a deforma inelul din Ni-Ti, atunci când acesta este în stare martensitică. În timpul răcirii inelului din Ni-Ti, acesta este expandat de mufa elastică care, la această temperatură, este mai rigidă decât inelul. În acest caz, fișa poate fi introdusă foarte ușor fără a fi nevoie de forță exterioară.

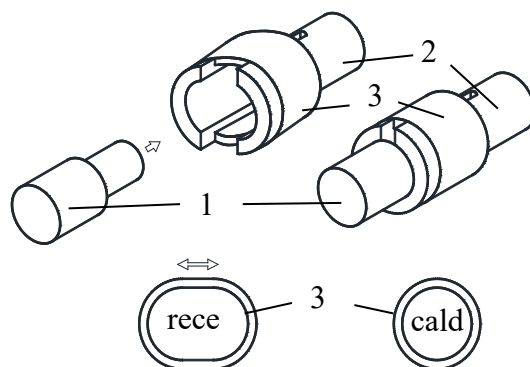


Fig. 2.2 Schema unui cuplaj electric de tip Cryocon [19]

1 - fișă; 2 - mufă; 3 - inel din Ni-Ti

La încălzire, mufa este strânsă puternic de către inel și la rândul ei, strânge puternic fișa. Lamellele de contact sunt încovoiate spre interior, astfel încât fișa să intre forțat, deformând elastic lamellele, stabilitatea contactului depinzând de acțiunea elastică a lamellelor [19], [27].

2.3 TIPURI DE ACTUATOARE CU NITINOL ÎNTÂLNITE ÎN APLICAȚII

2.3.1 Supapă de control cu Ni-Ti prin efect de memorare a formei

În figura 2.10 sunt surprinse două stadii din evoluția unei supape de control termice al presiunii uleiului. În poziția închis, uleiul nu este parcurs prin corpul supapei, deoarece este oprit de un piston care îi blochează calea, fiind împins de arcul de oțel, comprimând astfel arcul din Ni-Ti. Arcul de Ni-Ti are rol de activator termic. Situația este caracteristică temperaturilor joase ale uleiului, când acesta are vâscozitate mare și presiune mică, arcul fiind în stare martensitică, fiind mai moale decât resortul din oțel [16].

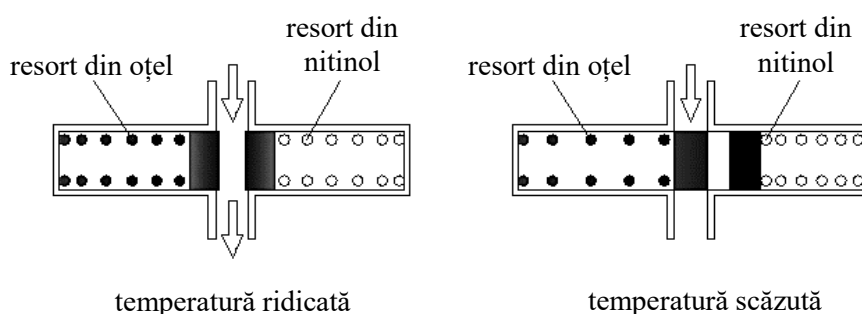


Fig. 2.10 Supapă de control prin efect de memorie a formei (reprodus după [16])

Când temperatura uleiului din transmisia automată crește, acesta fiind în mișcare, arcul din Ni-Ti devine austenitic, fiind mai rigid decât resortul din oțel, efectuând lucru mecanic, împingând pistonul spre stânga supapa trece în poziția deschis, permițând circulația uleiului și totodată scăderea presiunii.

2.4 TIPURI DE MOTOARE CU NITINOL ÎNTÂLNITE ÎN LITERATURA DE BREVETE

Literatura de brevete, lucrările științifice și tezele de doctorat din domeniul motoarelor și actuatorelor cu memoria formei, evidențiază următoarea clasificare:

- motoare cu buclă și bandă din nitinol [103], [105], [124], [151];
- motoare cu nitinol sincronizate [105], [122], [124], [125], [128];
- motoare cu nitinol nesincronizate [122], [123], [124], [125];
- motoare cu nitinol gravitaționale [31], [123], [141] .

2.5 STADIUL ACTUAL AL APLICAȚIILOR CE FOLOSESC MATERIALE INTELIGENTE REALIZATE ÎN CADRUL CENTRULUI DE CERCETARE EMAD

2.5.3 Motor termic cu rotor excentric cu Ni-Ti - varianta 1

Motorul realizat are la bază principiul unui concept brevetat, construit în '73, la Lawrence Berkeley Laboratory.

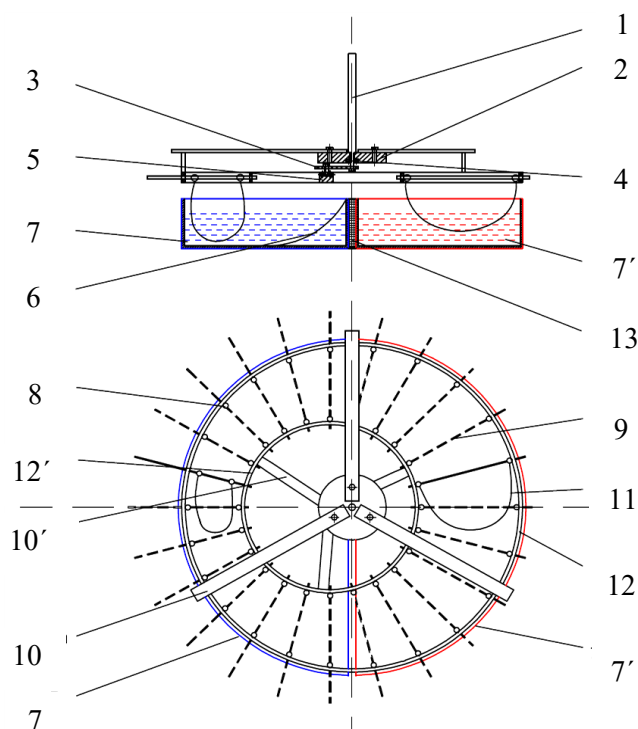


Fig. 2.27 Motor termic cu rotor excentric cu NiTi, secțiune transversală (reprodus după [140])

1 - ax central fix; 2 - piesă centrală de susținere; 3 - piesă excentrică; 4 - lagăr de alunecare;
5 - piesă excentrică de susținere; 6 - rampă; 7, 7' - bazine cu apă; 8 - elemente de prindere a firelor de NiTi; 9 - spițe; 10, 10' - bare de susținere; 11 - fir de NiTi; 12, 12' - inele; 13 - material termoizolant

În cadrul motorului s-au folosit ca elemente de acționare fire din nitinol, cu un diametru de 2 mm și o lungime de 240 mm, având o compoziție de 50% Nichel și 50% Titan, și care este memorat în dublu sens în formă de U. Temperatura de transformare a aliajului este de 65 °C [140]. Rotorul este constituit din cele două inele, unul fiind central 12, cu un diametru de 400

mm, iar celălalt fiind excentric 12', cu diametrul de 240 mm, în care sunt dispuse 24 de elemente (spițe) de orientare a firelor de NiTi. De axul vertical fix 1, este prinsă piesa excentrică 3 în care se rotește piesa 5 împreună cu inelul excentric 12', acesta, la rândul lui fiind prins de barele de susținere 10'.

Statorul este format din cele două bazine, apă rece 7, respectiv apă caldă 7', având un diametru de 440 mm și o înălțime de 100 mm. Între cele două bazine, se găsește un element izolator 13, care are rolul de a împiedica transferul de căldură dintre cele două bazine.

Rotorul, fiind scufundat în cele două bazine, tinde să se rotească datorită extinderii firelor de NiTi în apă fierbinte, respectiv, contractării lor în apă rece. Firele de NiTi, din bazinul cu apă caldă descompune forța într-o componentă normală și una tangențială, care sub efectul acesteia va începe să se rotească. În timpul rotirii, elementele de orientare (spițele) suferă o mișcare rectilinie alternativă față de inele, mecanismul fiind reglat astfel încât distanța dintre inelul excentric și inelul central să crească, atunci când firele de Nitinol sunt scufundate în apă. Astfel rotorul se va învârti fără oprire, atât timp cât se păstrează o diferență de temperatură cât mai mare a apei reci, respectiv a apei calde [140].



Fig. 2.28 Motor termic cu rotor excentric cu Ni-Ti realizat în cadrul Centrului EMAD [140]

2.5.4 Motor termic cu rotor excentric cu Ni-Ti - varianta 2

În cadrul motorului - varianta a doua, s-au folosit ca elemente de acționare un număr de 60 de arcuri din material cu memoria formei, din Ni-Ti, dispuse radial între cele două inele de diametre diferite. Ele se găsesc în număr de 3 pe fiecare element de susținere (distanțiere) fiind împărțit în 20 de astfel de elemente pe fiecare inel.

Rotorul este constituit din două piese separate, o piesă reprezentând ansamblul celor două inele cu diametru mare aflate la o anumită distanță unul față de altul cu ajutorul distanțierelor, a doua piesă fiind ansamblul inelelor cu diametrul mai mic, distanțate cu ajutorul elementelor de distanțare. Între ansamblul celor doua inele cu diametre diferite se găsesc arcurile din nitinol care fac legătura dintre ele. Dimensiunile rotorului sunt de 240 mm în diametru și 120 mm lățime [141].

În figura 2.30 ansamblul rotor 10 fiind fixat pe suportul 15, este scufundat, în partea inferioară, în apă fierbinte din bazinul 11 care are și rol de stator. Apa este încălzită peste temperatura de tranziție a elementelor de acționare din NiTi cu ajutorul unui încălzitor 14. Acesta este legat la un regulator de temperatură 13, care are rolul de a menține constantă temperatura din bazin prin prescrierea unei temperaturi constante. Rotorul fiind compus din cele

două ansambluri de inele cu centre diferite va tinde să se rotească datorită modificării formei elementelor din Nitinol.



Fig. 2.29 Stand experimental. Prototip motor cu nitinol (reprodus după [141])

1- inele de diametru mare; 2- inele de diametru mic; 3- arcuri din NiTi; 4- distanțiere;
5- bare de susținere; 6- lagăr mare; 7- lagăr mic; 8- ax principal; 9- elemente de fixare.

Pentru a putea fi verificat principiul de funcționare, rotorul este scufundat într-un bazin cu apă fierbinte, peste temperatura de tranziție a arcurilor din Nitinol, răcirea acestora fiind forțată de un ventilator.

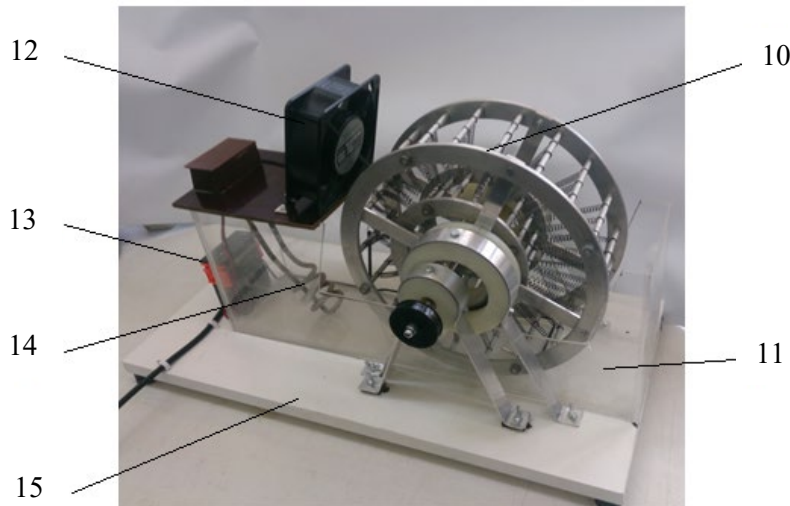


Fig. 2.30 Motor cu nitinol cu excentric (reprodus după [141])

10- rotor; 11- bazin cu apă fierbinte; 12- ventilator racire aer;
13- regulator de temperatură; 14- încălzitor apă; 15- suport.

În apa fierbinte, arcurile vor tinde să se revină la forma inițială (strângă), memorată, acționând cu o forță destul de mare, forță ce va tinde să elimine distanța excentrică dintre cele două ansambluri de inele. Astfel, arcurile ce se află în partea inferioară, scufundate în apa fierbinte vor acționa cu aceeași forță, care la rândul ei se va descompune în alte forțe dezvoltate de acțiunea arcurilor din Nitinol, fapt ce va conduce la rotirea rotorului.

Pentru ca rotația să fie cât mai constantă, este nevoie ca la partea superioară, arcurile din material cu memoria formei să fie răcite cu ajutorul unui ventilator. Prin răcire acestea

devin mai puțin tensionate, mai exact nu vor opune forță de rezistență arcurilor aflate în apa fierbinte. Pentru a crește performanțele motorului este nevoie ca diferența dintre temperaturile ce încălzesc, respectiv, răcesc arcurile din nitinol să fie cât mai mare [141].

2.6 CONCLUZII

1. Datorită proprietăților speciale ale nitinolului, acestea oferă largi domenii de aplicabilitate. Domeniile și aplicațiile în care sunt utilizate aliajele cu memoria formei sunt numeroase precum cele din domeniul medical (chirurgie – filtre și organe artificiale, ortopedie – implanturi, oftalmologie) robotică, micromotoare, micropompe protecții la supracurent dar și în domeniul automobilelor.

2. Actuatorii cu nitinol au numeroase avantaje prin faptul că sunt foarte simple din punct de vedere constructiv, au o fiabilitate sporită, având totodată și un preț de cost mic. Acestea sunt ușor de realizat și pot fi utilizate în aproape orice domeniu, acolo unde actuatorii de altă natură nu sunt permise sau recomandate.

3. În comparație cu alți actuatori convenționali, actuatorii cu memoria formei necesită un control mult mai simplificat, deoarece elementele din aliaj cu memoria formei pot combina funcțiile elementelor de execuție cu cea a angrenajelor și a legăturilor dintre motoarele electrice de acționare și sisteme de control. Trebuie remarcate și unele dezavantaje precum timpii de revenire mai mari, viteze de răcire limitate și sensibile la temperaturi ale mediului ambiant.

4. Motoarele cu nitinol sunt constituite în general din elemente active din material cu memoria formei, fie sub formă de arc (resort), fie din sârmă dreaptă sau în buclă, care în diferite configurații și sub influența temperaturilor ridicate, printr-o conversie termo-mecanică, vor fi constrânși să se rotească cu o viteză unghiulară relativ scăzută, executând o mișcare continuă.

5. În general, motoarele cu nitinol au un randament scăzut, cuplu redus și sunt mai greu de realizat din punct de vedere constructiv deoarece necesită proceduri de învățare specifice aplicației, însă prezintă și unele avantaje că sunt silențioase și nu necesită supraveghere atât timp cât le sunt asigurate anumite condiții de funcționare. Acestea pot fi utilizate în medii umede sau în zone în care motoarele electrice obișnuite se pot deteriora ușor.

6. Deși principalele utilizări sunt în domeniul medical, interesul pentru utilizarea actuatorilor și motoarelor cu nitinol în diverse domenii industriale este ridicat, lucru evidențiat și de numărul mare de brevete apărute din Japonia și până în Statele Unite.

7. În România preocupări intense cu privire la aplicațiile aliajelor cu memoria formei au apărut încă de acum 25 de ani în cadrul Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Inginerie Electrică ICPE-CA București și a Universității Ștefan cel Mare din Suceava.

Capitolul 3

PROIECTAREA, REALIZAREA ȘI TESTAREA UNOR STANDURI DE ÎNCERCĂRI PENTRU MATERIALE CU MEMORIA FORMEI

[5], [15], [16], [142], [144]

3.1 NOȚIUNI GENERALE

În ultimii ani, evoluția în domeniul materialelor cu memoria formei a fost foarte dinamică, fiind studiate proprietățile lor, au fost îmbunătățite și diversificate tehnologiile de obținere, s-au identificat aplicații în mai multe domenii, au fost dezvoltate sisteme ce înglobează materiale cu memoria formei [15].

Aliajul Ni-Ti are proprietatea de memorare a formei, dar și capacitate mare de amortizare și superelasticitate, aceste proprietăți obținându-se în funcție de compoziția celor două metale, precum și în funcție de prelucrările mecanice și tratamentul termic la care este supus.

3.2 PROIECTAREA STANDULUI DE ÎNCERCĂRI

Standul de testare a fost conceput pentru testarea și evaluarea caracteristicilor materialelor inteligente, încălzite direct sau indirect, pentru a înțelege modul cum acestea pot fi folosite în aplicații ca microîntrerupătoare, supape de sens, sisteme centralizate de închidere / deschidere, sisteme de orientare, etc.

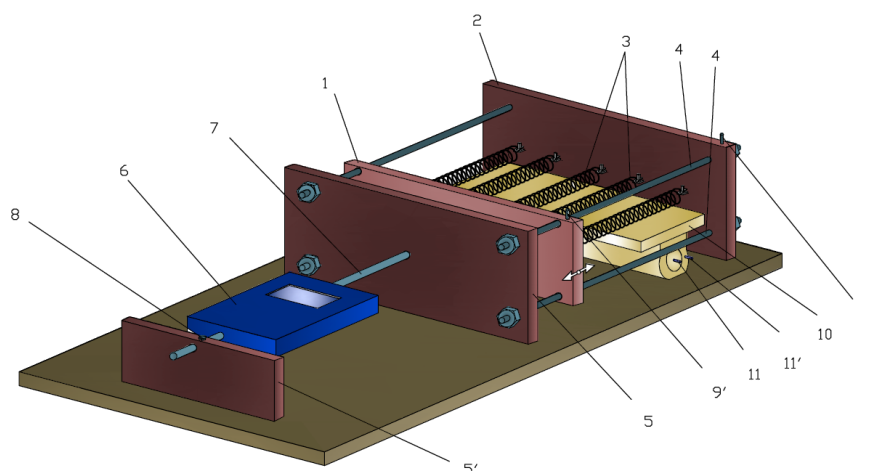


Fig. 3.1 Concept stand de încercare [144]

1 – armătură mobilă; 2 – armătură fixă; 3 – eșantioane de testare; 4 – ghidaje;
5, 5' – suport vertical; 6 – traductor de forță; 7 – bară de ghidare; 8 – șurub de blocare;
9, 9' - borne de alimentare eșantioane; 10 – rezistență; 11, 11' - bornele rezistenței.

