

MODELAREA ȘI SIMULAREA COMPORTĂRII UNOR MATERIALE REOLOGICE CU APLICAȚII LA AMORTIZORUL MAGNETOREOLOGIC

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea Politehnica Timișoara
în domeniul INGINERIE MECANICĂ
de către

ing. Alexandru Perescu

Conducător științific:
Referenți științifici:

prof.univ.dr.ing. Liviu Bereteu
prof.univ.dr. Ioan Bica
prof.univ.dr.ing. Tiberiu Vesselenyi
conf.univ.dr.ing. Eugen Ghita

Ziua susținerii tezei: 09.07.2015

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|---|--|
| 1. Automatică | 9. Inginerie Mecanică |
| 2. Chimie | 10. Știința Calculatoarelor |
| 3. Energetică | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 4. Ingineria Chimică | 12. Ingineria sistemelor |
| 5. Inginerie Civilă | 13. Inginerie energetică |
| 6. Inginerie Electrică | 14. Calculatoare și tehnologia informației |
| 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații | 15. Ingineria materialelor |
| 8. Inginerie Industrială | 16. Inginerie și Management |

Universitatea Politehnica Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2015

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității Politehnica Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Cuvânt înainte

Teza de doctorat cu titlul "Modelarea și simularea comportării unor materiale reologice cu aplicații la amortizorul magnetoreologic" a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul Departamentului de Mecanică și Rezistența Materialelor al Universității Politehnica Timișoara și în cadrul IUT Bethune parte din Universitatea Artois (Stagiul ERASMUS – 6 luni, Franța).

Prezentul studiu, realizat în vederea susținerii tezei de doctorat în domeniul ingineriei mecanice, reprezintă rezultatul cercetărilor și preocupărilor mele în domeniul mecanicii experimentale, cu aplicații directe în domeniul industrial, cu orientare în mod special asupra comportării fluidului magnetoreologic atât prin măsurători fizice în laborator, cât și prin simulare. Așadar, lucrarea reprezintă o abordare interdisciplinară legată de o problemă, mereu actuală, privind cunoașterea comportării unui fluid magnetoreologic în diferite aplicații.

Aceasta reprezintă, totodată, încununarea unei activități desfășurate pe parcursul a trei ani și nouă luni în cadrul activității doctorale, finanțată parțial din proiectul strategic POSDRU/159/1.5/S/137070 (2014) al Ministerului Educației Naționale, România, co-finanțat din Fondul Social European – Investește în oameni, în cadrul Programului Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013.

Mulțumiri deosebite se cuvin conducătorului de doctorat prof.dr.ing. Liviu BERETEU pentru opiniile sale critice, pertinente și constructive pe care mi le-a oferit pe întreg parcursul pregătirii mele, pentru îndrumările, sprijinul și sfaturile pe care mi le-a dat, precum și pentru faptul că a acceptat și a condus științific cercetarea doctorală.

De asemenea, doresc să adresez mulțumiri domnului prof.dr. Gheorghe E. Drăgănescu pentru buna colaborare și pentru sugestiile pe care mi le-a oferit pe parcursul acestei perioade, precum și domnului prof.dr.ing. Florin Breabăn pentru susținerea acordată pe parcursul stagiului ERASMUS la IUT Bethune, respectiv domnișoarelor conf.dr.ing. Mihaela Popescu și conf.dr.ing. Georgeta E. Mocuța pentru sprijinul acordat.

Mulțumiri se cuvin tuturor profesorilor care au avut un rol deosebit în formarea mea ca individ, iar apoi ca cercetător, în special celor din departamentul de Mecanică și Rezistența Materialelor precum și celor din departamentul de Mașini Mecanice, Utilaje și Transporturi.

În încheiere, dar nu în ultimul rând, doresc să mulțumesc familiei, prietenilor și colegilor pentru sprijinul și înțelegerea arătate până la finalizarea acestei teze.

Timișoara, Iulie 2015

ing. Alexandru PERESCU

PERESCU, Alexandru

Modelarea și simularea comportării unor materiale reologice cu aplicații la amortizorul magnetoreologic

Teze de doctorat ale UPT, Seria 9, Nr. 164, Editura Politehnica, 2015, 150 pagini, 137 figuri, 24 tabele.

ISSN: 1842-4937

ISBN: 978-606-554-978-4

Cuvinte cheie: comportare reologică, modelare, simulare numerică, fluid magnetoreologic, amortizor magnetoreologic, ecuații constitutive, determinarea parametrilor, prelucrarea semnalelor, pendulul Charpy, modele Bouc-Wen, transformata wavelet.

Rezumat,

Teza de doctorat urmărește modelarea, simularea și identificarea comportării unor corpuri reologice, în principal ale celor care sunt cunoscute sub denumirea de fluide magnetoreologice, precum și validarea acestora. Obiectivul principal al acestei lucrări îl constituie identificarea parametrilor amortizorului cu fluid MR pe baza analizei semnalelor obținute pe cale experimentală folosind transformata wavelet multirezoluție. Pentru prelucrarea semnalelor s-au folosit și alte metode cum sunt: metoda forței de revenire și metoda corelației. Pe parcursul lucrării s-au făcut dezvoltări teoretice (modelări), simulări numerice și măsurători experimentale având ca scop evidențierea comportamentului reologic al modelelor propuse prin curbele de fluaj și de relaxare, precum și prin diagramele tensiune-deformație. Un alt scop a fost identificarea forței introduse de amortizorul MR, a constantei de amortizare și a constantei elastice ale acestuia. S-au folosit trei modele pentru simularea comportamentului amortizorului MR, și anume: modelul Bouc-Wen neliniar, modelul Bouc-Wen liniar și modelul Bouc-Wen cu neliniaritate pătratică. Semnalele de vibrații au fost înregistrate prin intermediul unor accelerometre. După analiza rezultatelor experimentale, s-a constatat că dintre modelele matematice propuse pentru simularea comportamentului amortizorului MR, de tip RD-1005/3, satisfac cerințele comportării reale doar modelul Bouc-Wen liniar și modelul Bouc-Wen cu neliniaritate pătratică.

CUPRINS

LISTA DE FIGURI	7
LISTA DE TABELE	11
LISTA DE NOTAȚII ȘI ABREVIERI.....	12
1. INTRODUCERE.....	14
1.1. Materialele și proprietățile acestora	14
1.2. Aspecte generale asupra structurii tezei	16
1.3. Actualitatea temei	18
1.4. Obiectivele propuse în prezentul studiu.....	18
2. ELEMENTE DE MODELARE REOLOGICĂ A CORPURILOR	19
2.1. Obiectul reologiei și noțiuni fundamentale	19
2.2. Funcția de fluaj și funcția de relaxare.....	22
2.3. Corpul solid	24
2.3.1. Solidul lui Euclid sau corpul rigid.....	24
2.3.2. Solidul perfect elastic	24
2.3.3. Solidul lui Hooke.....	25
2.3.4. Corpuri cu elasticitate întârziată	26
2.4. Corpuri vâscoase.....	27
2.4.1. Lichidul lui Pascal sau lichidul incompresibil.....	27
2.4.2. Lichidul vâscos	27
2.4.3. Lichidul lui Newton.....	28
2.4.4. Lichidul vâscoelastic.....	28
2.5. Corpuri plastice.....	29
2.5.1. Solidul perfect plastic	29
2.5.2. Solidul perfect elastoplastic.....	30
2.5.3. Solidul elastoplastic	30
2.5.4. Corpul vâscoelastoplastic.....	31
2.5.5. Corpul Képès.....	31
2.6. Corpul vâscoelastic.....	31
2.7. Modele mecanice.....	32
2.7.1. Modele mecanice de bază	32
3. SIMULAREA MODELELOR REOLOGICE	36
3.1. Simularea cu ajutorul aplicației Simulink	36
3.2. Comportarea vâscoelastică liniară: Modelul Kelvin-Voigt.....	37
3.3. Comportarea solidelor vâscoelastice: Modelul Maxwell	40
3.4. Comportarea corpului vâscoelastic: Modelul Zener	43
3.5. Comportarea corpului vâscoelastic: Modelul Burgers.....	46
3.6. Modelul Lethersich.....	49
4. MODELAREA ȘI SIMULAREA COMPORTĂRII FLUIDULUI MAGNETOREOLOGIC	52
4.1. Fluidele magnetoreologice	52
4.2. Amortizorul cu fluid magnetoreologic RD-1005-3.....	56
4.3. Elastomeri magnetoreologici.....	59
4.4. Comportarea corpurilor vâscoelastice.....	60

4.4.1. Comportarea modelului Bingham	60
4.4.2. Comportarea modelului reologic Bouc-Wen	63
4.4.3. Comportarea modelului reologic Spencer	66
5. ELEMENTE DE ANALIZĂ ȘI DE IDENTIFICARE A SEMNALELOR	69
5.1. Problemele identificării.....	69
5.2. Semnale periodice și serii Fourier	70
5.3. Transformata Fourier	71
5.4. Transformata wavelet	71
5.4.1. Transformata wavelet continuă.....	72
5.4.2. Transformata wavelet discretă.....	73
5.4.3. Transformata wavelet pentru sisteme neliniare.....	73
5.5. Transformata wavelet multirezoluție	76
5.6. Identificarea parametrilor amortizorului MR cu ajutorul analizei wavelet multirezoluție	78
5.7. Caracteristici ale semnalelor aleatoare	79
5.7.1. Funcții de corelație.....	80
5.7.2. Transformata Fourier a funcțiilor de corelație	82
5.7.3. Prelucrarea numerică a semnalelor	82
6. REZULTATE ȘI PRELUCRĂRI EXPERIMENTALE	85
6.1. Standul experimental - Pendulul Charpy.....	85
6.2. Standul experimental - cu excitație pe cale cinematică	86
6.3. Rezultate obținute	89
6.3.1. Rezultatele obținute pe standul cu pendul Charpy	89
6.3.2. Prelucrarea rezultatelor obținute - Pendulul Charpy.....	92
6.3.3. Rezultatele obținute pe standul cu excitație cinematică.....	94
7. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE.....	99
7.1. Concluzii	99
7.2. Contribuții personale	100
BIBLIOGRAFIE	101
ANEXA 1	108
ANEXA 2	121
ANEXA 3	123
ANEXA 4.....	128

LISTA DE FIGURI

Figura 2.1	Diagrama de fluaj și curba de revenire	23
Figura 2.2	Diagrama deformație-tensiune	23
Figura 2.3	Diagramele caracteristice unui corp nedeformabil	24
Figura 2.4	Diagramele caracteristice unui corp perfect elastic	25
Figura 2.5	Diagramele caracteristice corpului cu elasticitate liniară	25
Figura 2.6	Diagramele caracteristice unor corpuri cu elasticitate întârziată	26
Figura 2.7	Diagramele fundamentale ale lichidului vâscos	27
Figura 2.8	Diagramele fundamentale ale lichidului perfect vâscos	28
Figura 2.9	Diagramele fundamentale ale lichidului vâscoelastic	28
Figura 2.10	Diagramele caracteristice ale solidului perfect plastic	29
Figura 2.11	Diagramele caracteristice solidului perfect elastoplastic	30
Figura 2.12	Diagramele caracteristice solidului elastoplastic	31
Figura 2.13	Resort	32
Figura 2.14	Amortizor Newtonian	33
Figura 2.15	Amortizor Norton	33
Figura 2.16	Patina	33
Figura 2.17	Patina lui Képès	33
Figura 2.18	Regulatorul	34
Figura 2.19	Limitator	34
Figura 2.20	Opritor	34
Figura 2.21	Comportările diferitelor modele mecanice	35
Figura 3.22	Modelul Kelvin-Voigt	37
Figura 3.23	Evoluția modelului Kelvin-Voigt în funcție de timp	38
Figura 3.24	Simularea comportamentului de fluaj al modelului Kelvin-Voigt realizat în Simulink	38
Figura 3.25	Diagrama de fluaj și curba de revenire a modelului Kelvin-Voigt simulată în Simulink	39
Figura 3.26	Simularea comportamentului de relaxare al modelului Kelvin-Voigt realizat în Simulink	39
Figura 3.27	Diagrama de relaxare a tensiunii pentru modelul Kelvin-Voigt simulată în Simulink	40
Figura 3.28	Modelul Maxwell	40
Figura 3.29	Diagramele de fluaj și de relaxare ale modelului Maxwell	41
Figura 3.30	Modelul Maxwell pentru simularea diagramei de fluaj	42
Figura 3.31	Simularea comportamentului de fluaj pentru modelul Maxwell realizată în Simulink	42
Figura 3.32	Modelul Maxwell pentru simularea diagramei de relaxare	43
Figura 3.33	Simularea comportamentului de relaxare pentru modelul Maxwell realizată în Simulink	43
Figura 3.34	Modelul Zener	44
Figura 3.35	Modelul Zener pentru simularea comportamentului de fluaj	45
Figura 3.36	Simularea comportamentului de fluaj al modelului Zener realizată în Simulink	45
Figura 3.37	Modelul Zener pentru simularea comportamentului de relaxare	46
Figura 3.38	Simularea comportamentului de relaxare pentru modelul Zener realizată în Simulink	46
Figura 3.39	Modelul Bürgers	47
Figura 3.40	Modelul Bürgers pentru simularea comportamentului de fluaj	47
Figura 3.41	Simularea comportamentului de fluaj pentru modelul Bürgers	47

	realizată în Simulink	
Figura 3.42	Modelul Bürgers pentru simularea comportamentului de relaxare	48
Figura 3.43	Simularea comportamentului de relaxare pentru modelul Bürgers realizată în Simulink	48
Figura 3.44	Modelul Lethersich	49
Figura 3.45	Modelul Lethersich pentru simularea comportamentului de fluaj	49
Figura 3.46	Simularea comportamentului de fluaj pentru modelul Lethersich realizată în Simulink	50
Figura 3.47	Modelul Lethersich pentru simularea comportamentului de relaxare	50
Figura 3.48	Simularea comportamentului de relaxare pentru modelul Lethersich realizată în Simulink	51
Figura 4.49	Particulele magnetice din fluidul MR	53
Figura 4.50	Particulele aliniate de-a lungul liniilor de flux magnetic	53
Figura 4.51	Fluidul MR după modul de curgere	54
Figura 4.52	Fluidul MR după modul de forfecare	54
Figura 4.53	Fluidul MR în modul de curgere ștrangulat	54
Figura 4.54	Amortizorul MR produs de Lord Corporation RD-1005-3	56
Figura 4.55	Schema de funcționare a amortizorului MR	57
Figura 4.56	Principiul de funcționare al amortizorului MR	58
Figura 4.57	Structura internă a amortizorului MR	59
Figura 4.58	Modelul Bingham-body	60
Figura 4.59	Diagrama tensiune-viteză de deformare a modelului Bingham-body	60
Figura 4.60	Structura reologică a modelului Bingham	60
Figura 4.61	Răspunsul modelului Bingham	61
Figura 4.62	Modelul Bingam realizat în Simulink	62
Figura 4.63	Semnalul modelului Bingham reprezentat pe osciloscop	62
Figura 4.64	Structura reologică a modelului Bouc-Wen	64
Figura 4.65	Modelul Bouc-Wen realizat în Simulink	65
Figura 4.66	Semnalul modelului Bouc-Wen plotat în Origin	65
Figura 4.67	Structura reologică a modelului Spencer	66
Figura 4.68	Modelul Spencer realizat în Simulink	67
Figura 4.69	Semnalul modelului Spencer plotat în Origin	67
Figura 5.70	Schematizarea unui sistem cu o perturbație și un răspuns	69
Figura 5.71	Transformata wavelet a unui semnal	72
Figura 5.72	Semnal sinusoidal $x(t)$ cu zgomot, măsurat	80
Figura 5.73	Funcția de autocorelație a semnalului $x(t)$	81
Figura 6.74	Schema standului experimental cu pendul Charpy	85
Figura 6.75	Standul experimental cu pendul Charpy	86
Figura 6.76	Schema standului experimental de măsurare pentru vibrații amortizate cu amortizorul MR	87
Figura 6.77	Standul experimental pentru amortizorul cu lichid MR	88
Figura 6.78	Deplasarea în funcție de timp, $u=0.6V$	90
Figura 6.79	Forța reprezentată în funcție de timp, $u=0.6V$	90
Figura 6.80	Tendența comportamentului $x(t)$ și $F(t)$ în funcție de tensiunea de alimentare	91
Figura 6.81	Diagrama tensiune-deformație pentru tensiunea de alimentare a bobinei amortizorului, $u=0.6V$	92

Figura 6.82	Vibrația obținută la $u=4V$	95
Figura 6.83	Semnalul rezultat după aplicarea funcției de corelație pentru înlăturarea zgomotului	95
Figura 6.84	Puterea spectrală a semnalului	96
Figura 6.85	Radicalul puterii spectrale a semnalului	96
Figura 6.86	Accelerația medie a semnalelor	97
Figura 6.87	Semnalul măsurat la tensiunea de alimentare $u=6V$ și frecvența de 90Hz	98
Figura A.88	Reprezentarea deplasării și forței în funcție de timp, $u=0V$	123
Figura A.89	Reprezentarea deplasării și forței în funcție de timp, $u=0.2V$	123
Figura A.90	Reprezentarea deplasării și forței în funcție de timp, $u=0.4V$	124
Figura A.91	Reprezentarea deplasării și forței în funcție de timp, $u=0.8V$	124
Figura A.92	Reprezentarea deplasării și forței în funcție de timp, $u=1V$	125
Figura A.93	Reprezentarea deplasării și forței în funcție de timp, $u=1.2V$	125
Figura A.94	Reprezentarea deplasării și forței în funcție de timp, $u=1.4V$	126
Figura A.95	Reprezentarea deplasării și forței în funcție de timp, $u=1.6V$	126
Figura A.96	Reprezentarea deplasării și forței în funcție de timp, $u=1.8V$	127
Figura A.97	Reprezentarea deplasării și forței în funcție de timp, $u=2V$	127
Figura A.98	Accelerația obținută la $u=0V$	128
Figura A.99	Puterea spectrală a semnalului	128
Figura A.100	Semnalul rezultat după aplicarea funcției de corelație pentru înlăturarea zgomotului	129
Figura A.101	Radicalul puterii spectrale a semnalului	129
Figura A.102	Vibrația obținută la $u=1V$	130
Figura A.103	Puterea spectrală a semnalului	130
Figura A.104	Semnalul rezultat după aplicarea funcției de corelație pentru înlăturarea zgomotului	131
Figura A.105	Radicalul puterii spectrale a semnalului	131
Figura A.106	Vibrația obținută la $u=2V$	132
Figura A.107	Puterea spectrală a semnalului	132
Figura A.108	Semnalul rezultat după aplicarea funcției de corelație pentru înlăturarea zgomotului	133
Figura A.109	Radicalul puterii spectrale a semnalului	133
Figura A.110	Vibrația obținută la $u=3V$	134
Figura A.111	Puterea spectrală a semnalului	134
Figura A.112	Semnalul rezultat după aplicarea funcției de corelație pentru înlăturarea zgomotului	135
Figura A.113	Radicalul puterii spectrale a semnalului	135
Figura A.114	Vibrația obținută la $u=5V$	136
Figura A.115	Puterea spectrală a semnalului	136
Figura A.116	Semnalul rezultat după aplicarea funcției de corelație pentru înlăturarea zgomotului	137
Figura A.117	Radicalul puterii spectrale a semnalului	137
Figura A.118	Vibrația obținută la $u=6V$	138
Figura A.119	Puterea spectrală a semnalului	138
Figura A.120	Semnalul rezultat după aplicarea funcției de corelație pentru înlăturarea zgomotului	139
Figura A.121	Radicalul puterii spectrale a semnalului	139
Figura A.122	Vibrația obținută la $u=7V$	140
Figura A.123	Puterea spectrală a semnalului	140
Figura A.124	Semnalul rezultat după aplicarea funcției de corelație pentru	141

	înlăturarea zgomotului	
Figura A.125	Radicalul puterii spectrale a semnalului	141
Figura A.126	Vibrația obținută la $u=8V$	142
Figura A.127	Puterea spectrală a semnalului	142
Figura A.128	Semnalul rezultat după aplicarea funcției de corelație pentru înlăturarea zgomotului	143
Figura A.129	Radicalul puterii spectrale a semnalului	143
Figura A.130	Vibrația obținută la $u=9V$	144
Figura A.131	Puterea spectrală a semnalului	144
Figura A.132	Semnalul rezultat după aplicarea funcției de corelație pentru înlăturarea zgomotului	145
Figura A.133	Radicalul puterii spectrale a semnalului	145
Figura A.134	Vibrația obținută la $u=10V$	146
Figura A.135	Puterea spectrală a semnalului	146
Figura A.136	Semnalul rezultat după aplicarea funcției de corelație pentru înlăturarea zgomotului	147
Figura A.137	Radicalul puterii spectrale a semnalului	147

LISTA DE TABELE

Tabelul 2.1	Clasificarea comportării corpurilor continue	20
Tabelul 2.2	Lucrări importante din domeniul reologiei	21
Tabelul 4.3	Caracteristicile amortizorului de tip RD-1005-3 cu fluid MR	57
Tabelul 4.4	Clasificarea modelelor amortizoarelor MR	58
Tabelul 6.5	Caracteristicile sistemelor de achiziție a semnalelor	87
Tabelul 6.6	Tensiunile de comandă ale amortizorului MR	89
Tabelul 6.7	Valorile maxime măsurate ale deplasării și ale forței de revenire	91
Tabelul 6.8	Parametrii identificați pentru modelul Bouc-Wen neliniar	93
Tabelul 6.9	Parametrii identificați pentru modelul Bouc-Wen liniar	93
Tabelul 6.10	Parametrii identificați pentru modelul Bouc-Wen cu neliniaritate pătratică	94
Tabelul 6.11	Valoarea accelerațiilor medii în funcție de tensiunea de alimentare	97
Tabelul A.12	Valorile numerice simulate pentru modelul reologic Kelvin-Voigt – FLUAJ	108
Tabelul A.13	Valorile numerice simulate pentru modelul reologic Kelvin-Voigt – RELAXARE	109
Tabelul A.14	Valorile numerice simulate pentru modelul reologic Maxwell – FLUAJ	110
Tabelul A.15	Valorile numerice simulate pentru modelul reologic Maxwell – RELAXARE	111
Tabelul A.16	Valorile numerice simulate pentru modelul reologic Zener – FLUAJ	112
Tabelul A.17	Valorile numerice simulate pentru modelul reologic Zener – RELAXARE	113
Tabelul A.18	Valorile numerice simulate pentru modelul reologic Bürgers – FLUAJ	114
Tabelul A.19	Valorile numerice simulate pentru modelul reologic Bürgers – RELAXARE	115
Tabelul A.20	Valorile numerice simulate pentru modelul reologic Lethersich – FLUAJ	116
Tabelul A.21	Valorile numerice simulate pentru modelul reologic Lethersich – RELAXARE	117
Tabelul A.22	Valorile numerice simulate pentru modelul reologic Bingham	118
Tabelul A.23	Valorile numerice simulate pentru modelul reologic Bouc-Wen	119
Tabelul A.24	Valorile numerice simulate pentru modelul reologic Spencer	120

LISTA DE NOTAȚII ȘI ABREVIERI

c	-	căldură specifică [J/kgc];
σ	-	tensiunea de întindere sau tensiunea normală [N/m ²];
σ_0	-	valoarea tensiunii aplicate instantaneu, la momentul inițial [N/m ²];
σ_c	-	valoarea tensiunii critice [N/m ²];
σ_t	-	valoarea tensiunii totale [N/m ²];
ε	-	deformația/alungirea specifică [mm];
$\dot{\varepsilon}$	-	viteză de deformare;
$\ddot{\varepsilon}$	-	acclerația de deformare;
ε_0	-	deformație instantanee la momentul inițial [mm];
ε_p	-	deformație permanentă [mm];
ε_l	-	deformație limitată [mm];
t	-	timpul [s];
$f(\sigma_0, t)$	-	funcția de fluaj sau de complianță;
$r(\varepsilon_0, t)$	-	funcție de relaxare sau modulul relaxat;
E	-	modulul de elasticitate longitudinal (Young) [N/m ²];
τ	-	tensiunea tangențială sau de forfecare [N/m ²];
G	-	modulul de elasticitate transversal/de forfecare (Couloumb) [N/m ²];
γ	-	deformația unghiulară sau de forfecare [rad];
η	-	vâscozitatea aparentă [N/m ² s];
p	-	presiunea [N/m ²];
ΔV	-	variația volumului [m ³];
V	-	volumul [m ³];
B	-	modulul global (Bulk) [N/m ²];
H	-	intensitatea câmpului magnetic [A/m];
f_c	-	forța de frecare uscată [N];
$Q(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$	-	forța de revenire [N];
ξ	-	variabilă evolutivă, deplasare [mm];
φ	-	deplasare [mm];
β, γ, α	-	parametrii care reprezintă controlul liniarității;
$x(t)$	-	semnal;
$y(y)$	-	semnal;
T	-	perioada [s];
ν	-	frecvență [Hz];
ω	-	pulsația sau frecvența circulară [1/s];
C_n, D_n	-	constante;
A_n, B_n	-	amplitudinea semnalului;
ϕ_n, ψ_n	-	defazajul armonicii;
L_2	-	spațiul funcțiilor (complexe) reale;
$H_2(\mathbb{R})$	-	spațiul Hilbert;
$T(a, b)$	-	transformata semnalului continuu $x(t)$;
$w(a)$	-	funcție de scalare;
ψ^*	-	complex conjugata funcției wavelet;
$\Phi(f)$	-	transformata Fourier;
$W(\tau, \nu)$	-	transformata wavelet;
$\text{erf}(z)$	-	funcție de eroare;
H_m	-	funcția Hermite de ordinul m ;
T_e	-	proces de eșantionare;

Φ	-	funcție de scalare;
F_e	-	forță elastică neliniară [N];
I	-	intensitatea curentului de magnetizare [A];
$C_{xx}(\tau)$	-	funcție de autocorelație;
$C_{yy}(\tau)$	-	funcție de autocorelație;
$S(u)$	-	densitatea spectrală de putere;
FFT	-	fast Fourier transform (transformata rapidă Fourier)
IFFT	-	inversa transformatei rapide Fourier;
MR	-	magnetoreologic;
ER	-	electroreologic;
MRF	-	fluid magnetoreologic (magnetorheological fluid);
ERF	-	elastomer magnetoreologic (magnetorheological elastomer).

1. INTRODUCERE

1.1. Materialele și proprietățile acestora

Termenul material a intrat întotdeauna în lexicul limbii într-un fel sau altul, trecând prin "epoca de piatră", "epoca bronzului", "epoca de fier" și acum prin "era informației" [1].

Milioanele de ani de evoluție au transformat lumea biologică într-un laborator extrem de eficient pentru dezvoltarea materialelor. Această perspectivă analizează modul în care substanțele găsite în mediul natural sunt imitate cu inspirație și ar putea acorda oamenilor, în cele din urmă, puteri supraomenești [2].

Pentru a satisface cerințele industriale de aplicații de înaltă tehnologie precum și cele personale, în industrie, în construcții, în agricultură, în transporturi etc. sunt utilizate o varietate de tipuri de materiale. Dezvoltările rapide din domeniul teoriei cuantice ale solidelor au deschis vaste oportunități pentru o mai bună înțelegere și utilizare a diverselor materiale.

Factorii care stau la baza diferitelor sisteme de clasificare a materialelor în știința materialelor și inginerie sunt:

- Compoziția chimică a materialului;
- Modul de apariție a materialului în natură;
- Rafinarea și procesul de fabricație, la care materialul este supus în prealabil ca acesta să obțină proprietățile dorite;
- Structura atomică și cristalină a materialului;
- Utilizarea industrială și tehnică a materialului [3], [4].

Materialele ingineresti comune care intră în domeniul de aplicare al științei materialelor și al ingineriei sunt următoarele:

- **Metale:** Materialele metalice sunt de obicei corpuri cristaline. La nivel de monocristal ele prezintă anizotropie (valorile măsurilor proprietăților sunt diferite în funcție de direcția de măsurare) dar, în mod obișnuit, aceste materiale fiind policristaline, caracterul proprietăților lor este cvasi-izotrop [5].
- **Ceramice:** Materialele ceramice sunt solide anorganice nemetalice cuprinzând oxizi, boruri, halogenuri, carburi cu utilitate tehnică. Acestea pot fi cristaline sau amorfe, pot prezenta legături chimice de tip metalic, dar și ionic sau covalent [6].
- **Polimeri organici:** un ansamblu de atomi legați covalent, într-o succesiune de molecule de bază, monomeri, în număr suficient de mare, astfel încât adăugarea sau scoaterea unui număr mic de unități de bază, să nu modifice proprietățile fizico-chimice ale ei [7].
- **Compozite:** Materialele compozite reprezintă ansambluri din cel puțin două materiale cu proprietăți diferite și care trebuie să asigure stabilirea unor

legături de interfață și uneori chiar cristalografice. Acest material are proprietăți unice [6], [8].

- **Semi-conductoare:** Materialele semi-conductoare stau la baza realizării dispozitivelor electronice și a circuitelor integrate. Acestea se caracterizează prin valori ale conductivității electrice cuprinsă în intervalul de valori $\sigma=(10^{-6}-10^5)\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ [9].
- **Biomateriale:** materiale sintetice folosite pentru a înlocui o parte a unui sistem viu sau pentru a funcționa în strânsă legătură cu un țesut viu. Acestea nu sunt materiale biologice, ci biocompatibile, de exemplu biopolimerii, metalele, polimerii, ceramicele, compozitele etc. [10], [11].
- **Materiale avansate:** Materialele inteligente sunt materiale de generație recentă care depășesc structural și funcțional materialele convenționale. Aceste materiale dețin capacități de adaptare la stimuli externi cu inteligență inerentă. Materialele inteligente pot fi atât active, cât și pasive [12], [13].
- **Materialele inteligente** includ aliaje cu memoria formei, materiale piezoelectrice, materiale magnetostrictive, materiale magnetoreologice și electroreologice, materiale cromice, care își schimbă culoarea în reacție cu diverși stimuli [4].

Dacă s-a crezut că știința materialelor se ocupă cu "bucăți" de metale fără viață, această afirmație trebuie regândită. Datorită dezvoltării rapide a materialelor smart (inteligente) din ultimele două decenii, această disciplină a fost la propriu, cu adevărat în mișcare [14].

Din categoria materialelor inteligente fac parte și materialele care constituie obiectul tezei, și anume **fluidele magnetoreologice**. Acestea având capacitatea de a-și schimba proprietățile de curgere (vâscozitatea) atunci când se află sub influența unui câmp magnetic.

O altă clasificare se poate realiza după proprietățile materialelor. Fiecare material are proprietăți diferite pentru a răspunde diferitelor cerințe în scop ingineresc. Aceste proprietăți sunt cele care dictează selectarea unui tip de material:

- **Proprietăți mecanice**

Cele mai importante proprietăți mecanice care determină alegerea unui material sunt:

- **Rezistența la rupere**, permite materialului să reziste atunci când este aplicată o forță de tracțiune. Pentru a rezista acestei forțe, structura internă a materialului asigură rezistența internă;
- **Duritatea**, reprezintă gradul de rezistență la indentare sau zgâriere, abraziune și uzură. Tehnicile de aliere și tratamentul termic ajută de asemenea la creșterea durității;
- **Ductilitatea**, este proprietatea unui metal datorită căreia acesta poate fi tras în fire sau alungit înainte să aibă loc rupura. Aceasta depinde de dimensiunea grăunțelor cristalelor metalului;
- **Rezistența la impact**, reprezintă energia necesară aplicată pe unitatea de suprafață a secțiunii transversale pentru a fractura un eșantion;
- **Rezistența la uzură**, este capacitatea unui material de a rezista la uzură prin frecare în condiții speciale;

- **Rezistența la coroziune**, apare la metalele și aliajele care pot rezista la acțiunea corozivă a unui mediu;
- **Densitatea**, reprezintă un factor important al unui material la care greutatea, și astfel masa este critică.
- **Proprietăți termice**
Caracteristicile unui material care sunt funcții de temperatură, sunt denumite proprietățile sale termice. Câteva din aceste caracteristici sunt:
 - **Căldura specifică (c)**, reprezintă capacitatea de căldură a unei unități de masă a unei substanțe omogene;
 - **Conductivitatea termică (K)**, reprezintă cantitatea de căldură realizată în unitatea de timp prin intermediul unei unități de suprafață perpendiculară pe direcția de conducție termică atunci când gradientul de temperatură peste elementul conducător de căldură este o unitate;
 - **Dilatarea termică**, toate solidele se extind la încălzire și se contractă la răcire.
Alte proprietăți termice sunt: **rezistența termică, difuzia termică, oboseala termică.**
- **Proprietăți electrice**
Câteva proprietăți electrice ale unui material sunt: **conductivitatea, rezistivitatea, rezistența dielectrică** etc.
- **Proprietăți magnetice**
Materialele în care poate fi indusă o stare de magnetism sunt numite materiale magnetice.
- **Proprietăți chimice**
Aceste proprietăți includ **greutatea atomică, greutatea moleculară, numărul atomic, valența, compoziția chimică, aciditatea, alcalinitatea** etc.
- **Proprietăți optice**
Proprietățile optice ale materialelor sunt **indicele de refracție, reflexie și coeficientul de absorbție** [3].

1.2. Aspecte generale asupra structurii tezei

Teza este structurată în șapte capitole, bibliografie și anexe, care cuprind abordări teoretice, numerice și experimentale pentru fundamentarea unor metode de simulare și analiză ale semnalelor, precum și de identificare a parametrilor unor modele pe baza analizei semnalelor de vibrații. Lucrarea cuprinde o sinteză bibliografică amănunțită, de actualitate, privind proprietățile materialelor existente și al celor în curs de dezvoltare, stadiul actual al cercetării în domeniul fluidelor magnetoreologice, elementele de modelare reologică a corpurilor și clasificarea acestora, definirea și caracterizarea fluidului magnetoreologic și analiza și identificarea elementelor semnalelor.

În **Capitolul 1** se prezintă o parte introductivă cu privire la materiale, în care se dă o clasificare a materialelor și a proprietăților acestora, făcându-se referire la materialele magnetoreologice, astfel evidențiindu-se și actualitatea temei abordate. În acest capitol sunt enunțate și obiectivele propuse în acest studiu.

În **Capitolul 2** sunt definite reologia, funcțiile de fluaj și de relaxare a solicitării, curba de revenire, curba deformație-tensiune și sunt prezentate tipurile de corpuri analizate și în teoria elasticității. În esență sunt prezentate elemente generale de modelare reologică a corpurilor.

Capitolul 3 vine în completarea capitolului anterior și pune accent pe simularea numerică a comportamentului reologic (funcțiile de fluaj și de relaxare ale solicitării) a câtorva modele reologice fundamentale ale unor corpuri vâscoelastice și anume: modelul Kelvin-Voigt, modelul Maxwell, modelul Zener, modelul Burgers și modelul Lethersich.

În **Capitolul 4** sunt prezentate proprietățile și comportamentul fluidului magnetoreologic, este descris amortizorul (principiul de funcționare și date tehnice) de tip RD-1005-3 cu fluid MR care este folosit la măsurătorile experimentale, precum și simularea numerică a comportamentului acestuia pentru unele modele reologice caracteristice acestui fluid și anume: modelul Bingham, modelul Bouc-Wen și modelul Spencer. Pe lângă acestea, în acest capitol se face și o trecere în revistă a elastomerilor magnetoreologici.

În **Capitolul 5** sunt redată elemente fundamentale din teoria semnalelor și metode pentru analiza semnalelor rezultate prin simulare numerică, dar și pentru cele obținute pe cale experimentală. Din teoria semnalelor au fost abordate elemente legate de semnalele periodice, de seriile Fourier, de transformatele Fourier și wavelet (continuă și discretă), de transformatele wavelet multirezoluție, de identificare a parametrilor semnalelor analizate și de funcții de corelație.

Capitolul 6 este dedicat diseminării rezultatelor obținute în cadrul cercetării doctorale și sunt prezentate atât cele două standuri experimentale: cu pendul de tip Charpy și cu excitație pe cale cinematică pe care s-au efectuat măsurătorile, rezultatele experimentale obținute în urma măsurătorilor, cât și metoda de identificare a parametrilor din semnalele obținute pe standul experimental cu pendul Charpy.

Capitolul 7 încheie această lucrare prin concluzii rezultate în urma studiului efectuat, printr-o enumerare succintă a contribuțiilor personale aduse în cadrul cercetării și prin dezvoltări ulterioare ale temei abordate.

Această lucrare a fost finanțată parțial din proiectul strategic POSDRU/159/1.5/S/137070 (2014) al Ministerului Educației Naționale, România, cofinanțat din Fondul Social European – Investește în oameni, în cadrul Programului Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013.

1.3. Actualitatea temei

De-a lungul deceniilor trecute, **fluidul magnetoreologic (MR)**, prin avantajele sale unice, a atras semnificativ atenția atât în cercetare cât și în domeniul aplicațiilor. În ultimul timp, analiza simulării, precum și investigația performanțelor fluidelor MR au atras, de asemenea, o atenție semnificativă cercetătorilor [15]. Cercetările recente privind interacțiunea om-robot au primit o atenție considerabilă. Un interes deosebit îl are tema siguranței în cadrul mediilor interactive [16].

Fluidele MR sunt materiale inteligente (smart), deci fac parte dintr-o categorie nouă de materiale care sunt încă în curs de dezvoltare. **Fluidele MR** sunt materiale active, compuse din microparticule feromagnetice ușoare (1-10 μ m), dispersate într-un lichid de transport. Sub acțiunea unui câmp magnetic exterior, particulele formează structuri de tip lanț sau se orientează paralel cu liniile câmpului

magnetic. Aceste materiale sunt complet reversibile. Astfel, materialele MR au capacitatea unei vâscozități aparente variabilă pe o plajă largă, vâscozitate ce poate fi modificată într-o fracțiune de milisecundă [15], [17], [18], [19], [20], [21], [22].

Datorită controlabilității ridicate, a timpului de răspuns rapid, a cerințelor reduse de energie, **fluidele MR** au un potențial uriaș în multiple aplicații care necesită interfețe controlabile electromagnetic, cum ar fi: *ambreiajele* [16], [23], [24], *frânele* [22], [25], *amortizoarele pentru controlul vibrațiilor* [26], [27], [28], [29], *robotica* [30], *dispozitivele haptice* [31] și *materialele abrazive* [32], [33].

1.4. Obiectivele propuse în prezentul studiu

În cadrul acestei lucrări se prezintă, în prima parte, elemente de modelare și de simulare a comportării reologice a corpurilor, dar și a fluidului magnetoreologic. După acestea s-a trecut la testarea la vibrații a amortizorului MR de tip RD-1005-3 și s-au aplicat elemente de analiză și de identificare a parametrilor semnalelor obținute în urma acestor încercări.

Pentru finalizarea cercetării științifice inginerești s-au urmărit următoarele etape:

- Realizarea unei investigații numerice asupra comportării unor corpuri, prin **simularea numerică a modelelor reologice** și determinarea unor soluții numerice;
- Realizarea unor **investigații experimentale** bazate pe înregistrarea și prelucrarea semnalelor de vibrații obținute pe două standuri experimentale.

Realizarea cercetării științifice este validă și este ancorată în următoarele obiective specifice acestui studiu:

- **Cercetarea bibliografică** actuală și riguroasă cu privire la:
 - o Proprietățile materialelor existente și a celor în curs de dezvoltare;
 - o Elementele de modelare reologică a corpurilor și clasificarea lor;
 - o Stadiul actual al cercetării în domeniul fluidelor MR;
 - o Analiza și identificarea elementelor semnalelor achiziționate.
- **Simularea** comportamentului unor modele reologice cu aplicația Simulink;
- **Validarea rezultatelor** obținute prin simulare cu teoria clasică;
- Adaptarea unui stand experimental și realizarea unuia nou pentru efectuarea măsurătorilor de vibrații pentru amortizorul MR de tip RD-1005-3;
- **Realizarea de teste**, pe cele două standuri experimentale a amortizorului MR de tip RD-1005-3;
- **Identificarea parametrilor amortizorului și a modelelor metematice**, care îl descriu, pe baza prelucrării semnalelor de vibrații obținute prin măsurători experimentale;
- Prezentarea contribuțiilor personale și a impactului pe care acest studiu îl poate avea asupra unor aplicații din industrie.

2. ELEMENTE DE MODELARE REOLOGICĂ A CORPURILOR

2.1. Obiectul reologiei și noțiuni fundamentale

Termenul reologie a rezultat din îmbinarea cuvintelor din limba greacă veche: *rheo* (curgere) și *logos* (știință) și reprezintă știința curgerii, o ramură a fizicii care se ocupă de curgerea și deformarea materialelor.

Dezvoltarea în timp a reologiei a contribuit la conturarea și sistematizarea altor discipline precum mecanica fluidelor și teoria elasticității, fiind în strânsă legătură cu acestea.

Reologia oferă științelor teoretice adiacente modele și preia de la acestea rezultatele cercetărilor pe care le utilizează pentru conceperea unor tehnici experimentale cu ajutorul cărora se măsoară coeficienții de material care afectează modelele. Rezultatele experimentale servesc în același timp și la verificarea modelelor sau la deducerea acestora.

Comportarea reologică a materialelor este descrisă cantitativ de relații care leagă tensiunile atât de deformațiile specifice cât și de derivatele lor în raport cu timpul. Asemenea relații sunt numite ecuații *reologice de stare*. Cele mai simple ecuații reologice au un caracter liniar, iar la baza descrierii acestora stau următoarele ipoteze:

- **Ipoteza micilor deformații**, care presupune faptul că deformațiile sunt mici, astfel încât să existe o proporționalitate între solicitări și deformații;
- **Ipoteza lui Boltzman**, care stipulează faptul că dacă asupra unui corp se aplică o succesiune de solicitări, la momente diferite, fiecare contribuie la deformația totală ca și cum ar acționa singură [34].

Dacă se consideră un corp deformabil, asupra căruia nu a acționat de mult timp o încărcare, astfel că dimensiunile sale, în momentul considerat, nu mai variază și i se aplică forțe exterioare pe suprafața lui sau în fiecare din punctele sale, se spune că acest corp este solicitat. Starea de solicitare reprezintă ansamblul tensiunilor unitare care se exercită în jurul unui punct și este reprezentată de tensorul tensiunilor.

Atunci când dimensiunile unui corp solicitat se schimbă, acesta se numește corp deformabil, în caz contrar acesta se numește corp rigid. Starea de deformație reprezintă ansamblul alungirilor și alunecărilor din jurul unui punct.

Abordarea teoretică a problemelor de comportare reologică a materialelor reale se face pe baza corpurilor cu proprietăți unitare (solidul liniar-elastic al lui Hooke, lichidul lui Newton, plasticul lui Saint Venant), a căror comportare este descrisă cu ajutorul unor relații liniare.

În realitate, corpurile din natură prezintă proprietăți ce sunt descrise de relații neliniare, în general dependente de timp:

$$f(\sigma, \varepsilon, t, \dot{\sigma}, \dot{\varepsilon}) = 0 \quad (2.1)$$

unde σ reprezintă tensiunea, ε este deformația și t , timpul. În unele situații, relația de mai sus, poate fi completată și cu temperatura.

Din aceste motive, o definiție a reologiei, foarte des utilizată în inginerie, este: **știința care studiază comportarea materialelor folosind "ecuații constitutive" între tensiuni și deformații.**

Cea mai simplă experiență pentru punerea în evidență a proprietăților unui corp este încercarea la tracțiune a unei epruvete. Dacă se aplică o tensiune σ crescătoare, după o anumită lege și se măsoară deformațiile specifice ϵ rezultate, se va putea trasa o curbă de variație tensiune-deformație cu tensiunea impusă, numită *diagramă de încărcare*. În mod asemănător se obține *diagrama de descărcare*, dacă tensiunea scade după o anumită lege. Dacă ϵ variază (crescător sau descrescător) cu timpul după o anumită lege, atunci se obține *diagrama tensiune-deformație*, cu deformație impusă [35]. Dacă diagrama de încărcare și descărcare este o dreaptă unică, atunci corpul se numește corp perfect elastic sau corp elastic liniar. În cazul în care diagrama de încărcare nu se suprapune peste diagrama de descărcare, corpul are o comportare histeretică.

O clasificare mai generală a comportării corpurilor poate fi făcută prin analiza următoarelor trei condiții și a combinațiilor posibile ale acestora:

- Dacă răspunsul în deformație pentru fiecare tensiune aplicată dă o valoare unică de echilibru sau nu, și invers, dacă fiecărei deformații îi corespunde o valoare unică a tensiunii;
- Dacă răspunsul de echilibru se stabilește instantaneu sau este variabil în timp;
- Dacă răspunsul este liniar sau neliniar.

În urma efectuării combinațiilor posibile, a celor trei condiții enunțate mai sus, se pot defini următoarele tipuri de corpuri continue, prezentate în Tabelul 2.1.

Tabelul 2.1 – Clasificarea comportării corpurilor continue

Denumirea corpului	Valoarea unică de echilibru	Echilibru instantaneu	Răspuns liniar
Corp perfect elastic liniar	DA	DA	DA
Corp perfect elastic neliniar	DA	DA	NU
Corp perfect plastic	NU	DA	NU
Corp vâscoplastic	DA	NU	DA
Corp liniar vâscoelastic	NU	NU	DA

Prin urmare, un corp elastic va îndeplini următoarele trei condiții:

- Pentru fiecare stare de tensiune va corespunde o valoare unică de deformație și invers;
- Răspunsul de echilibru este atins instantaneu sau într-un interval de timp;
- Dependența tensiune-deformație este liniară.

În Tabelul 2.2 sunt prezentate lucrările semnificative din domeniul reologiei din perioada anterioară creării oficiale a disciplinei de reologie în anul 1929 [36].

Tabelul 2.2 – Lucrări importante din domeniul reologiei

Clasa fluidelor/modelelor		Anul	Lucrări reprezentative
Materiale ideale	Corpul perfect rigid	Antichitate	Archimede (~250 î.Hr), Newton (1687)
	Solidul elastic ideal	Anii 1600	Boyle (1660), Hooke (1678), Young (1807), Cauchy (1827)
	Fluide nevâscoase	Anii 1700	Pascal (1663), Bernoulli (1738), Euler (1755)
	Lichide Newtoniene	Începutul anilor 1800	Newton (1687), Navier (1823), Stokes (1845), Hagen (1841), Weidemann (1856)
Vâscoelasticitatea liniară		Mijlocul anilor 1800	Weber (1835), Kohlrausch (1863), Maxwell (1867), Boltzmann (1878), Wiechert (1893), Poynting și Thomson (1902)
Lichide Newtoniene generalizate (vâscoase)		Sfârșitul anilor 1800 începutul anilor 1900	Schwedoff (1890), Trouton și Andrews (1904), Hatchek (1913), Bingham (1922), Ostwald (1925), de Waele (1923), Herschel și Bulkley (1926)
Vâscoelasticitate neliniară		Începutul anilor 1900	Zaremba (1903), Jaumann (1905), Poynting (1913), Hencky (1929)
Descrierea materialelor esențiale	Suspensiile	Începutul anilor 1900	Einstein (1906), Jeffrey (1922)
	Polimerii		Schonbein (1847), Baekeland (1909), Staudinger (1920), Carothers (1929)
	Vâscozitate extinsă		Barus (1893), Trouton (1906), Fano (1908), Tamman și Jenckel (1930)
Geneza reologiei		1929	Bingham, Reiner și alții

O altă experiență prin care se pot fundamenta fenomenele reologice și introduce definițiile termenilor utilizați în cadrul reologiei, se aseamănă cu exemplul precedent, numai că de data aceasta se presupune că asupra epruvetei se aplică instantaneu, la momentul $t=0$, o tensiune σ_0 , care se menține constantă un timp t_1 , după care starea de tensiune este eliminată, tot instantaneu. Epruveta ajunge la o anumită deformație la momentul t_1 , respectiv la o altă deformație după acel moment. În funcție de starea finală a deformației se pot defini următoarele tipuri de comportare mecanică a corpurilor:

- **Corp perfect elastic**, dacă legătura dintre tensiune și deformație este o funcție biunivocă, iar deformația este complet recuperabilă și instantaneu. Dacă funcția nu este liniară, corpul are o elasticitate neliniară, respectiv o elasticitate liniară, în caz contrar. În acest caz se numește corpul lui Hooke;
- **Corp vâscoelastic**, dacă recuperarea deformației se face complet, dar într-un anumit interval de timp;
- **Corp vâscoelastoplastic**, dacă recuperarea deformației se face parțial, după un anumit interval de timp;

- **Corp elastoplastic**, dacă recuperarea deformației se face parțial, dar instantaneu (recuperarea nu este funcție de timp);
- **Corp plastic**, dacă în urma înlăturării stării de tensiune, starea de deformație atinsă rămâne permanentă.

2.2. Funcția de fluaj și funcția de relaxare

Pentru descrierea și definirea proprietăților unui material din punct de vedere cantitativ cu ajutorul ecuațiilor reologice, se prezintă o descriere calitativă a comportării reologice în timp a unui material.

Termenii *fluaj* și *relaxare* se utilizează atât pentru definirea fenomenelor în sine, cât și pentru definirea experimentelor pe baza cărora se pot pune în evidență aceste fenomene.

O experiență de **fluaj** constă în menținerea sub sarcină constantă σ_0 a unui corp, un timp îndelungat, urmărindu-se variația deformației corpului în funcție de timp. Dacă se constată că deformația corpului solicitat este în funcție de timp, atunci se spune că a apărut un fenomen de fluaj. Dacă, din contră, în aceleași condiții, deformația este independentă de timp, atunci fenomenul de fluaj nu apare. Prin urmare, analizând Tabelul 2.1 se poate concluziona că numai corpurile vâscoelastice liniare și corpurile vâscoelastoplastice vor prezenta curbe caracteristice de fluaj și de relaxare.

Funcția definită prin raportul dintre valoarea deformației specifice ε , la un moment dat și valoarea tensiunii σ aplicate instantaneu, la momentul inițial și la o valoare constantă σ_0 , se numește funcție de fluaj sau de complianță și este dată de relația [33], [34], [36]:

$$f(\sigma_0, t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} \quad (2.2)$$

Prin urmare, se constată că la început apare o deformație instantanee ε_0 , după care deformația crește hiperbolic (Figura 2.1). Dacă hiperbola are o asimptotă înclinată, adică deformația crește continuu, se spune că acest corp are o comportare de lichid vâscos. Dacă hiperbola are o asimptotă orizontală, înseamnă că deformația se stabilizează în timp, iar corpul are o comportare de corp solid.

Partea a doua a diagramei din Figura 2.1, se obține dacă la un moment dat se întrerupe brusc tensiunea aplicată, deci se face o descărcare a probei, iar diagrama se numește **curbă de revenire**. Revenirea se face până la o anumită valoare a deformației permanente ε_p . În cazul în care deformația permanentă are valoarea zero, se spune că acest corp are o comportare perfect vâsco-elastică. Dacă întreruperea aplicării tensiunii se face la diferite momente de timp se obțin valori diferite pentru deformațiile permanente, pentru aceeași tensiune aplicată σ_0 . Reprezentarea grafică a deformațiilor permanente, pentru aceeași tensiune aplicată, în funcție de momentele de timp la care s-au făcut întreruperile aplicării tensiunii conduce la curba de curgere.

Se pot considera mai multe experiențe de fluaj făcute asupra aceluiași corp cu diferite tensiuni de încărcare și cu diferite momente de timp la care se realizează descărcarea, obținându-se o familie de curbe ca cele reprezentate în Figura 2.1. Curba care reprezintă variația lui ε în funcție de σ_0 se numește **curba deformație-tensiune** și este diferită de curba tensiune-deformație.

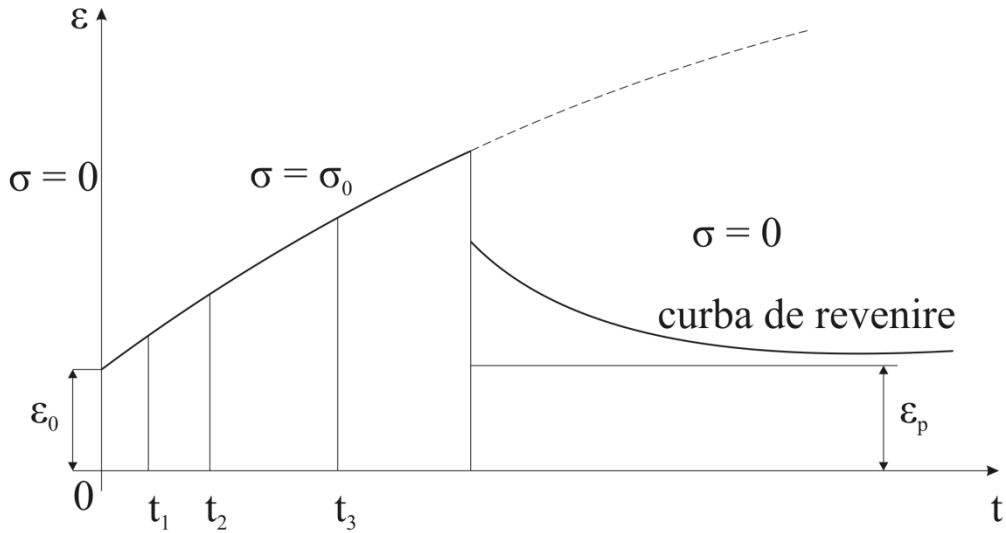


Fig. 2.1 - Diagrama de fluaj și curba de revenire

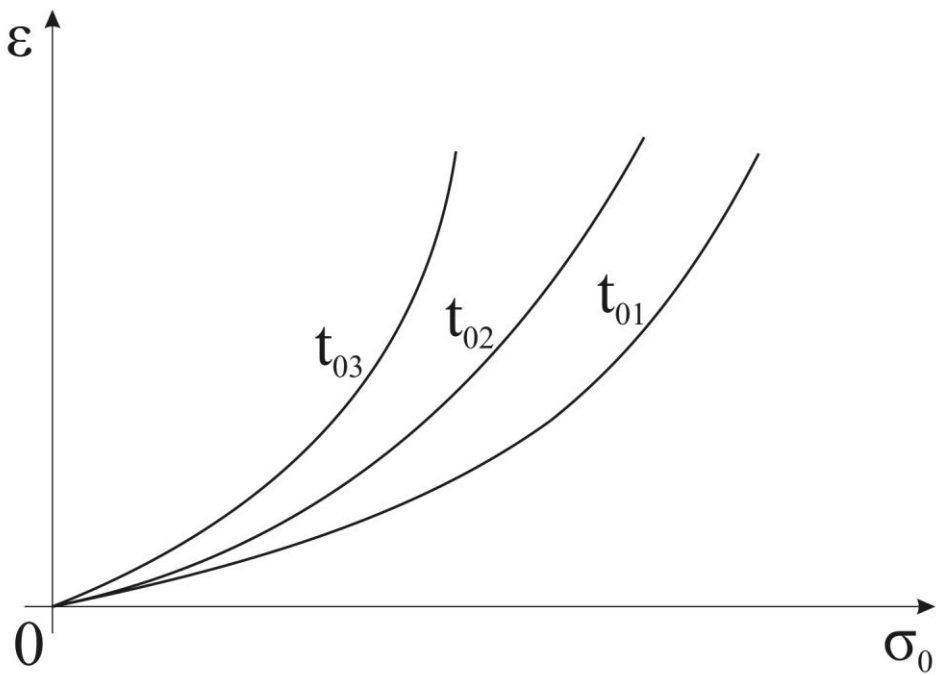


Fig. 2.2 - Diagrama deformație-tensiune

Dacă pentru un corp, a cărui deformație a fost nulă o perioadă de timp, în mod brusc valoarea deformației devine ϵ_0 și se menține constantă, urmărindu-se variațiile lui σ în funcție de timp, s-a realizat o experiență de relaxare. Funcția

definită prin raportul dintre valoarea tensiunii σ , la un moment dat, și valoarea deformației instantanee aplicate la momentul inițial se numește funcție de relaxare sau modulul relaxat și este dată de relația [33], [34], [36]:

$$r(\varepsilon_0, t) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon_0} \quad (2.3)$$

2.3. Corpul solid

2.3.1. Solidul lui Euclid sau corpul rigid

Deformațiile unui astfel de corp sunt egale cu zero, adică corpul este nedeformabil, numindu-se și corp rigid:

$$\varepsilon_i \equiv 0$$

(2.4)

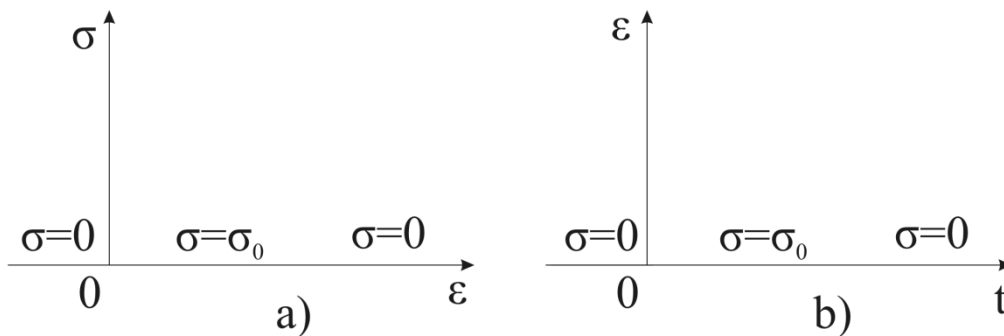


Fig. 2.3 – Diagramele caracteristice unui corp nedeformabil

Diagramele caracteristice ale unui astfel de corp sunt prezentate în Figura 2.3. Studiul unor probleme legate de solidul rigid (reducerea și echilibrul sistemelor de forțe ce acționează asupra unui corp sau unui sistem de corpuri rigide, cinematica și dinamica sistemelor de corpuri rigide) este făcut în cadrul mecanicii clasice.

