

UNIVERSITATEA TEHNICĂ „GHEORGHE ASACHI”
DIN IAŞI



CERCETĂRI PRIVIND REALIZAREA UNOR ARCURI ELECTROMAGNETICE CU ELASTICITATE CONTROLABILĂ

- REZUMAT -

Ing. Gabriel Muraviev

Conducător de doctorat: Prof. dr. ing. Olaru Radu

IAŞI, 2026

CERCETĂRI PRIVIND REALIZAREA UNOR ARCURI ELECTROMAGNETICE CU ELASTICITATE CONTROLABILĂ

Gabriel Muraviev
domeniul Inginerie Electrică

Președinte comisie doctorat:	Prenume Nume
Conducător de doctorat:	Prenume Nume
Referenți oficiali:	Prenume Nume
	Prenume Nume
	Prenume Nume

Comisia de îndrumare:
:

Prof. dr. ing. Radu Olaru
Prof. dr. ing. Camelia Petrescu
Conf. dr. ing. Costică Nițucă
Ș.l. dr. ing. Gabriel Chiriac

CUPRINS

INTRODUCERE 5

1. PRINCIPII FUNCȚIONALE, ARANJAMENTE CONSTRUCTIVE ȘI APLICAȚII ALE ARCURILOR MAGNETICE ȘI ELECTROMAGNETICE 6

1.1. Principii funcționale și aranjamente constructive ale arcurilor magnetice 6

1.1.1 Arcul magnetic cu doi magneți verticali în montaj repulsiv 6

1.1.2. Arcul magnetic cu trei magneți în montaj repulsiv 6

1.1.3. Arcul magnetic cu rigiditate cvasi-nulă cu magneții montați repulsiv și atractiv 7

1.1.4. Arcul magnetic de torsiune 7

1.1.5. Arcuri magnetice combinate 8

1.2. Modelarea dinamică a sistemelor cu arcuri magnetice și electromagnetice 9

1.2.1. Modelul masă-arc-amortizor 9

1.2.2. Vibrații libere și amortizate 9

1.2.3. Vibrații forțate și rezonanță 10

1.2.4. Funcția de transfer și răspunsuri în frecvență 10

1.2.5. Particularități dinamice ale arcurilor magnetice neliniare 10

1.2.6. Influența rigidității variabile asupra frecvenței naturale 10

1.3. Arcuri magnetice pasive și active..... 11

1.4. Aplicații ale arcurilor magnetice și electromagnetice 12

1.4.1 Recuperatorul de energie din vibrații 12

1.4.2. Sisteme de reducere a vibrațiilor 12

1.4.3. Actuatori și diverse dispozitive care utilizează arcuri magnetice 14

1.4.3.1. Actuatorul pe bază de suspensie magnetică 14

1.4.3.2. Generatoare de vibrații 14

1.4.3.3. Alte aplicații 14

1.5. Concluzii la capitol 15

2. STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII ARCURILOR ELECTROMAGNETICE CU ELASTICITATE CONTROLABILĂ 17

2.1. Stadiul actual al cercetării arcurilor magnetice cu elasticitate variabilă 17

2.1.1. Arcuri magnetice cu elasticitate ajustabilă (AMEA) 17

2.1.2. Arcuri electromagnetice cu elasticitate controlabilă (AEMEC) 22

2.2. Soluții tehnice originale de arcuri magnetice controlabile furnizate de bibliografia de patente 31
2.3. Concluzii la capitol 39
3. CONTRIBUȚII ȘTIINȚIFICE ORIGINALE PRIVIND ARCURILE ELECTROMAGNETICE CU ELASTICITATE CONTROLABILĂ 41
3.1. Modelarea și analiza la vibrații a arcului electromagnetic AEMEC 1 41
3.1.1. Conceptul AEMEC 1 cu magneți cilindrici magnetizați axial și pretensionare unidirecțională 41
3.1.2. Studiul și optimizarea prin simulare a unui model de arc electromagnetic AEMEC 1 42
3.1.3. Rezultate experimentale 44
3.1.4. Concluzii 47
3.2. Cercetări privind arcurile electromagnetice bidirecționale cu elasticitate controlabilă AEMEC 2 48
3.2.1. Aspecte generale despre magneții inelari cu magnetizarea radială și diametrală 48
3.2.2. Descrierea conceptului tehnic de AEMEC 2 cu magneți inelari magnetizați radial 50
3.2.3. Variante de soluții tehnice de AEMEC 2 cu magneți inelari magnetizați radial .. 52
3.2.4. Încercări preliminare de realizare a unui original AEMEC 2O 55
3.2.5. Studiul și validarea unui nou actuator de forțe elastice controlabile AEMEC 2O 58
a. Descrierea conceptului AEMEC 2O și alegerea variantei optime prin simulare 58
b. Rezultate experimentale 62
c. Concluzii 65
3.3. Studiul unui actuator de forte elastice controlabile AEMEC 3 66
3.3.1. Descriere AEMEC 3 66
3.3.2. Rezultate experimentale 68
3.3.3. Concluzii 74
3.4. Concluzii la capitol..... 75
4. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII PROPRII 77
BIBLIOGRAFIE 81

INTRODUCERE

Scopul principal al tezei îl constituie studiul, dezvoltarea și validarea unor arcuri electromagnetice cu elasticitate controlabilă, reunite sub denumirea AEMEC, bazate pe utilizarea magneților permanenți cilindrici inelari cu magnetizare axială și radială.

Pentru realizarea acestui scop au fost stabilite următoarele obiective:

- analiza principiilor funcționale și a aplicațiilor arcurilor magnetice și electromagnetice;
- studiul stadiului actual al cunoașterii în domeniul arcurilor electromagnetice cu elasticitate controlabilă;
- modelarea, simularea și testarea conceptului AEMEC 1;
- investigarea utilizării AEMEC 1 ca și actuatori cu rigiditate variabilă;
- dezvoltarea conceptului AEMEC 2O și analiza variantelor constructive posibile;
- continuarea cercetărilor privind AEMEC 3, destinat realizării unui actuator cu forțe elastice controlabile;
- evidențierea avantajelor soluțiilor propuse și a posibilităților de aplicare practică.

Au fost elaborate modele analitice pentru estimarea forțelor magnetice și a caracteristicilor elastice ale sistemelor studiate. Analizele au fost completate prin simulări numerice utilizând metode specifice de calcul al câmpului electromagnetic și optimizare constructivă.

Pe baza rezultatelor obținute au fost realizate modele experimentale și prototipuri reprezentative, care au fost testate în laborator. Rezultatele experimentale au fost comparate cu cele teoretice și numerice, în vederea validării soluțiilor propuse.

Teza de doctorat este structurată în patru capitole.

Capitolul 1 prezintă principiile funcționale, aranjamentele constructive și aplicațiile arcurilor magnetice și electromagnetice. Sunt abordate aspecte fundamentale de magnetism și electromagnetism, tipuri constructive reprezentative, sisteme pasive și active, precum și principalele domenii de utilizare.

Capitolul 2 este dedicat stadiului actual al cunoașterii arcurilor electromagnetice cu elasticitate controlabilă. Sunt analizate cercetările existente, soluțiile tehnice cunoscute și direcțiile actuale de dezvoltare ale domeniului.

Capitolul 3 conține contribuțiile științifice originale ale autorului privind familia de sisteme AEMEC. Sunt prezentate cercetările referitoare la AEMEC 1, AEMEC 2O și AEMEC 3, incluzând modelarea, simularea, rezultatele experimentale și perspectivele de utilizare practică.

Capitolul 4 cuprinde concluziile finale și contribuțiile proprii rezultate în urma cercetărilor efectuate, precum și direcțiile viitoare de dezvoltare.

1. PRINCIPII FUNCTIONALE, ARANJAMENTE CONSTRUCTIVE SI APLICAȚII ALE ARCURILOR MAGNETICE SI ELECTROMAGNETICE

1.1. Principii funcționale și aranjamente constructive ale arcurilor magnetice

Din punct de vedere constructiv, soluțiile întâlnite în literatura de specialitate pot fi grupate în mai multe configurații reprezentative: arcuri cu doi magneți în montaj repulsiv, arcuri diferențiale cu trei magneți, arcuri cu rigiditate scăzută sau cvasi-nulă, arcuri magnetice de torsiune și configurații compuse. Această clasificare este utilă deoarece permite evidențierea raportului dintre simplitatea constructivă, liniaritatea caracteristicii forță–deplasare și posibilitatea de integrare în sisteme dinamice sau actuatoare controlabile (Fig. 1.20.).

Configurațiile prezentate schematic în Fig. 1.20 constituie exemple reprezentative utilizate în literatura de specialitate pentru evidențierea principalelor tipuri de arcuri magnetice.

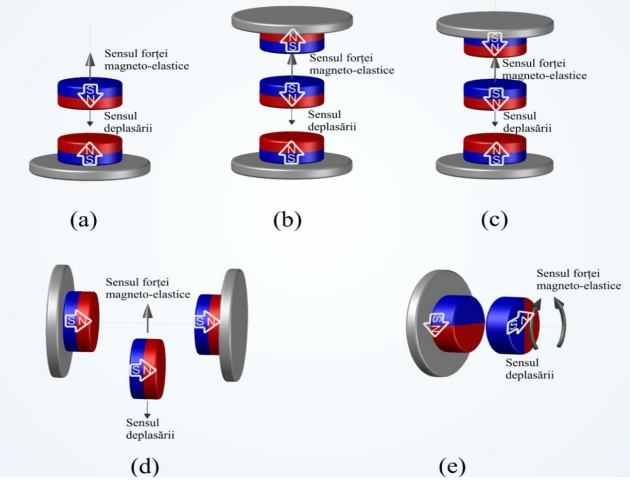


Fig. 1.20. Reprezentare schematică arcuri magnetice cu rigiditate pozitivă: a) 2 magneți verticali în montaj repulsiv; b) 3 magneți verticali în montaj repulsiv; c) arc magnetic cu rigiditate cvasi-nulă cu magneții montați repulsiv și atractiv; d) 3 magneți orizontali în montaj atractiv; e) arc magnetic de torsiune.

1.1.1. Arcul magnetic cu doi magneți verticali în montaj repulsiv

Acest tip de arc magnetic este cel mai simplu din punct de vedere constructiv și este alcătuit din doi magneți identici dispuși vertical, cu polii identici față în față.

1.1.2. Arcul magnetic cu trei magneți în montaj repulsiv

Arcul magnetic diferențial este obținut prin introducerea unui magnet mobil între doi magneți staționari dispuși astfel încât interacțiunile magnetice să fie de tip repulsiv. În poziția centrală, forțele

exercitate asupra magnetului mobil au valori apropiate și sensuri opuse, ceea ce conduce la o stare de echilibru. La deplasarea magnetului mobil față de această poziție, simetria sistemului este perturbată, iar diferența dintre cele două forțe magnetice generează o forță rezultantă de revenire.

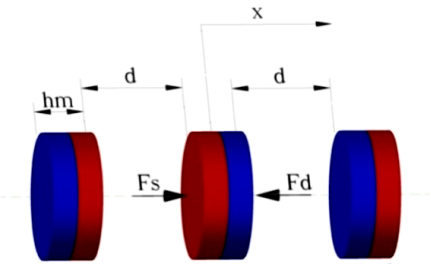


Fig. 1.23. Arc magnetic diferențial.

Arcul magnetic cu trei magneți în montaj repulsiv Fig. 1.23., este numit și arc magnetic diferențial. În cazul acestui arc, magnetul central se află în mod normal în stare de echilibru, iar asupra sa apare o forță de revenire doar dacă acesta este scos din poziția de echilibru de către o forță exterioară. În cazul unei deplasări spre dreapta, pe distanța x, asupra sa va acționa o forță F_{nl}, de tip neliniar, egală ca valoare cu diferența dintre forța de repulsie dintre magnetul din partea stângă și cel central F_S și forța de repulsie dintre magnetul din partea dreaptă și cel central F_d [Domme 2008].

1.1.3. Arcul magnetic cu rigiditate cvasi-nulă cu magneții montați repulsiv și atractiv

Arcurile magnetice cu rigiditate cvasi-nulă reprezintă o categorie specială de sisteme elastice magnetice, concepute pentru obținerea unei rigidități dinamice foarte reduse în vecinătatea poziției de echilibru, fără diminuarea semnificativă a capacității portante statice [Nijsse 2001], [Robertson 2006].

Principiul de funcționare al acestor sisteme se bazează pe combinarea unor interacțiuni magnetice repulsive și atractive astfel încât variațiile locale ale forței elastice să se compenseze parțial în jurul poziției de funcționare. În aceste condiții, caracteristica forță–deplasare poate prezenta o zonă cu pantă foarte redusă, echivalentă unei rigidități apropiate de zero [Zhu 2015].

În aplicațiile dinamice, comportarea arcurilor magnetice cu rigiditate cvasi-nulă este influențată atât de rigiditatea echivalentă a sistemului, cât și de efectele neliniare asociate distribuției fluxului magnetic. Din acest motiv, modelarea matematică și simularea numerică sunt necesare pentru evaluarea stabilității și a caracteristicilor vibraționale [Zhu 2015].

Necesitatea obținerii unor rigidități variabile și controlabile în regim dinamic reprezintă una dintre direcțiile care au condus ulterior la dezvoltarea sistemelor AEMEC prezentate în această teză.

1.1.4. Arcul magnetic de torsiune

Arcurile magnetice de torsiune reprezintă sisteme elastice rotative în care momentul de revenire este generat prin interacțiuni magnetice dintre elemente aflate în mișcare relativă unghiulară [Collins 2011], [Kanj 2022], [Che 2021]. Spre deosebire de arcurile magnetice liniare, unde forța elastică este asociată unei deplasări de translație, în cazul arcurilor de torsiune comportarea elastică este definită prin dependența dintre momentul magnetic și unghiul de rotație.

1.1.5. Arcuri magnetice combinate

Arcurile magnetice combinate reprezintă configurații constructive obținute prin asocierea mai multor tipuri de interacțiuni magnetice, cu scopul realizării unor caracteristici elastice imposibil sau dificil de obținut prin utilizarea unei singure configurații magnetice simple [Robertson 2005], [Janssen 2012].

Acest arc a fost conceput pentru a fi utilizat la dispozitive de protecție împotriva vibrațiilor, a echipamentelor sensibile la acestea.

Configurația cu matrice multipolare propusă de Robertson [Robertson 2005] evidențiază posibilitatea obținerii simultane a unei capacități portante ridicate și a unei rigidități reduse pe direcția de izolare. Utilizarea mai multor matrici magnetice permite extinderea comportării elastice pe mai multe direcții, însă conduce și la o complexitate mai ridicată a distribuției câmpului magnetic și a sistemului de centrare.

Configurația cu matrice multipolare propusă de Robertson [Robertson 2005] evidențiază posibilitatea obținerii simultane a unei capacități portante ridicate și a unei rigidități reduse pe direcția de izolare. Utilizarea mai multor matrici magnetice permite extinderea comportării elastice pe mai multe direcții, însă conduce și la o complexitate mai ridicată a distribuției câmpului magnetic și a sistemului de centrare.

Arcul magnetic oblic propus de Robertson [Robertson 2012] permite modificarea caracteristicii elastice prin ajustarea geometriei și orientării magneților. Configurația oferă atât efecte de autocentrare, cât și posibilitatea reglării rigidității echivalente.

Ansamblurile magnetice de tip matrice prezentate de Janssen [Janssen 2012] sunt destinate aplicațiilor vibroizolatoare pentru sarcini ridicate și utilizează distribuții multipolare ale câmpului magnetic pentru obținerea stabilității și a efectului elastic.

O ultimă categorie de arcuri magnetice compuse este aceea a lagărelor magnetice pasive.

Acestea sunt alcătuite din două rânduri de magneți concentrici, cu magnetizări axiale și diametrale astfel încât între rândul exterior și cel interior se creează forțe de repulsie ce asigură auto-centrarea și permit rotirea între ele fără contact (Fig. 1.37.).

1.2. Modelarea dinamică a sistemelor cu arcuri magnetice și electromagnetice

Pe baza exemplului particular prezentat în subcapitolul 1.2.3, modelele dinamice sunt generalizate în continuare pentru analiza sistemelor cu arcuri magnetice și electromagnetice.

1.2.1. Modelul masă–arc–amortizor

În numeroase aplicații inginerești care utilizează arcuri magnetice și electromagnetice, comportarea dinamică a sistemului poate fi aproximată prin modelul clasic masă–arc–amortizor. Acest model este utilizat pentru studiul vibrațiilor mecanice, al sistemelor oscilante și al actuatorilor electromagnetici cu rigiditate variabilă.

În cazul arcurilor electromagnetice, elementul elastic este reprezentat de forțele magnetostatice sau electromagnetice dezvoltate între magneții permanenți, respectiv între magneți și câmpurile generate de bobinele de comandă. Elementul inertial este reprezentat de masa mobilă a actuatorului sau sistemului suspendat, iar amortizarea este determinată de frecările mecanice, pierderile electromagnetice și efectele curenților turbionari.

Modelul general al unui sistem vibrator liniar este prezentat schematic în Fig. 1.38.

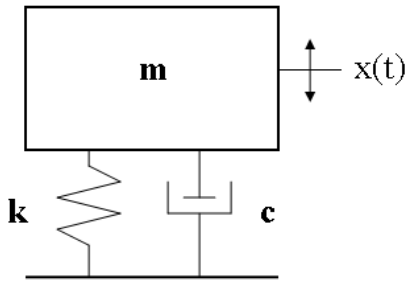


Fig. 1.38. Schema generală a sistemului oscilant amortizat.

, unde:

- *m* reprezintă masa mobilă;
- *k* reprezintă rigiditatea echivalentă a arcului magnetic;
- *c* reprezintă coeficientul de amortizare;
- *x(t)* reprezintă deplasarea masei mobile.

1.2.2. Vibrații libere și amortizate

Vibrațiile libere apar atunci când sistemul este deplasat din poziția de echilibru și apoi lăsat să oscileze fără aplicarea unei forțe externe suplimentare.

1.2.3. Vibrații forțate și rezonanță

În sistemele AEMEC, controlul rigidității electromagnetice permite deplasarea controlată a frecvenței naturale, ceea ce oferă posibilitatea:

- evitării regimurilor rezonante;
- adaptării dinamice la diferite regimuri de funcționare;
- realizării unor sisteme adaptive de control al vibrațiilor.

1.2.4. Funcția de transfer și răspunsul în frecvență

Răspunsul în frecvență reprezintă un instrument esențial pentru proiectarea actuatorilor electromagnetici și a sistemelor cu rigiditate controlabilă, deoarece permite evaluarea comportării sistemului pentru diferite valori ale rigidității și amortizării.

1.2.5. Particularități dinamice ale arcurilor magnetice neliniare

Spre deosebire de arcurile mecanice clasice, arcurile magnetice prezintă în mod natural caracteristici neliniare.

Această neliniaritate conduce la:

- apariția unor frecvențe naturale dependente de amplitudine;
- răspunsuri dinamice complexe;
- posibilitatea existenței mai multor puncte de echilibru;
- efecte de rigidizare sau înmuiere elastică.

În apropierea poziției de echilibru, multe sisteme magnetice pot fi aproximativ liniarizate utilizând dezvoltarea în serie Taylor a caracteristicii forță–deplasare.

În cazul sistemelor AEMEC, controlul electromagnetic permite modificarea caracteristicii elastice în timp real, ceea ce conduce la posibilitatea realizării unor sisteme adaptive cu rigiditate variabilă.

1.2.6. Influența rigidității variabile asupra frecvenței naturale

Una dintre cele mai importante particularități ale arcurilor electromagnetice cu elasticitate controlabilă este posibilitatea modificării frecvenței naturale prin variația rigidității electromagnetice.

Din punct de vedere funcțional, controlul rigidității electromagnetice poate fi interpretat ca o metodă de control indirect al răspunsului dinamic al sistemului mecanic, prin modificarea parametrilor echivalenți ai modelului vibrator.

În cadrul cercetărilor prezentate în această teză, principiul modificării controlate a rigidității electromagnetice constituie baza funcționării sistemelor AEMEC dezvoltate și investigate experimental.

1.3. Arcuri magnetice pasive și active

Arcurile magnetice active sunt arcuri ale căror proprietăți mecanice (rigiditate, forță elastică, forță de operare) pot fi modificate în funcție de cerințele aplicației în care sunt folosite.

Un arc magnetic pasiv, simplu sau diferențial, de tipul celor din Fig. 1.20.a) și b), poate deveni activ, în vedere obținerii unui control al forței arcului și, eventual daca este nevoie a elasticității sale, prin aplicarea următoarelor procedee:

a. prevederea unei forțe electromagnetice asupra magnetului mobil, ceea ce conduce la modificarea printr-o acțiune venita din exteriorul arcului, extrinseca, a forței arcului magnetic și a coeficientului de elasticitate;

b. modificarea distanței de repaos dintre magnetul mobil și magnetul (magneții) staționar (staționari), ceea ce conduce la modificarea, de asemenea prin acțiune extrinseca a coeficientului de elasticitate;

c. suprapunerea unui câmp magnetic peste cel al magneților arcului în spațiul cuprins între aceștia. De aceasta dată avem o acțiune intrinsecă care influențează direct fenomenul magnetic intern de funcționare al arcului magnetic, cu consecințe imediate și semnificative asupra evoluției forței și coeficientului de elasticitate.

a. Prin aplicarea unei forțe electromagnetice unui arc magnetic simplu sau diferențial, ca rezultat al interacțiunii dintre curentul electric ce parcurge una sau mai multe bobine și magnetul mobil al arcului, arcul respectiv devine activ și își modifică în același timp forța arcului și coeficientul de elasticitate în funcție de sensul și mărimea curentului electric.

b. Acest procedeu de activare a unui arc magnetic consta în modificarea distantei dintre magnetul (magneții) staționar și magnetul mobil, ceea ce implica schimbarea valorii și pantei de variație a forței cu distanța, deci a coeficientului de elasticitate, k. Pentru aceasta se exercita acțiuni mecanice exterioare (servomotoare) asupra magneților permanenți. Procedeul are două dezavantaje, complică construcția sistemului elastic și nu este adecvat în cazul unui control dinamic, rapid al arcului magnetic. Un exemplu de aplicare a acestui procedeu este cazul unui dispozitiv de prindere cu elasticitate variabilă [Memar 2018].

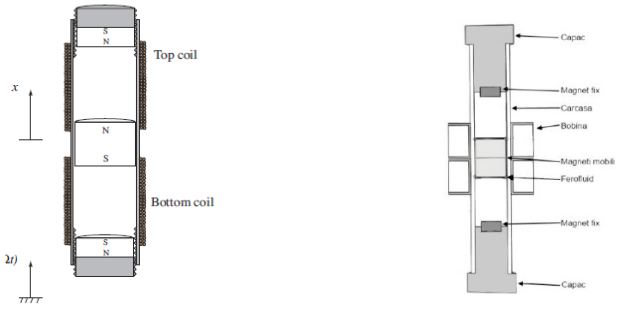
c. Procedeul consta în suprapunerea unui câmp magnetic furnizat de niște bobine parcurse de curent electric și este cel mai potrivit pentru controlul dinamic al forței și constantei de elasticitate.

1.4. Aplicații ale arcurilor magnetice și electromagnetice

Aplicațiile arcurilor magnetice și electromagnetice pot fi înțelese prin prisma funcției îndeplinite în sistem: susținere elastică fără contact, modificare a rigidității, control al vibrațiilor sau conversie electromecanică a energiei. În funcție de această funcție dominantă, aceleași principii magnetice pot fi utilizate în dispozitive foarte diferite, de la recuperatoare de energie până la actuatori cu răspuns controlat. Pentru teza de față, interesul principal nu constă în simpla inventariere a aplicațiilor, ci în identificarea acelor soluții care demonstrează necesitatea controlului activ al elasticității.

1.4.1. Recuperator de energie din vibrații

Prin deplasarea magnetului în interiorul tubului se induc tensiuni electromotoare în două bobine amplasate concentric la exteriorul tubului.



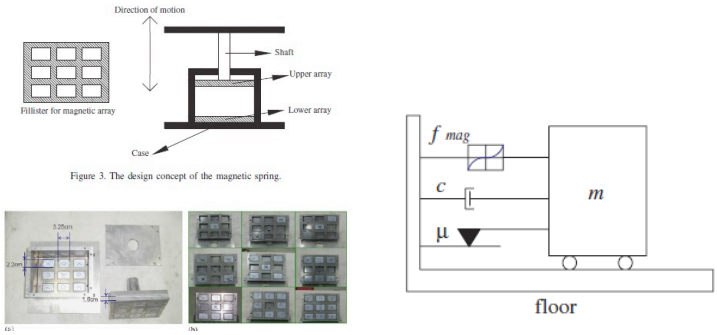
(a) (b)

Fig 1.40. Recuperator de energie din vibrații (a) [Mann 2009], (b) [Olaru 2013].

1.4.2. Sisteme de reducere a vibrațiilor

Un prim exemplu de dispozitiv de reducere a vibrațiilor este cel pentru protecția echipamentelor sensibile la undele seismice (Fig. 1.41.a), b)) [Yao 2009].

Arcul pasiv este alcătuit din două matrice de magneți de tip paralelipiped. Aceștia sunt fixați în carcase de aluminiu astfel încât toate fețele de pe matricea fixă să aibă polaritate identică cu cele de pe matricea mobilă asigurându-se în acest fel forța repulsivă în momentul apropierii celor două matrice.



a) b)

Fig 1.41. Izolator seismic [Yao 2009].

Un alt de sistem de control al vibrațiilor pe bază de arc magnetic activ îl regăsim în Fig. 1.42. [Snamina 2010], și este alcătuit din grupul de magneți mobili 1, montați repulsiv față de grupul de magneți ficși 2. Aceștia sunt plasați în interiorul jugurilor magnetice 3, 4 și 5. Controlul elasticității arcului se realizează cu ajutorul celor patru bobine 6. Magneții mobili 1, transmit forțele elastice prin intermediul axului 7, a cărui mișcare liniară este asigurată de lagărul 8. Capacele 9 și 10 asigură rigiditatea construcției.

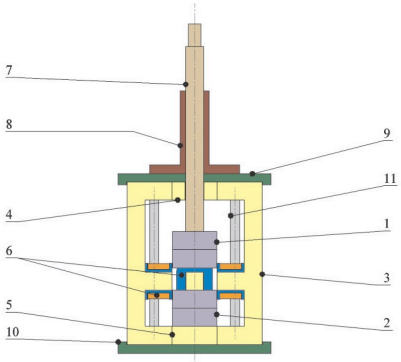


Fig. 1.42. Sistem de reducere a vibrațiilor pe bază de arc magnetic activ [Snamina 2010].

Un alt exemplu de arc magnetic [Robertson 2013] regăsit în Fig. 1.43., denumit arc magnetic cu rigiditate cvasi-nulă. Acesta este alcătuit din două perechi de magneți permanenți. În perechea inferioară magneții sunt montați repulsiv, asigurându-se suspensia sistemului, iar în perechea superioară magneții sunt montați atractiv, asigurându-se în acest fel o rigiditate scăzută a sistemului în apropierea punctului de echilibru.

Sistemul a fost îmbunătățit prin utilizarea unui actuator ce acționează asupra tijei comune a magneților în scopul reducerii amplitudinii frecvențelor de rezonanță.

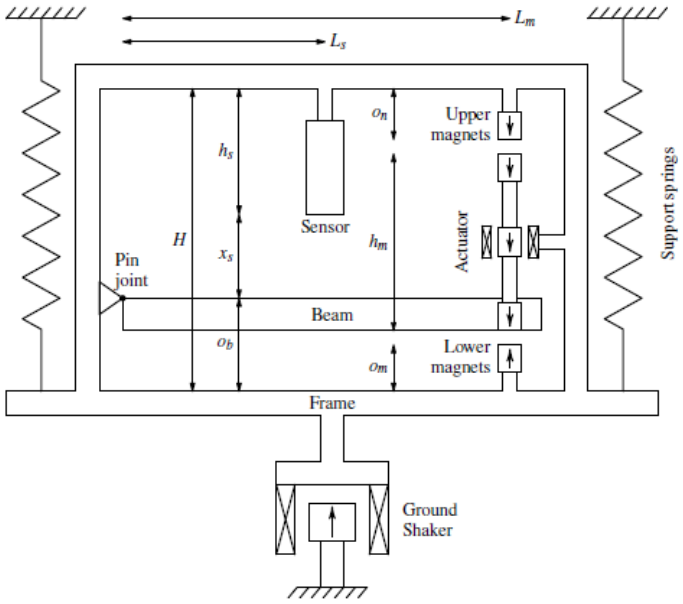


Fig. 1.43. Sistem de reducere a vibrațiilor pe bază de arc magnetic cu rigiditate cvasi-nulă [Robertson 2013].

1.4.3. Actuatori și diverse dispozitive care utilizează arcuri magnetice

1.4.3.1. Actuator pe bază de suspensie magnetică

Un prim astfel de dispozitiv este actuatorul pe bază de suspensie magnetică (magnetic suspension actuation – MSA), care poate fi folosit în aplicații pentru micro-poziționare în cadrul tehnologiilor de înaltă precizie.

1.4.3.2. Generatoare de vibrații

Alimentatorul piezoelectric pe bază de vibrații

O altă aplicație în care pot fi folosite cu succes arcurile magnetice este aceea a generatoarelor de vibrații unde pot fi înlocuite cu succes arcurile metalice.

1.4.3.3. Alte aplicații

Numeroase aplicații ale arcurilor magnetice pot fi regăsite și în cadrul brevetelor de invenție.

Creionul digital

Un astfel de exemplu este creionul digital [Ferguson 2014] (Fig. 1.46.) la care forța de apăsare, deci grosimea liniei trasate pe tabletă, este interpretată de un circuit electronic cu ajutorul unui traductor capacitiv care funcționează pe baza modificării grosimii dielectricului. Forțele de revenire a palpatorului

(minei creionului) în poziția de echilibru sunt asigurate cu ajutorul unui arc magnetic pe bază de magneți montați repulsiv.

1.5. Concluzii la capitol

Configurațiile pasive analizate prezintă avantaje diferite în funcție de aplicație. Arcurile simple sunt ușor de realizat, dar au caracteristici puternic neliniare. Arcurile diferențiale oferă o zonă de funcționare mai apropiată de comportamentul liniar, iar arcurile cu rigiditate cvasi-nulă sunt utile în aplicații de izolare a vibrațiilor. Configurațiile compuse extind posibilitățile funcționale, însă introduc dificultăți suplimentare de proiectare, centrare și control al distribuției câmpului magnetic.