3.4 TESTAREA MATERIALELOR INTELIGENTE

3.4.1 Testarea elementelor din material cu memoria formei - varianta 1

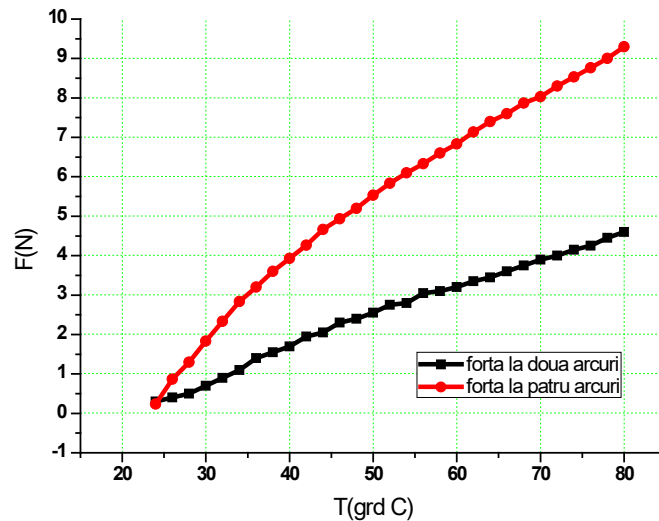


Fig. 3.3 Caracteristica forței de comprimare a arcurilor în funcție de temperatura de încălzire a termorezistenței

Analizând două arcuri puse în paralel pe standul de încercare, acestea fiind pretensionate la o lungime mai mare față de lungimea inițială, se observă că la temperatura de 24 °C, forța este de 0,3 N. Deoarece efectul de generare a forței apare la această valoare, putem spune ca aliajul nichel-titan superelastice se activează la temperatura de 24 °C. Forța devine semnificativă la pragul de 80 °C, aceasta fiind de 4,6 N.

Setul de patru elemente elastice reacționează tot la o temperatură de 24 °C, temperatură de activare, având o forță inițială de 0,35 N. Odată cu creșterea temperaturii, forța de comprimare este tot mai mare, urmând ca la 80 °C, forța să ajungă la puțin peste 9 N.

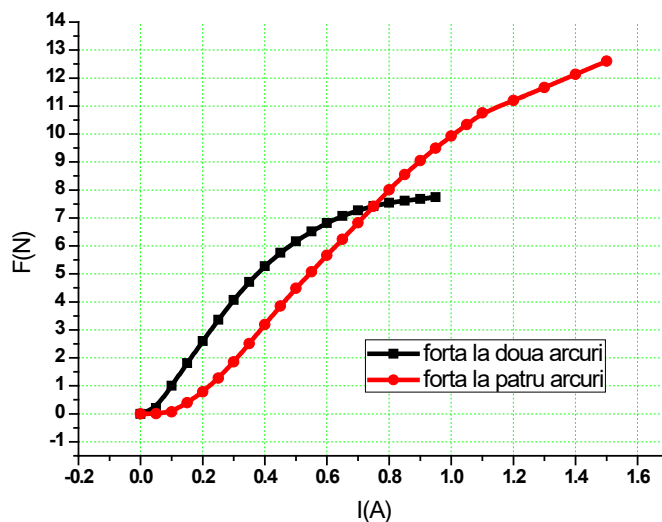


Fig. 3.4 Caracteristica forței de comprimare a două arcuri, respectiv patru arcuri în funcție de curentul electric de autoîncălzire aplicat

Alimentând un set de două arcuri, legate în paralel, cu curent electric, acestea vor avea o comportare asemănătoare situației anterioare, în care sursa de căldură era exterioară, plasată în partea inferioară pentru a genera căldura necesară activării elementelor elastice. Fiind alimentate la o sursă de tensiune, acestea se vor încălzi datorită rezistenței proprii prin efect Joule, rezultând astfel activarea și inducerea forței de comprimare a arcurilor din nitinol superelastice.

O altă determinare s-a efectuat pentru un set de patru arcuri din nitinol superelastice. Micile deviații ale caracteristicii sunt date de frecările apărute în ghidajele standului experimental și dezechilibrelor date de forțele produse de elementelor elastice, temperatura mediului exterior fiind menținută pentru toate experimentele realizate la 22 °C iar curenții exteriori de aer fiind doar cei produși de fenomenul de convecție.

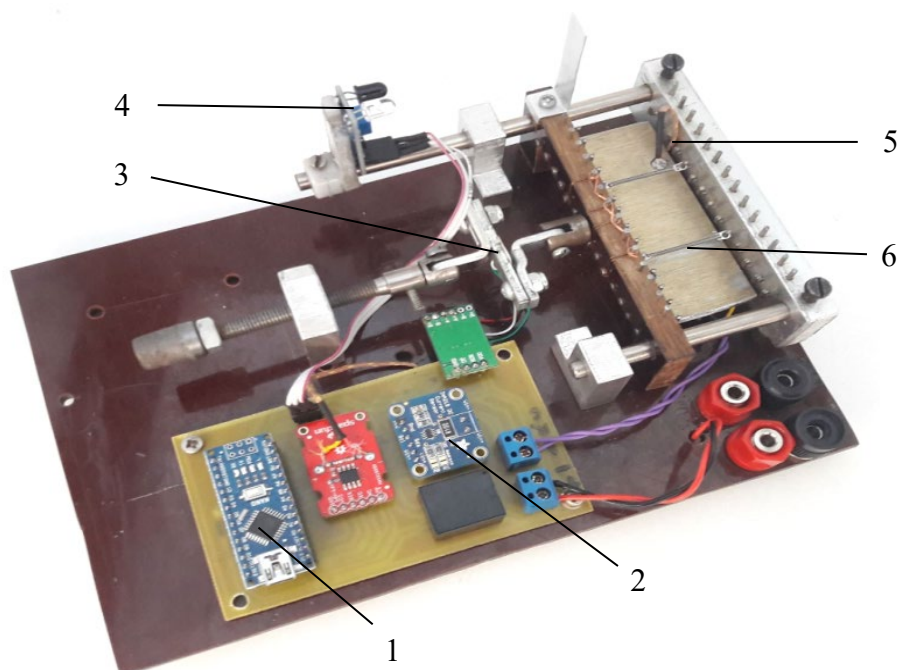


Fig. 3.6 Stand de testare a NiTi în varianta 2

Cu ajutorul interfeței LabVIEW de la National Instruments, se pot vizualiza datele în timp real preluate de la senzorii dispuși pe standul de testare.

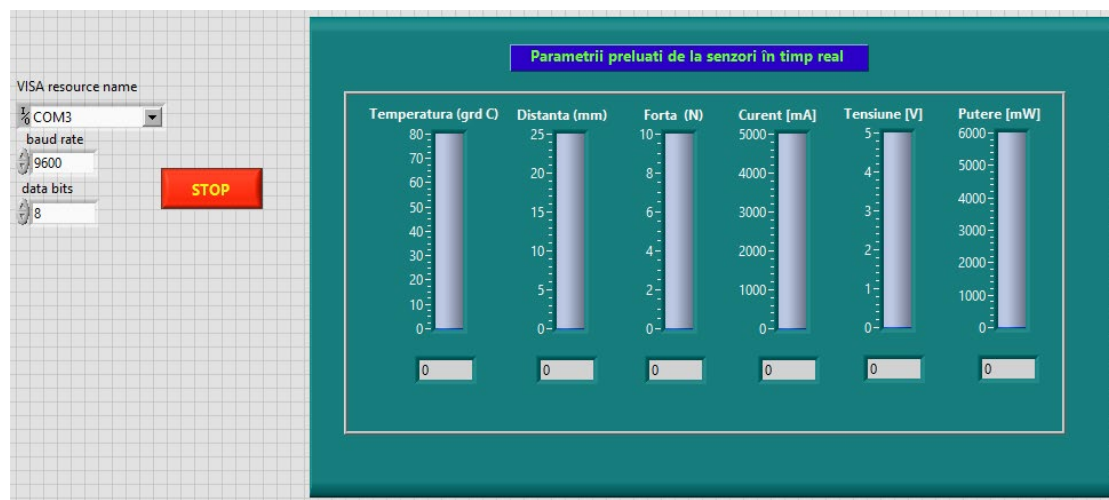


Fig. 3.8 Interfața grafică în LabVIEW

3.5 TESTAREA REZISTENȚEI LA OBOSEALA A ELEMENTELOR ACTIVE DIN NITINOL

3.5.1 Realizarea aplicației practice

Aplicația are la bază un sistem cu microcontroler conectat cu un senzor de forță, un senzor de temperatură ce monitorizează temperatura mediului ambiant și componente electrice necesare alimentării sistemului de autoîncălzire. Datele preluate în timpul funcționării sunt stocate într-un fisier Excel cu extensia .csv ce poate fi descărcat de pe site-ul ThingSpeak.com, în care sunt trecuți parametri citați la intervale stabilite de timp.

S-a stabilit că parametrul care trebuie monitorizat și achiziționat reprezintă forța dezvoltată de sistemul elastic. În acest sens, pe standul de testare a fost poziționat nitinolul sub formă de arc destins, forma inițială fiind memorată în formă comprimată, în care unul din capete este fix iar de celălalt capăt este atașat senzorul de forță. Alimentarea acestuia este făcută din exterior prin intermediul unei surse de curent continuu comutată cu un releu controlat de microcontroler.

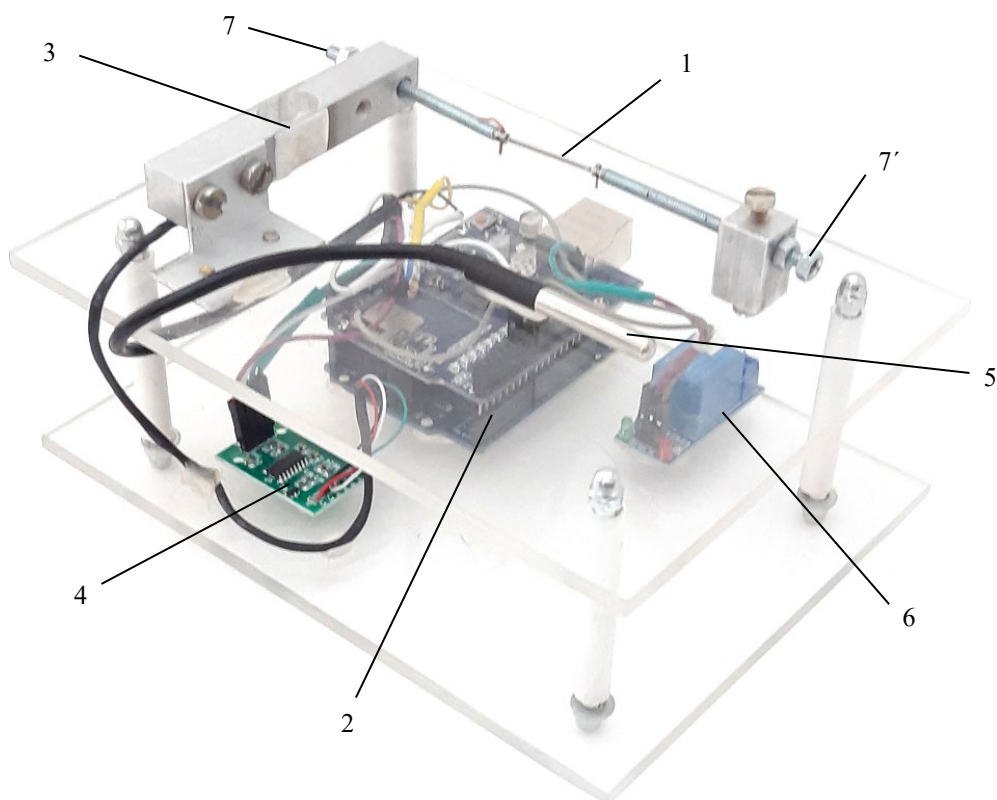


Fig. 3.14 Standul experimental pentru testarea rezistenței la oboseală a nitinolului

1 – element nitinol; 2 – sistemul cu microcontroler; 3 – senzor forță; 4 – adaptor pentru senzor de forță;
5 – senzor temperatură; 6 – releu alimentare sistem autoîncălzire elemente elastice; 7, 7' - borne alimentare

3.5.2 Determinări experimentale și analiza datelor

Pe perioada testărilor au fost realizate două tipuri de determinări cu privire la rezistența la oboseală a nitinolului, în care elementul elastic a fost alimentat la un curent I_1 de aproximativ 50 % respectiv un alt curent I_2 de 85 % din curentul maxim. Curentul maxim pentru elementul testat a fost de 1,1 A, reprezentând valoarea de prag peste care materialul se distruge.

În primă variantă standul experimental din figura 3.17 a funcționat o perioadă de 19 zile în care au fost înregistrate peste 100.000 de încercări.

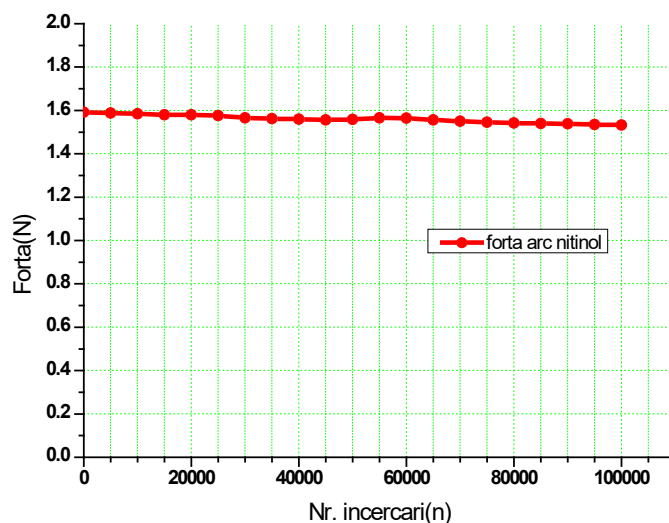


Fig. 3.17 Caracteristica forței generate de elementul elastic pe perioada de testare (19 zile de funcționare continuă) la curentul electric aplicat I_1

În a doua etapă a testărilor, caz în care curentul electric I_2 injectat în elementul elastic este de 0,914 A, mai mare față de prima încercare, fiind apropiat de curentul maxim ce poate fi injectat fără a deteriora elementul activ, sistemul a funcționat o perioadă de aproape 5 zile, realizând peste 25.000 de încercări.

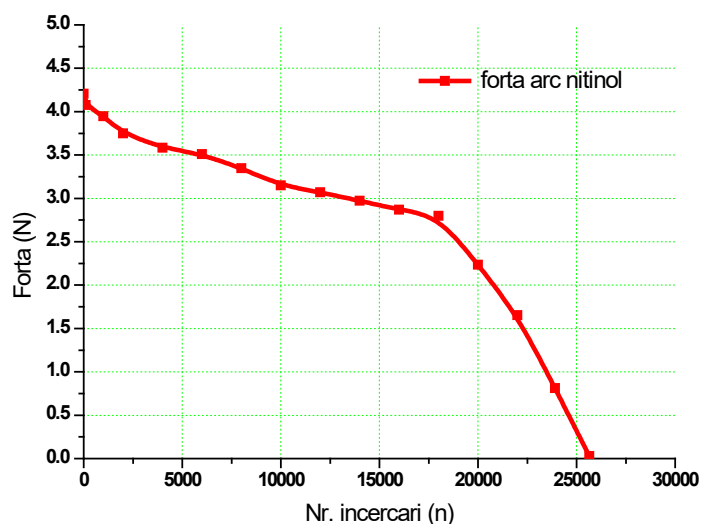


Fig. 3.20 Caracteristica forței generate de elementul elastic pe perioada de testare (5 zile de funcționare continuă) la curentul electric aplicat I_2

Analizând graficul din figura 3.20, se poate observa evoluția forței generate de elementul activ la cele peste 25.000 de încercări. Pornind inițial de la o forță de 4,3 N la curentul electric I_2 aplicat, a urmat o continuă scădere a acesteia până la aproximativ 20.000 de încercări, urmând o cădere mai pronunțată a alurii caracteristicii, fapt determinat de cedarea rezistenței la stres termic a elementului din nitinol, până la o forță aproximativ nulă.

3.6 CONCLUZII

1. Standurile de testare proiectate și realizate au fost folosite pentru testarea și evaluarea caracteristicilor materialelor inteligente, încălzite direct sau indirect, pentru a înțelege modul cum acestea răspund diversilor stimuli termici și pot fi folosite în dezvoltarea unor echipamente tehnice ce au la bază elemente elastice cu nitinol. S-a constatat că încălzirea prin efect Joule a elementelor active este mai eficientă decât încălzirea folosind surse externe.

2. În prima variantă de stand experimental, în care eșantioanele au fost încălzite fie de la o sursă exterioară, fie prin autoîncălzire prin efect Joule, s-au obținut familii de caracteristici pentru mai multe structuri cu elemente elastice din materiale cu memoria formei.

3. Din analiza graficelor obținute în urma încercărilor, se poate observa că forța dezvoltată de elementele elastice folosite prin încălzire poate ajunge până la 9 N pentru un grup de patru arcuri dispuse în paralel, ceea ce conduce la ideea folosirii acestora în aplicații practice industriale.