2.3.2. Solidul perfect elastic

În realitate toate corpurile se deformează, și pentru unele dintre ele, în anumite intervale de încărcare până la o anumită valoare a tensiunii numită limită de elasticitate, se poate considera că există o relație biunivocă între tensiune și deformația specifică. Pentru astfel de corpuri, analizând criteriile cerute în Tabelul 1, răspunsul de echilibru se stabilește instantaneu, prin urmare parametrul timp nu intervine, deci nu vor exista fenomene de fluaj și nici de relaxare. Pe de altă parte, nu există histerezis mecanic și nici frecare interioară.

Comportamentul perfect elastic implică faptul că deformația este o funcție căreia îi corespunde o singură valoare pentru o singură solicitare, deformație care este complet recuperată instantaneu atunci când aplicarea sarcinii este întreruptă [35], [37].

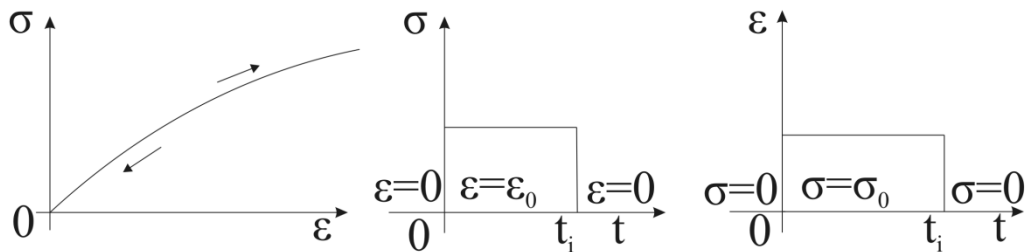


Fig. 2.4 - Diagrammele caracteristice unui corp perfect elastic

Ecuția acestui corp se poate scrie sub forma:

$$\sigma = K(\epsilon) \quad (2.5)$$

2.3.3. Solidul lui Hooke

Corpul cu elasticitate liniară este un corp elastic pentru care diagrama tensiune-deformație, până la limita de elasticitate, este o dreaptă ce pleacă din origine.

Majoritatea materialelor folosite în inginerie, supuse unor deformații mici, au un comportament elastic liniar, adică este descris de legea lui Hooke:

- Legea lui Hooke pentru întindere și compresiune este dată de relația:

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (2.6)$$

unde σ reprezintă tensiunea longitudinală aplicată corpului, E este modulul de elasticitate longitudinal sau modulul Young și ϵ reprezintă deformația suferită de corp.

- Legea lui Hooke pentru forfecare și răsucire este dată de relația:

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (2.7)$$

unde τ reprezintă tensiunea tangențială aplicată corpului, G este modulul de elasticitate transversal sau de forfecare, denumit și modulul lui Coulomb și γ reprezintă deformația unghiulară suferită de corp.

- Legea lui Hooke pentru presiune hidrostatică:

$$p = -B \frac{\Delta V}{V} \quad (2.8)$$

unde p reprezintă presiunea, ΔV este variația volumului, V este volumul și B reprezintă modulul global sau modulul Bulk.

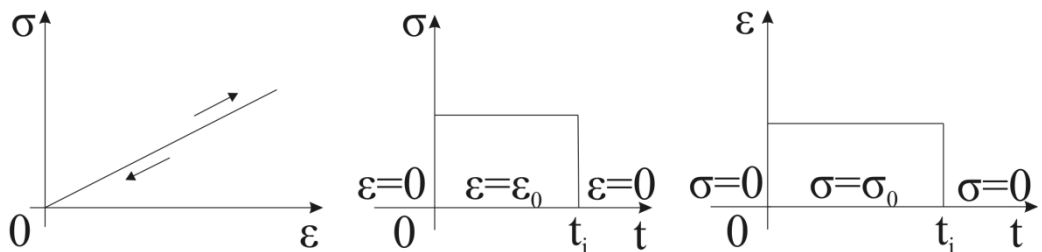


Fig. 2.5 - Diagrammele caracteristice corpului cu elasticitate liniară

Diagramele caracteristice sunt prezentate în Figura 2.5. Făcând o comparație cu cele trei criterii pe baza cărora s-a construit Tabelul 2.1 se poate concluziona că la aceste corpuri nu apar fenomene de fluaj, de relaxare sau de histerezis și nu au frecare interioară [35], [37].

2.3.4. Corpuri cu elasticitate întârziată

Pentru aceste corpuri, atunci când sunt supuse la un efort instantaneu, nu se atinge imediat deformația corespunzătoare valorii tensiunii, ci numai după un anumit timp. De asemenea, dacă la un moment t_i se va suprima încărcarea, $\sigma=0$, deformația nu dispăre imediat. Acest fenomen se mai numește și "postefect elastic". Pentru aceste corpuri deformația este atât în funcție de timp, cât și de valoarea tensiunii. În Figura 2.6 c) este prezentată diagrama de fluaj a corpurilor cu elasticitate întârziată.

Dacă valoarea deformației se menține constantă mult timp, tensiunea tinde spre o limită finită. Aceste întârzieri se datorează apariției unui histerezis, după cum poate fi observat în diagrama din Figura 2.6 a) când după un timp foarte lung se revine la zero [34].

În Figura 2.6 b) este prezentată diagrama de relaxare a corpurilor cu elasticitate întârziată, iar în Figura 2.6 c) este diagrama de fluaj și curba de revenire a acestor corpuri.

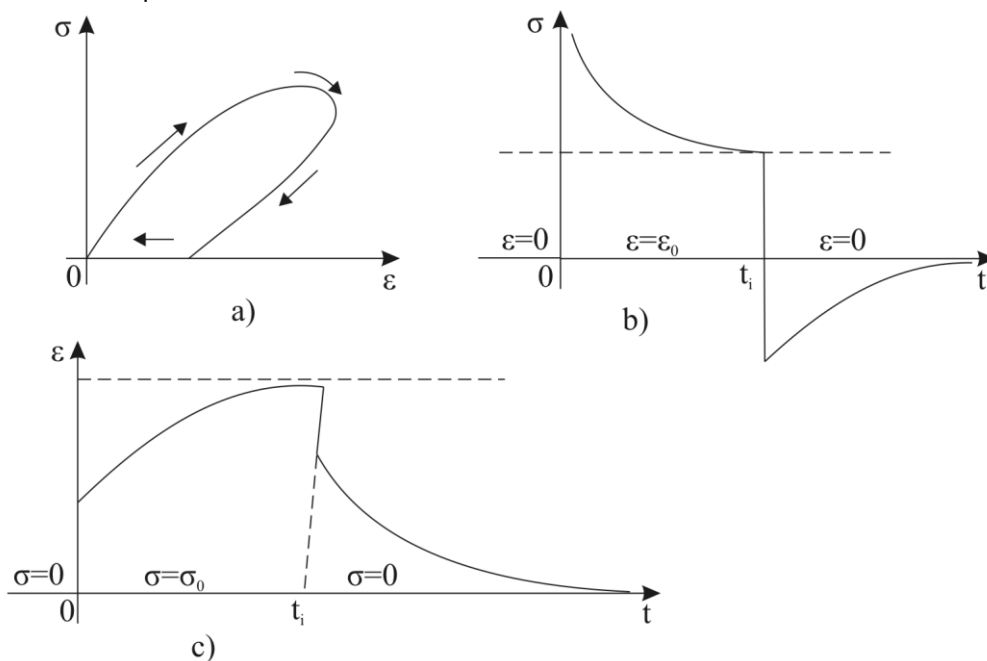


Fig. 2.6 – Diagramele caracteristice unor corpuri cu elasticitate întârziată

2.4. Corpuri vâscoase

Aceste corpuri prezintă un comportament similar fluidelor.

2.4.1. Lichidul lui Pascal sau lichidul incompresibil

Lichidele incompresibile sau lichidele ideale se consideră acele lichide care nu-și modifică volumul în urma aplicării unei presiuni hidrostatice. În schimb dacă asupra lichidelor acționează un alt tip de tensiune, nu de natură hidrostatică, se constată că acesta nu se opune cu nici o forță deformației lui. Prin urmare, ecuația de stare este:

$$\tau \equiv 0 \quad (2.9)$$

Ecuatiile (2.7) și (2.9) caracterizează cele două stări limită ale corpurilor: solidul rigid sau solidul euclidian, respectiv lichidul incompresibil sau lichidul lui Pascal.

2.4.2. Lichidul vâscos

Lichidele reale suferă deformații dacă asupra lor se aplică o tensiune diferită de zero. Pentru un anumit tip de lichide există o relație univocă între tensiunea τ și viteza de deformație $\dot{\epsilon}$, atunci când curgerea este în regim laminar, adică viteza de deformație nu depășește o anumită valoare ce caracterizează un regim de curgere turbulent.

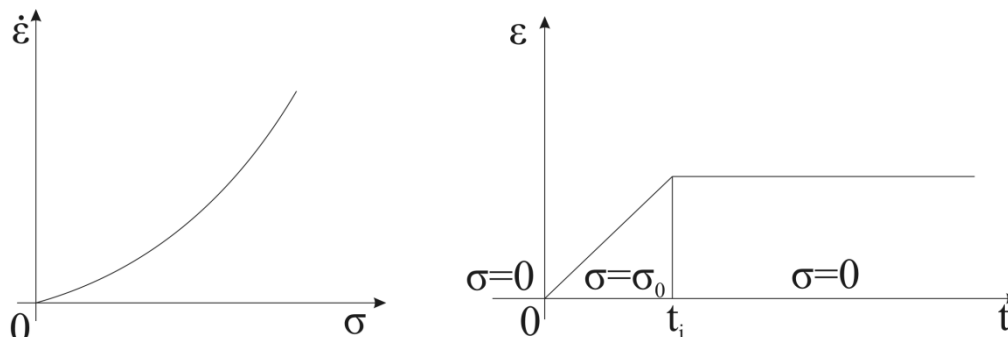


Fig. 2.7 – Diagramele fundamentale ale lichidului vâscos

Aceste corpuri se mai numesc și lichide anormale sau nenenewtoniene. Ecuația de stare a acestor corpuri este:

$$\tau \equiv \eta(\dot{\epsilon}) \quad (2.10)$$

unde η este vâscozitatea aparentă.

Diagramele ce caracterizează aceste lichide sunt prezentate în Figura 2.7. Diagrama tensiune-viteză de deformație este prezentată în Figura 2.7 a), iar în Figura 2.7 b) este prezentată diagrama de fluaj a acestui tip de lichid. În intervalul de timp în care este aplicată tensiunea constantă σ_0 deformația ajunge la o valoare ϵ , valoare ce se păstrează și după momentul t_i , din inerție și datorită faptului că nu există nici o forță disipativă care să o micșoreze. Diagrama de curgere coincide cu diagrama de fluaj.

2.4.3. Lichidul lui Newton

Denumit și lichid perfect vâscos, este un caz particular al lichidelor vâscoase și se caracterizează printr-o proporționalitate între tensiunea tangențială și viteza de deformare. Ecuația de stare a acestui corp este de forma:

$$\tau \equiv \eta \dot{\varepsilon} \quad (2.11)$$

unde η este vâscozitatea dinamică.

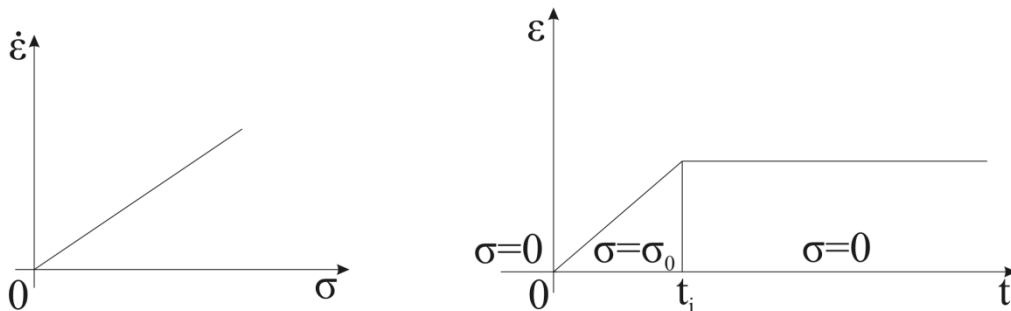


Fig. 2.8 – Diagramele fundamentale ale lichidului perfect vâscos

Diagramele ce caracterizează aceste lichide sunt prezentate în Figura 2.8. Diagrama tensiune-viteză de deformare este o dreaptă prezentată în Figura 2.8 a), iar diagrama de fluaj este prezentată în Figura 2.8 b).

2.4.4. Lichidul vâscoelastic

În această categorie sunt cuprinse corpurile care au comportarea unui lichid vâscos, dar prezintă și o elasticitate, de obicei întârziată pentru deformații rapide. Sub acțiunea unei tensiuni, oricât de mici ar fi, acest corp curge lent și ireversibil.

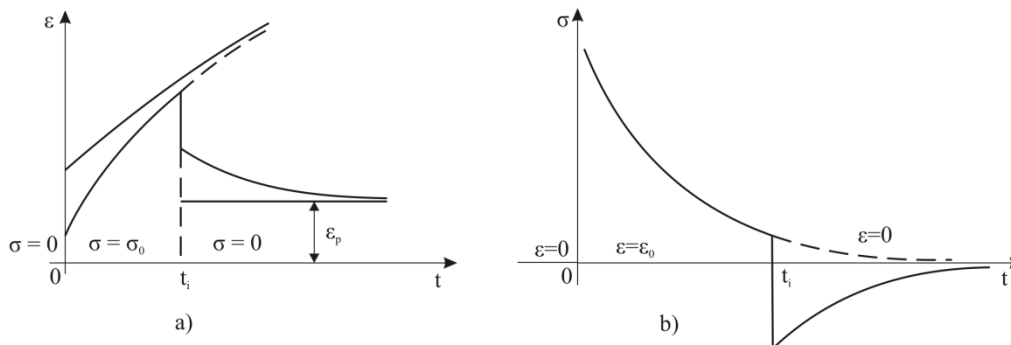


Fig. 2.9 – Diagramele fundamentale ale lichidului vâscoelastic

Diagrama tensiune-deformație poate fi reprezentată printr-o curbă, deci nu este obligatorie o proporționalitate între ε și σ .

Diagramele ce caracterizează lichidul vâscoelastic sunt prezentate în Figura 2.9. Diagrama de complianță se regăsește în Figura 2.9 a) în care fluajul crește,

având o asimptotă înclinată, până la momentul t_i , iar când $\sigma=0$, apare "postefectul elastic", deformația nu dispăre instantaneu și nici total, ci se manifestă fenomenul de revenire până la deformația permanentă ϵ_p , care reprezintă asimptota orizontală a diagramei de fluaj.

În Figura 2.9 b) este prezentată diagrama de relaxare a solicitării în care abscisa este asimptotă orizontală, aici apărând un histerzis și frecare interioară [35].

2.5. Corpuri plastice

Aceste corpuri nu prezintă deformații permanente importante decât de la o anumită valoare a încărcărilor numită *prag al tensiunilor*.

2.5.1. Solidul perfect plastic

Dacă un corp perfect plastic este supus unei încărcări progresive, la început, când valoarea tensiunii este redusă, corpul plastic nu se deformează. Când încărcarea a atins o anumită valoare σ_c , corpul începe să se deformeze cu viteză constantă, fără a mai fi necesară creșterea valorii tensiunii. Dacă încărcarea este suprimată brusc, corpul păstrează deformația pe care a suferit-o la timpul t_i , când s-a produs descărcarea (Figura 2.10).

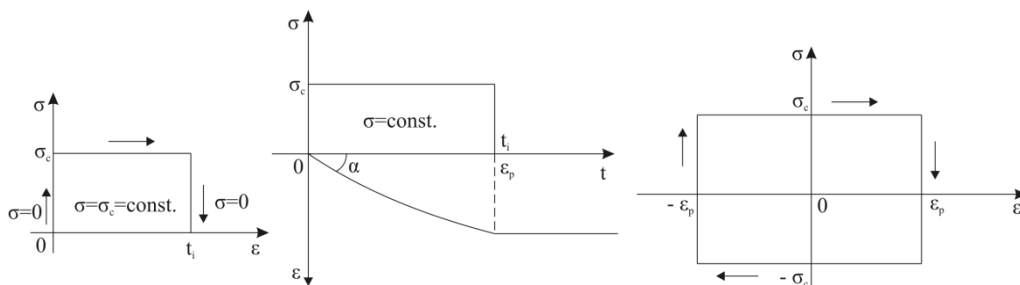


Fig. 2.10 – Diagramele caracteristice ale solidului perfect plastic

În Figura 2.10 este prezentată diagrama de fluaj și cea de relaxare a solidului perfect plastic.

Dacă un corp perfect plastic este supus la o variație alternativă a deformației între două valori extreme $\pm\epsilon_{max}$, ciclul descris va fi un dreptunghi (Figura 2.10). Acest corp se comportă ca un solid cu frecare, iar tensiunea care se aplică este constantă în valoare absolută și semnul ei este cel al vitezei de deformare și se poate exprima:

$$\sigma = \sigma_c \frac{\dot{\epsilon}}{|\dot{\epsilon}|} \tag{2.12}$$

2.5.2. Solidul perfect elastoplastic

În realitate, cele mai multe corpuri se deformează elastic înainte de a atinge pragul tensiunilor. Diagrama tensiune-deformație arată mai întâi o creștere a deformației concomitent cu creșterea încărcării, iar când s-a atins pragul de tensiune, deformația continuă să crească în timp ce valoarea tensiunii rămâne constantă. La suprimarea încărcării, deformația permanentă va avea o valoare mai redusă decât la timpul t_i deoarece a dispărut deformația elastică (Figura 2.11).

Dacă deformația are valori alternative, $\pm \varepsilon_{\max}$, atunci ciclul obținut are forma unui paralelogram (Figura 2.11).

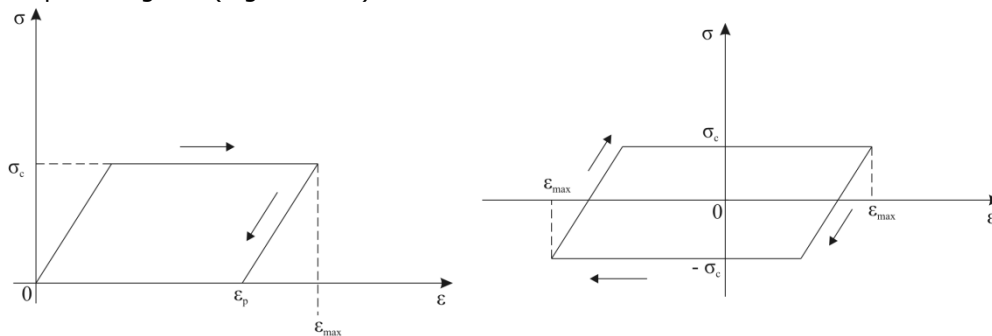


Fig. 2.11 – Diagramele caracteristice solidului perfect elastoplastic

Frecarea internă va avea valoarea:

$$\frac{\Delta V}{V} = 8 \left(1 - \frac{\sigma_c}{\varepsilon_{\max} K} \right) \quad (2.13)$$

unde K reprezintă modulul măsurat înainte de atingerea limitei de elasticitate, ε_{\max} este deformația maximă și σ_c este limita de plasticitate.

2.5.3. Solidul elastoplastic

Acest corp are o comportare elastică până la pragul de tensiune și după aceea, corpul se comportă plastic. În intervalul de încărcare elastică, legătura dintre tensiune și deformație poate fi neliniară, dar revenirea în cazul suprimării încărcării este instantanee și completă.

Diagramele de fluaj și de relaxare pentru solidul elastoplastic sunt prezentate în Figura 2.12.

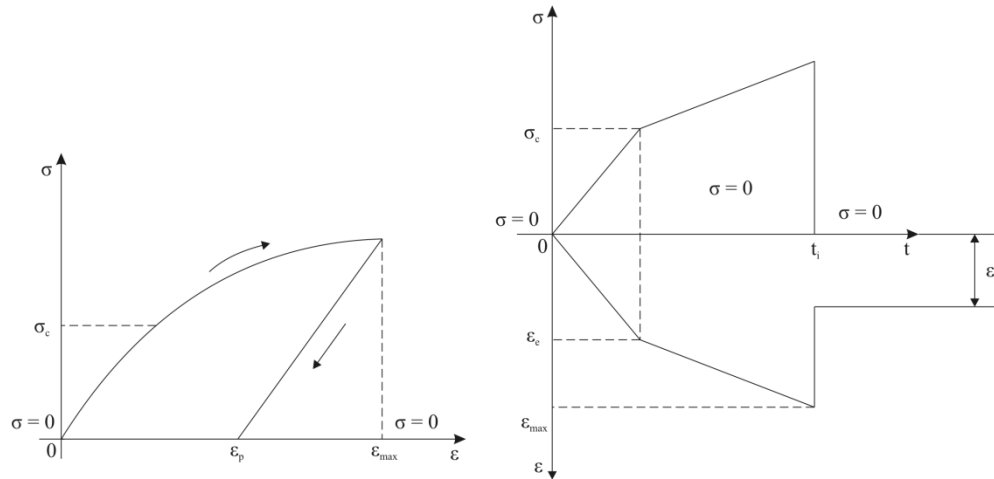


Fig. 2.12 - Diagramele caracteristice solidului elastoplastic

2.5.4. Corpul vâscoelastoplastic

Acest corp, sub acțiunea încărcărilor mai mici decât pragul tensiunilor, are o comportare vâscoelastică, iar dacă se depășește această valoare atunci începe o curgere ireversibilă în funcție sau nu de viteza de deformare.

2.5.5. Corpul Képès

Acest corp ideal, conceput de Képès, admite că tensiunea este formată din doi termeni, unul ca un corp elastic al lui Hooke, iar la cel de-al doilea se consideră că frecarea este proporțională în valoare absolută cu deformația. Timpul nu intervine și nu există un prag al tensiunilor. Al doilea termen al tensiunii va fi de forma [34]:

$$\sigma_2 = K_2 \frac{\dot{\epsilon}_2}{|\dot{\epsilon}_2|} |\epsilon_2| \quad (2.14)$$

Tensiunea totală va avea relația:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 = K_1 \epsilon_1 + K_2 \frac{\dot{\epsilon}_2}{|\dot{\epsilon}_2|} |\epsilon_2| \quad (2.15)$$

2.6. Corpul vâscoelastic

Folosirea unei teorii vâscoelastice în practică este o primă etapă obligatorie în determinarea stărilor de tensiune și de deformație în materialele cu proprietăți reologice. Teoria matematică a vâscoelasticității liniare limitează posibilitatea urmăririi riguroase a fenomenului fizic, dar permite rezolvarea unui număr mare de probleme practice în mod analitic, pe care reologia le-a sesizat prin experiment, dar pentru care nu a găsit decât unele soluții empirice particulare.

În vâscoelasticitatea liniară se caută pe de-o parte a se reprezenta sub formă analitică fenomenul real, iar pe de altă parte a se schematiza cu ajutorul modelelor mecanice compuse din resoarte și amortizoare elementele esențiale care permit generalizarea relațiilor obținute. Astfel, cu ajutorul resoartelor se modulează deformațiile reversibile legate de creșterea energiei potențiale și care sunt proporționale cu tensiunile care iau naștere, iar cu ajutorul amortizoarelor se reprezintă proprietățile vâscoase ale corpurilor ale căror deformații sunt ireversibile și care conduc la disiparea energiei create. Tensiunile care apar sunt proporționale cu viteza de deformație.

Cu ajutorul teoriei vâscoelasticității se pot rezolva un număr mare de probleme practice a căror fenomene conduc în timp la o importantă redistribuire a tensiunilor datorită modificărilor deformațiilor.

Un rol important în teoria vâscoelasticității îl au cele două funcții: de fluaj $f(t)$ și de relaxare $r(t)$. Aceste funcții nu depind nici de poziția, nici de forma corpului, ele reprezintă o caracteristică a materialului și depind numai de timp. Ele caracterizează proprietăți reologice ale materialului vâscoelastic, dar în timp ce funcția de fluaj este crescătoare, iar derivata ei descrește cu timpul, funcția de relaxare este descrescătoare având derivata negativă, având concavitatea curbei de relaxare în sus [35].

2.7. Modele mecanice

2.7.1. Modele mecanice de bază

Pentru a descrie comportamentul mecanic al materialelor, este foarte avantajos să se utilizeze modele mecanice care au un rol pedagogic și ne permit o descriere concretă a comportamentului mecanic. Cu toate acestea ele nu descriu fizic mecanismele responsabile pentru acest comportament mecanic. În numeroase cazuri, materialele reale nu pot fi descrise în totalitate de către aceste modele mecanice.

Modelarea comportării reologice a corpurilor reale se face cu ajutorul modelelor mecanice. Acestea ușurează vizualizarea și înțelegerea răspunsului la solicitări.

Aceste modele mecanice sunt asamblări mai mult sau mai puțin complexe ale unor elemente mecanice simple, cărora li se atribuie anumite comportări sub acțiunea încărcărilor și care sunt exprimate teoretic cu ajutorul ecuațiilor fundamentale.

Elementele mecanice cele mai frecvent utilizate sunt următoarele:

- **Resortul** sau **arcul elicoidal**, prezentat în Figura 2.13, caracterizează comportarea liniar-elastică a unui corp, numit corpul lui Hooke.



Fig. 2.13 – Resort

Resortul are ecuația caracteristică de forma:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.16)$$

- **Amortizorul**, prezentat în Figura 2.14, caracterizează un lichid Newtonian și este reprezentat printr-un piston care se mișcă într-un lichid vâscos în interiorul unui cilindru.

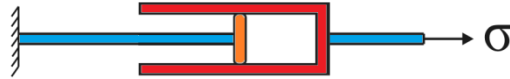


Fig. 2.14 – Amortizor Newtonian

Amortizorul are ecuația de stare:

$$\sigma = \eta \cdot \dot{\epsilon} \tag{2.17}$$

- **Amortizorul neNewtonian** sau **modelul Norton**, prezentat în Figura 2.15, caracterizează o comportare neliniară dintre tensiune și viteza de deplasare a pistonului.

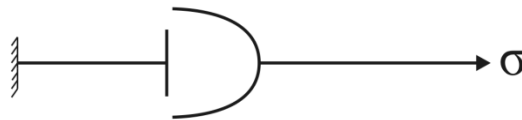


Fig. 2.15 - Amortizor Norton

Acesta are ecuația caracteristică de forma:

$$\sigma = \lambda \cdot \dot{\epsilon}^{1/N} \tag{2.18}$$

- **Patina**, prezentată în Figura 2.16, caracterizează frecarea solidă. Creșterea tensiunilor are efect numai când s-a ajuns la limita de curgere.

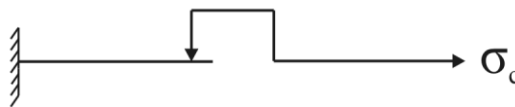


Fig. 2.16 – Patina

Patina are următoarea ecuație de stare:

$$-\sigma_c \leq \sigma \leq \sigma_c \tag{2.19}$$

- **Patina lui Képès**, prezentată în Figura 2.17, este constituită dintr-un corp cu frecare fără prag de tensiune și caracterizează rezistența de după atingerea limitei de curgere, domeniu în care frecarea este proporțională cu deformația.



Fig. 2.17 - Patina lui Képès

Aceasta are ecuația caracteristică de forma:

$$\sigma_c = K |\epsilon| \frac{\dot{\epsilon}}{|\dot{\epsilon}|} \tag{2.20}$$

- **Regulatorul**, prezentat în Figura 2.18, caracterizează corpurile care până la o anumită viteză de deformare $\dot{\epsilon}_c$ nu opun nici o rezistență la deformare, dar nici nu permit să se depășească niciodată această viteză de deformare.

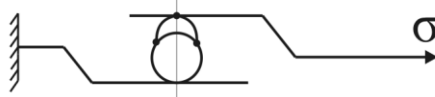


Fig. 2.18 - Regulatorul

Regulatorul are ecuația de stare de forma:

$$-\dot{\epsilon}_c \leq \dot{\epsilon} \leq \dot{\epsilon}_c \quad (2.21)$$

- **Limitatorul** de deformație, prezentat în Figura 2.19, care se atașează în general unui alt model mecanic atunci când există restricții în deplasarea acestuia într-un sens sau în ambele sensuri. Cât timp limitatorul nu face contact, forța este nulă, dar după realizarea contactului deplasarea nu depășește limita impusă, oricât de mare ar fi efortul aplicat.

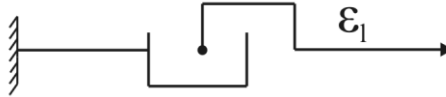


Fig. 2.19 - Limitator

Limitatorul are următoarea ecuație caracteristică:

$$-\epsilon_l \leq \epsilon \leq \epsilon_l \quad (2.22)$$

- **Opritorul** are o singură poziție de echilibru $\epsilon=0$, pentru tensiunea σ_1 . În rest el nu intervine. Opritorul este prezentat în Figura 2.20.

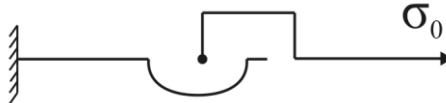


Fig. 2.20 - Opritor

Diferitele comportamente ale modelelor mecanice de bază sunt prezentate în Figura 2.21. Elementele prezentate pot fi asociate în serie sau în paralel. Ansamblul mai multor elemente se numește **grupare**. Când elementele sunt așezate în serie, întreaga încărcare este suportată de toate elementele, dar deformația totală a întregii grupări va fi egală cu suma deformațiilor fiecărui element. Când elementele sunt așezate în paralel, încărcarea totală, σ_t , este preluată parțial de fiecare element raportat la caracteristica de rigiditate a fiecărui element în timp ce deformațiile sunt egale între ele și, de asemenea, egale cu deformația întregului ansamblu [34], [35], [37].

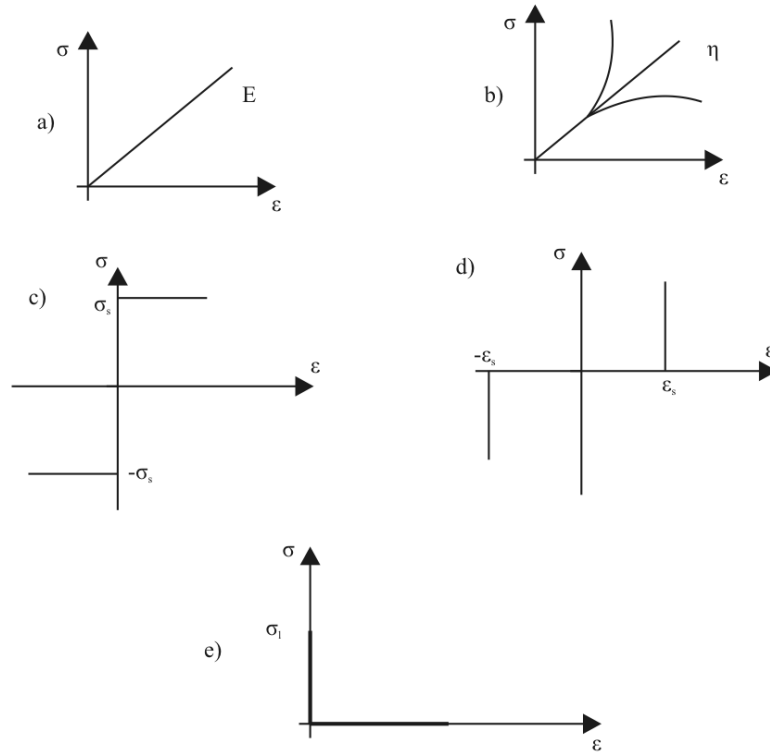


Fig. 2.21 - Comportările diferitelor modele mecanice

3. SIMULAREA MODELELOR REOLOGICE

3.1. Simularea cu ajutorul aplicației Simulink

Simulink este o aplicație a software-ului matematic MATLAB realizat de către MathWorks Inc. Aplicația Simulink este folosită pentru modelarea, simularea și analiza sistemelor dinamice.

Cu ajutorul aplicației **MATLAB/Simulink** se pot studia nu numai modele liniare idealizate, ci și modele neliniare, mai realiste, care descriu fenomene din lumea reală. După ce se definește un model, se poate simula dinamic comportamentul acestuia. În analiza modelului se pot folosi instrumente de linearizare și de temporizare, care se accesează de la linia de comandă a MATLAB. Deoarece MATLAB și Simulink sunt integrate, modelul poate fi simulat, analizat și modificat în oricare mediu (de programare) și la orice moment.

Simulink este mediu diagramă-bloc pentru simulări în variate domenii și pentru proiectare bazată pe modele (**Model-Based Design**). Acesta permite proiectare la nivel de sistem, simulare, generare automată de cod, precum și testarea și verificarea permanentă a sistemelor integrate.

Proiectarea bazată pe modelare este un proces care permite rapid o dezvoltare eficientă a sistemelor dinamice, incluzând sistemele de control, de procesare a semnalului și sistemele de comunicații. În proiectarea bazată pe modelare, un model de sistem se află în centrul procesului de dezvoltare, de la cerințele dezvoltării prin intermediul proiectării, implementării și al testării. Modelul este o specificație executabilă care poate fi îmbunătățită continuu pe tot parcursul procesului de dezvoltare. După realizarea modelului, simularea arată dacă modelul funcționează corect. Atunci când sunt cuprinse cerințe de implementare atât software, cât și hardware, cum ar fi un punct fix și temporizare, se poate genera automat codul integrat de implementare și se pot crea bancuri de testare pentru verificarea sistemului, economisind timp și evitând introducerea manuală a unei erori în cod [38].

Pentru crearea unui model, se urmăresc definirea modelului și analiza acestuia. Modelarea în vederea simulării în aplicația Simulink constă în selectarea unor blocuri logice și conectarea acestora conform ecuațiilor matematice specifice modelului propus sau analizat.

Parametrii unei simulări se pot configura foarte ușor din meniul aplicației. Pentru rularea unei simulări pe PC, trebuie aleasă o tehnică numerică de rezolvare a ecuațiilor diferențiale (ex. ode45)¹.

Sistemul poate fi simulat ca un sistem continuu sau ca un sistem discret, în funcție de blocurile care formează sistemul (în funcție de ecuație). Prin setarea parametrilor se poate alege metoda de integrare, stabilirea limitelor pentru variabila independentă (timpul), stabilirea limitelor pentru funcție, stabilirea pasului minim și maxim de integrare etc.

La finalul simulării, rezultatele pot fi vizualizate cu ajutorul unor blocuri pentru afișarea rezultatelor, prin salvarea datelor numerice în fișiere sau prin

¹ Metoda Dormand-Prince de rezolvare a ecuațiilor diferențiale folosită în aplicația Simulink

transmiterea automată a acestor rezultate numerice în spațiul de comandă din aplicația Matlab [39], [40].

3.2. Comportarea vâscoelastică liniară: Modelul Kelvin-Voigt

Un model mecanic simplu care descrie comportarea vâscoelastică a unui corp este modelul Kelvin-Voigt, constituit dintr-un resort și un amortizor poziționate în paralel (Figura 3.22). Cele două elemente vor avea aceeași deformare, iar tensiunea totală este suma tensiunilor din fiecare element. Se poate scrie ecuația caracteristică:

$$\sigma = \sigma_{\eta} + \sigma_E = E\varepsilon + \eta\dot{\varepsilon} \quad (3.23)$$

$$\frac{\sigma}{E} = \varepsilon + \tau\dot{\varepsilon} \quad (3.24)$$

cu $\tau = \eta/E$ timpul de relaxare.

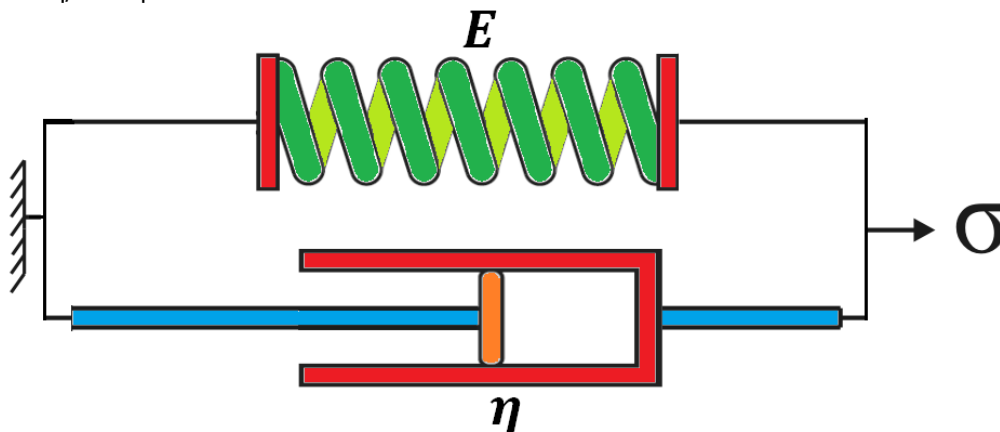


Fig. 3.22 – Modelul Kelvin-Voigt

În cazul în care o tensiune σ_0 este aplicată brusc la $t=0$, amortizorul vâscos cedează instantaneu. Nu se produce nici o deformare în momentul inițial, iar tensiunea este preluată doar de amortizor. Deci nu există elasticitate instantanee. Apoi, amortizorul se poate comprima, iar deformarea elastică întârziată se produce până când resortul preia complet tensiunea, iar din acest moment amortizorul nu se comprimă mai mult (Figura 3.23).

Acest model nu prezintă o elasticitate instantanee dacă se impune brusc o tensiune permanentă, pentru că ar trebui să apară o deformare infinită, ceea ce ar conduce la rupere. Când tensiunea este eliberată brusc, deformarea amortizorului nu poate avea loc imediat și resortul întins creează tensiunea σ_0 , iar amortizorul suportă tensiunea de comprimare $-\sigma_0$, astfel tensiunea totală este zero. Apoi amortizorul se decomprimă spre poziția sa inițială, tensiunile din resort și din amortizor scad la zero atunci când $t \rightarrow \infty$ (Figura 3.23).

Fluajul modelului Kelvin-Voigt poate fi obținut prin rezolvarea ecuației diferențiale (3.25). Se obține:

$$J(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0} = \frac{1}{E} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (3.25)$$

unde $\epsilon(t)$ tinde asimptotic spre σ_0/E din cauza contribuției resortului. Răspunsul de revenire este dat de relația:

$$\epsilon(t) = \epsilon_1 \exp\left(-\frac{t-t_1}{\tau}\right) \quad (3.26)$$

unde ϵ_1 este deformația la momentul t_1 [36].

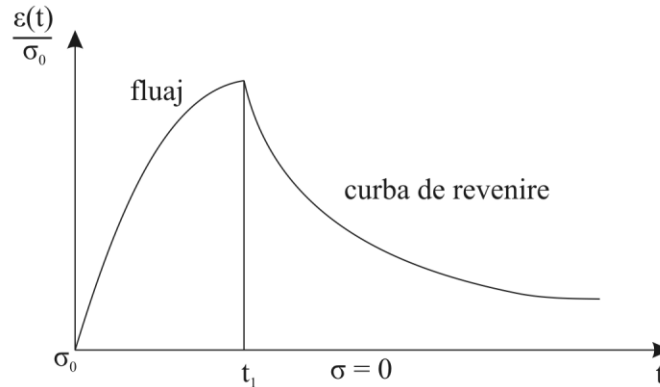


Fig. 3.23 - Evoluția modelului Kelvin-Voigt în funcție de timp

Simularea comportării modelului Kelvin-Voigt Modelul Kelvin-Voigt - FLUAJ

A fost considerat un sistem cu un grad de libertate (Figura 3.22) descris de ecuația de mișcare (3.23).

Conform ecuației (3.23) s-a realizat un model în aplicația Simulink pentru a simula comportamentul sistemului, evidențiind funcția de fluaj (Figura 3.24).

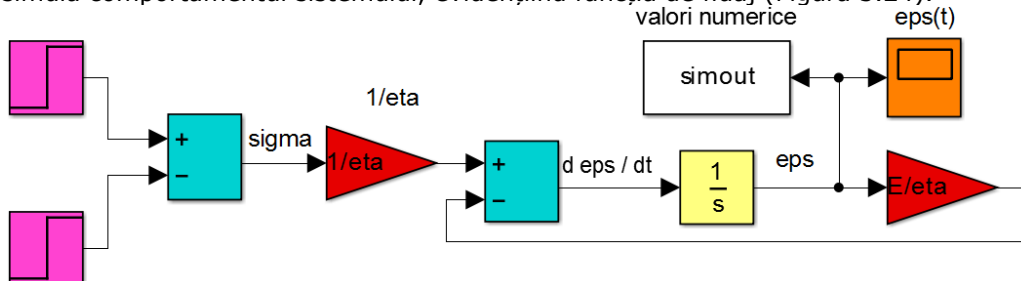


Fig. 3.24 - Simularea comportamentului de fluaj al modelului Kelvin-Voigt realizat în Simulink

Realizarea modelului s-a efectuat alegând blocuri corespunzătoare fiecărui termen din ecuația de stare din "biblioteca" Simulink, s-au definit termenii σ_0 , η și E , tensiunea a fost impusă de cele două blocuri de tip *treaptă*, iar apoi s-a ales un *osciloscop* pentru vizualizarea semnalului.

Pentru simulare au fost aleși următorii parametri: $\sigma_0=1\text{MPa}$, $\sigma(t_1)=1\text{MPa}$, $E=9\text{MPa}$ și $\eta=10\text{Pa s}$. Timpul ales pentru simulare a fost $t=10\text{s}$. Rezultatele numerice sunt prezentate în *Anexa 1 - Tabelul A.12*, ele fiind obținute cu ajutorul blocului *simout* al aplicației.

Rezultatul simulării este prezentat în Figura 3.25. Se observă că diagrama de fluaj rezultată din simulare este echivalentă cu cea teoretică (Figura 3.23) de la care s-a pornit în investigarea modelului Kelvin-Voigt.

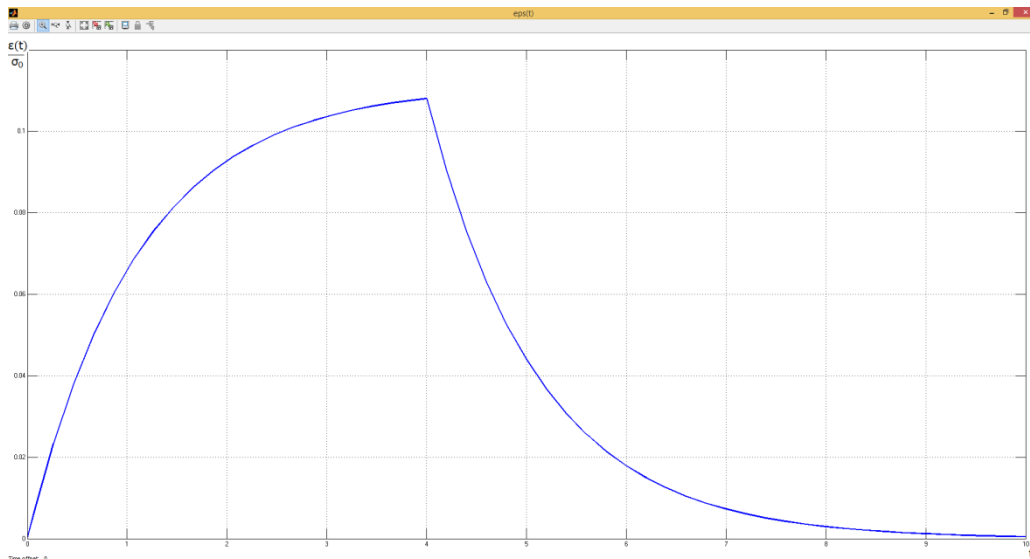


Fig. 3.25 – Diagrama de fluaj și curba de revenire a modelului Kelvin-Voigt simulate în Simulink

Pe diagrama din Figura 3.25 obținută prin simulare se poate observa fluajul caracteristic modelului Kelvin-Voigt, până la secunda 4, după care apare curba de revenire care tinde asimptotic la axa orizontală, la valoarea 0. Deci este o revenire completă, modelul având un comportament elastic.

Modelul Kelvin-Voigt - RELAXARE

Conform ecuației (3.23) s-a realizat un model în aplicația Simulink pentru a simula comportamentul sistemului, evidențiind funcția de relaxare (Figura 3.26).

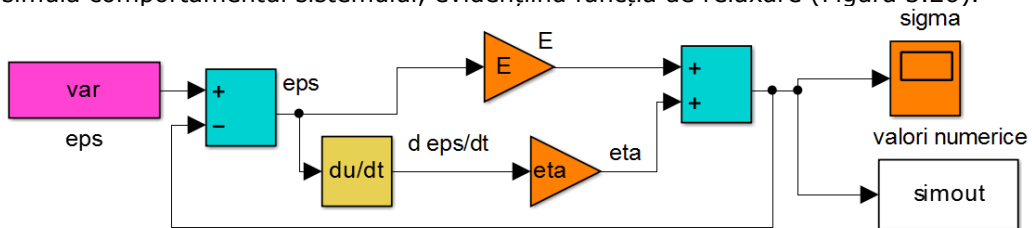


Fig. 3.26 - Simularea comportamentului de relaxare al modelului Kelvin-Voigt realizat în Simulink

Realizarea modelului s-a efectuat alegând blocuri corespunzătoare fiecărui termen din ecuația de stare din "biblioteca" Simulink, s-au definit termenii ϵ_0 , η și E , deformația a fost impusă prin blocul *From Workspace* în care s-au definit parametrii inițiali, iar apoi s-a ales un *oscilloscop* pentru vizualizarea semnalului.

Atunci când tensiunea din ecuația de mișcare a modelului Kelvin-Voigt este $\sigma_s = E\epsilon$, aceasta corespunde răspunsului instantaneu. Funcția de relaxare a acestui model are răspunsuri bune atunci când este supus unor excitații armonice.

Rezultatul simulării este prezentat în Figura 3.27.

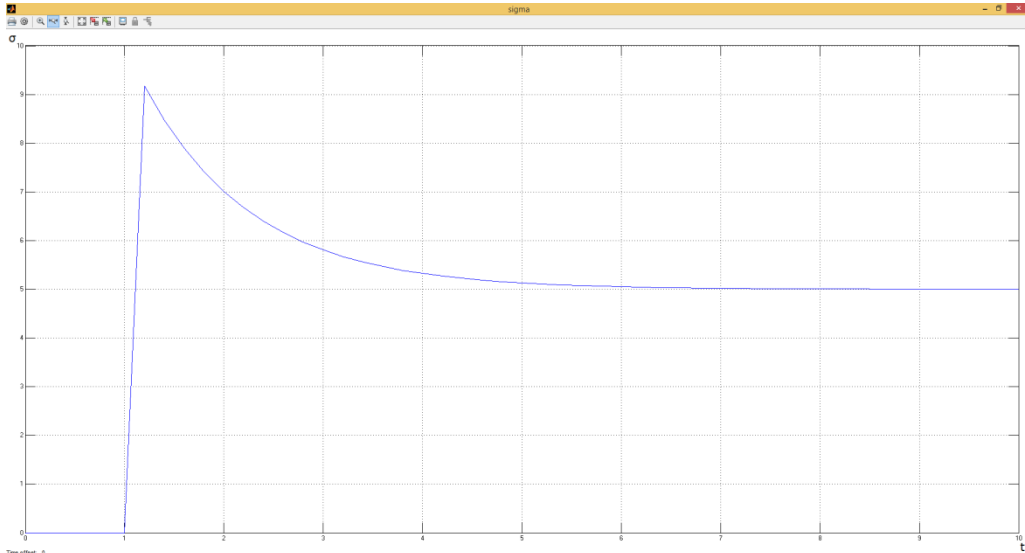


Fig. 3.27 - Diagrama de relaxare a tensiunii pentru modelul Kelvin-Voigt simulată în Simulink

Pentru simulare au fost aleși următorii parametri: $\epsilon_0=10\text{mm}$, $E=9\text{MPa}$ și $\eta=10\text{Pa s}$. Timpul ales pentru simulare a fost $t=10\text{s}$. Rezultatele numerice sunt prezentate în *Anexa 1 - Tabelul A.13*, ele fiind obținute cu ajutorul blocului *simout* al aplicației.

Pe diagrama de mai sus se poate observa că după îndepărtarea deformației impuse, ϵ_0 , la momentul $t=1\text{s}$, modelul are o relaxare parțială a solicitării.

3.3. Comportarea solidelor vâscoelastice: Modelul Maxwell

Modelul Maxwell (Figura 3.28) este constituit dintr-un arc și un amortizor legate în serie. Atunci când se aplică instantaneu o tensiune σ_0 , resortul suferă deformația σ_s/E iar apoi are loc un fluaj vâscos liniar lent datorită amortizorului. Tensiunea totală este egală cu tensiunea din fiecare element:

$$\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 \quad (3.27)$$



Fig. 3.28 - Modelul Maxwell

Când tensiunea este îndepărtată, există o deformare permanentă cauzată de amortizor. Deformația elastică cauzată de resort este recuperată imediat, dar nu se observă o recuperare progresivă. Modelul Maxwell (Figura 3.28) nu are un comportament vâscoelastic. Acesta are comportamentul unui lichid, în timpul relaxării unei tensiuni, $E(t)$ tinde la zero. Cu toate acestea, atunci când amortizorul se gripează instantaneu, acest model arată un comportament elastic.

Deformația totală va fi egală cu suma deformațiilor resimțite de fiecare element:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (3.28)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma}{E}; \quad \dot{\varepsilon}_2 = \frac{\sigma}{\eta} \quad (3.29)$$

Ecuția de mișcare a modelului devine:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta} \quad (3.30)$$

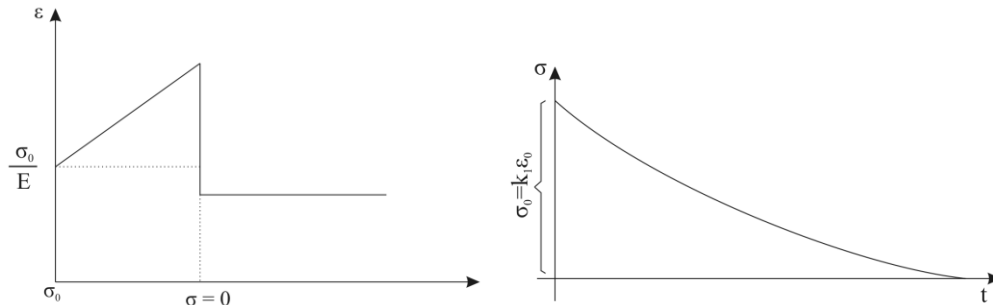


Fig. 3.29 – Diagramele de fluaj și de relaxare ale modelului Maxwell

Pentru determinarea diagramei de fluaj (Figura 3.29), se va aplica o tensiune constantă σ_0 care se menține tot timpul la această valoare, în această situație $\dot{\sigma}_0 = 0$, iar funcția de fluaj $f(t)$ devine:

$$f(t) = \frac{1}{E} \left(1 + \frac{E}{\eta} t \right) \quad (3.31)$$

Dacă la timpul $t=0s$ se impune o deformație ε_0 și se menține constantă tot timpul, atunci tensiunea variază în timp [35], [37].

Funcția de relaxare devine:

$$r(t) = E e^{-\frac{E}{\eta} t} \quad (3.32)$$

Simularea comportamentului modelului Maxwell

A fost considerat un sistem cu un grad de libertate (Figura 3.28) descris de ecuația de mișcare (3.30).

Modelul Maxwell are două cazuri distincte de comportament reologic. Aceste comportamente se vor analiza, pe modele de simulare create cu ajutorul aplicației Simulink pentru fiecare caz în parte.

Modelul Maxwell – FLUAJ

Modelarea se face pornind de la ecuația de stare, adică de la funcția de fluaj descrisă mai sus. Fluajul pentru acest model apare atunci când este aplicată o tensiune constantă.

Realizarea modelului (Figura 3.30) s-a efectuat alegând blocuri corespunzătoare fiecărui termen din ecuația de stare din "biblioteca" Simulink, s-au definit termenii σ_0 , η și E , iar apoi s-a ales un *oscilloscop* pentru vizualizarea semnalului.

Rezultatul simulării este prezentat în Figura 3.31. Se observă că diagrama rezultată din simulare este echivalentă cu cea de la care s-a pornit în investigarea modelului Maxwell pentru evidențierea fluajului.

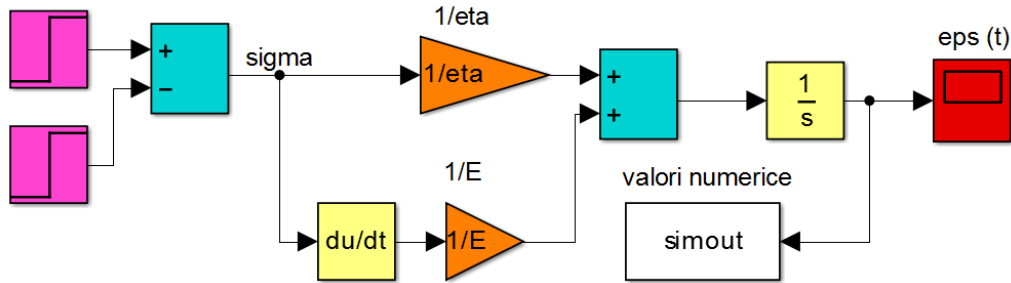


Fig. 3.30 – Modelul Maxwell pentru simularea diagramei de fluj

Pentru simulare au fost aleși următorii parametri: $\sigma_0=1\text{MPa}$, $E=8\text{MPa}$ și $\eta=7\text{Pa s}$. Timpul în care s-a produs simularea a fost $t=10\text{s}$. Rezultatele numerice sunt prezentate în *Anexa 1 – Tabelul A.14*, ele fiind obținute cu ajutorul blocului *simout* al aplicației.

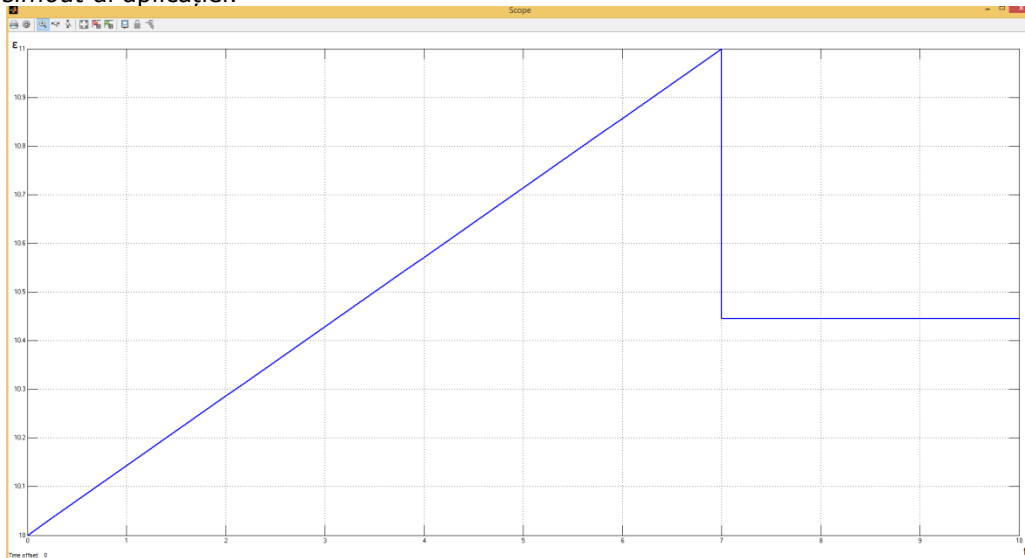


Fig. 3.31 – Simularea comportamentului de fluj pentru modelul Maxwell realizată în Simulink

Pe diagrama din Figura 3.31 obținută prin simulare se poate observa fluajul caracteristic modelului Maxwell, care crește în diagonală până la secunda 7, după care apare revenirea bruscă până la o valoare permanentă a deformației. Deci nu este o revenire completă, modelul având un comportament elasto-plastic.

Modelul Maxwell – RELAXARE

Modelarea se face pornind de la ecuația de stare, adică de la funcția de relaxare descrisă mai sus. Relaxarea pentru acest model apare atunci când este aplicată o deformație constantă, ϵ_0 .

Realizarea modelului (Figura 3.32) s-a efectuat alegând blocuri corespunzătoare termenilor din ecuația de stare din "biblioteca" Simulink, s-au definit termenii ϵ_0 , η și E , iar apoi s-a ales un osciloscop pentru vizualizarea semnalului.

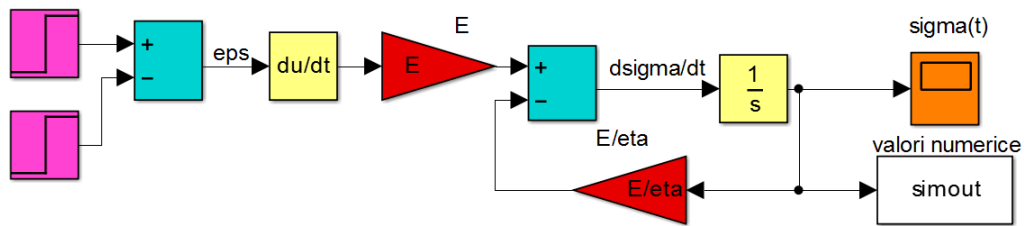


Fig. 3.32 - Modelul Maxwell pentru simularea diagramei de relaxare

Pentru simulare au fost aleși următorii parametri: $\epsilon_0=10\text{mm}$, $E=4\text{MPa}$ și $\eta=7\text{Pa s}$. Timpul în care s-a produs simularea a fost $t=10\text{s}$. Rezultatele numerice sunt prezentate în *Anexa 1 - Tabelul A.15*, ele fiind obținute cu ajutorul blocului *simout* al aplicației.

Rezultatul simulării este prezentat în Figura 3.33.