Din perspectiva tezei, categoria cea mai importantă este reprezentată de arcurile electromagnetice cu elasticitate controlabilă, deoarece acestea permit modificarea activă a rigidității și a forței elastice. Această proprietate creează legătura directă dintre principiile constructive ale arcurilor magnetice și dezvoltarea sistemelor AEMEC analizate în capitolele următoare.

În ceea ce privește arcurile active, se poate spune că din punct de vedere constructiv, acestea au la bază arcuri magnetice pasive, cărora li se aplică una din cele trei metode de modificare a caracteristicilor (metode de control) și anume: aplicarea unei forțe electromagnetice magnetului mobil, modificarea distanței de repaos dintre magnetul fix și cel mobil și suprapunerea unui câmp magnetic extern peste cel al magneților arcului. Ultima metoda de obținerea a unui arc magnetic activ, care înseamnă o acțiune intrinsecă la nivelul procesului fizic magnetic esențial al arcului magnetic, conduce la atingerea celor mai bune performanțe tehnice în legătură cu controlul dinamic și extins al forțelor și elasticității arcurilor electromagnetice.

În completarea clasificării constructive și funcționale prezentate, rezultă că analiza arcurilor magnetice și electromagnetice nu poate fi limitată la caracteristica statică forță / deplasare. În aplicațiile în care aceste elemente sunt integrate în actuatori, sisteme de izolare sau dispozitive vibratoare, comportarea lor este determinată și de răspunsul dinamic al ansamblului masă–arc–amortizor.

Pentru sistemele AEMEC, această proprietate reprezintă elementul central al funcționării: modificarea curentului de comandă nu produce doar o variație a forței elastice, ci permite intervenția asupra rigidității echivalente și, implicit, asupra regimului dinamic al dispozitivului. Astfel, arcul electromagnetic devine nu doar un element elastic fără contact mecanic direct, ci un element activ de control al răspunsului mecanic.

Această interpretare justifică integrarea modelării dinamice în studiul arcurilor electromagnetice cu elasticitate controlabilă și stabilește legătura directă dintre principiile generale prezentate în acest capitol și cercetările originale asupra sistemelor AEMEC dezvoltate în capitolele următoare.

În contextul tezei, vom considera drept arcuri magnetice acele arcuri constituite din magneți permanenți cu sau fără bobine parcurse de un curent pentru controlul funcționarii arcului.

De asemenea vom considera arcuri electromagnetice arcurile constituite din magneți permanenți, bobine și un ansamblu de miezuri feromagnetice destinate distribuției și concentrării fluxului magnetic în zone ale dispozitivului, în vederea creșterii nivelului de control. Cu alte cuvinte, un arc electromagnetic este un arc magnetic la care se adaugă o structură feromagnetică. Arcurile electromagnetice sunt singurele arcuri magnetice care pot asigura controlul continuu și rapid al elasticității în timpul funcționarii separate sau ca elemente componente în cadrul unor sisteme tehnice.

Deși literatura de specialitate propune numeroase configurații de arcuri magnetice pasive, soluțiile capabile să asigure reglaj activ al rigidității, forțe bidirecționale și integrare compactă în actuatori electromagnetici rămân limitate.

2. STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII ARCURILOR ELECTROMAGNETICE CU ELASTICITATE CONTROLABILĂ

2.1. Stadiul actual al cercetării arcurilor electromagnetice cu elasticitate controlabilă

Așa cum s-a menționat la final de subcapitol 1.3., arcurile electromagnetice reprezintă acea categorie de arcuri magnetice la care forța elastică și rigiditatea pot fi modificate prin intervenția directă asupra câmpului magnetic, cu ajutorul unui curent electric de comandă. Spre deosebire de arcurile magnetice pasive, la care caracteristica forță–deplasare este determinată în principal de geometria magneților, de distanța dintre aceștia și de proprietățile materialelor magnetice utilizate, arcurile electromagnetice permit intervenția activă asupra caracteristicii elastice în timpul funcționării.

Din investigarea literaturii științifice rezultă că se cunosc două categorii de arcuri magnetice cu elasticitate variabilă [Nijsse 2001], [Robertson 2006], [Snamina 2010], [Olaru 2017]:

1. arcuri magnetice cu elasticitate ajustabilă (**AMEA**) sau prestabilită, la care elasticitatea (coeficientul k) este prestabilită să varieze în limite mici, fără a putea fi modificată / controlată în timpul funcționarii iar rigiditatea este modificată prin repoziționarea unor componente magnetice înaintea funcționării sau în regim lent, fără control electromagnetic continuu;

2. arcuri electromagnetice cu elasticitate controlabilă (**AEMEC**), sunt arcuri magnetice, la care elasticitatea / rigiditatea poate fi modificată direct cu un curent electric de comandă aplicat bobinelor, pentru o variație în limite largi a forței și elasticității arcului magnetic.

Tip	Principiu	Avantaje	Limitări
AMEA	Repoziționare geometrică	Simplu	Control lent
AEMEC	Control electromagnetic	Dinamic	Complexitate

Sistemele AEMEC pot acoperi domenii largi de elasticitate, inclusiv valori negative, ceea ce le face utile în sisteme cu rigiditate cvasi-nulă, controlul vibrațiilor și actuatori complianți.

Din punctul de vederea al direcției de acțiune a forțelor magnetice repulsive create de magneți, avem tot două categorii de arcuri magnetice cu elasticitate variabilă:

1) arcuri magnetice liniare, la care forța este dezvoltată pe o direcție de translație;

2) arcuri magnetice de torsiune, la care efectul elastic apare sub forma unui cuplu magnetic.

2.1.1. Arcuri magnetice cu elasticitate ajustabilă (AMEA)

Aceasta este categoria de arcuri magnetice cu elasticitate ajustabila cea mai bine dezvoltată în literatura științifică internațională, dacă luăm în considerare numărul de lucrări științifice elaborate pe acest domeniu.

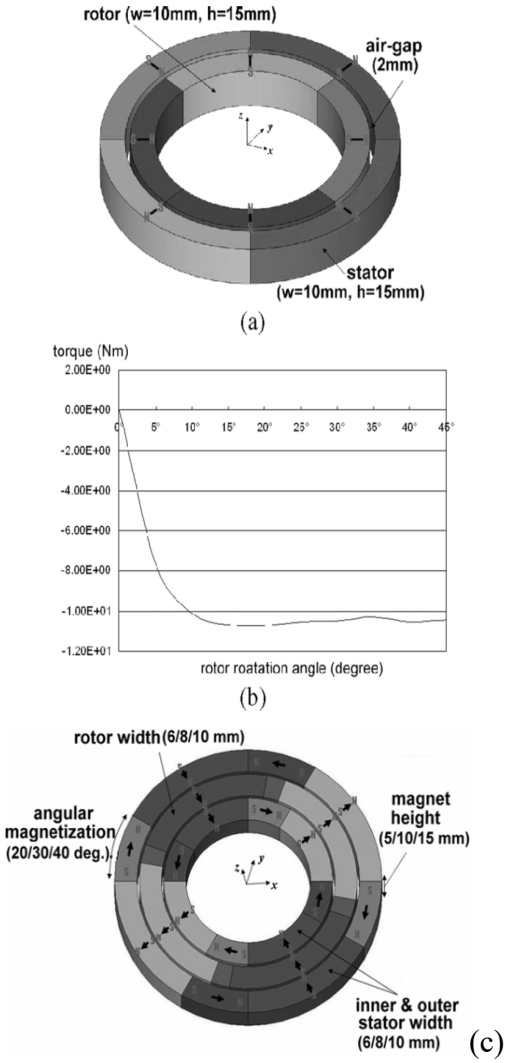


Fig. 2.1. Schema sistemelor AMEA. (a) Tip PM cu 2 inele. (b) Caracteristicile cuplului. (c) Tip PM cu 3 inele [Hyun 2007].

Fig. 2.3. arată cuplul generat de arcul magnetic pe măsură ce deplasarea unghiulară variază. ASMS generează un cuplu proporțional cu deplasarea unghiulară de până la 20º.

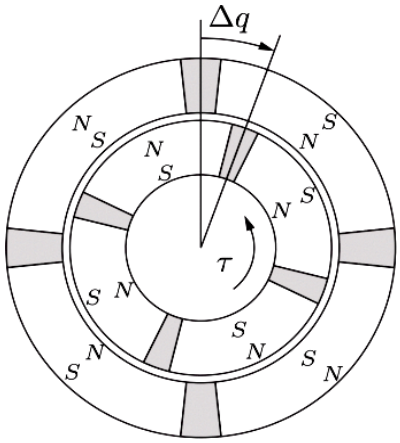


Fig. 2.2. Principiul AMEA de torsiune pentru proiectarea unei articulații robotizate cu rigiditate variabilă [Choi 2008].

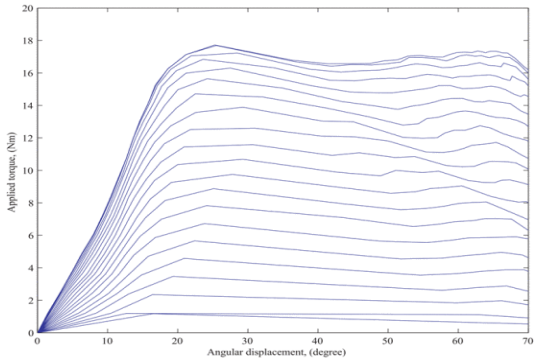


Fig. 2.3. Cuplul generat de magneți în funcție de variația deplasării unghiulare [Choi 2008].

În ultimii ani, au fost studiate noi tipuri de AMEA care permit reglarea rigidității prin rotirea unui magnet central al unui arc magnetic cu cursă axială [Che 2021], [Choi 2008] sau prin translația axială a rotorului magnetic exterior al unui arc magnetic de torsiune [Sudano 2013].

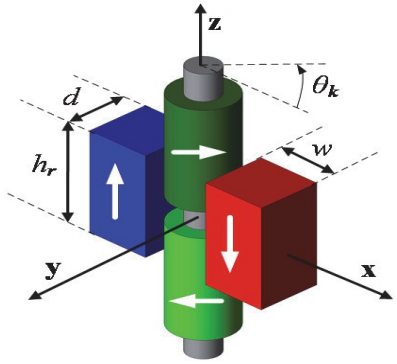


Fig. 2.4. Vedere în perspectivă a arcului magnetic axial reglabil [Che 2021].

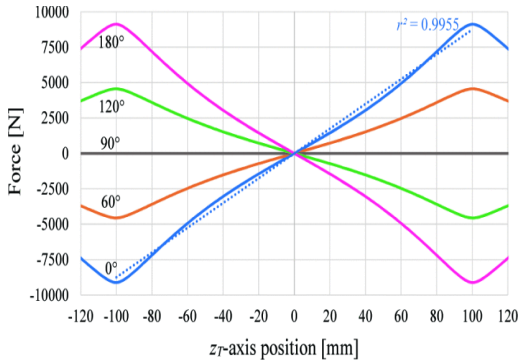


Fig. 2.5. Forța în funcție de lungimea cursei și de poziția unghiulară, θk, pentru o lungime maximă a cursei de z_m = 100 mm [Che 2021].

Baninajar et al. 2021 [Baninajar 2021] au studiat și au propus un nou tip de arc magnetic cu compresie liniară a lungimii cursei, cu preîncărcare, ilustrat în Fig. 2.6.. Configurația constă din patru magneți cubici dreptunghiulari Nd-Fe-B. Deplasarea celor doi magneți centrali de-a lungul axei y produce o schimbare a rigidității pozitive și negative.

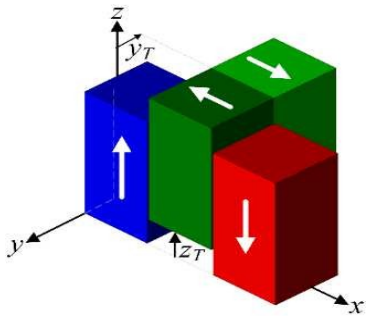


Fig. 2.6. Arc magnetic axial cu rigiditate reglabilă. Atunci când magneții centrali sunt deplasați de-a lungul axei y, rigiditatea arcului se modifică [Baninajar 2021].

Au fost realizate și propuse arcuri magnetice simple cu rigiditate reglabilă, care utilizează magneți permanenți antagonici, pentru mișcarea flexibilă a cleștelui robotului [Memar 2018] și a articulației robotului [Choi 2008].

Arcurile de torsiune cu rigiditate ajustabilă sunt mai bine reprezentate în literatura internațională, în special în aplicații robotice, unde rigiditatea articulației poate fi modificată prin deplasarea axială a rotorului față de stator sau prin modificarea suprapunerii dintre câmpurile magnetice ale unor structuri cu magneți permanenți. Exemplele analizate în review includ arcuri de torsiune bazate pe inele magnetice concentrice, magnetizate radial, utilizate pentru articulații robotice cu rigiditate variabilă.

O primă direcție importantă de cercetare este reprezentată de arcurile magnetice cu rigiditate ajustabilă pentru dispozitive robotice. Un exemplu relevant este dispozitivul robotic de prindere cu două degete mecanice, bazat pe arcuri magnetice antagoniste. Acest tip de sistem urmărește îmbunătățirea siguranței și robusteții în operațiile de manipulare, mai ales în situații cu șocuri, contacte accidentale sau interacțiuni dinamice severe.

Într-o astfel de configurație, magneții permanenți dispuși repulsiv formează arcuri neliniare între actuatorii sistemului și degetele mecanice. Prin modificarea poziției punctelor de capăt ale arcurilor magnetice, se modifică simultan poziția de echilibru și rigiditatea mecanismului. Rezultă astfel o complianță ajustabilă, utilă pentru prinderea obiectelor fragile sau pentru adaptarea forței de contact în

funcție de sarcina manipulată. Totuși, deoarece modificarea rigidității se realizează prin deplasarea mecanică a unor componente, sistemul nu poate fi încadrat în categoria arcurilor electromagnetice cu control rapid și continuu al elasticității

Un astfel de articol se referă la un arc magnetic de torsiune cu elasticitate ajustabilă [Sudano 2013].



Fig. 2.7. Dispozitiv robotic de prindere cu elasticitate ajustabila pe baza de arcuri magnetice antagoniste.

Un ansamblu de arcuri magnetice antagoniste este descris și folosit în cadrul studiului unui dispozitiv robotic de prindere cu două degete mecanice a obiectelor bazat pe acționare cu elasticitate variabilă pentru îmbunătățirea siguranței și robustețea dispozitivului de prindere, dar și pentru îmbunătățirea dinamicii de manipulare [Memar 2018].

Un astfel de dispozitiv, prezintă complianță ajustabilă a degetelor mecanice de prindere și îmbunătățește performanțele în activități cu dinamică severă, cum ar fi șocurile cauzate de lovituri. Dispozitivul este compus din două degete mecanice paralele și magneți repulsivi care sunt utilizați pentru a forma arcuri neliniare între actuatorii dispozitivului și degetele mecanice, Fig. 2.7. și 2.8.

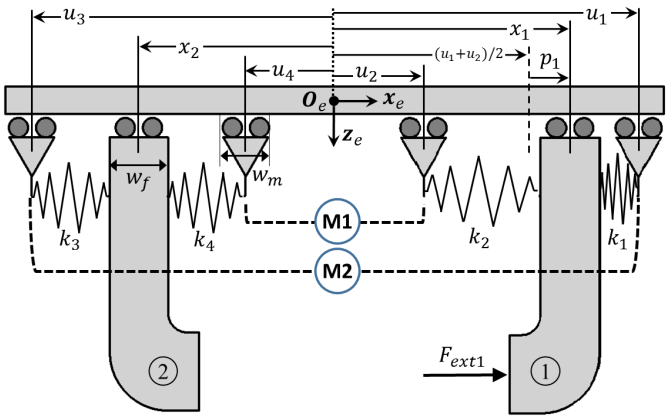


Fig. 2.8. Model propus de dispozitiv de prindere cu elasticitate ajustabila bazat pe arcuri magnetice antagoniste neliniare precomprimate. M1 și M2 reprezintă servomotoarele mecanismului. k_1-k_4 reprezintă arcurile magnetice.

2.1.2. Arcuri electromagnetice cu elasticitate controlabilă (AEMEC)

Din punct de vedere constructiv-funcțional, pot fi evidențiate două categorii de AEMEC, având configurațiile de bază bobină + magnet permanent și respectiv, bobină + magnet permanent + miez magnetic.

a. AEMEC bobină+magnet permanent

AEMEC-urile care utilizează combinații bobină-magnet permanent permit controlul în timp real al forțelor și rigidității prin modificarea intensității și polarității curentului din bobină. În acest context, s-au efectuat numeroase cercetări prin integrarea unor astfel de arcuri electromagnetice în aplicații specifice, cum ar fi sistemele de izolare a vibrațiilor neliniare cu rigiditate cvasinulă (QZS). Un prim exemplu de astfel de izolator este configurația „cu trei arcuri” propusă de Shujin Yuan et al. [Yuan 2020], care poate realiza rigiditatea negativă și rigiditatea statică zero ridicată prin combinarea unui arc electromagnetic liniar (LES) în paralel cu un sistem de izolare liniar convențional, așa cum se arată în Fig. 2.9.. Arcul electromagnetic conține trei bobine toroidale dispuse coaxial cu un magnet inelar. Prin controlul curentului de excitație al bobinelor, arcul electromagnetic poate genera o rigiditate negativă liniară care echilibrează rigiditatea pozitivă a sistemului convențional, obținându-se astfel o rigiditate cvasi nulă pe cursa lungă. Fig. 2.10. prezintă caracteristicile de forță și rigiditate ale LES proiectat. LES are o liniaritate de 1% pe întreaga cursă (±5 mm) și poate fi reglat online într-un domeniu foarte larg de ±2400 Nm−1.

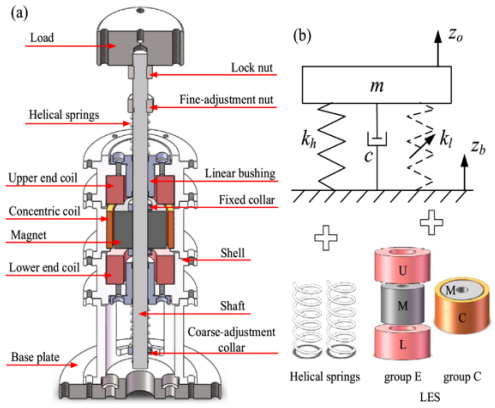


Fig. 2.9. Conceptul izolatorului QZS care utilizează AEMEC: (a) structura izolatorului cu LES în poziție de echilibru, (b) modelul echivalent al izolatorului [Yuan 2020].

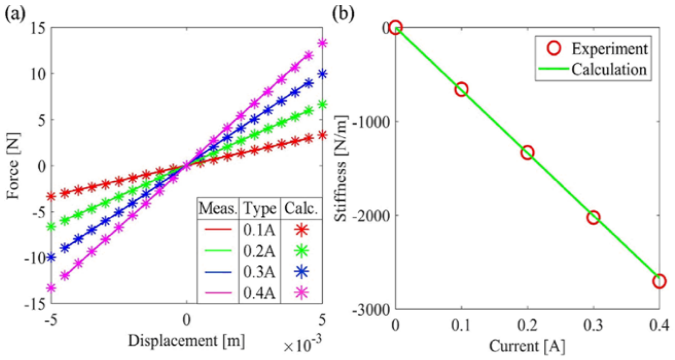


Fig. 2.10. Analiza liniarității LES-ului proiectat: (a) forța electromagnetică generată în funcție de deplasare. (b) rigiditatea axială în funcție de curent [Yuan 2020].

Huayan Pu și colab. [Pu 2019] propun un nou tip de arc electromagnetic multistrat (MES) compact, cu rigiditate negativă reglabilă, destinat izolării semi-active împotriva vibrațiilor. MES cuprinde mai multe straturi identice stivuite axial, fiecare strat conținând un inel magnetic permanent și o bobină inelară dispusă coaxial. Pentru a obține caracteristici de rigiditate negativă în apropierea punctului de echilibru, direcția curentului de control din fiecare bobină este determinată de direcția de magnetizare a magnetului din același strat. Fig. 2.11. prezintă unitatea MES în două configurații pentru rigiditate negativă. Direcția curentului în sensul acelor de ceasornic și direcția de magnetizare ascendentă sunt considerate pozitive. Astfel, o unitate cu un magnet cu magnetizare ascendentă poate fi reprezentată prin P, iar cea cu un magnet cu magnetizare descendentă prin N. Prin controlarea corespunzătoare a curentului în fiecare bobină, forța care acționează asupra magneților este zero la punctul de echilibru în care magneții coincid cu bobinele (deplasarea D a magneților față de bobine este zero). Mai mult, direcția forței electromagnetice este aceeași cu cea a deplasării relative într-o regiune mică din jurul punctului de echilibru. Acest lucru implică faptul că un arc cu rigiditate negativă acționează asupra magnetului mobil.

Prin combinarea mai multor straturi de unități MES de tip MES-P și MES–N, vezi Fig. 2.12., se pot obține multiple configurații MES pentru generarea rigidității negative, ceea ce oferă o mare flexibilitate și eficiență în proiectarea izolatorilor QZS și a sistemelor conforme care necesită controlul rigidității. Fig. 2.13. arată variația forțelor electromagnetice elastice în funcție de deplasarea unității MES, pentru 4 valori ale curentului de control. Pentru un curent de control variat de la -1,2 A la 1,2 A, MES-ul cu 6 straturi propus poate genera o rigiditate variabilă cuprinsă între –-9800 N/m și +9800 N/m.

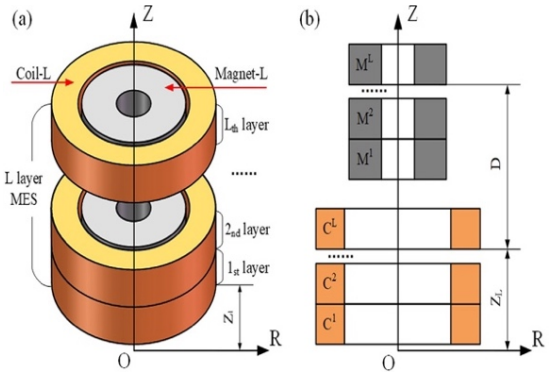


Fig. 2.11. Conceptul MES: (a) MES în punctul de echilibru; (b) MES cu o deplasare de D [Pu 2019].

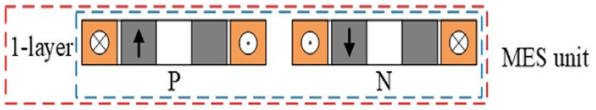


Fig. 2.12. Două configurații ale unităților MES pentru generarea rigidității negative [Pu 2019].

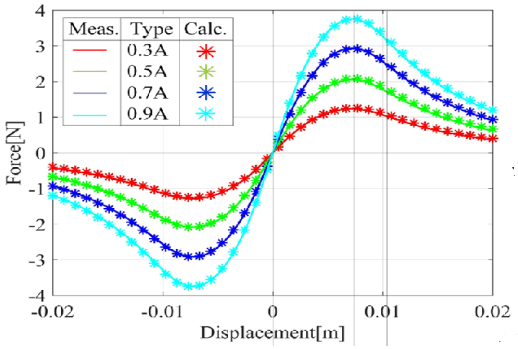


Fig. 2.13. Forțele electromagnetice calculate și măsurate ale unității MES [Pu 2019].

b. AEMEC bobină+magnet permanent+miez magneți

Cel mai simplu exemplu de AEMEC este cel propus în [Xu 2013], Fig. 2.14. Arcul electromagnetic include în principal un electromagnet și doi magneți dispuși repulsiv. Fig. 2.15. ilustrează formele de variație ale forței arcului electromagnetic în funcție de dimensiunea spațiului de aer pentru 4 valori ale tensiunii de alimentare a bobinei. Se constată că, odată cu creșterea tensiunii, atât forța

arcului electromagnetic, cât și panta curbelor de forță cresc, acest din urmă aspect indicând o variație a rigidității nu numai odată cu modificarea spațiului de aer, ci și odată cu tensiunea de alimentare a bobinei, sugerând o ajustare/control al rigidității la un punct de funcționare dorit, respectiv la o valoare prestabilită a spațiului de aer.

Principalele concluzii ale autorilor studiului sunt:

a) elasticitatea arcului electromagnetic prezintă proprietăți neliniare;

b) forța magnetică axială este decisă de magnetul cu energie de câmp magnetic mai mică și într-o anumită măsură forța crește odată cu creșterea volumului magnetului permanent 2;

c) pentru o valoare constantă a întrefierului, forța magnetică axială a arcului feromagnetic crește liniar cu creșterea tensiunii bobinei de excitație;

d) domeniul de aplicare al forței magnetice reglabile depinde de dimensiunile celor doi magneți, de densitatea fluxului magnetic de suprafață a acestora și de magnetizarea lor.

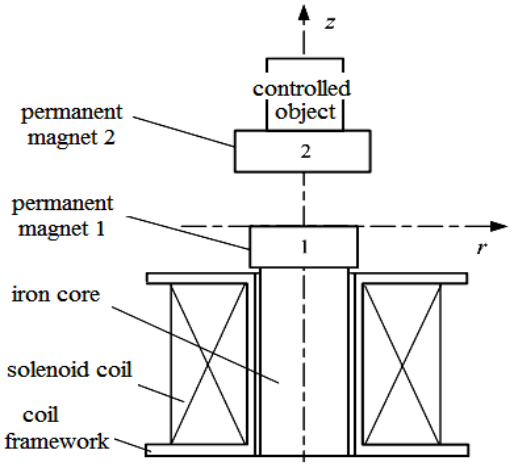


Fig. 2.14. Schema structurală a arcului electromagnetic [Xu 2013].

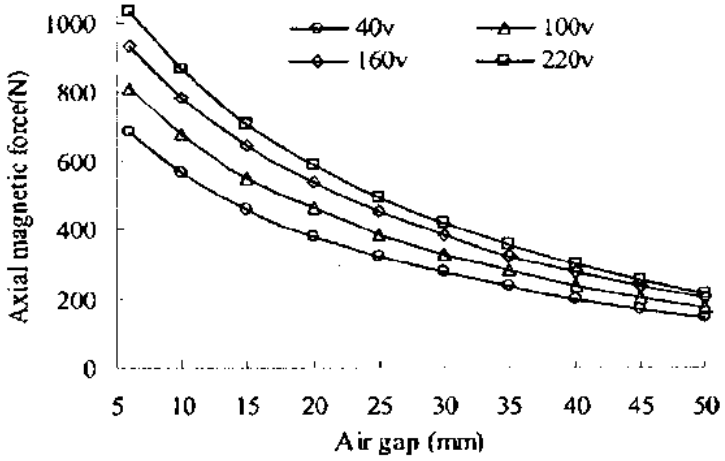


Fig. 2.15. Curbele de forță în funcție de distanța dintre magneți pentru 4 valori ale tensiunii de alimentare a bobinei: 40, 100, 160 și 220 V [Xu 2013].

Snamina et al. [Snamina 2010] propun un arc electromagnetic controlat care poate fi utilizat într-un sistem de reducere a vibrațiilor pentru scaunul operatorului unei mașini. Arcul electromagnetic este compus în principal din magneți, miezuri magnetice, bobine și un arbore, Fig. 2.16.(a). Doi magneți mobili Ne-Fe-B (1) sunt fixați la capătul unui arbore (7), iar alți doi magneți (2) sunt fixați pe miezul magnetic inferior (5). Circuitul magnetic este format din 4 miezuri magnetice laterale (3), un miez magnetic superior (4) și un miez magnetic inferior (5). 4 bobine (6) sunt instalate pe cele patru miezuri magnetice laterale (3). Mișcarea liniară a arborelui este realizată de o bucșă liniară (8). Poziția corectă a tuturor elementelor este asigurată de un capac superior (9) și unul inferior (10). Curenții care trec prin bobine (6) influențează câmpul magnetic din spațiul dintre magneți (1, 2) și, în același timp, forța arcului magnetic. Trebuie remarcat faptul că miezurile magnetice și bobinele au secțiune ortogonală.

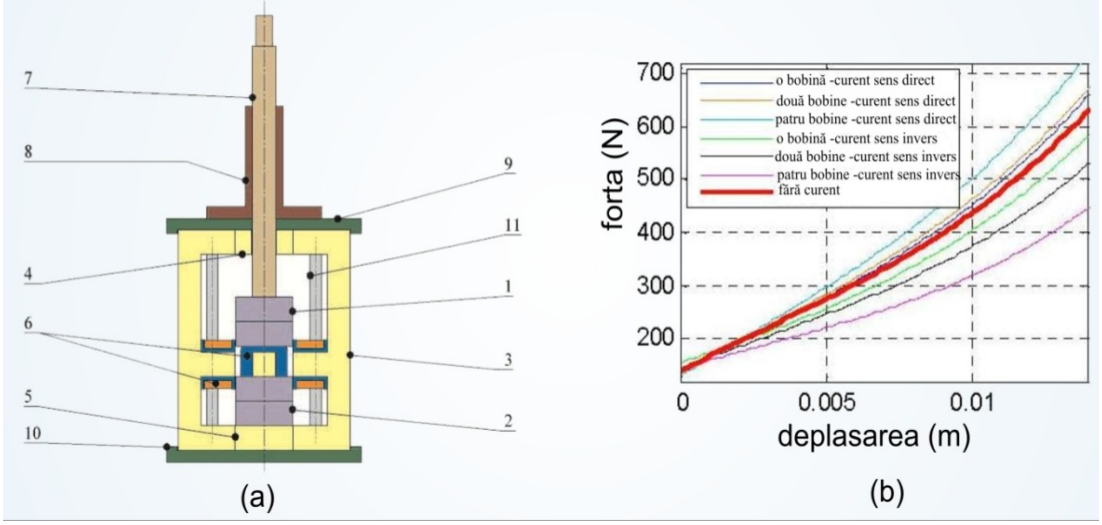


Fig. 2.16. Arc electromagnetic [Snamina 2010], (a) descriere, (b) caracteristici deplasare/forță.