4. În varianta a doua de stand experimental, preluarea de date este realizată de senzori folosind un microsistem de monitorizare conectat la un computer, acestea fiind vizualizate cu ajutorul unei interfețe grafice LabVIEW, permițându-se astfel preluarea automată a caracteristicilor de transfer și înregistrarea familiilor de caracteristici pentru condiții diverse de funcționare.

5. Analizând cele două variante constructive de standuri experimentale de testare, putem deduce că ambele au atât avantaje cât și dezavantaje. Avantajul primei variante constă în simplitate constructivă iar ca dezavantaj este timpul necesar preluării datelor a căror eroare poate fi afectată de operatorul uman, față de a doua variantă în care intervalele de timp sunt mult mai precis evaluate iar procesul de măsurare este automatizat, iar dezavantajul îl reprezintă complexitatea sistemului și prețul de cost.

6. A treia variantă de stand experimental, în care sistemele elastice au fost testate individual, este destinată analizei răspunsului la rezistența la oboseală. În cadrul testelor s-a realizat o comparație aplicând doi curenți diferiți de stimulare pentru a se putea evalua utilizarea elementelor active pentru dezvoltarea aplicațiilor bazate pe controlul în curent electric.

7. Prima variantă în care s-a aplicat un curent I_1 de aproximativ 50 % din curentul maxim, demonstrează că după un număr foarte mare de cicluri repetate continuu timp de 19 zile de funcționare, în aceleași condiții, acesta își păstrează caracteristicile elastice deci pot fi utilizate în domeniul industrial dar și în medicină și în industria automobilelor.

8. Al doilea test demonstrează că la aplicarea unui curent I_2 , la 85 % din curentul maxim, ce poate deteriora elementul activ, chiar dacă inițial se obțin performanțe ridicate asupra forței generate și a controlului mai precis al elementului cu o constantă de timp redusă, acesta își pierde definitiv proprietățile de memoria formei, fapt ce îi scade durata de viață, performanțele de elasticitate, forma și apare imposibilitatea de a fi reutilizat.

9. Pentru o analiză cât mai bună a eșantioanelor din NiTi, trebuie ținut cont de factorii ce pot influența substanțial precizia acestora: temperatura mediului exterior, fluxurile de aer din jurul elementelor active, temperatura la care se activează aliajul, dimensiunea de gabarit și modul de control al acestora.

Capitolul 4

CONTRIBUȚII EXPERIMENTALE CU PRIVIRE LA SISTEME DE CONTROL PENTRU FLUIDE

[16], [62], [64], [70], [137], [138], [145]

4.1 NOȚIUNI GENERALE

Superelasticitatea se caracterizează printr-o forță aproape constantă (în timpul descărcării) reprezentată pe graficul de încărcare / deformare a aliajului, cauzată de o transformare indusă de stres din faza austenitică spre martensitică, care sunt două structuri cristalografice diferite care pot exista în interiorul aceluiași aliaj.

Fiecare dintre aceste două faze are un modul de elasticitate diferit, ceea ce face ca acest aliaj să fie unic. În aplicații, adesea se dorește ca arcurile de nichel-titan să funcționeze pe palierul superelastic, dar este nevoie de un mare efort pentru a induce faza martensitică. Cu toate acestea, literatura nu este clară despre cât de mult ar trebui să fie activate aceste elemente fără a suferi o deformare permanentă semnificativă. Există în literatură, fără a prezenta nici o dovadă, activări de 500% din lungimea inițială a elementului fără deformare permanentă, deși nu impun limite unei activări mai mari.

4.2 PROIECTAREA, REALIZAREA ȘI TESTAREA UNUI PICURĂTOR ACȚIONAT CU MATERIALE INTELIGENTE

4.2.1 Proiectarea picurătorului acționat cu Ni-Ti

În cadrul Laboratorului de inventică și transfer tehnologic din USV s-a realizat un prototip al unei micropompe electromecanice – picurător ce are ca scop dozarea unei cantități bine determinate de lichid (de la picături până la curgere fluentă) în funcție de poziția obținută cu elemente active din material inteligent, fapt controlat prin intermediul curentului electric de către un dispozitiv ce poate fi programat sau comandat de către operatorul uman.

Prototipul picurătorului (figura 4.4) este constituit dintr-un recipient cilindric 1 în care este stocat lichidul, al cărui piston 5 este acționat prin intermediul elementelor din Nitinol 6a, 6b, 6c și 6d. Lichidul din cilindrul central va fi dispersat către alte trei recipiente 10a, 10b și 10c, al căror orificii de alimentare sunt situate la nivele diferite în recipientul 1. În funcție de poziția elementelor din Nitinol, alimentate de către o sursă de tensiune prin intermediul bornelor 14 și 14', prin care este stabilit curentul electric aplicat, acestea vor permite lichidului să umple recipientele pe rând, astfel obținându-se cantitatea dorită.

Prototipul micropompei de picurare a fost propus spre brevetare și realizat pe baza proiectului prezentat mai sus fapt ce arată că un astfel de dispozitiv poate fi reprodus în mai multe exemplare fără a-i fi modificate performanțele.

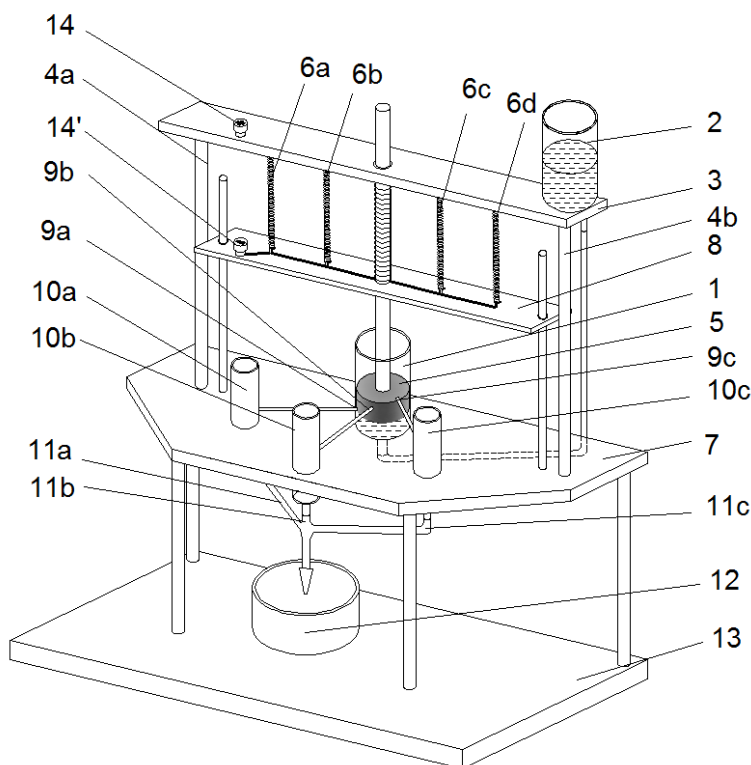


Fig. 4.4 Desen de principiu al picurătorului [138]

4.2.3 Testarea prototipului experimental realizat în laborator

În cadrul laboratorului din Centrul de cercetare EMAD al USV s-au efectuat o serie de încercări privind analiza picurătorului controlat în curent electric, respectiv dozarea lichidului prin intermediul treptelor de tensiune stabilite de utilizator.

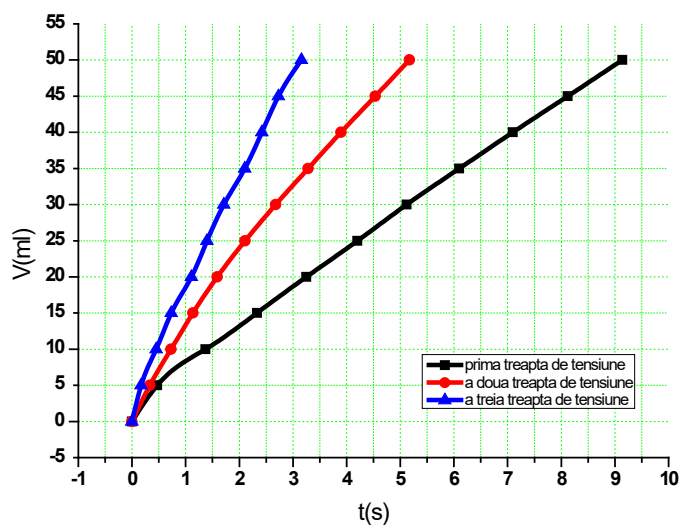


Fig. 4.7 Variația volumului de lichid picurat în funcție de timp, la trepte de tensiune diferite

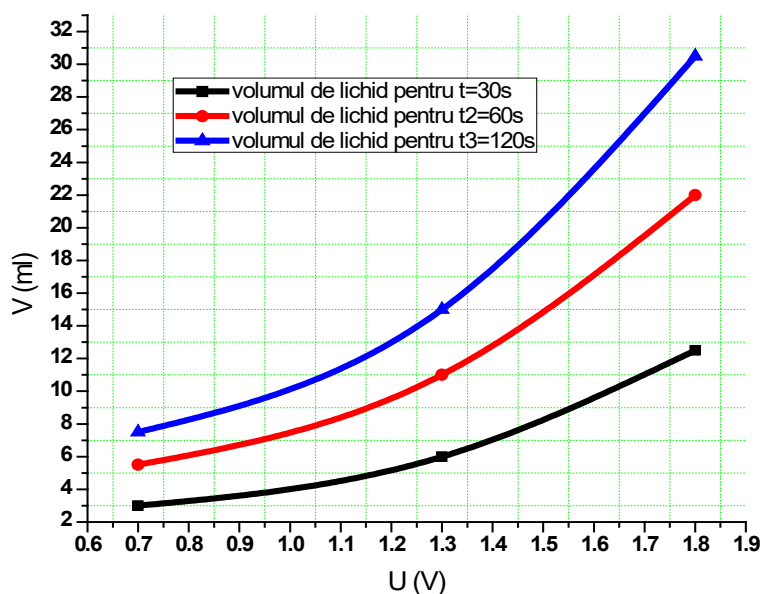


Fig. 4.8 Variația volumului de lichid vehiculat la variația tensiunii de alimentare a elementelor active pentru perioade diferite de timp (interpolare polinomială)

Figura 4.8 reprezintă caracteristicile volumului de lichid vehiculat, în funcție de tensiunea aplicată elementelor active.

4.3 PROIECTAREA, REALIZAREA ȘI TESTAREA UNEI MICROPOMPE ACȚIONATĂ CU MATERIALE CU MEMORIA FORMEI

În cadrul laboratorului de cercetare s-a realizat un prototip al unei micropompe electromecanice de vid sau presiune ce are ca scop controlul presiunii din interiorul unei incinte cilindrice, presiune controlată prin poziția elementelor active ale materialelor inteligente comandate prin intermediul curentului electric, programat de către operatorul uman.

4.3.1 Descrierea și realizarea prototipului experimental

Prototipul experimental se referă la o micropompă de vid sau presiune realizată pe baza a două sisteme cu arcuri din nitinol (material cu memoria formei), controlate în curent (încălzire prin efect Joule) și care are ca efect reglarea presiunii din interiorul unei incinte cu fluid.

Figura 4.11 reprezintă o vedere de principiu, în secțiune, a micropompei electromecanice de vid și presiune proiectată și realizată.

Micropompa electromecanică de vid și presiune, este compusă dintr-un recipient cilindric cu fluid 1 fixat pe o placă de susținere fixă 2, poziționată pe două ghidaje metalice 4 și 4' și care recipient este prevăzut la un capăt cu un piston 5, fixat rigid de o placă mobilă 6, a cărei deplasare bidirecțională este comandată de două sisteme formate din câte șase resoarte din Nitinol 7 și 7' care la rândul lor sunt prinse la un capăt de placa mobilă 6 care culisează pe ghidaje, iar la celălalt capăt de plăcile de susținere fixe 3 și respectiv 3', placi fixate pe ghidajele 4 și 4' astfel încât să permită pretensionarea sistemelor de resoarte. Comanda deplasării bidirecționale a pistonului este

realizată prin alimentarea cu tensiune reglabilă fin, alternativ a câte unui sistem de resoarte, la bornele 11 și $11'$, de la o sursă de tensiune, pentru a crește, respectiv scădea, presiunea din incinta 1 .

La capătul opus al recipientului cilindric 1 este realizat un orificiu, prevăzut cu o conductă elastică 8 prin care este conectat manometrul 9 pentru măsurarea presiunii din interiorul recipientului cilindric cu fluid 1 . Întreg ansamblu este fixat pe o placă suport 10 .

Pistonul acționează sub acțiunea forței rezultante obținută de la două sisteme de arcuri cu memoria formei comandate separat, formate din cate patru sau șase elemente active pe fiecare parte, în funcție de intervalul de presiune dorit [137].

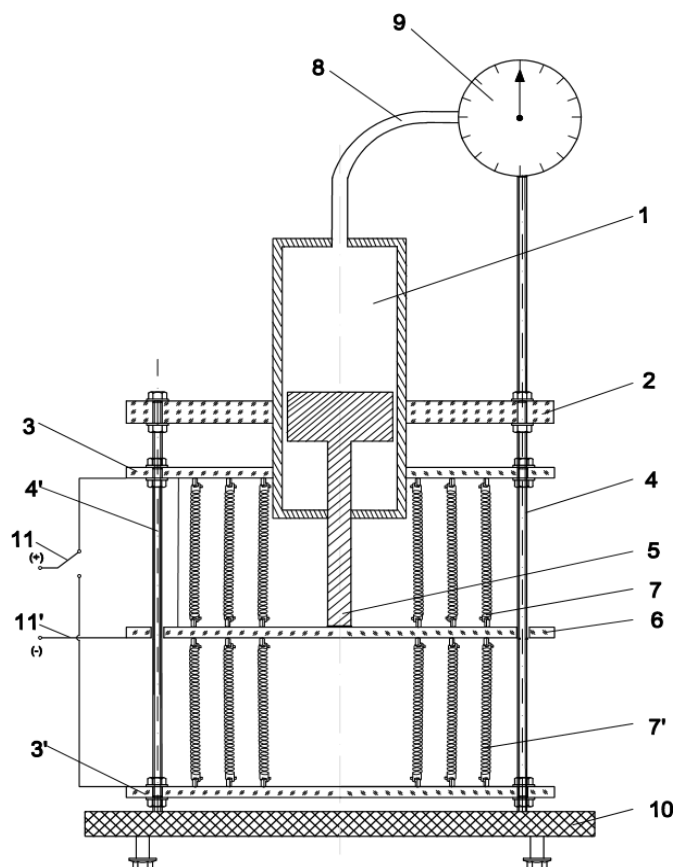


Fig. 4.11 Vedere de ansamblu al micropompei de vid și presiune [137]

Comanda deplasării bidirecționale a pistonului, prin modificarea constantei elastice a arcurilor și care stabilește presiunea fluidului este realizată cu ajutorul unei surse de tensiune reglabilă, care va alimenta pe rând câte un grup de elemente active în funcție de presiunea / depresiunea dorită.

Standul experimental realizat în cadrul laboratorului de cercetare al USV este cel din figura 4.12 și prezintă avantajul unui gabarit redus față de alte aplicații ce realizează controlul presiunii, construcția fiind destul de simplă din punct de vedere al complexității părților componente.

Sistemul poate fi automatizat folosind un microsistem de calcul care preia valoarea presiunii din incintă prin intermediul unui senzor de presiune și permite modificarea acesteia prin intermediul unei plăci cu relee care alimentează individual fiecare element activ al dispozitivului. Acest sistem va putea să mențină o presiune constantă în condiții de variație a temperaturii sau va permite modificarea presiunii la o valoare stabilă de un operator uman.

În cadrul testelor au fost preluate date experimentale pe standul realizat, la un număr diferit de elemente active, au fost determinate nivelul de presiune minimă / maximă și au fost ridicate caracteristici pentru a evidenția performanțele echipamentului.

4.3.2 Prezentarea datelor experimentale ale micropompei

Caracteristicile din figura 4.14 prezintă variația presiunii din incintă pentru un set de două, patru, respectiv șase elemente active dispuse în paralel, distribuite la o distanță egală pe fiecare parte.