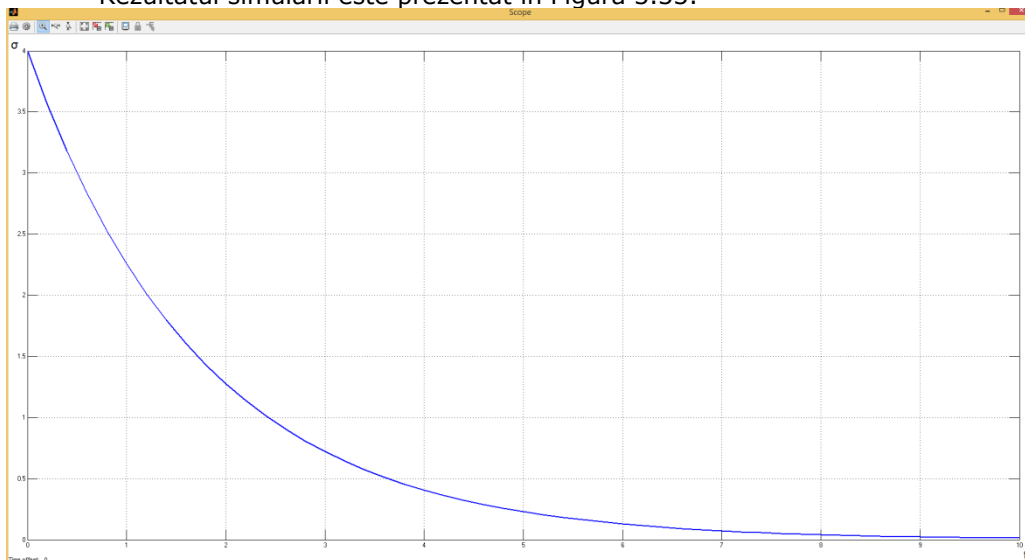


Fig. 3.33 - Simularea comportamentului de relaxare pentru modelul Maxwell realizată în Simulink

Se observă că diagrama rezultată din simulare este echivalentă cu cea teoretică (Figura 3.29) de la care s-a pornit în investigarea modelului Maxwell pentru evidențierea relaxării. Curba de relaxare a solicitării coboară de la maxim spre 0 printr-o curbă.

3.4. Comportarea corpului vâscoelastic: Modelul Zener

Modelul reologic Zener (Figura 3.34) este un model vâscoelastic mai complex, cu trei elemente, compus dintr-un corp Maxwell legat în paralel cu un resort. Comportamentul acestui model poate fi caracterizat la rate foarte scăzute sau foarte ridicate ale solicitării.

În cazul în care rata de deformare tinde la zero, adică la o încărcare lentă, infinitesimală, când $\dot{\epsilon}=0$, amortizorul nu are efect și modelul are un "modul

întârziat” care este echivalent cu modulul de elasticitate al celor două resorturi legate în serie. Pentru o încărcare instantanee, care conduce la rate mari de deformare, de exemplu $\dot{\varepsilon}=\infty$, atunci amortizorul se blochează, iar modelul prezintă un modul de elasticitate instantaneu, echivalent cu modulul celor două resorturi legate în paralele [34], [40].

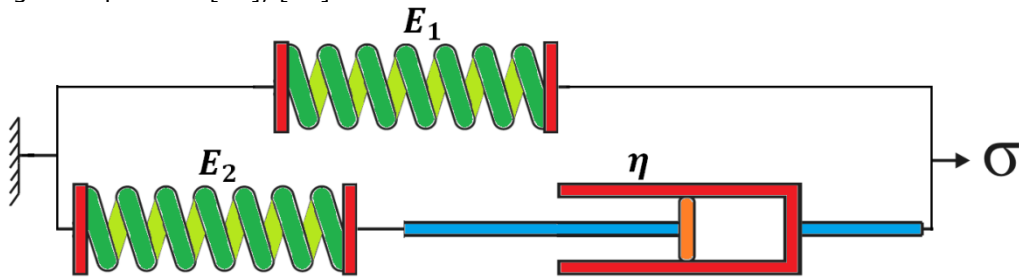


Fig. 3.34 – Modelul Zener

Deformația totală, ε , a acestui model este egală cu deformația din fiecare ramură, iar tensiunea este resimțită diferit în fiecare ramură: σ_1 pentru resortul având constanta elastică E_1 și σ_2 pentru ansamblul Maxwell:

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 \quad (3.33)$$

Ecuțiile caracteristice ale modelului sunt:

$$\begin{cases} \sigma_1 = E_1 \varepsilon_1 = E_1 \varepsilon \\ \sigma_2 = E_2 \varepsilon_2 = \eta \dot{\varepsilon}_3 \\ \varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \end{cases} \quad (3.34)$$

Pentru determinarea diagramei de fluaj, se aplică o tensiune constantă σ_0 care se menține tot timpul la această valoare, în această situație $\dot{\sigma}_0=0$, iar ecuația de fluaj este:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{E_1 + E_2} \dot{\sigma} + \frac{E_2}{\eta(E_1 + E_2)} \sigma - \frac{E_1 E_2}{\eta(E_1 + E_2)} \varepsilon \quad (3.35)$$

Dar dacă la timpul $t=0$ se impune o deformație ε_0 și se menține constantă tot timpul, atunci tensiunea variază în timp [34] și ecuația de relaxare este:

$$\dot{\sigma} = (E_1 + E_2) \dot{\varepsilon} + \frac{E_1 E_2}{\eta} \varepsilon - \frac{E_2}{\eta} \sigma \quad (3.36)$$

Simularea comportamentului modelului Zener

Pentru simularea comportării modelului Zener în Simulink a fost considerat sistemul din Figura 3.34 descris de ecuațiile de mișcare (3.34).

Modelul Zener are două cazuri distincte de comportament reologic. Aceste comportamente se vor analiza, pe modele de simulare create cu ajutorul aplicației Simulink pentru fiecare caz în parte.

Modelul Zener - FLUJ

Modelarea se face pornind de la ecuația de stare, adică de la ecuația de fluaj descrisă mai sus. Fluajul pentru acest model apare atunci când este aplicată o tensiune constantă, σ_0 .

Realizarea modelului (Figura 3.35) s-a efectuat alegând blocuri corespunzătoare fiecărui termen din ecuația de stare din "biblioteca" Simulink, s-au definit termenii σ_0 , η , E_1 , E_2 , iar apoi s-a ales un *osciloscop* pentru vizualizarea semnalului.

3.4. Comportarea corpului vâscoelastic: Modelul Zener 45

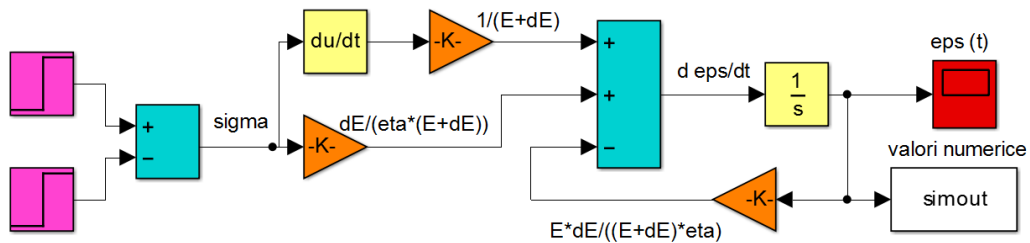


Fig. 3.35 – Modelul Zener pentru simularea comportamentului de fluaj

Pentru simulare au fost aleși următorii parametri: $\sigma_0=20\text{MPa}$, $E_1=10\text{MPa}$, $E_2=5\text{MPa}$ și $\eta=1\text{Pa s}$. Timpul ales pentru simulare a fost $t=10\text{s}$. Rezultatele numerice sunt prezentate în *Anexa 1 - Tabelul A.16*, ele fiind obținute cu ajutorul blocului *simout* al aplicației.

Rezultatul simulării este prezentat în Figura 3.36.

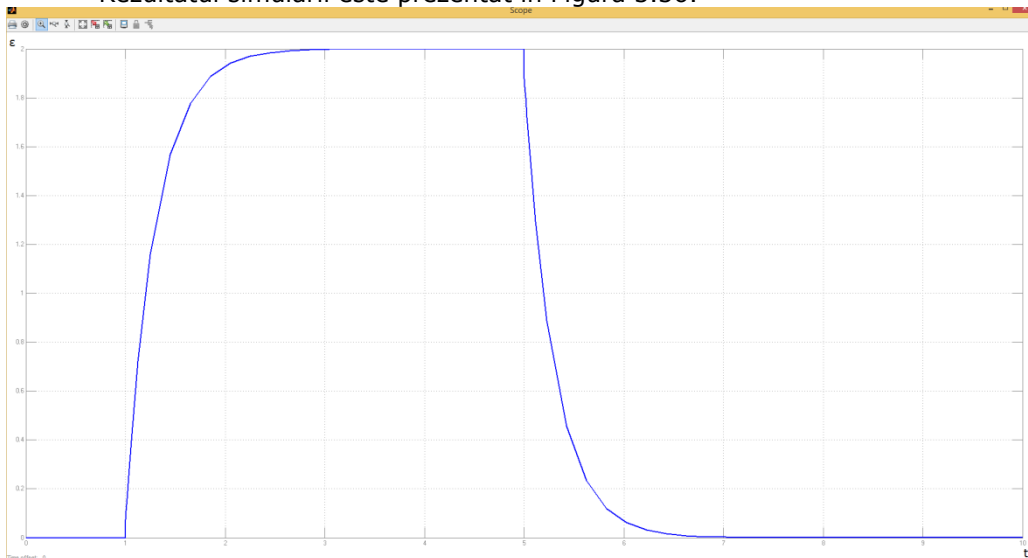


Fig. 3.36 – Simularea comportamentului de fluaj al modelului Zener realizată în Simulink

Pe diagrama din Figura 3.36, obținută prin simulare se poate observa fluajul caracteristic modelului Zener, de la $t_1=1\text{s}$ până la $t_2=3\text{s}$ după care apare curba de revenire. Deci este o revenire completă, modelul având un comportament elastic.

Modelul Zener - RELAXARE

Modelarea se face pornind de la ecuația de stare, adică de la ecuația de relaxare descrisă mai sus (Ecuația 3.36). Relaxarea pentru acest model apare atunci când este aplicată o deformare constantă, ϵ_0 .

Realizarea modelului (Figura 3.37) s-a efectuat alegând blocuri corespunzătoare fiecărui termen din ecuația de stare din "biblioteca" Simulink, s-au definit termenii ϵ_0 , η și E_1 , E_2 , iar apoi s-a ales un *osciloscop* pentru vizualizarea semnalului. De asemenea s-a mai utilizat și un bloc pentru preluarea valorilor numerice.

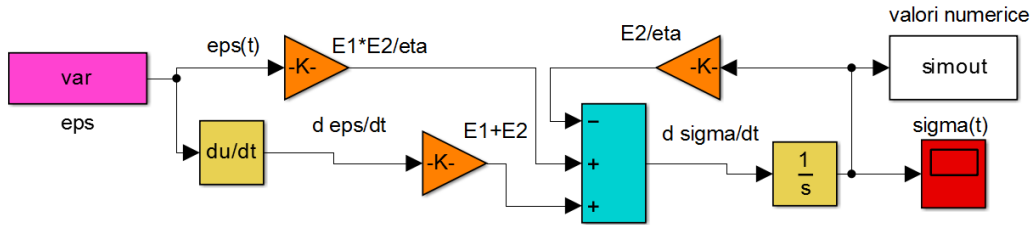


Fig. 3.37 – Modelul Zener pentru simularea comportamentului de relaxare

Rezultatul simulării este prezentat în Figura 3.38.

Pentru simulare au fost aleși următorii parametri: $\varepsilon_0=10\text{mm}$, $E_1=2\text{MPa}$, $E_2=1.5\text{MPa}$ și $\eta=1\text{Pa s}$. Timpul de simulare a fost $t=10\text{s}$. Rezultatele numerice sunt prezentate în *Anexa 1 – Tabelul A.17*, ele fiind obținute cu ajutorul blocului *simout* al aplicației.

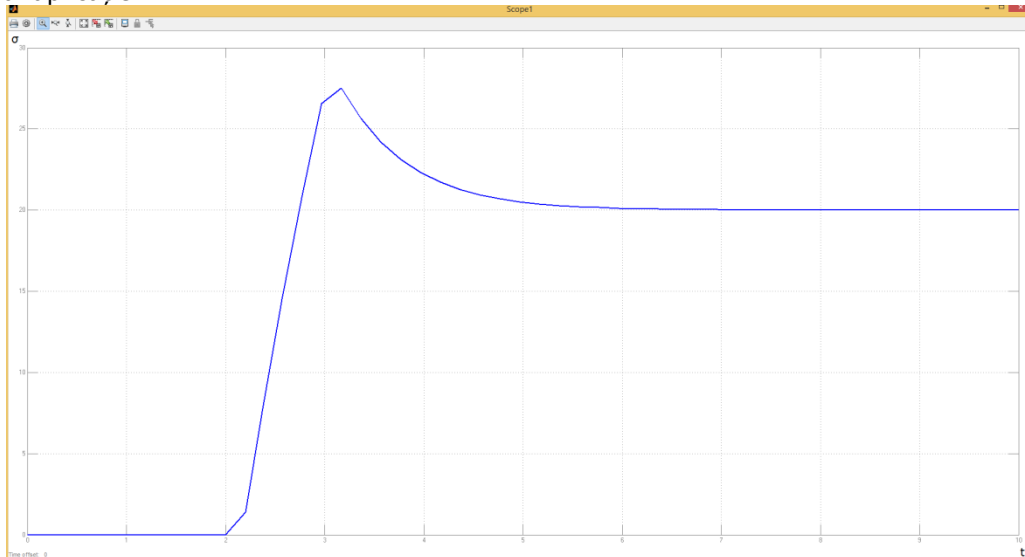


Fig. 3.38 – Simularea comportamentului de relaxare pentru modelul Zener realizată în Simulink

După îndepărtarea deformației impuse, ε_0 , la $t=3\text{s}$, are loc o relaxare parțială a solicitării.

3.5. Comportarea corpului vâscoelastic: Modelul Bürgers

Modelul Bürgers este un model vâscoelastic alcătuit dintr-un model Maxwell legat în serie cu un model Kelvin (Figura 3.39), rezultând că tensiunea în cele două corpuri este aceeași (σ), în timp ce deformațiile vor diferi [34].

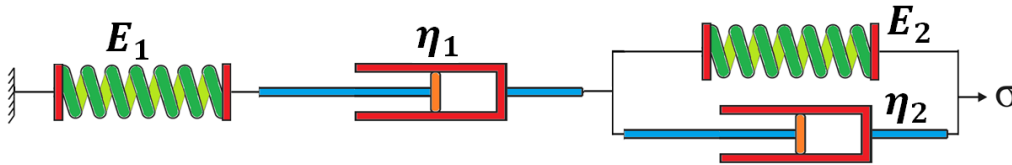


Fig. 3.39 – Modelul Bürgers

**Simularea comportamentului modelului Bürgers
Modelul Bürgers - FLUAJ**

Variația deformației specifice $\epsilon(t)=\sigma_0 f(t)$, atunci când corpul este încărcat cu o tensiune constantă σ_0 este prezentat în prima simulare a modelului Bürgers, fiind ecuația de fluaj.

$$\ddot{\epsilon} = -\frac{E_1}{\eta_1} \dot{\epsilon} + \frac{1}{E_2} \ddot{\sigma} + \left(\frac{1}{\eta_1} + \frac{1}{\eta_2} + \frac{E_1}{E_2 \eta_1}\right) \dot{\sigma} - \frac{E_1}{\eta_1 \eta_2} \sigma \quad (3.37)$$

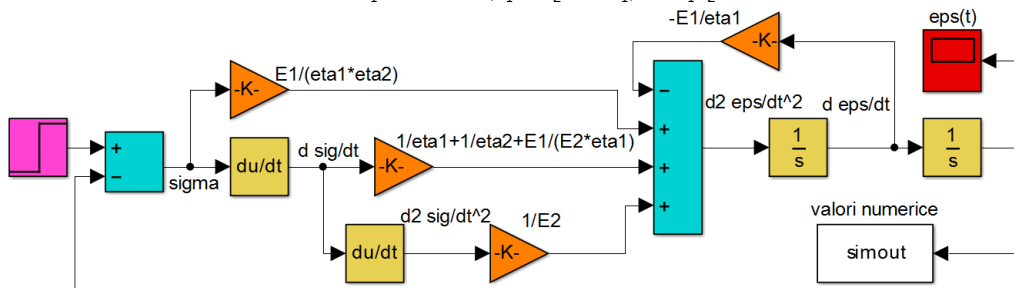


Fig. 3.40 - Modelul Bürgers pentru simularea comportamentului de fluaj

Realizarea modelului (Figura 3.40) s-a efectuat alegând blocuri corespunzătoare fiecărui termen din ecuația de stare (3.37) din "biblioteca" Simulink și s-au definit termenii σ_0 , η_1 , η_2 , E_1 și E_2 , iar apoi s-a ales un *osciloscop* pentru vizualizarea semnalului.

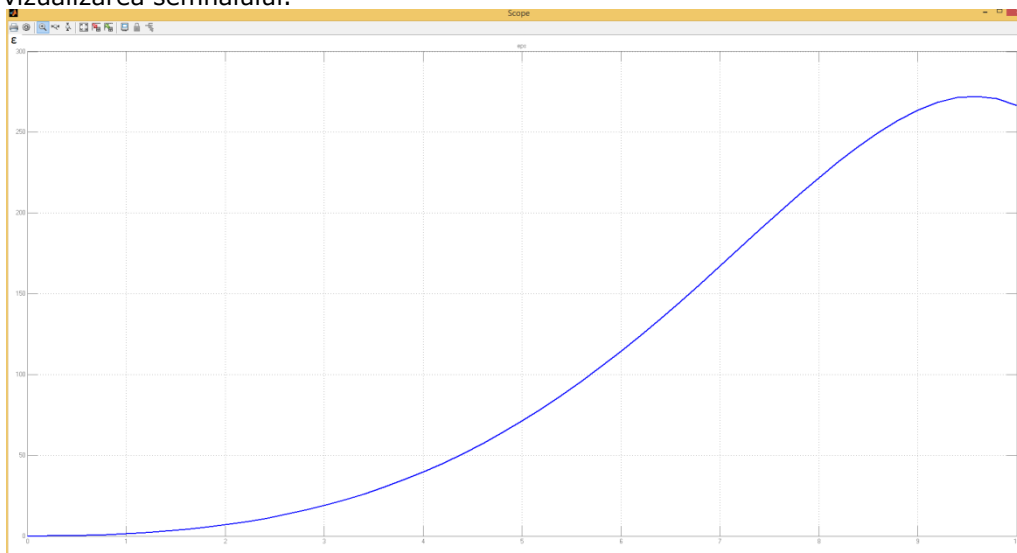


Fig. 3.41 - Simularea comportamentului de fluaj pentru modelul Bürgers realizată în Simulink

Pentru simulare au fost aleși următorii parametri: $\sigma_0=1\text{MPa}$, $E_1=10\text{MPa}$, $E_2=8\text{MPa}$, $\eta_1=8\text{Pa s}$ și $\eta_2=5\text{Pa s}$. Timpul în care s-a efectuat simularea a fost $t=10\text{s}$. Rezultatele numerice sunt prezentate în *Anexa 1 - Tabelul A.18*, ele fiind obținute cu ajutorul blocului simout al aplicației.

Pe diagrama din Figura 3.41 obținută prin simulare se poate observa fluajul caracteristic modelului Bürgers.

Modelul Bürgers - RELAXARE

Modelarea se face pornind de la ecuația de stare, adică de la ecuația de relaxare descrisă mai jos. Relaxarea pentru acest model apare atunci când este aplicată o deformare constantă, ϵ_0 .

$$\ddot{\sigma} = E_2 \ddot{\epsilon} + \frac{E_1 E_2}{\eta_1} \dot{\epsilon} - \left(\frac{E_2}{\eta_1} + \frac{E_2}{\eta_2} + \frac{E_1}{\eta_1} \right) \dot{\sigma} - \frac{E_1 E_2}{\eta_1 \eta_2} \sigma \tag{3.38}$$

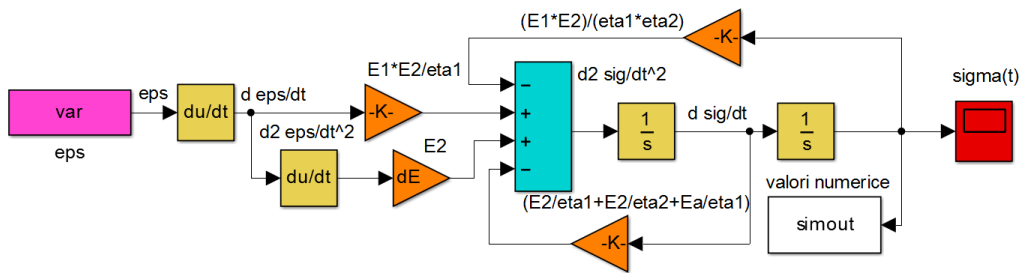


Fig. 3.42 – Modelul Bürgers pentru simularea comportamentului de relaxare

Rezultatul simulării este prezentat în Figura 3.43.

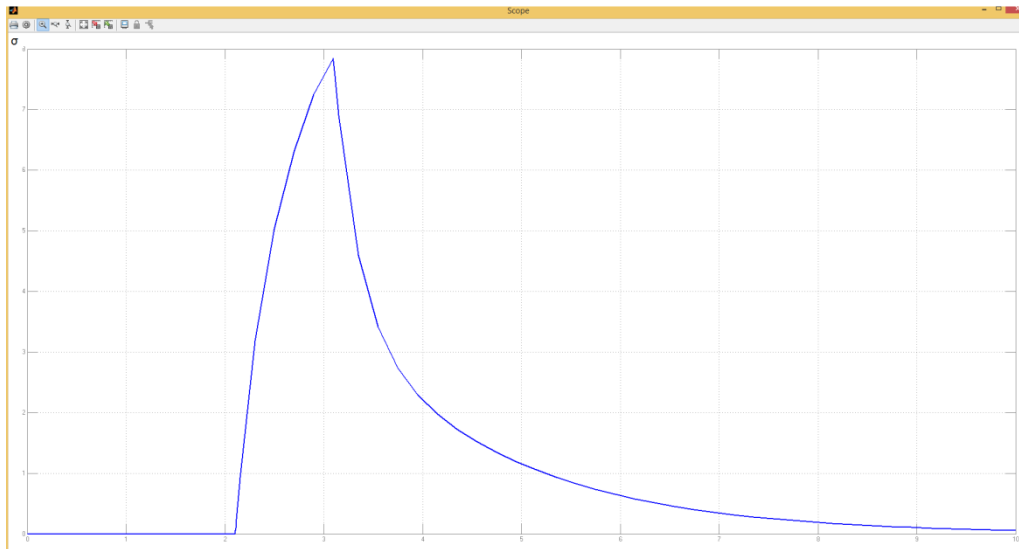


Fig. 3.43 - Simularea comportamentului de relaxare pentru modelul Bürgers realizată în Simulink

Realizarea modelului (Figura 3.42) s-a efectuat alegând blocuri corespunzătoare fiecărui termen din ecuația de stare (3.38) din "biblioteca" Simulink,

s-au definit termenii ϵ_0 , η_1 , η_2 , E_1 și E_2 , iar apoi s-a ales un *osciloscop* pentru vizualizarea semnalului.

Pentru simulare au fost aleși următorii parametri: $\epsilon_0=10\text{mm}$, $E_1=2\text{MPa}$, $E_2=1.5\text{MPa}$, $\eta_1=1\text{Pa s}$ și $\eta_2=1.2\text{Pa s}$. Timpul de simulare a fost $t=10\text{s}$. Rezultatele numerice sunt prezentate în *Anexa 1 - Tabelul A.19*, ele fiind obținute cu ajutorul blocului *simout* al aplicației.

Se observă că după înlăturarea deformației impuse, ϵ_0 , la $t=3\text{s}$, are loc relaxarea solicitării care tinde asimptotic către 0.

3.6. Modelul Lethersich

Modelul este format dintr-un amortizor legat în serie de un element Kelvin-Voigt. Acest model manifestă o curgere pur vâscoasă și o elasticitate întârziată. Modelul Lethersich este prezentat în Figura 3.44 de mai jos [34]:

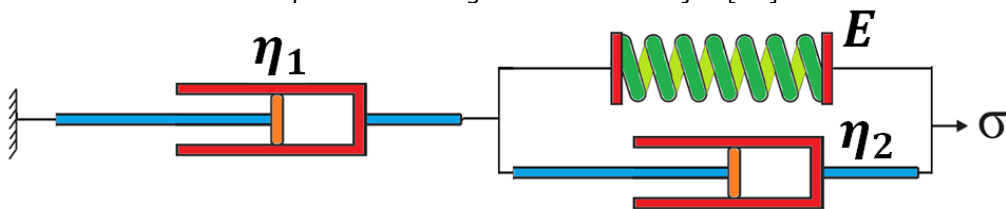


Fig. 3.44 – Modelul Lethersich

Simularea comportamentului modelului Lethersich Modelul Lethersich – FLUAJ

Modelarea se face pornind de la ecuația de stare, adică de la ecuația de fluaaj descrisă mai jos. Fluaajul pentru acest model apare atunci când este aplicată o tensiune constantă, σ_0 .

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{\eta_1} \ddot{\sigma} + \frac{1}{\eta_2} \dot{\sigma} - \frac{E}{\eta_1 \eta_2} \sigma - \frac{E}{\eta_1} \dot{\epsilon} \quad (3.39)$$

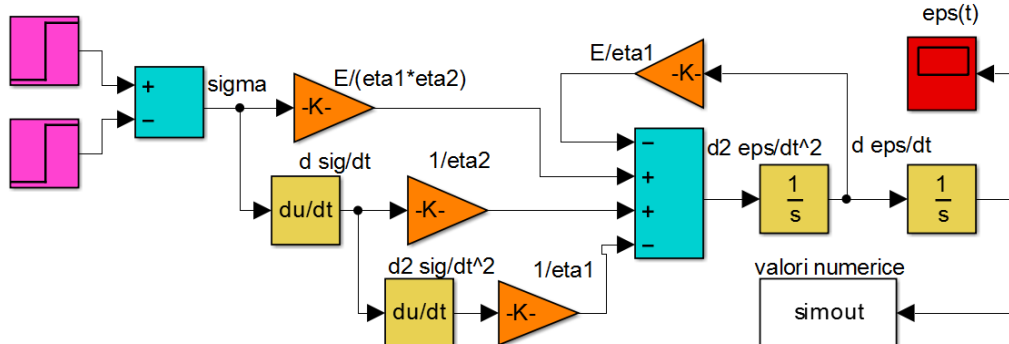


Fig. 3.45 – Modelul Lethersich pentru simularea comportamentului de fluaaj

Realizarea modelului (Figura 3.45) s-a efectuat alegând blocuri corespunzătoare fiecărui termen din ecuația de stare (3.39) din "biblioteca" Simulink, s-au definit termenii σ_0 , η_1 , η_2 , și E , iar apoi s-a ales un *osciloscop* pentru vizualizarea semnalului.

Pentru simulare au fost aleși următorii parametri: $\sigma_0=1\text{MPa}$, $E=10\text{MPa}$, $\eta_1=5\text{Pa s}$ și $\eta_2=5\text{Pa s}$. Timpul în care s-a efectuat simularea a fost $t=10\text{s}$. Rezultatele numerice sunt prezentate în *Anexa 1 – Tabelul A.20*, ele fiind obținute cu ajutorul blocului *simout* al aplicației.

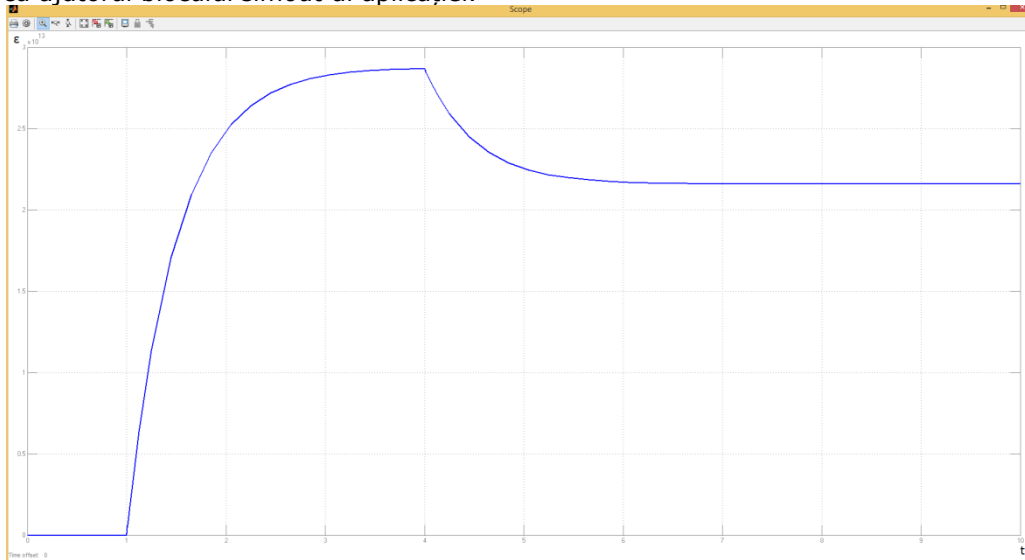


Fig. 3.46 – Simularea comportamentului de fluaj pentru modelul Lethersich realizată în Simulink

Pe diagrama din Figura 3.46 obținută prin simulare se poate observa fluajul caracteristic modelului Lethersich.

Modelul Lethersich – RELAXARE

Modelarea se face pornind de la ecuația de stare, adică de la ecuația de relaxare descrisă mai jos. Relaxarea pentru acest model apare atunci când este aplicată o deformare constantă, ϵ_0 .

$$\ddot{\sigma} = \eta_1 \dot{\epsilon} + E \dot{\epsilon} - \frac{\eta_1}{\eta_2} \dot{\sigma} - \frac{E}{\eta_2} \sigma \tag{3.40}$$

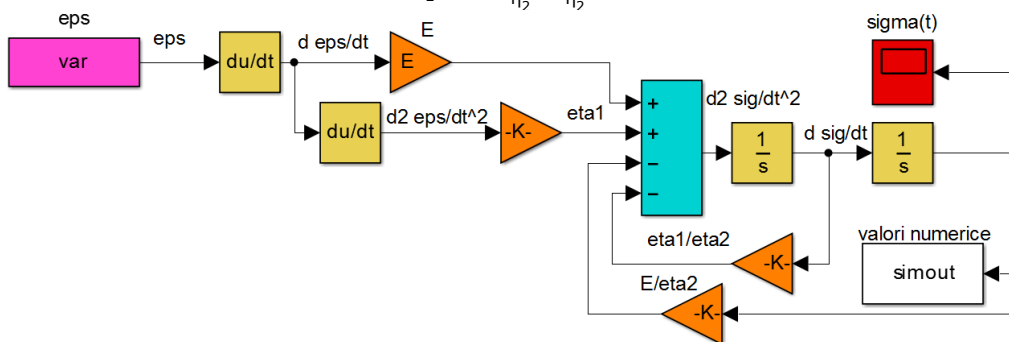


Fig. 3.47 - Modelul Lethersich pentru simularea comportamentului de relaxare

Realizarea modelului (Figura 3.47) s-a efectuat alegând blocuri corespunzătoare fiecărui termen din ecuația de stare (3.40) din "biblioteca" Simulink,

s-au definit termenii ε_0 , η_1 , η_2 și E , iar apoi s-a ales un *osciloscop* pentru vizualizarea semnalului.

Rezultatul simulării este prezentat în Figura 3.48.

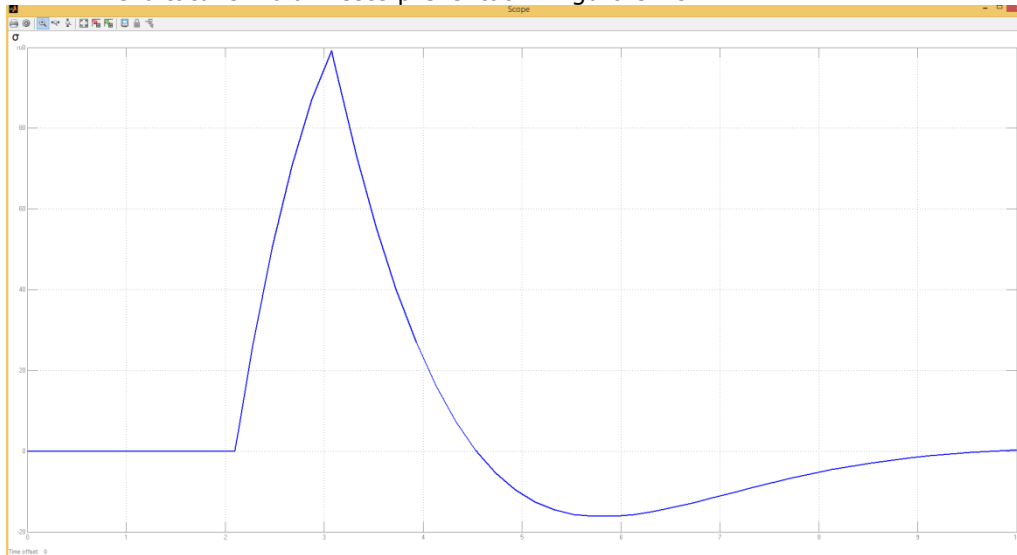


Fig. 3.48 - Simularea comportamentului de relaxare pentru modelul Lethersich realizată în Simulink

Pentru simulare au fost aleși următorii parametri: $\varepsilon_0=10\text{mm}$, $E=6\text{MPa}$, $\eta_1=10\text{Pa s}$ și $\eta_2=8\text{Pa s}$. Timpul de simulare a fost $t=10\text{s}$. Rezultatele numerice sunt prezentate în *Anexa 1 - Tabelul A.21*, ele fiind obținute cu ajutorul blocului *simout* al aplicației.

După îndepărtarea deformației impuse, ε_0 , la $t=3\text{s}$, are loc relaxarea solicitării.

În toate modelările de mai sus, semnalul de intrare generat în aplicație pentru simularea comportamentului de fluaj, reprezintă valoarea tensiunii σ_0 care acționează asupra corpului, iar semnalul de intrare generat pentru simularea comportamentului de relaxare a solicitării reprezintă valoarea deformației ε_0 resimțită de sistem.

Pentru simularea comportamentelor de fluaj și de relaxare, s-a ales durata în care a fost efectuată simularea și metoda de rezolvare de tip cu pași fixi denumită ode^24 (Runge-Kutta de ordinul 4).

² ode – ecuație diferențială ordinară (ordinary differential equation)

4. MODELAREA ȘI SIMULAREA COMPORTĂRII FLUIDULUI MAGNETOREOLOGIC

Magnetoreologia

Materialele magnetoreologice (MR) au fost studiate intens mai mult de jumătate de secol, de la mijlocul secolului 20, de când **Rabinow**, (1948) a descoperit **fluidele MR** care aparțin unei anumite clase, numite clasa materialelor inteligente. Proprietățile reologice ale acestora pot fi controlate printr-un câmp magnetic extern [42], [43].

Termenul "materiale inteligente" este folosit pentru a descrie materiale care pot "simți" schimbări în mediul lor și care răspund în mod controlat și util. În această ramură a materialelor inteligente sunt incluse piezoelectricele, materialele magnetorezistive, aliajele cu memoria formei, materialele biometrice, acoperirile electrocromice, și materialele electroreologice (ER) precum și toate materialele MR, inclusiv **fluidele MR**, elastomerii MR și spumele MR [44], [45].

Materialele MR sunt o clasă de materiale inteligente ale căror proprietăți mecanice și magnetice pot fi modificate prin aplicarea unui câmp magnetic exterior. De obicei, acestea constau în particule magnetice de dimensiuni micronice dispersate într-o matrice nemagnetică. La aplicarea unui câmp magnetic, aceste particule pot forma structuri care au ca rezultat performanțe comandate induse de câmp [46], [47].

4.1. Fluidele magnetoreologice

Fluidele MR, raportate prima dată de către Rabinow în 1948, prezintă o schimbare continuă, rapidă și reversibilă a caracteristicilor reologice atunci când sunt supuse la câmpuri magnetice exterioare suficient de puternice. Caracteristica esențială a acestor fluide este **capacitatea lor de a schimba în mod reversibil lichidul liniar vâscos care curge liber într-un semi-solid, datorită creșterii vâscozității aparente**, care are elasticitate controlabilă în câteva milisecunde atunci când este expus unui câmp magnetic. Fluidele MR au aplicații importante la dispozitive pentru transfer de cuplu, care includ *frâne*, *ambreiaje*, *amortizoare* și *suporturi*, utilizate în combaterea sau controlul semi-activ sau adaptiv al vibrațiilor. Până în prezent, pulberea de carbonil de fier este principalul material magnetic pentru prepararea fluidelor MR [47], [48], [49].

Fluidul MR este un tip de material inteligent cu particule magnetice moi de dimensiuni micronice (~1-100 μm) suspendate într-un fluid hidraulic sau ulei siliconic de transport. Proprietățile reologice ale fluidelor MR, cum ar fi efectul de curgere și vâscozitatea aparentă, pot fi controlate rapid și continuu prin variația câmpului magnetic aplicat [50], [51].

Un fluid magnetoreologic este, de obicei, un tip de ulei mineral sau silicon care transportă particule magnetice de dimensiuni micronice. Aceste particule magnetice pot fi particule de carbonil de fier, prezentate în Figura 4.49. În plus față

de aceste particule este posibil să conțină, de asemenea, aditivi pentru a menține în suspensie particulele de fier.

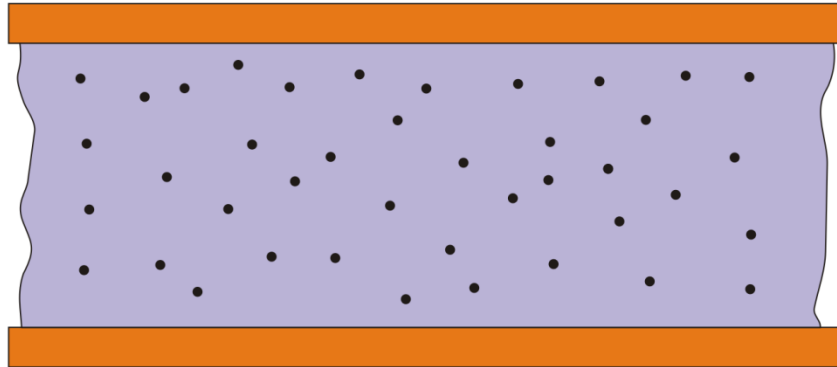


Fig. 4.49 - Particulele magnetice din fluidul MR

Când acest lichid este supus unui câmp magnetic, particulele de fier se comportă ca dipolii unui magnet și începe alinierea lor de-a lungul fluxului constant, prezentat în Figura 4.50. Când fluidul este cuprins între dipolii magnetului, mișcarea acestuia este limitată de către lanțurile de particule, crescând astfel vâscozitatea aparentă. Astfel, acesta își schimbă starea din lichid în solid vâscoelastic. După aliniere, în acest mod, mișcarea particulelor de fier este restricționată și fluidul MR se comportă ca un material vâscoplastic de tip Bingham. În concluzie, sub un câmp magnetic, fluidul MR se comportă ca un fluid ne-Newtonian cu vâscozitatea controlabilă. Cu toate acestea, în cazul în care câmpul magnetic este îndepărtat, suspensia transformă fluidul într-un fluid Newtonian în câteva milisecunde, iar tranziția între cele două faze este reversibilă, și oferă o caracteristică unică de controlabilitate a câmpului magnetic al fluxului fluidelor MR [53], [54], [55].

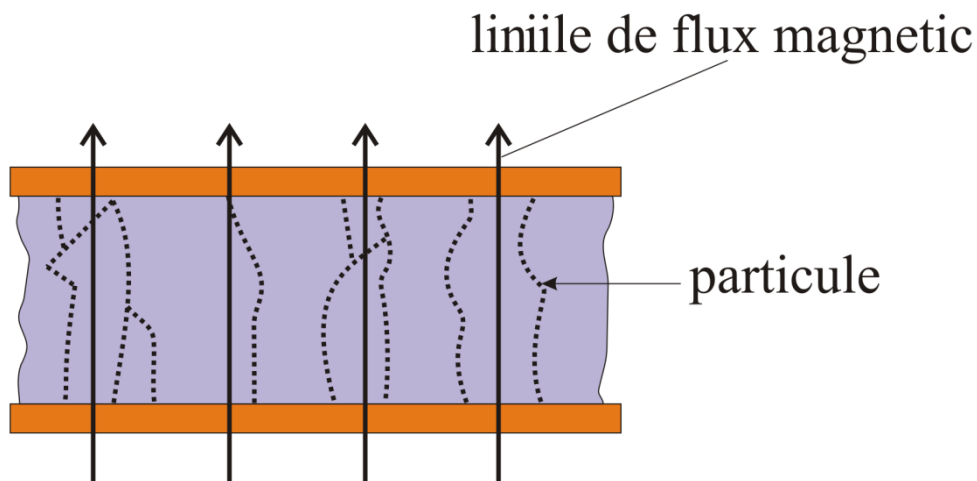


Fig. 4.50 - Particulele aliniate de-a lungul liniilor de flux magnetic

Fluidele MR pot fi folosite în trei moduri diferite:

- După modul de curgere

Fluidul curge ca urmare a diferenței de presiune dintre două plăci fixe. Acesta poate fi utilizat pentru amortizoare și absorbante de șoc, utilizând mișcarea controlată pentru a forța fluidul să treacă de-a lungul unei conducte peste care apoi se aplică un câmp magnetic (Figura 4.51).

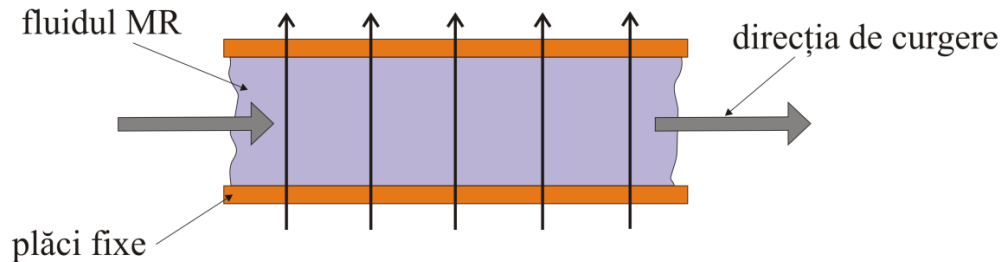


Fig. 4.51 - Fluidul MR după modul de curgere

- După modul de forfecare

Fluidul se află între două plăci care se deplasează paralel una față de alta. Acesta este utilizat în ambreiaje și frâne, adică în locurile în care mișcarea de rotație trebuie să fie controlată (Figura 4.52).

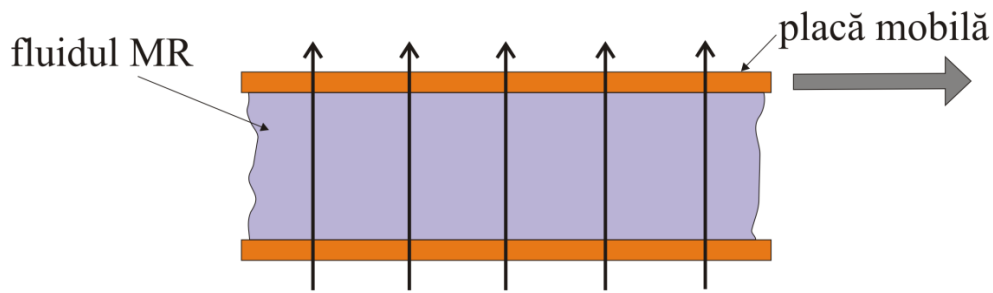


Fig. 4.52 - Fluidul MR după modul de forfecare

- După modul de curgere ștrangulat

Fluidul dintre două plăci se deplasează în direcție perpendiculară pe aceste plăci. Este foarte util pentru controlul deplasărilor mici cu forțe mari (Figura 4.53) [53].

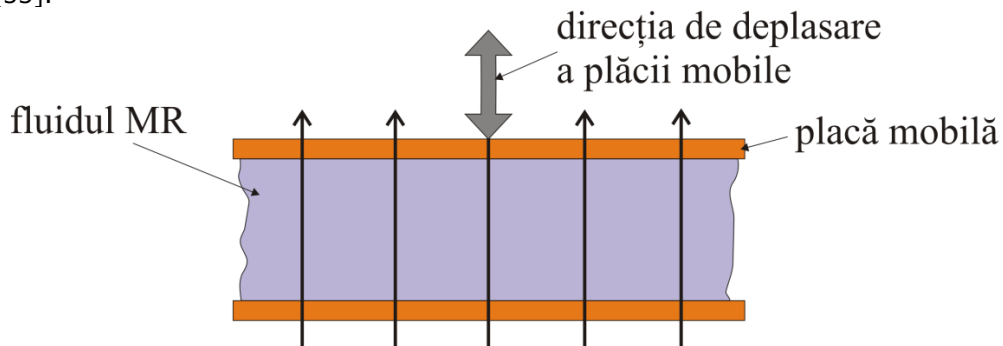


Fig. 4.53 - Fluidul MR în modul de curgere ștrangulat

Avantajele tehnologiei MR față de soluțiile convenționale electromecanice sunt:

- Timpul scurt de răspuns (mai puțin de 10 milisecunde);
- Controlul variabil continuu al amortizării în timp real;
- Simplitatea designului (puține sau fără componente în mișcare);
- Eficacitatea uniformă pe întreg intervalul variațiilor de temperatură;
- Forța disipativă mare, independentă de viteză;
- Densitatea mare de energie;
- Cerința minimă de putere (de obicei tensiune de 12V și curent de maxim 1 A, asigură autoprotejare pentru rezerva bateriei, aceasta putând fi autoprotejată în modul pasiv de amortizare);
- Stabilitatea sistemului inerent (nici o forță activă generată);
- Fără abraziuni sau sedimentări apreciabile;
- Siguranța în funcționare chiar și în modul pasiv de amortizare [56].

Răspunsul magnetoreologic al fluidelor MR rezultă din polarizarea magnetică indusă în particulele suspendate prin aplicarea unui câmp magnetic exterior. Interacțiunea rezultată dintre dipolii induși face ca particulele să formeze structuri tip coloană, paralele cu câmpul aplicat. Aceste structuri de tip lanț restricționează mișcarea fluidului, crescând astfel caracteristicile de vâscozitate ale suspensiei. Energia mecanică necesară pentru producerea acestor structuri de tip lanț crește odată cu creșterea câmpului aplicat rezultând dependența față de câmp a efortului la curgere. În absența unui câmp aplicat, fluidele MR manifestă un comportament similar celor Newtoniene. În acest model fluxul este guvernat de ecuațiile lui Bingham.

Pentru tensiuni tangențiale τ mari avem:

$$\tau = \tau_y(H) + \eta \dot{\gamma}, \quad \tau \geq \tau_y \quad (4.41)$$

adică tensiunea va avea o componentă dependentă de intensitatea H a câmpului magnetic $\tau_y(H)$. Sub limita de curgere (la eforturi de ordinul 10^{-3}), materialul se comportă vâscoelastic:

$$\tau = G\gamma, \quad \tau < \tau_y \quad (4.42)$$

unde G este modulul de elasticitate transversal [57].

Înțelegerea comportamentului tribologic al acestor fluide este departe de a fi completă în ciuda importanței acestora. În multe aplicații, microparticulele de fier dispersate au dimensiuni atipice, de același ordin de mărime cu grosimea supapei. Acest lucru este valabil mai ales pentru zona de operare de început a funcționării, de la debutul mișcării, imediat după punerea în aplicare a câmpului magnetic. În această situație, este de așteptat ca antrenarea fluidului să fie neglijabilă la contactul prin frecare iar sarcina este transferată prin asperitățile de contact și/sau microparticulele prinse. Acesta este așa-numitul regim de ungere laminară de tip Boundary unde suprafața și proprietățile filmului la scară moleculară trebuie să fie relevante, iar coeficientul de frecare să rămână constant cu grosimea peliculei și viteza de antrenare. Cea mai mare provocare cu care se confruntă cercetătorii în domeniul fluidelor MR este maximizarea duratei de viață a organelor de mașini și a fluidelor în mișcare relativă. Cu toate acestea, utilizarea particulelor abrazive de fier

și contactele puternice oțel/oțel sunt foarte dăunătoare, în acest sens, de obicei apare îngroșarea lubrifiantului în timpul funcționării [58].

Aplicațiile fluidelor MR includ *amortizoare* pentru controlul vibrațiilor vehiculului, *frâne rotative* pentru echipamente pentru exerciții de aerobic și dispozitive cu destinație specială pentru recuperare medicală, amortizoare seismice și *chirurgie virtuală*. Aplicațiile cele mai des utilizate pentru fluidele MR au fost în domeniul tehnologiei suspensiei autovehiculelor. Delphi Corporation furnizează sistemul Magne Ride pentru General Motors, folosind materiale furnizate de Lord Corporation [59].

Proprietatea de sedimentare și de curgere apare și din cauza densității nepotrivite dintre particulele magnetice și fluidele de transport. Sedimentarea particulelor cauzată de forța gravitațională constituie o serioasă piedică atunci când sunt folosite aceste fluide MR un timp îndelungat. Pentru rezolvarea acestei probleme s-a propus acoperirea particulelor magnetice cu polimeri organici. Aceasta este cea mai frecvent utilizată metodă și poate reduce densitatea particulelor, iar apoi diferența de densitate dintre particule și lichidul transportator scade. O altă problemă serioasă a acestor fluide este lubrifierea slabă a fluidelor MR din cauza componenței lor (particule de fier de dimensiuni mici), care pot duce la frecare și uzură [51], [60], [61].

4.2. Amortizorul cu fluid magnetoreologic RD-1005-3

Pentru efectuarea măsurătorilor de vibrații pe cele două standuri experimentale, s-a folosit un amortizor magnetoreologic, comercial, de tip RD-1005-3 (Figura 4.54) produs de compania Lord Corporation Ltd., USA.



Fig. 4.54 – Amortizorul MR produs de Lord Corporation RD-1005-3 [60]

Lungimea totală a amortizorului extins este de 208 mm, în timp ce lungimea acestuia comprimat este de 155 mm, cu o cursă de ± 25 mm. Diametrul cilindrului principal este de 41.4 mm, iar diametrul tijei pistonului este de 10 mm. În interiorul cilindrului principal sunt plasate pistonul, circuitul magnetic, acumulatorul și fluidul MR (Figura 4.54). Masa amortizorului este de 0.8 kg. Un acumulator de gaz care conține azot la presiune ridicată compensează modificările volumului de lichid dintre camere. Tensiunea de alimentare este de 12 V (curent continuu). Curentul de intrare poate fi variat între 0 și 2 A. Rezistența bobinei este de 5 Ω la temperatură ambiantă (25°C) și 7 Ω la 75°C. Forțele de amortizare (vârf la vârf) sunt de 2224 N (viteza de 51×10^{-3} m/s, curent 1 A) și 667 N (viteza de 200×10^{-3} m/s, curent 0 A). Deci capacitatea de amortizare a acestui dispozitiv este de până la o forță de 2.2 kN. Deoarece câmpul magnetic este aplicat fluidului MR în interiorul carcasei cilindrului, caracteristicile de amortizare ale fluidului cresc practic cu o precizie

4.2. - Amortizorul cu fluid magnetoreologic RD-1005-3 57

infinită, într-un interval de răspuns de 15 ms [49], [62], [63], [64], [65], [66], [67], [68], [69], [70]. Caracteristicile principale ale amortizorului de tip RD-1005-3 sunt date în Tabelul 4.3.

Tabelul 4.3 – Caracteristicile amortizorului de tip RD-1005-3 cu fluid MR [71], [72]

Parametru	Valoare
Caracteristicile amortizorului	
Lungime comprimat	155 mm
Lungime extins	208 mm
Diametrul cilindrului	41.4 mm
Diametrul tijei pistonului	10 mm
Masa	800 g
Durabilitate	2 milioane de cicluri de ± 13 mm, la 2 Hz cu un curent ce variază de la 0 la 0.8 A
Caracteristicile fluidului MR	
Vâscozitatea fluidului MR (MRF-132DG)	-0.092 ± 0.015 Pa s la 40°C
Densitatea	2.98-3.18 g/cm ³
Conținut de materie solidă în greutate	80.98%
Temperatura de funcționare	-40 la +130°C
Caracteristici electrice	
Curent de intrare	max 2 A
Tensiune de intrare	max 12 V
Rezistența bobinei	5Ω (25°C) - 7Ω (75°C)

De-a lungul timpului au fost propuse mai multe modele mecanice pentru a descrie comportamentul răspunsului amortizorului MR (Tabelul 4.4) [63].

Schema de funcționare a amortizorului MR este prezentată în Figura 4.55:

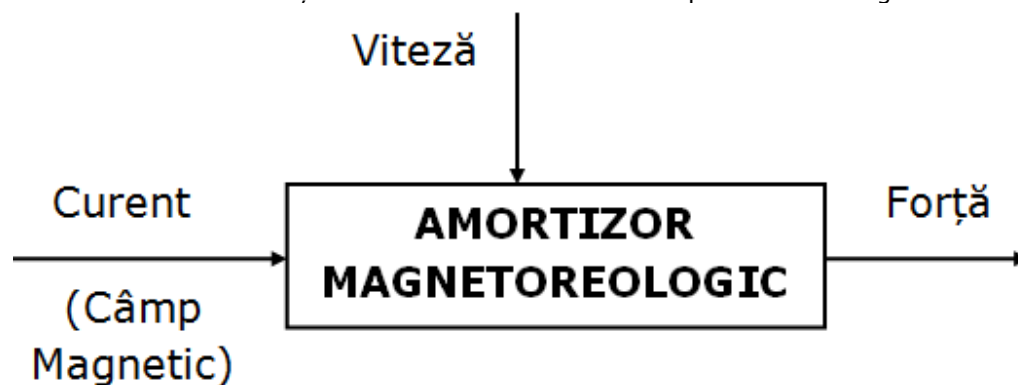


Fig. 4.55 – Schema de funcționare a amortizorului MR [62], [73]

Lord Corporation produce în momentul de față trei fluide magnetoreologice pe bază de hidrocarburi, cu aplicații pentru atenuarea șocurilor, amortizarea vibrațiilor și frâne. Aceste fluide sunt: MRF-122EG, MRF-132DG și MRF-140CG [74].

Structura internă și principiul de funcționare al amortizorului MR sunt prezentate în Figura 4.56 și Figura 4.57

Tabelul 4.4 – Clasificarea modelelor amortizoarelor MR [65], [74], [75], [76]

Tehnici de modelare	Modele ale amortizorului MR
Modele Bingham	Modelul Bingham original Modelul Bingham modificat Modelul Gamota și Filisko Modelul Bingham actualizat de Occhiuzzi și colab. Modelul cu trei elemente de Powell
Modele Bi-vâscoase	Modelul bi-vâscos neliniar Modelul bi-vâscos histeretic neliniar Modelul arctangent histeretic neliniar Modelul bi-vâscos cu parametri concentrați
Modele vâscoelastoplastice	Modele vâscoelastoplastice generale Modelul vâscoelastoplastic de Li și colab.
Modelul rigiditate-vâscozitate-elasto-alunecare	Modelul rigiditate-vâscozitate-elasto-alunecare
Modelul hidro-mecanic	Modelul hidro-mecanic
Modele Maxwell	Modelul BingMax de Makris și colab. Modelul Maxwell cu alunecare neliniară
Modele Bouc-Wen	Modelul Bouc-Wen simplu Modelul Bouc-Wen modificat Modelul Bouc-Wen pentru modulul de forfecare al amortizoarelor Modelul Bouc-Wen pentru amortizoare la scară mare Modelul Bouc-Wen dependent de curent Modelul Bouc-Wen dependent de curent-frecvență-amplitudine Modelul Bouc-Wen asimetric
Modele Dahl	Modelul Dahl modificat Modelul Dahl vâscos
Modele LuGre	Modelul LuGre modificat de Jimenez și Alvarez Modelul LuGre modificat de Sakai și colab.
Modele tangente hiperbolic	Modelul tangent hiperbolic de Kwok și colab.
Modele sigmoide	Modelul sigmoid de Wang și colab. și Ma și colab.
Modele echivalente	Modelul echivalent de Oh și Onoda
Modele de transmitere a fazei	Modelul de transmitere a fazei



Fig. 4.56 – Principiul de funcționare al amortizorului MR [76]

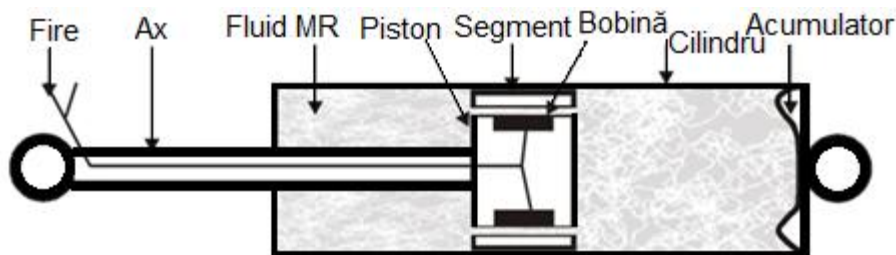


Fig. 4.57 – Structura internă a amortizorului MR [77], [78]

4.3. Elastomeri magnetoreologici

Elastomerul magnetoreologic (MRE) este un nou membru al familiei magnetoreologice. Acesta poate fi văzut ca un solid analog cu fluidului MR. Cele două componente constau în particule micro-dimensionale permeabile magnetic situate într-o matrice nemagnetică. Elastomerii MR sunt considerați materiale inteligente, deoarece proprietățile lor pot fi modificate și controlate reversibil prin aplicarea unui câmp magnetic exterior. De obicei, acestea constau în particule permeabile magnetic/magnetoactiv (fier, cobalt) de dimensiuni micrometrice încorporate într-o matrice polimerică de elastomeri (vâscoelastică) sau în materiale asemănătoare cauciucului. La aplicarea unui câmp magnetic H , așa numitul efect MR face ca particulele să formeze structuri ordonate care au ca rezultat îmbunătățirea performanței induse de câmp. Acești elastomeri MR au fost luați în considerare pentru aplicații ca elemente de rigiditate adaptive în amortizoare de vibrații, bușe auto și actuatori de putere servoelectrice, dar și pentru dezvoltarea rigidității variabile (reglabile) a amortizoarelor de vibrații și a altor dispozitive de atenuare a vibrațiilor [41], [79], [80], [81], [82], [83], [84].