Prototipul arcului electromagnetic destinat amortizării șocurilor este ilustrat în Fig. 2.17. Comutarea curentului în una, două sau toate cele patru bobine permite o variație de forță între 444 și 733 N. De menționat că, controlul arcului magnetic se face discontinuu iar variația elasticității / rigidității arcului magnetic este între limite relativ scăzute, după cum se poate deduce din analiza curbelor de forță vs. Deplasare, Fig. 2.16.(b). Din cele de mai sus, se poate constata că autorii lucrării nu au fost interesați de studiul controlului permanent al funcționării arcului prin modificarea continuă a curentului prin bobine, ci au avut în vederea numai schimbarea unor secvențe de lucru a celor 4 bobine alimentate cu un curent constant de 7A. Practic funcționarea studiată corespunde unui mod de lucru corespunzător unui

arc electromagnetic cu ajustare prealabilă a elasticității, deși dispozitivul ar putea lucra și în regim de arc electromagnetic cu controlul elasticității.

$$k(d_0) = \frac{\Delta F}{\Delta d}\ pentru\ d_0 = ct \qquad (2.11)$$



Fig. 2.17. Prototipul arcului electromagnetic [Snamina 2010].

Olaru et al. au descris conceptul [Olaru 2018], iar în [Olaru 2021] a fost prezentat studiul teoretic și experimental al unui arc electromagnetic inovator, a cărui forță și elasticitate variază în funcție de valoarea și direcția curentului electric care trece prin bobine. Prototipul experimental este alcătuit din doi magneți dispuși în repulsie, două bobine și o structură magnetică specială, a se vedea Fig. 2.26. Variația forței în funcție de deplasare la comprimarea arcului electromagnetic, pentru trei valori ale curentului electric, I=0, -2A și, respectiv, +2A, este ilustrată în Fig. 2.27. Dispunerea antagonistă a două arcuri cu caracteristici neliniare, Fig. 2.28., conduce la obținerea unor curbe cu caracteristici liniare sau cvasiliniare în jurul poziției de zero corespunzătoare situației de echilibru al arcului compus. Panta curbelor este controlată prin valoarea și sensul curentului prin cele două bobine.

Pentru variația curentului între -2A și +2A, variația elasticitatii/rigidității generate de prototip a fost de 3600 N/m, pentru o poziție de compresie a arcului la o distanță z=8 mm între cele două componente cu magneți, mobilă și fixă.

Principalul avantaj al actuatorului AEMEC 1, denumire cu care apare într-un studiu descris în subcap. 3.1., este capacitatea de a varia, în cel mai simplu și direct mod, rigiditatea și forța arcului magnetic, ceea ce asigură rapiditate și dinamică în controlul funcționării sistemelor bazate pe AEMEC.

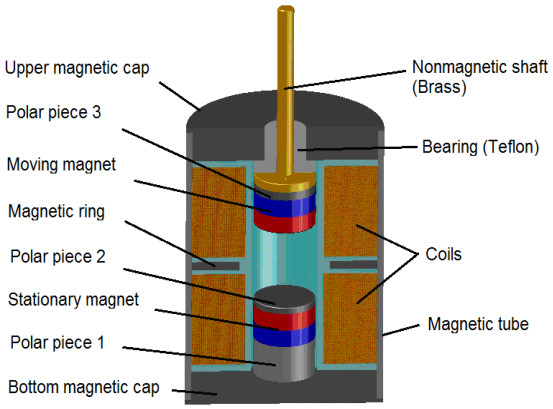


Fig. 2.18. Prototip experimental AEMEC 1 format din: Capac feromagnetic superior; Piesă polară 3; Magnet mobil; Inel feromagnetic; Piesă polară 2; Magnet staționar; Piesă polară 1; Capac feromagnetic inferior; Tijă non-magnetică (alamă); Bucșă (teflon); Bobine electrice; Carcasă fermognetică [Olaru 2021].

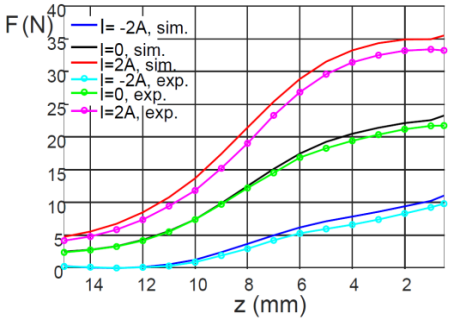
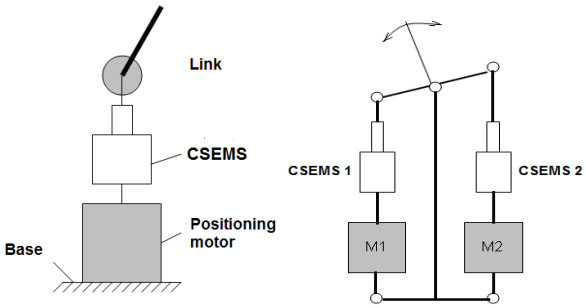


Fig. 2.19. Curbele forță-compresie pentru prototipul AEMEC 1[Olaru 2021].

Fig. 2.20 și Fig. 2.21. ilustrează 3 principii de utilizare a AEMEC-urilor în actuatoare cu rigiditate variabilă (VSA), iar Fig. 2.22. prezintă curbele forță vs. compresie pentru două AEMEC-uri antagoniste cu preîncărcarea arcului la 8 mm pentru configurația VSA din Fig. 2.20. [Olaru 2021].



(a) **(b)**

Fig. 2.20. Două principii VSA care utilizează AEMEC: (a) configurație cu un singur motor independent și un AEMEC (CSEMS), (b) două motoare antagoniste cu două AEMEC-uri antagoniste [Olaru 2021].

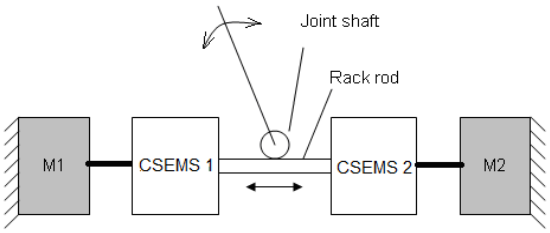


Fig. 2.21. Două motoare antagoniste cu două AEMEC-uri antagoniste dispuse în linie [Olaru 2021].

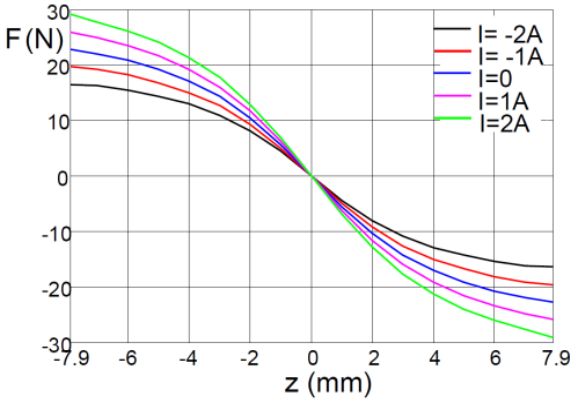


Fig. 2.22. Curbele forță-deplasare pentru două AEMEC-uri antagoniste cu preîncărcare a arcului verifica la 8 mm [Olaru 2021].

De asemenea, merită menționat Jiawei et al. [Xu 2020], care propune un sistem de izolare semi-activ cu rigiditate variabilă bazat pe un arc electromagnetic constituit dintr-un electromagnet și un magnet permanent. Sistemul de izolare împotriva vibrațiilor este proiectat astfel încât să utilizeze arcul electromagnetic în paralel cu arcul cu lame drepte. Prin controlul curentului din bobină, rigiditatea echivalentă și forța electromagnetică a sistemului sunt variabile pentru a realiza un control semi-activ.

Din cele de mai sus reiese că cele mai eficiente AEMEC studiate până în prezent, în ceea ce privește viteza și capacitatea de a controla forțele și rigiditatea, sunt cele proiectate în configurația bobină-magnet permanent și utilizabile în QFS, care pot asigura variația rigidității negative și pozitive în limite foarte mari, de până la ±9800 N/m. Dezavantajul lor este că trebuie asigurate condiții pentru a evita utilizarea materialelor feromagnetice în vecinătatea lor, care influențează distribuția câmpurilor magnetice care afectează modul de variație și valorile forțelor elastice și ale rigidității. În acest sens,

AEMEC-urile în configurație bobină-magnet permanent-miez magnetic, datorită faptului că sunt prevăzute cu circuite magnetice care contracarează fluxul magnetic în spațiul de aer pentru a genera forțe magnetice și rigiditate variabile controlate electric, au un interval de control mult mai restrâns, de maximum 3600 N/m de rigiditate pozitivă, așa cum se menționează în singura lucrare care oferă un astfel de rezultat pentru o configurație bobină-magnet permanent-miez magnetic [Olaru 2017]. Aceste configurații AEMEC au însă avantajul că pot fi proiectate să funcționeze integrate în sisteme sau ca produs/componentă individuală, care poate fi adăugată unui sistem, fiind dotate funcțional cu circuite magnetice care asigură implicit compatibilitatea magnetică, fără a influența mediul extern și fără a fi influențate de acesta în ceea ce privește câmpurile magnetice.

O altă direcție importantă este reprezentată de sistemele de izolare a vibrațiilor cu rigiditate cvasi-nulă. În aceste sisteme, combinația dintre rigiditatea pozitivă și rigiditatea negativă permite obținerea unei rigidități dinamice foarte mici în jurul poziției de echilibru, păstrând în același timp o rigiditate statică suficientă pentru susținerea sarcinii. Literatura recentă arată că mecanismele electromagnetice sunt tot mai mult utilizate în acest domeniu datorită răspunsului rapid, cursei utile, posibilității de control și costului relativ redus.

Un exemplu actual este izolatorul cu regiune de rigiditate cvasi-nulă controlabilă, propus pentru îmbunătățirea izolării vibrațiilor de joasă frecvență în echipamente de precizie. Studiul publicat în 2024 arată că introducerea unui mecanism de control magnetic poate delimita zona portantă de rigiditate statică ridicată de zona de lucru cu rigiditate cvasi-nulă, iar rezultatele experimentale au indicat reducerea semnalului de accelerație vârf-la-vârf cu aproximativ 66,7% în regiunea QZS.

Pe baza literaturii analizate, se poate afirma că arcurile electromagnetice cu elasticitate controlabilă se află încă într-o etapă de dezvoltare, dar prezintă un potențial aplicativ ridicat. Soluțiile actuale pot fi grupate în două mari familii constructive: sisteme de tip bobină–magnet permanent, care pot permite domenii largi de variație a rigidității, inclusiv rigiditate negativă, și sisteme bobină–magnet permanent–miez magnetic, care concentrează fluxul magnetic și pot asigura integrarea mai compactă în structuri tehnice.

Din perspectiva actualizării stadiului cercetării, direcția AEMEC este conectată tot mai puternic cu sistemele de izolare a vibrațiilor cu rigiditate cvasi-nulă. Review-ul publicat în RRST arată explicit că arcurile electromagnetice cu rigiditate controlabilă pot acoperi domenii foarte largi, de la valori negative până la valori pozitive ale rigidității, ceea ce le recomandă pentru procese rapide și aplicații adaptive.

În același timp, studiile recente privind izolarea neliniară de joasă frecvență confirmă interesul crescut pentru mecanisme electromagnetice datorită răspunsului rapid, posibilității de control activ, costului redus și adaptabilității la condiții variabile de funcționare.

Prin urmare, stadiul actual al cercetării AEMEC evidențiază existența unui număr încă redus de soluții de arcuri electromagnetice cu elasticitate controlabilă validate experimental, dar și o creștere a interesului pentru astfel de dispozitive în domenii precum vibroizolarea, robotică, actuatori complianți, recuperarea energiei din vibrații și sisteme adaptive. În acest context, cercetările privind familia AEMEC se înscriu într-o direcție actuală și justificată științific, având ca element distinctiv controlul direct al rigidității prin curent electric și posibilitatea dezvoltării unor configurații constructive originale cu magnetizare axială și radială.

Mai menționam, în final, că există preocupări științifice și tehnice în realizarea de arcuri magnetice cu elasticitate variabilă ce implică aranjamente de magneți dispuși repulsiv și atractiv care să producă controlul și anularea coeficienților de elasticitate de valori egale și contrare ca sens (elasticitate/rigiditate pozitivă și negativă), utile mai ales în obținerea sistemelor vibro-izolatoare necesare funcționarii unor echipamente sensibile la șocuri și vibrații, cum ar fi, echipamentele de manipulare genetică, mașinile de litografiere, microscoape și interferometre cu forță atomică, sisteme de comunicații cu laser, sisteme micro-electromecanice etc. Dintre cele mai recente exemple de astfel arcuri magnetice pentru izolatoare de vibrații se găsesc în [Jiulin Wu 2022], [Zhenhua Zhou 2022], [Koichi Oka 2020] și [Bo Yan 2020] și [Bo Yan 2022 a] [Bo Yan 2022 b].

Un sistem de levitație magnetică cu contro, activ și rigiditate ajustabilă a fost propus de Ferreira et al. [Ferreira 2019].

2.2. Soluții tehnice originale de arcuri magnetice controlabile furnizate de bibliografia de patente

Ca și în cazul investigării literaturii științifice, analiza bibliografiei de patente arată că există relativ puține soluții tehnice dedicate explicit arcurilor magnetice sau electromagnetice cu elasticitate/rigiditate controlabilă. Cele mai multe invenții identificate urmăresc fie obținerea unei forțe magnetice de revenire fără contact mecanic, fie realizarea unei caracteristici forță - deplasare cât mai liniare, fie modificarea forței printr-un mecanism auxiliar. Din această perspectivă, este necesară diferențierea clară între arcurile magnetice cu elasticitate ajustabilă, la care reglarea se face prin repoziționări mecanice sau prin modificarea geometriei circuitului magnetic, și arcurile electromagnetice cu elasticitate controlabilă, la care modificarea forței și rigidității se face direct prin curent electric de comandă.

În urma analizei brevetelor considerate relevante, se pot reține trei soluții tehnice principale din literatura de patente internațională, la care se adaugă soluția AEMEC aflată în legătură directă cu prezentai teza. Prima soluție se referă la un arc magnetic controlabil prin rotirea unui magnet permanent

cilindric magnetizat diametral; a doua propune un arc electromagnetic cu ax mobil, magneți permanenți și bobină de comandă; a treia descrie un sistem magnetic liniar combinat cu funcție de motor, iar soluția AEMEC propune controlul direct al forței și elasticității prin suprapunerea câmpului produs de bobine peste câmpul magneților permanenți.

Dintre acestea am reținut trei brevete S.U.A, descrise pe scurt în continuare dintre care primul este un arc magnetic controlabil prin rotirea unui magnet mobil acționat manual sau cu un servomotor, deci nu este un arc electromagnetic, al doilea reprezintă un arc electromagnetic controlat printr-un curent de comandă aplicat unei bobine iar al treilea este un arc magnetic liniar, de asemenea nefiind un arc electromagnetic.

În [Kamiunten 2016] (US 9396858), este descris un arc magnetic cu forțe și elasticitate controlabile ce include un magnet permanent cilindric cu polarizare diametrală, ce formează o pereche de poli N-S, care este interpus la unul din capete între două juguri magnetice dispuse față în față și un element mobil confecționat tot din material magnetizabil și dispus la celălalt capăt al perechii de juguri, care este prevăzut a avea o mișcare liniară pe o direcție perpendiculară pe axa magnetului (Fig. 2.31.).

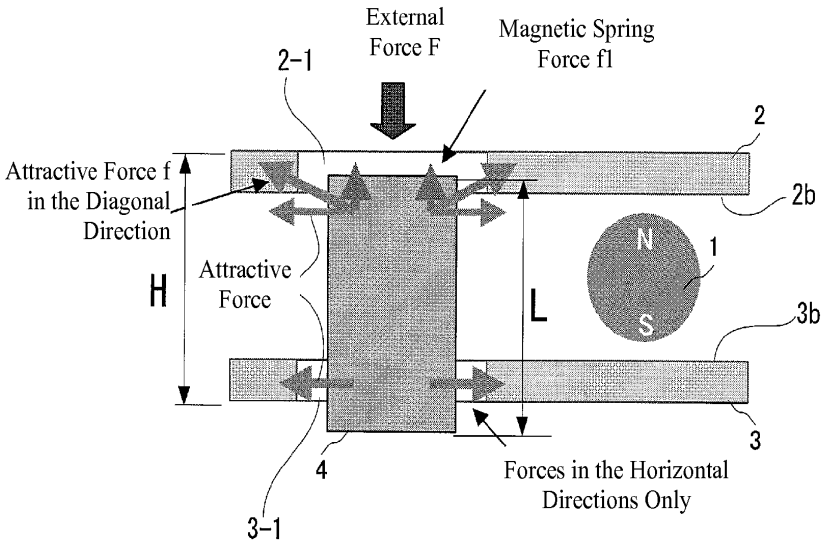


Fig. 2.31. Arc magnetic cu forța și elasticitatea controlabile prin rotirea unui magnet cilindric magnetizat diametral [Kamiunten 2016]: 1–magnet permanent cilindric ce poate fi rotit; 2 și 3 – juguri magnetice; 4-element mobil magnetic.

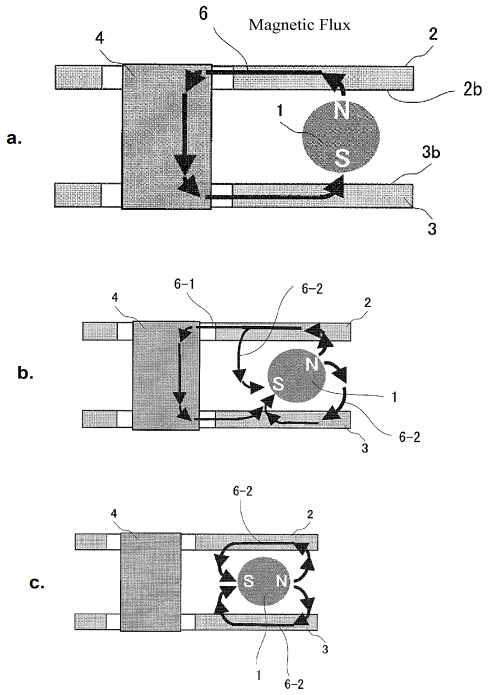


Fig. 2.32. Metoda de variere a distribuției fluxului magnetic în arcul electromagnetic: a. axa N-S a magnetului este paralele cu axa elementului magnetic mobil sau la 90º față de axele paralele a celor două juguri magnetice, fluxul magnetic este maxim în circuitul magnetic, forța magnetică a arcului este maximă. f_1 =max.; b. magnetul este rotit la 45º, o parte a fluxului magnetic se închide prin aer, fluxul în circuitul magnetic se reduce, forța magnetică a arcului scade; c. axa N-S a magnetului este la 90º față de axa elementului mobil, fluxul magnetic se închide în întregime prin circuitul magnetic al jugurilor, fără a mai trece prin elementul mobil al arcului, forța magnetică a arcului devine zero, f_1 =0.

Fig. 2.33. ilustrează curbele de variație ale forței de împingere a arcului magnetic cu schimbarea poziției față de cea de zero, de echilibru.

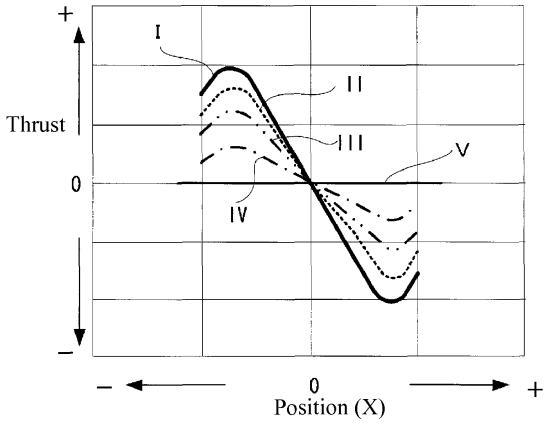


Fig. 2.33. Caracteristici forța-deplasare ale arcului feromagnetic pentru unghiuri ale magnetului permanent: I-0º; II-45º; III-60º; IV-75ºsi V-90º.

Se mai cunoaște un arc electromagnetic care conține un ax mobil din material magnetic prevăzut cu cel puțin doi magneți și o parte cilindrică ca stator, tot din material magnetic, profilată în interior pentru a prevede un număr de dinți egal cu numărul magneților (Fig. 2.34.a.) (US 8550221) [Paulides 2013]. Când axul 1 este poziționat astfel încât magneții sunt față în față cu dinții statorului și suprafața comună este maximă, forța magnetică a arcului este, de asemenea, maximă. Deplasarea axului din această poziție determină scăderea forței arcului. Activarea arcului, cu modificarea în plus sau în minus a forței arcului și a elasticității sale, se face prin aplicarea și varierea curentului continuu dintr-o bobină dispusă pe partea stator, fluxul magnetic al bobinei suprapunându-se peste cel al magneților. Arcul din Fig. 2.34. este prevăzut cu doi magneți și doi dinți dar se pot realiza arcuri cu mai mulți magneți și dinți polari, ceea ce produce creșterea forței elastice a arcului.

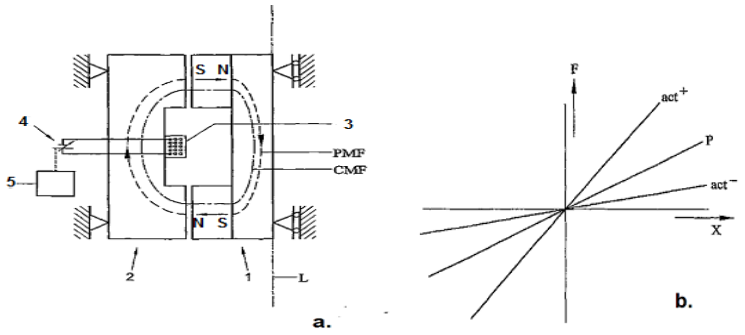


Fig. 2.34. Arc electromagnetic: a. secțiune schematică transversală a arcului electromagnetic, 1-partea mobilă; 2-partea fixă, 3-bobina, 4-sursa de tensiune variabilă, 5-element de control al sursei de alimentare; b. graficul forță-deplasare a arcului electromagnetic, unde p este caracteristica arcului electromagnetic pasiv (curent zero), iar celelalte două sunt pentru arcul activ când bobina este parcursă de un curent de comandă într-un sens, respectiv în celălalt sens, provocând creșterea respectiv scăderea forțelor în raport cu cazul pasiv.

Un alt concept patentat [Patt 1991], dezvoltat sub egida NASA, care utilizează un arc magnetic, asigură o funcționare liniară, inclusiv o variație a forței cu deplasarea liniară, urmărește să: 1. Ofere un aranjament al magneților, formând un arc magnetic care să permită o mișcare relativ lungă a sub-ansamblului acționat de arcul magnetic, folosind o funcție lineară a forței de mișcare; 2. Furnizeze arcuri magnetice care sunt liniare în deplasarea de-a lungul coordonatelor selectate ale diferitelor sisteme de coordonate; 3. Furnizeze o combinație arc magnetic/motor, în care un sistem de magnet nu oferă doar o forță de centrare a arcului cu cursă lungă, ci servește și ca magnet de câmp al unui motor de antrenare pentru oscilarea articolului cu arc în acest interval de mișcare. Aspectele tehnologice prezentate sunt foarte importante și cu aplicativitate în domeniul actuatoarelor sau a motoarelor de acționare.

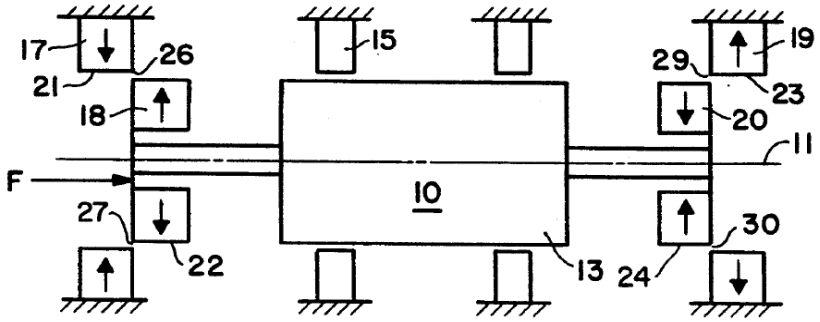


Fig. 2.35. Diagramă schematică mecanică a unei mașini cilindrice având un arc magnetic.

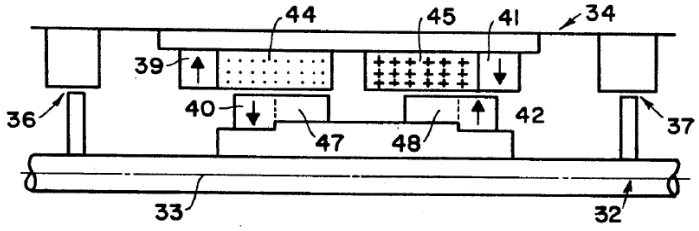


Fig. 2.36. Vedere schematică a unei mașini cilindrice cu o combinație arc/motor.

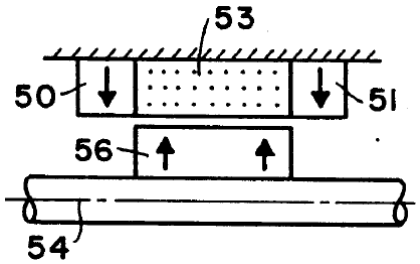


Fig. 2.37. Vedere schematică a unui prim exemplu de realizare alternativ arc/motor având o singură bobină.

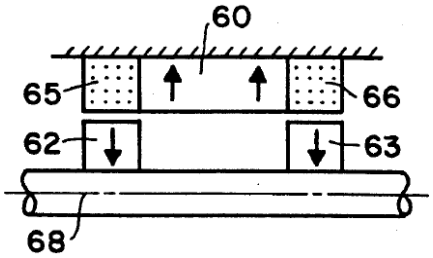


Fig. 2.38. Vedere schematică a unui al doilea exemplu de realizare alternativ cu arc/motor având un singur magnet exterior între jumătățile bobinei.

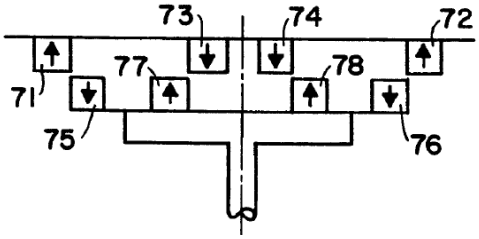


Fig. 2.39. Vedere schematică a unui prim exemplu de realizare cu arc radial.

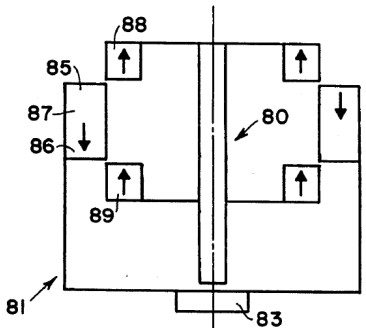


Fig. 2.40. Vedere schematică a unui al doilea exemplu de realizare cu arc radial.

Arcul electromagnetic cu elasticitate controlabilă, AEMEC 1, menționat în subcapitolul 2.1. (Fig. 2.41.), care are la bază o soluție tehnică brevetată [Patt 1991] cu schema din Fig. 2.41, conține un ansamblu magnetic staționar 1 constituit dintr-un magnet 1', un disc subțire 1'' dispus pe fața superioară a magnetului și un disc gros 1''' dispus pe fata inferioară a magnetului, ambele discuri fiind confecționate dintr-un material magnetic și un ansamblu magnetic mobil 2 format dintr-un magnet 2', un disc 2'' aplicat pe fața superioară a magnetului 2', realizat din material magnetic și un ax de acționare 2''', care poate fi sau nu, confecționat tot din material magnetic, prima variantă având avantajul că permite confecționarea unei piese feromagnetice unice ce conține axul și discul și care se fixează direct pe magnet, eliminând astfel realizarea unei îmbinări mecanice dintre ax și disc. Dispozitivul mai conține o bobină 3 alcătuită dintr-o carcasă nemetalică 3' și o înfășurare electrică 3'', o bobină 4 alcătuită, de asemenea, dintr-o carcasă nemetalică 4' și o înfășurare electrică 4'', un inel 5 din material magnetic, un lagăr 9 pentru asigurarea glisării axului 2''', o piesă inelară 10 pentru limitarea și amortizarea poziționării ansamblului mobil în partea superioară a dispozitivului, un manșon distanțier 11 și o carcasă exterioară constituită dintr-o cămașă cilindrică 6, un capac superior 7 și un capac inferior 8, toate realizate din material magnetic.

Cele două ansambluri magnetice, 1 și 2, constituie un arc magnetic pasiv. Când un curent, I=I+, parcurge cele două înfășurări cu sensul indicat în fluxurile magnetice create de cele două bobine au același sens cu fluxul magnetic creat de magnetul înconjurat de bobina respectivă. În aceste condiții, forța arcului magnetic crește, crescând în același timp și panta curbei forță-deplasare, deci crește și valoarea constantei de elasticitate a arcului magnetic. La schimbarea sensului curentului electric prin bobine, I=I-, se întâmplă fenomenul invers, adică fluxurile magnetice create de bobine reduc fluxurile magnetice ale magneților, ceea ce are ca efect reducerea forței arcului magnetic și a constantei elastice a arcului magnetic. Cele două bobine pot fi conectate electric între ele, când se dorește folosirea aceluiași curent prin cele două bobine sau pot fi neconectate electric și parcurse de curenți diferiți, atunci când aplicația impune anumite cerințe ce decurg din această opțiune.

Fig. 2.42. ilustrează cele două domenii de variație maximă a forțelor magneto-elastice ale arcului, unul situat deasupra și altul dedesubtul curbei arcului magnetic pasiv ce corespunde absenței curentului electric, I=0, limitate de curbele extreme ale forței obținute pentru curenții maximi prin bobine, $I= I_M$.

Nivelul de control al elasticității arcului magnetic activ, Nc, pentru o poziție z_0 a magnetului mobil 2' față de discul superior 1'' al magnetului staționar 1, prin aplicarea curentului de comandă în intervalul (-I,+I), se poate aprecia prin relația,

$$N_c = \frac{\Delta k}{k_0} \qquad (2.3)$$

, unde $k_0=dF/dz$ este constanta elastică a arcului magnetic pasiv în punctul z_0, iar $\Delta k=k_1-k_2=dF_1/dz-dF_2/dz$, reprezintă variația maximă a constantelor elastice în punctul z_0, prin aplicarea curenților prin bobine, I+ și respectiv I-.