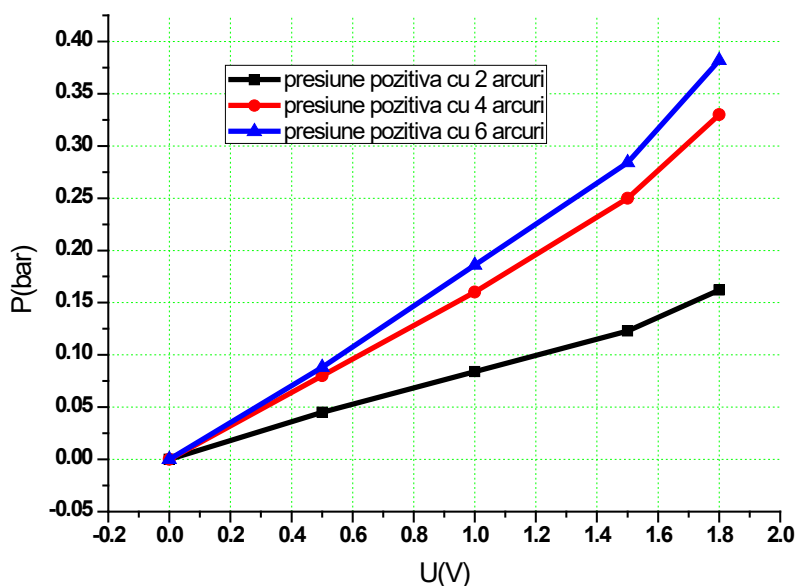


Fig. 4.14 Variația presiunii în funcție de tensiunea de alimentare pentru configurații diferite

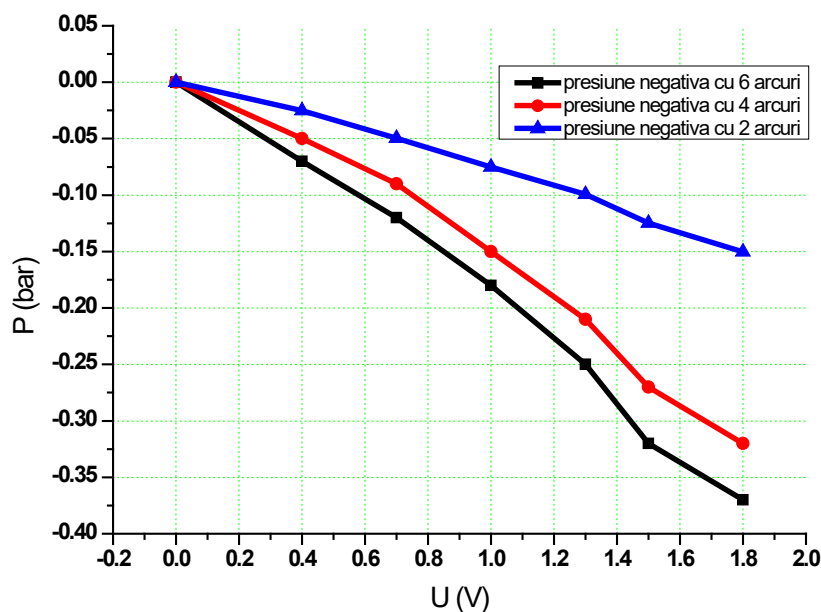


Fig. 4.16 Caracteristica presiunii negative în funcție de tensiunea de comandă

4.4 CONCLUZII

1. Dispozitivul experimental al picurătorului proiectat, realizat, testat și brevetat în cadrul lucrării are rolul de a doza debite fixe de lichid stabilite de către utilizator, valori ce pot fi setate prin calibrarea ușoară a acestuia cu ajutorul unei surse de tensiune reglabilă.

2. Pentru a realiza o dozare cât mai precisă, trebuie ținut cont de diametrul orificiilor, de volumul recipientelor de stocare a lichidului, de modul de dispunere a elementelor din nitinol, de temperatura mediului ambiant, de modul de prelucrare și finisare a elementelor componente, de caracteristicile de curgere a lichidului controlat și de geometria rezervorului.

3. În cazul prototipului dispozitivului de dozaj s-au folosit doar trei orificii la nivele diferite, respectiv, trei trepte de tensiune diferite pentru control. Pentru îmbunătățirea preciziei se pot adăuga mai multe orificii de curgere și respectiv trepte de tensiune, precum și un control diferențiat al elementelor active.

4. Dozarea lichidului, în cazul prototipului experimental al dispozitivului de picurare, este determinată de mai mulți factori precum temperatura mediului ambiant, a curenților de aer ce spală elementele elastice și presiunea hidrostatică a lichidului din rezervorul de alimentare. Pentru reducerea efectelor curenților de aer sistemul cu elemente active se poate închide într-o incintă. Prin termostatarea acesteia se poate elimina complet această sursă de erori.

5. În cadrul dozatorului, în funcție de modul de dispunere serie / paralel al elementelor din nitinol, vom avea nevoie de tensiuni electrice de comandă diferite și deci curenți electrici diferiți pentru a se obține temperaturile de lucru optime ale elementelor active pentru activarea acestora, ceea ce va determina alegerea sursei de alimentare și evaluarea nivelelor de control necesare.

6. În urma experimentelor pentru micropompă s-a dedus că dispozitivul necesită o putere electrică maximă 7,5 W la treapta a treia de tensiune. Pentru prima treaptă, puterea electrică necesară va fi 1,4 W iar la a doua treaptă va fi de aproximativ 3,5 W, deci un consum energetic redus.

7. Micropompa electromecanică de vid și presiune a fost proiectată și realizată pentru a menține sau controla modificarea presiunii dintr-o incintă prin control fin în curent al elementelor active de nitinol (material cu memoria formei).

8. În urma preluării datelor experimentale la micropompa electromecanică s-au obținut o serie de caracteristici ce evidențiază controlul constantei elastice a arcurilor din nitinol, respectiv, controlul presiunii create în incintă cu o precizie ridicată.

9. Analizând caracteristicile obținute în cadrul testării micropompei, putem observa că un control fin poate fi realizat folosind un număr mai mare de elemente elastice conectate pe stand, dar rezoluția echipamentului depinde de dimensiunea și geometria incintei în care se controlează presiunea.

11. Echipamentele realizate, testate și brevete pot fi automatizate ușor prin utilizarea unui microsistem ce comandă alimentarea fiecărui element activ prin intermediul unui microcontroler.

Capitolul 5

PROIECTAREA, REALIZAREA ȘI TESTAREA UNUI SISTEM DE ZĂVORÂRE CU NITINOL

[4], [19], [52], [71], [119], [146], [149], [155]

5.1 INTRODUCERE

Aplicațiile materialelor inteligente sunt o alternativă interesantă pentru înlocuirea actuatorilor convenționali. Avantajele lor creează un motiv bun pentru a reduce dimensiunea, greutatea și complexitatea, cu un raport remarcabil putere-greutate. Pe lângă avantajele menționate, există și câteva dezavantaje, inclusiv eficiență scăzută și dificultăți în controlul foarte precis al acestor actuatoare datorită efectului de memorie a formei care este un fenomen cu caracteristică neliniară. Nu în ultimul rând, ciclul de funcționare este destul de lent și depinde direct de modul în care căldura este transferată materialului din sursa caldă, respectiv rece [19].

5.2 PROIECTAREA ȘI DESCRIEREA SISTEMULUI DE ZĂVORÂRE

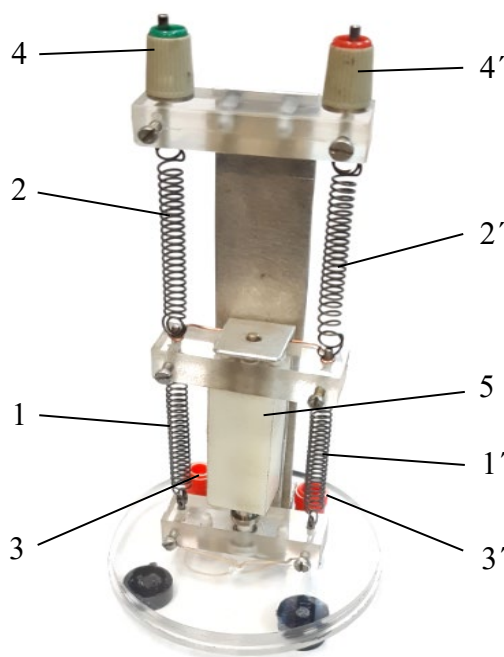


Fig. 5.7 Sistem de zăvorâre în varianta a doua

1, 1' - arcuri de acționare din nitinol; 2, 2' - arcuri de revenire din nitinol; 3, 3' - borne alimentare la acționare; 4, 4' - borne alimentare la revenire; 5 – mecanism zăvorâre.

Sistemul se bazează pe principiul de funcționare al materialului inteligent Nitinol, care are proprietatea de a se manifesta în moduri diferite la modificarea temperaturii sau când este controlat în curent electric, [146], [149] Acesta este realizat pe baza a două elemente elastice din nitinol și poate fi utilizat pentru închiderea / blocarea unor uși sau obloane în medii cu umiditate ridicată sau în domeniul automobilelor [155].

Elementele din nitinol poziționate pentru revenire sunt identice cu cele pentru acționare, poziționate la partea inferioară, având aceleași dimensiuni și cel mai important, aceeași temperatură de activare.

În graficul de mai jos sunt reprezentate caracteristicile curentului de alimentare ale arcurilor din nitinol în partea inferioară, la două temperaturi ambientale, în funcție de timpul în care s-a realizat acționarea. Pentru a ridica aceste grafice, au fost stabilite valorile curentului electric la care arcurile au fost alimentate de la o sursă de curent continuu fixă, plecând de la o valoare minimă a curentului de 1,5 A în care arcurile au început să genereze o forță necesară activării sistemului și un curent maxim de 2,75 A, curent care a fost stabilit pentru a nu deteriora arcurile și timpul cronometrat în care s-a realizat acționarea sistemului.

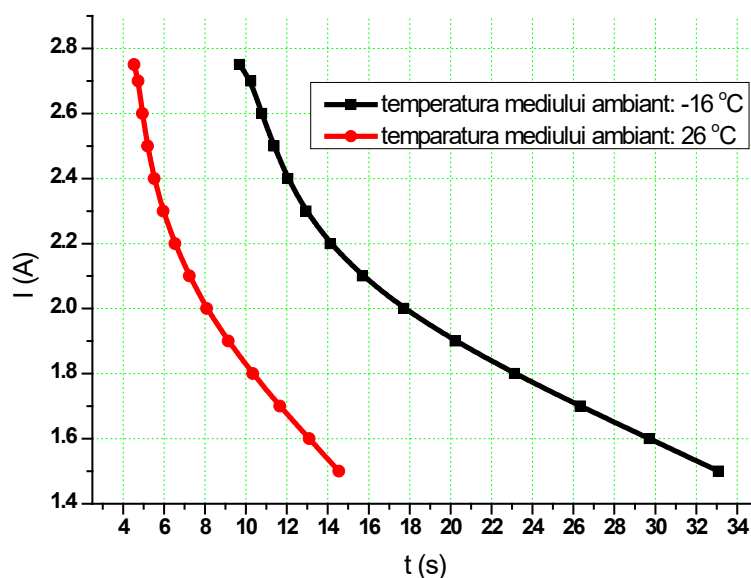


Fig. 5.10 Caracteristicile curentului de alimentare în funcție de timpul de acționare

Analizând alura caracteristicii, la temperatura ambientală de 26 °C la care s-au realizat încercările, se observă că la valoarea curentului minim de 1,5 A, timpul în care se realizează acționarea este de aproximativ 15 secunde. Cel mai mic timp de acționare s-a obținut la valoarea curentului de 2,75 A, curentul maxim stabilit, valoarea timpului la care s-a efectuat acționarea fiind de 4,8 secunde.

Comparând cele două caracteristici, se observă o diferență semnificativă a timpului de acționare, fiind mai mare la temperaturi scăzute. La temperatura ambientală de -16 °C, alura caracteristicii este mai puțin liniară, timpul cel mai mic la care se realizează acționarea, la același curent de 2,75 A, este aproximativ dublu față de valoarea primei caracteristici.

În cazul revenirii în poziția inițială, pentru o nouă acționare a sistemului care este realizată prin alimentarea arcurilor din partea superioară a standului se obțin noi caracteristici în care este evidențiat timpul total de acționare – revenire în poziția inițială în funcție de curentul electric aplicat, fiind considerat timpul în care se poate realiza o nouă acționare a sistemului.

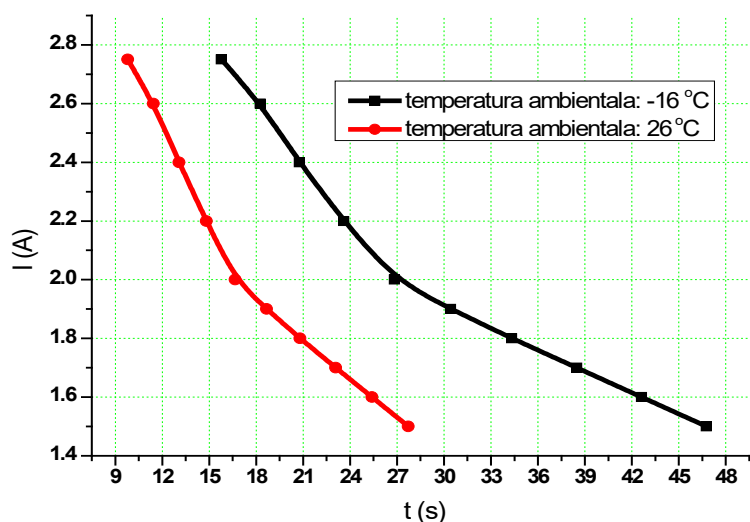


Fig. 5.11 Caracteristicile curentului de alimentare în funcție de timpul total acționare – revenire

Timpul cel mai mic la care se poate realiza o nouă acționare a sistemului este de aproximativ 10 secunde la curentul maxim de 2,75 A în cazul temperaturii ambientale de 26 °C. În același caz, la temperatura mediului de -16 °C, timpul pentru o nouă acționare este cu aproximație dublu față de prima caracteristică, având o valoare de 17 secunde la curentul maxim stabilit. Cele două caracteristici s-au determinat la temperaturi ambientale de 26 °C și -16 °C.

5.4 MODELAREA ÎN COMSOL MULTIPHYSICS A ELEMENTULUI ACTIV DIN NITINOL

Comsol Multiphysics este o platformă software de simulare prin metoda elementului finit care cuprinde toate etapele din fluxul de modelare, de la definirea geometriilor, proprietăților materialului care descriu fenomene specifice până la rezolvarea și procesarea modelelor afișând rezultate precise și de încredere.

Pentru crearea modelelor în domenii de aplicații specializate sau ingineresti, există posibilitatea de a combina module suplimentare din alte programe de simulare care fac posibilă integrarea simulării și cu alte programe software de inginerie utilizate în proiectare. Modelul realizat se poate converti într-o aplicație de simulare cu o interfață dedicată pentru utilizator, care poate fi utilizată și de alți utilizatori.

5.4.1 Realizarea modelului 3D a arcului din nitinol în programul de simulare Comsol Multiphysics

În cele ce urmează, sunt prezentate etapele aplicației ce simulează comportarea unui arc din material cu memoria formei, element ce a fost folosit în aplicațiile prezentate. În această aplicație a fost comparată comportarea arcului din nitinol folosit la sistemul de zăvorâre în care s-au evidențiat aspecte cu privire la distribuția temperaturii prin acesta la aplicarea unui curent electric, nivelul de stres dar și distribuția tensiunii electrice prin element. Elementul simulat are lungimea de 30 mm în stare inițială cu grosimea firului de 0,7 mm și un număr de 20 de spire.

Diametrul exterior al arcului este de 6 mm.

În primă etapă, a fost construit modelul arcului 3D și au fost introduse dimensiunile geometrice ale acestuia.

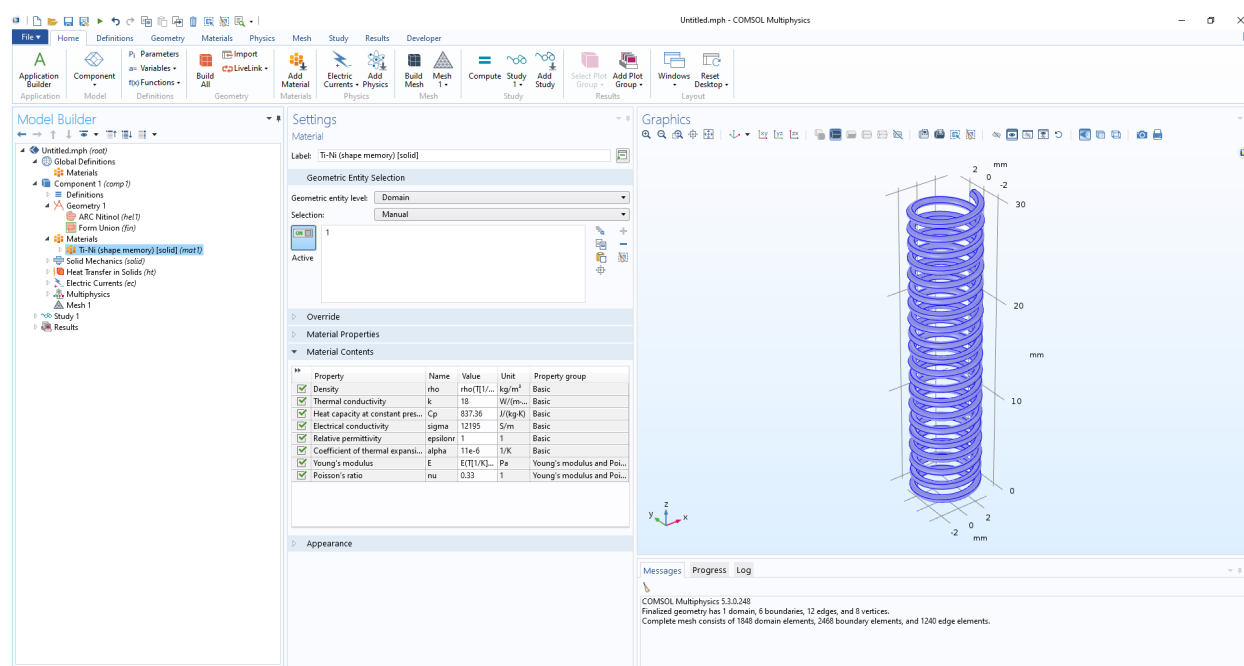


Fig. 5.13 Atribuirea materialului

5.5 DETERMINAREA RĂSPUNSULUI INDICIAL AL ARCULUI DIN NITINOL

5.5.2 Determinarea răspunsului indicial în cazul arcului din nitinol

Condițiile de desfășurare a determinării răspunsului indicial constau în deformarea arcului din nitinol la o lungime de 8 cm, pe un stand special dezvoltat în cadrul laboratorului, în care un capăt este fix și unul este lăsat liber pentru a determina revenirea în poziția inițială în cazul aplicării semnalului treaptă. Semnalul treaptă reprezintă un curent electric aplicat la capetele arcului de 0,4 A și 0,6 A, valori considerate ca procent de 10%, respectiv 15% din valoarea maximă a curentului ce poate deteriora arc. Modificarea deplasării arcului prin aplicarea semnalului treaptă a fost monitorizată de un senzor cu ajutorul unui microcontroler.