Materialele tipice utilizate pentru matricea încorporată includ cauciuc natural, cauciuc siliconic, poliuretan, iar particule de umplere sunt din carbonil de fier, Terfenol-D, precum și alte materiale exotice. Matricele pentru MRE includ cauciuc silicon moale, cauciuc natural, cauciuc sintetic, cum ar fi cauciuc de nitril, poliuretan (PU) și așa mai departe. Din cauza interacțiunilor dintre particulele magnetice, aceste compozite pot suferi tensiuni "spontane" atunci când sunt supuse la un câmp magnetic, fenomen care este în general cunoscut sub numele de magnetostricțiune. În plus, rigiditatea lor macroscopică poate fi modificată rapid, ușor și reversibil prin aplicarea unui câmp magnetic. Aceasta înseamnă că ele sunt bune candidate pentru aplicații la actuatoare, deoarece răspunsul lor macroscopic poate fi controlat în mod activ, în timp real. Prin urmare, MRE pot fi folosite de asemenea ca senzori în structuri și alte aplicații. Au fost deja propuse MRE pentru a fi utilizate ca suporturi de stocare pentru date magnetice, senzori de poziție magnetici, ecrane electromagnetice, magneți flexibili și afișaje cu ecran tactil, precum și suporturi controlabile, ambreiaje și amortizoare de vibrații pentru automobile. Elastomerii magnetoreologici oferă rigiditate variabilă și pot fi folosiți și în structurile adaptive din industria aerospațială, în aplicații din ingineria auto, civilă și electrică pentru controlul mișcării și vibrațiilor [83], [84], [85], [86].

Elastomerii MR pot fi împărțiți în două tipuri: elastomeri MR izotropi și elastomeri MR anizotropi. Pentru cei izotropi, particulele magnetice sunt dispersate aleator în matrice, în timp ce pentru cei anizotropi, particulele sunt orientate sub un

câmp magnetic, formând structuri de tip lanț și blocate în matrice în timpul procesului de întărire [83], [86], [87].

Negru de fum este selectat ca o completare pentru a modifica și îmbunătăți proprietățile mecanice ale MRE, pentru că acesta este o umplutură de ranforsare importantă în ingineria polimerilor, în special în tehnologia cauciucului [88].

4.4. Comportarea corpurilor vâscoelastice

4.4.1. Comportarea modelului Bingham

Modelul Bingham-body (Figura 4.58) este format dintr-un resort în serie cu o patină și un amortizor vâscos în paralel.

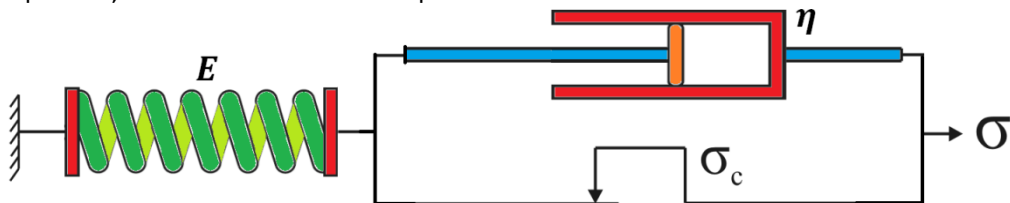


Fig. 4.58 – Modelul Bingham-body

Diagrama tensiune-viteză de deformație este o dreaptă oblică care pornește de la tensiunea inițială σ_c (Figura 4.59).

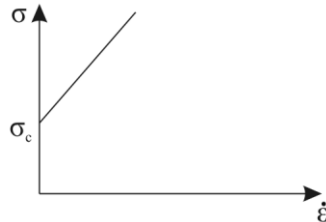


Fig. 4.59 – Diagrama tensiune-viteză de deformație a modelului Bingham-body

Idealizarea modelului de amortizor MR vâscoplastic prezentată de Dyke și colab., (1996), utilizează similarități în comportamentul reologic al fluidelor ER și MR precum și tehnici similare în modelarea amortizoarelor ER.

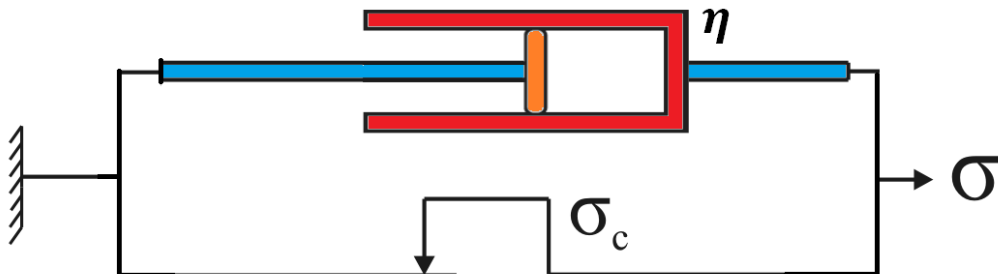


Fig. 4.60 – Structura reologică a modelului Bingham

În structura reologică (Figura 4.60) pe care se bazează modelul Bingham, există un element al frecării Coulombiene f_c amplasat paralel cu un amortizor vâscos. Conform modelului Bingham, pentru viteze nenule ale pistonului $\dot{\epsilon}$, tensiunea σ poate fi exprimată ca:

$$\sigma = f_c \text{sign} \dot{\epsilon} + \eta_0 \dot{\epsilon} + f_0 \quad (4.43)$$

unde f_c este forța de frecare uscată, η_0 este constanta de amortizare vâscoasă și f_0 este forța dată de acumulator. Această ultimă simplificare a modelului a rezultat din presupunerea că înlocuind elasticitatea activității acumulatorului, acesta are o rigiditate redusă și caracteristici liniare.

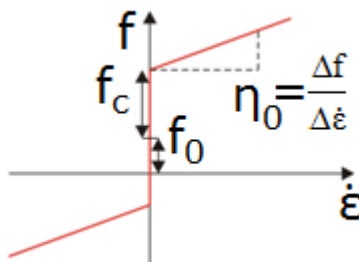


Fig. 4.61 – Răspunsul modelului Bingham

Se presupune că profilul forței Bingham va fi egal cu frecarea vâscoasă plus cea coulombiană, așa cum se vede în Figura 4.61. Forța de frecare f_c este egală cu punctul de pornire al graficului de pe axa y . Constanta de amortizare η_0 este egală cu relația liniară $\frac{\Delta f}{\Delta \dot{\epsilon}}$, care apare atunci când viteza $\dot{\epsilon}$ nu este zero [88], [89].

Modelul Bingham-body, a cărei structură este prezentată în Figura 4.58, diferă de modelul Bingham (Figura 4.60), prin introducerea unui resort E . Astfel, modelul Bingham-body încearcă fuzionarea a trei elemente, adică, conectarea în paralel a elementelor Saint-Venant (modelul plastic al corpului), Newton (modelul de curgere Newtonian) și elementul Hooke (modelul elastic al corpului). Acest model, prin tensiunea de forfecare scăzută, prezintă comportamentul unui solid. Cu toate acestea, prin aplicarea unei tensiuni de forfecare ridicate, corpul devine lichid. Acest lucru se întâmplă pentru că, la o anumită valoare a forței aplicate f_c (forța de frecare statică a elementului Saint-Venant care se referă la tensiunea de forfecare caracteristică $\tau_y(H)$), se va deforma numai resortul, similar cu corpul elastic Hooke. În cazul în care această forță este mai mare decât f_c , corpul Bingham se va alungi (corpul curge). Rata de deformare va fi proporțională cu diferența forței aplicate și a forței de frecare a elementului Saint-Venant.

Conform modelului Bingham-body (Figura 4.58), tensiunea de amortizare σ poate fi exprimată ca:

$$\sigma = \begin{cases} f_c \text{sign} \dot{\epsilon}_1 + \eta_0 \dot{\epsilon}_1 + f_0 & \text{pentru } |\sigma| > f_c \\ E(\epsilon_2 - \epsilon_1) + f_0 & \text{pentru } |\sigma| \leq f_c \end{cases} \quad (4.44)$$

unde f_c , η_0 , f_0 au aceeași semnificație ca în ecuația (4.44) și E reprezintă rigiditatea corpului elastic (modelul Hooke) [85].

Acest model are un comportament vâscoelastoplastic. În cazul în care solicitarea este mai mică decât σ_s , doar resortul suferă o deformare, iar solidul este elastic. Pentru $\sigma \geq \sigma_s$, solidul devine vâscoelastic și prezintă o rată de deformare dată de $(\sigma - \sigma_s) = \eta \dot{\epsilon}$. Amortizorul poate fi neNewtonian, iar atunci corespunde modelul Bingham-Norton [37].

Un model simplu vâscoelastic Bingham, este eficient în descrierea caracteristicilor esențiale dependente de câmp ale fluidului. În acest model tensiunea totală de forfecare este dată de:

$$\tau = \tau_0(H) \text{sign}(\dot{\gamma}) + \eta \dot{\gamma} \quad (4.45)$$

unde τ_0 este efortul de curgere provocat de câmpul aplicat; H este mărimea câmpului magnetic aplicat; $\dot{\gamma}$ este rata forfecării de deformare și η este vâscozitatea plastică independentă de câmp, definită ca pantă a tensiunii post-ramdament măsurate față de rata forfecării de deformare [90].

Simularea comportamentului modelului Bingham

Conform ecuației (4.43) s-a realizat un model în aplicația Simulink pentru a simula comportamentul sistemului, prezentat în Figura 4.62.

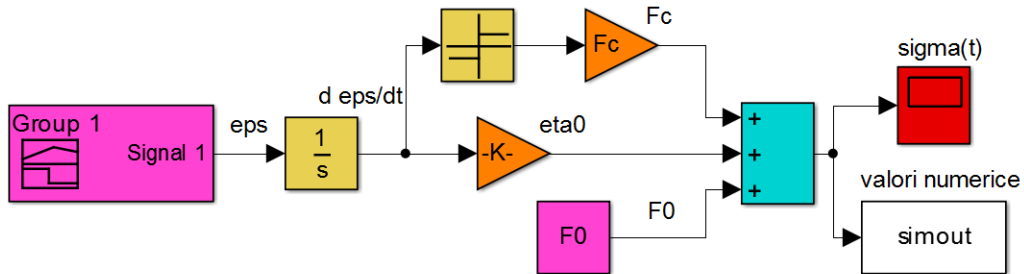


Fig. 4.62 – Modelul Bingham realizat în Simulink



Fig. 4.63 – Semnalul modelului Bingham reprezentat pe osciloscop

Realizarea modelului (Figura 4.62) s-a făcut astfel: s-a ales semnalul de intrare, căruia i s-au definit parametri, s-a folosit un bloc de *integrare*, obținându-se deplasarea, s-au folosit două blocuri de *amplificare* (pentru F_c și η_0), un bloc al funcției *sign*, s-au mai utilizat un bloc *sumator*, un bloc *constantă* (F_0). De

asemenea, s-a mai utilizat un *osciloscop* pentru vizualizarea semnalelor și un bloc pentru preluarea valorilor numerice.

Pentru simulare au fost aleși următorii parametri: $\varepsilon_0=10\text{mm}$, $f_c=15\text{N/m}$, $f_0=2\text{N/m}$ și $\eta_0=30\text{Pa s}$. Rezultatele numerice sunt prezentate în *Anexa 1 - Tabelul A.22*.

Semnalul de intrare generat în aplicație pentru simularea comportamentului modelului Bingham a fost creat cu ajutorul unui generator de semnale care reprezintă valoarea deformației ε resimțită de sistem.

Pentru simularea comportamentului modelului Bingham, s-a ales timpul în care a fost efectuată simularea, $t=10\text{s}$ precum și metoda de rezolvare de tip cu pași variabili denumită *ode45* (Dormad-Prince).

Rezultatul simulării este prezentat în Figura 4.63.

Se observă că diagrama rezultată prezintă comportamentul specific modelului Bingham.

4.4.2. Comportarea modelului reologic Bouc-Wen

În structurile care prezintă histerezis, prin presiune dinamică (în special atunci când structura considerată are caracter ne-elastic), forța de revenire depinde atât de momentul deplasării cât și de evenimentele anterioare ale structurii. Acest fapt creează anumite probleme în modelarea structurilor cu histerezis creând vibrații în unele situații. Pentru a rezolva această problemă, sunt aplicate diferite metode de evaluare, ceea ce conduce la diferite modele care să permită luarea în considerare a histerezisului în comportamentul amortizoarelor MR și ER. McClamroch și Gavin, (1995), și Hsu și Meyer, (1995), au utilizat pentru descrierea histerezisului funcțiile trigonometrice.

Această abordare, însă, nu permite luarea în considerare a saturației forței de amortizare, care are loc în timpul funcționării pistonului cu mare viteză. La rândul lor, Werely și colab., (1998) au prezentat un model bivâscos cu histerezis, Sims și colab., (2000) au modificat modelul plastic Bingham, dar și modelul Choi, în care dependența forței de amortizare față de viteză este un polinom de gradul 6 în raport cu viteza pistonului din amortizor. O dezvoltare ulterioară a modelului de amortizor MR, având în vedere apariția histerezisului și a saturației forței de amortizare, este modelul Bouc-Wen, a cărui structură reologică este prezentată în Figura 4.64. În acest model se aplică metoda de aproximare a histerezisului propusă de Wen (1976).

Prin urmare, în structurile care prezintă histerezis, forța de revenire $Q(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ este suma a două componente, fără histerezis $g(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$ și cu histerezis $h(\varepsilon)$:

$$Q(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = g(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) + h(\varepsilon) + \dots \quad (4.46)$$

sau

$$\sigma = \eta_0 \dot{\varepsilon} + E_0(\varepsilon - \varepsilon_0) + dE\dot{\xi} \quad (4.47)$$

Componenta $h(\varepsilon)$ este definită de o ecuație, care se referă la deplasarea ε și ξ (variabilă evolutivă), prin care poziția ecuației depinde dacă n este număr par sau impar. Pentru n impar, ecuația este:

$$\dot{\xi} = -dE|\dot{\varepsilon}|\xi^n - \beta\dot{\varepsilon}|\xi^n| + \alpha\dot{\varepsilon} \quad (4.48)$$

iar pentru un număr par:

$$\dot{\xi} = -dE|\dot{\varepsilon}|\xi^{n-1} - \beta\dot{\varepsilon}\xi^{n-1} + \alpha\dot{\varepsilon} \quad (4.49)$$

Forța de amortizare în modelul Bouc-Wen poate fi scrisă ca:

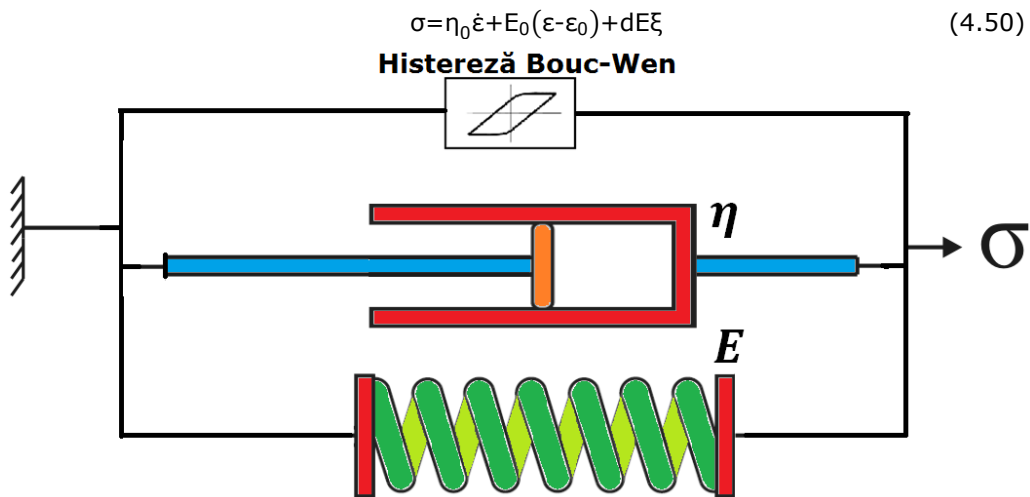


Fig. 4.64 - Structura reologică a modelului Bouc-Wen

unde variabila evolutivă ξ este descrisă de ecuația:

$$\dot{\xi} = \gamma |\dot{\xi}| \xi | \xi |^{n-1} - \beta \dot{\xi} | \xi |^n + \alpha \dot{\varepsilon} \quad (4.51)$$

unde, β , γ , α sunt parametri care reprezintă controlul liniarității în timpul descărcării și ușurința tranziției în zona de pre- și post-randament, dE este parametrul care reprezintă rigiditatea pentru componenta forței de amortizare asociată variabilei evolutive ξ , E_0 este parametrul care reprezintă rigiditatea resortului asociat amortizorului nominal datorită acumulatorului, η_0 este parametrul care reprezintă amortizarea vâscoasă; η_1 - parametrul reprezentând amortizarea inclusă în model pentru a produce atenuarea la viteze mici, iar ε_0 este parametrul care reprezintă deplasarea inițială a resortului cu rigiditate E_0 [79].

Conform ecuației (4.51) s-a realizat un model în aplicația Simulink pentru a simula comportamentul sistemului, prezentat în Figura 4.64.

Realizarea modelului (Figura 4.65) s-a făcut astfel: s-a ales semnalul de intrare de tip *From Workspace* căruia i s-au definit parametri, s-au folosit două blocuri de *integrare*, obținându-se viteza și deplasarea, s-au folosit șase blocuri de *amplificare* (pentru α , β , E_1 , E_2 , F_c și η_0), precum și alte blocuri pentru respectarea ecuației de mișcare. De asemenea s-a mai utilizat un *osciloscop* pentru vizualizarea tensiunii σ și un bloc pentru preluarea valorilor numerice.

Pentru simulare au fost aleși următorii parametri: $\dot{\varepsilon}$ - semnal generat, $\varepsilon_0=100\text{mm}$, $E_1=100\text{MPa}$, $E_2=200\text{MPa}$, $v=2\text{u.a.}$, $\alpha=200\text{u.a.}$, $\beta=200\text{u.a.}$ și $\eta=100\text{Pa s}$. Rezultatele numerice sunt prezentate în *Anexa 1 - Tabelul A.23*.

Semnalul de intrare generat în aplicație pentru simularea comportamentului modelului Bouc-Wen a fost creat cu ajutorul unui semnal generat cu parametri inițiali definiți care reprezintă valoarea vitezei de deformație $\dot{\varepsilon}$ resimțită de sistem.

Pentru simularea comportamentului modelului Bouc-Wen, s-a ales durata în care a fost efectuată simularea, $t=10\text{s}$ precum și metoda de rezolvare de tip cu pași variabili denumită *ode45* (Dormad-Prince).

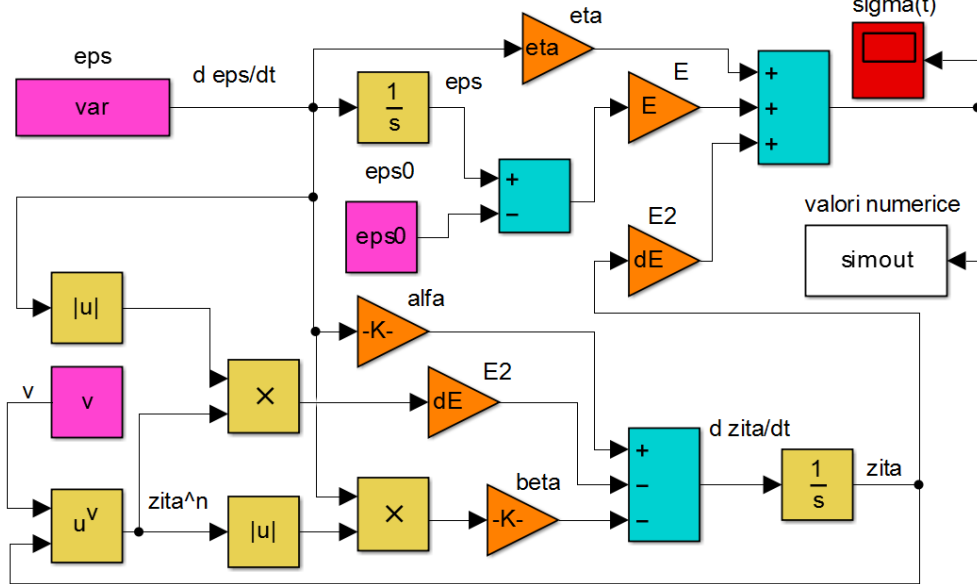


Fig. 4.65 – Modelul Bouc-Wen realizat în Simulink

Rezultatul simulării este prezentat în Figura 4.66.

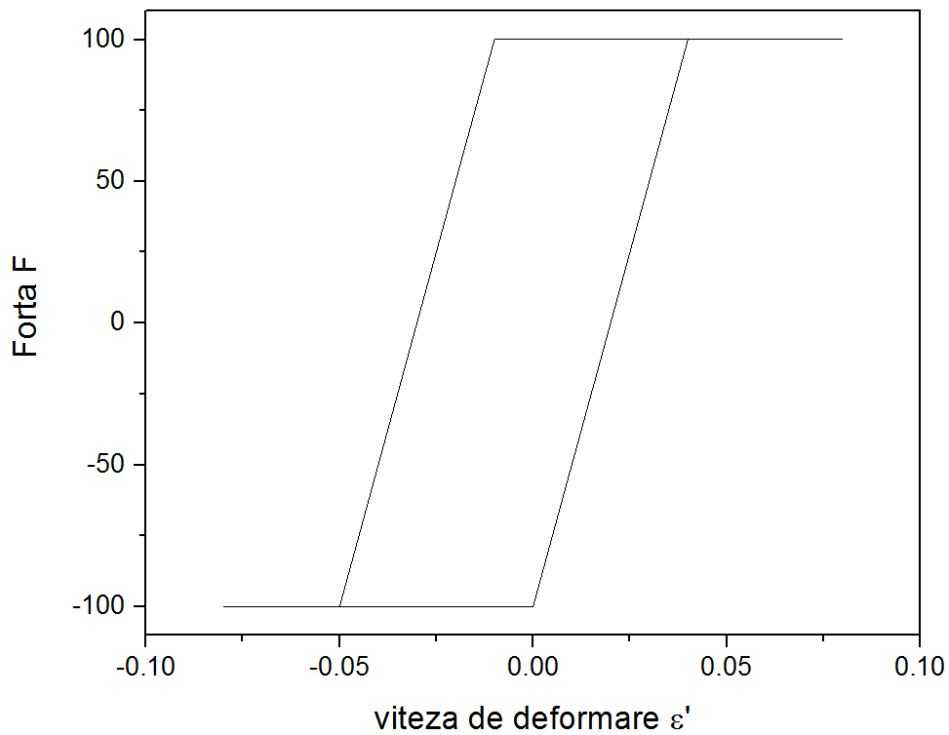


Fig. 4.66 – Semnalul modelului Bouc-Wen plotat în Origin

4.4.3. Comportarea modelului reologic Spencer

Extinderea modelului Bouc-Wen propus de Spencer se referă la introducerea suplimentară a unui amortizor η și a unui resort E . Această structură reologică este prezentată în Figura 4.67.

În acest model, rigiditatea acumulatorului este reprezentată de E și amortizarea vâscoasă observată la viteze mari este reprezentată de η_0 . Amortizarea reprezentată de η este inclusă în modelul care produce atenuarea, observată la viteze mici, resortul cu modulul de elasticitate E_0 este prezent pentru a controla rigiditatea la viteze mari, iar ε_0 este deplasarea inițială a resortului E asociată cu forța de amortizare nominală datorată acumulatorului [91].

Tensiunea de amortizare în modelul Spencer poate fi scrisă ca:

$$\sigma = \alpha\xi + \eta_0(\dot{\varepsilon} - \dot{\phi}) + E_0(\varepsilon - \phi) + E(\varepsilon - \varepsilon_0) \quad (4.52)$$

aceasta mai poate fi scrisă și ca:

$$\sigma = \eta\dot{\phi} + E(\varepsilon - \varepsilon_0) \quad (4.53)$$

unde deplasările ξ și ϕ sunt definite ca:

$$\dot{\xi} = -\gamma|\dot{\varepsilon} - \dot{\phi}|\xi|\xi|^{n-1} - \beta(\dot{\varepsilon} - \dot{\phi})|\xi|^n + A(\dot{\varepsilon} - \dot{\phi}) \quad (4.54)$$

$$\dot{\phi} = \frac{1}{\eta_0 + \eta} [\alpha\xi + \eta_0\dot{\varepsilon} + E_0(\varepsilon - \phi)] \quad (4.55)$$

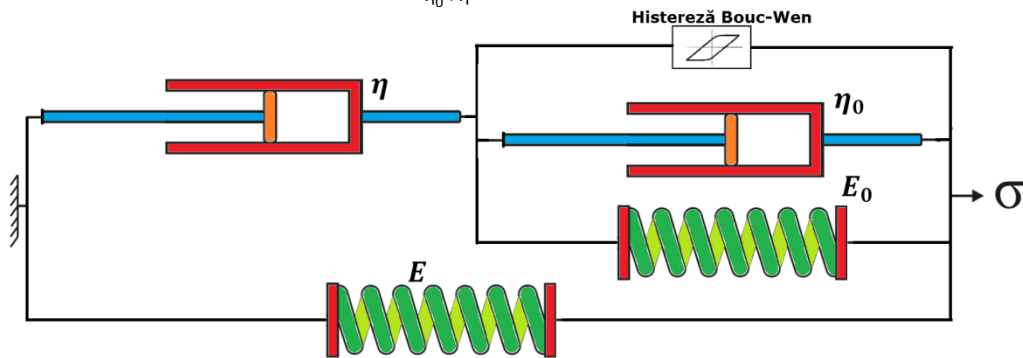


Fig. 4.67 – Structura reologică a modelului Spencer

Parametrul de amortizare vâscoasă η este ales pentru funcționarea la viteze mari, parametrul E corespunde rigidității acumulatorului, parametrul η_0 reprezintă rigiditatea la viteze mari, iar restul parametrilor din ecuațiile (4.52), (4.53), (4.54) și (4.55) au același înțeles ca și în modelul Bouc-Wen [88].

Conform ecuațiilor (4.52), (4.53), (4.54) și (4.55), s-a realizat un model în aplicația Simulink pentru a simula comportamentul sistemului, prezentat în Figura 4.68.

Realizarea modelului (Figura 4.68) s-a făcut respectând ecuațiile de mișcare, iar parametri σ , și ε , sunt prezentați cu ajutorul unui bloc *oscilloscop*.

Pentru simulare au fost aleși următorii parametri: ε - semnal generat cu parametrii inițiali definiți, $\varepsilon_0 = 10\text{mm}$, $E_0 = 5\text{MPa}$, $E = 10\text{MPa}$, $n = 2\text{u.a.}$, $A = 1.8\text{u.a.}$, $\alpha = 0.8\text{u.a.}$, $\beta = 0.5\text{u.a.}$, $\gamma = 1.2\text{u.a.}$, $\eta_0 = 5\text{Pa s}$ și $\eta = 10\text{Pa s}$. Rezultatele numerice sunt prezentate în Anexa 1 – Tabelul A.24.

Simularea comportamentului modelului Spencer

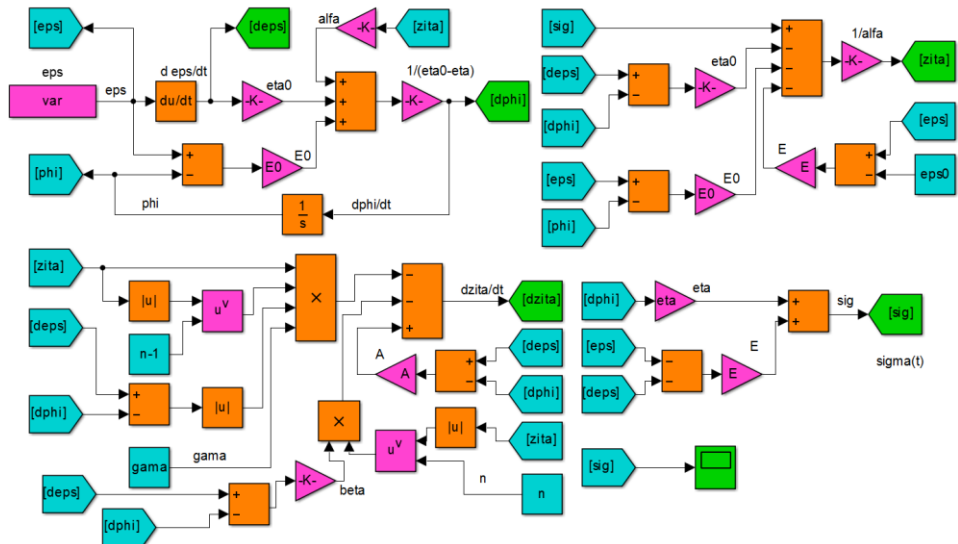


Fig. 4.68 – Modelul Spencer realizat în Simulink

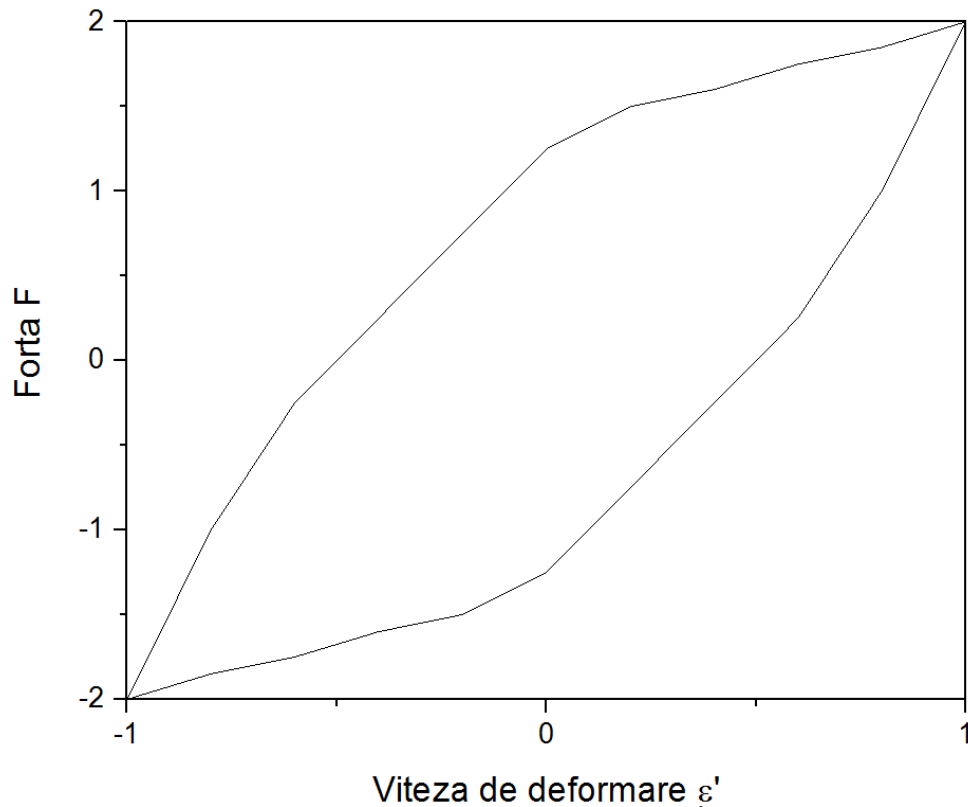


Fig. 4.69 – Semnalul modelului Spencer plotat în Origin

Semnalul de intrare generat în aplicație pentru simularea comportamentului modelului Spencer a fost creat cu ajutorul unui semnal generat care reprezintă valoarea deformației ϵ resimțită de sistem.

Rezultatul simulării este prezentat în Figura 4.69.

Pentru simularea comportamentului modelului Spencer, s-a ales durata în care a fost efectuată simularea, $t=10s$ precum și metoda de rezolvare de tip cu pași variabili denumită ode45 (Dormand-Prince).

5. ELEMENTE DE ANALIZĂ ȘI DE IDENTIFICARE A SEMNALELOR

În anul 1909, matematicianul german Alfred Haar a făcut primele referiri la analiza wavelet în teza sa despre teoria sistemelor funcționale ortogonale. Între anii 1930 și 1970 au fost aduse contribuții importante în analiza wavelet de către Levey, Littlewood și Paley în 1930, Stein, Riker în 1953, precum și de către Weiss și Coifman după 1960. Rezultatele acestora au fost dezvoltate ulterior de către Grossman, Morlet, Daubechies, Mallat (1986) care propun ideea de analiză multirezoluție. Odată cu dezvoltarea și perfecționarea calculatoarelor, au fost găsite multiple aplicații ale analizei wavelet [92], [93], [94], [95], [96].

5.1. Problemele identificării

Identificarea sistemelor este o ramură a teoriei sistemelor și are scopul de a stabili metodologii pentru estimarea cât mai fidelă a modelelor matematice care descriu sistemele reale pe baza studiului experimental al acestora. Astfel știința identificării sistemelor este deosebit de importantă pentru toate ramurile științei care se bazează pe elaborarea modelelor matematice pentru fenomenele cercetate.

Deseori, studiul sistemului se face simplu, căutând prin metode experimentale răspunsul $y(t)$ al sistemului la o perturbație $x(t)$, Figura 5.70.

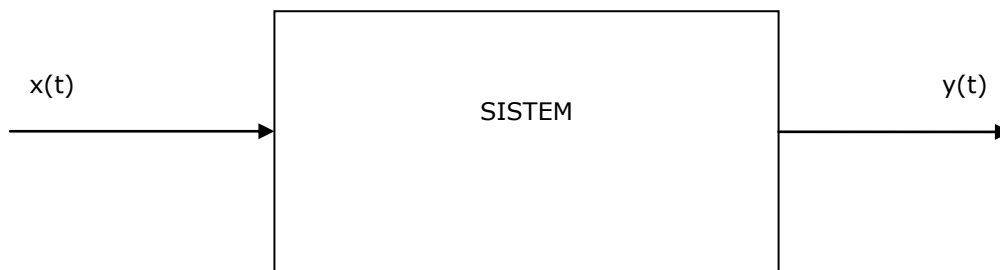


Fig. 5.70 – Schematizarea unui sistem cu o perturbație și un răspuns

De obicei, într-un experiment pentru un sistem dat, se măsoară o serie de semnale de intrare $x(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_i(t)\}$ pentru care rezultă răspunsurile sistemului studiat $y(t) = \{y_1(t), y_2(t), \dots, y_j(t)\}$, unde i reprezintă numărul de intrări și j numărul de ieșiri.

Se pot preciza mai multe tipuri de identificări:

- **Identificare tip cutie albă** (se cunosc toate legile fizice care guvernează sistemul);
- **Identificare tip cutie gri** (se cunosc o parte din legile fizice care guvernează sistemul);

- **Identificare tip cutie neagră** (nu se cunosc legile fizice care guvernează sistemul) [97].

Transformata wavelet aparține unei discipline de frontieră între matematică, calculul numeric și prelucrarea semnalelor. Din punct de vedere matematic, transformata wavelet poate fi privită ca având o componentă de analiză și una de sinteză.

Pentru *componenta analiză*, wavelet este un filtru trece-bandă care are caracteristici distincte:

- Un **parametru de scalare** (dilatare - contracție) este folosit pentru ajustarea lărgimii benzii de frecvență;
- Un **parametru de translație** este utilizat pentru a descrie poziția semnalului în timp, al cărui spectru de frecvență se află în banda respectivă.

Pentru *sinteză*, transformata wavelet poate fi utilizată pentru reprezentarea unui semnal pornind de la caracteristicile sale esențiale până la detaliile de înaltă frecvență.

5.2. Semnale periodice și serii Fourier

Semnalul $x(t)$ are următoarea proprietate de periodicitate:

$$x(t) = x(t + nT)$$

unde $n \in \mathbb{Z}$ și T reprezintă perioada. Frecvența este notată cu $\nu = 1/T$, și pulsația cu $\omega_0 = 2\pi\nu$. Semnalul periodic se descompune în serie Fourier astfel:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} (C_n \sin n\omega_0 t + D_n \cos n\omega_0 t) \quad (5.56)$$

unde C_n și D_n reprezintă constante care sunt determinate cu:

$$C_n = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \sin n\omega_0 t dt \quad (5.57)$$

$$D_n = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cos n\omega_0 t dt \quad (5.58)$$

unde $n \in \mathbb{N}$.

Descompunerea Fourier dată de (5.56) poate fi pusă și sub alte forme echivalente, folosind numai funcții sinus sau numai funcții cosinus, adică :

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \sin(n\omega_0 t + \phi_n) \quad (5.59)$$

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} B_n \cos(n\omega_0 t + \psi_n) \quad (5.60)$$

care de această dată sunt mai intuitive, deoarece A_n (respectiv B_n) reprezintă amplitudinea, iar ϕ_n (respectiv ψ_n), defazajul armonicii de pulsație $n\omega_0$, corespunzătoare descompunerii în oscilații sinusoidale (respectiv cosinusoidale).

Există de asemenea și o formă complexă de exprimare a dezvoltării în serie Fourier:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{in\omega_0 t} \quad (5.61)$$

unde C_n este calculat cu relația:

$$C_n = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-in\omega_0 t} dt \quad (5.62)$$

C_n reprezentând o cantitate complexă ($C_n = R_n + iI_n \in \mathbb{C}$).

5.3. Transformata Fourier

Se consideră un semnal neperiodic, descris de o funcție reală sau complexă $x(t) \in \mathbb{C}$, unde $t \in \mathbb{R}$. Produsul scalar a două elemente $x(t)$ și $y(t)$ este definit ca:

$$\langle x(t) | y(t) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} x^*(t) y(t) dt$$

iar norma se definește din produsul scalar:

$$\|x\| = \sqrt{\langle x | x \rangle}$$

Funcțiile sunt de pătrat integrabil dacă integralele sunt finite:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt < \infty$$

Cu L_2 se notează spațiul funcțiilor complexe (reale), de pătrat sumabil. Se definește un element $x \in L_2$, transformata sa Fourier:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt = F\{x\} \quad (5.63)$$

unde $\omega = 2\pi\nu$. Prin această transformare, semnalul $x(t)$, reprezentat în domeniul temporal, poate fi reprezentat în domeniul frecvență ($X(\omega) = X(2\pi\nu) = X(\nu)$), $X(\nu)$ fiind spectrul funcției $x(t)$, spectru care este continuu.

Dacă se constată că $X(\omega)$ este un complex, de forma:

$$X(\omega) = X_r(\omega) - iX_i(\omega)$$

având o componentă reală X_r și una imaginara X_i , însă $X(\omega)$ poate fi scris și ca:

$$X(\omega) = |X| e^{i\phi(\omega)} = A(\omega) e^{i\phi(\omega)}$$

$A(\omega)$ reprezentând spectrul de amplitudine, iar $\phi(\omega)$ spectrul de fază.

Transformata Fourier inversă, face legătura inversă între $X(\omega)$ și $x(t)$ și are forma:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) e^{i\omega t} d\omega = F^{-1}\{X\} \quad (5.64)$$

Ecuatia (5.63) face operația de descompunere a semnalului în spectru, adică analiza semnalului, iar (5.64) face operația de suprapunere a unui pachet de oscilații armonice $X(\omega) \exp[-i\omega t]$, prin care se obține $x(t)$, operație numită sinteza semnalului. Aceste operații fiind echivalente și $x(t)$ este echivalent cu $X(\omega)$, face ca $x(t)$ să se numească reprezentarea temporală a semnalului, iar $X(\nu)$ reprezentarea frecvențială.

5.4. Transformata wavelet

Analiza wavelet a apărut din dorința de a depăși unele limitări evidente ale analizei Fourier. Analiza wavelet aduce o metodă nouă de descompunere a semnalului în constituienți, eliminând dezavantajul analizei Fourier în care caracteristicile particulare ale unor oscilații sunt pierdute, neputându-se localiza în timp.

Descompunerea de tip wavelet a fost folosită cu succes în diverse aplicații precum analiza timp-frecvență, aproximarea neliniară și în diferite domenii ca și compresia datelor [98], reducerea zgomotului [99], codificarea canalului și a sursei [100], ingineria biomedicală, evaluarea nedistructivă [101], rezolvarea numerică a ecuațiilor parțial diferențiale, studierea universului îndepărtat, rețelelor wavelet, fractali, analiza turbulențelor, analiza financiară și multe altele. Analiza wavelet este capabilă să ofere o descriere amplă și folositoare unei funcții bazate pe o familie de funcții numite wavelet-e (unde) [97].

Transforma wavelet oferă posibilitatea de estimare a parametrilor modali ai unui sistem vibrator cu răspuns liber. Analiza răspunsului unui sistem la impuls este

folosită pentru estimarea parametrilor modali și se bazează pe aproximarea răspunsului efectiv cu ajutorul transformatei Hilbert. Aproximarea este exactă doar dacă în sistemul analizat apar erori atunci când structura este amortizată.

Transformata wavelet efectuează o transformare liniară și oferă o reprezentare liniară timp-frecvență a sistemului. Avantajul acestei transformate în comparație cu alte transformări timp-frecvență este asigurarea unei analize multirezoluție în domeniul timp-frecvență, având o rezoluție ridicată la frecvențe joase și una scăzută la frecvențe înalte. Reprezentarea wavelet în domeniul timp-frecvență este utilă atunci când semnalul analizat este răspunsul liber a unui sistem cu mai multe grade de libertate. Reprezentarea timp-frecvență permite descompunerea fiecărui mod al structurii prin alegerea corectă a valorii frecvenței care corespunde modului analizat [97].

5.4.1. Transformata wavelet continuă

Transformata wavelet a unui semnal continuu $x(t)$ este definită de relația:

$$T(a,b) = w(a) \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (5.65)$$

unde $w(a)$ reprezintă o funcție de scalare, iar Ψ^* este complex conjugata funcției wavelet utilizate.

O funcție este considerată wavelet dacă respectă condițiile:

- Funcția trebuie să aibă energie finită:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(t)|^2 dt < \infty \quad (5.66)$$

- Trebuie să satisfacă condiția:

$$C_g = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(f)|^2}{f} df < \infty \quad (5.67)$$

unde $\Psi(f)$ este transformata Fourier:

$$\Psi(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(t) e^{-i(2\pi f)t} dt \quad (5.68)$$

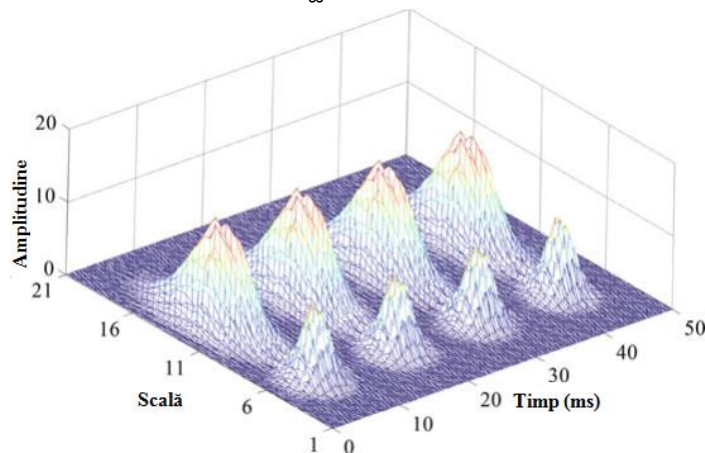


Fig. 5.71 – Transformata wavelet a unui semnal [102]

O exemplificare de reprezentare grafică a unei transformate wavelet este prezentată în Figura 5.71.

5.4.2. Transformata wavelet discretă

Se introduce ideea posibilității de a reconstrui complet semnalul original utilizând sumări infinite a unor coeficienți wavelet discreți în locul unor integrale continue.

Spre deosebire de definiția continuă a transformatei wavelet, se introduce o discretizare a factorului de scalare a și a locațiilor b :

$$\Psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \Psi\left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m}\right) \quad (5.69)$$

unde întregii m și n controlează dilatația și translația, a_0 este pasul de dilatare fixat cu o valoare mai mare de 1, iar b_0 este parametrul locației și trebuie să fie mai mare ca 0.

În aceste condiții, transformata wavelet a unui semnal continuu $x(t)$, folosind o funcție wavelet discretă este:

$$T_{m,n} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{a_0^{m/2}} \Psi(a_0^{-m} t - nb_0) dt \quad (5.70)$$

5.4.3. Transformata wavelet pentru sisteme neliniare

Caracterizarea sistemelor vibrante neliniare reprezintă un domeniu tot mai bine documentat și cercetat. Unele tehnici de identificare se axează pe modulația de frecvență, cum ar fi deconvoluția frecvenței, transformata Hilbert precum și transformata wavelet. Acestea se folosesc pentru caracterizarea neliniarității schimbărilor din frecvențele naturale ale sistemelor cu schimbarea amplitudinii răspunsului. O altă metodă presupune utilizarea răspunsului în frecvență de ordin înalt. O metodă ce poate fi folosită și în lipsa măsurătorilor intrărilor externe pentru aplicații cu sisteme neliniare este cea a forței de restaurare [97].

Deși abordarea unor sisteme utilizând un model liniar simplifică de multe ori analiza, există fenomene oscilatorii care, pe cât sunt de surprinzătoare din punct de vedere teoretic, pe atât sunt de importante din punct de vedere practic și care pot fi înțelese pe deplin doar privite ca oscilații neliniare.

Tehnicile de identificare ale sistemelor neliniare pot fi împărțite în metode parametrice și metode neparametrice. Metodele parametrice presupun folosirea modelelor de înaltă fidelitate, care sunt fizic precise, și care mai sunt denumite și abordări fizice de bază sau abordări bazate pe modele. Pe de altă parte, modelele neparametrice presupun o legătură între datele de intrare și cele de ieșire. Modelele neparametrice se bazează pe modele matematice, de exemplu rețelele neuronale, modelele fuzzy (neclare) sau cele regresive, care nu au un sens fizic explicit. Există posibilitatea combinării celor două metode, de exemplu coeficienții dintr-un model parametric se pot identifica cu ajutorul unei metode neparametrice.

Pentru identificarea și simularea neliniarităților au fost dezvoltate diferite modele histeretice, modelul Bouc-Wen fiind cel mai adaptabil. Acesta este un model semi-fizic care poate avea comportamentul unei clase largi de sisteme histeretice, care poate fi utilizat pentru studii analitice la vibrații aleatoare și analiza fiabilității histerezei structurilor.

Tehnicile de identificare neliniară se aplică pe rezultate experimentale pentru detectarea efectelor neliniare, prin trasarea forței de revenire neparametrică și pentru compararea estimărilor numerice prin metode parametrice de estimare directă. Metoda forței de revenire se aplică la sisteme fără a avea informații despre

elasticitate sau natura disipativă a forțelor, în timp ce metoda parametrilor de estimare directă oferă estimări ai termenilor neliniari ai dinamicii modelului în domeniul timp [97].

Dacă se ia în considerare criteriul ecuațiilor diferențiale de care sunt descrise, sistemele neliniare pot fi clasificate după cum urmează:

Sisteme descrise de ecuații diferențiale neliniare omogene cu coeficienți constanți:

$$\ddot{y} + f(\dot{y}, y) = 0 \quad (5.71)$$

Acestea pot fi la rândul lor împărțite în subcategorii, corespunzător naturii soluției, respectiv oscilații amortizate, oscilații neamortizate sau oscilații autoexcitate de natură periodică, quasiperiodică sau haotică.

Sisteme descrise de ecuații diferențiale neliniare omogene ale căror coeficienți depind de o variabilă independentă:

$$\ddot{y} + f(\dot{y}, y, \omega t) = 0 \quad (5.72)$$

Termenul ωt se referă la excitația sistemului, care este liniară parametrică. Cazul excitației neliniare parametrice va fi reprezentat prin termeni în care variabila timp este înlocuită cu o funcție de timp neliniară. În cazul în care coeficienții nu sunt periodici, ci funcții de timp cu variație aleatoare, avem de-a face cu o excitație parametrică stohastică.

Sisteme descrise de ecuații diferențiale neliniare neomogene:

$$\ddot{y} + f(\dot{y}, y) = F(\omega t) \quad (5.73)$$

unde F este o funcție de timp periodică sau stohastică.

În esență, pentru sisteme neliniare, răspunsul permanent al sistemului, datorat unei excitații armonice, nu are același caracter, putând fi periodic, quasiperiodic sau chiar neperiodic.

Dacă la sisteme liniare amortizate, în lipsa excitației nu se poate produce un răspuns de regim permanent de amplitudine finită, oscilațiile autoexcitate de regim permanent sunt o caracteristică a sistemelor neliniare.

Studiul sistemelor neliniare se lovește de dificultăți datorate faptului că legile de ordin general nu se mai pot aplica (cum ar fi principiul proporționalității sau al superpoziției). Este posibil să existe mai multe soluții de regim permanent și astfel devine necesar un studiu de stabilitate în prezența unor perturbații.

În ultimii ani se intensifică eforturile dedicate problemelor sistemelor neliniare care apar în domenii ca: circuite electronice, elemente de construcții de mașini, sisteme giroscopice, sisteme cu impact, sisteme aerodinamice sau hidrodinamice, astronomie, sisteme spațiale, reologie.

Interesul pentru sisteme neliniare a crescut și datorită sporirii fără precedent a puterii de calcul (hardware și software - algoritmi de prelucrare). Dacă în cazul sistemelor liniare cunoașterea valorilor proprii și a vectorilor proprii duce la obținerea soluției în formă închisă, puține sisteme neliniare permit o astfel de exprimare a soluției. Din acest motiv, simularea numerică a căpătat un rol esențial în descoperirea și analizarea fenomenelor neliniare.

Identificarea parametrilor modelelor liniare pune la punct o serie de metode general valabile pentru sisteme cu unul sau mai multe grade de libertate. Metodele pentru modelele neliniare sunt în general valabile pentru cazuri particulare sau pentru clase restrânse de sisteme. La fel ca și sistemele liniare, acestea sunt legate de metodele de prelucrare a semnalelor. Abordarea problemelor de identificare a parametrilor sunt prezentate într-o serie de lucrări și se bazează pe transformarea wavelet cu aplicații la sisteme vibrante liniare și neliniare.

Transformata wavelet a unui semnal $x(t)$ este o transformare continuă two la o funcție cu două variabile, definită:

$$W(\tau, u) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi_{\tau, u}^*(t) dt, \quad (5.74)$$

unde Ψ^* este complex conjugata funcției wavelet, iar Ψ_0 este o funcție numită *basic wavelet* și reprezintă o funcție de transfer a unui sistem. Funcția *basic wavelet* se construiește dintr-o funcție de bază Ψ prin:

$$\Psi_{\tau, u}(t) = \frac{1}{\sqrt{u}} \Psi\left(\frac{t-\tau}{u}\right) \quad (5.75)$$

unde atât $x(t)$ cât și $\Psi(t)$ trebuie să fie de pătrat sumabil:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt < \infty, \quad (5.76)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(t)|^2 dt < \infty. \quad (5.77)$$

Această transformată este inversabilă:

$$x(t) = \frac{1}{c_{\Psi}} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} W(\tau, u) \Psi_{\tau, u}(t) \frac{d\tau du}{u^2}, \quad (5.78)$$

unde c_{Ψ} este constanta de normare:

$$c_{\Psi} = 2\pi \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\Psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega, \quad (5.79)$$

care este dependentă de funcția de bază care se folosește, iar $\hat{\Psi}$ este transformata Fourier a funcției $\Psi(t)$ și este definită:

$$\hat{\Psi}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) e^{-i\omega t} dt. \quad (5.80)$$

Există o serie de funcții wavelet de bază:

- Funcția **Morlet**:

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{4\pi}} e^{-i\omega_0 t} e^{-t^2/2} \quad (5.81)$$

- Funcția **Pălăria mexicană**:

$$\Psi = (1-t^2) e^{-at^2/2} \quad (5.82)$$

- Funcția **Paul**:

$$\Psi_m = \frac{2^m i^m m!}{\sqrt{\pi} (2m)!} (1-it)^{-(m+1)} \quad (5.83)$$

- Funcția **Gauss**:

$$\Psi_m = \frac{(-1)^{m+1}}{\sqrt{\Gamma(m+\frac{1}{2})}} \frac{d^m}{dt^m} e^{-t^2/2} \quad (5.84)$$

- Funcția **Hermite**:

$$\Psi_m = \frac{1}{\sqrt{\sqrt{m} 2^m \Gamma(m+\frac{1}{2})}} e^{-t^2/2} H_m\left(\frac{t}{\sqrt{m}}\right) \quad (5.85)$$

unde $m \in \mathbb{N}$ și reprezintă ordinul transformării, iar H_m este funcția Hermite de ordinul m .

Se calculează analitic transformata wavelet pentru răspunsul liber al unui sistem cu amortizare vâscoasă, având amplitudinea A , pseudopulsăția ω și factorul de amortizare c :

$$x(t) = \begin{cases} Ae^{-ct} e^{-i\omega t} & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (5.86)$$

folosind funcția de bază Morlet definită mai sus, rezultă:

$$W(\tau, u) = \frac{\sqrt{\pi} u}{\sqrt{2}} e^{\left(-\frac{\omega_0^2}{2} + \omega_0 \omega u - \tau c + \frac{(c^2 - \omega^2) u^2}{2}\right)} \cdot e^{-i[(c\omega u^2 - \tau\omega - c\omega_0 u)]} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{c\omega u - \tau}{\sqrt{2}}\right) - \left(\frac{\omega u - \omega_0}{\sqrt{2}}\right) \right] \quad (5.87)$$

unde $\operatorname{erf}(z)$ este funcția de eroare (5.88):

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt. \quad (5.88)$$

Pentru aplicații practice se folosește modulul transformatei (5.87), adică:

$$|W(\tau, u)| = \frac{\sqrt{\pi} u}{\sqrt{2}} e^{\left(-\frac{\omega_0^2}{2} + \omega_0 \omega u - \tau c + \frac{(c^2 - \omega^2) u^2}{2}\right)} \sqrt{(R_e - 1)^2 + I_e^2} \quad (5.89)$$

unde R_e și I_e reprezintă partea reală și cea imaginară a funcției de eroare:

$$R_e = \operatorname{Re}\{\operatorname{erf}(x+iy)\} = \frac{2x}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{y^{2n}}{n!} {}_1F_1\left(n + \frac{1}{2}; \frac{3}{2}; -x^2\right), \quad (5.90)$$

$$I_e = \operatorname{Re}\{\operatorname{erf}(x+iy)\} = \frac{2x}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{y^{2n+1}}{(2n+1)n!} {}_1F_1\left(n + \frac{1}{2}; \frac{1}{2}; -x^2\right), \quad (5.91)$$

exprimate în serii conținând funcția hipergeometrică de tip ${}_1F_1(a; b; z)$ în variabilă reală.

Funcția de eroare are proprietățile:

$$\operatorname{erf}(-z) = -\operatorname{erf}(z), \quad \operatorname{erf}(z^*) = (\operatorname{erf}(z))^*, \quad (5.92)$$

$$\frac{d}{dz} \operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-z^2},$$

$$[\operatorname{erf}(z)]^2 \approx 1 - e^{\left(-\frac{4}{1+az^2}\right)}, \quad (5.93)$$

unde $\operatorname{erf}(z) = \frac{2x}{\sqrt{\pi}} {}_1F_1\left(n + \frac{1}{2}; \frac{3}{2}; -x^2\right)$.

5.5. Transformata wavelet multirezoluție

Semnalele măsurate experimental se vor considera funcții ale spațiului Hilbert $H_2(\mathbb{R})$. Se va exprima produsul scalar a două funcții $x(t)$ și $y(t)$ cu ajutorul notației Dirac:

$$\langle x(t) | y(t) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} x^*(t) y(t) dt \quad (5.94)$$

unde $x^*(t)$ reprezintă complex conjugata lui $x(t)$. În acest caz norma funcției poate fi exprimată din produsul scalar $\|x\| = \langle x(t) | x(t) \rangle^{1/2}$.

Transformata wavelet a unui semnal reprezintă aplicarea unei funcții $x(t)$ (unde $t \in \mathbb{R}$) la o funcție $w(a, b)$, unde $(a, b) \in \mathbb{R}^2$, definită ca:

$$w(a, b) = \langle \psi_{a,b}^*(t) | x(t) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{a,b}^*(t) x(t) dt. \quad (5.95)$$

unde ψ reprezintă funcția wavelet mamă, definită ca:

$$\psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (5.96)$$

unde a este parametrul de scalare, iar b reprezintă un parametru de întârziere (defazare). Există, de asemenea și o inversă a transformatei wavelet.

Pentru funcțiile $x(t)$ din spațiul Hilbert $L_2(\mathbb{R})$ poate fi construită o structură multirezoluție de subspații închise ale funcțiilor $V_k \subset L_2(\mathbb{R})$, (unde $k \in \mathbb{Z}$). Această structură multirezoluție are următoarele proprietăți [103], [104], [105]:

Subspațiile V_k au următoarea proprietate de includere:

$$\dots \subset V_{-2} \subset V_{-1} \subset V_0 \subset V_1 \subset V_2 \subset \dots \subset V_n \quad (5.97)$$

Proprietatea de integritate, adică:

$$\bigcap_{k \in \mathbb{Z}} V_k = \{0\}, \quad \bigcup_{k \in \mathbb{Z}} V_k = L_2(\mathbb{R}) \quad (5.98)$$

Proprietatea de scalare, adică fiecare funcție $f(t) \in L_2(\mathbb{R})$ respectă proprietatea de scalare, astfel că dacă $f(t) \in V_k$, (unde $k \in \mathbb{Z}$) funcția dilatată $f(2t) \in V_{k+1}$:

$$f(t) \in V_k \rightarrow f(2t) \in V_{k+1} \quad (5.99)$$

Pentru toate funcțiile sub o translație cu un număr întreg ($k \in \mathbb{Z}$), adică:

$$f(x-k) \in V_0 \quad (5.100)$$

Existența unei funcții de bază. Aceasta este o funcție $\psi(t) \in V_0$, care poate fi folosită pentru a construi o funcție de bază:

$$e_{nl} = \psi_{nl}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^n}} \psi(2^{-n}t-l) \quad (5.101)$$

unde $n, l \in \mathbb{Z}$, cu proprietatea de ortonormalitate:

$$\langle \psi_{nl}(t) | \psi_{n'l'} \rangle = \delta_{ll'} \quad (5.102)$$

pentru $n, l, n', l' \in \mathbb{Z}$.