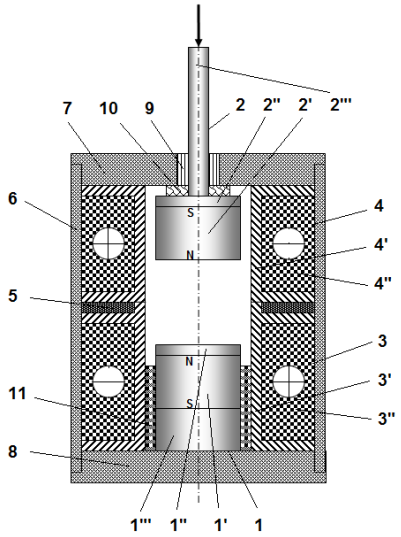


Fig. 2.41. Schema conceptuală a arcului electromagnetic cu elasticitate controlabilă.

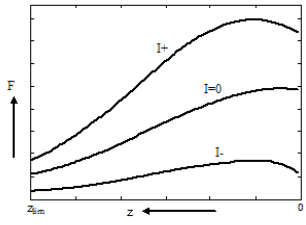


Fig. 2.42. Curbe de variație a forțelor elastice extreme în funcție de poziția ansamblului mobil față de cel staționar.

În cazul curbelor din Fig. 2.42., valorile lui depășesc cu mult 100%, ajungând la peste 150% în punctele de funcționare situate la începutul cursei ansamblului mobil.

Nivelul de control și parametrii de funcționare ai dispozitivului depind în mod hotărâtor de componentele feromagnetice ale acestuia. Astfel, discul subțire 1” al magnetului staționar 1’ reduce substanțial forța repulsivă la apropierea magnetului mobil 2’ de suprafața discului 1”, creând condiția incipientă pentru creșterea semnificativă a controlului elasticității prin introducerea celorlalte componente ale circuitului magnetic al celor două bobine și anume, discul gros 1”’ al ansamblului staționar 1, discul 2” din ansamblul mobil 2, carcasa, inelul 5 și axul 2”’, dacă acesta este confecționat din material magnetic.

Dispozitivul AEMEC 1 descris, este analizat și studiat teoretic și experimental în subcapitolul 3.1. sub aspectul comportării la vibrații, și are ca principal avantaj capacitatea de a varia în cel mai simplu și direct mod elasticitatea și forța arcului magnetic, modificând câmpul magnetic în spațiul de funcționare cuprins între cele două ansambluri magnetice, prin suprapunerea peste câmpul magnetic creat de cei doi magneți a câmpului magnetic produs de două bobine parcurse de același curent de comandă sau de curenți diferiți.

Observații comparative asupra soluțiilor brevetate mentionate

Analiza brevetelor evidențiază faptul că soluțiile tehnice existente urmăresc controlul forței elastice prin metode diferite. În cazul [Kamiunten 2016], reglarea se face prin rotirea unui magnet diametral și modificarea distribuției fluxului magnetic. În cazul [Paulides 2013], controlul este electromagnetic, prin suprapunerea fluxului unei bobine peste fluxul magneților montați pe un ax mobil. În cazul [Patt 1991], accentul este pus pe integrarea funcției de arc magnetic cu funcția de motor liniar. În cazul AEMEC, controlul este realizat direct prin curent, într-o structură cu magneți permanenți, bobine și circuit magnetic dedicat.

Din perspectiva prezentei teze, cele mai relevante sunt soluțiile în care rigiditatea poate fi modificată prin curent electric, deoarece acestea răspund cerinței de control rapid, continuu și integrabil electronic. Soluțiile cu reglaj mecanic rămân importante ca principiu de variație a caracteristicii magnetice, dar prezintă limitări privind viteza de răspuns, compactitatea și integrarea în sisteme cu dinamică ridicată.

Pe baza celor analizate, se poate afirma că domeniul arcurilor electromagnetice cu elasticitate controlabilă rămâne insuficient dezvoltat la nivel de soluții brevetate și validate experimental. Acest aspect justifică dezvoltarea familiei AEMEC, respectiv a variantelor AEMEC 2 și AEMEC 3, care urmăresc extinderea controlului elasticității prin configurații constructive noi, prin utilizarea magneților cilindrici inelari cu magnetizare axială și radială și prin integrarea bobinelor de comandă în circuite magnetice adecvate.

2.3. Concluzii la capitol

Analiza stadiului actual al cunoașterii privind arcurile electromagnetice cu elasticitate controlabilă evidențiază faptul că acest domeniu se află într-o etapă de dezvoltare activă, determinată de cerințele tot mai ridicate ale sistemelor moderne din robotică, mecatronică, vibroizolare, transport inteligent, echipamente medicale și sisteme adaptive. În comparație cu arcurile mecanice convenționale, soluțiile magnetice și electromagnetice oferă avantaje importante precum funcționarea fără contact mecanic direct, lipsa uzurii prin frecare, zgomot redus, durată mare de viață și posibilitatea integrării în structuri inteligente comandate electronic.

Din analiza literaturii de specialitate rezultă existența a două mari categorii de arcuri magnetice cu rigiditate variabilă, asa cum sunt diferențiate în [Olaru, Muraviev 2021], [Pu 2019]:

a) arcuri magnetice cu elasticitate ajustabilă, la care rigiditatea este modificată prin repoziționarea unor componente magnetice sau prin schimbarea configurației constructive, în general înaintea funcționării sau în regim lent;
b) arcuri electromagnetice cu elasticitate controlabilă, la care rigiditatea și forța elastică pot fi modificate în timp real prin variația amplitudinii și sensului curentului electric aplicat bobinelor de comandă.

Prima categorie este mai bine reprezentată numeric în literatura internațională, în special prin arcuri magnetice de torsiune utilizate în articulații robotice cu rigiditate variabilă, dispozitive de prindere și mecanisme de manipulare. Aceste soluții sunt valoroase prin simplitatea energetică, deoarece nu necesită consum electric permanent pentru menținerea rigidității. Totuși, modificarea elasticității se realizează de regulă prin servomecanisme auxiliare sau repoziționări mecanice, ceea ce limitează viteza de răspuns și aplicabilitatea în procese dinamice rapide.

A doua categorie, cea a arcurilor electromagnetice cu elasticitate controlabilă, prezintă un interes superior pentru aplicațiile moderne deoarece permite controlul direct și continuu al rigidității. Literatura analizată arată că aceste dispozitive pot fi utilizate în sisteme de izolare a vibrațiilor, mecanisme cu rigiditate cvasi-nulă, actuatori complianți, roboți colaborativi, dispozitive medicale și sisteme de compensare a forțelor. În mod particular, studiile recente confirmă că mecanismele electromagnetice permit obținerea unor domenii largi de variație a rigidității, inclusiv rigiditate negativă, utilă în sistemele QZS (Quasi-Zero Stiffness).

Cu toate acestea, analiza lucrărilor publicate și a brevetelor relevă faptul că numărul soluțiilor constructive validate experimental rămâne redus. Multe concepte sunt prezentate la nivel teoretic sau numeric, fără validări experimentale complete, iar unele soluții existente oferă doar domenii limitate de variație a rigidității. În alte cazuri apar limitări tehnologice legate de:

- inductanța ridicată a bobinelor și răspunsul tranzitoriu lent;
- saturația magnetică a miezurilor feromagnetice;
- încălzirea bobinelor și managementul termic;
- histerezisul magnetic;
- apariția forțelor laterale nedorite;
- complexitatea constructivă sau volum ridicat;
- dificultatea integrării compacte în sisteme reale.

Se poate concluziona că direcțiile majore de dezvoltare ale domeniului sunt:

- creșterea domeniului de variație a rigidității;
- reducerea consumului energetic al controlului activ;
- miniaturizarea și compactizarea structurilor constructive;
- utilizarea magneților performanți și a materialelor magnetice avansate;
- integrarea senzorilor și a controlului inteligent în timp real;
- dezvoltarea de actuatori cu rigiditate variabilă pentru robotică;
- realizarea de sisteme vibroizolatoare adaptive pentru frecvențe joase;
- validarea experimentală extinsă în condiții reale de funcționare.

În concluzie, stadiul actual al cercetării demonstrează că arcurile electromagnetice cu elasticitate controlabilă reprezintă un domeniu emergent, cu potențial științific și aplicativ ridicat, aflat încă departe de maturitatea deplină. Tocmai această situație justifică și susține cercetările originale dezvoltate în capitolul următor, dedicate familiei de actuatoare de forțe elastice controlabile AEMEC 1, AEMEC 2O și AEMEC 3, orientate către extinderea performanțelor și aplicabilității arcurilor electromagnetice moderne.

3. CONTRIBUȚII ȘTIINȚIFICE ORIGINALE PRIVIND ARCURILE ELECTROMAGNETICE CU ELASTICITATE CONTROLABILĂ

3.1. Modelarea și analiza la vibrații a arcului electromagnetic AEMEC 1

În capitolul 2 s-a menționat și a fost descrisă soluția tehnică originală a arcului cu pretensionare unidirecțională AEMEC 1, care permite varierea în timp real a forței și a elasticitatii arcului electromagnetic prin intermediul unui curent electric de comandă.

În continuare se prezintă un studiu teoretic și experimental al funcționării AEMEC 1 la vibrații. Modelarea dinamică a prototipului analizat evidențiază în principal parametrii proprii ai comportamentului la vibrații, precum frecvența naturală de vibrație, frecvența de rezonanță și coeficientul de amortizare.

3.1.1. Conceptul AEMEC 1 cu magneți cilindrici magnetizați axial și pretensionare unidirecțională

Fig. 3.1 ilustrează ideea de bază pentru AEMEC 1, cu utilizarea a doi magneți cilindrici cu magnetizare axială, la care elasticitatea arcului magnetic poate fi modificată folosind un curent de comandă [Olaru 2021]. Magnetul staționar este asociat cu o bobină și o structură magnetică formată din carcasă, două piese polare și un inel. Această structură magnetică asigură direcționarea fluxului magnetic produs de bobina alimentată cu curent în întrefierul dintre cei doi magneți. Fluxul magnetic al bobinei se suprapune peste fluxul magnetic al celor doi magneți și în funcție de direcția curentului din bobină, se obține un flux magnetic total mai mare sau mai mic decât în absența curentului electric. Rezultatul este o creștere sau o scădere a forței arcului magnetic, respectiv, însoțită de o modificare a rigidității sale, așa cum se va arăta mai jos. Semnele + și – din figură semnifică direcția curentului prin bobină, +I și respectiv –I, pentru un curent I, care determină creșterea sau scăderea fluxului magnetic total al ansamblului electromagnetic cu magnetul staționar, adică creșterea sau scăderea forței arcului magnetic. Soluția tehnică brevetată a fost prezentată în subcapitol 2.2.

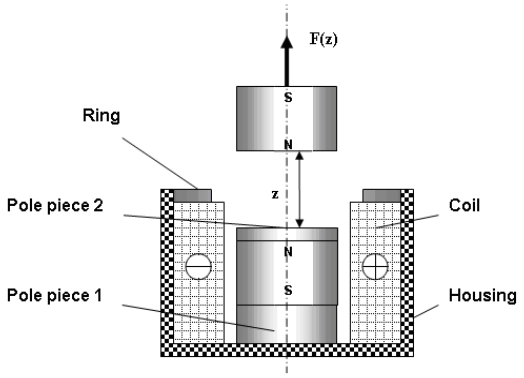


Fig. 3.1. Conceptul de arc electromagnetic cu elasticitate controlabilă bazat pe doi magneți cilindrici cu magnetizare axială, AEMEC 1.

3.1.2. Studiul și optimizarea prin simulare a modelului de arc electromagnetic AEMEC 1

Modelul prototip AEMEC 1 utilizat pentru studiul comportării la vibrații este prezentat în Fig. 3.2. [24], iar curbele de variație a forței în funcție de comprimarea z, obținute prin simulări și experiment, sunt prezentate în Fig. 3.3. [Olaru 2017]. Pe baza curbelor experimentale din Fig. 3.3., a fost calculat parametrul de calitate al AEMEC, nivelul de control al rigidității, L_{SC} (adimensional), definit prin relația (3.1) ca raportul dintre diferența de rigiditate maximă în două puncte active de funcționare situate pe curbele curentului maxim pozitiv și maxim negativ și rigiditatea într-un punct de pe curba pasivă (I=0), la echilibru:

$$L_{sc} = \frac{\Delta k_M}{k_0} = \frac{(k_{M+} - k_{M-})}{k_0} \qquad (3.1)$$

, unde k_0, k_{M+} și k_{M-} reprezintă coeficientul de rigiditate al arcului într-o poziție pasivă a acestuia (z_0, F_0 (z_0, 0)), într-o poziție activă a arcului la curent pozitiv (z_1, F_1 (z_1, +I)) și într-o altă poziție activă a arcului la curent negativ (z_2, F_2 (z_2, -I)), respectiv.

Valoarea maximă, L_{SC} = 133, a fost obținută pentru poziția z = 8 mm a ansamblului magnetic mobil față de cel staționar, cu o variație a rigidității, k_{M+} - k_{M-} = 2,70 (N/mm).

Pentru modelarea matematică a dinamicii AEMEC 1, se utilizează modelul echivalent din Fig. 3.4. Parametrii m, k și c reprezintă, respectiv, masa mobilă a arcului electromagnetic, coeficientul de rigiditate și coeficientul de amortizare mecanică. În modelul echivalent Fig. 3.4., F_0 (z_0) este o forță constantă aplicată masei mobile prin poziționarea acesteia prin comprimarea arcului un spațiu magnetic, z_0. Această forță de preîncărcare a arcului electromagnetic nu afectează comportamentul dinamic general al sistemului vibrator.

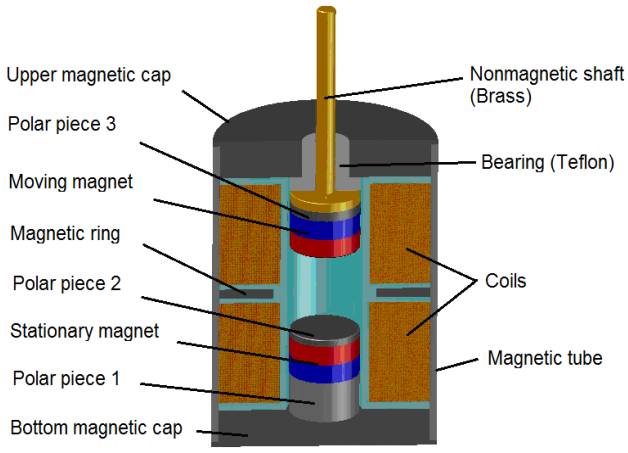


Fig. 3.2. Prototip AEMEC 1 [Olaru 2021].

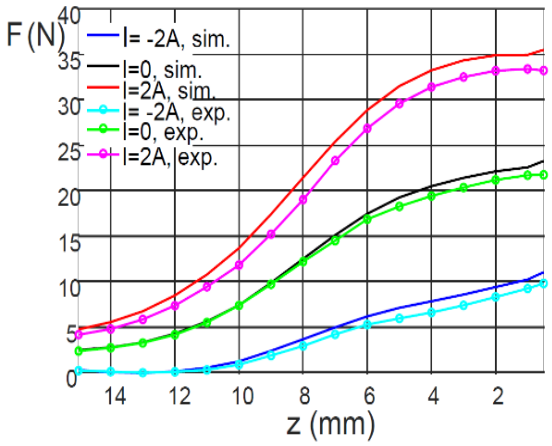


Fig. 3.3. Curbe de forță în funcție de deplasarea la comprimare (poziția de zero a axelor corespunde distanței inițiale de 15 cm între magnetul mobil și cel staționar) pentru AEMEC 1, obținute prin simulare cu ajutorul programului COMSOL MultiPhysics și cu datele experimentale [Olaru 2021].

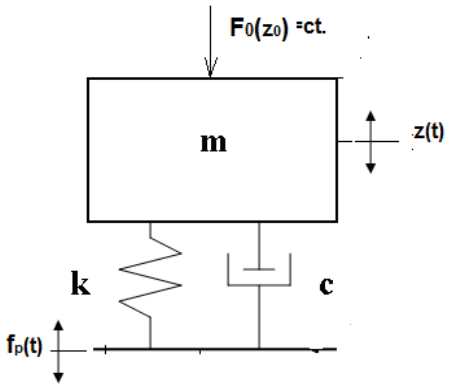


Fig. 3.4. Modelul echivalent al AEMEC 1.

Aplicând teoria generală a studiului sistemelor oscilante liniare de ordinul doi, obținem ecuația cu parametrii specifici ai sistemelor oscilante,

$$\ddot{z} + 2\zeta\omega_n z + \omega_n^2 z = \frac{f_P(t)}{m} = \frac{F_P}{m}\sin\omega t = Y_P \sin\omega t \qquad (3.2)$$

unde $f_P(t) = F_P \sin\omega t$ reprezintă forța vibratorie sinusoidală aplicată AEMEC 1, $Y_P = \frac{F_P}{m}$ este amplitudinea în regim permanent a acceleratiei perturbatoare, $\zeta = c/2\sqrt{mk}$ este coeficientul de amortizare, $\omega_n = \sqrt{k/m}$ fiind pulsatia naturală.

Din (3.2) rezultă că, prin aplicarea unei forțe sinusoidale asupra sistemului vibrator din Fig. 3.4., se obține o vibrație sinusoidală pentru masa mobilă a sistemului, cu amplitudinea dată de relația,

$$Z(\omega) = \frac{F_P}{k} \frac{\omega_n^2}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega)^2}} \qquad (3.3)$$

Notăm cu r frecvența normalizată, adică raportul dintre frecvența forței și frecvența naturală a sistemului vibrator, $r = \omega/\omega_n = f/f_n$, care dă amplitudinea vibrației *Z*, definită de următoarea relație:

$$Z = \frac{F_P}{k} \frac{1}{\sqrt{(1-r)^2+(2\zeta r)^2}} \quad (3.4)$$

La rezonanță, *r=1* și

$$Z = \frac{F_P}{k}\frac{1}{2\zeta} = \frac{F_P}{c}\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (3.5)$$

, ceea ce înseamnă că amplitudinea maximă a vibrației, Z, a masei libere este proporțională cu rădăcina pătrată inversă a constantei de rigiditate a arcului electromagnetic.

Comportamentul sistemului depinde de valorile celor doi parametri fundamentali, pulsația naturală ωn și factorul de amortizare ζ. Astfel, pulsația și frecvența de rezonanță au următoarele expresii:

$$\omega_{rez} = \omega_n\sqrt{1-\zeta^2} < \omega_n \quad (3.6)$$

și

$$f_{rez} = f_n\sqrt{1-\zeta^2} < f_n \quad (3.7)$$

De exemplu, frecvența naturală de vibrație a masei în mișcare la distanța *z*=8 mm, pentru arcul electromagnetic pasiv (*I=0*), unde coeficientul de rigiditate este *k*=2,71 N/mm [9], calculată cu ajutorul relației are valoarea de 51 Hz (26 g este masa ansamblului mobil a AEMEC).

Conform relației (3.5), raportul dintre cele două amplitudini de vibrație la rezonanță, corespunzător variației valorilor rigidității de la k_1 la k_2 pentru funcționarea unui AEMEC 1 în jurul unei poziții staționare, z_i = constant (vezi Fig. 3.3.), este

$$\frac{Z_2}{Z_1} = \sqrt{\frac{k_1}{k_2}} \quad (3.8)$$

ceea ce înseamnă că amplificarea sau atenuarea vibrației la axul AEMEC cu forță de preîncărcare variază proporțional cu rădăcina pătrată a raportului invers al celor două rigidități.

3.1.3. Rezultate experimentale

Rezultatele experimentale au fost obținute utilizând configurația experimentală prezentată în Fig. 3.5, [Muraviev 2025]. Structura mecanică elastică este alcătuită în principal din două membrane metalice care conțin între ele un generator de vibrații sinusoidale și AEMEC comprimat la un spațiu de aer de 8 mm între ansamblul magnetic mobil și cel staționar. Dimensiunile AEMEC sunt de 48 mm și, respectiv, 70 mm în diametru și înălțime. Magneții inelari au diametrul de 15 mm și înălțimea de 8 mm.

Diametrul interior și înălțimea unei bobine sunt de 18 mm, respectiv 22 mm. Cele doua bobine au fiecare N=600 de fire de cupru, cu diametrul de 0,55 mm, și sunt conectate în serie și în opoziție de fază. Au fost utilizate următoarele aparate și dispozitive: sursa de alimentare liniară cu curent continuu Instek GPS-2303 cu 2 canale, 30 V/3 A, 180 W, generator de frecvență de alimentare de 10 W, vibrator inerțial descris în [Olaru 2018] și vibrometru PCE-VT 204.

Fig. 3.6. ilustrează caracteristica de frecvență a vibratorului (valori ale amplitudinii „vârf la vârf") la un curent de excitație sinusoidal, I=0,25 A. Se constată că frecvența de rezonanță a vibratorului este de 61 Hz.

Variațiile vibrațiilor (valori „vârf la vârf") în funcție de deplasarea tijei AEMEC fixate pe membrana metalică (a) în configurația experimentală sunt reprezentate grafic în Fig. 3.7., pentru 3 cazuri de funcționare ale AEMEC: pasiv (I = 0), activ-pozitiv (I = +1,5 A) și activ-negativ (I = -1,5 A). Curbele din Fig. 3.6. și 3.7. corespund măsurătorilor efectuate cu vibratorul și AEMEC 1 asamblate în ansamblu, așa cum se arată în Fig. 3.5.

Frecvența de rezonanță măsurată la nivelul membranei superioare este de 68 Hz, diferită de frecvențele de rezonanță ale AEMEC 1 și vibratorului, respectiv 51 Hz și 61 Hz. Explicația este influența celor două membrane elastice care au frecvențe de rezonanță diferite.

Fig. 3.7. arată efectul major al curentului de control asupra amplitudinii vibrației transmise de arborele AEMEC 1, observat prin scăderea, respectiv creșterea vibrației în raport cu starea pasivă a dispozitivului, în funcție de direcția și valoarea acestui curent.

Pentru a compara rezultatele teoretice obținute prin modelarea matematică cu rezultatele experimentale privind funcționarea vibrațională AEMEC 1, utilizăm relația (3.8), ceea ce înseamnă că amplificarea sau atenuarea vibrației la arborele AEMEC cu forță de preîncărcare variază proporțional cu rădăcina pătrată a raportului invers al rigidității.

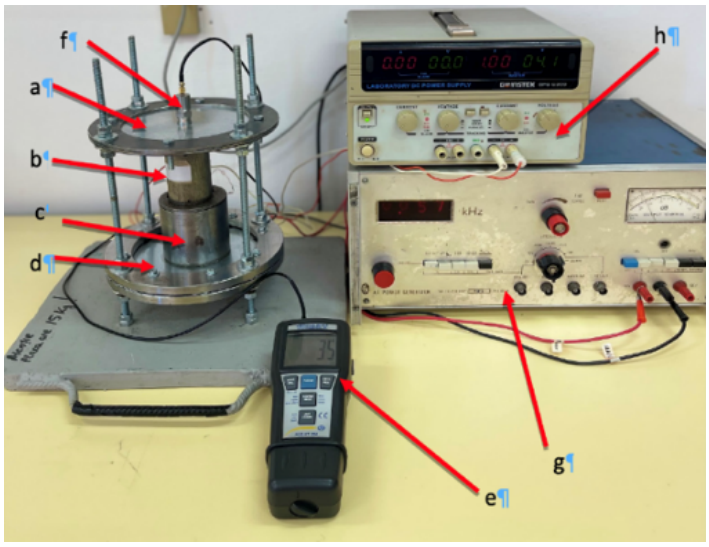


Fig. 3.5. Configurația experimentală pentru studiul vibrațiilor AEMEC: a. Membrană metalică superioară; b. AEMEC; c. Vibrator; d. Membrană metalică inferioară; e. Vibrometru; f. Senzorul vibrometrului; g. Generator de frecvență; h. Sursă de curent continuu [Muraviev 2025].

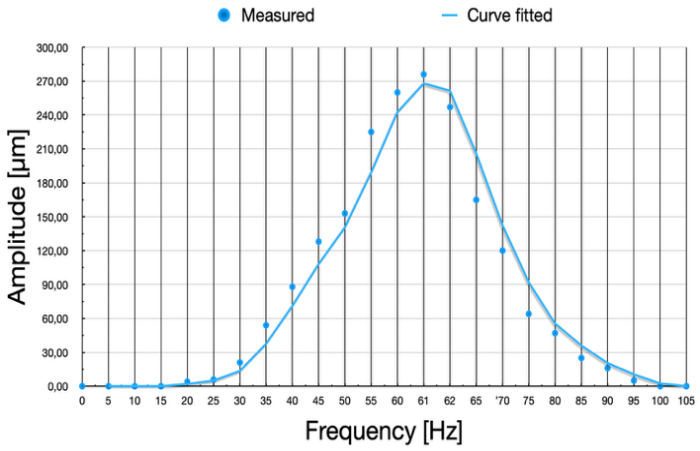


Fig. 3.6. Caracteristica de frecvență a vibratorului (valori ale amplitudinii „vârf la vârf") pentru un curent de excitație, I = 0,25 A, [Muraviev 2025].

Studiul în regim staționar al AEMEC [Muraviev 2025] menționează trei valori ale coeficientului de elasticitate k obținute experimental, 1,39, 2,71 și 5,01, corespunzătoare celor trei valori ale curentului prin bobine, -1,5 A, 0, +1,5 A, ceea ce înseamnă obținerea la rezonanță a unei creșteri/amplificări a vibrației aplicate de 1,37 și a unei scăderi/atenuări de 0,72 în comparație cu vibrația în starea pasivă a dispozitivului (I=0). În cazul AEMEC care funcționează în ansamblul din Fig. 3.5., valorile experimentale corespunzătoare ale variației vibrației sunt 1,3 și, respectiv, 0,71, valori foarte apropiate de cele obținute cu relația (3.8). Aceasta înseamnă că funcționarea AEMEC într-o altă configurație nu modifică parametrii săi de funcționare.

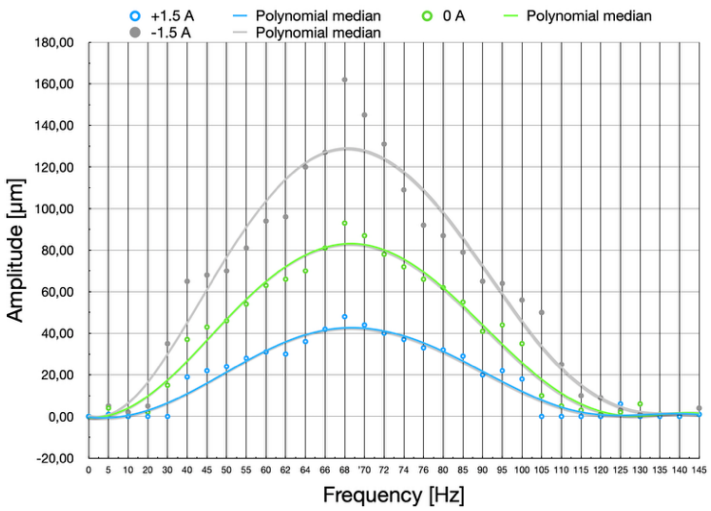


Fig. 3.7. Variația amplitudinii vibrațiilor (valori vârf la vârf) în funcție de frecvența tijei AEMEC fixată de membrana metalică superioară, pentru trei cazuri de funcționare a arcului electromagnetic: pasiv (I = 0 A), activ-pozitiv, cu forța și rigiditatea arcului în creștere (I = +1,5 A) și activ-negativ, cu forța și rigiditatea arcului în scădere (I = -1,5 A), la o tensiune constantă de excitație a vibratorului de 13 V [Muraviev 2025].

Rezultatele teoretice și experimentale obținute în cadrul studiului comportamentului la vibrații al arcului electromagnetic cu elasticitate controlabilă AEMEC 1 demonstrează posibilitatea de a varia elasticitatea arcului electromagnetic într-un interval larg, prin amplitudinea și semnul curentului electric de comanda. Acest lucru îl poate face util în numeroase aplicații ale componentelor și sistemelor tehnice flexibile, cum ar fi actuatoarele de acționare din robotica umanoidă și cele din roboții dedicați îngrijirii medicale a persoanelor cu dizabilități, dar și în sistemele de amortizare a vibrațiilor.

3.1.4. Concluzii

Pentru un prototip original de AEMEC 1, descris și studiat în condiții de funcționare în regim staționar [Olaru 2021], a fost studiată functionarea acestuia în regim dinamic, sub actiunea vibrațiilor într-o gamă de frecvență care să permită cunoașterea caracteristicilor și parametrilor specifici dispozitivului în vederea evaluarii posibilitatilor de proiectare și aplicare practică.

Rezultatele obținute prin simulări numerice au demonstrat influența semnificativă a circuitului magnetic asupra performanțelor dispozitivului. În mod particular, introducerea carcasei magnetice conduce la creșterea coeficientului de rigiditate, ceea ce justifică alegerea unei configurații constructive optimizate pentru etapa experimentală. Frecvența naturală de vibrație a masei în mișcare la distanța z=8 mm, pentru arcul electromagnetic pasiv (I=0), unde coeficientul de rigiditate este k=2,71 N/mm [Muraviev 2025], calculată cu ajutorul relației 3.9 are valoarea de 51 Hz (26 g este masa ansamblului mobil a AEMEC 1).

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}} \qquad (3.9)$$

O concluzie importantă reieșită în urma modelării matematice este ca raportul dintre două amplitudini de vibrație la rezonanță, corespunzător variației valorilor rigidității de la k_1 la k_2, adica amplificarea sau atenuarea vibrației la axul AEMEC 1 pentru funcționarea acestuia în jurul unei poziții staționare, z_i = constant, este proporțională cu rădăcina pătrată a raportului invers al celor două rigidități, conform relației 3.8.

În cadrul măsurătorilor a fost proiectată o configuratie experimentală special realizată și destinată culegerii datelor utile studiului, constituită în principal dintr-un vibrator, AEMEC 1 și 2 membrane metalice subțiri elastice, alcătuind împreună un sistem elastic de vibrație care poate asigura pretensionarea dorită a AEMEC 1 într-o poziție de funcționare dorită. Frecvența de rezonanță măsurată la nivelul membranei superioare este de 68 Hz, diferită de frecvențele de rezonanță ale AEMEC 1 și vibratorului, respectiv 51 Hz și 61 Hz. Explicația este influența celor două membrane elastice care au frecvențe de rezonanță diferite de acestea.