Tabel 5.1

Condiții experimentale (semnale treaptă)	Tip proces	Ecuția procesului	Expresia funcției indiciale	Valorile constantelor de timp
$I = 0,4 \text{ A}$	PT_1	$42 \frac{dx_e(t)}{dt} + x_e(t) = 8x_i(t)$	$x_e(t) = 8(1 - e^{-t/42})$	$T = 42 \text{ s}$ $t = 126 \text{ s}$
$I = 0,6 \text{ A}$	PT_1	$49 \frac{dx_e(t)}{dt} + x_e(t) = 17,1x_i(t)$	$x_e(t) = 17,1(1 - e^{-t/49})$	$T = 49 \text{ s}$ $t = 147 \text{ s}$

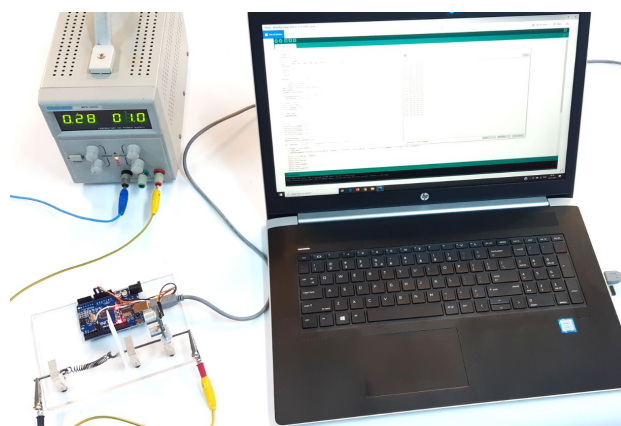


Fig. 5.21 Stand pentru determinarea răspunsului indical al arcului din nitinol

În tabelul 5.1 sunt prezentate expresiile modelelor matematice, ale funcțiilor indiciale și ale valorilor constantelor de timp pentru determinarea răspunsului indical al arcului din nitinol.

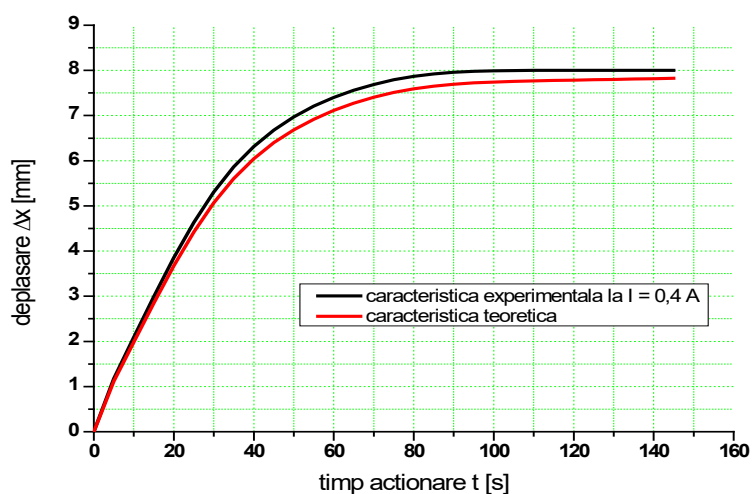


Fig. 5.22 Funcțiile indiciale, experimentală și teoretică, ale arcului din nitinol la semnalul treaptă aplicat ($I = 0,4 \text{ A}$)

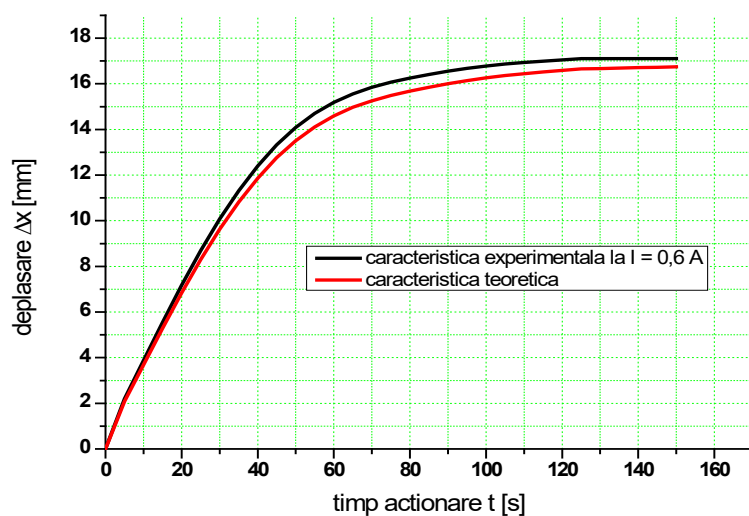


Fig. 5.23 Funcțiile indiciale, experimentală și teoretică, ale arcului din nitinol la semnalul treaptă aplicat ($I = 0,6 \text{ A}$)

5.6 CONCLUZII

1. Sistemul de zăvorâre descris prezintă câteva avantaje precum; simplitate constructivă, ecartament redus, capacitatea de a fi comandat la distanță dar și siguranța în exploatare.

2. În cazul primei variante, datorită micilor abateri constructive ale resortului de revenire care s-a dovedit mai puțin eficient, s-a recurs la o îmbunătățire a acestuia, caz în care revenirea a fost efectuată cu arcuri din nitinol similar acționării.

3. Varianta a doua prezintă câteva avantaje, evident fiind faptul că este mai ușor de controlat la acționări și reveniri, fiind simplu din punct de vedere constructiv și având un timp de acționare - revenire mai ușor de controlat și mai scurt.

4. Ținând cont de temperatura de tranziție a nitinolului de 45 °C, temperatura minimă de încălzire a arcurilor prin efect Joule, la trecerea curentului electric se obține o temperatură de aproximativ 56 °C, necesară pentru activarea sistemului, generând o forță de acționare de 7 N.

5. În urma testării sistemului la cele două temperaturi ambientale, s-au observat diferențe de funcționare ale acestora, sistemul fiind mult mai lent în cazul temperaturilor negative fapt ce demonstrează că temperatura mediului ambiant este un parametru important în cazul funcționării elementelor active din nitinol.

6. Varianta a doua are avantajul faptului ca sistemul este dotat cu arcuri din nitinol atât la acționare cât și la revenire, deoarece apare o compensare la schimbările bruște ale temperaturilor ambientale.

7. Pentru un control cât mai precis și un timp cât mai mic la acționare – revenire, sistemul poate fi îmbunătățit prin crearea unei incinte care sa izoleze elementele active față de curenții de aer și un microcontroler ce poate controla curentul absorbit de arcuri în funcție de temperatura mediului ambiant.

8. Pentru confirmarea comportării arcului din nitinol la variațiile de temperatură generate prin efect Joule prin aplicarea unui curent electric la capetele acestuia s-a folosit mediul de simulare Comsol Multiphysics. Rezultatele experimentale simulate demonstrează că arcul se deformează sub acțiunea unui curent electric, respectiv la temperaturi ridicate peste temperatura de tranziție. Datele obținute în urma simulării sunt asemănătoare cu cele obținute experimental prin testarea prototipului în cadrul laboratorului.

9. Încercările experimentale privind determinarea răspunsului indical, evidențiază faptul că, modelul matematic asociat elementului de tip arc din material cu memoria formei este o ecuație de ordinul întâi sau *sistem de ordinul întâi (PT1)*.

10. Regimul tranzitoriu al elementului de tip arc din nitinol este influențat de temperatura mediului ambiant și de micile erori constructive ale standului de testare. Pentru a diminua aceste dezavantaje, se poate realiza o izolare termică a elementului testat și o precizie ridicată a măsurătorilor privind deplasarea acestuia în timp.

Capitolul 6

CONTRIBUȚII PRIVIND PROIECTAREA, REALIZAREA ȘI TESTAREA UNEI TERMOCUPLEI TIP AMBREIAJ

[19], [148]

6.1 NOȚIUNI GENERALE

În aplicațiile cu revenire liberă a AMF (*aliaje cu memoria formei*), singura funcție este de a produce mișcare și deformare prin EMF (*efect de memorie a formei*). La proiectarea aplicațiilor cu revenire liberă, se urmărește mișcarea maximă disponibilă și deformarea necesară pentru atingerea acestui maxim. O altă problemă o reprezintă diferența dintre comportarea de memorie a formei proiectată și cea reală [19].

Spre deosebire de revenirea liberă, revenirea reținută constă în împiedicarea redobândirii prin EMF a formei calde, din cauza unei constrângeri externe. Această formă de revenire poate duce la tensiuni destul de ridicate și această caracteristică stă la baza celor mai vechi aplicații ale aliajelor cu memoria formei. Aceste aplicații se referă la dispozitive de cuplare sau fixare dar și aplicații spațiale. Se realizează astfel un tip de îmbinare superioară celor mecanice, datorită dezvoltării unor tensiuni insensibile la variații termice, tensiuni care sunt foarte fiabile și cu precizie determinate. La aceste îmbinări, AMF este împiedicat să efectueze ciclul complet de transformare, datorită unui histerezis de transformare majorat [19].

6.2 PROIECTAREA TERMOCUPLEI TIP AMBREIAJ

Termocupla tip ambreiaj (fig. 6.2) [148] este constituită dintr-un tambur 1 din material metalic termoconductor, în interiorul căruia se află un sistem rotativ independent de tamburul 1 și care este constituit din elemente cu memoria formei 5, 5', 5'', 5''', memorate în formă arcuită, fiind prinse la un capăt de flanșă 6 ce face corp comun cu axul condus 7. La celălalt capăt sunt prinse dispozitivele de cuplare de tip ferodou 4 și 4', ce au rolul de a face contact cu partea 2 din interiorul tamburului.

Termocupla tip ambreiaj realizează cuplarea sau decuplarea unor sisteme aflate în mișcare de rotație față de un alt sistem, de ventilație de exemplu. Aceasta poate fi cuplată pe axul unui motor electric prin intermediul axului 3, iar când acesta atinge o temperatură impusă, elementele active din nitinol își vor modifica forma, deplasând ferodourile, acestea la rândul lor realizând cuplarea prin fricțiune a sistemului de ventilație transmis prin axul 7, fapt ce va determina scăderea temperaturii de funcționare a sistemului, care ulterior, va duce la decuplarea sistemului de ventilație, elementele din nitinol revenind în starea inițială.

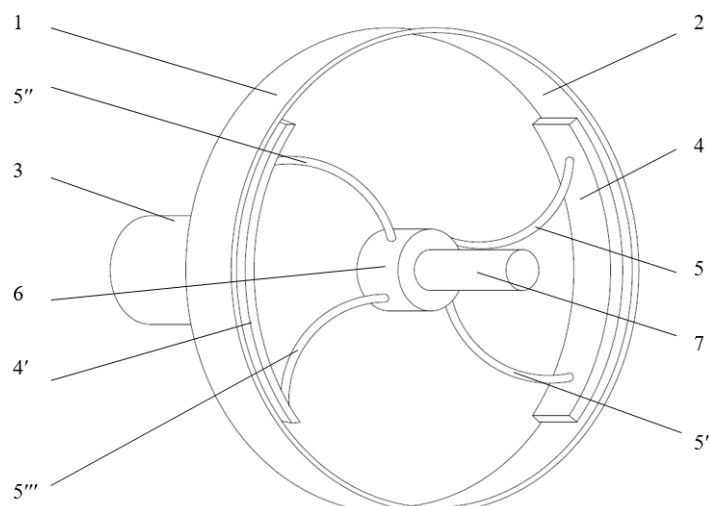


Fig. 6.2 Termocupla tip ambreiaj [148]

1 – tambur; 2 – zonă de contact; 3 – ax motor; 4, 4' - material de fricțiune (ferodou);
5, 5', 5'', 5''' – elemente din material cu memoria formei; 6 – flanșă; 7 – ax condus;

6.3 REALIZAREA ȘI TESTAREA TERMOCUPLEI TIP AMBREIAJ

Varianta experimentală de testare a termocuplei tip ambreiaj este prezentată în figura 6.3. În standul experimental realizat s-a utilizat un motor de curent continuu de mică putere, tamburul fiind montat pe axul acestuia. Sistemul independent de ventilație este plasat axial în interiorul tamburului, astfel încât să asigure o rotire a acestuia independentă față de motor.

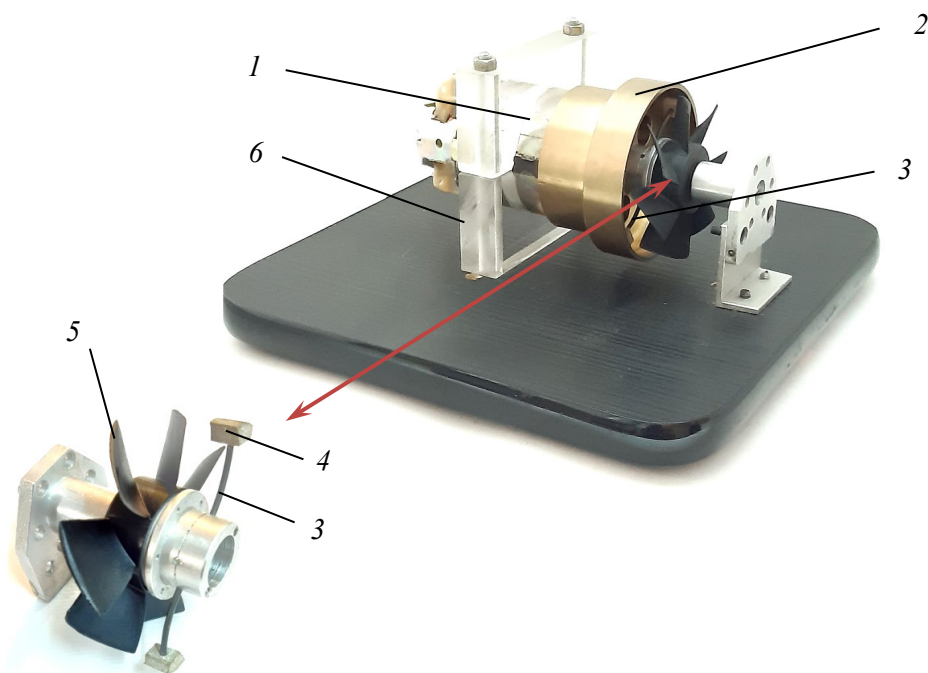


Fig. 6.3 Standul experimental pentru termocupla tip ambreiaj

1 – motor electric; 2 – tambur; 3 – element activ din nitinol;
4 – material de fricțiune (ferodou); 5 – ventilator de răcire; 6 – suport.

6.3.1 Testarea experimentală a termocuplei tip ambreiaj

Testarea termocuplei tip ambreiaj s-a realizat în condiții de temperatură a mediului ambiant de 26 °C, sursa de căldură fiind generată cu o turbosuflantă.

În primă etapă, s-a stabilit o viteză de rotație a motorului de aproximativ 1000 rpm și s-a realizat o simulare de supraîncălzire a motorului prin încălzirea acestuia cu ajutorul unui pistol cu aer cald. Inițial sistemul de ventilație este în poziție de repaus, până când elementele din nitinol își vor modifica forma după atingerea temperaturii de tranziție.

Analizând cele două imagini preluate cu camera de termoviziune se poate vizualiza distribuția temperaturii pe întreg ansamblul. Prima imagine (fig. 6.4 a.) reprezintă momentul în care temperatura atinge pragul de cuplare a sistemului de ventilație și începe să se rotească cu aceeași viteză de rotație cu motorul. După cuplarea sistemului de ventilație, acesta a funcționat timp de 25 secunde, timp în care s-a realizat răcirea motorului, respectiv retragerea ferodourilor și decuplarea ventilatorului, sistemul revenind în poziția de repaus. La decuplare, temperatura motorului scade semnificativ, atingând valori de aproximativ 45 °C (fig. 6.4 b.), moment în care elementele din nitinol revin la poziția inițială, memorată în forma curbată.

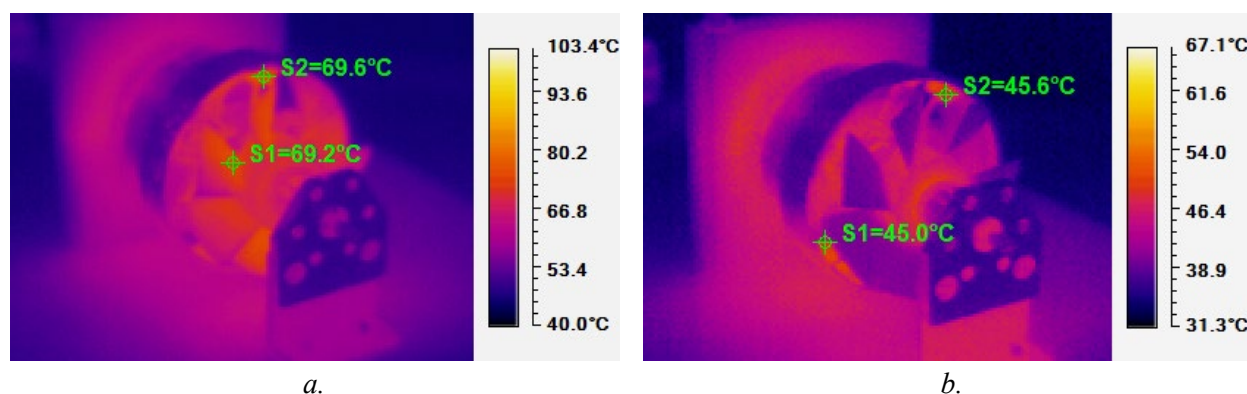


Fig. 6.4 Harta temperaturilor în momentul funcționării sistemului
a) – în timpul cuplării; b) – după decuplarea ventilației

S-a folosit un traductor de cuplu (dinamometru digital) de tip IMADA Zlink 3 cuplat pe axul sistemului de ventilație pentru a determina cuplul de frânare în momentul supraîncălzirii și activării elementelor din nitinol.