Folosind această funcție de bază, un semnal $x(t)$, (unde $H_2(\mathbb{R})$), poate fi dezvoltat în serii a bazei ca [98], [99], [100]:

$$\begin{aligned} x(t) &= \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \langle e_{nl} | x \rangle = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \langle \psi(2^n t-l) | x(t) \rangle = \\ &= \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \alpha_{nl} \psi(2^n t-l) \end{aligned} \quad (5.103)$$

unde coeficienții α_{nl} sunt calculați ca:

$$\alpha_{nl} = \langle \psi(2^n t-l) | x(t) \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(2^n t-l) x(t) dt \quad (5.104)$$

De asemenea, s-a constatat că poate fi introdusă o funcție de scalare $\Phi \in V_0$, astfel încât funcțiile $e_n = \psi(2t-n)$, (unde $n \in \mathbb{Z}$) sunt o bază în V_1 .

Funcțiile de scalare respectă de asemenea identitatea [96], [97], [98]:

$$\Phi(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \gamma_k \Phi(2t-n) \quad (5.105)$$

cunoscut sub numele de dilatare (scalare) și de identitate. Coeficienții γ_k sunt obținuți din produsele scalare $\gamma_k = \langle \Phi(t) | \Phi(2t-n) \rangle$.

Trebuie subliniat faptul că funcția de scalare ψ este cunoscută de asemenea și sub numele de funcție wavelet tată. S-a stabilit că funcția wavelet de bază poate fi exprimată ca termeni ai funcției de scalare [96], [97], [98]:

$$\psi(t) = \sum_{n=0}^{N-1} (-1)^n \gamma_n \Phi(2t+n-N+1) \quad (5.106)$$

unde γ_n reprezintă un set de coeficienți nedisipativi exprimând dezvoltarea în serie a funcțiilor de transfer ale unui filtru. N reprezintă numărul de coeficienți nedisipativi, numit ordin al filtrului.

Funcția Φ trebuie să îndeplinească condițiile de admisibilitate [103], [104], [105], [106]:

$$\int_{\mathbb{R}} \Phi(t) dt = 1. \quad (5.107)$$

Ecuția (5.95) poate fi exprimată, de asemenea sub forma:

$$x(t) = \beta_0 \Phi(t) + \sum_{l=0}^{2^n} \beta_{2^n+l} \psi(2^n t-l) \quad (5.108)$$

unde coeficienții β pot fi scriși conform ecuației (5.96) ca: $\beta_{2^n+l} = \alpha_{nl}$.

În cele din urmă $x(t)$ poate fi scris ca:

$$\begin{aligned} x(t) &= \beta_0 \Phi(t) + \beta_1 \psi(t) + [\beta_2 \quad \beta_3] \begin{bmatrix} \psi(2t) \\ \psi(2t-1) \end{bmatrix} + [\beta_4 \quad \beta_5 \quad \beta_6 \quad \beta_7] \begin{bmatrix} \psi(4t) \\ \psi(4t-1) \\ \psi(4t-2) \\ \psi(4t-3) \end{bmatrix} + \dots \\ &+ [\beta_{2^k} \quad \beta_{2^k+1} \quad \dots \quad \beta_{2^{k+1}-1}] \begin{bmatrix} \psi(2^k t) \\ \psi(2^k t-1) \\ \dots \\ \psi(2^k t-2^k+1) \end{bmatrix} + \dots + \beta_{2^n+l} \psi(2^n t-l) + \dots \end{aligned} \quad (5.109)$$

sau ca seria:

$$x(t) = \beta_0 \Phi_0 + \beta_1 \psi_1 + \beta_2 \psi_2 + \dots + \beta_n \psi_n + \dots \quad (5.110)$$

Coeficienții din (5.101) sunt:

$$\beta_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Phi(t) dt, \quad \beta_{2^n+l} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi(2^n t-l) dt \quad (5.111)$$

ultima ecuație fiind valabilă pentru $2^n+l \neq 0$.

În continuare este folosită transformata wavelet de bază Haar, definită:

$$\psi(t) = \begin{cases} 1 & t \in [0, 1/2) \\ -1 & t \in [1/2, 1) \\ 0 & t \notin [0, 1) \end{cases} \quad (5.112)$$

cu funcția de scalare:

$$\Phi(t) = \begin{cases} 1 & t \in [0, 1) \\ 0 & t \notin [0, 1) \end{cases} \quad (5.113)$$

5.6. Identificarea parametrilor amortizorului MR cu ajutorul analizei wavelet multirezoluție

Transformata wavelet se utilizează pentru identificarea parametrilor din sistemele neliniare [107], [108].

Se consideră un sistem vibrator neliniar. Cu x este notată alungirea oscilatorului, cu m masa, cu c constanta de amortizare și forța elastică neliniară $F_e = kx + k_3x^3 + k_5x^5$ este supusă unei forțe de histerezis $f_{\text{sign}}(\dot{x})$, asupra cărora acționează forța de excitație $F(t)$. Ecuația de mișcare a sistemului poate fi scrisă:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) + k_3x^3(t) + k_5x^5(t) + f_{\text{sign}}(\dot{x}) = F(t). \quad (5.114)$$

În cazul unui răspuns liber, ecuația de mișcare poate fi:

$$c\dot{x}(t) + kx(t) + k_3x^3(t) + k_5x^5(t) + f_{\text{sign}}(\dot{x}) = -m\ddot{x}(t). \quad (5.115)$$

Trebuie remarcat faptul că f și c sunt dependente de intensitatea câmpului magnetic H aplicat ferofluidului din amortizor sau de intensitatea I a curentului de magnetizare al acestuia.

Pentru identificarea parametrilor modali ai sistemului, se va dezvolta în termenii unei baze wavelet ca:

$$\ddot{x} = \sum_{n=1}^{\infty} \langle \ddot{x} \rangle_n \psi_n = \sum_{n=1}^{\infty} \ddot{\xi}_n \psi_n, \quad (5.116)$$

$$\dot{x} = \sum_{n=1}^{\infty} \langle \dot{x} \rangle_n \psi_n = \sum_{n=1}^{\infty} \dot{\xi}_n \psi_n, \quad (5.117)$$

$$x = \sum_{n=1}^{\infty} \langle x \rangle_n \psi_n = \sum_{n=1}^{\infty} \xi_n \psi_n, \quad (5.118)$$

$$x^k = \sum_{n=1}^{\infty} \langle x^k \rangle_n \psi_n = \sum_{n=1}^{\infty} \xi_n^k \psi_n, \quad (5.119)$$

...

$$\text{sign}(\dot{x}) = \sum_{n=1}^{\infty} \langle \text{sign}(\dot{x}) \rangle_n \psi_n = s_n \psi_n, \quad (5.120)$$

unde ξ_k , $\dot{\xi}_k$, $\ddot{\xi}_k$ și s_n sunt coeficienți numerici.

$$\begin{bmatrix} \ddot{\xi}_1 & \xi_1 & \xi_1^2 & \xi_1^3 & s_1 \\ \ddot{\xi}_2 & \xi_2 & \xi_2^2 & \xi_2^3 & s_2 \\ \ddot{\xi}_3 & \xi_3 & \xi_3^2 & \xi_3^3 & s_3 \\ \ddot{\xi}_4 & \xi_4 & \xi_4^2 & \xi_4^3 & s_4 \\ \ddot{\xi}_5 & \xi_5 & \xi_5^2 & \xi_5^3 & s_5 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \ddot{\xi}_n & \xi_n & \xi_n^2 & \xi_n^3 & s_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} c \\ k \\ k_2 \\ k_3 \\ f \end{Bmatrix} = -m \begin{Bmatrix} \ddot{\xi}_1 \\ \ddot{\xi}_2 \\ \ddot{\xi}_3 \\ \ddot{\xi}_4 \\ \ddot{\xi}_5 \\ \dots \\ \ddot{\xi}_n \end{Bmatrix} \quad (5.121)$$

care poate fi scrisă de asemenea ca:

$$[X]\{q\} = -m\{\ddot{\xi}\}, \quad (5.122)$$

unde $[X]$ este o matrice $n \times 5$, $\{q\}$ este vector coloană 5×1 , conținând parametrii sistemului vibrator și $\{\ddot{\xi}\}$ este un vector coloană de tip $n \times 1$.

Înlocuind (5.112) în (5.111), după separație se obține matricea sistemului:

Se remarcă faptul că sistemul (5.113) reprezintă un sistem supradeterminat, care poate fi rezolvat cu ajutorul metodei celor mai mici pătrate. Parametrii sistemului vor fi:

$$\{q\} = -m([X]^t[X])^{-1}[X]^t\{\xi\}, \quad (5.123)$$

unde cu $[\dots]^{-1}$ este notată matricea inversă, iar cu $[\dots]^t$ matricea transpusă.

Din punct de vedere experimental, folosind răspunsul liber al mișcării, se poate înregistra poziția instantanee, $x(t)$ a amortizorului, o înregistrare ca o secvență de n valori ale semnalului $x_k = x((k-1)T_s)$, unde $k=1, 2, \dots, n$ și $T_s=1/v_s$, iar v_s este frecvența de eșantionare.

Poziția instantanee a fost obținută cu ajutorul unui senzor potențiometric. Semnalul $x(t)$ a fost introdus în calculator prin intermediul dispozitivului de achiziție FS1608USB produs de către Computer Measurements.

$$v_s \geq 2v_{\max} \quad (5.124)$$

Frecvența de eșantionare trebuie să fie în acord cu teorema lui Shannon în care v_{\max} reprezintă frecvența maximă conținută în semnalul măsurat. S-a folosit $v_s=100\text{Hz}$.

Derivatele numerice pot fi calculate folosind:

$$\dot{x}_n = \frac{x_{n+1} - x_n}{T_s}, \quad \ddot{x}_n = \frac{x_{n+1} + x_{n-1} - 2x_n}{T_s^2}. \quad (5.125)$$

5.7. Caracteristici ale semnalelor aleatoare

Semnalele aleatoare se manifestă prin zgomote care se regăsesc pretutindeni, în natură, dar și în instrumentele de măsură. Cu $z(t)$ este notat un semnal aleator reprezentat în funcție de timp. Semnalul poate fi reprezentat atât în domeniul timp, cât și în frecvență, cu ajutorul transformatei Fourier, dar în acest caz spectrul de fază nu are semnificație.

Pentru caracterizarea semnalelor aleatoare se folosesc și mărimi statistice, de exemplu densitatea de probabilitate $w(z)$ de apariție a valorii z . Cantitatea $w(z)dz$ reprezintă probabilitatea de apariție a unei valori a mărimii aleatoare cuprinsă în intervalul $[z, z+dz]$. Această mărime, $w(z)$, se mai numește și densitate de probabilitate diferențială. Rezultă astfel că dacă se integrează pe tot intervalul de valori posibile ale lui z , se obține evenimentul sigur:

$$\int_R w(z)dz = 1 \quad (5.126)$$

Proprietățile semnalelor aleatoare mai pot fi caracterizate utilizând și alte mărimi statistice, cum ar fi valoarea medie:

$$\bar{z} = \int_R zw(z)dz \quad (5.127)$$

sau momente de diferite ordine.

$$m_n(z) = \int_R (z - \bar{z})^n w(z)dz \quad (5.128)$$

unde $m_n(z)$ reprezintă momentul de ordinul n , n este un întreg pozitiv ($n \in \mathbb{N}$).

Aparatele care măsoară distribuția $w(z)$ se numesc analizatoare de amplitudine, iar curbele de distribuție măsurate, $w(z)dz$, se numesc histograme de amplitudine.

Dacă un semnal are o distribuție de probabilitate constantă ($w(z)=\text{const.}$), atunci semnalul este aleator pur și din punct de vedere spectral este un zgomot alb, iar dacă media pe ansamblu este tot timpul constantă, semnalul se numește staționar.

5.7.1. Funcții de corelație

Sistemele aleatoare pot interacționa cu sistemele fizice, producând la ieșirea acestora răspunsuri cu un caracter aleator din care nu se pot obține multe informații concludente prin analiză spectrală sau prin mărimi statistice.

Pentru a obține informații asupra dependențelor statistice dintre un semnal și el însuși sau între două semnale la diferite momente de timp, se pot folosi funcțiile de corelație.

Se consideră două semnale notate x și y (aleatoare sau deterministe) reprezentate în domeniul timp. Funcțiile de autocorelație ale celor două semnale sunt definite ca:

$$C_{xx}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t+\tau)x(t)dt \quad (5.129)$$

$$C_{yy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(t+\tau)y(t)dt \quad (5.130)$$

Funcțiile de intercorelație ale celor două semnale sunt definite similar:

$$C_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t+\tau)y(t)dt \quad (5.131)$$

$$C_{yx}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(t+\tau)x(t)dt \quad (5.132)$$

Din punct de vedere dimensional, funcțiile de corelație reprezintă puteri.

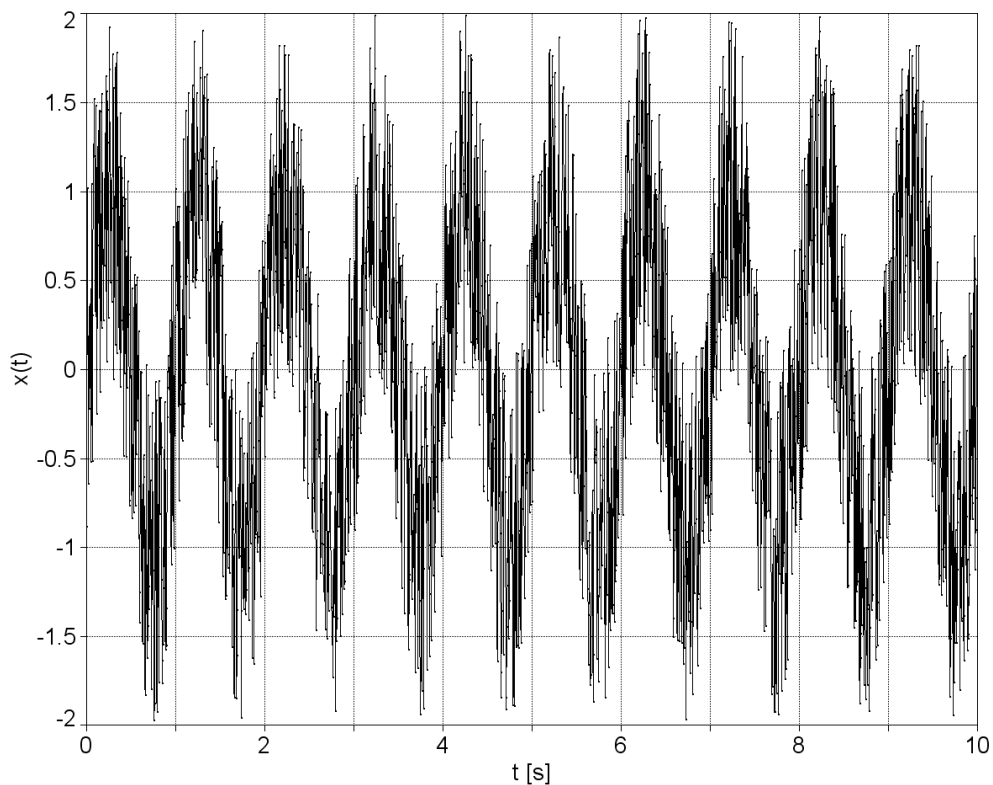


Fig. 5.72 – Semnal sinusoidal $x(t)$ cu zgomot, măsurat

Funcția de autocorelație exprimă dependența energetică dintre un semnal și el însuși, întârziat cu τ . Funcția de intercorelație arată interdependența energetică dintre un semnal și un alt semnal întârziat cu τ . Această interdependență este

conținută în tot semnalul, datorită integrării pe întreaga durată a semnalului ($t \in R$). Funcțiile de corelație au ca variabilă întârzierea τ , nu timpul obișnuit.

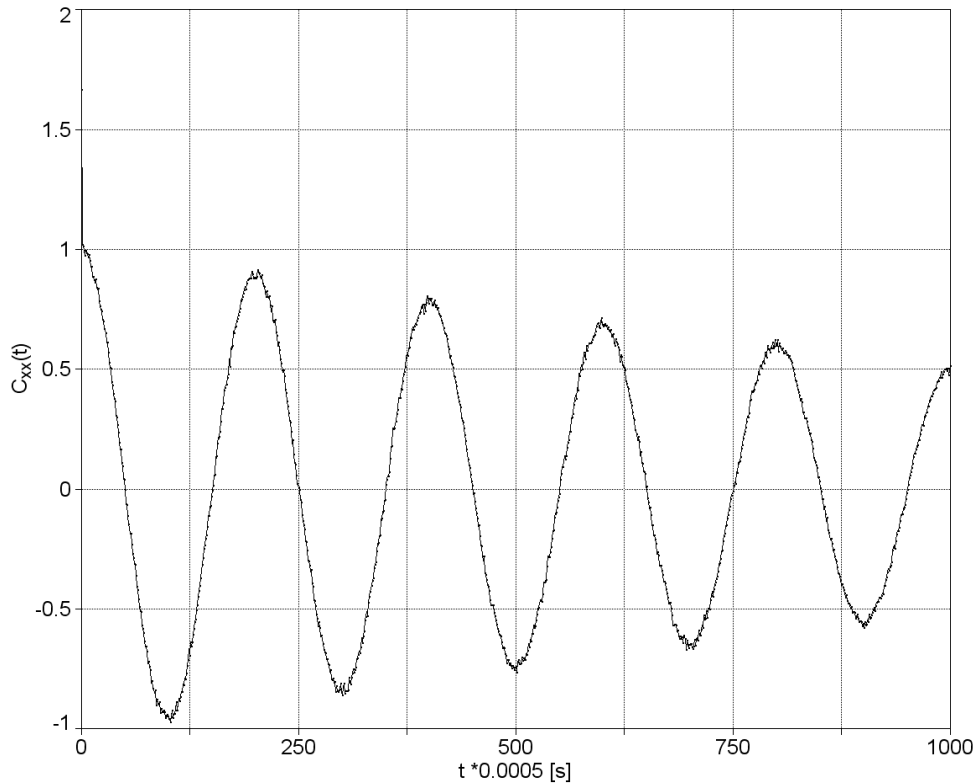


Fig. 5.73 – Funcția de autocorelație a semnalului $x(t)$

$C_{xy}(0)$ și $C_{yx}(0)=C_{xy}(0)$ (în origine) reprezintă puterea maximă de interacțiune dintre semnale, iar $C_{xx}(0)$ reprezintă puterea maximă a semnalului x .

Un semnal aleator pur are funcția de corelație [109]:

$$C_{zz}(\tau) = \delta(\tau)$$

Pentru semnale aleatoare care au și elemente deterministe funcția de corelație are maximul în origine și are o comportare descrescătoare, asemeni unui proces amortizat:

$$C_{zz}(\tau) \rightarrow 0 \text{ dacă } \tau \rightarrow \infty$$

Pentru un semnal care conține atât componente deterministe periodice, cât și aleatoare, pentru o întârziere τ mare, efectul dependenței aleatoare a semnalului dispare, rămânând doar corelația semnalului determinist. Această proprietate permite extragerea semnalelor periodice deterministe care sunt înecate în zgomote, extrăgând din funcția de corelație doar partea corespunzătoare întârzierilor mari. Astfel, $x = x_t + z$ reprezintă un semnal amestecat, unde z este semnalul aleator, iar x_t este semnalul periodic:

$$C_{xx} = C_{zz} + C_{x_t z} + C_{z x_t} + C_{x_t x_t} \rightarrow C_{x_t x_t} \text{ dacă } \tau \rightarrow \infty$$

Funcțiile de corelație, din punct de vedere al parității, au următoarele proprietăți:

$$\begin{aligned} C_{xx}(\tau) &= C_{xx}(-\tau) & C_{yy}(\tau) &= C_{yy}(-\tau), \\ C_{xy}(\tau) &= C_{yx}(-\tau) & C_{yx}(\tau) &= C_{xy}(-\tau) \end{aligned}$$

Dacă la intrarea unui sistem se aplică un zgomot alb $z(t)$, și se calculează funcția de intercorelație dintre semnalul de intrare și cel de ieșire $y(t)$, această funcție reprezintă funcția de transfer $h(t)$ a semnalului respectiv, în reprezentare temporală:

$$C_{zy}(\tau) = h(-\tau) \quad (5.133)$$

Determinarea funcțiilor de corelație pentru semnalele experimentale se poate face cu ajutorul calculatorului sau cu echipamente specializate, denumite corelatoare.

În Figura 5.72 este reprezentat un semnal sinusoidal suprapus peste un semnal aleator de același nivel, notat $x(t)$, iar în Figura 5.73 este reprezentată funcția de autocorelație $C_{xx}(\tau)$. Se observă că maximum funcției de autocorelație este în origine, dar și faptul că prin corelație, efectul zgomotului este eliminat.

Semnalele din diagramele de mai sus sunt obținute prin măsurători experimentale pe standul experimental cu excitație pe cale cinematică și provin de la accelerometrul 3.

5.7.2. Transformata Fourier a funcțiilor de corelație

Două semnale se notează cu $x(t)$ și $y(t)$ în reprezentare temporală și transformatele Fourier ale acestora se notează cu $X(\omega)$ și $Y(\omega)$. Transformatele Fourier ale funcțiilor de autocorelație ale celor două semnale sunt:

$$F\{C_{xx}\} = X^* X = |X|^2 = S_{xx}(\omega) \quad F\{C_{yy}\} = Y^* Y = |Y|^2 = S_{yy}(\omega) \quad (5.134)$$

adică densitățile spectrale de putere S_{xx} și S_{yy} ale celor două semnale. Acestea nu conțin informații despre faza semnalelor.

Transformatele Fourier ale funcțiilor de intercorelație sunt:

$$F\{C_{xy}\} = X^* Y = S_{xy}(\omega) \quad F\{C_{yx}\} = Y^* X = S_{yx}(\omega) \quad (5.135)$$

adică densitățile spectrale mutuale de putere S_{xy} și S_{yx} .

Funcțiile de corelație obținute prin transformatele Fourier inverse ale densităților spectrale de putere sunt:

$$F^{-1}\{S_{xx}(\omega)\} = C_{xx}(t) \quad F^{-1}\{S_{yy}(\omega)\} = C_{yy}(t) \quad (5.136)$$

$$F^{-1}\{S_{xy}(\omega)\} = C_{xy}(t) \quad F^{-1}\{S_{yx}(\omega)\} = C_{yx}(t) \quad (5.137)$$

5.7.3. Prelucrarea numerică a semnalelor

Spectrul de amplitudine și de fază s-a obținut la început pe cale analogică cu filtre trece-bandă, acordate pe frecvențe fixe, cu filtre cu frecvența de trecere reglabilă, iar faza cu dispozitive analogice de măsurare a fazei.

Evoluția actuală a echipamentelor numerice permite efectuarea operațiilor de transformare Fourier și al funcțiilor de corelație cu calculatorul, sau cu ajutorul sistemelor de calcul specializate, numite analizoare de semnal.

În vederea prelucrării semnalului, acesta trebuie transformat dintr-un semnal cu variație continuă, într-un șir de valori ale acestuia luate la momente discrete de timp:

$$x(t) \rightarrow x(1T_e), x(2T_e), \dots, x(nT_e), \dots$$

numit proces de eșantionare. T_e se numește proces de eșantionare, iar $v_e = 1/T_e$, denumită frecvență de eșantionare. După acest proces, semnalul analogic va fi

transformat în semnal numeric (sau cuantizat), în binar care va fi introdus în echipamentul de calcul. Uzual, cuantizarea se efectuează pe $n=10, 12$ sau 16 biți, adică pe $2^{n+1}-1$ nivele. Dispozitivul care face operația de eșantionare și de cuantizare se numește convertor analog-digital. Este posibilă și operația inversă de conversie digital-analogică a semnalului prin care se generează semnale analogice cu echipamentul de calcul, pornind de la șiruri de valori cuantizate.

Pentru acuratețea prelucrării semnalului, eșantionarea trebuie efectuată în acord cu teorema de eșantionare (Shannon). Aceasta presupune că semnalul eșantionat are aceleași proprietăți cu semnalul dat, dacă frecvența de eșantionare, v_e , este mai mare sau egală de două ori față de frecvența maximă din spectrul semnalului dat, v_{max} :

$$v_e \geq 2v_{max} \quad (5.138)$$

Valorile eșantionate ale semnalului de prelucrat sunt notate cu $x(k)=x(kT_e)$. Din teorema de eșantionare reiese că, în situația în care semnalul este eșantionat cu $v_e=2v_{max}$, frecvența maximă din spectru este:

$$v_{max} = \frac{v_e}{2} = \frac{1}{2T_e}$$

Dacă un semnal este eșantionat în N puncte, atunci transformata Fourier a acestuia este:

$$X(m) = X(m\delta v) = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x(j) \exp \left[-i \frac{2\pi j m}{N} \right] \quad (5.139)$$

iar transformata Fourier inversă este:

$$x(m) = x(mT_e) = \sum_{j=0}^{N-1} X(j) \exp \left[i \frac{2\pi j m}{N} \right] \quad (5.140)$$

Calculul transformatei duce la N^2 înmulțiri. Se folosesc un număr de puncte de forma $N=2^M$, printr-un algoritm de calcul, care ține cont de periodicitatea funcțiilor sinus și cosinus (respectiv $(i2\pi j m/N)$) și reduce numărul de înmulțiri la jumătate ($N^2/2$). Algoritmul se numește transformata Fourier rapidă (Fast Fourier Transform - FFT).

În majoritatea cazurilor se lucrează cu acest algoritm, care este implementat ca funcție (FFT și IFFT - transformata Fourier rapidă inversă) și în aplicațiile dedicate calculului științific, cum ar fi Maple, Mathcad, Matlab, Matematica etc.

$X(m)$ este un număr complex scris sub forma:

$$X(m) = X_r(m) - iX_i(m)$$

din care se pot obține modulul și faza spectrului:

$$A(m\delta v) = \sqrt{X^*(m)X(m)} \quad \phi(m\delta v) = -\arctg \frac{X_i(m)}{X_r(m)}$$

La prelucrarea spectrală a zgomotelor, inclusiv al celor acustice, trebuie să se țină cont de faptul că spectrul de fază nu are sens fizic. În acest caz este preferabil să se utilizeze densitatea spectrală de putere:

$$S(n) = S(n\delta v) = X^*(n\delta v)X(n\delta v)$$

densitatea spectrală obținându-se din spectrul semnalului X . Pentru aplicații uzuale, se evită calculul spectrului într-un număr mare de puncte, preferându-se utilizarea mai multor secvențe de semnal cu $512 - 1024$ puncte, pentru care se calculează spectrele după care acestea se și mediază.

La calculul funcției de corelație se recomandă utilizarea unui număr de valori N ale semnalului de cel puțin $5 - 10$ ori mai mare decât numărul de puncte M în care se calculează funcția de corelație. Calculul numeric se efectuează cu relațiile:

$$C_{xx}(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{j=0}^{N-m-1} x(j)x(j+m) \quad (5.141)$$

$$C_{yy}(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{j=0}^{N-m-1} y(j)y(j+m) \quad (5.142)$$

$$C_{xy}(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{j=0}^{N-m-1} x(j)y(j+m) \quad (5.143)$$

$$C_{yx}(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{j=0}^{N-m-1} y(j)x(j+m) \quad (5.144)$$

unde $m=0,1,\dots,M-1$. La calculul funcției de corelație, timpul de calcul este mult mai mare, fiind necesare $[N-(M-1)/2]M$ înmulțiri.

Funcția de convoluție dintre h și x se calculează din semnalele eșantionate cu relația:

$$y(m) = \frac{1}{N-m} \sum_{j=0}^{N-m-1} h(j)x(m-j) \quad (5.145)$$

unde $m=0,1,2,\dots,M-1$.

Pentru calculul efectiv al transformatei Fourier a unui semnal eșantionat $x(j)$, $j=1,2,\dots,N$, se recomandă efectuarea centrării semnalului, adică înlocuirea acestuia cu:

$$x(j) \rightarrow x'(j) = x(j) - \bar{x}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x(j)$$

unde \bar{x} reprezintă valoarea medie. Astfel se evită apariția în spectru al componentelor constante. În afară de acesta, semnalul centrat se înmulțește cu o fereastră de ponderare (de exemplu Hanning). Calculul curent al transformatei Fourier se face în general dintr-un semnal cu $N=512=2^9$, $1024=2^{10}$ sau $2048=2^{11}$ puncte.

Există și tehnici de prelucrare optică a semnalelor. Astfel pentru efectuarea transformatei Fourier semnalul de prelucrat este înregistrat, după anumite reguli, pe o placă fotografică și plasat în planul focal al unei lentile. Prin iluminarea plăcii cu un fascicul laser colimat, în celălalt plan focal se obține o distribuție de intensitate egală cu modulul transformatei Fourier a obiectului (semnalului) din celălalt plan focal.

6. REZULTATE ȘI PRELUCRĂRI EXPERIMENTALE

6.1. Standul experimental - Pendulul Charpy

Primul stand experimental (Figura 6.74) cu ajutorul căruia s-au efectuat măsurători de vibrații amortizate cu amortizorul MR are următoarea componență: fundația standului (a), batiul pendulului (b), o articulație între batiu și pendul (A), două articulații de care este fixat amortizorul MR (B, C).

- a - fundația batiului
- b - batiul pendulului
- B, C - articulații de care este fixat amortizorul MR
- A - articulația dintre batiu și pendul
- L_1 - lungimea tijeii între articulațiile A și B
- L - lungimea brațului pendulului
- α - unghiul maxim de pendulare

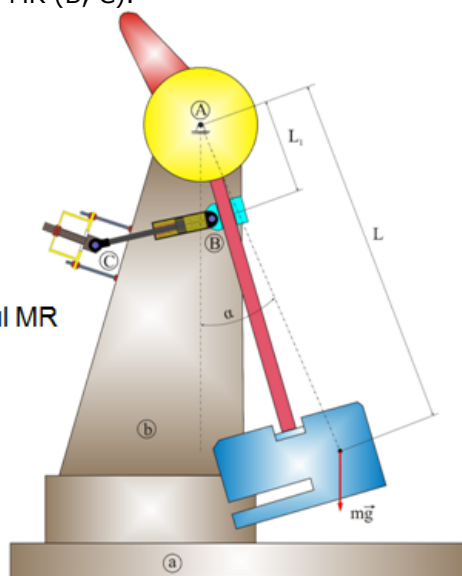


Fig. 6.74 – Schema standului experimental cu pendul Charpy

Pe acest stand (Figura 6.75) s-au realizat măsurători ale oscilațiilor libere ale pendulului, aplicând diferite valori ale tensiunii de alimentare ale amortizorului MR, acesta modificându-și vâscozitatea aparentă în funcție de câmpul magnetic rezultat.

Plaja de tensiuni aplicate bobinei din interiorul amortizorului a fost de la 0V la 2V cu un pas de 0.2V, obținându-se astfel după realizarea măsurătorilor experimentale un set de 11 semnale ale deplasărilor sistemului. Valorile semnalelor au fost înregistrate cu ajutorul unui accelerometru piezoelectric.

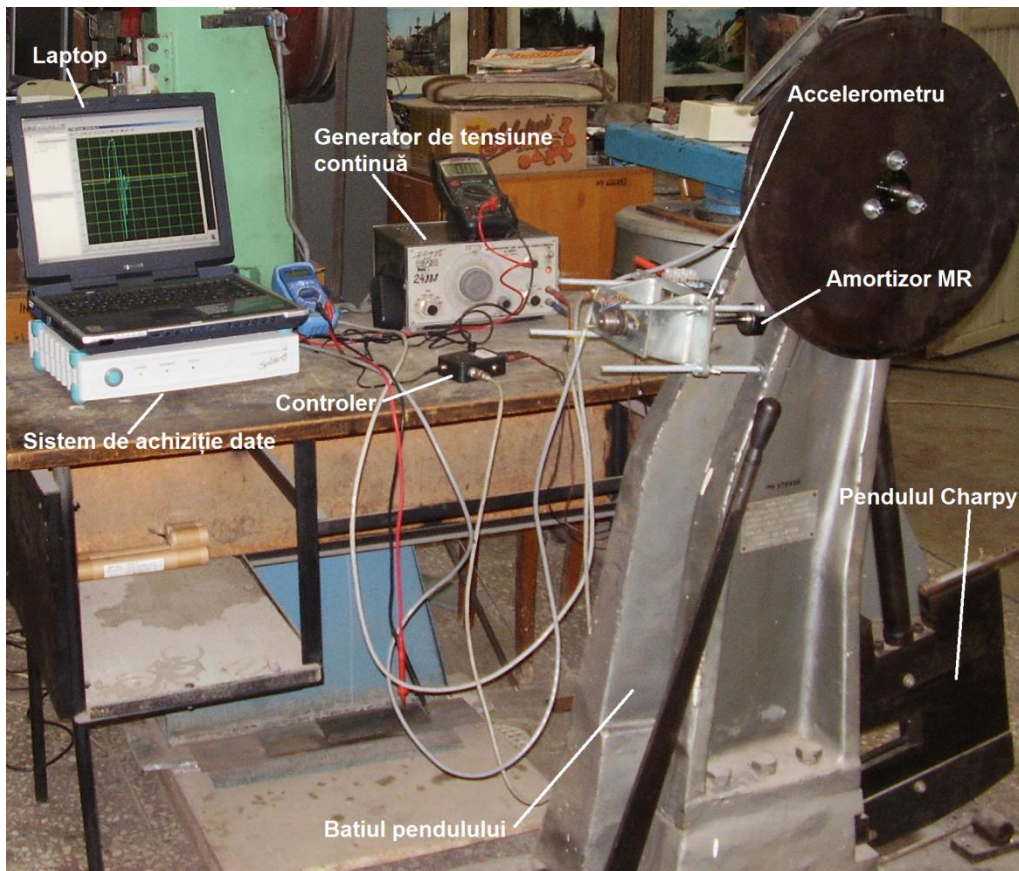


Fig 6.75 – Standul experimental cu pendul Charpy

6.2. Standul experimental - cu mișcare verticală

Al doilea stand experimental (Figura 6.76) cu ajutorul căruia s-au efectuat măsurătorile de vibrații amortizate cu amortizorul MR are următoarea componență: o fundație în care sunt încastrate două coloane de ghidaj, două platforme ghidate pe coloane, una de excitație și una amortizată, două arcuri elicoidale plasate între cele două platforme, amortizorul MR care atenuează vibrațiile resimțite de placa superioară, excentricul care antrenează sistemul în mișcarea oscilatorie verticală și o masă plasată peste platforma amortizată, pentru creșterea inerției mecanice.

Standul execută o deplasare verticală a celor două platforme, între care sunt montate două arcuri elicoidale și amortizorul MR. Această deplasare este produsă de un excentric care este acționat de un motor electric, a cărui turație este comandată printr-un variator de tensiune.

Pe stand (Figura 6.77) au fost montate trei accelerometre și doi senzori de deplasare pentru achiziția semnalelor de intrare și al celor de ieșire.

Excentricul este acționat de un motor electric comandat de un variator de tensiune. Tensiunea de alimentare a amortizorului MR este comandată de un circuit

electronic, o placă de interfață sau un amplificator de putere cu ajutorul unui program creat în Matlab (*Anexa 2*). Achiziția semnalelor se face printr-o placă de achiziție National Instruments, iar datele sunt încărcate în calculator cu ajutorul unui program în Matlab. Achizițiile s-au efectuat pentru tensiunile de comandă ale amortizorului, Tabelul 6.6.

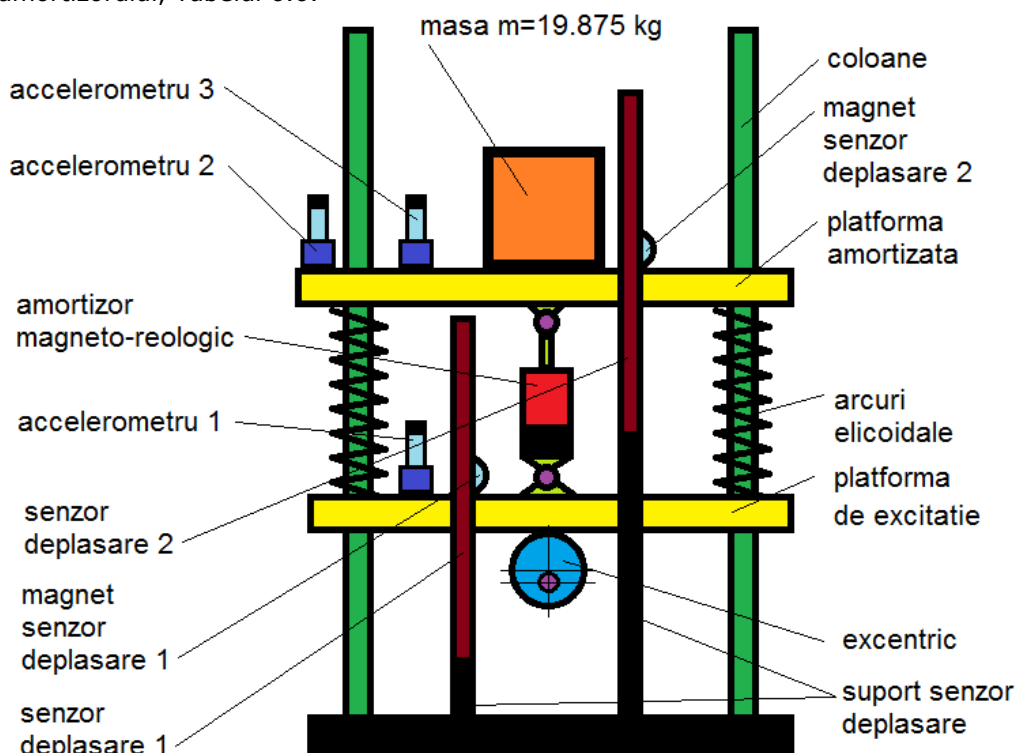


Fig. 6.76 – Schema standului experimental de măsurare pentru vibrații amortizate cu amortizorul MR

Tabelul 6.5 – Caracteristicile sistemelor de achiziție a semnalelor

Denumire	Caracteristici
Senzor deplasare 1	0.1894 V/mm
Senzor deplasare 2	0.1769 V/mm
Timp de achiziție senzori deplasare	Secunde
Eșantionare senzori deplasare	5000 aciziții/s pe un canal
Accelerometru 1	100 mV/g
Accelerometru 2	100 mV/g
Accelerometru 3	500 mV/g
Timp de achiziție accelerometre	Secunde
Eșantionare accelerometre	51200 aciziții/s pe un canal
Amplitudinea oscilațiilor	32 mm
Excentricitate	16 mm

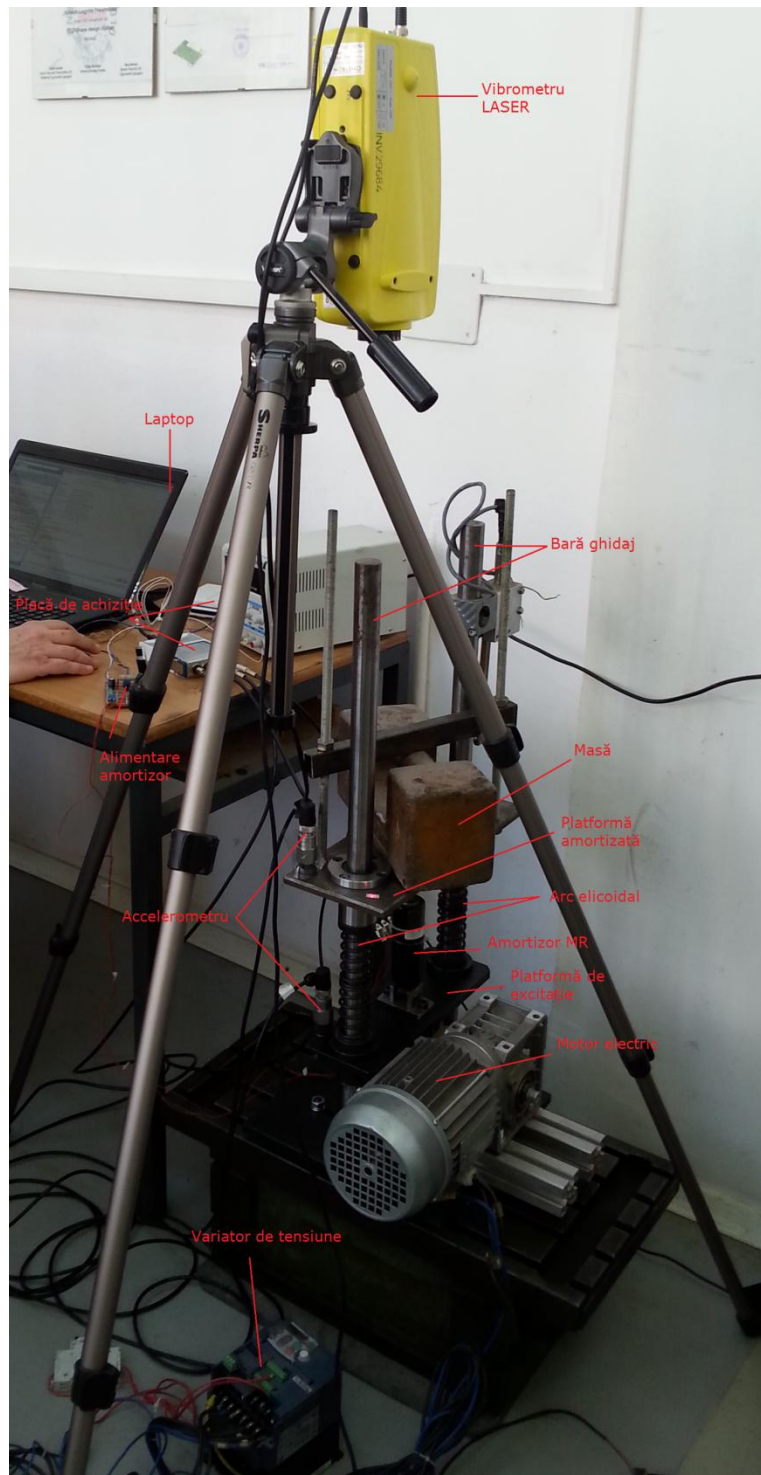


Fig. 6.77 – Standul experimental pentru amortizorul cu lichid MR

Tabelul 6.6 – Tensiunile de comandă ale amortizorului MR

Tensiunea generată din placa de achiziție [mV]	Tensiunea de ieșire la placa de interfață (amplificator de putere) [mV]
0	0
1000	0.9
2000	395
3000	1345
4000	2336
5000	3353
6000	4358
7000	5420
8000	6456
9000	7456
10000	8402

Pe standul experimental (Figura 6.77) s-au făcut înregistrări de semnale atât pentru vibrații forțate, generate de excentric prin intermediul motorului electric, cât și pentru vibrații libere.

6.3. Rezultate obținute

6.3.1. Rezultatele obținute pe standul cu pendul Charpy

Semnalele au fost obținute cu ajutorul unui accelerometru piezoelectric. Acestea sunt înregistrate pentru vibrațiile libere ale sistemului. Modificând tensiunea de alimentare a amortizorului MR, se modifică implicit coeficientul de amortizare al acestuia.

Tensiunea de alimentare a amortizorului, U , a avut valori de la 0V la 2V, cu un pas de 0.2V, obținându-se astfel 11 semnale care au fost analizate și prelucrate.

După prelucrarea rezultatelor experimentale, s-au realizat reprezentări pentru fiecare valoare a tensiunii de alimentare a bobinei din interiorul amortizorului MR. Întâi s-au efectuat reprezentări ale deplasării sistemului în funcție de timp, iar după ce s-a calculat forța de amortizare a amortizorului MR a fost și aceasta reprezentată în funcție de timp.

Reprezentările au fost efectuate cu ajutorul aplicației Origin vers. 9.

Reprezentarea deplasării în funcție de timp este redată în Figura 6.78, iar cea a forței de amortizare în funcție de timp în Figura 6.79.

În Figura 6.80 este prezentată evoluția comportării deplasării sistemului și a forței de amortizare, ca valori maxime în funcție de timp. Se poate observa că maximul deplasării scade odată cu mărirea câmpului magnetic rezultând o forță de amortizare de sens contrar, deoarece se opune deplasării, din ce în ce mai mult.

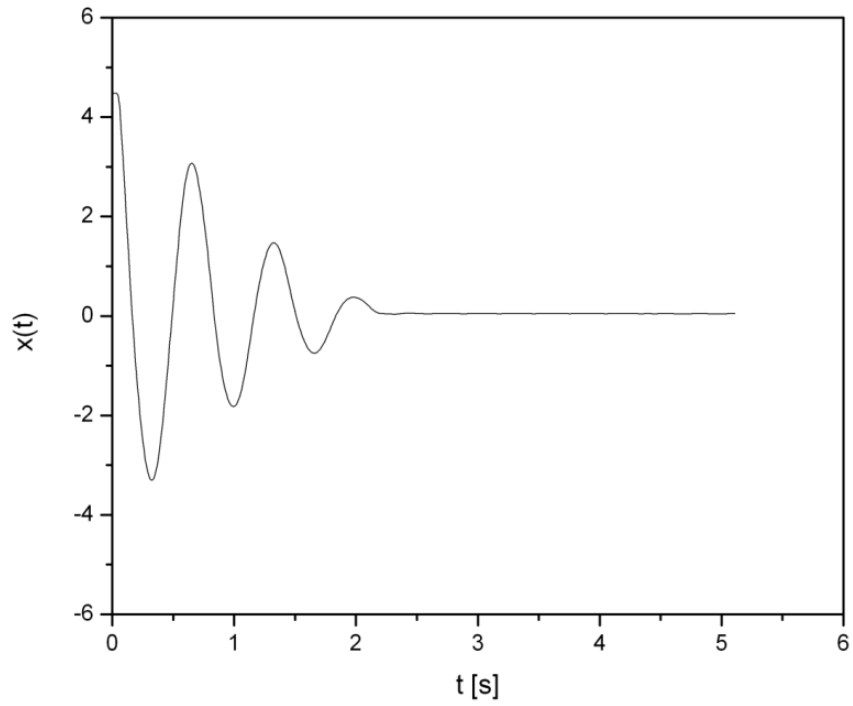


Fig. 6.78 – Deplasarea în funcție de timp, $U=0.6V$

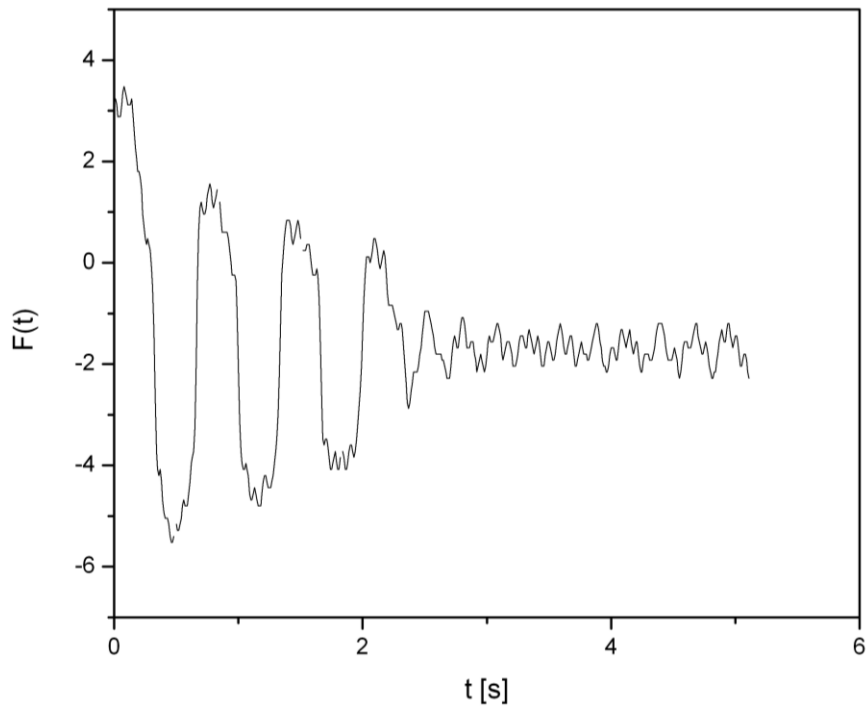


Fig. 6.79 – Forța reprezentată în funcție de timp, $U=0.6V$

Reprezentările pentru restul celor 10 seturi de măsurători se regăsesc în *Anexa 3*.

Tabelul 6.7 – Valorile maxime măsurate ale deplasării și ale forței de revenire

Tensiunea de alimentare U [V]	Deplasarea maximă a pistonului, $x(t)_{\max}$	Forța maximă de amortizare, $F(t)_{\max/\min}$
0.0	4.935	-3.00
0.2	4.501	-3.72
0.4	4.477	-4.08
0.6	4.48	-5.52
0.8	4.518	-9.00
1.0	4.500	-11.52
1.2	4.438	-13.20
1.4	4.438	-15.60
1.6	4.393	-18.72
1.8	4.313	-22.32
2.0	4.319	-24.00

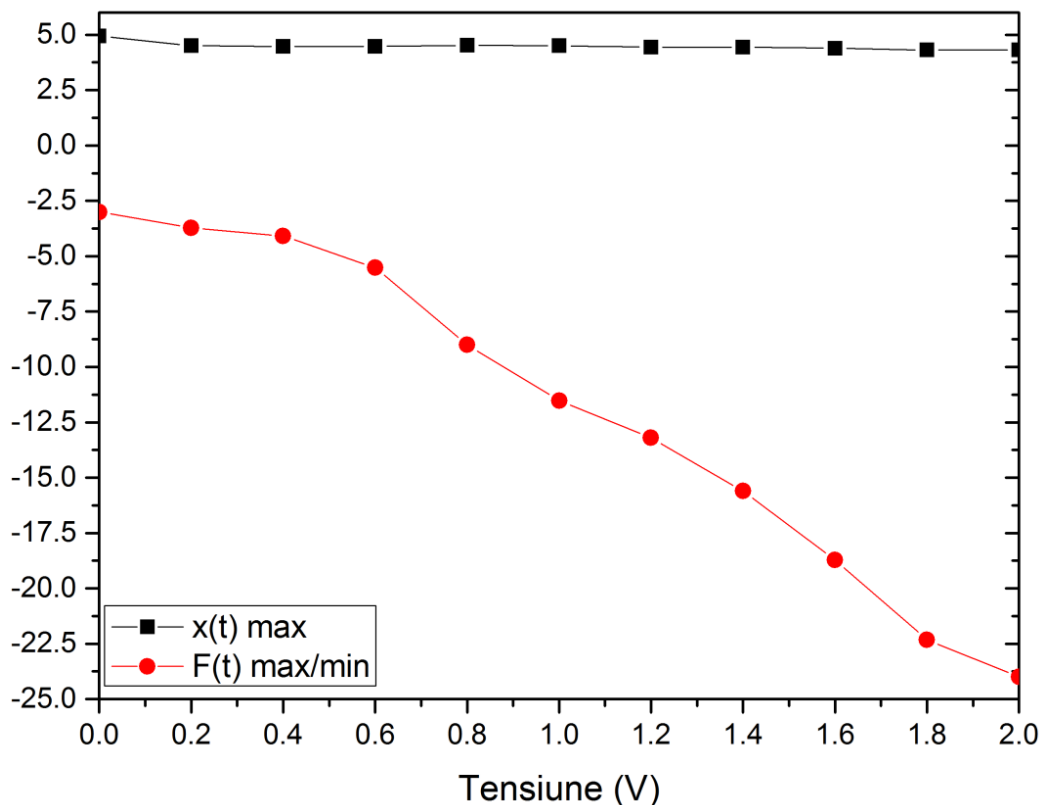


Fig. 6.80 - Tendința comportamentului $x(t)$ și $F(t)$ în funcție de tensiunea de alimentare

Diagramele tensiune-deformație pentru cazul excitării armonice trebuie să prezinte o buclă închisă de histerază. În cazul mișcării libere amortizate, curba de

histereză se prezintă sub forma unei spirale deformate (Figura 6.81) care scade ca întindere cu timpul. Din această diagramă se remarcă faptul că amortizorul are un comportament stabil.

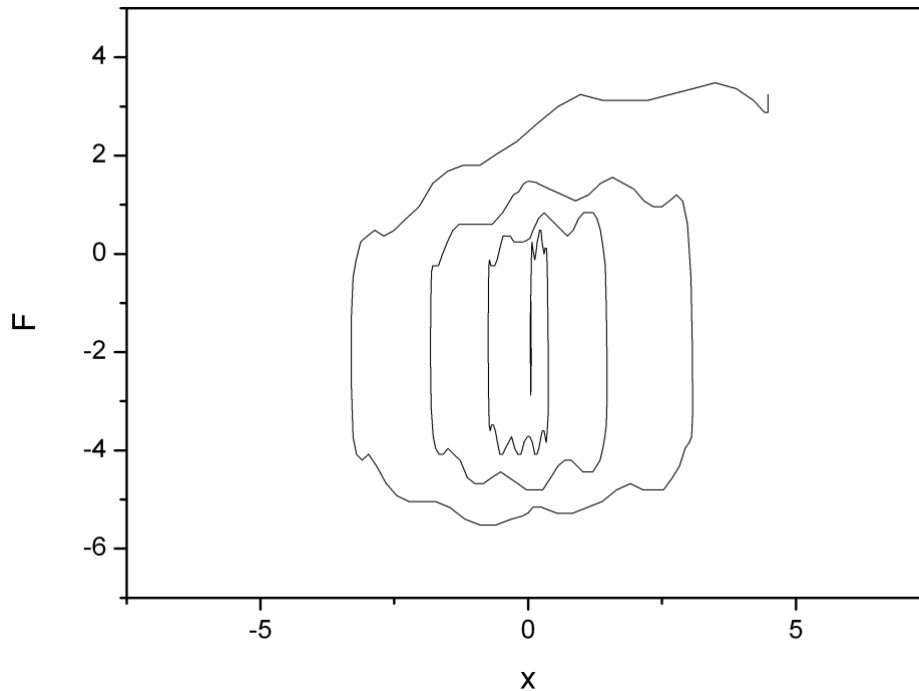


Figura 6.81 - Diagrama tensiune-deformație pentru tensiunea de alimentare a bobinei amortizorului, $U=0.6V$

6.3.2. Prelucrarea rezultatelor obținute - Pendulul Charpy

În vederea identificării parametrilor amortizorului MR testat am utilizat standul experimental de tip ciocan Charpy. Acesta a fost adaptat să înregistreze vibrațiile libere ale ciocanului la care a fost montat amortizorul magnetoreologic. Standul experimental este prezentat mai sus în Figura 6.74. Am folosit un amortizor (d) de tip RD-1005-3 (Lord Corporation), fixat pe suportul dispozitivului (coloana b fixată pe baza a) și pe partea oscilatoare (c) a ciocanului Charpy prin articulațiile B și C. Distanța dintre articulația pendulului A și centrul de greutate al acestuia a fost notată cu L , iar distanța dintre articulațiile A și B a fost notată cu L_1 . O imagine a standului experimental cu ciocan Charpy este prezentată în Figura 6.75.

Poziția unghiulară a pendulului a fost notată cu α . Această poziție a fost înregistrată cu ajutorul unui senzor potențiomtric rezistiv, fixat în articulația A. Tensiunea instantanee a senzorului unghiular a fost notată cu $x(t)$.

Forța axială de-a lungul amortizorului magnetoreologic a fost notată cu $F_d(t)$. Această forță a fost înregistrată cu ajutorul unui senzor de forță fixat de-a lungul amortizorului.

Semnalele $x(t)$ și $F(t)$ înregistrate, au fost introduse în calculator cu ajutorul plăcii de achiziție pe 16 biți de tip USB-1608-FS (Measurements Computing) cu 8 intrări analogice. Am folosit frecvența de eșantionare $v_s=100\text{Hz}$.

Numărul de puncte ale semnalului de intrare a fost notat cu n .

Am înregistrat semnalele de vibrații libere mici pentru diferite tensiuni de alimentare, U , a bobinei de magnetizare din interiorul amortizorului MR.

Folosind metoda de analiză wavelet multirezoluție am stabilit parametrii corespunzători următoarelor modele descrise de ecuațiile:

- Modelul Bouc-Wen neliniar:

$$m\ddot{x}+c\dot{x}+kx+k_3x^3+k_5x^5+f\text{sign}(\dot{x})=0 \quad (6.146)$$

- Modelul Bouc-Wen liniar:

$$m\ddot{x}+c\dot{x}+kx+f\text{sign}(x)=0 \quad (6.147)$$

- Modelul Bouc-Wen cu neliniaritate pătratică:

$$m\ddot{x}+c\dot{x}+kx+k_2x^2f\text{sign}(\dot{x})=0 \quad (6.148)$$

unde n este numărul de puncte ale semnalului, $u[V]$ este tensiunea de alimentare a bobinei de magnetizare a fluidului MR, măsurată în V , m reprezintă masa echivalentă a sistemului de translație echivalent mișcării de rotație a pendulului care oscilează și am fixat această masă la $m=1\text{kg}$, $k[N/m]$ este constanta elastică a amortizorului, $c[Ns/m]$ reprezintă coeficientul de amortizare a acestuia, $k_2[N/m^2]$ este constanta elastică pătratică, $k_3[N/m^3]$ este constanta elastică cubică, $k_5[N/m^5]$ este constanta elastică de ordinul 5 și $f[N]$ este forța de acționare a amortizorului MR. Parametrii m , k , c sunt pozitivi întotdeauna.