Pe baza curbelor experimentale obținute a fost calculat parametrul de calitate al AEMEC 1, nivelul de control al rigidității, a carui valoare maxima, L_{SC} = 133, a fost obținută pentru poziția z = 8 mm a ansamblului magnetic mobil față de cel staționar, la o variație a rigidității, k_{M+} - k_{M-} = 2700 (N/m) și la schimbarea curentului de comanda, Ic = ±1,5A.

Rezultatele experimentale au confirmat modelele teoretice și au evidențiat posibilitatea controlului vibrațiilor prin variația rigidității arcului electromagnetic. Valorile obținute pentru amplificarea și atenuarea vibrațiilor sunt în concordanță cu relațiile analitice deduse, ceea ce validează modelul matematic propus.

Din punct de vedere aplicativ, AEMEC 1 prezintă un potențial ridicat pentru integrarea în actuatori cu rigiditate variabilă (VSA), unde controlul simultan al poziției și rigidității este esențial. În acest context, arcurile electromagnetice pot reprezenta o alternativă viabilă la sistemele elastice mecanice clasice, oferind avantajul unui control direct și rapid al parametrilor elastici.

În concluzie finală, rezultatele teoretice și experimentale demonstrează că AEMEC 1 reprezintă o soluție eficientă pentru realizarea unor sisteme elastice controlabile, cu aplicații în domenii precum robotică, sisteme compliante și controlul vibrațiilor, constituind o bază solidă pentru dezvoltările ulterioare din cadrul familiei AEMEC.

3.2. Cercetări privind arcurile electromagnetice bidirecționale cu elasticitate controlabilă AEMEC 2

3.2.1. Aspecte generale despre magneții inelari cu magnetizarea radială și diametrală

Mulți utilizatori de magneți au tendința de a confunda magnetizarea radială cu magnetizarea diametrală. După cum sugerează și numele, direcția de magnetizare a magnetului inel magnetizat radial este de-a lungul vectorului său radial. Pentru magnetul de neodim sinterizat, magnetizarea radială se bazează pe orientarea radială. Magnetul inel orientat radial servește mai mult ca bază pentru obținerea unui magnet inel multipolar.

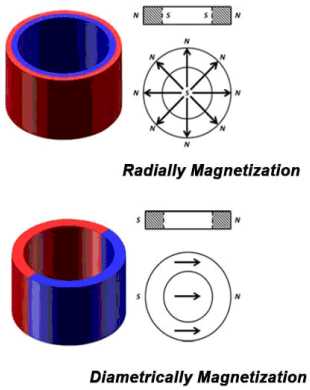


Fig. 3.8. Magnetizarea radială și magnetizarea diametrală.

Magnetul inel radial poate fi fabricat fie prin proces de metalurgie a pulberilor, fie prin proces de deformare la cald.

Procesul de fabricație al magnetului inel orientat radial

Procesul de metalurgie a pulberilor

Pentru magnetul de neodim sinterizat, producătorii trebuie să aplice câmpul magnetic extern pentru a ordona direcția de magnetizare ușoară a pulberii în timpul procesului de turnare astfel încât pulberea să fie în concordanță cu direcția finală de magnetizare. Modul general de generare sau câmpul magnetic cu orientare radială include tehnologia de orientare repulsivă și tehnologia de orientare rotativă unică chineză.

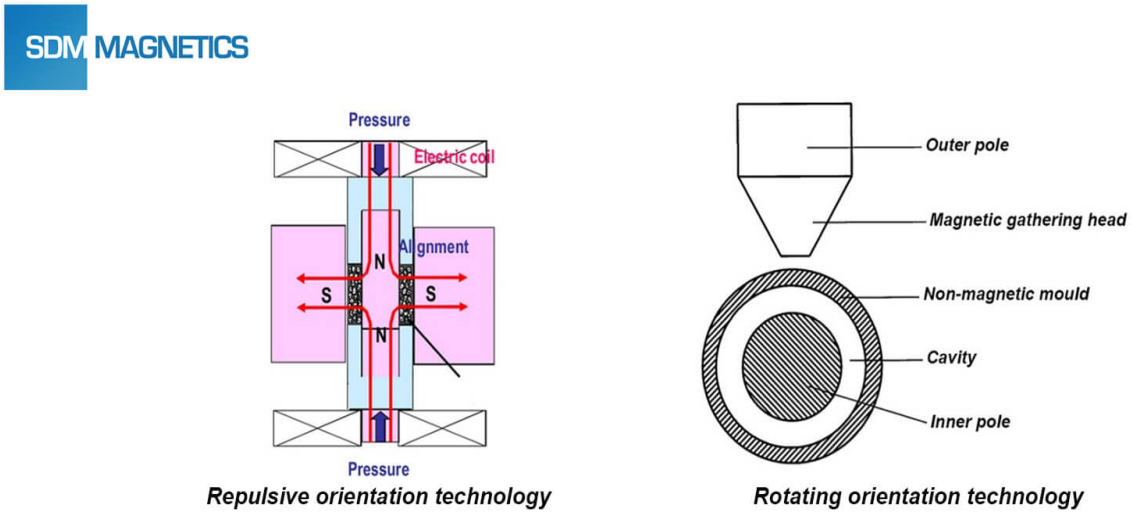


Fig.3.9. Tehnologia de orientare repulsiva și tehnologia de orientare rotativă la generarea câmpului magnetic [SDM Magnetics 2020].

Procesul de deformare la cald

Magnetul presat la cald realizat prin procesul de deformare la cald este o altă cale de a produce magnet inel radial. Faza principală Nd2Fe14B are structură tetragonală și modulul elastic al axei de magnetizare ușoară este relativ scăzut. Pentru magnetul izotrop de neodim nano-cristalin, direcția sa de magnetizare ușoară va forma orientarea preferată de-a lungul direcției presiunii în timpul procesului de deformare la cald. Cea mai remarcabilă caracteristică a procesului de deformare la cald este că nu are nevoie de câmp magnetic pentru a orienta pulberea.

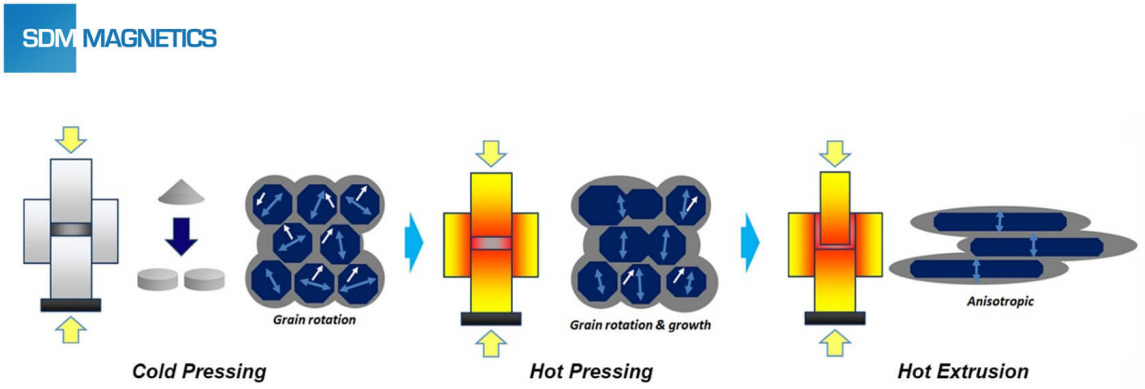


Fig.3.10. Procesul de deformare la cald [SDM Magnetics 2020].

Avantajele magnetului inel orientat radial:

- mai ușor pentru procesul de asamblare în comparație cu lipirea mai multor segmente de magneți și astfel se reduce costul de asamblare;

- îmbunătățirea ratei de utilizare a materiei prime;

- precizie dimensională excelentă, care va îmbunătăți substanțial echilibrul dinamic al motorului;

- disponibil pentru materialele de magneți N35-N50, N35M-N50M, N35H-N48H, N35SH-N45SH, N35UH-N40UH, N28EH-N33EH.

3.2.2. Descrierea conceptului tehnic AEMEC 2 cu magneți inelari magnetizați radial

Conceptul de baza al unui AEMEC 2, cu 2 sau 3 magneți cu magnetizare radială dispuși succesiv și având polarizări magnetice inversate unul față de cel alăturat, este descris în [Encica 2008]. Conceptul a fost preluat și completat mai târziu în [Paulides 2013].

Arcul electromagnetic conține un ax mobil, 1, din material magnetic, prevăzut cu cel puțin doi magneți și o parte cilindrică ca stator, respectiv miezul magnetic 2, profilat în interior pentru a prevede un număr de dinți egal cu numărul magneților (Fig. 3.11.a.) (US 8550221) [Paulides 2013]. Când axul 1

este poziționat astfel încât magneții sunt față în față cu dinții statorului și suprafața comună este maximă, forța magnetică de atracție magnet-miez magnetic staționar este, de asemenea, maximă. Deplasarea axului din această poziție determină o forță de revenire a arcului în poziția inițială. Activarea arcului, cu modificarea în plus sau în minus a forței arcului și a elasticității sale, se face prin aplicarea și varierea curentului continuu dintr-o bobină dispusă pe partea stator, fluxul magnetic al bobinei suprapunându-se peste cel al magneților. Arcul din Fig. 3.11.a. este prevăzut cu doi magneți și doi dinți, dar se pot realiza arcuri cu mai mulți magneți și dinți polari, ceea ce produce creșterea forței elastice a arcului.

Fig. 3.12. ilustrează o poziție decalată față de poziția aliniată sau neutră a părții mobile a arcului. În poziția neutră a arcului, Fig. 3.11.a, polii magnetici se aliniază cu dinții circulari ai părții magnetice fixate, forța magnetica de atracție maximă dintre partea mobilă și stator fiind maximă, forța dată de relația,

$$F_{max} = \frac{B_r^2 \; S_{\partial.max}}{2\mu_0} \qquad (3.10)$$

, unde B_r este inducția reziduală a magneților (peste 1 Tesla de regula), $S_{\delta.max}$ reprezintă suprafața comună maximă dintre partea mobilă și cea fixă, iar μ_0 este permeabilitatea magnetică a vidului.

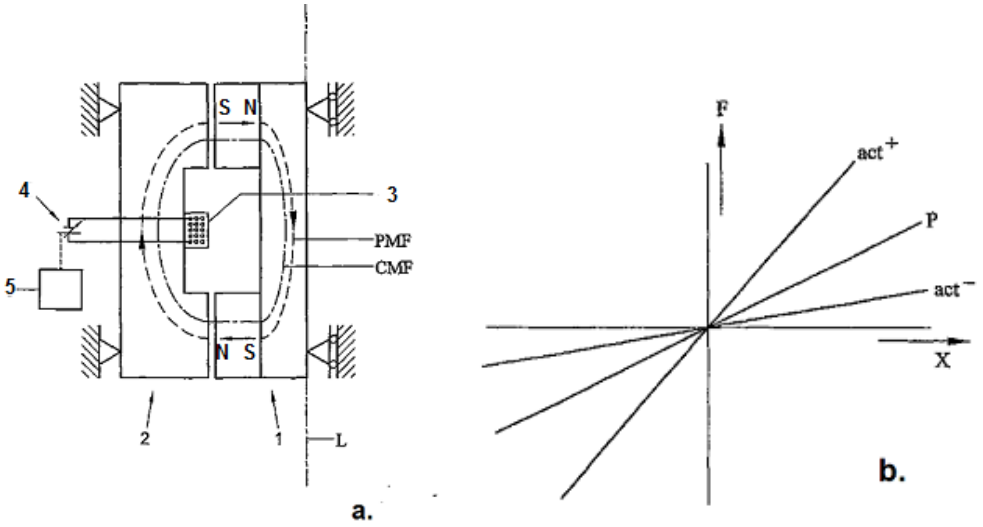


Fig. 3.11. AEMEC 2 cu 2 magneți inelari având polarizări inverse: a. secțiune schematică transversală semi-plan stâng a arcului electromagnetic, 1 - partea mobilă; 2 - partea fixă, 3 - bobina, 4 - sursa de tensiune variabilă, 5 - element de control al sursei de alimentare [Encica 2008]; b. graficul forță-deplasare a arcului electromagnetic, unde p este caracteristica arcului electromagnetic pasiv (curent zero), iar celelalte două sunt pentru arcul activ când bobina este parcursă de un curent de comandă într-un sens, respectiv în celălalt sens, provocând creșterea respectiv scăderea forțelor în raport cu cazul pasiv [Paulides 2013].

Din relația (3.10) se constată că forța de atracție scade proporțional cu scăderea suprafeței comune a celor două părți ale arcului electromagnetic, practic cu deplasarea verticala a axului în interiorul întrefierului, ceea ce înseamnă ca forța magnetica de revenire a arcului, care este proporțională cu variația F_{max} - $F(S_\delta)$, crește proporțional cu deplasarea axului, așa cum sugerează Fig. 3.11.b.

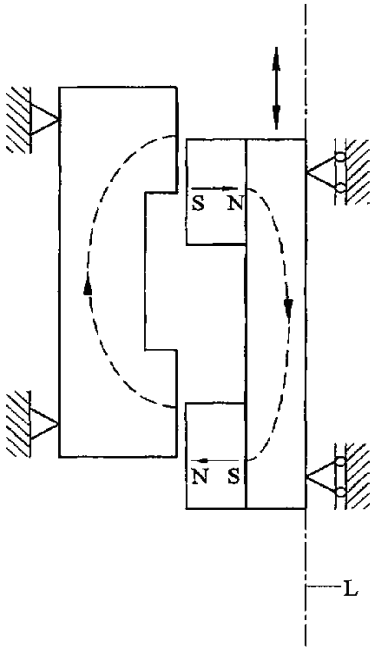


Fig. 3.12. Secțiune transversala semi-plan stâng a arcului în poziția decalată a părții mobile (ax plus magneți) relativ la partea fixată (miez feromagnetic cu bobină).

3.2.3. Variante de soluții tehnice AEMEC 2 cu magneți inelari magnetizați radial

Câteva variante de arcuri magnetice cu magneți inelari magnetizați radial au în vedere creșterea forței arcului și modificarea/adaptarea caracteristicii forță/deplasare funcție de necesitățile utilizatorului. Astfel, creșterea forței arcului se poate realiza pe două căi, creșterea numărului de dinți al ansamblului magnetic sau utilizarea unui miez magnetic suplimentar.

Prima metodă presupune adăugarea mai multor dinți configurați pe miezul stator, adăugându-se în mod corespunzător același număr de magneți pe partea mobilă și bobine pe stator. Fig. 3.13. ilustrează configurația arcului cu 3 dinți.

A doua metodă de creștere a forței arcului, Fig. 3.14., folosește două părți staționare 1, 1’ și o parte mobilă 2. În exterior, carcasa cilindrica 1 are în interior fixați magneții 4, 4’ pe suprafața interioară a acesteia, iar în interior, partea cilindrica 1’ are fixați pe exterior magneții 4’’ și 4’’’. Partea mobilă 2, este constituită dintr-un miez feromagnetic interior cu profiluri cilindrice, care prezintă dinții 5, 5’, 5’’ și 5’’’.

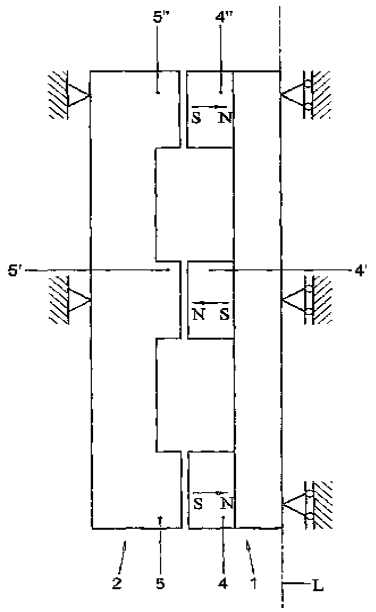


Fig. 3.13. Secțiune transversala semi-plan stâng a arcului cu 3 dinți.

Variantele de arcuri magnetice destinate a adapta / ajusta caracteristicele forță / deplasare sunt ilustrate în figurile 3.15., 3.16. și 3.17.

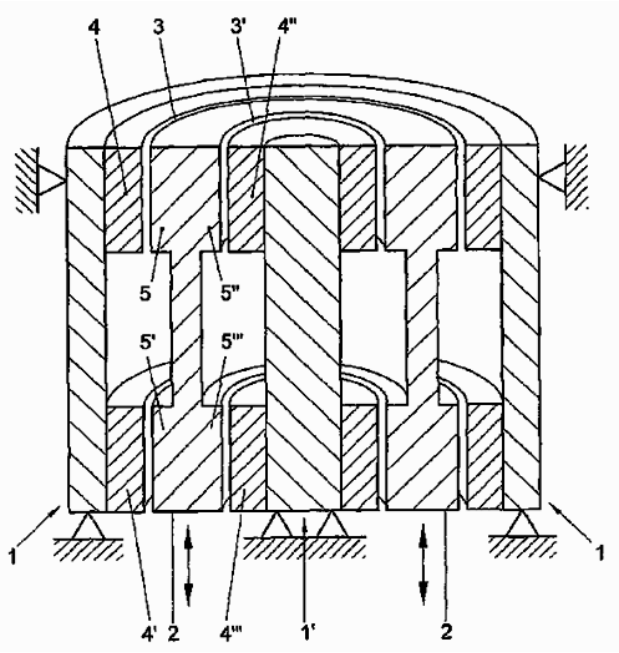


Fig. 3.14. Secțiune transversală a arcului cu ax magnetic mobil [Paulides 2013].

În configurația din Fig. 3.15., elasticitatea arcului va crește mai repede cu deplasarea în afara poziției aliniate decât în cazurile anterioare, cu suprafața dinților plan-paralelă cu axa longitudinală.

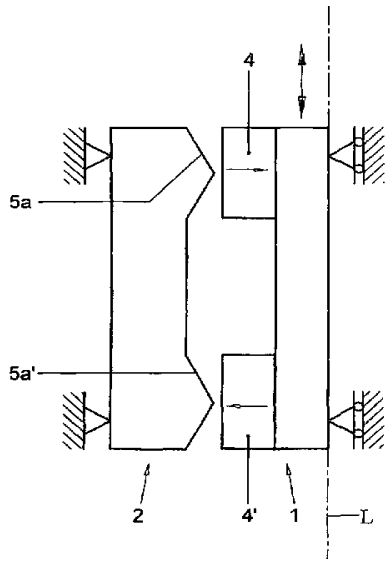


Fig. 3.15. Arc magnetic cu dinți de ferăstrău.

În configurația din Fig. 3.16., curba suprafețelor dinților 5, 5’ sunt definite printr-un segment circular. Dinții sunt concavi față de magneții permanenți 4,4’. Când segmentele circulare formează dinți convecși față de magneții permanenți, se obține o funcționare a arcului similară cu cea a configurației din Fig. 3.15., care folosește dinți de ferăstrău.

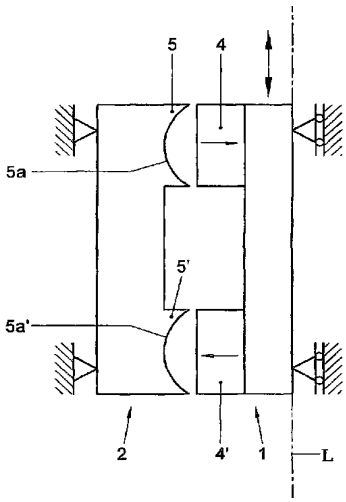


Fig. 3.16. Arc magnetic cu dinți ce au curba de segment de cerc.

Prin proiectarea dinților convecși o caracteristică forță / deplasare a arcului pretensionat poate fi imitată, adică o mișcare mică în jurul poziției aliniate a piesei în raport cu cea de-a două parte produce direct o forță de arc. În diagrama forță/deplasare, rezultă o caracteristică forță-deplasare care nu traversează punctul de intersecție al axelor, dar care începe pe axa forței deasupra sau sub axa deplasării.

În varianta de arc magnetic din Fig. 3.17., dinții 5, 5' și magneții 4, 4' au suprafețele dispuse conic în raport cu axa longitudinală. În consecință, când prima parte 1 se deplasează în jos față de a două parte 2 în direcția longitudinală, lungimea întrefierului crește, ceea ce cauzează o caracteristică forță-deplasare a arcului modificată, diferită de a arcului cu dinți obișnuiți, nemodificați, la care lungimea întrefierului nu se schimbă când partea mobilă se deplasează relativ la stator. În varianta din Fig. 3.17. elasticitatea arcului va crește mai rapid, respectiv rigiditatea arcului va scădea mai rapid decât în cazul variantei de bază, cu dinți având fețele plan-paralel cu axa longitudinală.

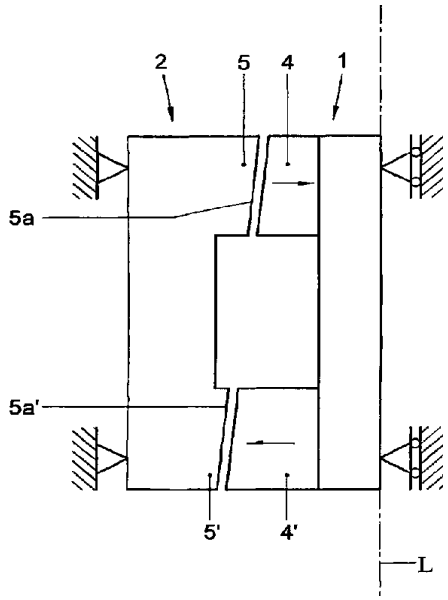


Fig. 3.17. Arc magnetic cu dinți ce se îngustează în direcția axei longitudinale.

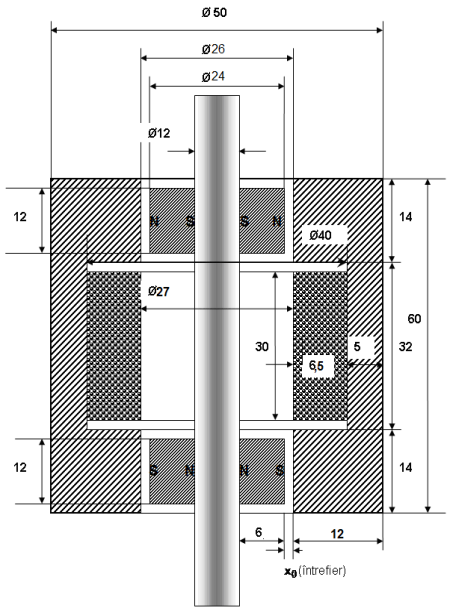
3.2.4. Încercări preliminare de realizare a unui original AEMEC 2O

În această etapă ne propunem la început să facem un studiu prin simulare și experiment a unui model de AEMEC 2, plecând de la soluția tehnică cunoscută și prezentată la punctul precedent, Fig. 3.12 [Paulides 2013]. Studiul prin simulare numerică urmează să furnizeze caracteristicele funcționale ale dispozitivului, în special caracteristicele forță / deplasare dar și căile de optimizare cu rezultatele ce pot fi obținute.

Fig. 3.18. prezintă modelul de simulat numeric al AEMEC 2. Principalele caracteristici geometrice și constructive sunt: înălțime, 60mm, diametru exterior, 50mm, diametru ax magnetic mobil, 12mm, bobina toroidală cu suprafața ferestrei de bobinare de 180mm^2, 350 spire din CuEm de 0,6mm diametru. Curentul maxim al bobinei este 2A. Modelul este constituit dintr-o parte mobilă prevăzută cu un ax cilindric din material feromagnetic și 2 magneți inelari identici și o parte staționară constituită dintr-o cămașă cilindrică tot din material feromagnetic profilată astfel încât să adăpostească o bobină și să asigure un întrefier în dreptul celor 2 magneți de pe rotorul ansamblului.

Studiul și proiectarea sistemului AEMEC 2 pleacă de la alegerea celor doi magneți cu magnetizare radială, Fig. 3.19. Magneții sunt confecționați din material NdFeB (Neodim-Fier-Bor) sinterizat, tipul de material magnetic este N50 cu următoarele specificații principale: Inducția remanentă, B_r = 1,39-1,44 T, Produsul de energie maxim (BH)max = 47-51 kJ/, Diametrul exterior, DE=25mm, Diametrul interior, DI=12mm, Grosimea (înălțimea), G=14mm.

Magnetul este constituit din mai multe segmente asamblate și fixate într-o carcasă cilindrică din material nemagnetic, Fig. 3.19.



Fg. 3.18. Model de simulare imitial AEMEC 2: dimensiunile din Fig. sunt pentru întrefier x_0= 1mm. 2 magneți inelari D24xd12x12 (grosime / înălțime) mm. Inducția remanentă, B_r=1.4 T. Număr spire conform secțiunii ferestrei, S_f=180 mm.p, număr spire, N= 350 spire, diametrul conductorului bobinei, Ø=0,6/0,66mm (fără izolație / cu izolație).

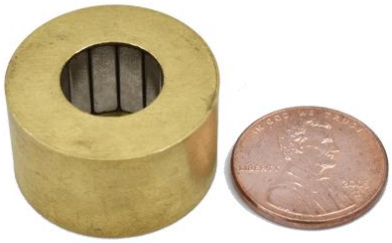


Fig. 3.19. Ansamblu de magnet, cod RR0100, utilizat în proiectarea modelului experimental.

Simulările efectuate au avut în vedere 2 obiective, în optimizarea AEMEC 2 și anume, obținerea unor curbe liniare de variație a forței într-un domeniu de variație a comprimării arcului în jurul poziției

de repaos și a unei variații cât mai mari a coeficientului k de elasticitate a arcului la schimbarea sensului curetului prin bobine, +/- 2A. Principalii parametri identificați care prezintă o influență hotărâtoare în atingerea obiectivelor propuse sunt mărimea întrefierului magnetic x_0 și înălțimea porțiunii inelare a cămășii feromagnetice care asigură întrefierul magnetic. S-a găsit astfel că, optimizarea AEMEC 2 se obține la valori ale întrefierului de 3-4mm și la valori mai mici sau egale cu 10 mm ale înălțimii porțiunii inelare a cămășii feromagnetice. Fig. 3.20 ilustrează forma curbelor de forță obținute în aceste condiții.

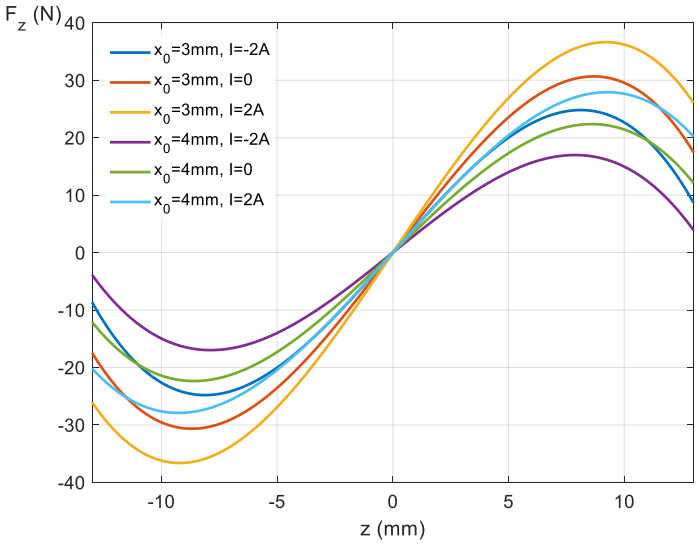


Fig. 3.20. Grafic curbe forțelor elastice, obținute după optimizarea modelului din Fig. 3.18 sub aspectul formei curbelor și al nivelului de control al elasticității, pentru două valori ale întrefierului, x_0=3 și 4mm și valori ale curentuluui de comandă, I= 0 și +/- 2A.

Pentru validare experimentală, s-a construit un model fizic de AEMEC 2 cu schema de bază din Fig. 3.18, având diametrul interior al porțiunii inelare de 30 mm (intrefier x_0 = 0,3mm) și o înălțime a acesteia de 10 mm. Rezultatele experimentale nu au fost pe măsura așteptărilor, în sensul că nivelul de control al forței și elasticității arcului este foarte redus și total dezechilibrat, deși la activarea arcului cu un curent de comandă negativ, -3A, se constată o reducere relativ mică a forței și coeficientrului de elasticitate k, la activarea cu un curent pozitiv, +3A, creșterea forței și constantei k au valori foarte mici. Această anomalie a fost deslușită după vizualizarea spectrului de câmp magnetic al acestui model de actuator AEMEC 2, Fig. 3.21. Explicația găsită după analizarea spectrului câmpului magnetic furnizat de cei 2 magneți din circuitul magnetic format, arată că, din cauza celor 2 magneți cu polarizări inverse, fluxul magnetic generat de aceștia se suprapun aditiv în circuitul magnetic, ceea ce duce la o creștere puternică a inducției magnetice în zona cuprinsă în axul magnetic dintre cei 2 magneți, care atinge valori comparabile cu inducția de saturație a fierului magnetic moale, situată în jurul valorii de 2 T (Fig. 3.21.), asta și datorită faptului că densitatea fluxului crește foarte mult în secțiunea axului, a cărei suprafață este

mult mai mică decât suprafața de ieșire a fluxului magnetic din magneții aflați în contact cu axul. Creșterea intrefierului dintre magneți și miezul magnetic nu a dus la o îmbunătățire suficientă a capacității de reglare a forțelor elastice. O altă măsură posibilă de a reduce densitatea fluxului magnegtic în secțiunea axului ar fi creșterea diametrului și deci a secțiunii axului care conduce însă la creșterea dimensiunilor și a greutății actuatorului, dar și la înrăutățirea comportarii dinamice a acestuia prin creșterea masei ansamblului mobil.

În consecință, a celor de mai sus, se impune găsirea unei noi soluții tehnice pentru eliminarea acestui mare neajuns provocat de saturarea magnetică a axului dispozitivului, soluție tehnică descrisă și validată experimental în continuare.

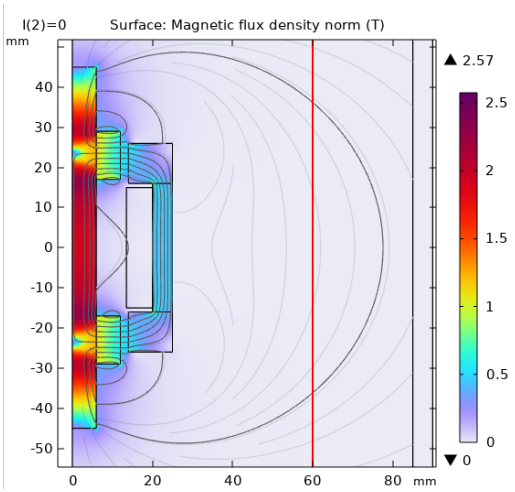


Fig. 3.21. Spectru de camp magnetic al modelului AEMEC 2 din Fig. 3.18.