Determinarea cuplului de frânare s-a realizat la temperatura mediului de 24,8 °C. În aceste condiții, s-a urmărit evoluția temperaturii din interiorul tamburului, măsurată cu senzorul de temperatură 5 caz în care încălzirea motorului s-a realizat cu turbosuflanta 6. Motorul 1 a fost alimentat de la sursa de curent continuu, obținând o viteză de rotație de aproximativ 800 rpm. Sistemul de ventilație 2, fiind independent de axul motorului, este cuplat la traductorul de cuplu 3 ce va indica valoarea cuplului pe interfața 4.

În momentul creșterii temperaturii din interiorul tamburului care este comun cu axul motorului, elementele din nitinol vor tinde să se deformeze spre forma memorată la cald, fapt ce va determina un contact a ferodourilor cu interiorul tamburului. Cu cât temperatura este mai mare, cu atât contactul dintre acestea va fi mai ferm, frânarea fiind monitorizată prin intermediul traductorului de cuplu.

Graficul din figura 6.6 prezintă caracteristica temperatură – cuplu de frânare în cazul analizei comportării elementelor din nitinol într-o situație reală de funcționare din care se poate

determina și alege temperatura de tranziție a elementelor active din nitinol în funcție de regimul de lucru al motorului utilizat.

În cazul arcurilor din nitinol ale sistemului de ventilație, care au temperatura de tranziție de aproximativ 65 °C, din grafic putem observa valoarea temperaturii în interiorul tamburului, respectiv temperatura elementelor active la care acestea se deformează, realizând contactul dintre ferodou și tambur, fiind realizată cuplarea, determinând astfel cuplul de frânare datorat sistemului de ventilație.

Cuplul de frânare crește odată cu creșterea temperaturii sârmelor din nitinol până la o valoare, când cuplajul va fi complet și motorul se va opri. În cazul de față, motorul s-a oprit la un cuplu de 0,05 Nm iar temperatura înregistrată a fost de aproximativ 80 °C.

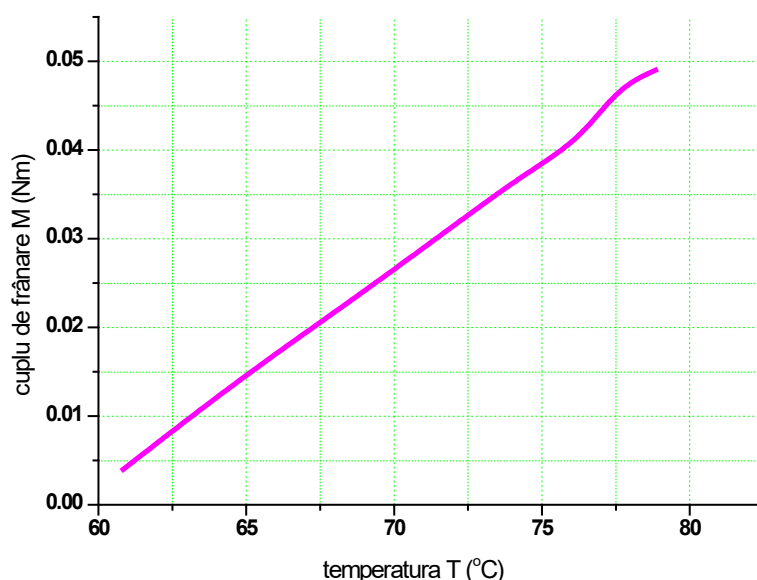


Fig. 6.6 Caracteristica cuplului de frânare în funcție de temperatura din interiorul tamburului, respectiv a elementelor active din nitinol

6.4 CONCLUZII

1. În cadrul Centrului de Cercetare EMAD al USV, s-a dezvoltat aplicația denumită termocuplă tip ambreiaj în care s-a pus în evidență comportarea nitinolului sub o formă curbă, ca element activ al termocuplei, aceasta fiind memorată de către autor.

2. Elementele din nitinol utilizate în aplicație sunt din sârmă din aliaj cu memoria formei, activându-se la temperatura de tranziție de 65 °C, având un diametrul de 2 mm și lungimea de 25 mm, fiind memorate în dublu sens, în formă dreaptă la cald și în formă curbată la rece, ceea ce permite generarea unor forțe semnificativ mari ce pot fi utilizate în aplicații industriale.



Fig. 6.7 Forma memorată a sârmei din nitinol

a. – forma memorată la cald; b. – forma memorată la rece

3. În cadrul proiectării și realizării termocuplei s-a observat că, pentru varianta prototipului realizat în laborator, aplicația poate utiliza doar două astfel de elemente dispuse radial și în sensuri opuse, deoarece dimensiunile constructive ale tamburului sunt reduse și forța necesară cuplajului este redusă.

4. În cazul unor aplicații de dimensiuni mai mari sau chiar industriale, aceste elemente pot fi multiplicare, oferind o forță de apăsare, o uniformizare a forțelor pe suprafața tamburului respectiv un cuplu de frânare mai mare dar și un contact mai sigur între materialul de fricțiune și tambur. Un avantaj deosebit față de alte materiale folosite în cadrul acestor sisteme de cuplare ce se pot deforma termic reprezintă capacitatea de a memora o anumită formă a nitinolului la diferiți parametri geometrice, în funcție de necesitatea aplicației și totodată se poate alege temperatura la care acestea se activează.

5. Analizând rezultatele experimentale în cazul termocuplei tip ambreiaj, proiectată, realizată și testată în cadrul laboratorului de cercetare, s-au obținut informații cu privire la funcționarea acesteia. La pornirea motorului și simulând totodată supraîncălzirea acestuia, sistemul de ventilație v-a rămâne în repaus, ceea ce constituie un avantaj relativ la eficiența motorului, până când sistemul atinge o temperatură de aproximativ 70 °C, moment în care se realizează cuplarea ventilației până la scăderea temperaturii sub valoarea critică. În acest timp, motorul se v-a răci până la aproximativ 45 °C și se v-a realiza decuplarea ventilatorului, până la sesizarea unei noi supraîncălziri a motorului în cauză.

6. Pentru a evidenția o comportare a elementelor din nitinol utilizate în această aplicație, s-a trasat o caracteristică a cuplului de frânare în funcție de temperatura de activare; pentru modelul analizat cuplul minim la care se realizează contactul realizându-se la aproximativ 60 °C, iar la cuplul maxim este de 0,047 Nm, când motorul va fi frânat până la oprire.

7. Această aplicație aduce o serie de avantaje legate de pierderile mecanice prin ventilație ale motorului care în general sunt de aproximativ 12 %. Modelul propus oferă o diminuare a acestor pierderi printr-o funcționare intermitentă doar atunci când este sesizată o supraîncălzire a sistemului. De asemenea, din punct de vedere constructiv este ușor de realizat și poate fi integrat la orice sistem rotativ ce necesită ventilație.

8. Termocupla tip ambreiaj este propusă pentru brevetare și poate fi utilizată în diverse dispozitive ce necesită ventilație în funcționare, cu utilizarea judicioasă a cuplurilor și puterii provenite de la echipamentul de acționare sau pentru menținerea temperaturii în incinte mici ce conțin elemente în mișcare de rotație ce funcționează cu sarcină variabilă.

9. Avantajele utilizării aliajelor de tip nitinol constau în posibilitatea memorării formei în cele două stări distincte și particularizarea elementelor la o gama foarte largă de aplicații și structuri mecanice.

Capitolul 7

CONCLUZII GENERALE

Teza de doctorat „*Contribuții teoretice și experimentale privind realizarea unor actuatori și motoare speciale folosind materiale cu memoria formei*” are la bază studii ce continuă preocupările colectivelor de cercetare din cadrul Centrului de Cercetare EMAD al Universității Ștefan cel Mare din Suceava în domeniul materialelor inteligente și care se bazează pe dezvoltarea unor actuatori și motoare speciale utilizate în industriile medicale și a automobilelor.

În acest capitol sunt prezentate principalele concluzii ale autorului cu privire la cercetările aplicative desfășurate în perioada elaborării tezei, în special legate de proiectarea, realizarea și testarea unor aplicații ce au la bază elemente active din material cu memoria formei, respectiv contribuțiile teoretice și experimentale ale autorului și principalele direcții de viitor în vederea cercetării aprofundate în domeniul materialelor inteligente.

7.1 CONTRIBUȚIILE TEORETICE ALE LUCRĂRII

a. O primă contribuție teoretică reprezintă elaborarea unui studiu asupra modului de obținere a aliajelor inteligente, a aplicațiilor tehnice precum și a celor legate de infrastructură, acestea clasificându-se în patru categorii și anume:

- aliaje cu memoria formei;
- materiale ceramice piezoelectrice;
- materiale magnetorezistive;
- fluide energetice.

b. A fost realizat un studiu amănunțit cu privire la aliajele cu memoria formei plecând de la clasificarea materialelor inteligente. Acestea au capacitatea de a-și modifica proprietățile sub acțiunea unor stimuli externi sau modificarea formei și revenirea la forma inițială după încetarea stimulului, fiind cauzate de obicei de schimbări ale temperaturii sau sub acțiunea unui curent electric. Lucrarea prezintă un istoric al descoperirilor din domeniul acestor tipuri de materiale precum și descrierea mecanismelor ce conduc la aceste proprietăți speciale.

c. Au fost studiate metodele de obținere ale aliajelor cu memoria formei, cele trei etape fiind: elaborarea (obținerea), tratamentul termic primar și obținerea formelor la cald și la rece. Totodată au fost studiate și comportările termomecanice ce apar la aliajele cu memoria formei, pseudoelasticitatea de maclare și pseudoelasticitatea de transformare sau superelasticitatea aceasta conducând la multiple aplicații în domeniul medical.

d. Au fost realizate analize și studii documentare cu privire la efectele de memorie ale nitinolului, atât în simplu sens cât și în dublu sens, fapt demonstrat și experimental prin încercări de a-l memora în diferite forme, având în vedere un factor important și anume temperatura de tranziție la care acesta se activează.

e. A fost analizată comportarea termomecanică a martensitelor termoelastice din perspectiva proprietății de pseudoelasticitate (PSE).

f. În urma documentării asupra modului de funcționare ale nitinolului, au fost studiate aplicațiile actuale cu elemente active din nitinol pe plan mondial și o clasificare a domeniilor de utilizare, fapt ce a condus la dezvoltarea unor noi aplicații practice ce evidențiază comportarea aliajelor cu memoria formei în diferite domenii aplicative. Au fost trecute în revistă principalele tipuri de actuatoare și motoare cu nitinol dezvoltate pe plan mondial.

g. S-a realizat un studiu documentar cu privire la dezvoltarea domeniului aplicativ, proiectarea, construcția, testarea și brevetarea unor modele actuatoarele cu materiale cu memoria formei în cadrul Centrului de cercetare EMAD al Universității din Suceava și contribuția echipelor de cercetare de aici în dezvoltarea domeniului.

7.2 CONTRIBUȚIILE EXPERIMENTALE ALE LUCRĂRII

a. O primă contribuție experimentală constituie proiectarea, realizarea și testarea a trei variante de standuri în care sunt evidențiate diferite aspecte cu privire la comportarea nitinolului sub influența temperaturii sau acțiunea curentului electric. În prima variantă este prezentat un stand în care este măsurată forța unor elemente din nitinol sub formă de arc, încălzite indirect cu ajutorul unei termorezistențe. Varianta a doua presupune monitorizarea parametrilor, cu ajutorul unor senzori și a unui microcontroler a elementelor din nitinol, fiind încălzite prin efect Joule la trecerea curentului electric prin acestea. Pentru testarea rezistenței la oboseală s-a realizat un stand ce are rolul de a supune elementele active la cicluri repetate (încălzire – răcire), controlate prin intermediul curentului electric în care s-a realizat un studiu comparativ a acestora.

b. Realizarea și constituirea Depozitului Național Reglementar, în vederea brevetării unui stand de încercări pentru materiale cu memoria formei cu rolul de a testa și evalua caracteristicile materialelor din nitinol, încălzite direct sau indirect, pentru a înțelege modul cum acestea pot fi folosite în aplicații.

c. În urma testării elementelor din nitinol, a fost proiectat, realizat și testat un sistem de control al fluidelor de tip picurător și micropompă, acționat cu materiale inteligente, destinate dozării fixe a unor fluide. În funcție de modul de dispunere serie / paralel a elementelor din nitinol, curenți electrici de comandă sunt diferiți pentru a se obține temperaturile de lucru optime a elementelor active, ceea ce va determina alegerea sursei de alimentare și evaluarea nivelelor de control necesare.

d. A fost proiectat și dezvoltat un sistem de control al presiunii sau vidului într-o incintă, sistem ce utilizează elemente active din nitinol sub formă de arc, controlate prin intermediul curentului electric. În urma preluării datelor experimentale, s-au obținut o serie de caracteristici ce evidențiază controlul constantei elastice a arcurilor din nitinol, respectiv, controlul presiunii create în incintă cu o precizie ridicată. Echipamentele realizate, testate și propuse spre brevetare pot fi automatizate ușor prin utilizarea unui microsistem ce comandă alimentarea fiecărui element activ prin intermediul unei plăci cu releu.

e. Realizarea și constituirea Depozitului Național Reglementar, în vederea brevetării unui picurător acționat cu materiale inteligente, ce constituie un sistem de control pentru fluide fiind

evidențiate caracteristicile de comportare a nitinolului superelastice sub formă de arc, destinat dozării fixe al fluidelor.

f. Realizarea și constituirea Depozitului Național Reglementar, în vederea brevetării unei micropompe de vid și presiune, acționate cu arcuri din nitinol controlate electric.

g. A fost proiectat și realizat sistemul de zăvorâre ce se bazează pe principiul de funcționare al materialului cu memoria formei cu rolul de a se manifesta prin acționarea unui sistem de blocare având destinația zăvorârii ușilor și obloanelor, în special în domeniul automobilelor. A fost abordată și o modelare a elementului sub formă de arc din nitinol, în programul de simulare Comsol Multiphysics și o modelare matematică cu privire la răspunsul indical al arcului.

h. Realizarea și constituirea Depozitului Național Reglementar, în vederea brevetării unui sistem de zăvorâre cu nitinol, ce se referă la un sistem de blocare realizat pe baza unor elemente din nitinol sub formă de arc, după ce acestea au fost testate pe standurile de testare prezentate în capitolul 3.

i. S-a proiectat, realizat și testat o aplicație ce poate fi introdusă cu ușurință în industrie și care are rolul de a cupla sau decupla două sisteme independente, un motor și un ventilator, cuplarea realizându-se la o temperatură dată a motorului. Elementele din nitinol utilizate în aplicație sunt din sârmă din aliaj cu memoria formei, activându-se la temperatura de tranziție de 65 °C, cu diametrul de 2 mm și o lungime de 25 mm, fiind memorate în dublu sens, în formă dreaptă la cald și în formă curbată la rece, ceea ce permite generarea unor forțe semnificativ mari ce pot fi utilizate în aplicații industriale.

j. Realizarea și constituirea Depozitului Național Reglementar, în vederea brevetării unei termocuple tip ambreiaj cu rolul de a cupla / decupla unele sisteme aflate în mișcare de rotație față de un sistem de ventilație, utilizând sârmă memorată în dublu sens.

k. În urma testării elementelor din nitinol în diferite condiții și prin dezvoltarea aplicațiilor în Laboratorul de inventică și transfer tehnologic al Universității din Suceava, s-au pus în evidență câteva aspecte cu privire la comportarea materialului cu memoria formei și anume:

- prezintă o caracteristică neliniară în funcționare;
- este puternic influențat de temperatura mediului ambiant și de curenții de aer;
- punctul temperaturii de tranziție reprezintă un aspect foarte important în alegerea aliajului pentru diverse aplicații;
- poate fi controlat cu ușurință prin alimentarea acestuia la o sursă de tensiune, având posibilitatea de a genera forța necesară în funcție de curentul electric aplicat;
- se găsește sub formă de arcuri și sârmă dreaptă, fiind necesară memorarea acestuia la anumite forme în funcție de necesitate;
- metodele de memorare sunt complexe, fiind necesare temperaturi ridicate constante și menținerea la forma de memorare, repetând mai multe cicluri până se setează la forma dorită;
- sistemele ce folosesc acționări folosind materiale cu memoria formei au fiabilitate ridicată, simplitate constructivă și avantaje în ceea ce privește gabaritul și masa;

- permit dezvoltarea a numeroase aplicații, domeniile de aplicare fiind de la industria jucăriilor, industria energetică, automatizări, industria automotive și industria aerospațială până la domeniul ingineriei medicale.

7.3 DIRECȚII ULTERIOARE DE CERCETARE

Studiile realizate deschid noi orizonturi privind utilizarea aliajelor cu memoria formei în industrie din perspectiva dezvoltării durabile astfel:

1. Determinarea comportării materialelor cu memoria formei în diferite medii, precum lichide și gazoase prin controlarea unor echipamente cu ajutorul curentului electric.
2. Cercetări teoretice și experimentale în vederea realizării de noi sisteme acționate cu materiale cu memoria formei, în special în domeniul automobilelor al ingineriei spațiale și al medicinei.
3. Dezvoltarea unor motoare și actuatoare speciale ce pot fi utilizate la orientarea solară a panourilor fotovoltaice în cazul unor condiții meteorologice nefavorabile.
4. Dezvoltarea unor sisteme de acționare ce folosesc ape uzate din industrie și recuperarea energie termice din acestea.