După aplicarea metodei analizei wavelet pentru modelele luate în considerare, au rezultat parametrii:

Tabelul 6.8 – Parametrii identificați pentru modelul Bouc-Wen neliniar

n	U[V]	m[kg]	k[N/m]	c[Ns/m]	$k_3[N/m^3]$	$k_5[N/m^5]$	f[N]
601	0	1	85.36227	0.989022	0.684275	-0.03813	-0.4626
596	0.2		7.441194	0.960516	0.001607	0	0.851208
596	0.4		93.47233	0.37894	-4.81118	0.455637	1.444625
595	0.8		26.95509	1.096038	9.488011	0.138528	0.729546
595	1		-42.1993	0.289455	27.61324	-0.52026	2.069654
574	1.4		-24.4745	0.274672	26.95935	-0.80162	0.856479
593	1.6		-61.097	1.70854	48.79314	-1.63508	-1.32964
569	1.8		-124.173	0.683027	67.61312	-2.44414	0.286307

Tabelul 6.9 – Parametrii identificați pentru modelul Bouc-Wen liniar

n	U[V]	m[kg]	k[N/m]	c[Ns/m]	f[N]
601	0	1	86.4525	0.904497	-0.11425
596	0.2		8.973766	0.519984	1.571459
596	0.4		100.0392	1.723314	-0.29002
595	0.8		142.8118	5.349433	-1.52516
595	1		170.5074	4.884476	-0.20631
574	1.4		131.097	3.286705	2.451257
593	1.6		181.3584	4.838403	2.992193
569	1.8		227.9143	5.352903	-0.97475

Tabelul 6.10- Parametrii identificați pentru modelul Bouc-Wen cu neliniaritate pătratică

n	U[V]	m[kg]	k[N/m]	c[Ns/m]	k_2 [N/m ²]	f[N]
601	0	1	85.50218	0.877733	0.982637	0.011754
596	0.2		8.694104	0.47468	2.397799	1.628312
596	0.4		91.90979	1.283148	11.07759	0.243907
595	0.8		111.851	3.525319	28.7372	-0.39434
595	1		129.6877	2.356989	36.31711	1.162537
574	1.4		83.34129	0.654991	26.34917	2.583255
593	1.6		96.22895	0.683691	45.34872	2.270684
569	1.8		128.6237	0.776947	46.41337	0.520702

După încercările modelelor teoretice s-au obținut și rezultate negative pentru coeficientul de amortizare, c , cât și pentru coeficientul elastic, k , rezultând o mișcare instabilă a amortizorului, în contradicție cu rezultatele experimentale. Așadar amortizorul MR analizat nu are un comportament caracteristic modelului matematic Bouc-Wen neliniar.

Prin urmare, comportamentul amortizorului magnetoreologic testat poate fi modelat după modele matematice Bouc-Wen liniar cu frecare uscată și Bouc-Wen cu neliniaritate pătrată.

6.3.3. Rezultatele obținute pe standul cu mișcare verticală

Măsurătorile au fost obținute cu ajutorul accelerometrelor. Semnalele sunt măsurate atât pentru vibrații libere ale sistemului, cât și pentru cele forțate, modificând tensiunea de alimentare a amortizorului MR, se modifică câmpul magnetic și implicit coeficientul de amortizare al acestuia.

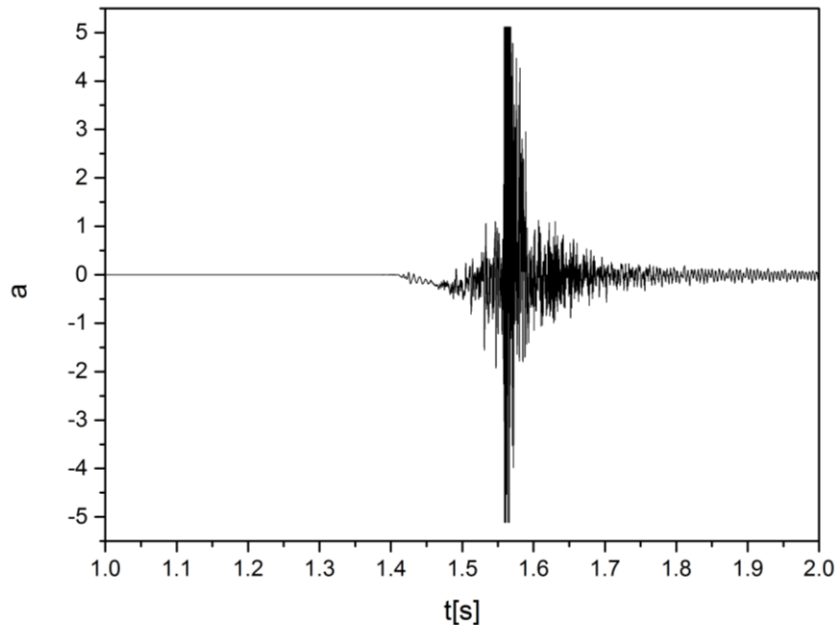
Pentru răspunsul liber al sistemului, tensiunea de alimentare a amortizorului, U , a avut valori de la 0V la 10V, cu un pas de 1V, obținându-se astfel 11 semnale.

Pentru răspunsul sistemului la vibrații forțate, motorului electric de antrenare a excentricului i s-au aplicat diferite frecvențe cuprinse între 15Hz și 150Hz cu un pas de 15Hz. Acesta excitând forțat sistemul analizat. Tensiunea de alimentare a amortizorului, u , a avut valori de la 0V la 10V, cu un pas de 1V pentru fiecare frecvență în parte, obținându-se astfel 110 semnale. Semnalele obținute din răspunsul liber al sistemului au fost prelucrate și analizate.

Ulterior s-a putut evidenția puterea spectrală a fiecărui semnal și radicalul acesteia. Prin aceste metode s-au obținut frecvențele platformei amortizate a standului experimental, pentru fiecare tensiune de alimentare a amortizorului MR.

Una dintre acestea este reprezentată în ceea ce urmează:

- Vibrații libere – tensiune de alimentare $U=4V$

Fig. 6.82 - Vibrația obținută la $U=4V$

Toate semnalele obținute au zgomot. Pentru înlăturarea zgomotului și evidențierea semnalului propriu-zis s-a folosit metoda funcției de corelație. Aceasta a fost aplicată prin intermediul unui program realizat în Matlab (*Anexa 2*).

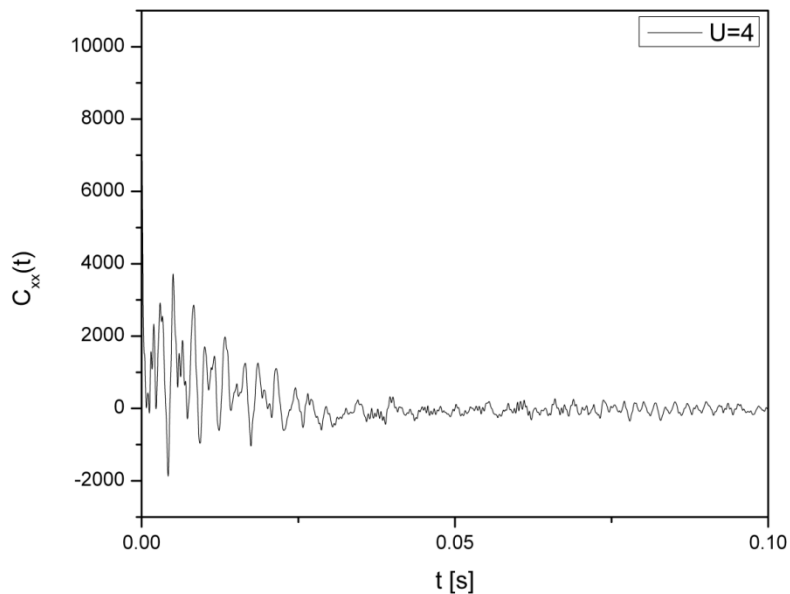


Fig. 6.83 - Semnalul rezultat după aplicarea funcției de corelație pentru înlăturarea zgomotului

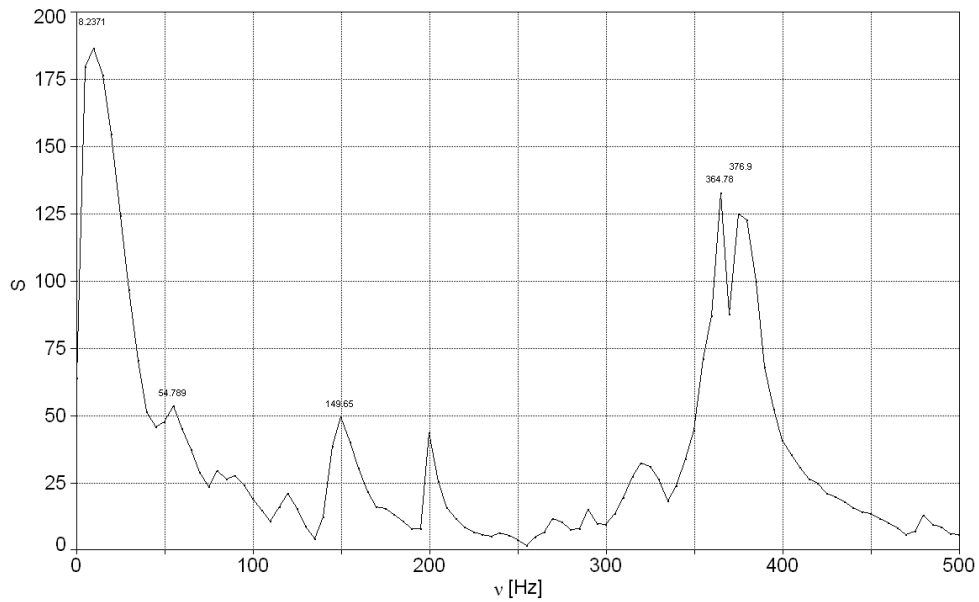


Fig. 6.84 - Puterea spectrală a semnalului

Frecvența puterii spectrale obținută are primul vârf al amplitudinii la $\nu=8.237\text{Hz}$.

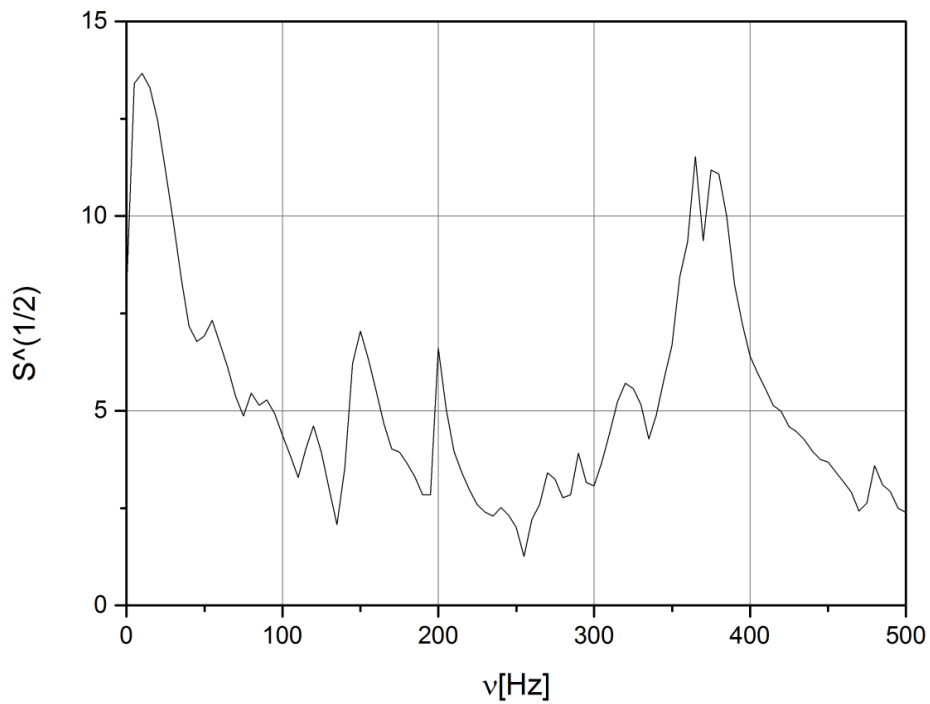


Figura 6.85 - Radicalul puterii spectrale a semnalului

Reprezentările grafice pentru restul tensiunilor de alimentare la măsurătorile efectuate pentru oscilații libere se regăsesc în *Anexa 4*.

Tabelul 6.11 – Valoarea accelerației medii în funcție de tensiunea de alimentare

Tensiunea de alimentare	Intervalul de timp analizat	Accelerația medie calculată
0V	1.1-1.5s	0.26
1V	1.2-1.6s	0.36
2V	1.1-1.5s	0.33
3V	1.3-1.7s	0.306
4V	1.4-1.8s	0.346
5V	1.2-1.6s	0.346
6V	1.2-1.6s	0.387
7V	2.1-2.5s	0.344
8V	1.0-1.4s	0.185
9V	1.7-2.1s	0.385
10V	1.0-1.4s	0.392

În Figura 6.86 sunt prezentate tendințele de variație a accelerației medii a sistemului în funcție de valoarea tensiunii de alimentare a amortizorului MR. S-au avut în vedere timpul în care se resimt oscilațiile de 0.4s din timpul total de achiziție a semnalului, în care sunt 20.480 de valori înregistrate pentru fiecare semnal în parte. Media accelerației sistemului a fost calculată în aplicația Excel, considerând toate valorile accelerației pozitive (folosind funcția ABS).

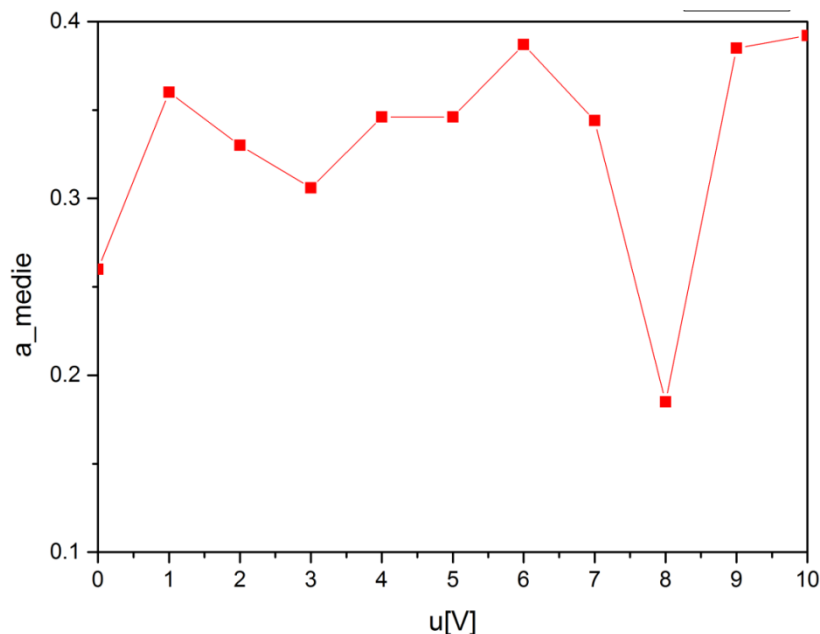


Figura 6.86 – Accelerația medie a semnalelor

Semnalele obținute din excitarea forțată a sistemului au fost alterate de zgomot (Figura 6.87), astfel încât această metodă nu este eficientă pentru studiul amortizorului MR utilizat.

Rezultatele de slabă calitate provin din faptul că pentru acest tip de amortizoare sunt necesare forțe foarte mari de acționare pentru a produce aceste mișcări armonice. Odată cu aceste forțe, apar și o serie de zgomote provenite din angrenajele sistemului.

Metodele de filtraj utilizate nu au fost suficiente pentru a obține măsurători de acuratețe. Soluția ar fi să se conceapă pentru experiment amortizoare mai mici, ușor de acționat.

În schimb, la răspunsul liber al sistemului, acesta nu interacționează cu mecanismul de excitație, obținându-se cu adevărat un răspuns liber al sistemului.

Unul dintre semnalele obținute prin excitare pe cale cinematică este reprezentat mai jos:

- Vibrații forțate – tensiune de alimentare $U=6V$ la frecvența $f=90Hz$

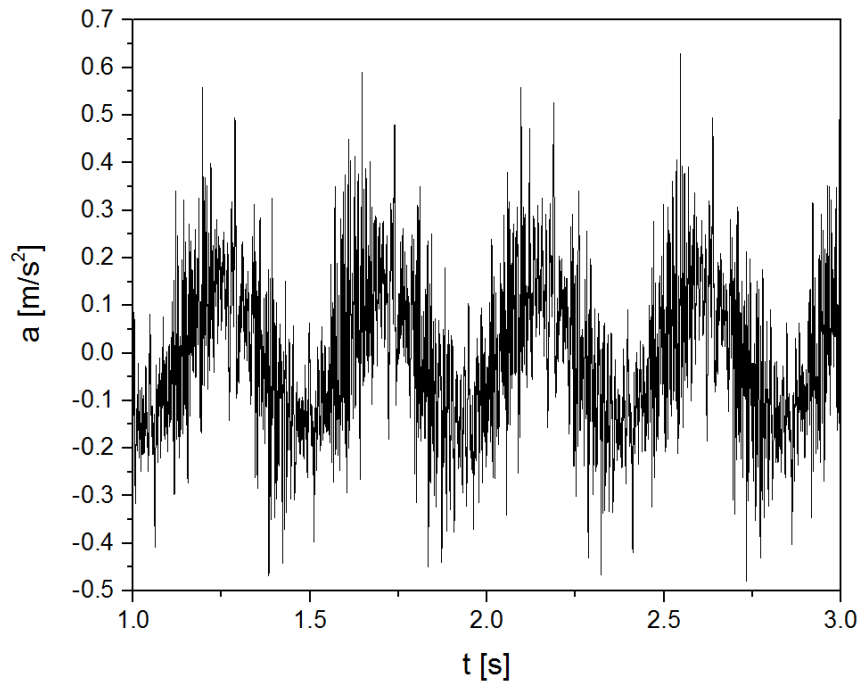


Figura 6.87 - Semnalul măsurat la tensiunea de alimentare $U=6V$ și frecvența de $90Hz$

7. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Lucrarea este dedicată unei tematici de actualitate și de mare importanță științifică, înscriindu-se în problematica comportării și simulării fluidului magnetoreologic într-un amortizor de vibrații, cu aplicabilitate în domeniul autovehiculelor. Prelucrarea semnalelor de vibrații cu ajutorul metodelor moderne de analiză a semnalelor, având drept scop determinarea coeficientului de amortizare și a forței de revenire reprezintă o nouă abordare în acest domeniu.

7.1. Concluzii

Simulink este un mediu util pentru modelarea, analiza și simularea unui număr mare de sisteme fizice și matematice. **Simularea comportării reologice a corpurilor** a fost unul dintre obiectivele specifice ale acestei lucrări. Aplicația Simulink oferă o interfață grafică cu utilizatorul, pentru realizarea modelelor sistemelor dinamice reprezentate în schema bloc. Aceasta permite modelarea rapidă și clară a sistemelor, fără a fi necesară scrierea nici măcar a unui rând de cod de simulare. Modelele realizate sunt de natură grafică, iar pe lângă numeroase alte avantaje Simulink oferă și posibilitatea de documentare și de tipărire a rezultatelor la imprimantă. Rezultatele simulării unui sistem pot fi urmărite chiar în timp ce se desfășoară simularea, pe un osciloscop reprezentat într-o fereastră a ecranului.

Diagramele de fluaj și de relaxare pentru diferite modele de **corpuri reologice** se obțin instantaneu, putându-se urmări cu ajutorul osciloscopului, diferite alte mărimi rezultate prin integrare, derivare sau multiplicare, iar valorile numerice se pot exporta sub forma unor fișiere de tip *.mat.

Modelarea și simularea comportării fluidelor magnetoreologice a fost un alt obiectiv specific al acestei lucrări. Comportarea liniară sau neliniară a acestor lichide poate fi vizualizată în mediul Simulink.

Determinarea parametrilor ce caracterizează diferite ecuații diferențiale ce guvernează modelele prin care sunt reprezentate lichidele magnetoreologice a constituit de asemenea un obiectiv specific al acestei lucrări.

Utilizarea unor tehnici moderne de analiză a semnalelor reprezintă de asemenea un obiectiv al acestei teze.

Pentru **achiziția semnalelor de vibrații** au fost **concepute standuri experimentale și realizate lanțuri de măsură**.

Prelucrarea semnalelor achiziționate pe cale experimentală a constituit un alt obiectiv principal al acestei lucrări.

Utilizarea și realizarea unor softuri/coduri dedicate analizei de semnale (FFT sau Transformata Wavelet) și utile în **determinarea parametrilor fizici ai modelelor reologice** a constituit poate cel mai important obiectiv al tezei.

7.2. Contribuții personale

Urmărind realizarea obiectivului general și a obiectivelor specifice rezultate din acesta, obiective menționate în **Introducere**, se pot enunța următoarele contribuții și realizări personale:

- Realizarea unui studiu **bibliografic a 116 referințe** cu privire la:
 - o Proprietățile materialelor existente și în curs de dezvoltare;
 - o Stadiul actual al cercetării în domeniul fluidelor magnetorelogice;
 - o Elemente de modelare reologică a corpurilor și clasificarea acestora;
 - o Definierea și caracterizarea fluidului magnetoreologic;
 - o Analiza și identificarea elementelor semalelor;
- Realizarea **modelelor reologice în aplicația Simulink**, cu ajutorul blocurilor aplicației, respectând ecuațiile caracteristice fiecărui model în parte și simularea comportamentului reologic al acestora evidențiindu-se curbele de fluaj și de relaxare a solicitării.
- Analizarea curbelor caracteristice de fluaj și de relaxare obținute prin simulare, în comparație cu cele obținute pe cale analitică în teoria cunoscută.
- **Adaptarea standului experimental ciocan pendul de tip Charpy** pentru testarea amortizorului MR de tip RD -1005/3, fabricat de LORD Corporation.
- **Achiziția semnalelor** cu ajutorul unor accelerometre, precum și **prelucrarea** acestora.
- **Realizarea standului experimental cu excitație pe cale cinematică** antrenat de un motor electric cu excentric controlat printr-un variator de tensiune.
- **Achiziția semnalelor** cu ajutorul accelerometrelor și a vibrometrului laser, printr-un program realizat în MATLAB, precum și **prelucrarea** acestora.
- Identificarea parametrilor prin analiza semnalelor de vibrații cu transformata wavelet, metoda forței de revenire și metoda Corelației.

Rezultatele cercetării sunt publicate sau în curs de publicare în volumele unor manifestări științifice indexate **ISI Proceedings în trei lucrări** [110], [111], [112], în unele **reviste de specialitate indexate BDI în două lucrări** incluse în categoria **B** [113], [114] și în **volumele unor manifestări științifice internaționale** de tip **Proceedings** în **două articole** [115], [116].

BIBLIOGRAFIE

- [1] Ogren, J., *Smart materials*. Journal of Materials Engineering and Performance, 1994. 2(2): p. 315.
- [2] Brody, H., *Biomaterials*. nature OUTLOOK, 2015. 519(7544): p. S1.
- [3] Kakani, S., Kakani, A., *Material science*. New Age International (P) Limited, 2008: New Delhi.
- [4] Talbot, D., *Smart materials*. Rochester, 2003.
- [5] Bădărău, G., *Proprietățile materialelor metalice*. 2007: Iași.
- [6] Suciu, V., Suciu, M., *Studiul Materialelor*. Fair Partners, 2007: București.
- [7] Daley, R., Daley, S., *Chapter 22 - Polymer Chemistry*. Organic Chemistry, 2005: p. 1133-1179.
- [8] *Lighter and stronger than composites made with ordinary carbon fibres but they are still extremely. Composite materials,* RSC Advancing the Chemical Science. Available: <http://www.rsc.org/Education/Teachers/Resources/Inspirational/resources/4.3.1.pdf>, acces. 17.04.2015.
- [9] Olteanu, *Tehnologie electronică*. 2. Materiale semiconductoare: Brașov.
- [10] Bulancea, V., *Biomateriale*. Iași
- [11] Yoruç, A., Şener, B., *3 Biomaterials*. A Roadmap of Biomedical Engineers and Milestones, 2012: Rijeka, p. 67-115.
- [12] *Smart structures and materials*.
- [13] Bica, I., Liu, Y., D., Chio, H., J., *Physical characteristics of magnetorheological suspensions and their applications*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2013. 19(2): p. 394-406.
- [14] O'Jenkins, J., *Smart Materials*. Engineering and Technology Magazine, 2012. p. 32-36.
- [15] Liu, X., Gao, X., Li, F., Yu, H., Ye, D., *Shear Performance of a Metal Foam Magnetorheological Fluid Damper*. IEEE Transactions on Magnetics, 2015. 51(1).
- [16] Yadmellat, P., *Adaptive Modeling of a Magnetorheological Clutch*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014. 19(5): p. 1716-1723.
- [17] Wang, D., Zi, B., Zeng, Y., Hou, Y., Meng, Q., *Temperature-dependent material properties of the components of magnetorheological fluids*. J Mater Sci, 2014. 49: p. 8459-8470.
- [18] Lager, H., Bierwisch, C., Korvink, J., Moseler, M., *Discrete element study of viscous flow in magnetorheological fluids*. Rheol Acta, 2014. 53: p. 417-443.
- [19] Zhou, H., Bai, M., *Three-Dimensional Numerical Simulation of Magnetorheological Fluid Seal Technology Applied on Circular Cooler and Its Experimental Validation*. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2013. 21(4): p. 329-340.
- [20] Niranjana, M., Jha, S., Kotnala, R., *Ball End Magnetorheological Finishing Using Bidisperse Magnetorheological Polishing Fluid*. Materials and Manufacturing Processes, 2014. 29(4): p. 487-492.
- [21] Zhang, W., Kim, S., Choi, H., *Effect of Graphene Oxide on Carbonyl-Iron-Based Magnetorheological Fluid*. IEEE Transactions on Magnetics, 2014. 50(1).

- [22] Rossa, C., Jaegy, A., Lozada, J., Micaelli, A., *Design Considerations for Magnetorheological Brakes*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014. 19(5).
- [23] Bucchini, F., Forte, P., Frenzo, F., *Temperature Effect on the Torque Characteristic of a Magnetorheological Clutch*. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2015. 22: p. 150-158.
- [24] Li, W., Yadmellat, P., Kermani, M., *Linearized Torque Actuation Using FPGA-Controlled Magnetorheological Actuators*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015. 20(2): p. 696-704.
- [25] Ubaidillah, A., Triyono, D., Mazlan, F., *Simulation And Experimental Studies On Braking Response Of Inertial Load Using Magnetorheological Brake*. 2014 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Computer Science, 2014: Bali.
- [26] Yang, D., Lu, Z., Haito, Z., Zhongxian, L., *Simplified design method for shear-valve magnetorheological dampres*. Earthq Eng & Eng Vib, 2014. 13(4): p. 637-652.
- [27] McLaughlin, G., Hu, W., W., N., *Advanced magnetorheological damper with a spiral channel bypass valve*. Journal of Applied Physics, 2014. 115.
- [28] Zalewski, R., Nachman, J., Shillor, M., Bajkowski, J., *Dynamic model for a magnetorheological damper*. Applied Mathematical Modelling, 2014. 38(9-10): p. 2366-2376.
- [29] Luu, M., Martinez-Rodrigo, M., Zabel, V., Könke, C., *Semi-active magnetorheological dampers for reducing response of high-speed railway bridges*. Control Engineering Practice, 2014. 32: p. 147-160.
- [30] Li, Z., Wu, Z., Cui, J., *Semi-active Vibration Control for SCARA Robot Using Magnetorheological Damper*. Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2014: Shenyang.
- [31] Oh, J., Choi, S., -H., Choi, S., -B., *Design of a 4-DOF MR haptic master for application to robot surgery: virtual environment work*. Smart Mater. Struct., 2014. 23.
- [32] Nirajan, M., Jha, S., Kotnala, R., *Ball End Magnetorheological Finishing Using Bidisperse Magnetorheological Polishing Fluid*. Materials and Manufacturing Processes, 2014. 29(4): p. 487-492.
- [33] Li, P., Cheung, M., Tong, H., Cheng, H., Yam, Y., *Design and Implementation of a Technique for Iterative Magnetorheological Jet Polishing*. International Journal of Optomechatronics, 2014. 8(3): p. 195-205.
- [34] Bolcu, D., Marin, M., *Elemente de plasticitate și reologie*. Tipografia Universității din Craiova, 2002: Craiova.
- [35] Vaicum, A., *Studiul reologic al corpurilor solide*. Editura Academiei Republicii Socialiste România, 1978: București.
- [36] Deepak, D., *The Origins of Rheology: A Short Historical Excursion*.
- [37] Schaller, R., Fantozzi, G., Gremaud, G., *Introduction to Mechanical Spectroscopy*. Mechanical Spectroscopy Q-1 2001, Trans Tech Publications, 2001. p. 3-12.
- [38] *Simulink - Getting Started Guide R2014b*. The MathWorks, Inc. 2014: Natick.
- [39] *Simulink® Getting Started Guide*. The MathWorks, Inc. 2014: Natick.
- [40] Vesselenyi, T., Dziřac, S., Dziřac, I., Manolescu, M., J., *Fuzzy and Neural Controllers for a Pneumatic Actuator*. International Journal of Computers, Communications & Control, 2007. II(4): p. 375-387.

- [41] Bui, H., D., Chaillat, S., Constantinescu, A., Grasso, E., *Identification of a planar crack in Zener type viscoelasticity*. Annals of Solid and Structural Mechanics, 2010. 1(3-8).
- [42] Yu, M., Ju, B., Fu, J., Liu, X., Yang, Q., *Influence of composition of carbonyl iron particles on dynamic mechanical properties of magnetorheological elastomers*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2012. 324: p. 2147-2152.
- [43] Sun, T., L., Gong, X., L., Jiang, W., Q., Li, J., F., Xu, Z, B., Li, W., H., *Study on the damping properties of magnetorheological elastomers based on cis-polybutadiene rubber*. Polymer Testing, 2008. 27: p. 520-526.
- [44] Li, J., Gong, X., Zhu, H., Jiang, W., *Influence of particle coating on dynamic mechanical behaviors of magnetorheological elastomers*. Polymer Testing, 2009. 28: p. 331-337.
- [45] Yang, I., -H., Yoon, J., -H., Jeong, J., -E., Jeong, U., -C., Kim, J., -S., Chung, K., H., Oh, J., -E., *Magnetic-field-dependent Shear Modulus of a Magnetorheological Elastomer Based on Natural Rubber*. Journal of the Korean Physical Society, 2013. 62(2): p. 220-228.
- [46] Zhang, W., Gong, X., L., Chen, L., *A Gaussian distribution model of anisotropic magnetorheological elastomers*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2010. 322: p. 3797-3801.
- [47] Guana, X., Donga, X., Ou, J., *Magnetostrictive effect of magnetorheological elastomer*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2008. 320: p. 158-163.
- [48] Pan, G., Matsuhisa, H., Honda, Y., *Analytical Model of a Magnetorheological Damper and Its Applications to the Vibration Control*. IEEE, 2000. p. 1850-1855.
- [49] Bica, I., *Advances in magnetorheological suspension: production and properties*. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2006. 12(4): p. 501-515.
- [50] Cao, Z., Jiang, W., Ye, X., Gong, X., *Preparation of superparamagnetic Fe₃O₄/PMMA nano composites and their magnetorheological characteristics*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2008. 320: p. 1499-1502.
- [51] Jiang, W., Zhang, Y., Xuan, S., Gou, C., Gong, X., *Dimorphic magnetorheological fluid with improved rheological properties*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2011. 323: p. 3246-3250.
- [52] Ekwebelam, C., See, H., *Microstructural investigations of the yielding behaviour of bidisperse magnetorheological fluids*. Rheologica Acta, 2009. 48: p. 19-32.
- [53] Karimi, H., R., *A Semiactive Vibration Control Design for Suspension Systems with MR Dampers*. Vibration Analysis and Control - New Trends and Developments, 2011. p. 115-130.
- [54] Sahin, I., Engin, T., Cesemeci, S., *Comparison of some existing parametric models for magnetorheological fluid dampers*. Smart Materials and Structures, 2010. 19.
- [55] Jang, K., -I., Seok, J., Min, B., -K., Lee, J., *Behavioral model for magnetorheological fluid under a magnetic field using Lekner summation method*. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2009. 321: p. 1167-1176.
- [56] Carlson, D., Marjoan, B., Toscano, J., Leroy, D., Burson, K., Clair, K., St., Kintz, A., *Magneto-Rheological Technology and Applications*. 2007: Cary.
- [57] Jolly, M., R., Bender, J., W., Carlson, J., D., *Properties and Applications of*

- Commercial Magnetorheological Fluids*. Lord Corporation, Cary.
- [58] Bombard, A., J., F., de Vicente, J., *Boundary lubrication of magnetorheological fluids in PTFE/steel point contacts*. *Wear*, 2012. 296: p. 484-490.
- [59] Fuchs, A., Rashid, A., Liu, Y., Kavlicoglu, B., Sahin, H., Gordaninejad, F., *Compressible Magnetorheological Fluids*. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009. 115: p. 3348-3356.
- [60] Yang, Y., Li, L., Chen, G., Liu, E., *Synthesis and characterization of iron-based alloy nanoparticles for magnetorheological fluids*. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2008. 320: p. 2030-2038.
- [61] Hu, Z., D., Yan, H., Qiu, H., Z., Zhang, P., Liu, Q., *Friction and wear of magnetorheological fluid under magnetic field*. *Wear*, 2012. 1(278-279): p. 48-52.
- [62] Sapinski, B., *Linearized Characterization of a Magnetorheological Fluid Damper*. *Mechanics*, 2005. 24(2): p. 144-149.
- [63] Samali, B., Djajakesukma, S., Nguyen, H., Li, J., *An experimental study of a five storey steel frame using semi-active control system*. *APVC Proceedings*, 2003. 2: p. 604-609.
- [64] Sapiński, B., *Control design for an mr damper in a driver's seat*. *Collection of scientific papers VSB - Technical University of Ostrava*, 2007. 2: p. 121-130.
- [65] Braz-Cesar, M., Barros, R., *Experimental and Numerical Analysis of MR Dampers*. 4th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, 2013: Kos Island.
- [66] *Automotive Suspension Systems Lord Corporation*. Available: <http://www.lord.com/products-and-solutions/active-vibration-control/automotive-suspension-systems>, acces 26.04.2015.
- [67] Sapinski, B., *Characteristics of the RD-1005-3 Magnetorheological Damper Power-Supplied from the Electromagnetic Generator*. *Mechanics - Technical Transactions Politechniki Krakowskiej*, 2011. 108(2): p. 205-213.
- [68] Lin, Y., Z., Christenson, R., E., *Comparison of Real-Time Hybrid Testing with Shake Table Tests for an MR Damper Controlled Structure*. 2009 American Control Conference, 2009: Hyatt Regency Riverfront, St. Louis.
- [69] Ali, S. F., Ramaswamy, A., *Testing and Modeling of MR Damper and Its Application to SDOF Systems Using Integral Backstepping Technique*. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2009. 131.
- [70] Bica, I., *Damper with magnetorheological suspension*. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2002. 241(2): 196-200.
- [71] Ahn, K., K., Truong, D. Q., Islam, M., A., *Modeling of a Magneto-Rheological (MR) Fluid Damper using a Self Tuning Fuzzy Mechanism*. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2009. 23(5): p. 1485-1499.
- [72] Vaculín, O., von Tapavicza, M., Bose, L., Altmann, F., *Modelling and simulation of an experimental vehicle with magnetorheological dampers*. *EUROMECH 455 on Semi-Active Vibration Suppression*, 2004: Prague.
- [73] Sapiński, B., Rosół, M., *MR damper performance for shock isolation*. *Journal of theoretical and applied mechanics*, 2007. 45(1): p. 133-145.
- [74] Braz-César, M., Barros, R., *Experimental Behaviour and Numerical Analysis of MR dampers*. 15 WCEE, 2012: Lisboa.
- [75] Truong, D., Q., Ahn, K., K., *MR Fluid Damper and Its Application to Force Sensorless Damping Control System*. *Smart Actuation and Sensing Systems – Recent Advances and Future Challenges*, 2012. p. 383-424.

- [76] Truong, D., Q., Ahn, K., K., *Nonlinear black-box models and force-sensorless damping control for damping systems using magneto-rheological fluid dampers*. Sensors and Actuators A: Physical, 2011. 167: p. 556-573.
- [77] *Lord MR Products*. Lord Corporation, Available: <http://www.lordstore.com/lord-mr-products>, acces 25.04.2015.
- [78] Sapiński, B., *Facilities for testing mr damper-based vibration reduction systems*. Academic journal of manufacturing engineering, 2009. 7(2): p. 77-82.
- [79] Boczkowska, A., Awietjan, S., F., Wejrzanowski, T., *Image analysis of the microstructure of magnetorheological elastomers*. Journal of Materials Science, 2009. 44: p. 3135-3140.
- [80] Chen, L., Jerrams, S., *A Rheological Model of the Dynamic Behaviour of Magnetorheological Elastomers*. Journal of Applied Physics, 2011. 110.
- [81] von Lockette, P., R., Lofland, S. E., Koo, J., -H., Kadlowec, J., Dermond, M., *Dynamic characterization of bimodal particle mixtures in silicone rubber magnetorheological materials*. Polymer Testing, 2008. 27(8): p. 931-935.
- [82] Grigoriew, H., Wiegart, L., Boczkowska, A., Mirkowska, M., *Dynamic correlation in magnetorheological composite under magnetic field studied by XPCS*. Solid State Communications, 2010. p. 840-843.
- [83] Boczkowska, A., Awietjan, S., F., Pietrzko, S., Kurzydłowski, K., J., *Mechanical properties of magnetorheological elastomers under shear deformation*. Composites: Part B, 2012. 43: p. 636-640.
- [84] Ponte Castaneda, P., Galipeau, E., *Homogenization-based constitutive models for magnetorheological elastomers at finite strain*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2011. 59: p. 194-215.
- [85] Bica, I., *Influence of the transverse magnetic field intensity upon the electric resistance of the magnetorheological elastomer containing graphite microparticles*. Materials Letters, 2009. 63: p. 2230-2232.
- [86] Bica, I., Liu, Y., D., Choi, H., J., *Magnetic field intensity effect on plane electric capacitor characteristics and viscoelasticity of magnetorheological elastomer*. Colloid and Polymer Science, 2012. 290: p. 1115-1122.
- [87] Wu, J., Gong, X., Fan, Y., Xia, H., *Improving the Magnetorheological Properties of Polyurethane Magnetorheological Elastomer Through Plasticization*. Journal of Applied Polymer Science, 2012. 123: p. 2476-2484.
- [88] Chen, L., Gong, X., L., Li, W. H., *Effect of carbon black on the mechanical performances of magnetorheological elastomers*. Polymer Testing, 2008. 27: p. 340-345.
- [89] Sapiński, B., Filuś, J., *Analysis of parametric models of MR linear damper*. Journal of theoretical and applied mechanics, 2003. 41(2): p. 215-240.
- [90] Iskandarani, Y., Karimi, H., R., *Hysteresis model parameters identification for the SAS rotational MR damper*. WSEAS transactions on systems and control, 2011. 6(10): p. 371-381.
- [91] Rashid, M., Hussain, M., Rahim, N., *Application of Magneto-Rheological Damper for Car Suspension Control*. Fournal of Applied Sciences, 2006. 6(4): p. 933-938.
- [92] Spencer, B., Dyke, S., Sain, M., Carlson, J., *Phenomenological Model of a Magnetorheological Damper*. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 1997. 123(3): p. 230-238.
- [93] Torresani, B., *Analyse continue par ondelettes*. Inter Editions et CNRS Editions, 1995: Paris.

- [94] Mix, D., Olejniczak, K., *Elements of Wavelets for Engineers and Scientists*. John Wiley&Sons, 2003: Hoboken.
- [95] Akansu, A., Haddad, R., *Multiresolution Signal Decomposition Transforms Subbands and Wavelets*. Academic Press, 2001: Newark and London.
- [96] Polikar, R., *The Story of Wavelets*. IMACS/IEEE CSCC 99 Proceedings, 1999. p. 5481-5485.
- [97] Gao, R., Yan, R., *Wavelets - Theory and Applications for Manufacturing*. Springer US, 2011: New York.
- [98] Bereteu, L., Drăgănescu, G., E., Stănescu, D., V., *A Nonlinear Fractional Oscillator and Its Experimental Identification in Terms of Wavelet Method*. AIP Conference Proceedings, 2011. 1378: p. 235-240.
- [99] Rao, R., Bopardikar, A., *Wavelet Transforms, Introduction to Theory and Applications*. Addison Wesley, 1998.
- [100] Donoho, D., *Denoising via Soft Thresholding*. IEEE Tran. on Information Theory, 1995. 41(5): p. 613-627.
- [101] Wronell, G., *Emerging Applications of Multirate Signal Processing and Wavelets in Digital Communications*. Proceedings of the IEEE, 1996. 84(4): p. 586-603.
- [102] Polikar, R., Udpa, L., Udpa, S., Taylor, T., *Frequency Invariant Classification of Weld Inspection Signals*. IEEE Tran. Ultra. Ferro and Freq. Cont., 1998. 45(3): p. 614-625.
- [103] Gao, R., X., Yan, R., *Theory and Applications for Manufacturing*. Springer, 2011.
- [104] Mallat, S., *A Wavelet Tour of Signal Processing*. Academic Press, 1999: New York.
- [105] Mayer, Y., *Wavelets. Algorithms and Applications*. SIAM Press, 1993: Philadelphia
- [106] Mallat, S., G., *Multiresolution Approximations and Wavelet Orthonormal Bases of $L_2(R)$* . Trans. AMS, 1989. 315: p. 69-87.
- [107] Cohen, A., Ryan, R., D., *Wavlets and Multiscale Signal Processing*. Chapman & Hall, 1995: London.
- [108] Staszewski, W., J., Chance, J., E., *Identification of nonlinear systems using wavelets - experimental study*. IMAC97, 1997. p. 1012-1016.
- [109] Papoulis, A., *The Fourier Integral and its Applications*. J. Wiley and Sons, 1965.
- [110] **Perescu, A.**, Bereteu, L., *Simulation and comparison of quarter-car passive suspension system with Bingham and Bouc-Wen MR semi-active suspension models*. AIP Conference Proceedings, 2013. 1564(22): p. 22-27.
- [111] **Perescu, A.**, Bereteu, L., Simoiu, D., Nyaguly, E., *Nondestructive method for the determination of the elastic properties of welded aluminium plates*. Advanced Materials Research, 2015. 1111: p. 73-78.
- [112] **Perescu, A.**, Suciu, O., Neamtu, A., Neş, C., Bereteu, L., *Viscoelastic behavior simulation of cortical bone tissue using Burgers rheological model*. Applied Mechanics and Materials - **în curs de publicare**
- [113] **Perescu, A.**, *Quarter car suspension with 1-DOF simulated using Simulink*. Sci. Bulletin of the Politeh. Univ. of Timisoara - Trans. on Mech., 2011. 56(2): p. 65-68.
- [114] Bereteu, L., **Perescu, A.**, *Quarter car suspension system with one degree of freedom simulated using Simulink*. The Annals of the West Univ. of Timiosara - Physics Series, 2012. 56: p. 88-93.
- [115] **Perescu, A.**, Bereteu, L., *Analysis of quarter passive suspension system*

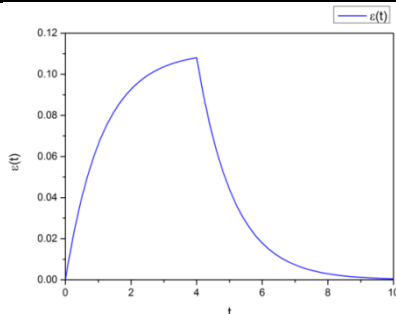
- with 1-DOF and 2-DOF using Simulink*. Proc. ModTech Int. Conf., 2012. 2: p.729-732.
- [116] **Perescu, A.**, Bereteu, L., *Analysis of quarter passive suspension system using Simulink*. Proc. ModTech Int. Conf., 2012. 2: p. 733-736.

ANEXA 1

Valori numerice obținute prin simulare a modelelor reologice

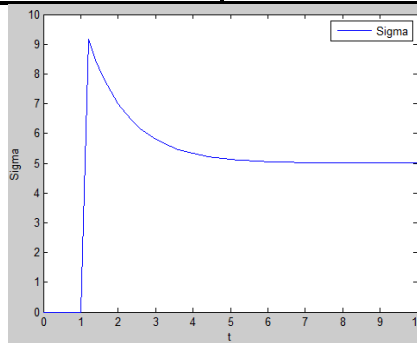
Tabelul A.12 – Valori numerice simulate pentru modelul reologic Kelvin-Voigt - FLUAJ

Valori numerice obținute prin simulare pentru modelul Kelvin-Voigt			
FLUAJ			
Timpul (s)	$\epsilon(t)$	Timpul (s)	$\epsilon(t)$
0	0		
3.16E-30	3.16E-31	4.600000000000006	0.062981
0.002009509	0.000201	4.800000000000006	0.052606
0.012057055	0.001199	5.000000000000006	0.04394
0.062294784	0.006058	5.200000000000006	0.036702
0.262294784	0.023363	5.400000000000006	0.030656
0.462294784	0.037818	5.600000000000006	0.025606
0.662294784	0.049892	5.800000000000006	0.021388
0.862294784	0.059976	6.000000000000006	0.017865
1.062294784	0.0684	6.200000000000006	0.014922
1.262294784	0.075436	6.400000000000006	0.012464
1.462294784	0.081312	6.600000000000006	0.010411
1.662294784	0.086221	6.800000000000006	0.008696
1.862294784	0.090321	7.000000000000006	0.007263
2.062294784	0.093746	7.200000000000006	0.006067
2.262294784	0.096607	7.400000000000006	0.005067
2.462294784	0.098996	7.600000000000006	0.004233
2.662294784	0.100992	7.800000000000006	0.003535
2.862294784	0.102659	8.000000000000006	0.002953
3.062294784	0.104051	8.200000000000006	0.002467
3.262294784	0.105214	8.400000000000006	0.00206
3.462294784	0.106185	8.600000000000006	0.001721
3.662294784	0.106997	8.800000000000006	0.001437
3.862294784	0.107675	9.000000000000006	0.001201
3.999999999999997	0.108075	9.200000000000006	0.001003
4.000000000	0.108075	9.400000000000006	0.000838
4.000000000000006	0.108075	9.600000000000006	0.0007
4.200000000000006	0.108075	9.800000000000005	0.000584
4.400000000000006	0.090272	10	0.000488
	0.075401		



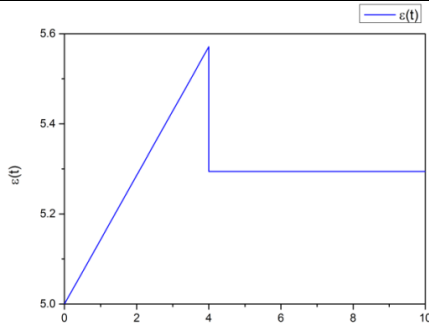
Tabelul A.13 – Valori numerice simulate pentru modelul reologic Kelvin-Voigt - RELAXARE

Valorile numerice obținute prin simulare pentru modelul Kelvin-Voigt			
RELAXARE			
Timpul (s)	$\sigma(t)$	Timpul (s)	$\sigma(t)$
0	0	5.200000000000000	5.10868355543578
0.200000000000000	0	5.400000000000000	5.09056962952983
0.400000000000000	0	5.600000000000000	5.07547469127485
0.600000000000000	0	5.800000000000000	5.06289557606238
0.800000000000000	0	6.000000000000000	5.05241298005198
1	0	6.200000000000000	5.04367748337665
1.200000000000000	9.16666666666667	6.400000000000000	5.03639790281388
1.400000000000000	8.47222222222222	6.600000000000000	5.03033158567822
1.600000000000000	7.89351851851852	6.800000000000000	5.02527632139853
1.800000000000000	7.41126543209877	7.000000000000000	5.02106360116544
2.000000000000000	7.00938786008231	7.200000000000000	5.01755300097120
2.200000000000000	6.67448988340192	7.400000000000000	5.01462750080933
2.400000000000000	6.39540823616827	7.600000000000000	5.01218958400778
2.600000000000000	6.16284019680689	7.800000000000000	5.01015798667315
2.800000000000000	5.96903349733908	8.000000000000000	5.00846498889429
3.000000000000000	5.80752791444923	8.200000000000000	5.00705415741191
3.200000000000000	5.67293992870769	8.400000000000000	5.00587846450992
3.400000000000000	5.56078327392308	8.600000000000000	5.00489872042494
3.600000000000000	5.46731939493589	8.800000000000000	5.00408226702078
3.800000000000000	5.38943282911325	9	5.00340188918398
4.000000000000000	5.32452735759437	9.200000000000000	5.00283490765332
4.200000000000000	5.27043946466198	9.400000000000000	5.00236242304443
4.400000000000000	5.22536622055165	9.600000000000000	5.00196868587036
4.600000000000000	5.18780518379304	9.800000000000000	5.00164057155864
4.800000000000000	5.15650431982753	10	5.00136714296553
5.000000000000000	5.13042026652295		



Tabelul A.14 - Valori numerice simulate pentru modelul reologic Maxwell – FLUAJ

Valori numerice obținute prin simulare pentru modelul Maxwell			
FLUAJ			
Timpul (s)	$\epsilon(t)$	Timpul (s)	$\epsilon(t)$
0	5	4.00021102815411	5.29423256321343
3.15544362088405E-30	5	4.00105514076848	5.29423256321343
0.2	5.02857142857143	4.00527570384031	5.29423256321343
0.4	5.05714285714286	4.02637851919949	5.29423256321343
0.6	5.08571428571429	4.13189259599536	5.29423256321343
0.8	5.11428571428571	4.33189259599536	5.29423256321343
1	5.14285714285714	4.53189259599536	5.29423256321343
1.2	5.17142857142857	4.73189259599536	5.29423256321343
1.4	5.2	4.93189259599536	5.29423256321343
1.6	5.22857142857143	5.13189259599536	5.29423256321343
1.8	5.25714285714286	5.33189259599536	5.29423256321343
2	5.28571428571429	5.53189259599536	5.29423256321343
2.2	5.31428571428571	5.73189259599536	5.29423256321343
2.4	5.34285714285714	5.93189259599537	5.29423256321343
2.6	5.37142857142857	6.13189259599537	5.29423256321343
2.8	5.4	6.33189259599537	5.29423256321343
3	5.42857142857143	6.53189259599537	5.29423256321343
3.2	5.45714285714286	6.73189259599537	5.29423256321343
3.4	5.48571428571428	6.93189259599537	5.29423256321343
3.6	5.51428571428571	7.13189259599537	5.29423256321343
3.8	5.54285714285714	7.33189259599537	5.29423256321343
3.99999999999997	5.57142857142857	7.53189259599537	5.29423256321343
4	5.57142857142857	7.73189259599537	5.29423256321343
4.000000000000069	5.29423256321343	7.93189259599537	5.29423256321343
4.000000000000139	5.29423256321343	8.13189259599537	5.29423256321343
4.000000000000484	5.29423256321343	8.33189259599537	5.29423256321343
4.000000000002213	5.29423256321343	8.53189259599536	5.29423256321343
4.00000000010857	5.29423256321343	8.73189259599536	5.29423256321343
4.00000000054075	5.29423256321343	8.93189259599536	5.29423256321343
4.00000000270168	5.29423256321343	9.13189259599536	5.29423256321343
4.00000001350632	5.29423256321343	9.33189259599536	5.29423256321343
4.00000006752953	5.29423256321343	9.53189259599536	5.29423256321343
4.00000033764557	5.29423256321343	9.73189259599536	5.29423256321343
4.00000168822575	5.29423256321343	9.93189259599536	5.29423256321343
4.00000844112666	5.29423256321343	10	5.29423256321343
4.00004220563124	5.29423256321343		

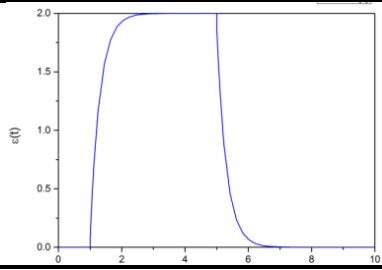


Tabelul A.15 - Valori numerice simulate pentru modelul reologic Maxwell – RELAXARE

Valori numerice obținute prin simulare pentru modelul Maxwell			
RELAXARE			
Timpul (s)	$\sigma(t)$	Timpul (s)	$\sigma(t)$
0	4	5.000000000000000	0.229730481376317
3.15544362088405e-30	4	5.200000000000000	0.204920292850401
0.200000000000000	3.56801224848739	5.400000000000000	0.182789528713463
0.400000000000000	3.18267785133902	5.600000000000000	0.163048819336219
0.600000000000000	2.83895838914179	5.800000000000000	0.145440046123259
0.800000000000000	2.53235957635098	6.000000000000000	0.129732966497090
1	2.25887249649866	6.200000000000000	0.115722203373556
1.200000000000000	2.01492118381963	6.400000000000000	0.103224559764699
1.400000000000000	1.79731586590129	6.600000000000000	0.0920766233962911
1.600000000000000	1.60321125598413	6.800000000000000	0.0821326300193319
1.800000000000000	1.43006934956606	7.000000000000000	0.0732625574773649
2.000000000000000	1.27562623885953	7.200000000000000	0.0653504256086874
2.200000000000000	1.13786251118567	7.400000000000000	0.0582927797539152
2.400000000000000	1.01497684425128	7.600000000000000	0.0519973380400869
2.600000000000000	0.905362453054910	7.800000000000000	0.0463817847539423
2.800000000000000	0.807586080455128	8.000000000000000	0.0413726940271930
3.000000000000000	0.720369256692955	8.200000000000000	0.0369045697604865
3.200000000000000	0.642571582828556	8.400000000000000	0.0329189892326433
3.400000000000000	0.573175819515555	8.600000000000000	0.0293638391974740
3.600000000000000	0.511274586142074	8.800000000000000	0.0261926344798004
3.800000000000000	0.456058496423811	9	0.0233639101610202
3.999999999999997	0.406805575316732	9.200000000000000	0.0208406794067698
4.000000000000000	0.406805575316726	9.400000000000000	0.0185899498475384
4.200000000000000	0.362871818870759	9.600000000000000	0.0165822921886959
4.400000000000000	0.323682773590442	9.800000000000000	0.0147914554093159
4.600000000000000	0.288726025198767	10	0.0131940235183485
4.800000000000000	0.257544498591570		

Tabelul A.16 - Valori numerice simulate pentru modelul reologic Zener - FLUAJ

Valorile numerice obținute prin simulare pentru modelul Zener					
FLUAJ					
Timpul (s)	$\epsilon(t)$	Timpul (s)	$\epsilon(t)$	Timpul (s)	$\epsilon(t)$
0	0	1.00390625	0.085850679	5.000000001	1.889396165
0.2	0	1.0078125	0.110612936	5.000000002	1.889395825
0.4	0	1.015625	0.159180588	5.000000003	1.889395144
0.6	0	1.03125	0.252602616	5.000000007	1.889393783
0.8	0	1.0625	0.425463717	5.000000014	1.889391062
1	0	1.125	0.721576723	5.000000027	1.889385619
1	0.060763889	1.25	1.157209049	5.000000054	1.889374733
1	0.060763889	1.45	1.567267117	5.000000108	1.88935296
1	0.060763889	1.65	1.777812342	5.000000216	1.889309417
1	0.060763889	1.85	1.885917254	5.000000432	1.889222332
1	0.060763889	2.05	1.941423961	5.000000864	1.889048176
1	0.060763889	2.25	1.969924003	5.000001729	1.888699911
1	0.060763889	2.45	1.984557413	5.000003457	1.888003573
1	0.060763889	2.65	1.992070969	5.000006914	1.886611669
1	0.060763889	2.85	1.995928822	5.000013828	1.883830937
1	0.060763889	3.05	1.997909644	5.000027657	1.878281764
1	0.060763889	3.25	1.998926702	5.000055313	1.867232407
1	0.060763889	3.45	1.999448913	5.000110626	1.845328311
1	0.060763889	3.65	1.999717043	5.000221252	1.802287962
1	0.060763889	3.85	1.999854715	5.000442505	1.719195462
1	0.060763889	4.05	1.999925403	5.056640625	1.564326509
1	0.060763889	4.25	1.999961698	5.11328125	1.295184711
1	0	4.45	1.999980334	5.2265625	0.887852751
1	0.06076389	4.65	1.999989902	5.4265625	0.455869964
1	0.06076389	4.85	1.999994815	5.6265625	0.234067444
1	0.060763892	5	1.999996856	5.8265625	0.120182448
1.000000001	0.060763895	5	1.999996856	6.0265625	0.061707945
1.000000002	0.060763901	5	1.889396505	6.2265625	0.031684081
1.000000004	0.060763913	5	1.889396505	6.4265625	0.016268262
1.000000007	0.060763937	5	1.889396505	6.6265625	0.008352975
1.000000015	0.060763985	5	1.889396505	6.8265625	0.004288854
1.00000003	0.060764082	5	1.889396505	7.0265625	0.002202121
1.00000006	0.060764274	5	1.889396505	7.2265625	0.001130684
1.000000119	0.060764659	5	1.889396505	7.4265625	0.000580552
1.000000238	0.06076543	5	1.889396505	7.6265625	0.000298086
1.000000477	0.060766971	5	1.889396505	7.8265625	0.000153053
1.000000954	0.060770054	5	1.889396505	8.0265625	7.86E-05
1.000001907	0.060776218	5	1.889396505	8.2265625	4.03E-05
1.000003815	0.060788547	5	1.889396505	8.4265625	2.07E-05
1.000007629	0.060813206	5	1.889396504	8.6265625	1.06E-05
1.000015259	0.060862521	5	1.889396504	8.8265625	5.46E-06
1.000030518	0.060961148	5	1.889396502	9.0265625	2.80E-06
1.000061035	0.061158387	5.00088501	1.8893965	9.2265625	1.44E-06
1.00012207	0.061552806	5.00177002	1.889396494	9.4265625	7.39E-07
1.000244141	0.062341401	5.003540039	1.889396484	9.6265625	3.80E-07
1.000488281	0.06391763	5.007080078	1.889396462	9.8265625	1.95E-07
1.000976563	0.067066243	5.014160156	1.88939642	10	1.09E-07
1.001953125	0.073348115	5.028320313	1.889396335		