3.2.5. Studiul și validarea unui nou actuator de forțe elastice controlabile AEMEC 2O

a. Descrierea conceptului AEMEC 2O și alegerea variantei optime prin simulare

Pe baza concluziilor obținute anterior a fost conceput un model original de actuator AEMEC 2O, Fig. 3.22, care prezintă două modificari importante și cu consecințe extrem de favorabile privind performanța noului AEMEC 2O și anume, utilizarea a 2 magneti identici, având deci același sens de polarizare magnetică și folosirea a două bobine conectate în serie și opoziție de fază, parcurse de curentul de comandă.

Cele două ansambluri magnetice, 1 și 4, constituie un arc magnetic pasiv în absența unui curent electric prin bobine. Când un curent trece prin cele două bobine conectate în serie și în opoziție de fază, cu direcția indicată în Fig. 3.22., fluxul circular creat de fiecare bobină se suprapune aditiv cu fluxul magnetic produs de magnetul cel mai apropiat de bobina respectivă, ducând la o creștere a fluxului

magnetic rezultat în cele două spații de aer și la o creștere consecventă a forței magnetice a arcului electromagnetic. Când se schimbă direcția fluxului magnetic prin bobine, are loc fenomenul opus, și anume reducerea fluxului magnetic total în spațiile de aer și scăderea forței elastice a arcului. Panta variației forței elastice, respectiv rigiditatea *k* a arcului, depinde de mărimea și direcția curentului electric aplicat, după cum se va vedea mai departe.

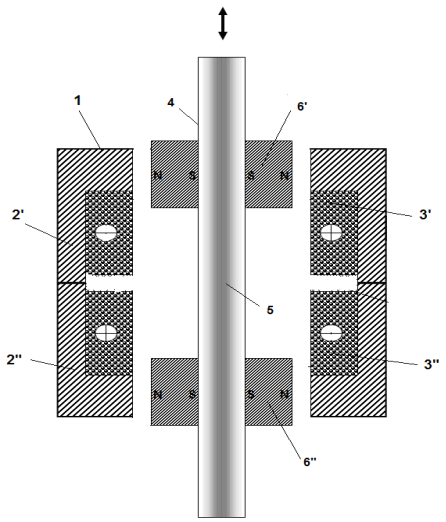


Fig. 3.22. Schema de bază AEMEC 2O (A/0071 2026 RO Patent pending): 1 Ansamblu stator; 2',2" Miezuri feromagnetice; 3', 3" Bobine; 4 Ansamblu mobil; 5 Ax feromagnetic; 6', 6" Magneți.

Modelul utilizat în simularea și proiectarea prototipului AEMEC 2O este ilustrat în Fig. 3.23, unde valorile parametrilor principali sunt cele din Tabel 3.1.

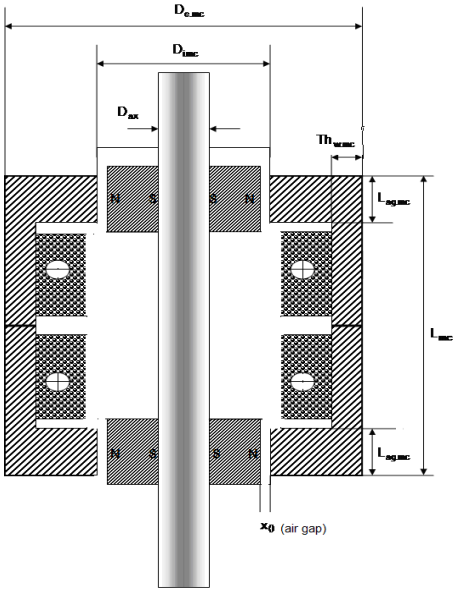


Fig. 3.23. Modelul AEMEC 2O folosit în simulări.

Tabel 3.1. Parametri AEMEC 2O:

Parameters	Value
Magnetic core length, L_{mc}(mm)	60
Magnetic core outer diameter, $D_{e.mc}$(mm)	50
Magnetic core inner diameter, $D_{i.mc}$(mm)	32
Magnetic core length at air gap, $L_{ag.mc}$(mm)	10
Magnetic core wall thickness, $Th_{w.mc}$(mm)	5
Ax diameter, D_{ax}(mm)	12
Air gap magnetic, x_0(mm)	4
Number of turns on the coil, N_c	150
Winding conductor diameter, D_c(mm)	0.7

Cei doi magneți utilizați au codul RR0100, sunt polarizați radial și au următoarele dimensiuni: grosime de 14 mm, diametru interior de 12 mm și diametru exterior de 25 mm (pe mansonul din alamă). Fig. 3.24. ilustrează distribuția fluxului magnetic obținută pentru această variantă. Se constată că, datorită formării a două bucle de flux magnetic separate, fiecare mai scurtă decât lungimea buclei din cazul inițial și cu densitate redusă, deficiențele menționate au fost eliminate, așa cum se va vedea în continuare.

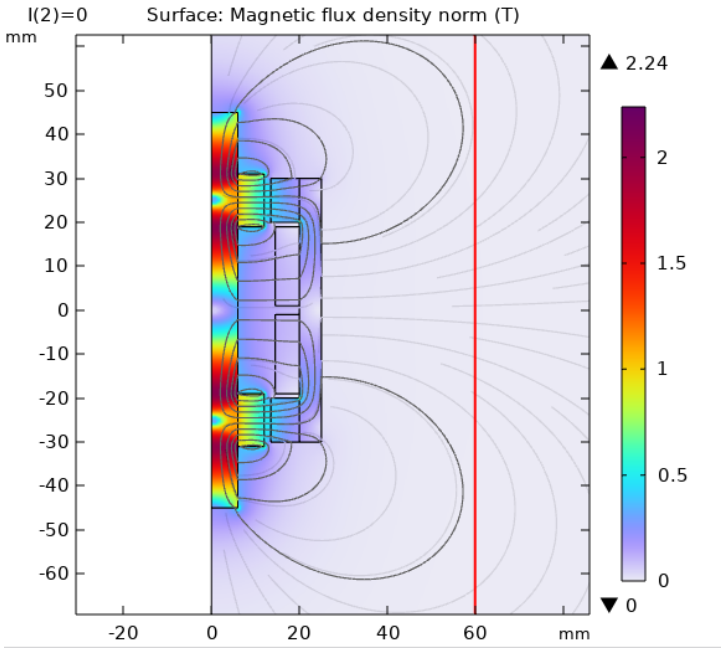


Fig. 3.24. Spectrul câmpului magnetic pentru modelul AEMEC 2O propus (model cu polarizare magnetică identică, două bobine).

Simulările succesive efectuate pentru optimizarea constructiv - funcțională au avut ca obiectiv principal maximizarea intervalului de variație a rigidității arcului $\Delta k_m = k_{m+} - k_{m-}$ pentru o variație a curentului de comandă $\Delta I_{cm} = I_{cm+} - I_{cm-}$, respectiv între +3A și -3A.

Fig. 3.25. și Fig. 3.26. ilustrează forma de variatie a forțelor elastice în funcție de deplasarea axului pentru valorile curentului de comandă I = 0, -3 A și +3 A și două valori ale întrefierului magnetic, respectiv 1,5 mm și 4 mm, corespunzând unui diametru interior al miezului magnetic de 27 mm și respectiv, 34 mm. Se observă efectul major al creșterii spațiului de aer de la 1,5 la 4 mm, care, deși produce o reducere a forțelor elastice ale arcului, îmbunătățește considerabil liniaritatea curbelor și intervalul de variație al pantelor acestora (rigiditate, **k**), pe un interval extins de variație a deplasării ±z, atunci când se aplică curentul de control.

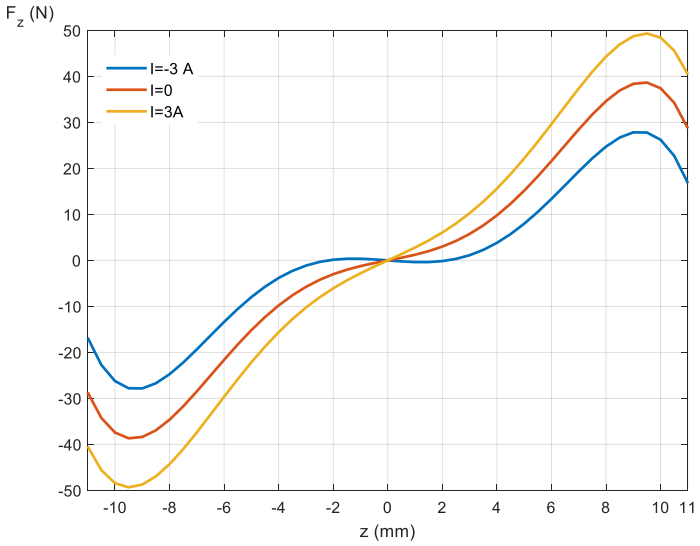


Fig. 3.25. Curbele forță-deplasare pentru AEMEC 2O cu intrefier magnetic, x_0 = 1,5 mm.

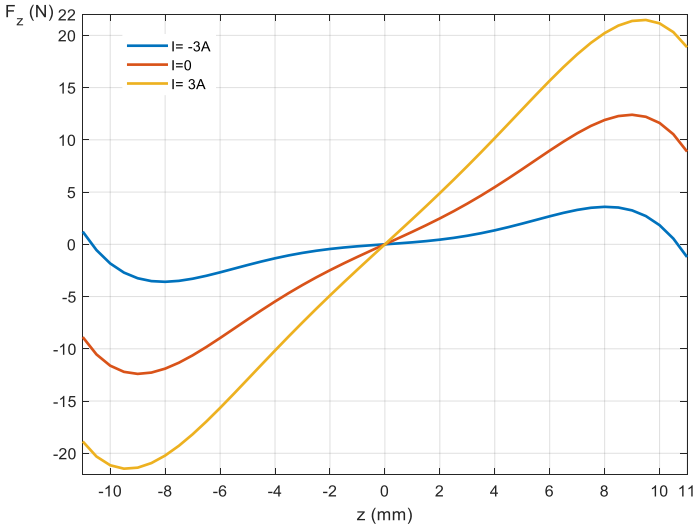


Fig. 3.26. Curbele forță-deplasare pentru AEMEC 2O cu întrefier magnetic, x_0 = 4 mm.

În continuare, este descris, proiectat, construit și analizat un prototip AEMEC 2O original, cu referire la performanțele sale.

b. Rezultate experimentale

A fost proiectat și realizat un prototip AEMEC 2O, Fig. 3.27, cu parametrii prezentați în Tabel 3.1. Rezultatele experimentale pentru reprezentarea grafică a curbelor de variație ale forțelor AEMEC în funcție de poziția z au fost obținute cu ajutorul unui ansamblu de măsurare mecanic ilustrat în Fig. 3.28. Rezultatele experimentale pentru prototipul construit și pus în funcțiune la două valori de comandă, Ic = ±2A, sunt prezentate în Fig. 3.29.

Fig. 3.30 ilustrează caracteristicile de forță ale AEMEC 2O obținute prin simulare și experiment la curenți de comanda, $I_c = \pm 3$ A. În comparație cu rezultatele obținute pentru curentul de control, $I_c = \pm 2$ A (Fig. 3.28.), se constată că, odată cu creșterea curentului de control, cresc atât forțele, cât și rigiditatea acestora. De asemenea, se constată o concordanță satisfăcătoare între rezultatele experimentale și cele obținute prin simulare.

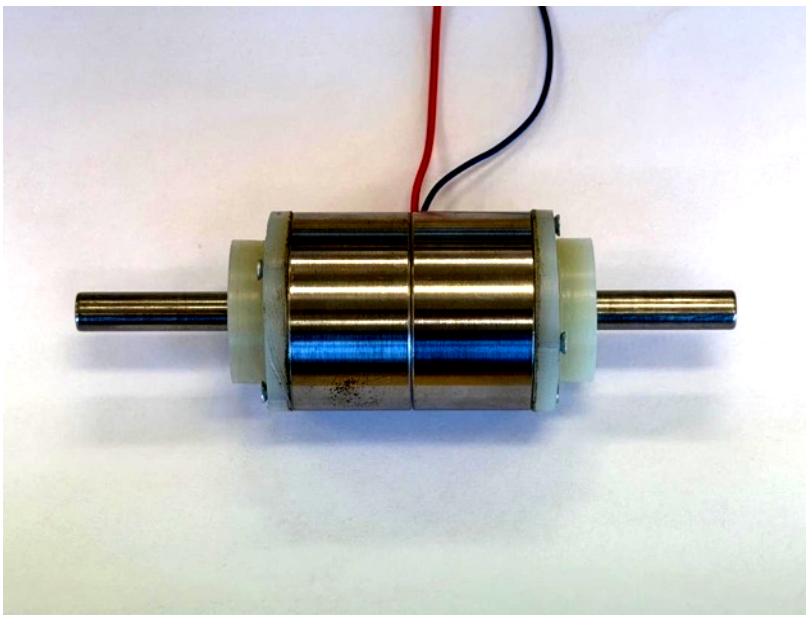


Fig. 3.27. Prototip AEMEC 2O.

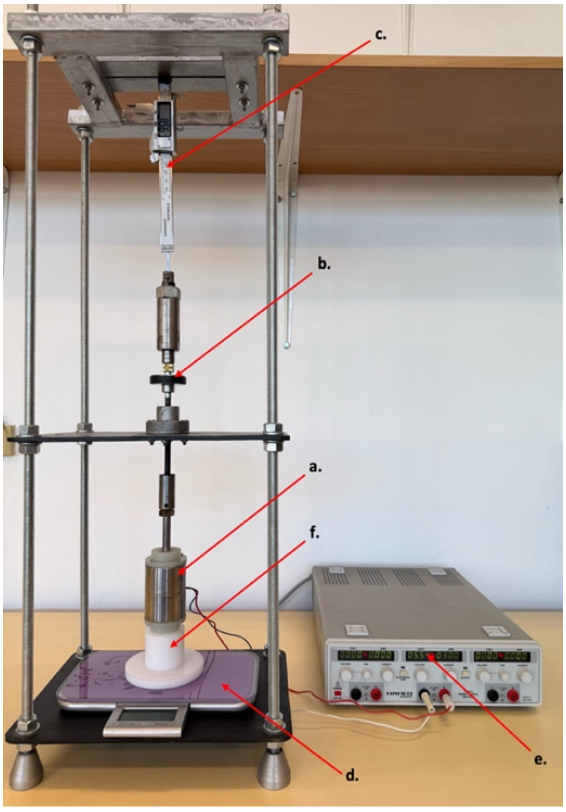


Fig. 3.28. Configurația experimentală: a. Prototip AEMEC 2O; b. Rolă de rotație manuală (deplasare verticală); c. Șubler digital; d. Cântar digital; Sursă de alimentare; f. Suport AEMEC cu spațiu de mobilitate a axului.

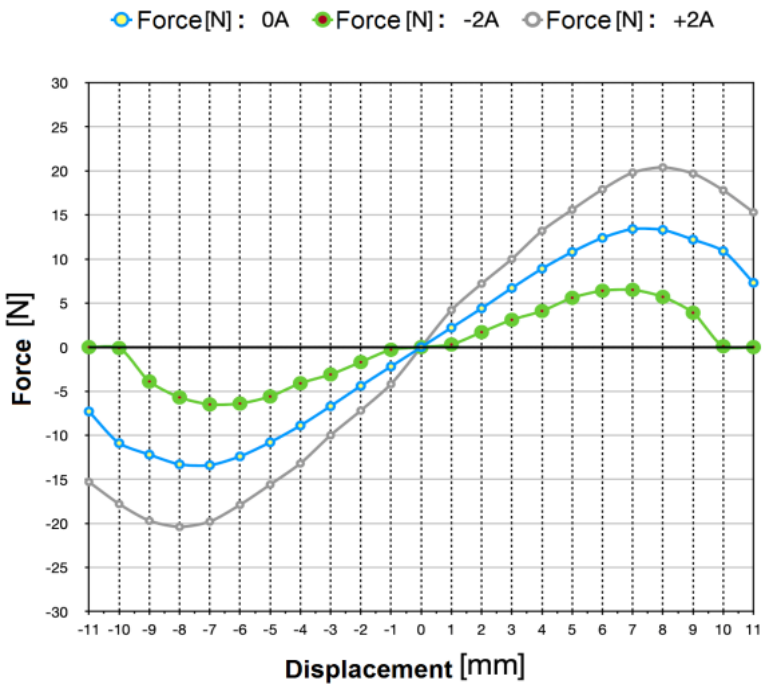


Fig. 3.29. Curbele forță-deplasare pentru prototip AEMEC 2O, I_c=±2A, obtinute prin experiment.

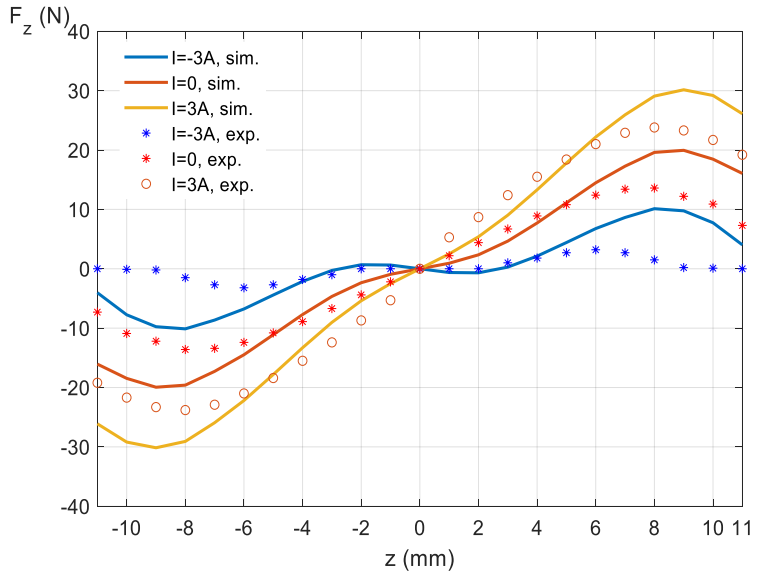


Fig. 3.30. Curbele forță-deplasare pentru prototip AEMEC 2O, I_c=±3A, obtinute prin simulare și experiment.

Tabel 3.1. Valorile experimentale ale fortelor AEMEC 2O cu intrefier x_0=4 mm din Fig. 3.30.

Cursă [mm]	Forță [N] la 0A	Forță [N] la -3A	Forță [N] la +3A	[g] 0A	[g] -3A	[g] +3A	K0	K-	K+	Lcs = ΔKm/K0
-11	-7.3	0	-19.2	-729	0	-1923				
-10	-10.9	-0.1	-21.7	-1090	-12	-2168				
-9	-12.2	-0.2	-23.3	-1215	-16	-2331				
-8	-13.3	-1.5	-23.8	-1334	-152	-2384				
-7	-13.4	-2.7	-22.9	-1337	-274	-2289				
-6	-12.4	-3.2	-21	-1238	-320	-2099				
-5	-10.8	-2.7	-18.4	-1077	-269	-1842				
-4	-8.9	-1.8	-15.5	-888	-177	-1550				
-3	-6.7	-1	-12.4	-667	-102	-1237				
-2	-4.4	0	-8.7	-443	0	-870				
-1	-2.2	0	-5.3	-224	0	-533				
0	**0**	**0**	**0**	0	0	0				
1	**2.2**	**0**	**5.3**	224	0	533	2.2	0	5.3	2.41
2	**4.4**	**0**	**8.7**	443	0	870	2.25	0.5	3.55	1.36
3	**6.7**	**1**	**12.4**	667	102	1237	2.25	0.9	3.4	1.11
4	**8.9**	**1.8**	**15.5**	888	177	1550	2.05	0.85	3	1.05
5	**10.8**	**2.7**	**18.4**	1077	269	1842	1.75	0.7	2.75	1.17
6	**12.4**	**3.2**	**21**	1238	320	2099	1.3	0	2.25	1.73
7	**13.4**	**2.7**	**22.9**	1337	274	2289				
8	**13.3**	**1.5**	**23.8**	1334	152	2384				
9	**12.2**	**0.2**	**23.3**	1215	16	2331				
10	**10.9**	**0.1**	**21.7**	1090	12	2168				
11	**7.3**	**0**	**19.2**	729	0	1923				

Pentru a testa posibilitățile de îmbunătățire suplimentară a performanței actuatorului cu forțe elastice propus, s-a introdus un inel din material magnetic cu grosimea de 2 mm între cele două bobine, cu scopul de a produce o mică concentrare a fluxului magnetic în cele două bucle ale câmpului magnetic, iar rezultatele experimentale din Fig. 3.31, comparativ cu cele din Fig. 3.30, arată o creștere a forțelor elastice și a intervalului de variație a rigidității în prezența inelului magnetic. De exemplu, dacă comparăm variația rigidității, $\Delta k = k_+ - k_-$, obținută prin inversarea direcției curentului de control de la +3A la -3A, în pozițiile de compresie a arcului, z = 4, 5 și 6 mm, în cazurile AEMEC 2O fără și cu inel magnetic, au fost obtinute valorile, 2,15, 2,05, 2,25 și respectiv, 2,55, 2,35, 2,40, exprimate în N/mm, deci valori semnificativ mai mari obținute în cazul utilizarii inelului magnetic. Astfel, se prevede o modalitate de optimizare a dispozitivului în condițiile unor aplicații specifice prin alegerea dimensiunilor și a caracteristicilor magnetice adecvate ale unei astfel de piese. Variația maximă a elasticitatii oferită de AEMEC 2O este de aproximativ ±5000 N/m, în cazul ambelor variante ale dispozitivului, cu și fără inel feromagnetic, care se obține în jurul poziției zero a arcului la deplasări mici ale acestuia, de până la ±1 mm.

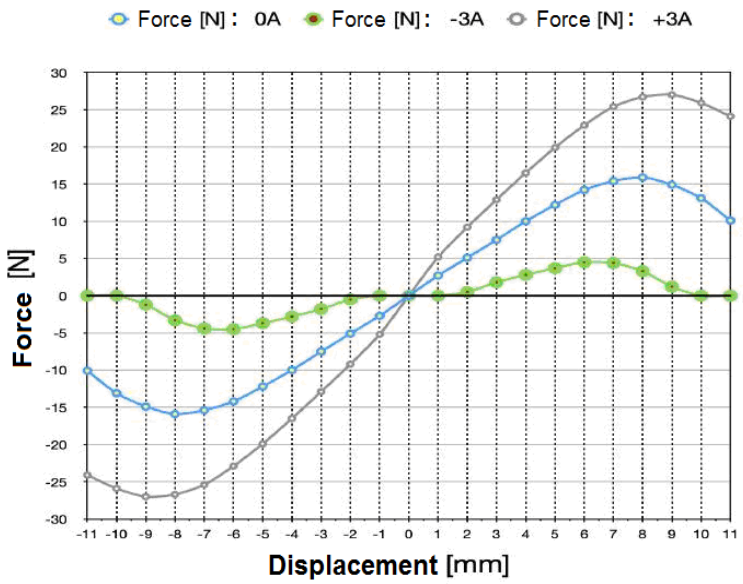


Fig. 3.31. Curbe forță-deplasare pentru prototip AEMEC 2O cu inel feromagnetic, I_c=±3A.

c. Concluzii

A fost studiat și dezvoltat teoretic și experimental, un arc electromagnetic bidirecțional original destinat controlului fortelor în amplitudine și elasticitate. Conceptul AEMEC 2O a fost obținut pornind de la o configurație inițială AEMEC, care conține un ax magnetic cu doi magneți diferiti prin sensul de polarizare magnetica radială, ca ansamblu magnetic mobil, și un miez magnetic cilindric profilat pentru

a adaposti o bobină parcursa de curentul de comandă, ca ansamblu magnetic staționar. Varianta AEMEC fost testată prin simulare și experiment dar nu a furnizat rezultatele așteptate, astfel încât, după simulări succesive, au fost identificate trei modificări relativ simple, dar cu efecte majore asupra funcționării arcului electromagnetic, și anume utilizarea a doi magneți cu același sens de polarizare magnetică, mărirea intrefierului și utilizarea a două bobine în loc de una, cu alimentarea lor în serie și în opoziție de fază. În aceste condiții, utilizând valorile parametrilor principali de proiectare identificați și calculați în urma simulărilor, a fost proiectat, construit și testat experimental prototipul final AEMEC 2O. Variația maximă a rigidității, ±5200 N/m, a fost obținută în intervalul de variație a deplasării în jurul poziției zero, $\Delta z = \pm 1$ mm, pentru o variație a curentului de comanda, $I = \pm 3$ A.

Rezultatele experimentale sunt în concordanță satisfăcătoare cu cele obținute prin simulare numerică, demonstrând astfel funcționalitatea și utilitatea modelului propus al AEMEC 2O. Acesta are o construcție foarte simplă, un cost redus și oferă posibilități de adaptare și optimizare pentru aplicații tehnice specifice bazate pe acționarea elastică.

3.3. Studiu unui nou tip de arc electromagnetic cu elasticitate controlabila AEMEC 3

3.3.1. Descriere AEMEC 3

AEMEC 3 reprezintă de fapt funcționarea particulară a actuatorului electromagnetic multifuncțional cu arc magnetic, obiectul unei cereri de brevetare OSIM [90]. Un obiectiv al noului actuator este creșterea utilității și capacitatii de adaptare la multiple aplicații tehnice ce includ tehnologii de acționare a unor sisteme flexibile, cu rigiditate scăzută și cu ajustarea elasticității. În acest scop și prin raportare la situația actuală a soluțiilor tehnice originale de AEMEC descrisă în subcap. 2.2, problema tehnică pe care o rezolvă conceptul popus constă în realizarea unei configurații electromagnetice simple și fiabile care asigură, în lipsa oricarei modificări interne, operarea în trei moduri diferite și anume, arc electromagnetic de forțe elastice controlabile, actuator de vibrații și actuator de deplasări liniare.

În Fig. 3.32. este redată schema actuatorului AEMEC 3. Acesta conține un ansamblu magnetic staționar 1 constituit dintr-o carcasă cilindrică 2, realizată din material magnetic, profilată în interior pentru a forma o porțiune inelară centrală 2', două capace dispuse la capetele carcasei 3' și 3", confecționate tot din material magnetic și două bobine electrice 4' și 4". Dispozitivul mai conține un ansamblu magnetic mobil 5, alcătuit dintr-un ax 5' din material magnetic și un magnet permanent 5" fixat pe axul 5' având o polarizare magnetică radială, întregul ansamblu glisând axial prin intermediul a două bucșe / lagare de alunecare 6' și 6". Cele două ansambluri magnetice, 1 și 5, constituie un arc magnetic pasiv în lipsa curentului electric prin bobine. Fluxurile magnetice generate de magnetul permanent sunt distribuite în mod egal prin cele 2 circuite magnetice formate fiecare din magnet - porțiunea inelară

centrală 2' – porțiunea stânga / dreapta din carcasa 2 – capac 3'/3" – porțiunea stânga / dreapta din axul 5' - magnet, cele două circuite magnetice având aceeași reluctanță magnetică. Ansamblul mobil este reținut în poziția centrală a sistemului, acolo unde fluxul magnetic este maxim, magnetul cu axul fixat de acesta este în poziția centrală a sistemului magnetic dispus simetric față de porțiunea inelară a carcasei, forța elastică de reținere a arcului magnetic fiind de asemenea maximă.

Prin aplicarea unui curent electric prin cele două bobine conectate în serie sau opoziție de fază, fluxurile magnetice furnizate de cele două bobine se modifică prin suprapunerea acestora peste cele furnizate de magnet, putând obține astfel câteva moduri de funcționare diferite pentru același actuator. Astfel, la aplicarea unui curent prin bobinele conectate în serie și opoziîie de fază, cu sensul curenților prin bobine indicat în Fig.3.32, fluxul magnetic al fiecarei bobine se suprapune aditiv peste fluxul magnetic produs de magnet în circuitul magnetic respectiv rezultând o creștere a fluxului magnetic total din întrefierul magnetului permanent și deci a forței electromagnetice a arcului. La schimbarea sensului curentului, rezultă scăderea fluxului magnetic și a forței rezultate realizându-se astfel un control rapid și precis al valorii și pantei de variație (coeficientul de elasticitate) pentru forța furnizată de actuator, așa cum indică demonstrativ Fig. 3.33, actuatorul electromagnetic funcționând astfel ca arc electromagnetic cu elasticitate controlabilă.

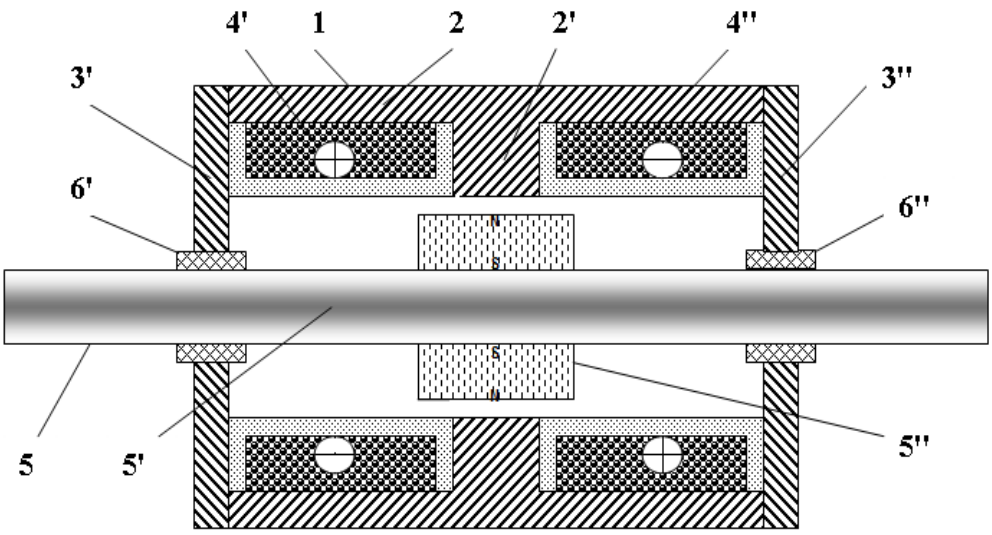


Fig. 3.32. Desen schematic AEMEC 3.