REFERINȚE BIBLIOGRAFICE

- [1]. ABBOTT, J.A. *Radiant heat engine*. Int. Cl.⁴: F03 G 7/06. Brevet US, 4598550. 1986-07-08.
- [2]. ALDEA, F.; TĂNESCU, S. *Bimetalul și aplicațiile lui în electrotehnică*. București: Editura Tehnică, 1973.
- [3]. ALTANI, K. *Shape memory alloy motor as incorporated into solar tracking system*, US Patent Application, No US 2007/0074753 A1, 2007-04-05.
- [4]. A., KOPELLOVICI, P., *Sistem de reglare automată. Metode de calcul ingineresti*. București: Editura Tehnică, 1963.
- [5]. BABĂȚĂ, G. I. *Studiul materialelor cu memoria formei*. Proiect de diplomă. Universitatea Ștefan cel Mare din Suceava, Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, Suceava, 2011.
- [6]. BANKS, R. *Energy conversion system*. Int. Cl.²: F01B 29/00. US Patent, No 3 913 326, 1975-10-21.
- [7]. BANKS, R. *Laterally oscillating nitinol engine*. Int. Cl.⁴: F03G 7/06. US Patent, No 4 691 517, 1987-09-08.
- [8]. BANKS, R. *Linear output nitinol engine*. Int. Cl.⁴: F03G 7/06. US Patent, No 4 563 876, 1986-01-14.
- [9]. BANKS, R. *Vertically oscillating heat engine*. Int. Cl.⁴: F03G 7/06. US Patent, No 4 691 518, 1987-09-08.
- [10]. BAUMBICK, R.J. *Shape memory alloy actuator*. Int. Cl.⁷: F01 B 29/10. Brevet US, 6151897. 2000-11-28.
- [11]. BĂLĂ, V.C. *Mașini electrice. Teorie și încercări*. București: Editura Didactică și Pedagogică, Ed. a 2-a, 1982.
- [12]. BLOCH, J.T. *Rotary actuator utilizing a shape memory alloy*. Int. Cl.⁴: F03 G 7/06. Brevet US, 4761955. 1988-08-09.
- [13]. BREMER, H. *Electrical heat motor*. Brevet US, 764518. 1904-07-05.
- [14]. BRUDNICKI, M.J. *Rotary actuator*. Int. Cl.⁶: F03 G 7/00. Brevet US, 5396769. 1995-03-14.
- [15]. BUJOREANU, L.Gh. *Materiale inteligente*. Iași: Editura Junimea, 2002
- [16]. BUJOREANU, L.Gh; SACARESCU, G. *Materiale nemetalice cu memoria formei. Structura - proprietăți - aplicații*. Iași: Editura Junimea, 2002
- [17]. BUZDUGA, C.; NEGRU, M.; SOREA, N. et. al. *Dispozitiv de picurare*. Cerere de Brevet de Invenție nr. A/00331 din 21.04.2009, O.S.I.M. București.
- [18]. BOSTAN, I.; DULGHERU, V.; SOBOR, I.; BOSTAN, A.; SOCHIREAN, A. *Sisteme de conversie a energiilor regenerabile*. Chișinău: Editura TEHNICA-INFO, ISBN: 978-995-63-076-4, 2007.
- [19]. CALUGARU, G.; BUJOREANU, L.G.; STANCIU, S.; et. al. *Memoria formei. Fenomene și aplicații în știința materialelor*. ISBN 973-9150-50-0, Editura „Plumb”, Bacău, 1995.

- [20]. CERNOMAZU, D. *Brevetarea invențiilor în România*. Suceava: Editura Universității „Ștefan cel Mare”, 1997, p.32-68.
- [21]. CERNOMAZU, D.; MANDICI, L.; COJOCARU, I.; MĂCINCĂ, I.; PENTIUC, R.; POPA, C.; BARBĂ, N.; MINESCU, D.; MILICI, M.; MILICI, D.; RAȚĂ, M.; MELINTE, H.; CHIȘ, L. *Contribuții la optimizarea instalațiilor pentru conversia energiei solare*. Contract de cercetare nr. 5016/1996, Universitatea „Ștefan cel Mare” Suceava, Facultatea de Inginerie Electrică, Beneficiar: Ministerul Învățământului, 1996, p.12.
- [22]. CERRUTI, D. Thermal actuation device. Int. Cl.7: H05 B 1/02. Brevet US, 6121588. 2000-09-19.
- [23]. CERNOMAZU, D.; MANDICI, L.; MELINTE, H. et al. *Motor solar*. Brevet RO 118241 B, O.S.I.M. București.
- [24]. CERNOMAZU, D.; MINESCU, D.; UNGUREANU, C.; NEGRU, M.B.; PRODAN, C. *Contribuții la realizarea și experimentarea unor motoare neconvenționale*. Comunicare susținută la Conferința Națională a Energiei, Regional Energy Foren 2002, 9-13 iunie, Neptun-Olimp, România.
- [25]. CERNOMAZU, D.; RAȚĂ, M.; Ciobanu, C. *Tehnici de conversie a energiei – îndrumar de laborator*. Suceava: Editura Universității, Universitatea „Ștefan cel Mare”, Suceava, 2000.
- [26]. CERNOMAZU, D.; UNGUREANU, C.; SAVU, E.; MINESCU, D. [et. al.] *Contribuții privind realizarea și experimentarea unor motoare neconvenționale la universitatea din Suceava*. In: ECOTEHNOLOGII 2003 - Creșterea eficienței proceselor de creație tehnică, 19-22 Iunie 2003, Iași, Romania, ISBN: 973-8075-90-4, p.174-181.
- [27]. CYDZIK, E.; *The design of electrical interconnection systems with shape memory alloys*. Raychem Corporation, Menlo Park, CA, 1990.
- [28]. CHASE, T.H.; WEIGEL, L.M. *Solar orientation device*. Int. Cl.: F03 G 7/06. Brevet US, 3630020. 1971-12-28.
- [29]. COLAN, H.; TUDORAN, P.; AILINCĂI, G.; MARCU, M.; *Studiul materialelor*. Editura didactică și pedagogică, București, 1983.
- [30]. CORY, J. *Solid state heat engine*. Int. Cl.3: F03G 7/06. US Patent, No 4 305 250, 1981-12-15.
- [31]. CORY, J. *Variable density heat engine*. Int. Cl.²: F03G 7/06. US Patent, No 4 027 479, 1977-06-07.
- [32]. DĂNESCU, A.; BUCURENCIU, S.; STOIAN P. *Utilizarea energiei solare*. București: Editura Tehnică, 1980.
- [33]. DUERING, T.W; MELTON, K.N; STOCKEL, D.; *Engineering aspects of shape memory alloys*. Butterworth-helnemann, 1990.
- [34]. DULGHERU, V.; CANTEMIR, D.; CARCEA, M. *Manual de creativitate*. Chișinău: Editura Tehnica- Info, 2000.
- [35]. DEZELLUS. A.; OCHIN, P.; *Shape memory thin round wires produced by the inrotating water melt-spinning technique*. Acta Mater, 2006.
- [36]. ERHAN, V. *Brevetarea invențiilor în România*. București: Editura Economica, 1998, p.15-204.
- [37]. EVANGER, J. A. *Energy conversion apparatus*. Int. Cl.5: F03B 9/00. US Patent, No 5 125 233, 1992-06-30.

- [38]. FALK, F.; *Model free energy, Mechanism and thermodynamics of shape memory alloys*. Acta Metall, 1980.
- [39]. FURUYA, Y.; SHIMADA, H.; *Shape memory actuators for robotic applications*. Butterworth-Heinemann, London, 1990.
- [40]. GÂDEA, S.; PETRESCU, M.; *Transformarea martensitică și bainitică, în Metalurgie fizică și studiul materialelor*. Vol.III, Editura didactică și pedagogică, București, 1983.
- [41]. GERU, N.; *Metalurgia fizică*. Editura didactică și pedagogică, București, 1981.
- [42]. GOLDSTEIN, D. *Heat engine based on shape memory alloys*. Int. Cl.⁵: F03 G 7/06. Brevet US, 4938026. 1990-07-03.
- [43]. GOLDSTEIN, D. *Heat engine with corrugated shape memory drive belt*. Int. Cl.⁵: F03 G 7/06. Brevet US, 4996842. 1991-03-05.
- [44]. GOLESTANEH, A.A. *Solid state engine using nitinol memory alloy*. Int. Cl.³: F03 G 7/06. Brevet US, 4302939. 1981-12-01.
- [45]. GOLESTANEH, A.A. *Solid state engine with alternating motion*. Int. Cl.³: F03 G 7/06. Brevet US, 4325217. 1982-04-20.
- [46]. GRESCHIK, G. *Expansion rotary engine*. Int. Cl.6: F03 G 7/00. Brevet US, 5901554. 1999-05-11.
- [47]. HENAULT, C. *Heat motor*. Int. Cl.5: F03 G 7/06. Brevet US, 5020325. 1991-06-04.
- [48]. HIBIDO, K.; TANGE, K.; NAGASHIMA, T. *Tracking solar module*. Int. Cl.7: H01L 31/052. US Patent, No 6 018 122, 2000-01-25.
- [49]. HOCHSTEIN, P.A. *Thermal energy converting assembly*. Int. Cl.²: F03 G 7/06. Brevet US, 4037411. 1977-07-26.
- [50]. *** <http://wikifoundryattachments.com/DjWjiAJGHPRRiwKLnZczg==961572>, accesat la data de 22.03.2016
- [51]. *** <http://www.ableelectropolishing.com/alloys-electropolished/nitinol/>, accesat la data de 08.02.2016
- [52]. *** <http://www.chemistrylearner.com/nitinol.html>, accesat la data de 17.05.2016
- [53]. *** <http://www.dynalloy.com/TechData.html>, accesat la data de 15.01.2015
- [54]. *** <http://www.fwmetals.com/services/resource-library/nitinol-wire/>, accesat la data de 18.05.2017
- [55]. *** <http://www.instron.us/en-us/testing-solutions/by-test-type/simple-cyclic/astm-2516>, accesat la data de 02.06.2017
- [56]. *** http://www.mec.tuiasi.ro/diverse/Curs_Actuatori_Neconv.pdf, accesat la data de 21.03.2017
- [57]. *** <http://mecanica.ucv.ro/Cercetare/Implant/Prezentare%20proiect.pdf>, accesat la data de 22.03.2017
- [58]. *** <http://www.micro-tech-europe.com/index.php?id=109>, accesat la data de 19.04.2017
- [59]. *** <http://www.rasfoiesc.com/inginerie/tehnica-mecanica/CERCETARI-PROPRII-PRIVIND-EDUC42.php>, accesat la data de 09.11.2016
- [60]. *** <http://www.rasfoiesc.com/inginerie/tehnica-mecanica/INTRODUCERE-IN-DOMENIUL-ALIAJE13.php>, accesat la data de 10.11.2016
- [61]. *** http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2176-94512017000100038, accesat la data de 05.12.2017
- [62]. *** http://www.sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/L.G.Bujoreanu-Mater_Nemetal_Mem_Formei.pdf, accesat la data de 10.11.2016

- [63]. ***<http://www.sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/MMF.pdf>, accesat la data de 14.11.2016
- [64]. *** <https://technology.nasa.gov/patent/LEW-TOPS-99>, accesat la data de 25.02.2017
- [65]. ***https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6390/03%20-%20Anexo_1%20-%20Anexos_PFC-Heura_Ventura_Casellas.pdf?sequence=2&isAllowed=y, accesat la data de 20.03.2017
- [66]. *** <https://www.hindawi.com/journals/amse/2013/823594/fig3/>, accesat la data de 28.06.2017
- [67]. *** <https://www.instructables.com/id/Electroplating-Nitinol-for-Soldering/>, accesat la data de 25.04.2018
- [68]. ***<https://www.medtronic.com/us-en/about/news/medtronic-studies-nitinol.html>, accesat la data de 25.04.2018
- [69]. *** <https://www.novastep-us.com/product/staple-fixation-system/>, accesat la data de 02.08.2016
- [70]. ***<https://www.saesgetters.com/sites/default/files/Presentation%20by%20F.%20Butera%20SAES%20Group.pdf>, accesat la data de 11.11.2016
- [71]. ***https://www.seas.es/blog/disenio_mecanico/materiales-con-memoria-de-forma-el-nitinol/, accesat la data de 12.01.2017
- [72]. HUNT, A. J. *Reciprocating solar engine*. Int. Cl.3: F03G 7/02. US Patent, No 4 452 047, 1984-06-05.
- [73]. JACOT, A.D.; CLINGMAN, D.J. *Shape memory rotary actuator*. Int. Cl.7: B64 L 27/00. Brevet US, 6065934. 2000-05-23.
- [74]. JEDER, M.; OLARIU, E.; UNGUREANU, C.; CERNOMAZU, D. *Motor solar gravitațional*. Cerere de brevet de Invenție nr. A/00325. În B.O.P.I. nr. 11, 2013, O.S.I.M. București.
- [75]. JOHNSON, A.D. *Shape memory alloy rotary actuator*. Int. Cl.5: H01 H 71/18. Brevet US, 4965545. 1990-10-23.
- [76]. JOHNSON, A.D. *Two-way shape memory alloy heat engine*. Int. Cl.3: F03 G 7/06. Brevet US, 4490976. 1985-01-01.
- [77]. JOHNSON, A.D.; KIRKPATRICK, P.F. *Field effect memory alloy heat engine*. Int. Cl.³: F03 G 7/06. Brevet US, 4281513. 1981-08-04.
- [78]. KITTERMAN, R.L. *Thermal engine*. Int. Cl.2: F03 G 7/06. Brevet US, 4014170. 1977-03-29.
- [79]. KUO, S.F. *Thermal conversion engine*. Int. Cl.2: F03 G 7/06. Brevet US, 4186558. 1980-02-05.
- [80]. KUTLUCINAR, I.V.; SAUL, A.M. *Heat converter engine using a shape memory alloy actuator*. Int. Cl.⁷: F01 B 29/10. Brevet US, 6226992 B1. 2001-05-08.
- [81]. LAPEYRE, J. M. *Solar engine*. Int. Cl.2: F01K 7/02. US Patent, No 3 984 985, 1976-10-12.
- [82]. LI, Y.T. *Nitinol engine for low grade heat*. Int. Cl.³: F03 G 7/06. Brevet US, 4302938. 1981-12-01.
- [83]. LOW, G.M.; CRAWFORD, R. *Solar energy powered heliotrope*. Int. Cl.: F03 G 7/06; F03 G 7/02. Brevet US, 3678685. 1972-06-25.
- [84]. MELTON, K.N.; MERCIER, O.; *Fatigue of NiTi thermoelastic martensites*. Acta Metall. 1979.
- [85]. MIYAZAKI, S.; IGO, Y.; *Effect of thermal cycling on the transformation temperature of*

NiTi alloys. Acta Metall, 1986.

- [86]. MOIGNIER, P.; CHENUT, G.; JABS, H. *Rotary actuator using shape memory*. Int. Cl.⁶: B64 G 1/44. Brevet US, 5975468. 1999-11-02.
- [87]. NOBUYUKI, N. *Thermal drive type motor*. Int. Cl.: H02 N 10/00. Brevet JP, 56157282. 1981-12-04.
- [88]. NOȚINGHER, P.; IFRIM, A. *Materiale electrotehnice*. București: Editura Didactică și Pedagogică, 1992.
- [89]. O'HARE, L. R. *Solar engine called, bellows solar engine*. Int. Cl.2: F02C 1/04. US Patent, No 4 179 893, 1979-12-25.
- [90]. O'HARE, L.R. *Bimetallic solar engine*. Int. Cl.⁴: F03 G 7/02. Brevet US, 4551978. 1985-11-12.
- [91]. O'HARE, L.R. *Wire engine*. Int. Cl.⁴: F03 G 7/06. Brevet US, 4759187. 1988-06-26.
- [92]. OTSUKA, G.K. *Shape memory alloy heat engine*. Int. Cl.⁶: F03 G 7/00. Brevet US, 5442914. 1995-08-22.
- [93]. PACHTER, J.J. *Engine*. Int. Cl.2: F03 G 7/06. Brevet US, 4150544. 1979-04-24.
- [94]. PATOOR, E.; EBERHARDT, A.; *Comportement pseudoelastique et effet de memoire de forme double sens. Application ala torsion du barreau cylindrique*. Traits term., 1990, pg. 43-48.
- [95]. PELLE, R.L. *Memory power engine*. Int. Cl.³: F03 G 7/06. Brevet US, 4407124. 1983-10-04.
- [96]. PELL, L.R. *Shape memory element engine*. Int. Cl.³: F03 G 7/06. Brevet US, 4393654. 1983-07-19.
- [97]. PERKINS, J.; *Shape memory effects in alloys*. Plenum Press, New York and London, 1975.
- [98]. PISCIUC, S.; *Studiul privind realizarea și funcționarea actuatorilor realizați cu materiale cu memoria formei*. Proiect de disertație. Universitatea Ștefan cel Mare din Suceava, Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, Suceava, 2011.
- [99]. RADULESCU, M.; *Studiul metalelor*. Editura didactică și pedagogică, București, 1982.
- [100]. ROBBINS, R. W. *Solar-energy-powered sun tracker*. Int. Cl.2: H24J 3/02; G01J 1/20. US Patent, No 4 027 651, 1977-06-07.
- [101]. RYUICHIRO, A. *Heat sensitive magnetic material heat engine*. Int. Cl: F03G 3/00, F03G 7/04. JP Patent, No 9 184 473, 1997-07-15.
- [102]. SABURI, T.; WAYMAN, C. M.; TAKATA, K.; *The shape memory mechanism in 18R martensitic alloys*. Acta metall, 1980.
- [103]. SANDOVAL, D.J. *Thermal motor*. Int. Cl.²: F03 G 7/06. Brevet US, 4010612. 1977-03-08.
- [104]. SANTIAGO, J. A. *Large force shape memory alloy linear actuator*. University of Florida, 2002
- [105]. SCHILLER, E.H. *Heat engine driven by shape memory alloys: prototyping and design*. Blacksburg: Thesis submitted to the Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for a degree of Master of Science in Mechanical Engineering, Virginia, S.U.A., 2002.
- [106]. SCHUR, G.O. *Gravity actuated thermal motor*. Int. Cl.2: F03 G 7/06. Brevet US, 4121420. 1978-10-24.