Tabelul A.17 - Valori numerice simulate pentru modelul reologic Zener – RELAXARE

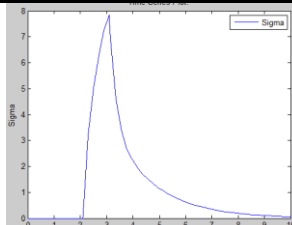
Valori numerice obținute prin simulare pentru modelul Zener			
RELAXARE			
Timpul (s)	$\sigma(t)$	Timpul (s)	$\sigma(t)$
0	0	5.16853704700650	20.3799040164751
0.200000000000000	0	5.36853704700650	20.2814399103324
0.400000000000000	0	5.56853704700650	20.2084958823622
0.600000000000000	0	5.76853704700650	20.1544575995304
0.800000000000000	0	5.96853704700650	20.1144250417917
1	0	6.16853704700650	20.0847681838177
1.200000000000000	0	6.36853704700650	20.0627978358167
1.400000000000000	0	6.56853704700650	20.0465217963350
1.600000000000000	0	6.76853704700651	20.0344642057500
1.800000000000000	0	6.96853704700651	20.0255317200011
2.000000000000000	0	7.16853704700651	20.0189143696200
2.200000000000000	1.40740635723956	7.36853704700651	20.0140121142684
2.36853704700650	7.58504920160196	7.56853704700651	20.0103804329837
2.56853704700650	14.4900469853139	7.76853704700651	20.0076900164290
2.76853704700650	20.7573147776050	7.96853704700651	20.0056969061668
2.96853704700650	26.5521404165675	8.16853704700651	20.0042203732817
3.16853704700650	27.5192961907376	8.36853704700651	20.0031265304563
3.36853704700650	25.6528530677758	8.56853704700651	20.0023161914934
3.56853704700650	24.1877379325402	8.76853704700650	20.0017158774268
3.76853704700650	23.1023535870067	8.96853704700650	20.0012711536814
3.96853704700650	22.2982808222136	9.16853704700650	20.0009416941191
4.16853704700650	21.7026088708512	9.36853704700650	20.0006976243918
4.36853704700650	21.2613240901994	9.56853704700650	20.0005168130311
4.56853704700650	20.9344121763690	9.76853704700650	20.0003828646364
4.76853704700650	20.6922297941750	9.96853704700650	20.0002836331922
4.96853704700650	20.5128166135480	10	20.0002705582446

Tabelul A.18 - Valori numerice simulate pentru modelul reologic Burgers – FLUAJ

Valori numerice obținute prin simulare pentru modelul Burgers			
FLUAJ			
Timpul (s)	$\epsilon(t)$	Timpul (s)	$\epsilon(t)$
0	0	5.200000000000000	78.9118054547998
0.200000000000000	0.051500000000000	5.400000000000000	87.1158845469728
0.400000000000000	0.210770940843370	5.600000000000000	95.7802287673377
0.600000000000000	0.485978743986227	5.800000000000000	104.889264463406
0.800000000000000	0.892190724908729	6	114.420903873868
1	1.44452771914160	6.200000000000000	124.345806151398
1.200000000000000	2.15903737978019	6.400000000000000	134.626599856187
1.400000000000000	3.05254432306218	6.600000000000000	145.217068722059
1.600000000000000	4.14262007759646	6.800000000000000	156.061303110210
1.800000000000000	5.44752205787092	7	167.092820245136
2	6.98611963727021	7.200000000000000	178.233657076429
2.200000000000000	8.77780327098252	7.400000000000000	189.393440431698
2.400000000000000	10.8423754400286	7.600000000000000	200.468440022804
2.600000000000000	13.1999217576051	7.800000000000000	211.340610842155
2.800000000000000	15.8706605818020	8	221.876632540118
3	18.8747694351849	8.200000000000000	231.926954510174
3.200000000000000	22.2321865062139	8.400000000000000	241.324856626317
3.400000000000000	25.9623854936224	8.600000000000000	249.885536877717
3.600000000000000	30.0841220557441	8.800000000000000	257.405238528541
3.800000000000000	34.6151501443349	9	263.660430894753
4	39.5719065389758	9.200000000000000	268.407059372683
4.200000000000000	44.9691619560754	9.400000000000000	271.379881972818
4.400000000000000	50.8196371883889	9.600000000000000	272.291911302351
4.600000000000000	57.1335828395416	9.800000000000000	270.833982695723
4.800000000000000	63.9183213561454	10	266.674471006514
5	71.1777502307103		

Tabelul A.19 - Valori numerice simulate pentru modelul reologic Burgers – RELAXARE

Valori numerice obținute prin simulare pentru modelul Burgers			
RELAXARE			
Timpul (s)	$\sigma(t)$	Timpul (s)	$\sigma(t)$
0	0	3.09602541380742	0.0553763646980159
0.2000000000000000	0	3.09602541466674	0.0613368661688151
0.4000000000000000	0	3.09602541896333	0.0910594172572016
0.6000000000000000	0	3.09602544044633	7.84604127471395
0.8000000000000000	0	3.09602554786128	7.84603916175705
1	0	3.09602608493608	7.84602859698536
1.2000000000000000	0	3.09602877031006	7.84597577344627
1.4000000000000000	0	3.09604219717998	7.84571166373584
1.6000000000000000	0	3.09610933152957	7.84439131478591
1.8000000000000000	0	3.09644500327752	7.83779455726599
2.0000000000000000	0	3.09812336201727	7.80493509788899
2.08815574339988	0	3.10651515571598	7.64370241497498
2.09779879799508	0	3.14847412420958	6.90898895207098
2.10744185259028	0.0538854045126398	3.34847412420958	4.59817097158997
2.10744185259029	0.0538854045127690	3.54847412420958	3.40987151703951
2.10744185259029	0.0538854045129276	3.74847412420958	2.73189676445823
2.10744185259030	0.0538854045130994	3.94847412420958	2.29474520484650
2.10744185259032	0.0538854045135220	4.14847412420958	1.97874137734983
2.10744185259039	0.0538854045148584	4.34847412420958	1.72983252314514
2.10744185259063	0.0538854045201110	4.54847412420958	1.52281284823157
2.10744185259179	0.0538854045445416	4.74847412420958	1.34524982715720
2.10744185259756	0.0538854046666947	4.94847412420958	1.19044825469102
2.10744185262639	0.0538854052774605	5.14847412420958	1.05436104623647
2.10744185277059	0.0538854083312890	5.34847412420958	0.934224632194994
2.10744185349156	0.0538854236004317	5.54847412420958	0.827948883728299
2.10744185709642	0.0538854999461450	5.74847412420958	0.733837990260534
2.10744187512070	0.0538858816746982	5.94847412420958	0.650457236855404
2.10744196524211	0.0538877903171357	6.14847412420958	0.576564752546854
2.10744241584915	0.0538973335211113	6.34847412420958	0.511072762361910
2.10744466888437	0.0539450493357122	6.54847412420958	0.453022733505013
2.10745593406046	0.0541836232768597	6.74847412420958	0.401567487576770
2.10751225994090	0.237696134780695	6.94847412420958	0.355957152690288
2.10779388934313	0.924212323386061	7.14847412420958	0.315527500304705
2.10920203635427	3.18423680683170	7.34847412420958	0.279689951174120
2.11624277140996	5.02561580342593	7.54847412420958	0.247922866731918
2.15144644668841	6.30309800405925	7.74847412420958	0.219763895198357
2.30316973508694	7.24731212311038	7.94847412420958	0.194803215644796
2.49602541359257	7.84604180295359	8.14847412420958	0.172677561889426
2.69602541359257	7.84604180295347	8.34847412420958	0.153064930609440
2.89602541359257	7.84604180295325	8.54847412420958	0.135679892883266
3.09602541359257	7.84604180295303	8.74847412420958	0.120269439284221
3.09602541359258	7.84604180295195	8.94847412420958	0.106609297339661
3.09602541359259	7.84604180294654	9.14847412420958	0.0945006674491184
3.09602541359260	7.84604180291950	9.34847412420958	0.0837673296215441
3.09602541359265	7.84604180278427	9.54847412420958	0.0742530788655573
3.09602541359293	7.84604180210812	9.74847412420957	0.0658194518832116
3.09602541359430	7.84604179872739	9.94847412420957	0.0583437119719084
3.09602541360118	7.84604178182373	10	0.0565593655821815
3.09602541363555	7.84604169730543		

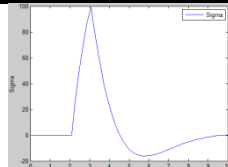


Tabelul A.20 - Valori numerice simulate pentru modelul reologic Lethersich - FLUAJ

Valori numerice obținute prin simulare pentru modelul Lethersich					
FLUAJ					
Timpul (s)	$\epsilon(t)$	Timpul (s)	$\epsilon(t)$	Timpul (s)	$\epsilon(t)$
0	0	1.003906	2.24E+11	4.000001	2.87E+13
0.2	0	1.007813	4.47E+11	4.000002	2.87E+13
0.4	0	1.015625	8.86E+11	4.000004	2.87E+13
0.6	0	1.03125	1.75E+12	4.000008	2.87E+13
0.8	0	1.0625	3.39E+12	4.000015	2.87E+13
1	0	1.125	6.37E+12	4.000031	2.87E+13
1	0	1.25	1.13E+13	4.000061	2.87E+13
1	0.108004	1.45	1.71E+13	4.000122	2.87E+13
1	0.312697	1.65	2.1E+13	4.000244	2.87E+13
1	0.51739	1.85	2.35E+13	4.000488	2.87E+13
1	0.926777	2.05	2.53E+13	4.000977	2.87E+13
1	1.74555	2.25	2.64E+13	4.001953	2.87E+13
1	3.383097	2.45	2.72E+13	4.003906	2.87E+13
1	6.658191	2.65	2.77E+13	4.007813	2.86E+13
1	13.20838	2.85	2.81E+13	4.015625	2.85E+13
1	26.30875	3.05	2.83E+13	4.03125	2.83E+13
1	52.5095	3.25	2.85E+13	4.0625	2.79E+13
1	104.911	3.45	2.86E+13	4.125	2.72E+13
1	209.714	3.65	2.87E+13	4.25	2.59E+13
1	419.32	3.85	2.87E+13	4.45	2.45E+13
1	838.532	4	2.87E+13	4.65	2.35E+13
1	1676.956	4	2.87E+13	4.85	2.29E+13
1	3353.804	4	2.87E+13	5.05	2.25E+13
1	6707.5	4	2.87E+13	5.25	2.22E+13
1	13414.89	4	2.87E+13	5.45	2.2E+13
1	26829.68	4	2.87E+13	5.65	2.19E+13
1	53659.24	4	2.87E+13	5.85	2.18E+13
1	107318.4	4	2.87E+13	6.05	2.17E+13
1	214636.7	4	2.87E+13	6.25	2.17E+13
1	429273.2	4	2.87E+13	6.45	2.17E+13
1	858546.3	4	2.87E+13	6.65	2.16E+13
1	1717092	4	2.87E+13	6.85	2.16E+13
1	3434185	4	2.87E+13	7.05	2.16E+13
1	6868369	4	2.87E+13	7.25	2.16E+13
1	13736736	4	2.87E+13	7.45	2.16E+13
1	27473465	4	2.87E+13	7.65	2.16E+13
1.000001	54946903	4	2.87E+13	7.85	2.16E+13
1.000002	1.1E+08	4	2.87E+13	8.05	2.16E+13
1.000004	2.2E+08	4	2.87E+13	8.25	2.16E+13
1.000008	4.4E+08	4	2.87E+13	8.45	2.16E+13
1.000015	8.79E+08	4	2.87E+13	8.65	2.16E+13
1.000031	1.76E+09	4	2.87E+13	8.85	2.16E+13
1.000061	3.52E+09	4	2.87E+13	9.05	2.16E+13
1.000122	7.03E+09	4	2.87E+13	9.25	2.16E+13
1.000244	1.41E+10	4	2.87E+13	9.45	2.16E+13
1.000488	2.81E+10	4	2.87E+13	9.65	2.16E+13
1.000977	5.62E+10	4	2.87E+13	9.85	2.16E+13
1.001953	1.12E+11	4	2.87E+13	10	2.16E+13

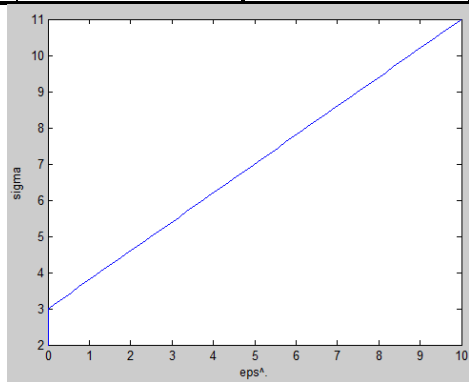
Tabelul A.21 - Valori numerice simulate pentru modelul reologic Lethersich – RELAXARE

Valori numerice obținute prin simulare pentru modelul Lethrsich			
RELAXARE			
Timpul (s)	$\sigma(t)$	Timpul (s)	$\sigma(t)$
0	0	3.07787742071700	99.1625041374073
0.2000000000000000	0	3.07787742075117	99.1625041335894
0.4000000000000000	0	3.07787742092202	99.1625041144999
0.6000000000000000	0	3.07787742177631	99.1531833232252
0.8000000000000000	0	3.07787742604772	99.1159046067134
1	0	3.07787744740478	99.1625040190524
1.2000000000000000	0	3.07787755419011	99.1625035418150
1.4000000000000000	0	3.07787808811673	99.1625011556282
1.6000000000000000	0	3.07788075774984	99.1624892246946
1.8000000000000000	0	3.07789410591538	99.1624295700376
2.0000000000000000	0	3.07796084674311	99.1621312970318
2.08073058111330	0	3.07829455088172	99.1606399389823
2.09279454495503	0	3.07996307157481	98.9296200834837
2.09795010467801	0	3.08830567504025	98.0009242411315
2.09993472467009	0	3.13001869236746	93.4256387764936
2.09999462722918	0	3.33001869236746	73.0642236936106
2.09999831667205	0	3.53001869236746	55.2721662832556
2.09999938963661	0	3.73001869236746	39.9522191049811
2.1000046260117	3.87671662714900e-06	3.93001869236746	26.9631900240072
2.1000046260118	3.87671731931221e-06	4.13001869236746	16.1334011837850
2.1000046260119	3.87671849456829e-06	4.33001869236746	7.27197805567117
2.1000046260119	3.87671966982440e-06	4.53001869236746	0.178149643070189
2.1000046260123	3.87672554610505e-06	4.73001869236746	-5.35124647674255
2.1000046260142	3.87675492750827e-06	4.93001869236746	-9.51585590074037
2.1000046260235	3.87690183452427e-06	5.13001869236746	-12.5072991663470
2.1000046260701	3.87763636960441e-06	5.33001869236746	-14.5058732204048
2.1000046263033	3.88130904500495e-06	5.53001869236746	-15.6782823430673
2.1000046274690	3.89967242200671e-06	5.73001869236746	-16.1762308918706
2.1000046332977	3.99148930698890e-06	5.93001869236746	-16.1357244929153
2.1000046624410	4.45057373123625e-06	6.13001869236746	-15.6769414740501
2.1000048081578	6.74599583588014e-06	6.33001869236746	-14.9045518071257
2.1000055367419	1.82231059442807e-05	6.53001869236746	-13.9083761258115
2.1000091796620	7.56086461158063e-05	6.73001869236746	-12.7642921452626
2.1000273942625	0.000362536087711584	6.93001869236746	-11.5353097586476
2.10001184672650	0.00179716681415258	7.13001869236746	-10.2727490332840
2.10005738322778	0.00897015840895590	7.33001869236746	-9.01746715445907
2.10028506573416	0.0448310655786579	7.53001869236746	-7.80109100311682
2.10142347826604	0.224034347665561	7.73001869236746	-6.64722148540242
2.10711554092547	1.11752146072982	7.93001869236746	-5.57258397467526
2.13557585422263	5.52198251204521	8.13001869236746	-4.58810632483043
2.27787742070843	26.0033754935243	8.33001869236746	-3.69991193280346
2.47787742070843	50.6588591297614	8.53001869236746	-2.91022034731752
2.67787742070843	70.8728117400012	8.73001869236746	-2.21815202853880
2.87787742070843	87.0924778683276	8.93001869236746	-1.62043715221249
3.07787742070843	99.1625041383631	9.13001869236746	-1.11203091607375
3.07787742070844	99.1625041383626	9.33001869236746	-0.686639738268601
3.07787742070846	99.1625041383614	9.53001869236745	-0.337164125887332
3.07787742070847	99.1625041383602	9.73001869236745	-0.0560649199832394
3.07787742070852	99.1625041383541	9.93001869236745	0.164339831181480
3.07787742070879	99.1625041383235	10	0.228537382452090
3.07787742071016	99.1625041381708		



Tabelul A.22 - Valori numerice simulate pentru modelul reologic Bingham

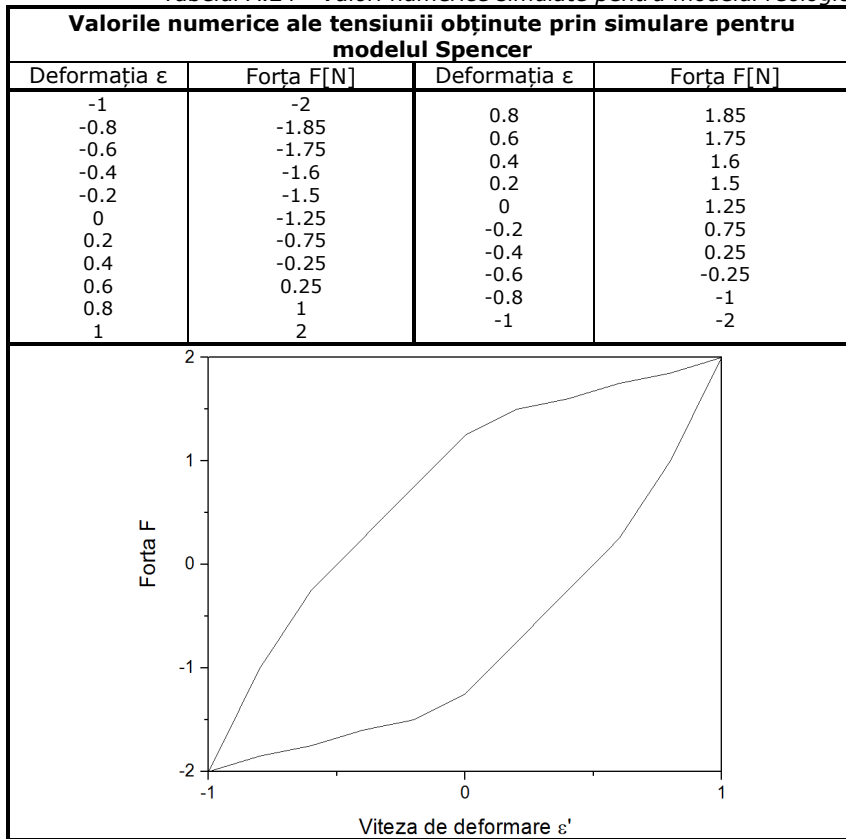
Valori numerice ale tensiunii obținute prin simulare pentru modelul Bingham			
Deformația ϵ	Forța F[N]	Deformația ϵ	Forța F[N]
0	2		
3.83363260422128e-30	3	4.75694266424072	6.64555413139258
0.000200950914520766	3.00016076073162	4.95694266424072	6.96555413139258
0.00120570548712460	3.00096456438970	5.15694266424072	7.12555413139258
0.00622947835014376	3.00498358268012	5.35694266424072	7.28555413139258
0.0313483426652396	3.02507867413219	5.55694266424072	7.44555413139258
0.156942664240719	3.12555413139257	5.75694266424072	7.60555413139258
0.356942664240719	3.28555413139258	5.95694266424072	7.76555413139258
0.556942664240719	3.44555413139257	6.15694266424072	7.92555413139258
0.756942664240718	3.60555413139257	6.35694266424072	8.08555413139258
0.956942664240718	3.76555413139258	6.55694266424072	8.24555413139258
1.15694266424072	3.92555413139257	6.75694266424072	8.40555413139258
1.35694266424072	4.08555413139258	6.95694266424072	8.56555413139258
1.55694266424072	4.24555413139257	7.15694266424072	8.72555413139258
1.75694266424072	4.40555413139258	7.35694266424072	8.88555413139258
1.95694266424072	4.56555413139258	7.55694266424072	9.04555413139258
2.15694266424072	4.72555413139258	7.75694266424072	9.20555413139258
2.35694266424072	4.88555413139258	7.95694266424072	9.36555413139258
2.55694266424072	5.04555413139258	8.15694266424072	9.52555413139258
2.75694266424072	5.20555413139258	8.35694266424072	9.68555413139258
2.95694266424072	5.36555413139258	8.55694266424072	9.84555413139258
3.15694266424072	5.52555413139258	8.75694266424072	10.0055541313926
3.35694266424072	5.68555413139258	8.95694266424072	10.1655541313926
3.55694266424072	5.84555413139258	9.15694266424072	10.3255541313926
3.75694266424072	6.00555413139258	9.35694266424072	10.4855541313926
3.95694266424072	6.16555413139258	9.55694266424072	10.6455541313926
4.15694266424072	6.32555413139258	9.75694266424072	10.8055541313926
4.35694266424072	6.48555413139258	9.95694266424072	10.9655541313926
4.55694266424072	6.64555413139258	10	11



Tabelul A.23 - Valori numerice simulate pentru modelul reologic Bouc-Wen

Valorile numerice ale tensiunii obținute prin simulare pentru modelul Bouc-Wen			
Deformația ϵ	Forța F[N]	Deformația ϵ	Forța F[N]
-0.08	-100	0.07	100
-0.07	-100	0.06	100
-0.06	-100	0.05	100
-0.05	-100	0.04	100
-0.04	-100	0.03	100
-0.03	-100	0.02	100
-0.02	-100	0.01	100
-0.01	-100	0	100
0	-100	-0.01	100
0.01	-50	-0.02	50
0.02	0	-0.03	0
0.03	50	-0.04	-50
0.04	100	-0.05	-100
0.05	100	-0.06	-100
0.06	100	-0.07	-100
0.07	100	-0.08	-100
0.08	100		

Tabelul A.24 - Valori numerice simulate pentru modelul reologic Spencer



ANEXA 2

Programe MATLAB pentru prelucrarea datelor experimentale

*Anexa A.1 – Program MATLAB *.mat - *.wav*

Program MATLAB de conversie a fișierelor cu extensie *.mat în fișiere cu extensie *.wav:
clear

```
fi='e0_150.mat'  
fo='e0_150.wav'
```

```
load(fi);  
n=50000;
```

```
for i=1:n  
d1(i)=data1(i,1);  
d2(i)=data1(i,2);  
end;  
m1=mean(d1);  
m2=mean(d2);  
for i=1:n  
data1(i,1)=d1(i)-m1;  
data1(i,2)=d2(i)-m2;  
end;
```

```
t=time1; data1=data1*.1; fs = 5000;
```

```
wavwrite(data1,fs,24,fo);
```

*Anexa A.2 – Program MATLAB *.mat - *.txt*

Program MATLAB de conversie a fișierelor cu extensie *.mat în fișiere cu extensie *.txt:
clear

```
load('e9_135.mat')  
fil=fopen('e9_135.txt','w')  
t=time1;  
x=data1;  
n=length(t)
```

```
for i=1:n  
fprintf(fil,'%1.6f %f %f \n', t(i),x(i,1),x(i,2));  
end  
fclose(fil)
```

Anexa A.3 – Program MATLAB pentru calcularea funcției de corelație

Program MATLAB pentru calculul funcției de corelație a semnalelor

experimentale:

```
clear
    x=load('co10.prn')
    fil=fopen('cc10.prn','w')
    n=10000;
    for i=0:n
        a = i*0.00002;
        fprintf(fil,'%f %f\n', a, x(i+1,2));
    end;
    beep
    beep
    fclose(fil);
```

Anexa A.4 – Program MATLAB pentru calcularea puterii spectrale a semnalelor măsurate

Program MATLAB pentru calculul puterii spectrale a semnalelor măsurate

experimental:

```
clear;
    x=load('s9.txt');
    fil=fopen('x9.txt','w');
    n=1000;
    for i=1:n
        a=sqrt(x(i,4));
        fprintf(fil,'%f %f\n', x(i,2),a);
    end;
    beep
    fclose(fil);
    beep
```

ANEXA 3

Rezultate experimentale obținute după efectuarea măsurărilor pe standul cu pendul Charpy

Vibrații libere – tensiune de alimentare amortizor MR: **U=0V**

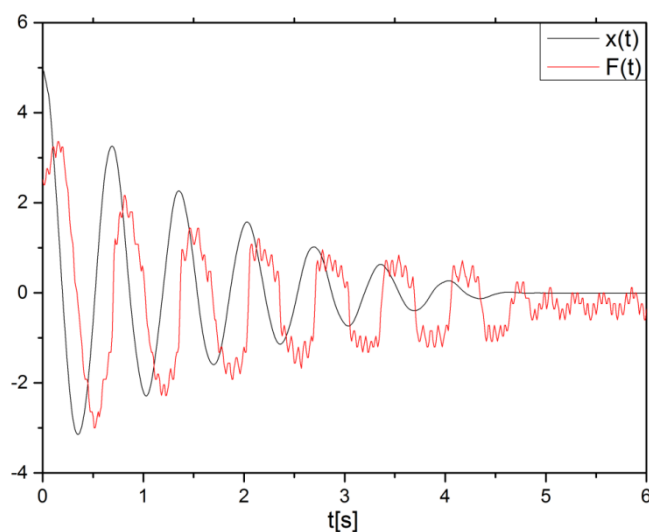


Fig. A.88 – Reprezentarea deplasării și forței în funcție de timp, U=0V

Vibrații libere – tensiune de alimentare amortizor MR: **U=0.2V**

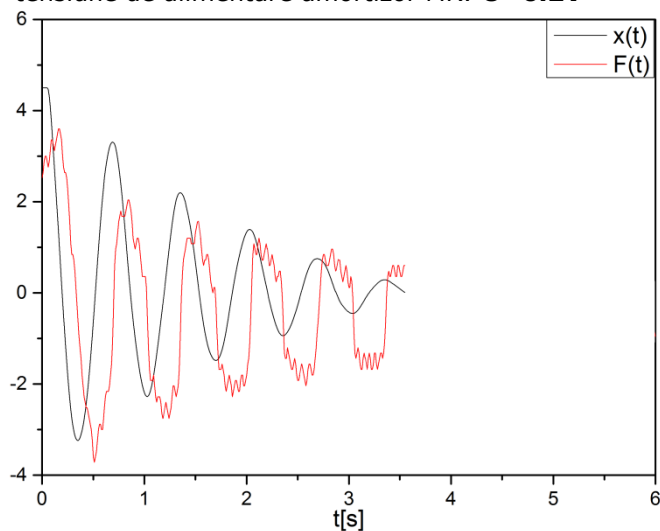


Fig. A.89 - Reprezentarea deplasării și forței în funcție de timp, U=0.2V

Vibrații libere – tensiune de alimentare amortizor MR: **U=0.4V**

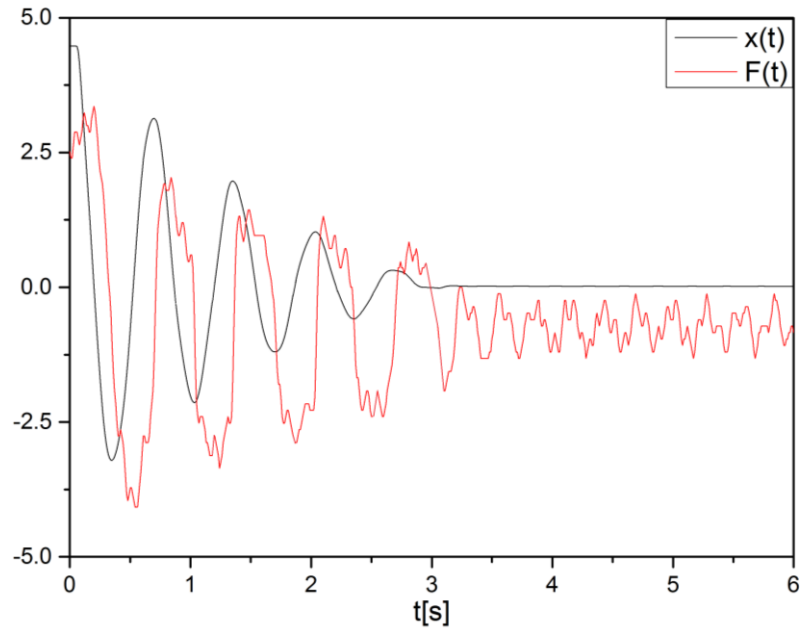


Fig. A.90 - Reprezentarea deplasării și forței în funcție de timp, U=0.4V

Vibrații libere – tensiune de alimentare amortizor MR: **U=0.8V**

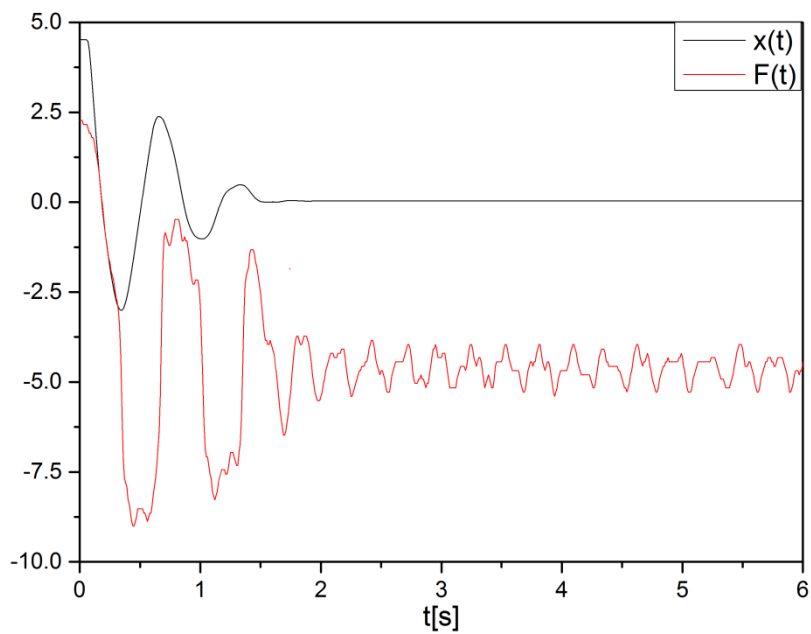


Fig. A.91 - Reprezentarea deplasării și forței în funcție de timp, U=0.8V

Vibrații libere – tensiune de alimentare amortizor MR: **U=1V**

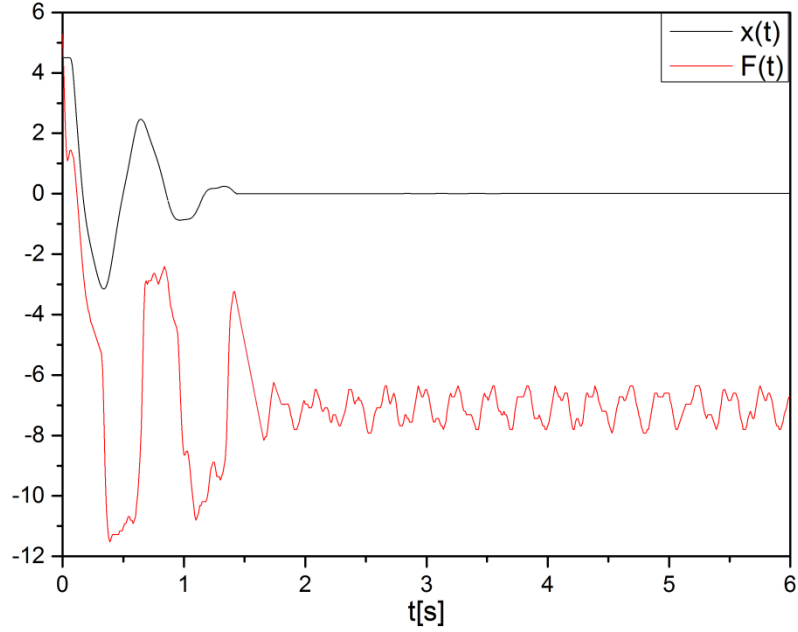


Fig. A.92 - Reprezentarea deplasării și forței în funcție de timp, $U=1V$

Vibrații libere – tensiune de alimentare amortizor MR: **U=1.2V**

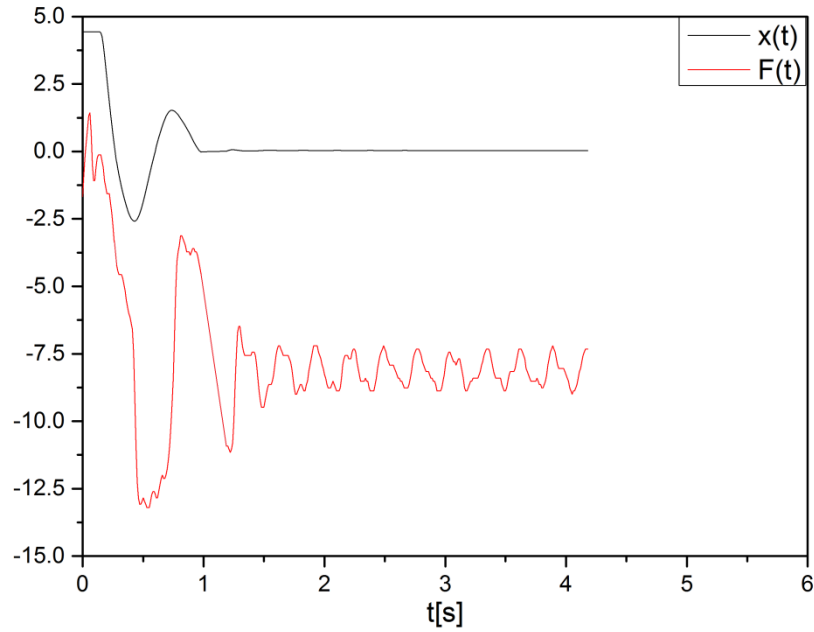


Fig. A.93 - Reprezentarea deplasării și forței în funcție de timp, $U=1.2V$

Vibrații libere – tensiune de alimentare amortizor MR: **U=1.4V**

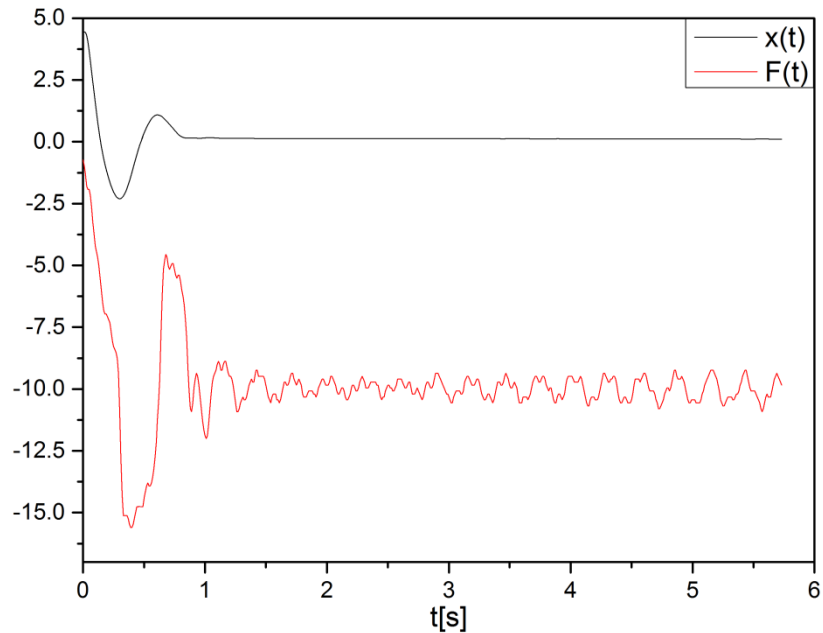


Fig. A.94 - Reprezentarea deplasării și forței în funcție de timp, $U=1.4V$

Vibrații libere – tensiune de alimentare amortizor MR: **U=1.6V**

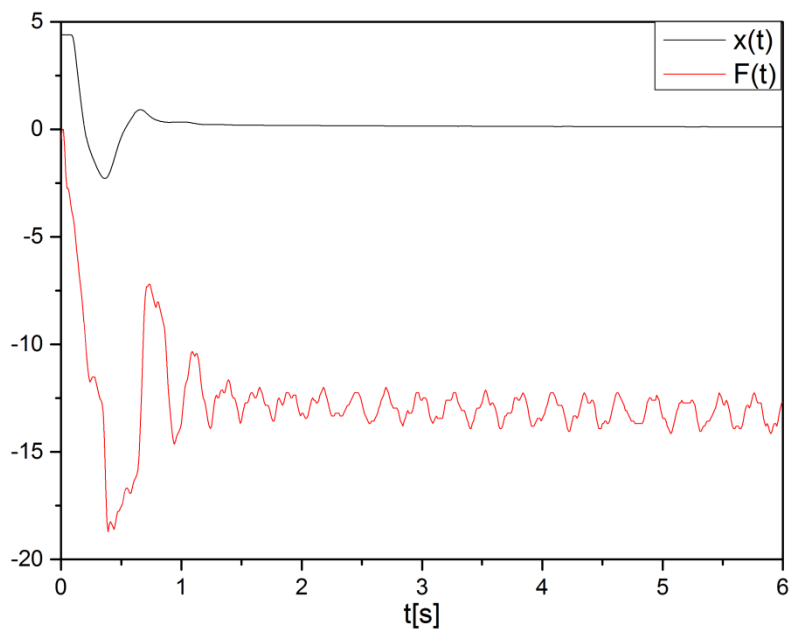


Fig. A.95 - Reprezentarea deplasării și forței în funcție de timp, $U=1.6V$

Vibrații libere – tensiune de alimentare amortizor MR: **U=1.8V**

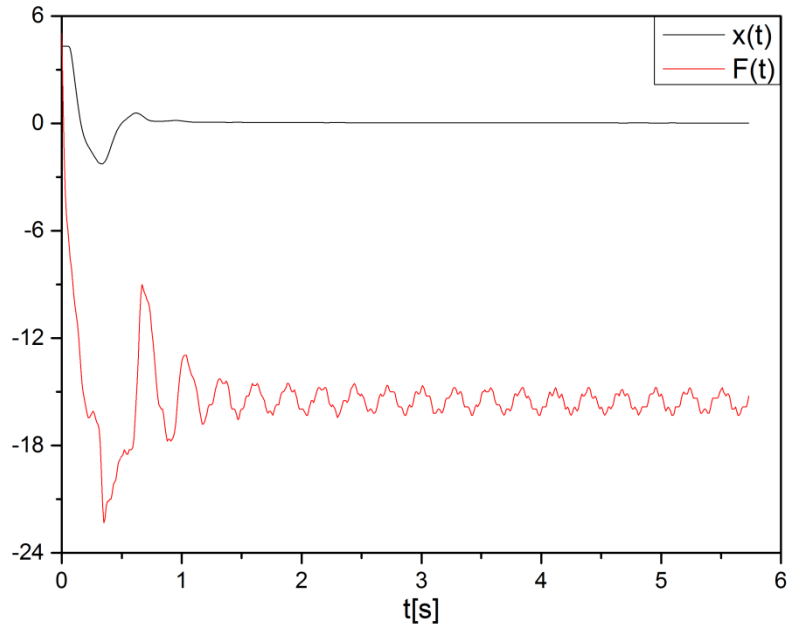


Fig. A.96 - Reprezentarea deplasării și forței în funcție de timp, U=1.8V

Vibrații libere – tensiune de alimentare amortizor MR: **U=2V**

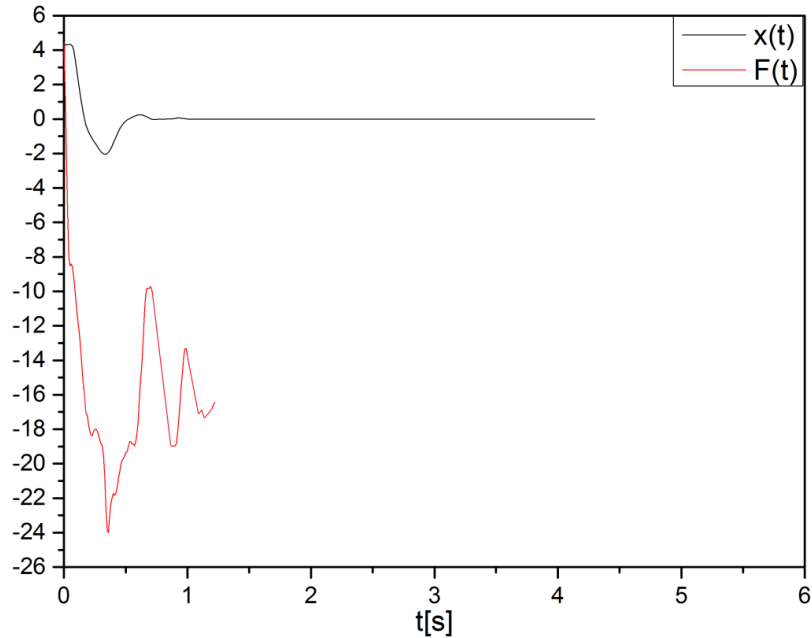


Fig. A.97 - Reprezentarea deplasării și forței în funcție de timp, U=2V

ANEXA 4

Rezultate experimentale obținute după efectuarea măsurărilor pe standul cu excitație pe cale cinematică

Vibrații libere – tensiune de alimentare $U=0V$

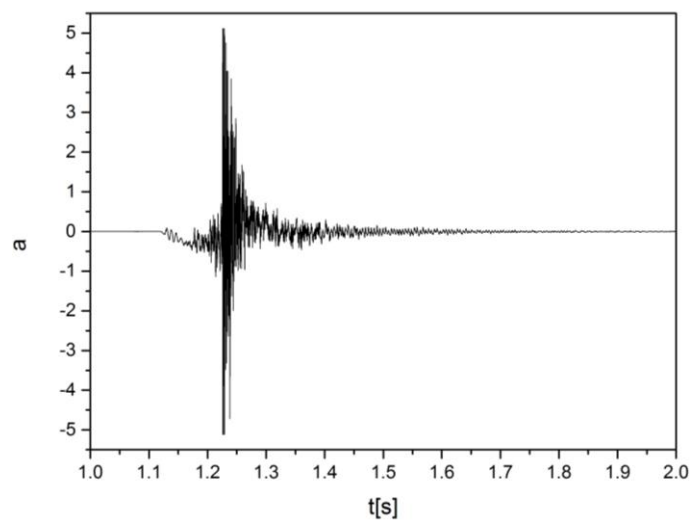


Fig. A.98 – Accelația obținută la $U=0V$

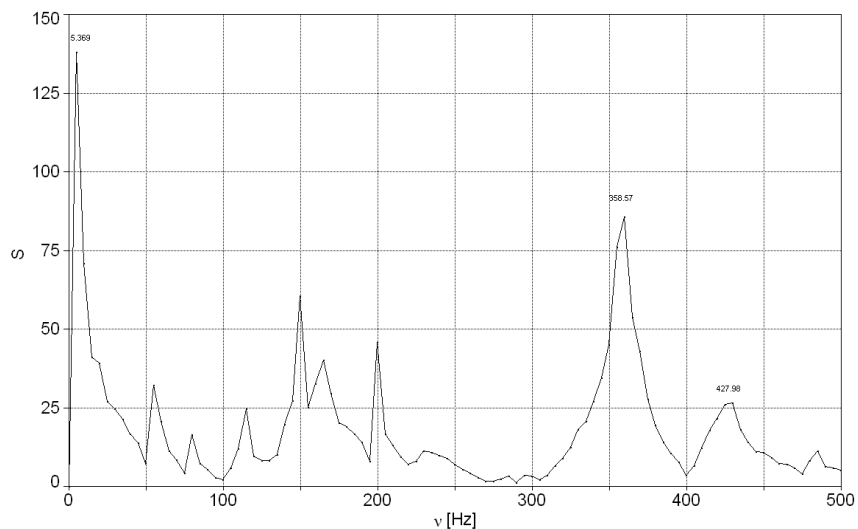


Fig. A.99 – Puterea spectrală a semnalului

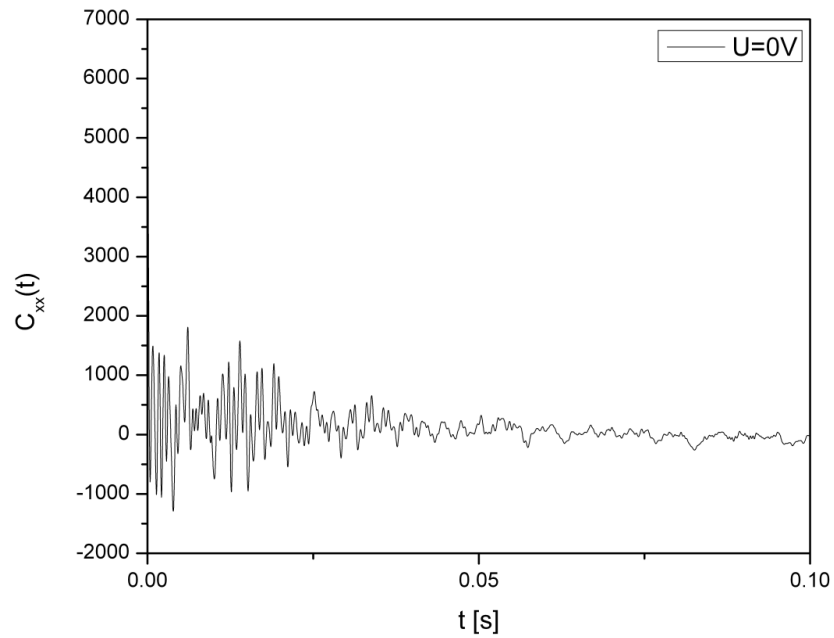


Fig. A.100 – Semnalul rezultat după aplicarea funcției de corelație pentru înlăturarea zgomotului

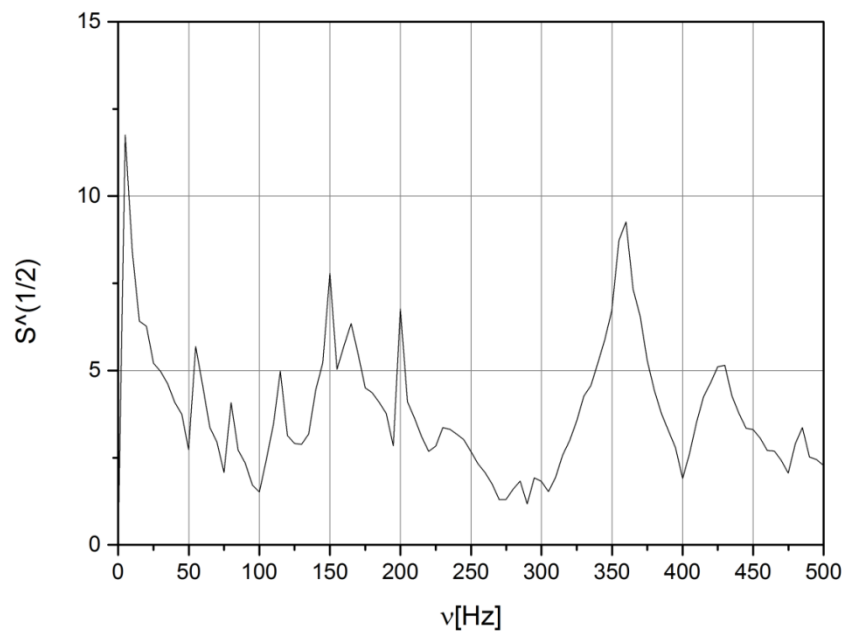


Fig. A.101 – Radicalul puterii spectrale a semnalului

Frecvența puterii spectrale obținută este $\nu=5.369\text{Hz}$.

Vibrații libere – tensiune de alimentare **U=1V**

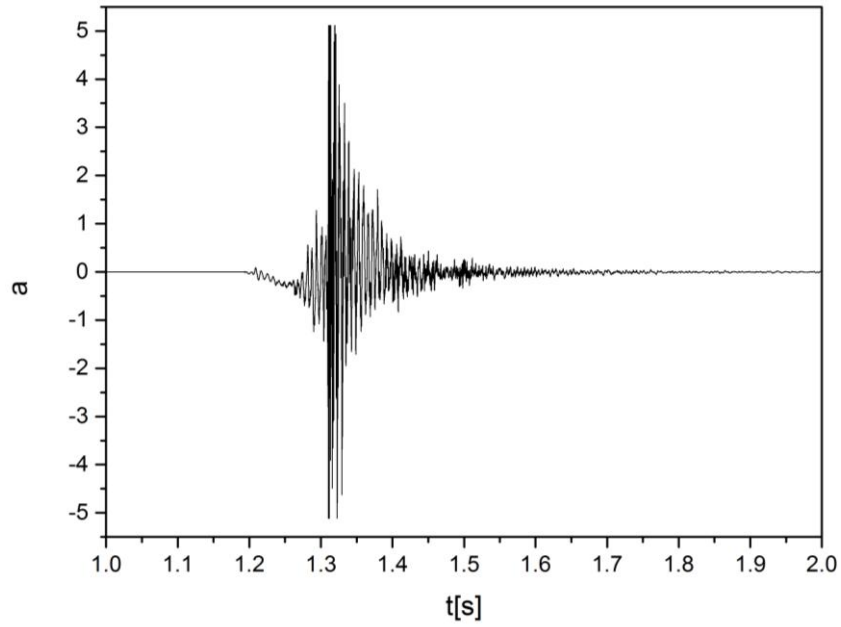


Fig. A.102 - Vibrația obținută la U=1V

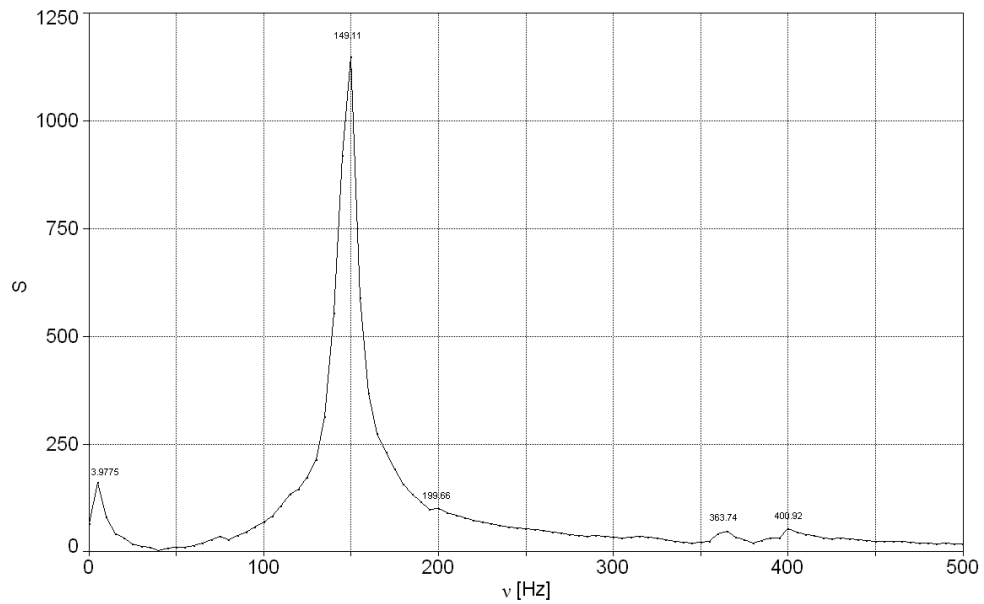


Fig. A.103 - Puterea spectrală a semnalului

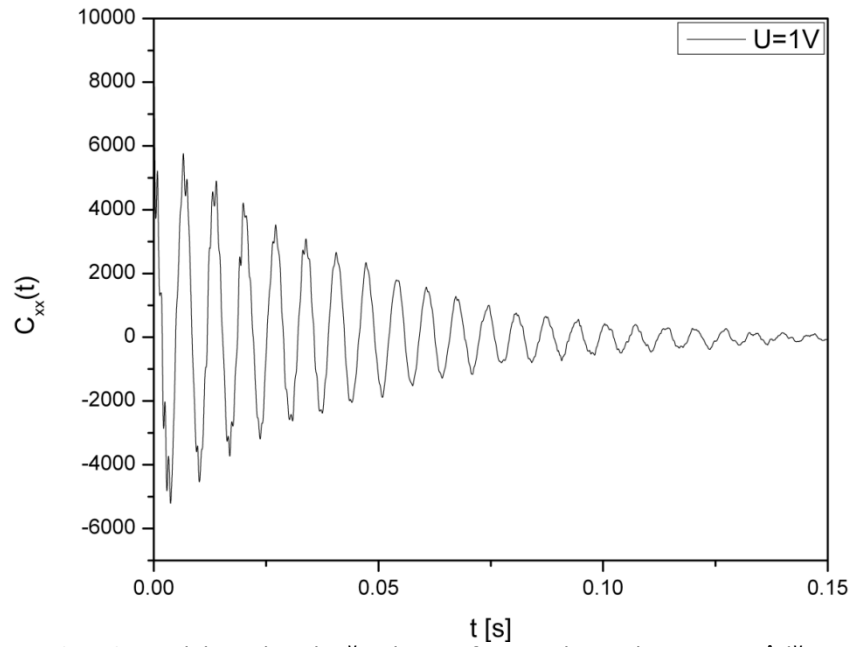


Fig. A.104 - Semnalul rezultat după aplicarea funcției de corelație pentru înlăturarea zgomotului

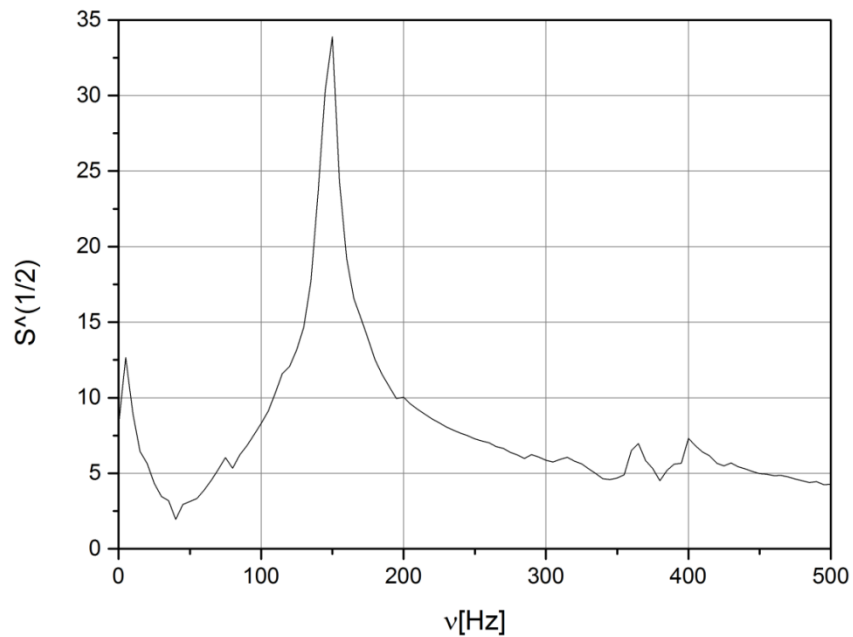


Fig. A.105 - Radicalul puterii spectrale a semnalului

Frecvența puterii spectrale obținută are primul vârf al amplitudinii la $\nu=3.977\text{Hz}$.