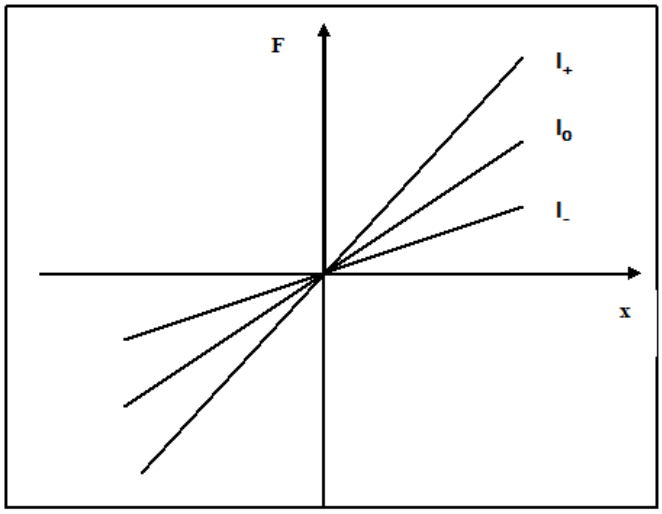


Fig. 3.33. Grafic demostrativ al fortelor elastice controlabile la AEMEC 3.

Dacă cele două bobine ale actuatorului sunt conectate în serie, curentul circulă prin ambele bobine cu același sens, indicat pentru bobina 4' de exemplu, crește fluxul magnetic total din circuitul magnetic al acestei bobine și scade în aceeași măsură fluxul magnetic total din circuitul bobinei din dreapta, rezutând deplasarea spre dreapta a ansamblului mobil. Evident că, la schimbarea sensului curentului, se obține deplasarea la stânga, avand așadar o funcționare a dispozitivului ca actuator de deplasare.

Cu aceeași conectare în serie a bobinelor prin aplicarea unui curent altenativ sinusoidal dispozitivul funcționează ca actuator de vibrații, furnizând oscilații sinusoidale cu frecvența curentului de alimentare.

3.3.2. Rezultate experimentale

Desenul initial, pentru proiectarea, construirea și experimentarea unui prototip de AEMEC 3 este arătat în Fig. 3.34. Se observă că, întrefierul magnetic inițial considerat al dispozitivului, este x_0 = 0.1,5 mm, acesta fiind minimul posibil pentru asigurarea forțelor elasto-magnetice maxime în condiții de deplasare a ansamblului magnetic mobil în timpul funcționării și de a permite asamblarea / demontarea cu ușurință și în siguranță a acestuia. Modelul construit pentru investigații experimentale și care a ramas sub aceeași formă exterioară ca prototip experimental la final, mici modificari având loc doar în configurația internă, este arătat în Fig. 3.35.

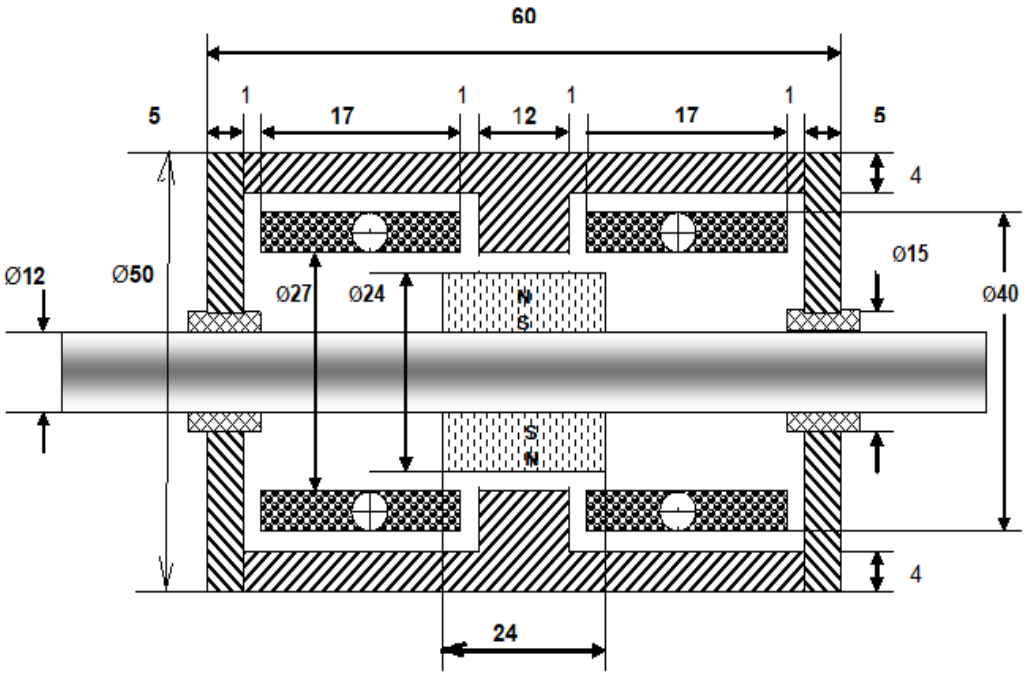


Fig. 3.34. Desenul de bază pentru proiectarea și construirea modelului experimental AEMEC 3: Secțiunea ferestrei unei bobine este Sf=17x6.5 =110mm.p; Diametru conductor fără izolație, d=0,7mm, Număr spire per bobină, N= 130. Număr total, Nt=260spire.

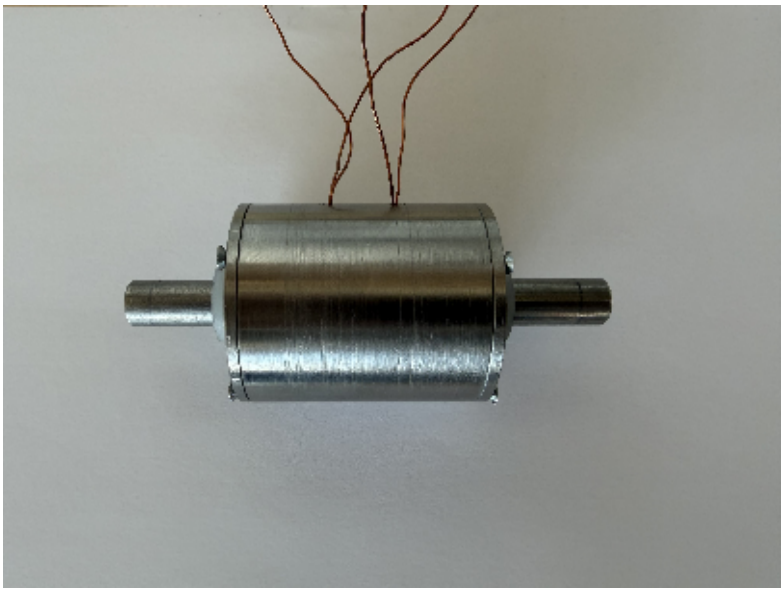
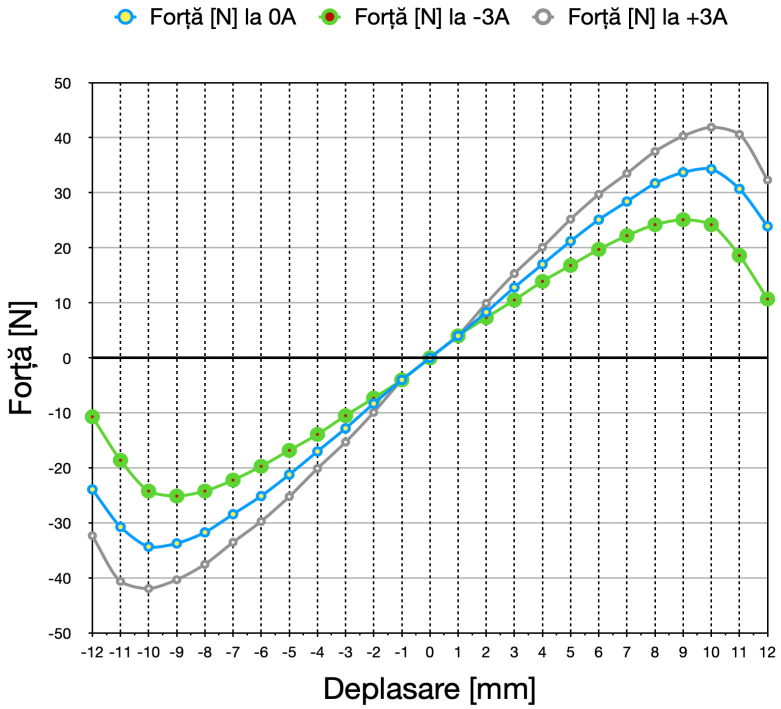


Fig. 3.35. Prototip experimental AEMEC 3.

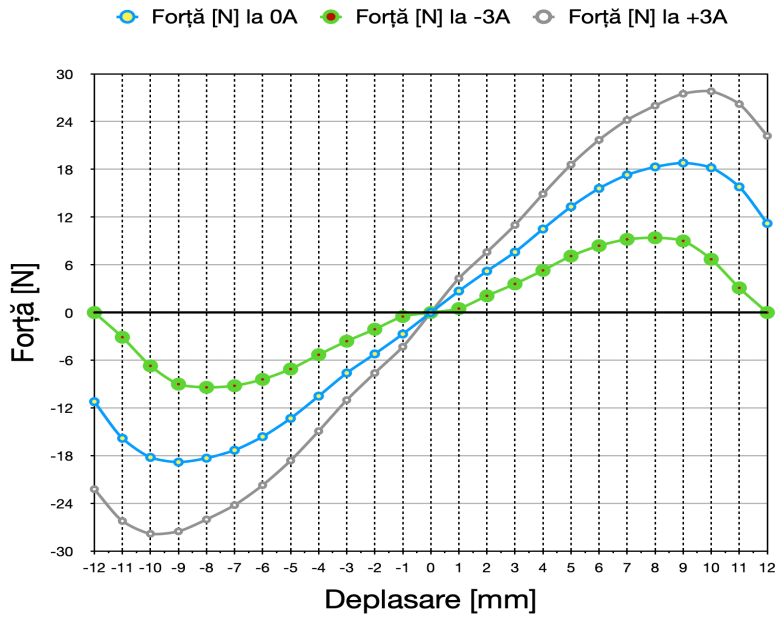
În aceste condiții, curbele forță - deplasare obținute experimental, Fig. 3.36, ating valori maxime ridicate, 34,3 N în funcționare pasivă a arcului, 25,1 N în funcționare activ-negativ și 41,8 N în funcționare activ-pozitiv, valori atinse pentru comprimări ale arcului de 9-10 mm, așa cum rezultă si din Tabel 3.2. De asemenea, alura curbelor este foarte bună, liniare sau aproape liniare în jurul poziției de

echilibru pe o distanță mare, de circa +/- 7mm. Inconvientul însă constă în variația relativ mică a elasticității arcului la comutarea +/- 3A a sensului curentului în bobine, respectiv, doar 1,2 N/mm în poziția de funcționare la 2 mm față de cea de echilibru.



Variația forței arcului magnetic în funcție de cursa tijei și de curent (0A, ±3A)

Fig. 3.36. Curbe forță - deplasare pentru AEMEC 3, cu întrefier x_0=1.5 mm, conform desenului din Fig. 3.34, I_c= +/- 3A.



Variația forței arcului magnetic în funcție de cursa tijei și de curent (0A, ±3A)

Fig. 3.37. Curbe forță - deplasare pentru AEMEC 3, cu întrefier x_0=3mm, I_c= +/- 3A.

Tabel 3.2. Valorile experimentale ale fortelor AEMEC 3 cu întrefier x_0=1.5 mm din Fig. 3.36.

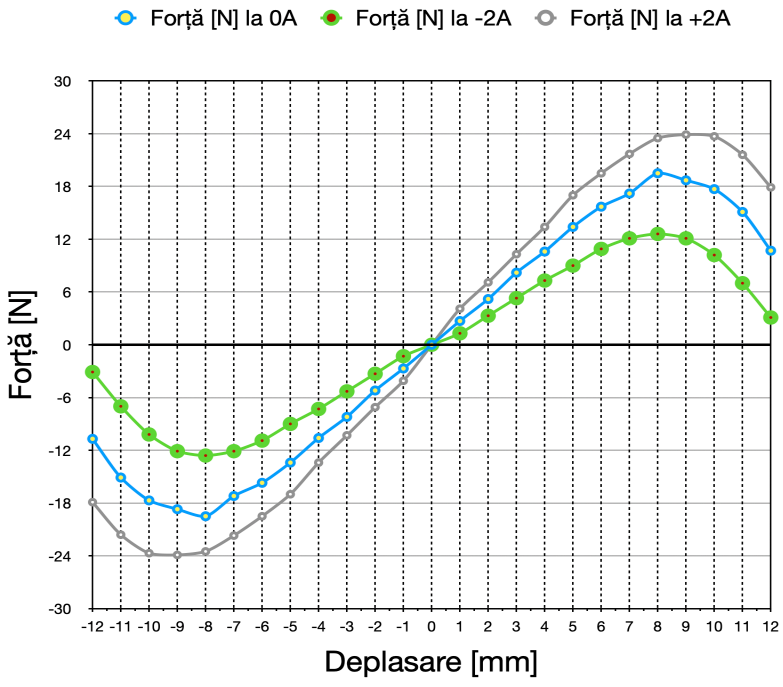
Cursă [mm]	Forța [N] la 0A	Forța [N] la -3A	Forța [N] la +3A	[g] 0A	[g] -3A	[g] +3A	K0	K-	K+	Lcs = ?Km/K0
-12	-23.9	-10.7	-32.3	-2389	-1071	-3230				
-11	-30.7	-18.6	-40.6	-3065	-1855	-4055				
-10	-34.3	-24.2	-41.9	-3434	-2423	-4193				
-9	-33.7	-25.1	-40.3	-3373	-2505	-4031				
-8	-31.7	-24.2	-37.5	-3167	-2419	-3748				
-7	-28.4	-22.2	-33.5	-2843	-2216	-3347				
-6	-25.1	-19.7	-29.7	-2506	-1968	-2968				
-5	-21.2	-16.8	-25.2	-2124	-1677	-2522				
-4	-17	-13.9	-20.1	-1702	-1388	-2012				
-3	-12.8	-10.5	-15.3	-1278	-1052	-1530				
-2	-8.3	-7.3	-9.9	-830	-734	-993				
-1	-4	-4	-4.1	-403	-395	-406				
0	0	0	0	0	0	0				
1	4	4	4.1	403	395	406	4	4	4.1	0.02
2	8.3	7.3	9.9	830	734	993	4.4	3.25	5.6	0.53
3	12.8	10.5	15.3	1278	1052	1530	4.35	3.3	5.1	0.41
4	17	13.9	20.1	1702	1388	2012	4.2	3.15	4.95	0.43
5	21.2	16.8	25.2	2124	1677	2522	4.05	2.9	4.8	0.47
6	25.1	19.7	29.7	2506	1968	2968	3.6	2.7	4.15	0.4
7	28.4	22.2	33.5	2843	2216	3347				
8	31.7	24.2	37.5	3167	2419	3748				
9	33.7	25.1	40.3	3373	2505	4031				
10	34.3	24.2	41.9	3434	2423	4193				
11	30.7	18.6	40.6	3065	1855	4055				
12	23.9	10.7	32.3	2389	1071	3230				

Tabel 3.3. Valorile experimentale ale fortelor AEMEC 3 cu întrefier x_0=3 mm din Fig. 3.37.

Cursă [mm]	Forță [N] la 0A	Forță [N] la -3A	Forță [N] la +3A	[g] 0A	[g] -3A	[g] +3A	K0	K-	K+	Lcs = ΔKm/K0
-12	-11.2	0	-22.2	-1123	0	-2216				
-11	-15.8	-3.1	-26.2	-1579	-306	-2622				
-10	-18.2	-6.7	-27.8	-1821	-673	-2780				
-9	-18.8	-9	-27.5	-1884	-898	-2748				
-8	-18.3	-9.4	-26	-1834	-941	-2600				
-7	-17.3	-9.2	-24.2	-1725	-923	-2418				
-6	-15.6	-8.4	-21.7	-1560	-838	-2167				
-5	-13.3	-7.1	-18.6	-1325	-713	-1857				
-4	-10.5	-5.3	-14.9	-1053	-527	-1486				
-3	-7.6	-3.6	-11	-762	-364	-1102				
-2	-5.2	-2.1	-7.6	-515	-205	-755				
-1	-2.7	-0.5	-4.3	-274	-45	-426				
0	0	0	0	0	0	0				
1	2.7	0.5	4.3	274	45	426	2.7	0.5	4.3	1.41
2	5.2	2.1	7.6	515	205	755	2.45	1.55	3.35	0.73
3	7.6	3.6	11	762	364	1102	2.65	1.6	3.65	0.77
4	10.5	5.3	14.9	1053	527	1486	2.85	1.75	3.8	0.72
5	13.3	7.1	18.6	1325	713	1857	2.55	1.55	3.4	0.73
6	15.6	8.4	21.7	1560	838	2167	2	1.05	2.8	0.87
7	17.3	9.2	24.2	1725	923	2418				
8	18.3	9.4	26	1834	941	2600				
9	18.8	9	27.5	1884	898	2748				
10	18.2	6.7	27.8	1821	673	2780				
11	15.8	3.1	26.2	1579	306	2622				
12	11.2	0	22.2	1123	0	2216				

În condițiile de mai sus, pentru maximizarea domeniului de variație al AEMEC 3, având în vedere experiența anterioară acumulată cu studiul AEMEC 2, s-a crescut întrefierul magnetic de la 1,5 la 3 mm, prin creșterea diametrului porțiunii inelare a carcasei feromagnetice de la 27mm la 30 mm, Fig. 3.37. Ca urmare, deși s-au micșorat forțele arcului, a crescut la un nivel mulțumitor capacitatea de control a rigidității, astfel că, în apropierea poziției de echilibru, variația de rigiditate este maximă, 3800 N/m, în intervalul +/- 1mm, folosind valorile din Tabel 3.2. și scade treptat cu creșterea distanței de funcționare față de origine până în apropierea zonei de maxim al forțelor unde se pierde efectul de control, variația de rigiditate devenind nesemnificativă.

Fig. 3.38. ilustrează curbele de forță AEMEC 3 pentru curentul de comandă, I_c= +/- 2A, constituite pe baza valorilor experimentale din tabelul 3.3. Se observă că s-au redus valorile forțelor elastice și de asemenea valorile de variație a rigidității, așa cum era de așteptat. De exemplu, variația de rigiditate maximă a dispozitivului obținută în intervalul +/- 1 mm, este de 2800 N/m, în loc de 3800 N/m cât a fost în cazul aplicării curentului, I_c= +/- 3A.



Variația forței arcului magnetic în funcție de cursa tijei și de curent (0A, ±2A)

Fig. 3.38. Curbe forță - deplasare pentru AEMEC 3, cu întrefier x_0=3mm, I_c= +/- 2A.

Așa cum s-a precizat la început, actuatorul realizat poate avea și alte destinații prin modul de functionare. Astfel, la schimbarea conectarii celor două bobine, din serie-opozite, cum a fost până acum în cazul functionarii ca arc cu rigiditate / elasticitate controlabilă, într-o conectare serie, se obține fie funcționarea ca vibrator, adică generează vibrații controlate în funcție de amplitudinea și frecvența tensiunii alternative aplicate actuatorului sau cea de actuator de deplasare în funcție de amplitudinea și

sensul de alimentare cu o tensiune continuă. De exemplu, în Fig. 3.39 este ilustrată caracteristica de frecvență la actuatorul în funcționare ca vibrator, obținută experimental într-un domeniu de frecvență superior frecvenței de rezonanță a actuatorului, din cauza că, generatorul de frecvență de putere disponibil, are limita minimă a frecvenței tensiunii generate, de numai 18 Hz.

Tabel 3.4. Valorile experimentale ale forțelor AEMEC 3 cu întrefier x_0=3mm din Fig. 3.38.

Cursă [mm]	Forță [N] la 0A	Forță [N] la -2A	Forță [N] la +2A	[g] 0A	[g] -2A	[g] +2A	K0	K-	K+	Lcs = ΔKm/K0
-12	-10.7	-3.1	-17.9	-1074	-309	-1794				
-11	-15.1	-7	-21.6	-1514	-698	-2164				
-10	-17.7	-10.2	-23.7	-1766	-1023	-2374				
-9	-18.7	-12.1	-23.9	-1867	-1214	-2394				
-8	-19.5	-12.6	-23.5	-1954	-1256	-2353				
-7	-17.2	-12.1	-21.7	-1720	-1214	-2166				
-6	-15.7	-10.9	-19.5	-1566	-1087	-1950				
-5	-13.4	-9	-17	-1336	-903	-1701				
-4	-10.6	-7.3	-13.4	-1061	-734	-1339				
-3	-8.2	-5.3	-10.3	-816	-528	-1026				
-2	-5.2	-3.3	-7.1	-519	-328	-707				
-1	-2.7	-1.3	-4.1	-270	-129	-407				
0	0	0	0	0	0	0				
1	2.7	1.3	4.1	270	129	407	2.7	1.3	4.1	1.04
2	5.2	3.3	7.1	519	328	707	2.75	2	3.1	0.4
3	8.2	5.3	10.3	816	528	1026	2.7	2	3.15	0.43
4	10.6	7.3	13.4	1061	734	1339	2.6	1.85	3.35	0.58
5	13.4	9	17	1336	903	1701	2.55	1.8	3.05	0.49
6	15.7	10.9	19.5	1566	1087	1950	1.9	1.55	2.35	0.42
7	17.2	12.1	21.7	1720	1214	2166				
8	19.5	12.6	23.5	1954	1256	2353				
9	18.7	12.1	23.9	1867	1214	2394				
10	17.7	10.2	23.7	1766	1023	2374				
11	15.1	7	21.6	1514	698	2164				

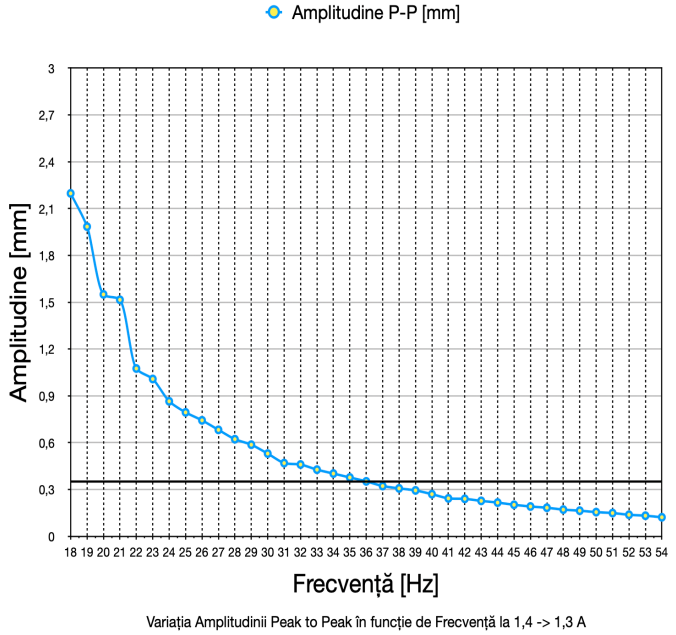


Fig. 3.39. Caracteristica amplitudine - frecvență parțială (post-rezonanță) a actuatorului de vibrație la un curent alternativ de comandă, I_c= 1,35 A

O determinare teoretică, prin calcul a frecvenței naturale a actuatorului construit, cunoscând parametrii k și m, respectiv, constanta de elasticitate a AEMEC 3 și masa ansamblului mobil, s-a facut folosind relația cunoscută pentru sistemele oscilante liniare,

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k}{m}}$$

Pentru curba pasivă, I = 0, conform valorilor obținute experimental, pentru vibrația în jurul originii, k = 2,7 N/mm (panta curbei F(x) în origine) sau 2700 N/m.

Masa mobilă, care transmite vibrația, ax plus magnet, m = 0,144 kg.

Astfel,

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{2700}{0{,}144}} \approx 21{,}8Hz$$

, valoare corespunzătoare pentru o funcționare ideală, la amortizare c=0. În condiții reale, în prezența amortizării, frecvența de rezonanță este mai mică decât cea naturală, deci sub 21 Hz, așa cum sugerează și graficul amplitudine-frecvență, Fig. 3.39.

3.3.3. Concluzii

A fost dezvoltat și investigat un nou actuator electromagnetic de vibrații și forțe elastice controlabile, AEMEC 3, bazat pe utilizarea interacțiunii dintre magneți permanenți și câmpuri electromagnetice generate de bobine de comandă.

Prin simulare și cercetare experimentală s-a evidențiat capacitatea actuatorului de a genera forțe elastice controlabile și vibrații cu amplitudine reglabilă prin variația curentului electric de comandă.

Rezultatele experimentale au confirmat funcționarea stabilă a dispozitivului și concordanța generală dintre rezultatele teoretice și cele experimentale. Caracteristicile amplitudine–frecvență obținute au evidențiat comportamentul rezonant al sistemului și posibilitatea utilizării actuatorului în aplicații vibraționale.

S-a constatat că geometria circuitului magnetic, valoarea întrefierului și parametrii electrici ai bobinelor influențează semnificativ caracteristicile elastice și dinamice ale dispozitivului.

Prin rezultatele obținute, AEMEC 3 evidențiază posibilitatea realizării unor actuatoare electromagnetice compacte cu elasticitate controlabilă, utilizabile în sisteme de vibrații, control dinamic și aplicații mecatronice avansate.

3.4. Concluzii la capitol

În cadrul acestui capitol au fost dezvoltate și validate contribuțiile științifice originale privind actuatoarele electromagnetice de forțe elasto-magnetice controlabile, reunite sub denumirea particulară din această teză, AEMEC, prin abordări teoretice, modelare numerică și verificări experimentale. Din această familie, AEMEC, au fost investigate științific 3 variante noi și originale, AEMEC 1 brevetată OSIM, AEMEC 2O și AEMEC 3 trimise pentru brevetare la OSIM.

În prima parte a capitolului a fost analizat comportamentul vibrațional al arcului electromagnetic AEMEC 1, evidențiindu-se capacitatea acestuia de a varia în mod controlat rigiditatea și forța elastică prin intermediul curentului electric. Modelarea matematică a sistemului a permis identificarea parametrilor dinamici principali, iar rezultatele experimentale au confirmat corectitudinea modelelor teoretice și posibilitatea controlului vibrațiilor prin variația rigidității. Astfel, AEMEC 1 demonstrează un potențial ridicat pentru utilizarea în sisteme cu rigiditate variabilă și aplicații de amortizare adaptivă.

În continuare, au fost analizate soluțiile bazate pe magneți inelari cu magnetizare radială, evidențiindu-se particularitățile constructive, avantajele tehnologice și posibilitățile de utilizare în structuri electromagnetice avansate. Au fost prezentate principiile de funcționare ale arcurilor electromagnetice bidirecționale și limitările unor soluții existente, în special cele legate de inductanța ridicată și de apariția forțelor transversale nedorite.

Pe baza acestor analize a fost dezvoltat conceptul AEMEC 2, pentru care au fost propuse și evaluate mai multe variante constructive. Studiile de simulare au evidențiat influența parametrilor geometrici și magnetici asupra caracteristicilor forță – deplasare și au permis identificarea unor direcții de optimizare privind creșterea forței elastice și îmbunătățirea liniarității.

O contribuție semnificativă o reprezintă dezvoltarea actuatorului bidirecțional AEMEC 2O, pentru care au fost realizate etapele complete de proiectare, optimizare numerică, realizare experimentală și validare. Rezultatele obținute au demonstrat o variație largă a rigidității, de ordinul ±5200 N/m în jurul poziției de echilibru, precum și o concordanță satisfăcătoare între simulări și măsurători. De asemenea, s-a evidențiat posibilitatea optimizării suplimentare a performanțelor prin modificări constructive simple, cum ar fi introducerea unor elemente feromagnetice auxiliare.

În ultima parte a capitolului a fost studiat AEMEC 3, un actuator electromagnetic multifuncțional original, capabil să funcționeze în trei moduri distincte: arc electromagnetic cu elasticitate controlabilă, actuator de deplasare și actuator de vibrații. Această soluție extinde semnificativ domeniul de aplicabilitate al sistemelor AEMEC, oferind o flexibilitate funcțională ridicată și un control direct al forțelor magneto-elastice prin intermediul curentului electric. Cercetările teoretice și experimentale au evidențiat funcționarea stabilă a dispozitivului și posibilitatea controlului amplitudinii

vibrațiilor prin variația parametrilor electrici de alimentare. Caracteristicile amplitudine–frecvență obținute au confirmat comportamentul rezonant specific sistemelor electromagnetice elastice și posibilitatea utilizării actuatorului în aplicații vibraționale și mecatronice avansate.

Rezultatele obținute în cadrul acestui capitol evidențiază faptul că utilizarea magneților permanenți și a circuitelor electromagnetice permite realizarea unor sisteme elastice active, cu performanțe superioare celor mecanice clasice, caracterizate prin controlabilitate, adaptabilitate și posibilitatea integrării în sisteme moderne de acționare.

În ansamblu, contribuțiile prezentate confirmă validitatea conceptului AEMEC și demonstrează fezabilitatea realizării unor actuatoare electromagnetice cu rigiditate controlabilă, capabile să răspundă cerințelor actuale din domenii precum robotică, sisteme compliante, controlul vibrațiilor și acționări electromecanice avansate. Aceste rezultate constituie o bază solidă pentru dezvoltările ulterioare și pentru extinderea aplicațiilor practice ale acestor sisteme.

4. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII PROPRII

Teza de doctorat a avut ca obiectiv principal studiul, dezvoltarea și validarea unor sisteme electromagnetice cu elasticitate variabilă bazate pe interacțiunea dintre magneți permanenți și câmpuri electromagnetice controlabile. Cercetările efectuate au urmărit atât analiza stadiului actual al sistemelor de tip arc magnetic și arc electromagnetic, cât și dezvoltarea unor soluții originale destinate realizării de actuatoare electromagnetice cu elasticitate controlabilă și aplicații în domeniul vibrațiilor și al sistemelor mecatronice.