- [107]. SHIHOU, L.; GENG, L. *Prime motor using Curie point of material as power source*. Int. Cl.⁷: H02N10/00, CN Patent, No 1159836C, 2004-07-28.
- [108]. SHIN, M.C. [et. al.] *Twin-crank type heat engine*. Int. Cl.⁴: F01 B 29/10. Brevet US, 4683721. 1987-08-04.
- [109]. SINHA, A.K.; *Thermoelastic martensite, in Ferrous Physical Metalurgy*. Butterworth, 1989.
- [110]. SMITH, R.H. *Continuous loop shape memory effect heat engine*. Int. Cl.²: F03 G 7/06. Brevet US, 4117680. 1978-10-03.
- [111]. SMITH, W. K. *Compound memory engine*. Int. Cl.²: F03G 7/06. US Patent, No 4 086 769, 1978-05-02.
- [112]. SOREA, N. *Contribuții teoretice și experimentale privind perfecționarea motoarelor solare bazate pe conversia termomecanică*. Teză de doctorat. Suceava: Universitatea “Ștefan cel Mare”, Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, 2012.
- [113]. STACHOVIK, G.B.; McCORMICK, P.G.; *Shape memory behaviour associated with the R and martensitic transformation in a NiTi alloy*. Acta Metall, 1988.
- [114]. SWENSON, S.R. *Shape memory bi-directional rotary actuator*. Int. Cl.⁵: F03 G 7/06. Brevet US, 5127228. 1992-07-07.
- [115]. TANAKA, H.; KOHDA, M.; OKUDA, T. *A study of the high-power nitinol heat engine*. In: 20th Intersociety Energy Conversion, 1985, Vol. 2, p.2729-2734.
- [116]. TANAKA, M.; KEIZO, S. *Conveyance device*. Int. Cl.⁵: F03 G 7/06. Brevet US, 5031711. 1991-07-16.
- [117]. TSUYOSHI, T. *Method of converting heat energy into mechanical energy and heat engine*. Int. Cl.⁵: H02 N 11/00. Brevet JP, 3011985. 1991-01-17.
- [118]. TSUYOSHI, T.; TAKESHI, K. *Conversion of heat energy into mechanical energy and heat engine*. Int. Cl.⁴: H02 N 11/00. Brevet JP, 1259765. 1989-10-17.
- [119]. UNGUREANU, C. *Contribuții teoretice și experimentale privind realizarea și experimentarea unor motoare electrice solare*. Teză de doctorat. Suceava: Universitatea “Ștefan cel Mare”, Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, 2011.
- [120]. UNGUREANU, C. *Contribuții teoretice și experimentale privind realizarea și experimentarea unor motoare electrice solare*. Suceava: Referat III, în cadrul programului de pregătire pentru doctorat. Conducător științific: Prof. dr. ing. Dorel Cernomazu, Universitatea „Ștefan cel Mare”, Facultatea de Inginerie Electrică, Suceava, 2002.
- [121]. UNGUREANU, C. *Contribuții teoretice și experimentale privind realizarea unor motoare electrice solare*. Grant nr. 33361/29.06.2004, cod CNCIS 62, tip proiect TD: Tema nr. 2, Etapa 2004 - Trecerea de la modelele demonstrative deja realizate, la modele experimentale și prototipuri în domeniul motoarelor solare electrice de viteză medie și de viteză redusă (cu rotor rulant și cu rotor flexibil) care să facă posibilă trecerea la realizări cu aplicabilitate industrială. Universitatea “Ștefan cel Mare” Suceava, Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, Suceava, 2004.
- [122]. UNGUREANU, C. *Stadiul actual al cercetărilor privind motoarele și micromotoarele solare -Referat II în cadrul programului de pregătire pentru doctorat*. Conducător științific: prof. univ. dr. ing. Dorel Cernomazu, Universitatea „Ștefan cel Mare”, Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, Suceava, 2002.
- [123]. UNGUREANU, C.; CERNOMAZU, D. *Motoare Electrice Solare de Construcție*

Specială. București: Editura Matrix Rom, 2012.

- [124]. UNGUREANU, C.; CERNOMAZU, D. *Motoare solare. Culegere documentară din literatura de brevete*. Suceava: Universitatea „Ștefan cel Mare” din Suceava, Vol. II, 2010, p. 551.
- [125]. UNGUREANU, C.; MINESCU, D.; PRODAN, C.; NEGRU, M.B.; CERNOMAZU, D. *Stadiul actual al cercetărilor în domeniul motoarelor solare*. Comunicare susținută la Conferința Națională a Energiei, Regional Energy Foren, 9-13 iunie, Neptun-Olimp, România, 2002.
- [126]. WAHLIG, M.A. [et. al.] *Nitinol engine development*. Solar Energy Program - Energy @ Environment Division, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, S.U.A., March, 1981, p.11-13.
- [127]. WAKJIRA, J.F. *The VT1 shape memory alloy heat engine design*. Blacksburg: Thesis submitted to the Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for a degree of Master of Science in Mechanical Engineering, Virginia, S.U.A., 2001.
- [128]. WAYMAN, C.M. *Solid state thermal engine*. Int. Cl.³: F03 G 7/06. Brevet US, 4246754. 1981-01-27.
- [129]. WECHSLER, M.S. *Apparatus for recovery and use of waste thermal energy*. Int. Cl.⁵: F03 G 7/00. Brevet US, 5279123. 1994-01-18.
- [130]. WEINERT, F. *Heat expansion machine*. Int. Cl.³: F03 G 7/02. Brevet US, 4236377. 1980-12-02.
- [131]. WHITE, F.W. *Linear force generator and heat engine embodying same*. Int. Cl.²: F03 G 7/06; F03 G 7/06. Brevet US, 4041706. 1977-08-16.
- [132]. WIELD, D.V.; GILLAN, E. *Deformation behaviour of Cu-Zn-Si alloys close to their martensitic transformation temperature*. Acta Metall, 1977.
- [133]. WU, S.K.; KHACHATURIAN, A.G.; *Superstructure of interstitial ordering of oxygen in TiNi alloys*. Acta Metall, 1988.
- [134]. WU, S.K.; WAYMAN, C.M. *Interstitial ordering of hydrogen and oxygen in TiNi alloys*. Acta Metall, 1988.
- [135]. ZHU, J.J.; LIANG, N.G.; HUANG, W.M.; LIEV, K.M. *Energy conversion in shape memory alloy heat engine. Part I: Theory*. In: Journal of Intelligent Material Systems and Structures, February 1, 2001, 12(2), p.127-132.
- [136]. Zhu, J.J.; LIANG, N.G.; HUANG, W.M.; LIEV, K.M. *Energy conversion in shape memory alloy heat engine. Part I: Theory*. In: Journal of Intelligent Material Systems and Structures, February 1, 2001, 12(2), p.127-132.

Lista lucrărilor personale publicate în domeniul tezei de doctorat

- [137]. CERNUȘCĂ D.; DIMIAN M.; POIENAR M.; MILICI M. R.; PAȚA S. *Micropompă electrochimică de vid și presiune*. Cerere de Brevet de Invenție nr. A/00152 din 14.03.2017. O.S.I.M., București.
- [138]. CERNUȘCĂ D.; POPA V.; GRAUR A.; POIENAR M.; MILICI L. D.; NIȚAN I. *Micropompă electromecanică*. Cerere de Brevet de Invenție nr. A/00151 din 14.03.2017. O.S.I.M., București.

- [139]. **CERNUȘCĂ, D.**; MILICI, L. D.; UNGUREANU, C.; *Theoretical and experimental contribution of using special actuators and materials with shape memory*. In: 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE 2016), 20-22 October, Iasi, Romania.
- [140]. **CERNUȘCĂ, D.** *Analiza unui sistem de conversie a energiei termice în energie mecanică*. Proiect de diplomă. Universitatea Ștefan cel Mare din Suceava, Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, Suceava, 2013.
- [141]. **CERNUȘCĂ, D.** *Cercetări privind realizarea unui motor cu nitinol*. Proiect de disertație. Universitatea Ștefan cel Mare din Suceava, Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, Suceava, 2015.
- [142]. **CERNUȘCĂ, D.**; MILICI, D. L.; POIENAR, M. *Developement of special actuators using smart materials*. In: The 9th International Conference on Electrical and Power Engineering, EPE 2016, 20-22 Octombrie 2016, Iași, Romania.
- [143]. **CERNUȘCĂ, D.**; POIENAR, M. MILICI, D. L. Termocuplă tip ambreiaj. Cerere de Brevet de Invenție nr. A/00519, din 09.07.2018. O.S.I.M., București.
- [144]. **CERNUȘCĂ, D.**; POIENAR, M.; MILICI, D. L.; PAȚA, S. D.; UNGUREANU, C.; PENTIUC, R. D.; POPA, C. D. *Stand pentru testare*. Cerere de brevet de invenție, nr. A/00717, din 10.10.2016. O.S.I.M., București.
- [145]. **CERNUȘCĂ, D.**; POIENAR, M.; PAȚA, S.D.; *Electrochemical micropump*. Salonul Național a Inovării și Cercetării Științifice Studentești "CADET INOVA", 2017, Sibiu, România, Aprilie 2017.
- [146]. **CERNUȘCĂ, D.**, POIENAR, M., PAȚA, S. D., PIANÎH, A., TOADER, V., E. *Interlocking system*. In: Buletinul Științific al Academiei forțelor terestre "Nicolae Bălcescu", 2019, Sibiu, România, ISSN 2501-3157.
- [147]. **CERNUȘCĂ, D.**; MILICI, L. D.; PENTIUC, R. D.; POPA, C.; TOADER, V. E., *Research on the Realization of a Electromechanical Pressure Micropump Used in Electrical Equipment*. 2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, Romania.
- [148]. **CERNUȘCĂ, D.**; MILICI L. D.; NIȚAN, I.; POIENAR, M.; PAȚA, S.; CENUȘĂ, M.; BREABĂN, B.; POPA, C. D.; *Clutch type thermocouple*. Cerere de brevet de invenție european nr. 19464010.8.
- [149]. NIȚAN, I.; MILICI, L. D.; POIENAR, M.; **CERNUȘCĂ, D.**; PAȚA, S. D.; PIANÎH, A.; PENTIUC, R.D.; POPA, C. D.; RAȚĂ, M.; UNGUREANU, C. *Sistem de zăvorâre*. Cerere de brevet de invenție NR. A/00157 DIN 07.03.2018.
- [150]. **CERNUȘCĂ, D.**; MILICI, L. D.; POIENAR, M.; *Researches on the realization of a electromechanical micropump*. 2018 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), 18-19 Oct. 2018, Iasi, Romania;
- [151]. UNGUREANU, C.; **CERNUȘCĂ, D.**; PRODAN, C.; MANDICI, L. *System for converting heat energy into mechanical energy*. Buletinul AGIR, Nr. 3, iulie-septembrie, 2013.
- [152]. **CERNUȘCĂ, D.**; UNGUREANU, C.; POIENAR, M.; POPESCU, P; *The nitinol motor*. Salonul Național a Inovării și Cercetării Științifice Studentești "CADET INOVA", Sibiu, România, 2016.
- [153]. **CERNUȘCĂ, D.**; UNGUREANU, C.; ȚANȚA, O.; POIENAR, M.; ROMANESCU, A.; *System for converting heat energy into mechanical energy*. Salonul Național a Inovării și

Cercetării Științifice Studentești "CADET INOVA", Sibiu, România, 2016.

- [154]. TOADER, E.; MILICI, L. D.; MILICI, M.; POIENAR, M.; **CERNUȘCĂ, D.**; *The Current State of Special Actuators and Motors Researches in the University of Ștefan cel Mare Suceava*, 2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucuresti, Romania.
- [155]. NIȚAN, I.; MILICI, L. D.; POIENAR, M.; **CERNUȘCĂ, D.**; PAȚA, S. D.; PIANÎH, A.; PENTIUC, R. D.; POPA, C. D.; RAȚĂ, M.; UNGUREANU, C.; *Interlocking system*. Cerere de brevet de invenție european nr. 19464001.7.
- [156]. **CERNUȘCĂ, D.**; POIENAR, M.; PAȚA, D. S.; *Electromechanical vacuum and pressure micropump*. Salonul Național a Inovării și Cercetării Științifice Studentești "CADET INOVA", Sibiu, România, 2018.
- [157]. **CERNUȘCĂ, D.**; GROSU, O. V.; TOADER, V. E.; POIENAR, M.; *Clutch-type thermocouple*. Salonul Național a Inovării și Cercetării Științifice Studentești "CADET INOVA", Sibiu, România, 2020.

Alte lucrări la elaborarea și publicarea cărora doctorandul a participat în calitate de coautor, în perioada stagiului de pregătire și elaborare a tezei de doctorat

- [158]. POIENAR M., SABADAȘ A., **CERNUȘCĂ D.**, PAȚA S. D., TOADER, V., E. *Thermomechanical safety lock*, In: Buletinul Științific al Academiei forțelor terestre "Nicolae Bălcescu", 2019, Sibiu, România, ISSN 2501-3157.
- [159]. CENUȘĂ, M.; POIENAR, M.; **CERNUȘCĂ, D.**; PAȚA, S. D.; *System and method for measuring and connecting single-phase electric energy consumers*. In: Buletinul Științific al Academiei forțelor terestre "Nicolae Bălcescu", 2019, Sibiu, România, ISSN 2501- 3157.
- [160]. **CERNUȘCĂ, D.**; PENTIUC, R.D.; HOPULELE, E.; MILICI, L.D.; *Distributed Generation Modeling in Matlab-Simulink*. In: 12th International Conference And Exhibition on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), Chișinău, R. Moldova, 10-11 october 2019.
- [161]. CENUȘĂ, M.; POIENAR, M.; **CERNUȘCĂ, D.**; *Solution for Reducing Technological Consumption in Low Voltage Distribution Network*. In: 8th International Conference Modern Power Systems (MPS), Cluj-Napoca, România, 21-23 May 2019.
- [162]. ROMANESCU, A.N.; **CERNUȘCĂ, D.**; POIENAR, M.; MILICI, L. D. *Considerations regarding the practical implementation of the heliothermic actuator in the form of flat spiral spring*. In: 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE 2016), 20-22 October, Iasi, Romania, 2016.
- [163]. PAȚA, S. D. ; POIENAR, M.; **CERNUȘCĂ, D.**; MILICI, D. L. *Automatically prevention of accidentally maintenance system*. In: 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE 2016), 20-22 October, Iasi, Romania, 2016.
- [164]. ROMANESCU, A.N.; **CERNUȘCĂ, D.**; ȚANȚA, O. M. *Assessments concerning the practical use for heliothermic actuators in the form of flat spiral spring*. In: 13th International Conference on Development and Application Systems, 19th – 21th May, 2016, Suceava, România.

- [165]. ROMANESCU, A. N.; **CERNUȘCĂ, D.**; PAȚA, S. D.; CENUȘĂ, M.; POIENAR, M.; ATĂNĂSOAE, P.; PENTIUC, R. D.; MILICI, D. L. *Actuator helioteermic*. Cerere de Brevet de Invenție nr. A/00301 din 26.04.2016.
- [166]. ROMANESCU, A. N.; **CERNUȘCĂ, D.**; PAȚA, S. D.; CENUȘĂ, M.; POIENAR, M.; OLARIU, E. D.; UNGUREANU, C.; NIȚAN, I.; MILICI, D. L. *Actuator helioteermic cu lamelă bimetalică*. Cerere de Brevet de Invenție nr. A/00439 din 16.06.2016.
- [167]. ROMANESCU, A. N.; **CERNUȘCĂ, D.**; PAȚA, S. D.; CENUȘĂ, M.; POIENAR, M.; NIȚAN, I.; POPA, C. D.; MILICI, D. L.; PENTIUC, G. *Actuator liniar cu bimetal*. Cerere de Brevet de Invenție nr. A/00487 din 05.07.2016.
- [168]. ROMANESCU, A. N.; POIENAR, M.; CENUȘĂ, M.; **CERNUȘCĂ, D.**; PAȚA, S. D.; OLARIU, E. D.; UNGUREANU, C.; POPA, C. D.; MILICI, M. R. *Actuator helioteermic cu bimetal*. Cerere de Brevet de Invenție nr. A/00153 din 14.03.2017.
- [169]. POPESCU, P.; CENUȘĂ, M.; **CERNUȘCĂ, D.**; *Human performance assessment system in sports training and physiotherapeutic rehabilitation*. Buletinul Științific (Supliment) al Academiei Forțelor Terestre "Nicolae Bălcescu", Sibiu, 2016.
- [170]. POPESCU, P.; PLĂCINTĂ, V. M.; **CERNUȘCĂ, D.**; PAȚA, S. D.; *Control of electrically propelled vehicle using balance*. Buletinul Științific (Supliment) al Academiei Forțelor Terestre "Nicolae Bălcescu", Sibiu, 2016.
- [171]. CENUȘĂ, M.; POIENAR, M.; **CERNUȘCĂ, D.**; PAȚA, S. D.; *System and method for measuring and connecting single-phase electric energy consumers*. In: Buletinul Științific al Academiei forțelor terestre "Nicolae Bălcescu", 2019, Sibiu, România, ISSN 2501- 3157.