În cadrul cercetărilor au fost analizate principalele configurații constructive și funcționale ale arcurilor magnetice cu elasticitate ajustabilă (AMEA), fiind evidențiate avantajele și limitările acestora în raport cu arcurile mecanice clasice. Au fost studiate soluții bazate pe magneți permanenți montați în configurații repulsive și atractive, precum și sisteme cu rigiditate cvasi-zero.

Rezultatele obținute au evidențiat faptul că sistemele AMEA permit realizarea unor caracteristici elastice fără contact mecanic, cu frecare redusă și fiabilitate ridicată, fiind adecvate pentru aplicații în domeniul vibrațiilor, al suspensiilor elastice și al sistemelor cu rigiditate variabilă.

O parte importantă a cercetărilor a fost dedicată dezvoltării și investigării actuatorilor electromagnetici cu elasticitate controlabilă (AEMEC). Au fost elaborate și analizate mai multe configurații constructive originale, bazate pe utilizarea interacțiunii dintre magneți permanenți și bobine electromagnetice alimentate controlat.

În cazul variantei AEMEC 1 au fost investigate posibilitățile de control al rigidității electromagnetice prin variația curentului electric, fiind evidențiată capacitatea sistemului de a modifica caracteristicile elastice și dinamice ale actuatorului.

În continuare au fost dezvoltate și investigate structuri electromagnetice bazate pe magneți inelari cu magnetizare radială, fiind elaborată varianta originală AEMEC 2O. Cercetările teoretice și experimentale au evidențiat influența configurației circuitului magnetic, a elementelor feromagnetice și a parametrilor electrici asupra caracteristicilor elastice și a performanțelor dispozitivului.

Rezultatele obținute au confirmat posibilitatea realizării unor actuatoare electromagnetice bidirecționale cu elasticitate controlabilă și rigiditate variabilă într-un domeniu extins.

În ultima parte a cercetărilor a fost analizat și validat experimental actuatorul electromagnetic AEMEC 3, destinat generării de vibrații și forțe elastice controlabile. Studiile efectuate au evidențiat funcționarea stabilă a dispozitivului și posibilitatea controlului amplitudinii vibrațiilor prin variația parametrilor electrici de alimentare.

Pentru validarea soluțiilor propuse au fost realizate modele experimentale și standuri de măsurare specifice. Rezultatele experimentale obținute au evidențiat o concordanță generală bună cu rezultatele obținute prin modelare matematică și simulări numerice utilizând metoda elementului finit.

Cercetările experimentale au confirmat posibilitatea controlului forțelor elastice și a rigidității electromagnetice prin variația parametrilor constructivi și electrici ai dispozitivelor dezvoltate.

Sistemele dezvoltate în cadrul tezei prezintă posibilități de utilizare în domeniul actuatorilor de vibrații, al sistemelor de control al vibrațiilor, al suspensiilor electromagnetice, al sistemelor mecatronice adaptive și al structurilor cu rigiditate variabilă.

Caracteristicile constructive și funcționale ale actuatorilor AEMEC permit integrarea acestora în aplicații care necesită control dinamic al elasticității și reducerea uzurii mecanice prin eliminarea contactului dintre elementele elastice.

Prin cercetările teoretice și experimentale realizate în cadrul tezei a fost demonstrată posibilitatea dezvoltării unor actuatoare electromagnetice cu elasticitate controlabilă bazate pe interacțiunea dintre magneți permanenți și câmpuri electromagnetice. Rezultatele obținute confirmă potențialul acestor sisteme pentru aplicații moderne în domeniul vibrațiilor, al controlului dinamic și al sistemelor electromecanice adaptive.

Principalele contribuții originale realizate în cadrul tezei sunt următoarele:

1. În prezenta teza este abordată prima cercetare științifică de amploare dedicată exclusiv arcurilor electromagnetice cu rigiditate / elasticitate controlabilă, din ce se cunoaște până în prezent în literatura științifică națională și internațională, incluzând aici și primul articol știintific care diseminează o parte din cercetările cuprinse în teză.
2. Elaborarea unui studiu documentar aprofundat și în premierî privind cercetările în domeniul arcurilor magnetice și electromagnetice cu elasticitate variabilă, în care sunt descrise și caracterizate toate categoriile de arcuri magnetgice pasive și active cunoscute până în prezent.
3. Descrierea arcurilor magnetice cu elasticitate variabilă care sunt propuse a fi clasificate în doua mari categorii, si anume, arcuri magnetice cu elasticitate ajustabilă (AMEA) și arcuri electromagnetice cu elasticitate controlabilă (AEMEC).
4. Analiza teoretică prin simulare numerică a principalelor configurații constructive de arcuri magnetice și electromagnetice utilizate în aplicații vibraționale.
5. Investigarea teoretică și experimentală a funcționării la vibrații a unui original arc electromagnetic cu pretensionare elastică unidirecțională și controlabilă AEMEC 1, bazat pe utilizarea unui magnet inelar cu magnetizare axială. Pentru o poziționare z = 8 mm a

ansamblului magnetic mobil față de cel staționar, a fost obținută o variație a rigidității, $k_{M+} - k_{M-} = 2700$ (N/m) la schimbarea sensului curentului de comandă, Ic = ±1,5A.

6. Elaborarea și validarea conceptului original AEMEC 2O bidirecțional bazat pe utilizarea a doi magneți inelari cu magnetizare radială. Variația maximă a rigidității / elasticitatii, ±5200 N/m, a prototipului experimentat a fost obținută în intervalul de variație a deplasării în jurul poziției zero, Δz = ±1 mm, pentru o variație a curentului de comandă, I = ±3 A.
7. Investigarea experimentală a unui original arc electromagnetic cu forțe elastice controlabile bidirecțional, AEMEC 3, bazat pe utilizarea unui magnet inelar cu magnetizare radială, ca o functionare particulară a actuatorului electromagnetic cu funcționare multiplă propus pentru brevetare, actuator care poate funcționa și ca actuator vibrator și ca actuator de deplasare. Variația maximă de rigiditate / elasticitate a arcului obținută în intervalul de functionare +/- 1 mm, este de 3800 N/m la aplicarea curentului de comandă, I_c= +/- 3A.
8. Evidențierea posibilităților de utilizare a sistemelor dezvoltate în aplicații de control al vibrațiilor, sisteme mecatronice adaptive și actuatoare cu rigiditate variabilă.

LISTA DE LUCRĂRI

Activitatea de cercetare desfășurată în cadrul tezei a fost cuprinsă, în partea de început, în cele două rapoarte de cercetare științifice, respectiv studiul principiilor funcționale, configurațiilor de bază, aplicațiilor arcurilor electromagnetice și stadiul actual al cunoașterii arcurilor electromagnetice cu elasticitate controlabilă. Cercetarea de bază, cu contribuții științifice semnificative, a fost diseminată și valorificată parțial sau este în curs de validare științifică, prin două lucrări ISI-WoS, respectiv un articol cu factor de impact ISI-WoS și o lucrare indexată ISI-WoS, un alt articol fiind în curs de evaluare la o revistă cotată ISI-WoS și o altă lucrare este în curs de elaborare. Ultimele două lucrări au la bază soluții tehnice originale, propuse la OSIM a fi brevetate.

1. R. Olaru, **G. Muraviev**, Current research of the variable stiffness magnetic springs, Rev. Roum. Sci. Tech.-Électrotechn. et Énerg. Vol. 71, 1, pp. 15-20, Bucarest, 2026. **WoS, I.F= 1.1** (JCR2024/25).
2. **G. Muraviev**, R. Olaru, Modeling and Vibration Analysis of an Electromagnetic Spring with Controllable Stiffness, 15th International Conference on Electromechanical and Energy Systems-Sielmen 2025 International Conference On Electromechanical And Energy Systems, Sielmen, pp.83-86.| **WoS**

3. R. Olaru, **G. Muraviev**, Camelia-Mihaela Petrescu, Theoretical and experimental study of a novel electromagnetic spring with controllable stiffness, în curs de evaluare la Proceedings of the Romanian Academy, Series A., 2026. **WoS, I.F. =1.0**

4. R. Olaru, **G. Muraviev**, Camelia Petrescu, Multifunctional electromagnetic actuator with magnetic spring, Lucrare în curs de elaborare, 2026.

Brevete de invenţii – cereri în curs de solutionare la OSIM

1. R. Olaru, **G. Muraviev,** Camelia Petrescu, Arc electromagnetic cu forța elastică controlabilă, Cerere Brevet de invenție OSIM, nr. A/00071, 13.02.2026.

2. R. Olaru, **G. Muraviev,** Camelia Petrescu, Actuator electromagnetic multifuncțional cu arc magnetic, Cerere Brevet de invenție OSIM, nr. A/00329, 25.07.2025.

Direcții viitoare de cercetare

Cercetările viitoare pot urmări dezvoltarea unor noi configurații constructive de actuatoare electromagnetice cu elasticitate controlabilă, optimizarea performanțelor energetice și extinderea domeniului de variație al rigidității electromagnetice.

O direcție importantă o reprezintă integrarea unor metode moderne de control inteligent și dezvoltarea unor sisteme adaptive cu reglaj automat al elasticității în funcție de regimul de funcționare.

De asemenea, pot fi investigate posibilitățile de miniaturizare a sistemelor dezvoltate și utilizarea acestora în aplicații de precizie, robotică, biomecanică și sisteme vibraționale multiaxiale.

BIBLIOGRAFIE

Lucrări științifice

1. R. Ahamed, I. Howard, K. McKee, Dynamics analysis of magnetic spring-based nonlinear oscillator system, Nonlinear Dynamics, vol. 111, pp. 15705-15736, 2023.
2. R. M. Alexander, Three Uses for Springs în Legged Locomotion, International Journal of Robotics Research, vol. 9, issue 2, pp. 53-61, 1990.
3. S. Benacchio, A. Mahler, J. Boisson, C. Touzé, Design of a magnetic vibration absorber with tunable stiffness, Nonlinear Dynamics, vol. 85, pp. 893-911, 2016.
4. M. Bednarek, D. Lewandowski, K. Polczynski, J. Awrejcewicz, On the active damping of vibrations using electromagnetic spring, Mechanics Based Design of Structures and Machines, vol. 49, issue 8, 2021.
5. J. Bijak, G. Lo Sciuto, Z. Kowalik, P. Lasek, M. Szczygiel, T. Trawinski, Magnetic flux density analysis of magnetic spring în energy harvester by Hall-Effect sensors and 2D magnetostatic FE model, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 579, article 170934, 2023.
6. A. Buta, D. Opincariu, Bazele electrotehnicii – Lecții de curs, Universitatea „Ion Slavici" Timișoara, 2003.
7. J. Callebaut, Application Note - Induction Heating, European Copper Institute, Publication No. Cu0123, 2014.
8. D. T. E. H. van Casteren, J. J. H. Paulides, J. L. G. Janssen, E. A. Lomonova, Analytical Force, Stiffness, and Resonance Frequency Calculations of a Magnetic Vibration Isolator for a Micro Balance, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 1, 2015.
9. D. Che, J. Z. Bird, A. Hagmüller, M. E. Hossain, An Adjustable Stiffness Torsional Magnetic Spring with a Linear Stroke Length, Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 5944-5948, 2021.
10. X. Chen, J. Zhao, Y. Jing, X. Cao, S. Yuan, J. Luo, H. Pu, A novel permanent magnet vibration isolator with wide stiffness range and high bearing capacity, Mechatronics, vol. 98, article 103119, 2024.
11. J. Choi, S. Park, W. Lee, S.-C. Kang, Design of a robot joint with variable stiffness, Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA, pp. 1760-1765, 2008.
12. J. M. D. Coey, Magnetism and Magnetic Materials, Cambridge University Press, 2009.
13. S. Defrancesco, V. Zanetti, Experiments on Magnetic Repulsion, American Journal of Physics, vol. 51, no. 11, pp. 1023-1025, 1983.

14. E. Diez-Jimenez, J. L. Perez-Diaz, J. C. Garcia-Prada, Review of Passive Electromagnetic Device for Vibration Damping and Isolation, Shock and Vibration, Article ID 1250707, 2019.
15. E. Diez-Jimenez, C. Alén-Cordero, R. Alcover-Sánchez, E. Corral-Abad, Modelling and Test of an Integrated Magnetic Spring-Eddy Current Damper for Space Applications, Actuators, vol. 10, issue 8, 2021.
16. D. D. Domme, Experimental and Analytical Characterization of a Transducer for Energy Harvesting Through Electromagnetic Induction, Master Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2008.
17. J. Ferreira, Cours de Magnétostatique, Université Joseph Fourier Grenoble, 2001.
18. N. B. Gîrtan, Actuatori electromagnetici pentru vibrații pe bază de magneți permanenți, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi" din Iași, 2019.
19. N. B. Gîrtan, R. Olaru, Improving the Performance of a Vibration Electromagnetic Actuator Based on Active Magnetic Springs, Proc. EPE2018, Iași, pp. 284-289, 2018.
20. N. Gori, C. Simonelli, A. Musolino, R. Rizzo, E. Diez-Jimenez, L. Sani, Design and Optimization of a Permanent Magnet-Based Spring–Damper System, Actuators, vol. 12, issue 7, article 291, 2023.
21. M. Granström, Design and Analysis of a 1-DOF Magnetic Bearing, Master's Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2011.
22. M. R. Hamers, Actuation Principles of Permanent Magnet Synchronous Planar Motors, Eindhoven University of Technology, 2005.
23. I. R. Harris, A. J. Williams, Magnetic Materials, University of Birmingham, 2009.
24. M. W. Hyun, J. Yoo, S. T. Hwang, J. H. Choi, S. Kang, S. J. Kim, Optimal Design of a Variable Stiffness Joint Using Permanent Magnets, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 43, issue 6, pp. 2710-2712, 2007.
25. M. E. Hossain, J. Z. Bird, Investigating the Performance of a Variable Stiffness Magnetic Spring for Resonant Ocean Power Generation, Proc. IEEE ECCE, pp. 5002-5008, 2019.
26. M. E. Hossain, J. Z. Bird, V. Albarran, D. Che, Analysis and Experimental Testing of a New Type of Variable Stiffness Magnetic Spring with a Linear Stroke Length, Proc. IEEE ECCE, pp. 5961-5965, 2021.
27. D. Ioan, Modelarea dispozitivelor electromagnetice, Universitatea Politehnică București, editura Printech, 2000.

28. J. L. G. Janssen, J. J. H. Paulides, E. A. Lomonova, Passive magnetic bearing and spring assemblies usinf permanent magnet arrays, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, no. 11, pp. 4106-4109, 2012.
29. J. Jiao, T. Wang, L. Yan, Design and analysis of linear oscillating motor for linear pump application - magnetic field, dynamics and thermotics, Frontiers of Mechanical Engineering, vol. 11, issue 4, pp. 351-362, 2016.
30. N. A. Kamaruzaman, W. S. P. Robertson, M. H. Ghayesh, B. S. Cazzolato, A. C. Zander, Improving Passive Stability of a Planar Quasi-Zero Stiffness Magnetic Levitation System via Lever Arm, Proc. IEEE INTERMAG, ID 1800023, 2018.
31. C. Lee, D. Stamp, R. Kapania, J. O. Mur-Miranda, Harvesting vibration energy using nonlinear oscillations of an electromagnetic inductor, Proc. SPIE 7683, Energy Harvesting and Storage: Materials, Devices, and Applications, paper 76830Y, 2010.
32. J. Lucas, P. Lucas, T. Le Mercier, Rare Earths - Science, Technology, Production and Use, Elsevier, 2014.
33. Y. Lou, H. Zhang, H. Cai, Design, Modeling, and Characteristics Analysis of Halbach Permanent Magnetic Spring, Actuators, vol. 13, article 453, 2024.
34. Y. Lou, H. Zhang, L. Zhang, H. Cai, Advancements în Key Technologies for Vibration Isolators Utilizing Electromagnetic Levitation, Energies, vol. 17, article 5343, 2024.
35. B. P. Mann, N. D. Sims, Energy harvesting from the nonlinear oscillations of magnetic levitation, Journal of Sound and Vibration, vol. 319, Issues 1-2, pp. 515-530, 2009.
36. D. Marconi, A. Baldoni, Z. McKinney, M. Cempini, S. Creab, N. Vitiello, A novel hand exoskeleton with series elastic actuation for modulated torque transfer, Mechatronics, vol. 61, pp. 69-82, 2019.
37. P. Marian, Electrotehnica, Editura Academiei Forțelor Aeriene „Henri Coandă”, 2004.
38. A. H. Memar, E. T. Esfahani, A Variable Stiffness Gripper with Antagonistic Magnetic Springs for Enhancing Manipulation, Proc. Robotics: Science and Systems, 2018.
39. A. H. Memar, E. T. Esfahani, A Robot Gripper With Variable Stiffness Actuation for Enhancing Collision Safety, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 67, issue 8, pp. 6607-6616, 2020.
40. U. Mettin, P. X. La Hera, L. B. Freidovich, A. S. Shiriaev, Parallel Elastic Actuators as a Control Tool for Preplanned Trajectories of Underactuated Mechanical Systems, International Journal of Robotics Research, vol. 29, issue 9, pp. 1186-1198, 2010.

41. P. J. Misljen, Ž. V. Despotovic, M. S. Majevic, Modeling and control of bulk material on the electromagnetic vibratory feeder, Automatika, vol. 57, issue 4, pp. 936-947, 2016.
42. R. G. Montague, C. M. Bingham, K. Atallah, Servo control of magnetic gears, IEEE/ASME Transactions of Mechtronics, vol. 17, no. 2, pp. 269-278, 2012.
43. **G. Muraviev**, Stadiul actual al cercetării arcurilor magnetice și electromagnetice cu elasticitate variabilă și controlabilă. Investigarea unor modele noi de arcuri electromagnetice cu elasticitate controlabilă, Raport de cercetare științifică nr. 1, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi" din Iași, 2022.
44. **G. Muraviev**, Studiul teoretic și experimental al unui arc electromagnetic cu elasticitate controlabilă și analizarea variantelor de utilizare practică, Raport de cercetare științifică nr. 2, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi" din Iași, 2022.
45. **G. Muraviev,** R. Olaru, Modeling and Vibration Analysis of an Electromagnetic Spring with Controllable Stiffness, 15th International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), pp. 83-86, 2025.
46. A. Nammari, L. Caskey, J. Negrete, H. Bardaweel, Fabrication and characterization of non-resonant magneto mechanical low-frequency vibration energy harvester, Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 102, pp. 298-311, 2018.
47. G. Nijsse, Active Magnetic Spring for Vibration Isolation, Delft Universitu of Technology, Delft, Netherland, 2001.
48. K. Oka, T. Ishizaki, Y. Shimogo, Proposal of a vibration isolation system using magnetic negative stiffness, Mechanical Engineering Journal, vol. 7, no. 6, 2020.
49. R. Olaru, C. Astratini-Enache, C. Petrescu, Analysis and design of a moving-magnet type linear actuator with repulsive magnetic forces, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 38, pp. 127-137, 2012.
50. R. Olaru, R. Ghercă, Generator with levitated magnet for vibration energy harvesting, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 42, pp. 421-435, 2013.
51. R. Olaru, R. Ghercă, C. Petrescu, Analysis and design of a vibration energy harvester using permanent magnets, Rev. Roum. Sci. Tech.-Électrotechn. et Énerg., vol. 59, issue 2, pp. 131-140, Bucharest, 2014.
52. R. Olaru, A. Arcire, C. Petrescu, M. M. Mihai, N. B. Gîrtan, A novel vibration actuator based on active magnetic spring, Sensors and Actuators A: Physical, vol. 264, pp. 11-17, 2017.

53. R. Olaru, M. M. Mihai, B. Gîrtan, C. Petrescu, A. Arcire, Design and experiment of an electromagnetic vibrational inertial actuator using linearized magnetic spring, Rev. Roum. Sci. Tech.-Électrotechn. et Énerg., vol. 63, issue 3, pp. 253-258, Bucharest, 2018.
54. R. Olaru, C. Petrescu, A. Arcire, Design of a magnetic spring for variable stiffness actuators, Proceedings of the Romanian Academy, Series A, vol. 22, no. 3, pp. 235-243, 2021.
55. R. Olaru, **G. Muraviev,** Current research of the variable stiffness magnetic springs, Rev. Roum. Sci. Tech.-Électrotechn. et Énerg., vol. 71, no. 1, pp. 15-20, Bucharest, 2026.
56. R. Olaru, **G. Muraviev**, C. Petrescu, Theoretical and experimental study of a novel electromagnetic spring with controllable stiffness, Proceedings of the Romanian Academy, Series A, în evaluare, 2026.
57. R. Olaru, **G. Muraviev**, C. Petrescu, Multifunctional electromagnetic actuator with magnetic spring, lucrare în curs de elaborare, 2026.
58. P. J. Patt, Design and Testing of a Coaxial Linear Magnetic Spring with Integral Linear Motor, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 21, pp. 1759-1761, 1985.
59. H. Pu., S. Yuan, Y. Peng, K. Meng, J. Zhao, R. Xie, Y. Huang, Y. Sun, Y. Yang, S. Xie, J. Luo, X. Chen, Multi-layer electromagnetic spring with tunable negative stiffness for semi-active vibration isolation, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 121, pp. 942–960, DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.12.028, 2019.
60. K. X. Qian,P. Zeng,W. M. Ru, H. Y. Yuan, Novel magnetic spring and magnetic bearing, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 39, issue 1, pp. 559-561, 2003.
61. W. S. P. Robertson, B. Cazzolato, A. Zander, A Multipole Array Magnetic Spring, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 41, no. 10, pp. 3826-3828, 2005.
62. W. S. P. Robertson, R. Wood, B. Cazzolato, A. Zander, Zero Stiffness Magnetic Springs for Active Vibration Isolation, ACTIVE 2006, Adelaide, Australia, 18-20 September 2006.
63. W. S. P. Robertson, B. Cazzolato, A. Zander, Theoretical analysis of a non-contact spring with inclined magnets, Journal of Sound and Vibration, vol. 331. No.6, pp. 1247-1258, 2012.
64. W. S. P. Robertson, B. Cazzolato, A. Zander, Experimental results of a 1D passive magnetic spring approaching quasi-zero stiffness and using active skyhook damping, Proc. Acoustics 2013, Victor Harbor, Australia, 17-20 November, 2013.
65. J. Saha, T. O'Donnel, H. Loder, S. Beeby, Electromagnetic generator for harvesting energy from human motion, Sensors and Actuators A, vol. 147, no. 1, pp. 248-253, DOI: 10.1016/j.sna.2008.03.008, 2008.

66. M. P. S. dos Santos, J. A. F. Ferreira, J. A. O. Simoes, R. Pascoal, J. Torrao, X. Xue, E. P. Furlani, Magnetic levitation-based non-linear model for energy transduction, Scientific Reports, vol. 6, Article number 18579, DOI: 10.1038/srep18579, 2016.
67. SDM Magnetics Co., Ltd., A brief Introduction to Radially Oriented NdFeB Ring Magnets, Technical Web Documentation, 2020.
68. M. Simi, P. Valdastri, A. Menciassi, P. Dario, Magnetic torsion spring mechanism for a wireless capsule, ASME Journal of Medical Devices, vol. 7, no. 2, 020949, DOI: 10.1115/1.4023576, 2013.
69. J. Snamina, P. Habel, Magnetic spring as the element of vibration reduction system, Mechanics and Control, vol. 29, issue 1, pp. 40-44, 2010.
70. J. Sulze, M. Peshkin, J. Patton, MARIONET: an exotendon-driven, rotary series elastic actuator for exerting joint torque, Proc. International Conference on Robotics for Rehabilitation (ICORR), pp. 103-108, 2005.
71. N. L. Tagliamonte, F. Sergi, D. Accoto, G. Carpino, E. Guglielmelli, Double actuation architectures for rendering variable impedance în compliant robots: A review, Mechatronics, vol. 22, pp. 1187-1203, 2012.
72. B. Vanderborght, N. Tsagarakis, R. Van Ham, I. Thorson, D. Caldwell, MACCEPA 2.0: compliant actuator used for energy efficient hopping robot Chobino1D, Autonomous Robots, pp. 1-11, 2009.
73. B. Vanderborght, R. Van Ham, A. Bicchi, E. Burdet, D. G. Caldwell, R. Carloni, M Catalano, O. Eiberger, W. Friedl, G. R. Garabini, Variable impedance actuators: A review, Robotics and Autonomous Systems, vol. 61, no. 12, pp. 1601-1614, DOI: 10.1016/j.robot.2013.06.009, 2013.
74. R. Van Ham, T. Sugar, B. Vanderborght, K. Hollander, D. Lefeber, Compliant actuator designs, IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 16, pp. 81-94, 2009.
75. Q. Wang, J. Zhou, D. Xu, H. Ouyang, Design and experimental investigation of ultra-low frequency vibration isolation during neonatal transport, Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 139, article 106633, 2020.
76. X. Wang, Y. Chen, Z. Zhang, M. Li, Vibration energy harvester based on torsionally oscillating magnet, Micromachines, vol. 12, no. 12, article 1545, DOI: 10.3390/mi12121545, 2021.
77. W. Wang, H. Wei, Z.-H. Wei, Numerical analysis of a magnetic spring-based piecewise nonlinear electromagnetic energy harvester, European Physical Journal Plus, vol. 137, article 56, 2022.
78. S. Wolf, G. Grioli, O. Eiberger, W. Friedl, M. Grebenstein, H. Höpner, H. Albu-Schaffer, A. Bicchi, A. Albu-Schaffer, Variable Stiffness Actuators: Review on Design and Components,

IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 21, no. 5, pp. 2418-2430, DOI: 10.1109/TMECH.2015.2501019, 2016.

79. J. Wu, L. Zeng, B. Han, Y. Zhou, X. Luo, X. Li, X. Chen, W. Jiang, Analysis and design of a novel arrayed magnetic spring with high negative stiffness for low-frequency vibration isolation, International Journal of Mechanical Sciences, vol. 216. Art. no. 106980, 2022.
80. X. Xu, C. Zeng, Magnetic Spring and Experimental Research on its Stiffness Properties, Advanced Materials Research, vol. 706-708, pp. 1418-1422, 2013.
81. J. Xu, X. Yang, W. Li, J. Zheng, Y. Wang, M. Fan, Research on semi-active vibration isolation system based on electromagnetic spring, Mechanics & Industry, vol. 21, article 101, 2020.
82. B. Yan, R. Zhu, X. Liu, J. Chen, A broadband vibration isolator with grounded negative stiffness magnetic spring, Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 139, Art. no. 106635, 2020.
83. B. Yan, N. Yu, C. Wu, A state-of-the-art review on low-frequency nonlinear vibration isolation with electromagnetic mechanisms, Applied Mathematics and Mechanics (English Edition), vol. 43, issue 7, pp. 1045-1062, 2022.
84. B. Yan, N. Yu, C. Wu, Lever-type quasi-zero stiffness vibration isolator with magnetic spring, Journal of Sound and Vibration, vol. 527, 2022.
85. Y. Yao, G. C. Huang, Performance of a guideway seismic isolator with magnetic springs for precision machinery, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol. 38, pp. 181-203, 2009.
86. S. Yuan, Y. Sun, J. Zhao, K. Meng, M. Wang, H. Pu, Y. Peng, J. Luo, S. Xie, A tunable quasi-zero stiffness isolator based on a linear electromagnetic spring, Journal of Sound and Vibration, vol. 482, article 115449, 2020.
87. N. Yu, X. Fei, C. Wu, B. Yan, Modeling and analysis of magnetic spring enhanced lever-type electromagnetic energy harvesters, Applied Mathematics and Mechanics (English Edition), vol. 43, issue 5, pp. 743-760, 2022.
88. J. Zheng, X. Zhang, C. Ma, Z. Zhang, S. Zhang, An ultra-low frequency pendulum isolator using a negative stiffness magnetic spring, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 52, pp. 1313-1320, 2016.
89. F. Zhang, S. Shao, Z. Tian, M. Xu, S. Xie, Active-passive hybrid vibration isolation with magnetic negative stiffness isolator based on Maxwell normal stress, Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 123, pp. 244-263, 2019.

90. F. Zhang, J. Wang, Y. Zhu, S. Li, A new high-static-low-dynamic stiffness vibration isolator based on magnetic negative stiffness mechanism employing variable reluctance stress, Journal of Sound and Vibration, vol. 476, article 115322, 2020.
91. M. Zhang, L. Fang, F. Sun, X. Sun, Y. Gao, K. Oka, Realization of Flexible Motion of Robot Joint with A Novel Permanent Magnetic Spring, Proc. IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics (ISR), pp. 331-336, 2018.
92. Z. Zhou, Z. Dai, Y. Leng, X. Wei, An adjustable low frequency vibration isolation with high-static-stiffness low-dynamic-stiffness property using a novel negative stiffness element, Applied Acoustics, vol. 188, Article 108565, DOI: 10.1016/j.apacoust.2021.108565, 2022.
93. R. Zhu, M. Wang, J. Chen, A nonlinear magnetic spring with quasi-zero stiffness for vibration isolation, Journal of Sound and Vibration, vol 344, pp. 233-245, DOI: 10.1016/j.jsv.2015.01.041, 2015.

Brevete de invenție

94. S. Kamiunten, Magnetic spring device, US Patent No. 9 396 858 B2, Jul. 19, 2016.
95. J. T. Cheung, T. Oaks, H. Xin, S. Oaks, Electrical generator with ferrofluid bearings, US Patent US 6 812 583 B2, issued Nov. 2, 2004.
96. L. Encica, J. J. H. Paulides, E. A. Lomonova, Spring, assembly of springs, assembly of a spring and damper, as well a vehicle comprising a spring, International Patent WO2008/004871 A1, published Jan. 10, 2008.
97. P. J. Patt, F. R. Stolfi, Linear magnetic spring and spring/motor combination, US Patent US 5 017 819, May 21, 1991.
98. J. J. H. Paulides, E. A. Lomonova, A. J. P. Vandenout, Magnetic spring, a spring and damper assembly, and a vehicle including the spring, US Patent No. 8 550 221 B2, Oct. 8, 2013.
99. R. Olaru, C. Petrescu, Arc magnetic cu forță elastică controlabilă, Brevet de inventie OSIM, no. 134250/30.06.2023.
100. R. Olaru, **G. Muraviev**, C. Petrescu, Actuator electromagnetic multifuncțional cu arc magnetic, Cerere Brevet de invenție OSIM nr. A/00329, 25.07.2025.
101. R. Olaru, **G. Muraviev**, C. Petrescu, Arc electromagnetic cu forță elastică controlabilă, Cerere Brevet de invenție OSIM nr. A/00071, 13.02.2026.