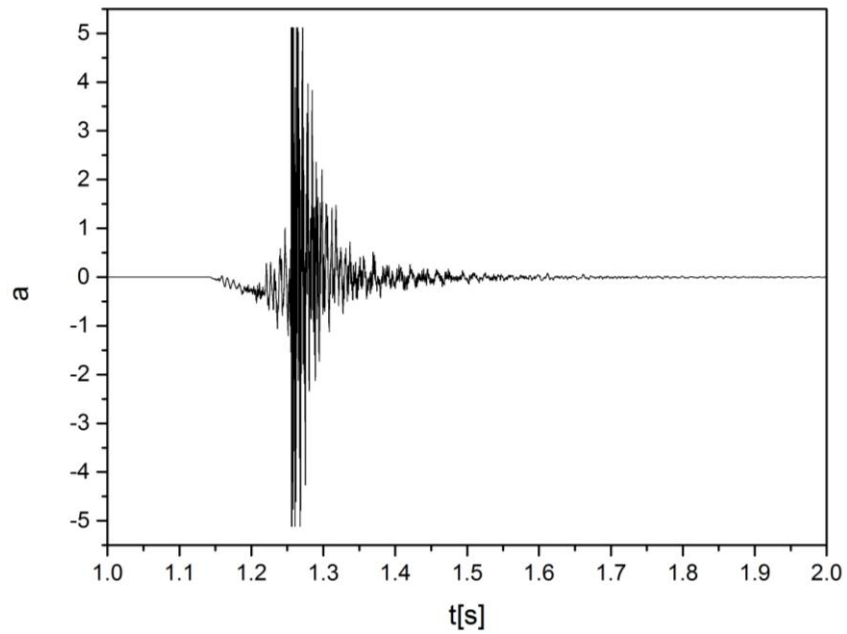
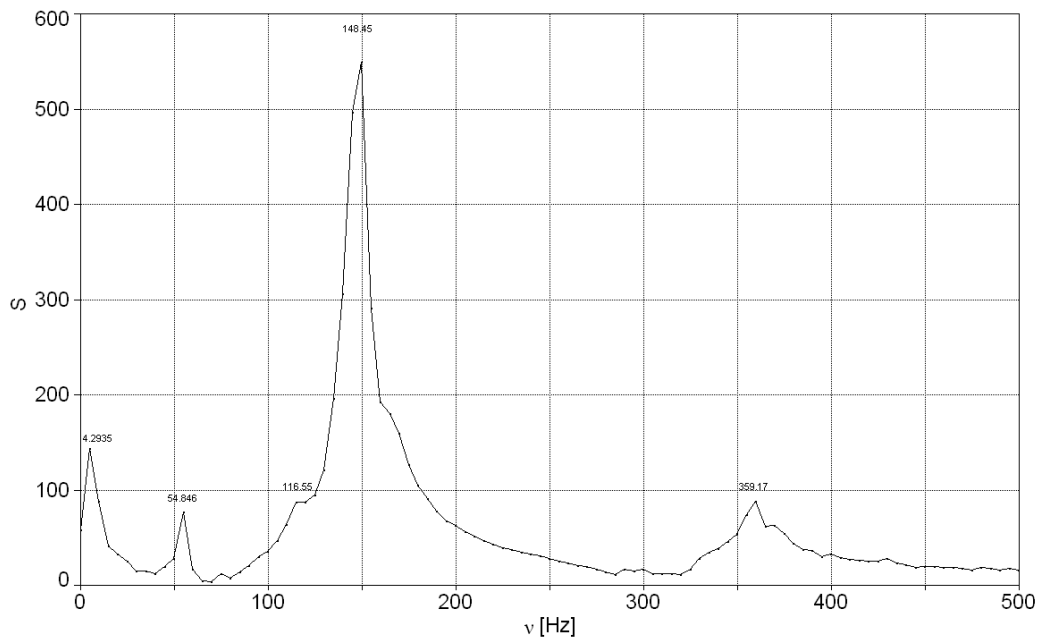
Vibrații libere – tensiune de alimentare $U=2V$ Fig. A.106 - Vibrația obținută la $U=2V$ 

Fig. A.107 - Puterea spectrală a semnalului

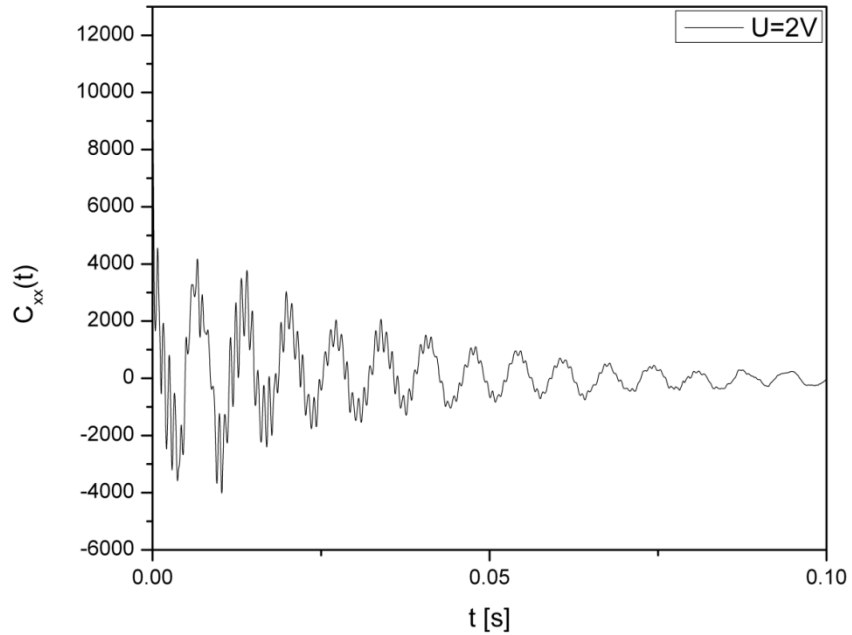


Fig. A.108 - Semnalul rezultat după aplicarea funcției de corelație pentru înlăturarea zgomotului

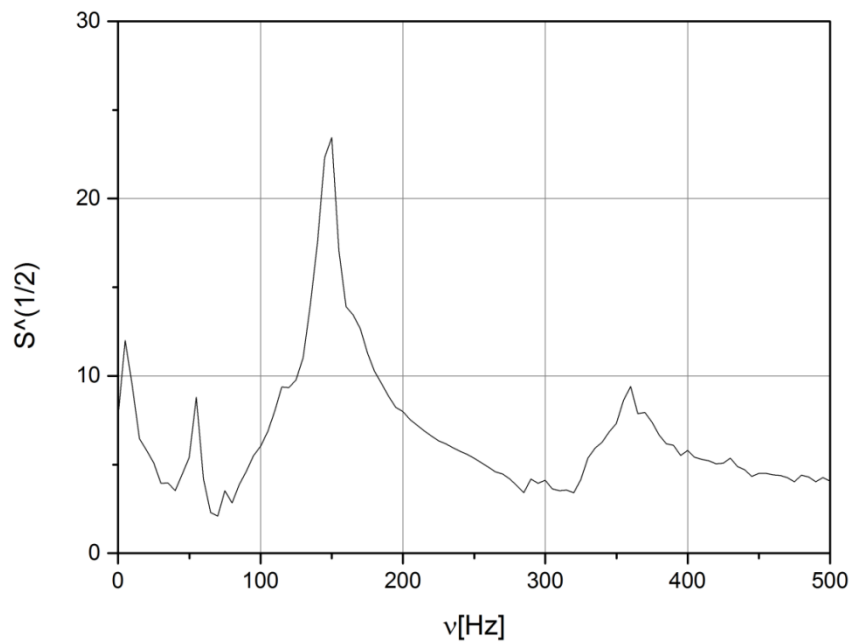


Fig. A.109 - Radicalul puterii spectrale a semnalului

Frecvența puterii spectrale obținută are primul vârf al amplitudinii la $\nu=4.293\text{Hz}$.

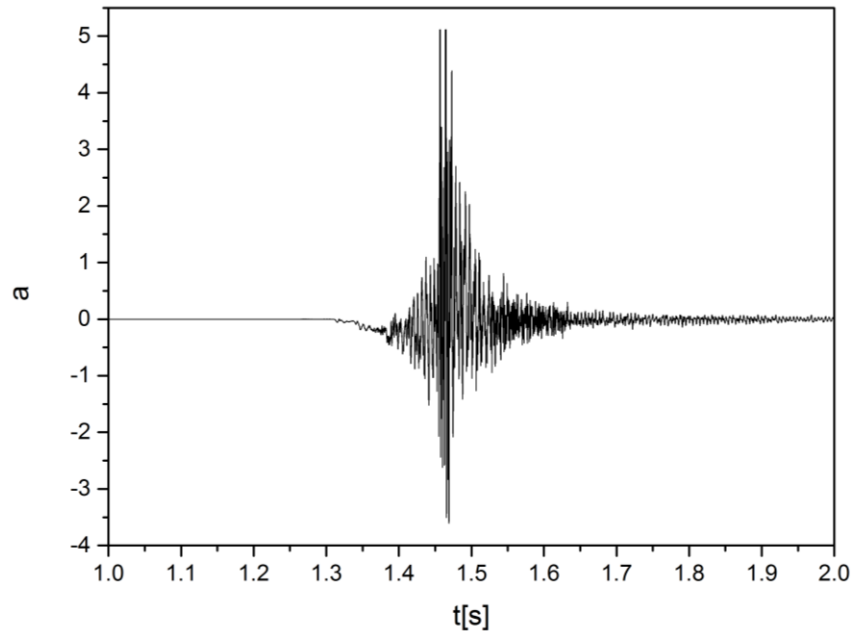
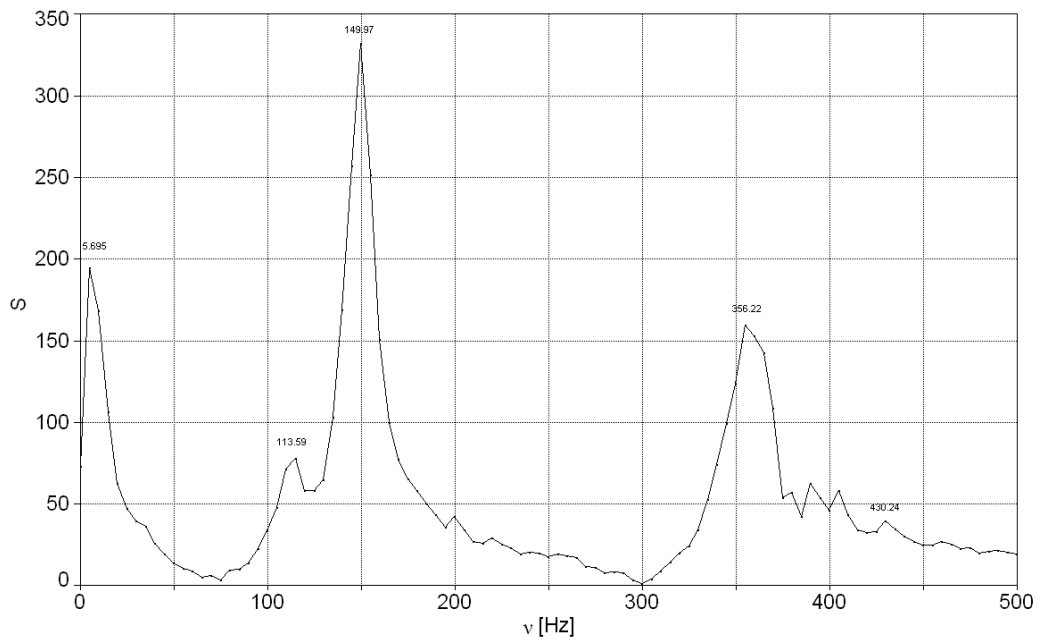
Vibrații libere – tensiune de alimentare $U=3V$ Fig. A.110 - Vibrația obținută la $U=3V$ 

Fig. A.111 - Puterea spectrală a semnalului

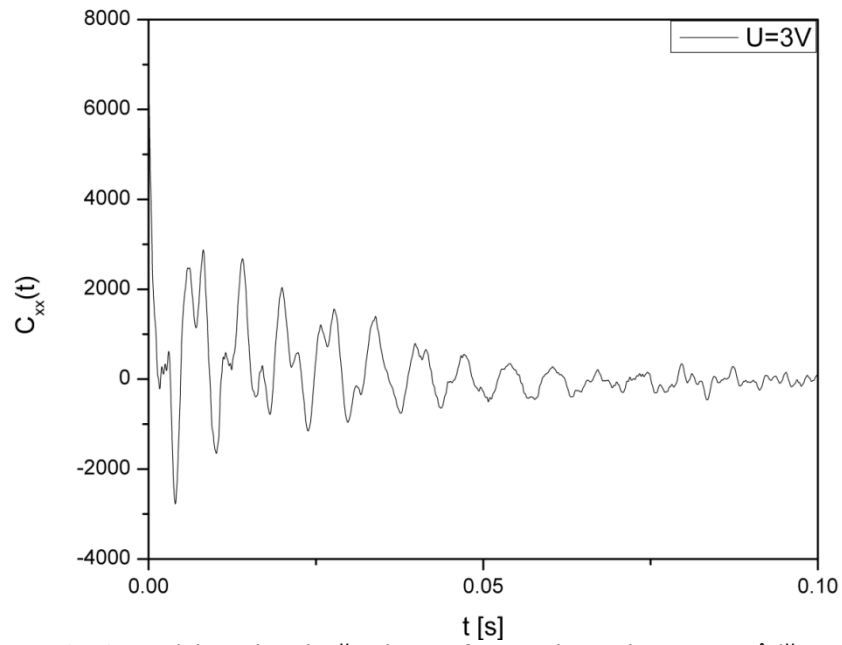


Fig. A.112 - Semnalul rezultat după aplicarea funcției de corelație pentru înlăturarea zgomotului

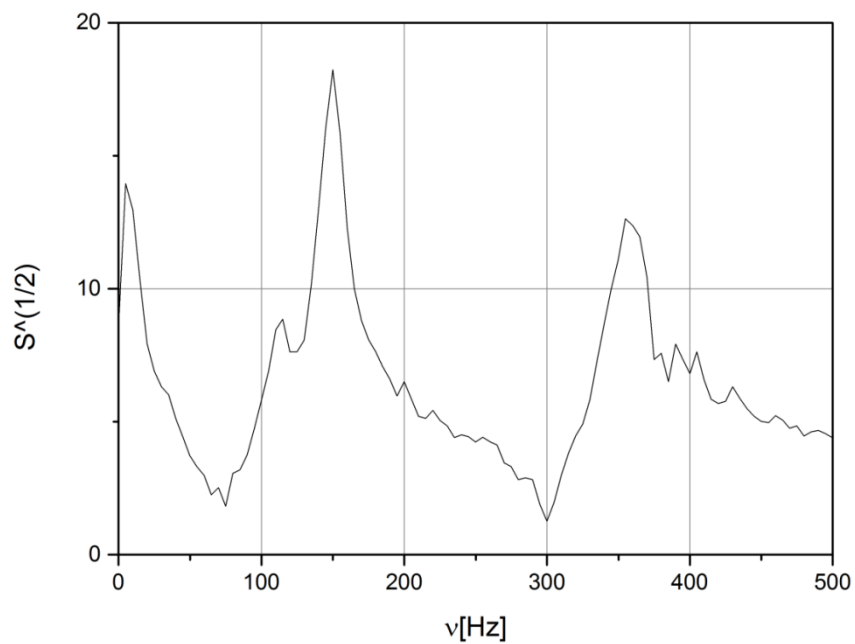


Fig. A.113 - Radicalul puterii spectrale a semnalului

Frecvența puterii spectrale obținută are primul vârf al amplitudinii la $\nu=5.695\text{Hz}$.

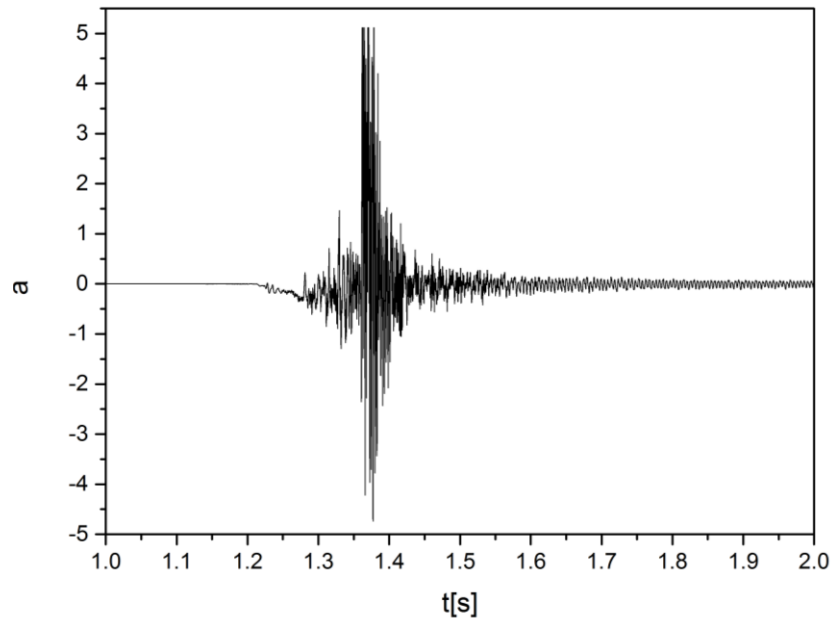
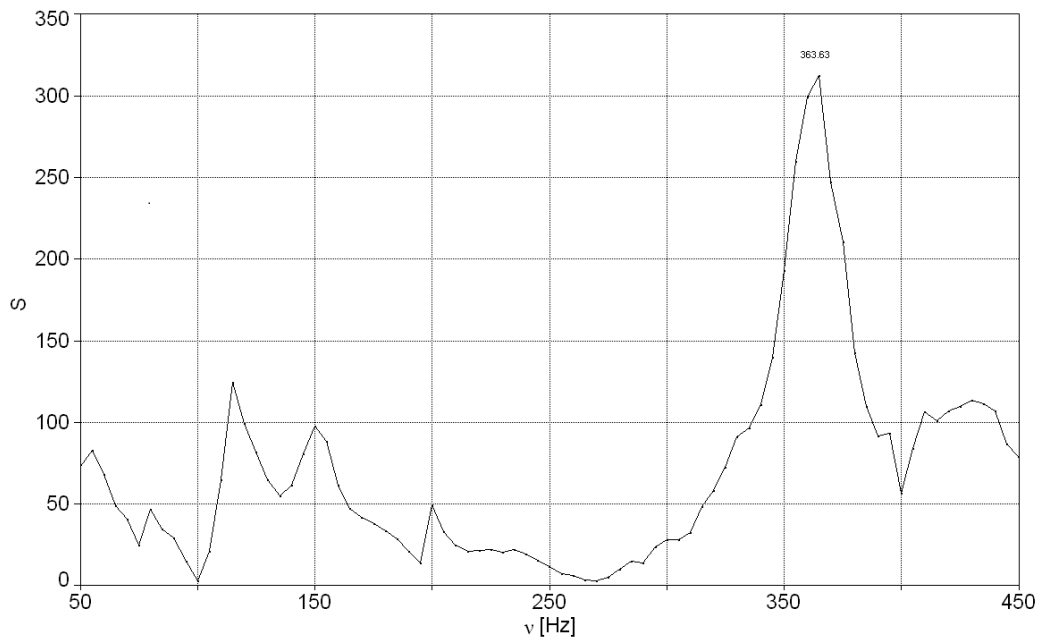
Vibrații libere – tensiune de alimentare $U=5V$ Fig. A.114 - Vibrația obținută la $U=5V$ 

Fig. A.115 - Puterea spectrală a semnalului

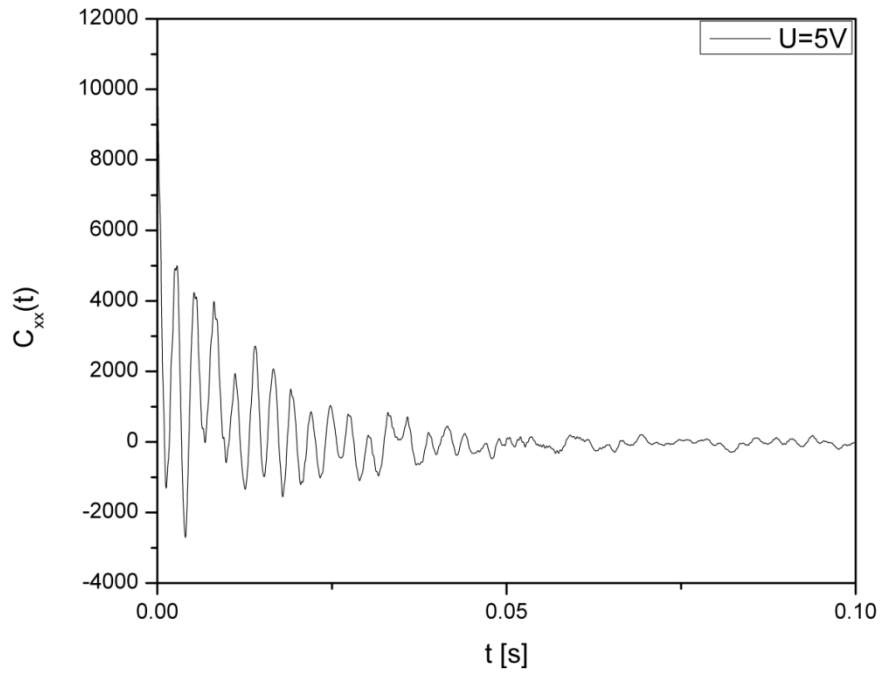


Fig. A.116 - Semnalul rezultat după aplicarea funcției de corelație pentru înlăturarea zgomotului

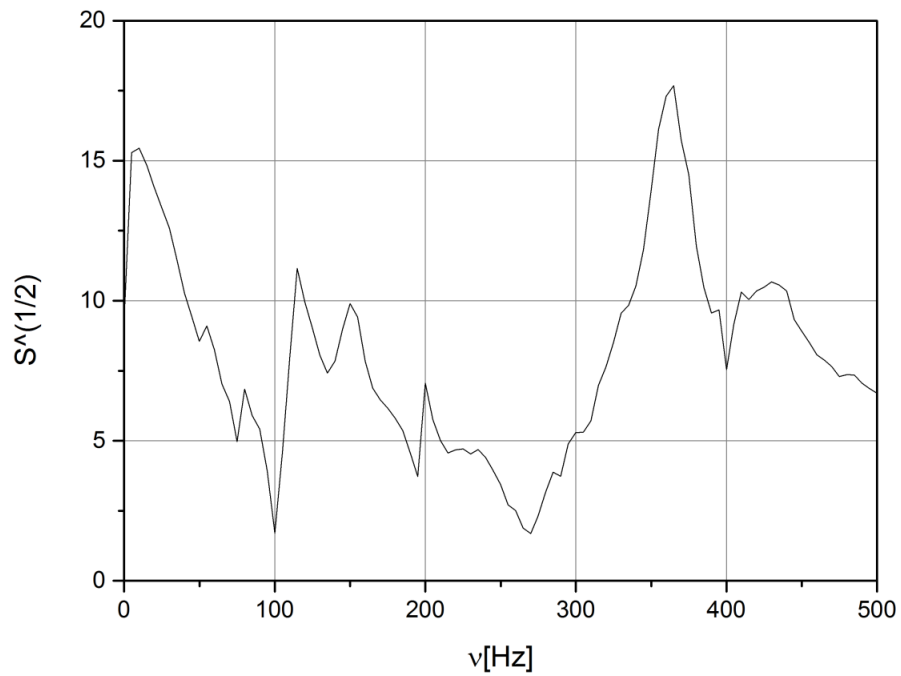


Fig. A.117 - Radicalul puterii spectrale a semnalului

Vibrații libere – tensiune de alimentare **U=6V**

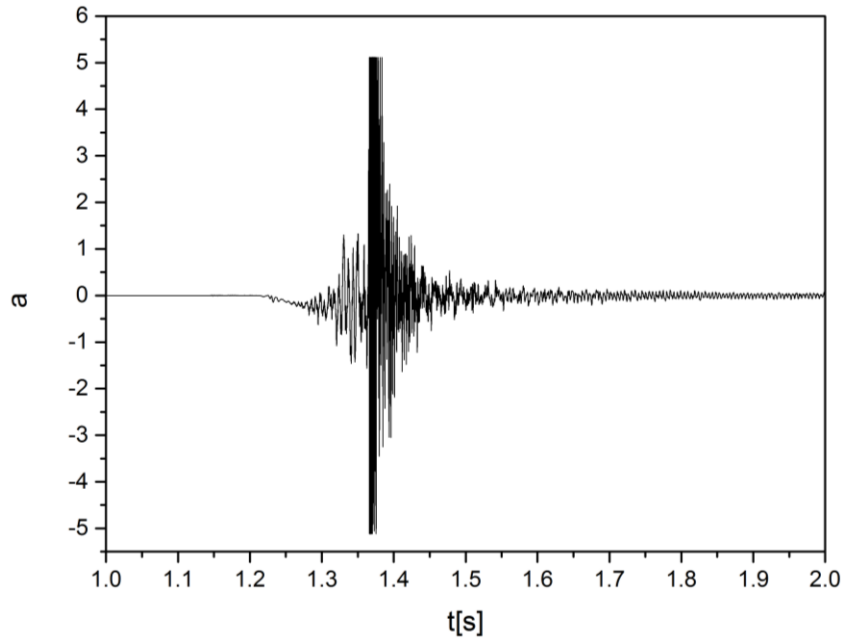


Fig. A.118 - Vibrația obținută la U=6V

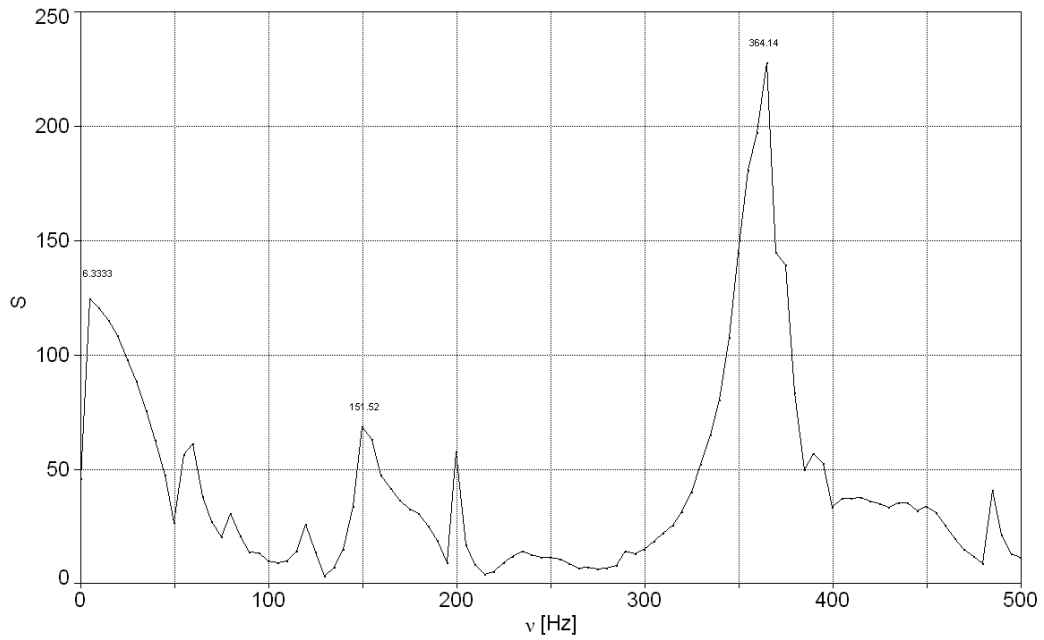


Fig. A.119 - Puterea spectrală a semnalului

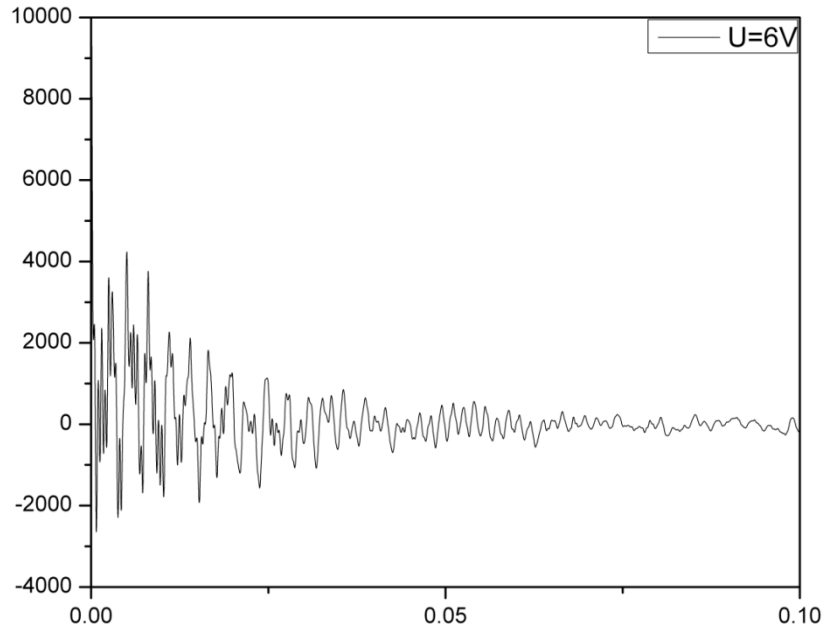


Fig. A.120 - Semnalul rezultat după aplicarea funcției de corelație pentru înlăturarea zgomotului

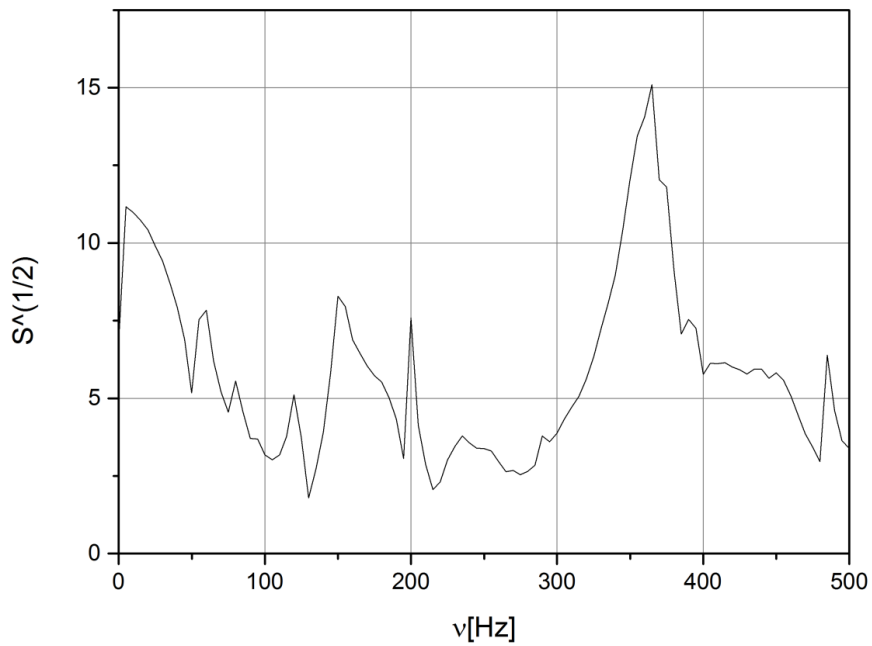


Fig. A.121 - Radicalul puterii spectrale a semnalului

Frecvența puterii spectrale obținută are primul vârf al amplitudinii la $\nu=6.333\text{Hz}$.

Vibrații libere – tensiune de alimentare **U=7V**

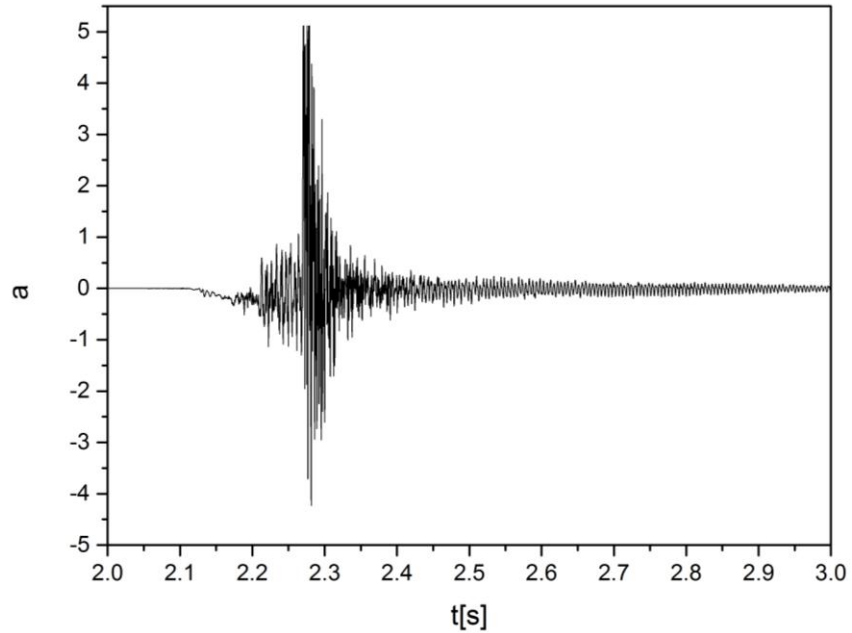


Fig. A.122 - Vibrația obținută la U=7V

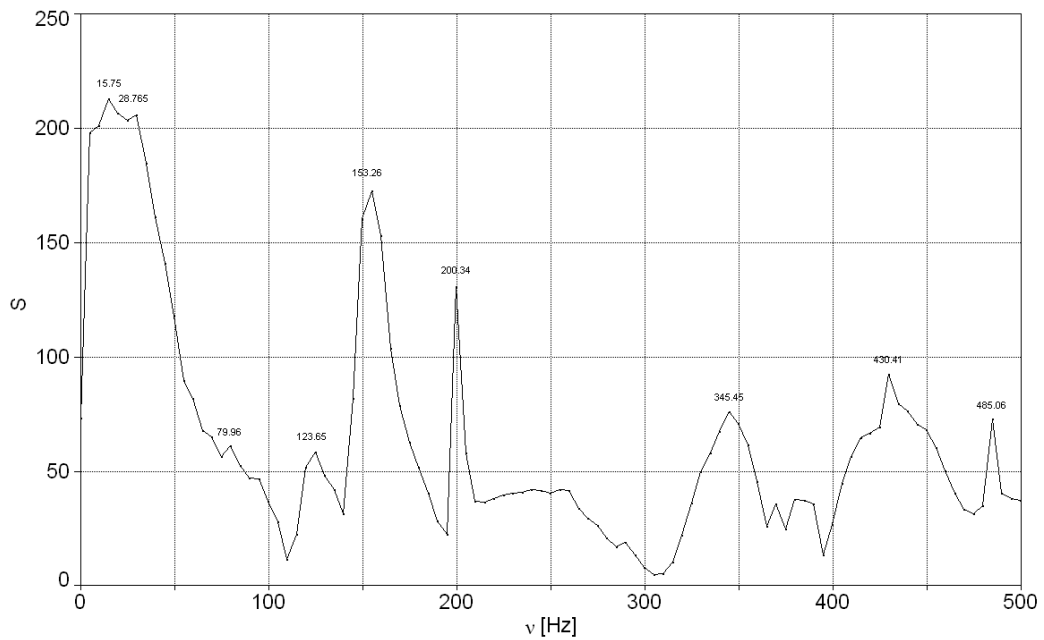


Fig. A.123 - Puterea spectrală a semnalului

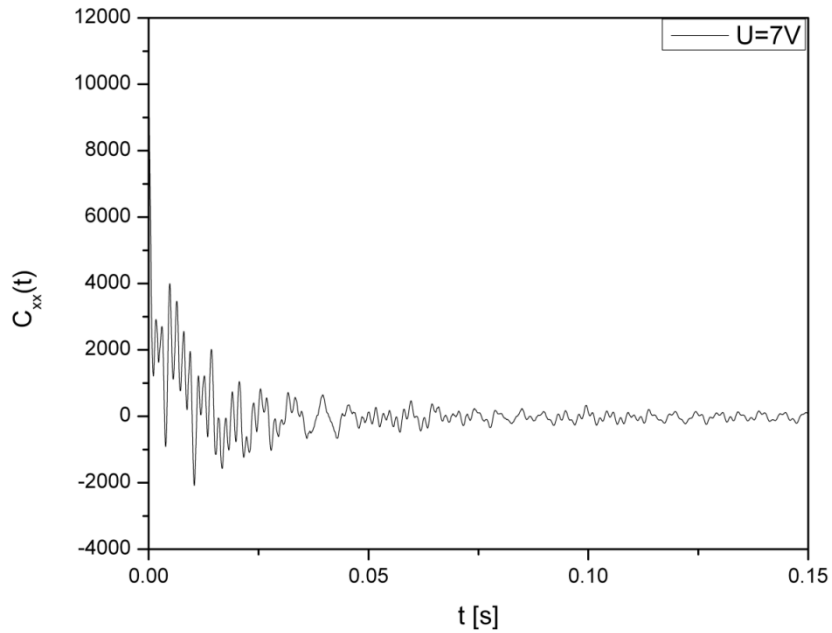


Fig. A.124 - Semnalul rezultat după aplicarea funcției de corelație pentru înlăturarea zgomotului

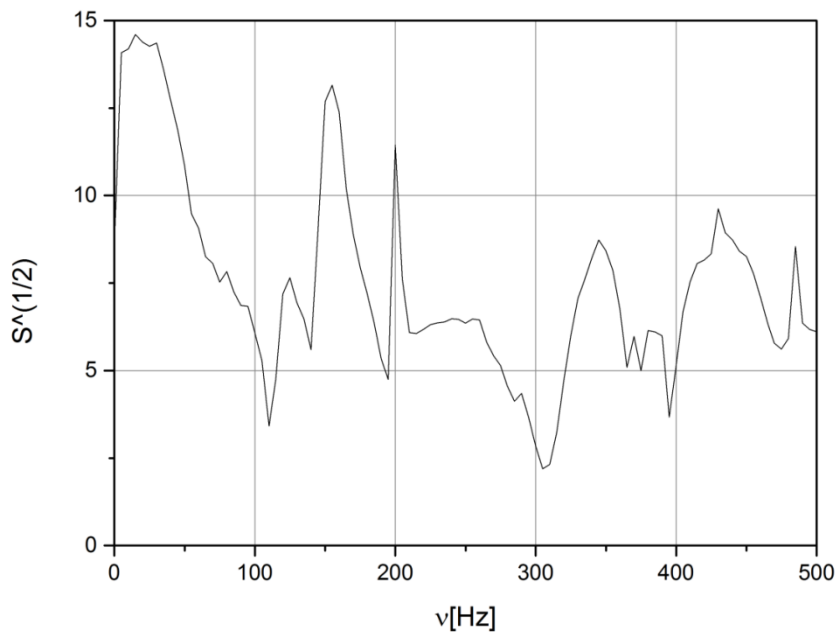


Fig. A.125 - Radicalul puterii spectrale a semnalului

Frecvența puterii spectrale obținută are primul vârf al amplitudinii la $\nu=15.75\text{Hz}$.

Vibrații libere – tensiune de alimentare **U=8V**

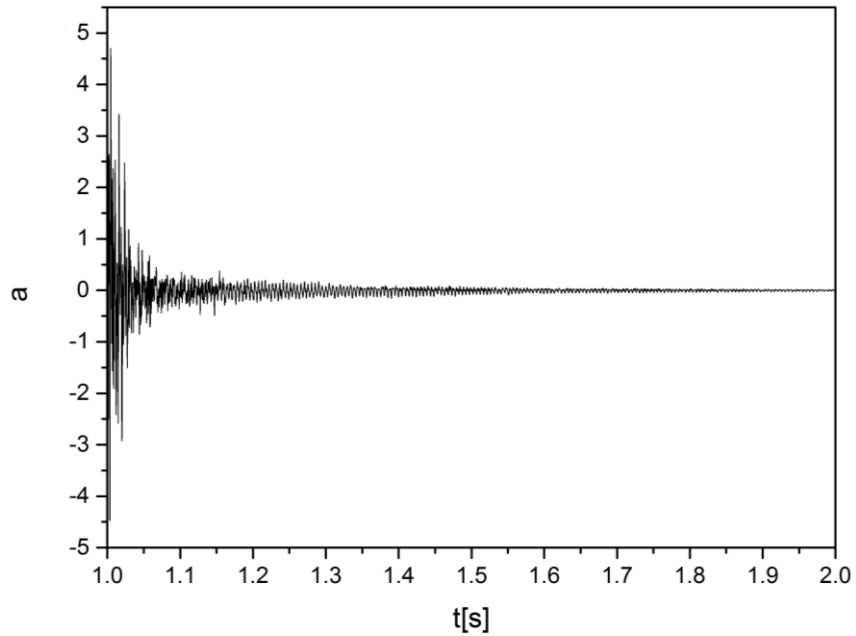


Fig. A.126 - Vibrația obținută la U=8V

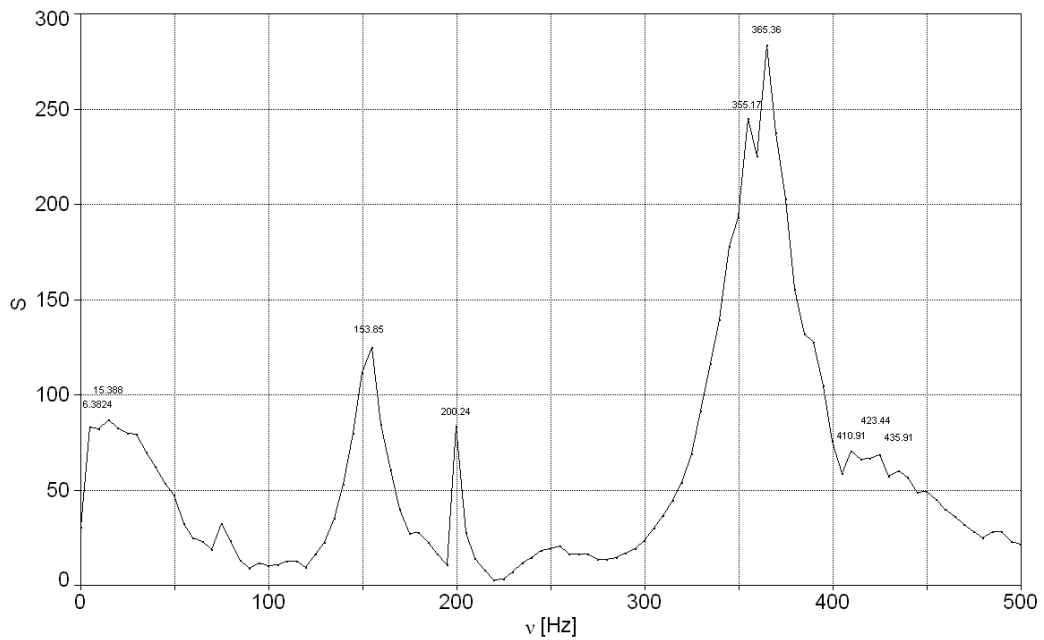


Fig. A.127 - Puterea spectrală a semnalului

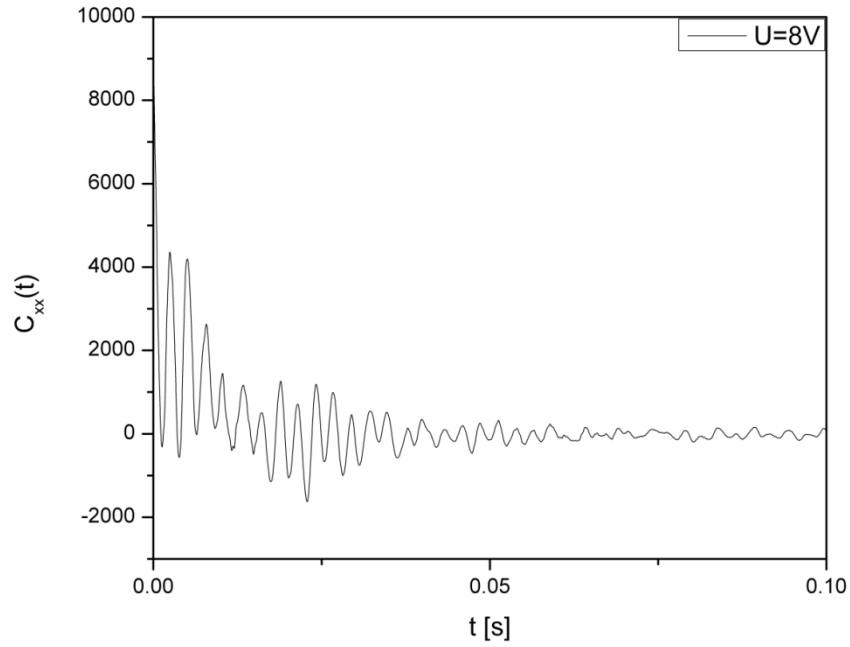


Fig. A.128 - Semnalul rezultat după aplicarea funcției de corelație pentru înlăturarea zgomotului

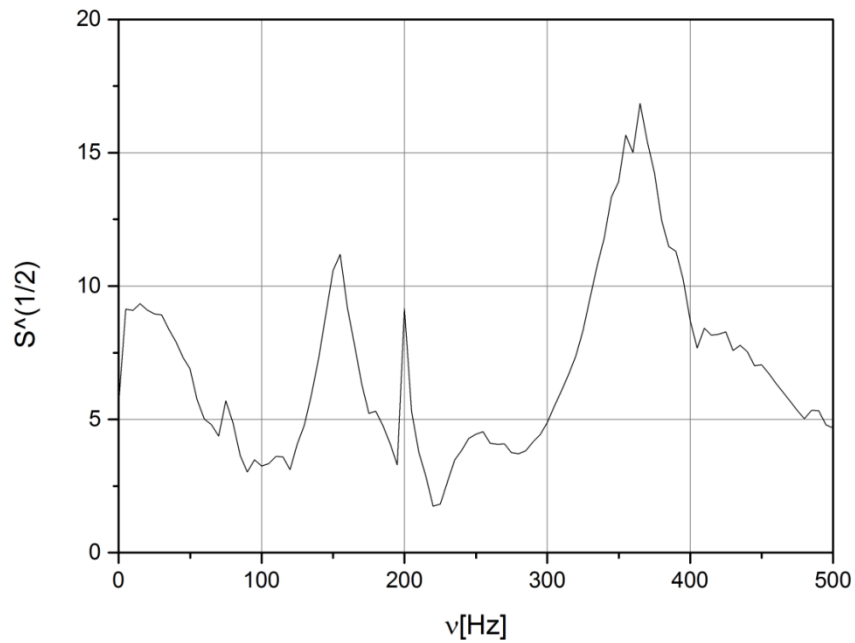


Fig. A.129 - Radicalul puterii spectrale a semnalului

Frecvența puterii spectrale obținută are primul vârf al amplitudinii la $\nu=6.594\text{Hz}$.

Vibrații libere – tensiune de alimentare **U=9V**

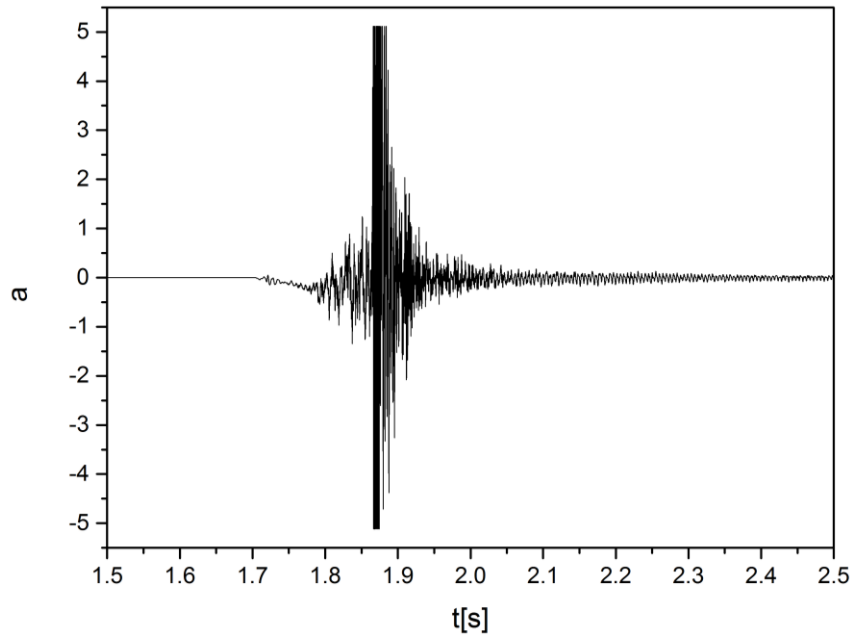


Fig. A.130 - Vibrația obținută la U=9V

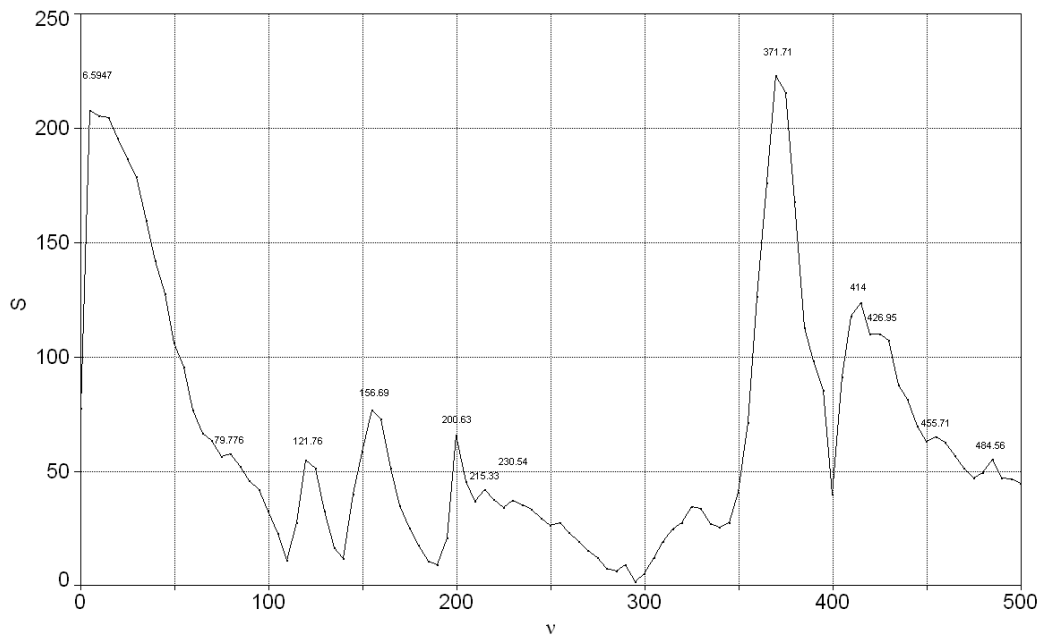


Fig. A.131 - Puterea spectrală a semnalului

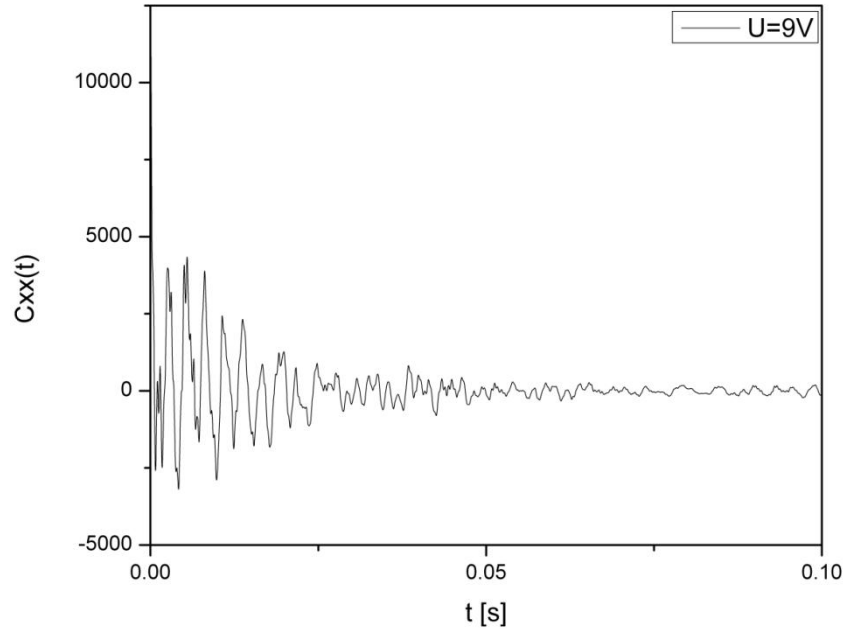


Fig. A.132 - Semnalul rezultat după aplicarea funcției de corelație pentru înlăturarea zgomotului

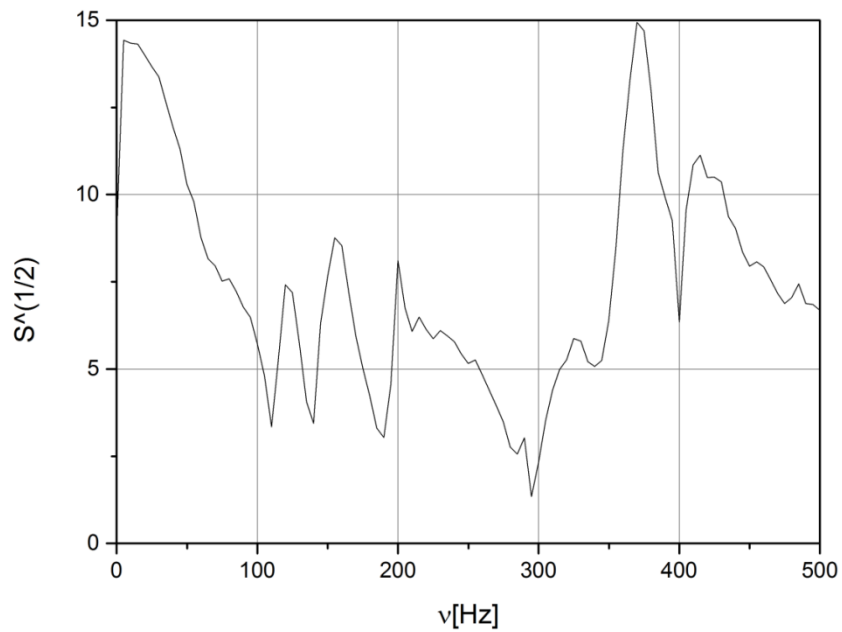


Fig. A.133 - Radicalul puterii spectrale a semnalului

Frecvența puterii spectrale obținută are primul vârf al amplitudinii la $\nu=6.382\text{Hz}$.

Vibrații libere – tensiune de alimentare **U=10V**

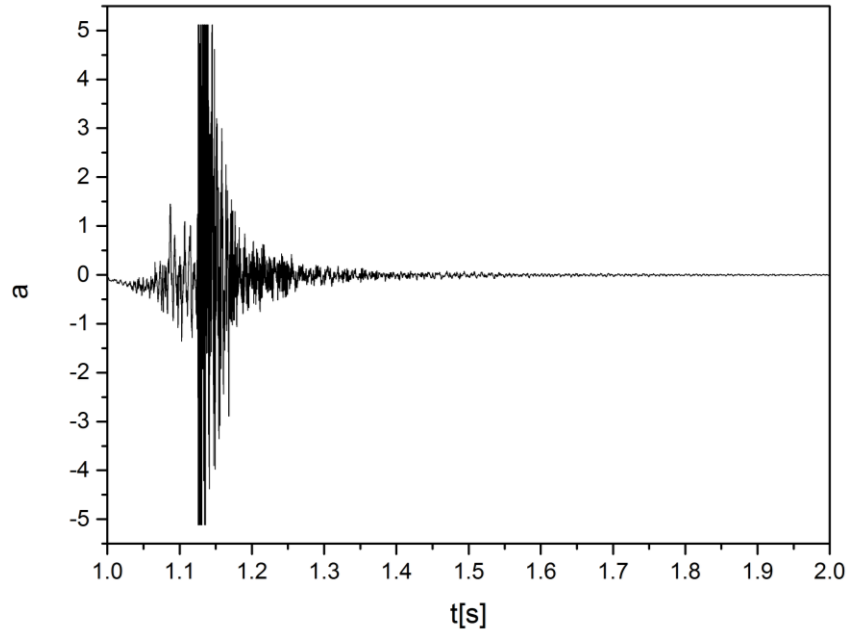


Fig. A.134 - Vibrația obținută la U=10V

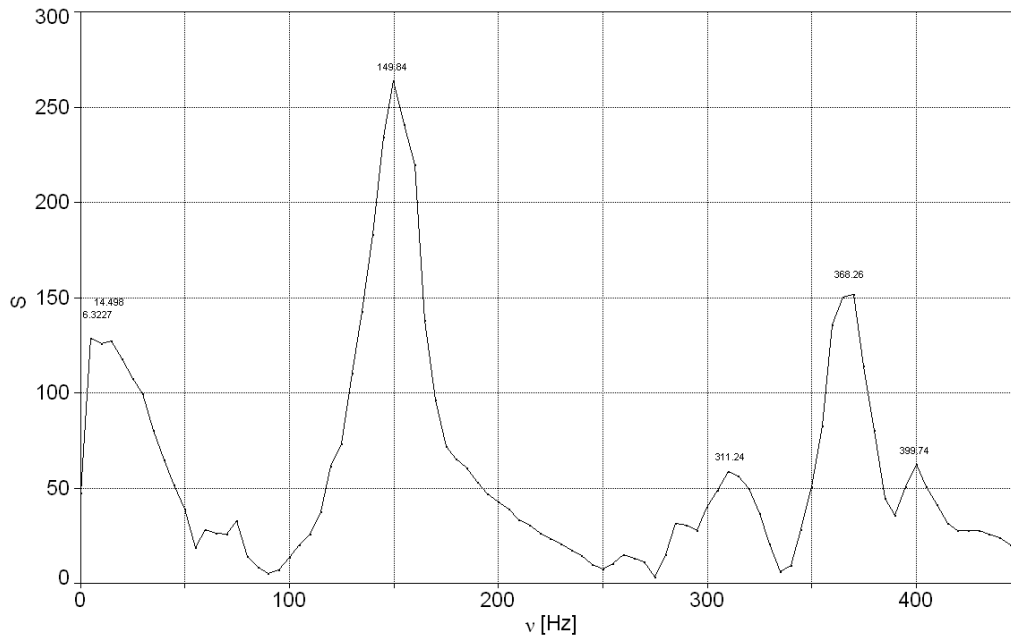


Fig. A.135 - Puterea spectrală a semnalului

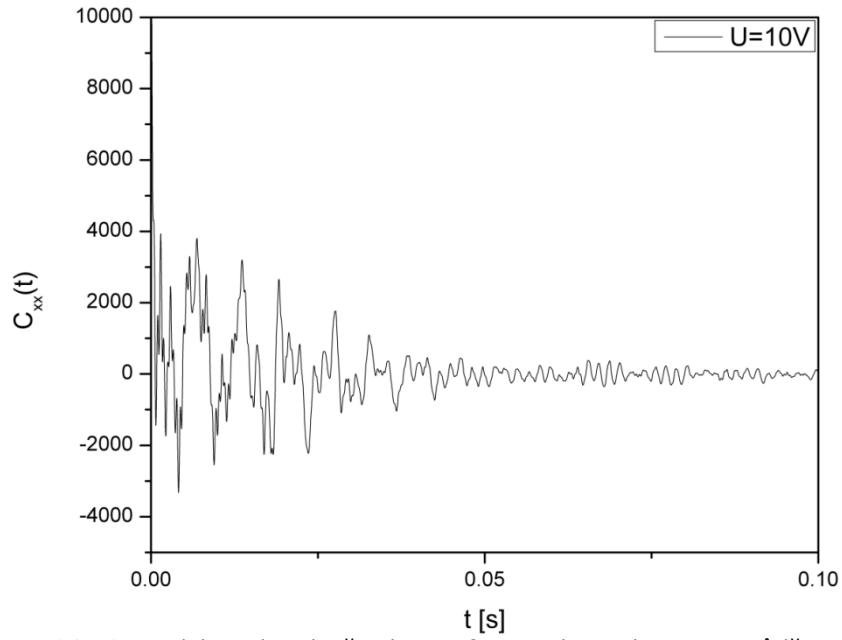


Fig. A.136 - Semnalul rezultat după aplicarea funcției de corelație pentru înlăturarea zgomotului

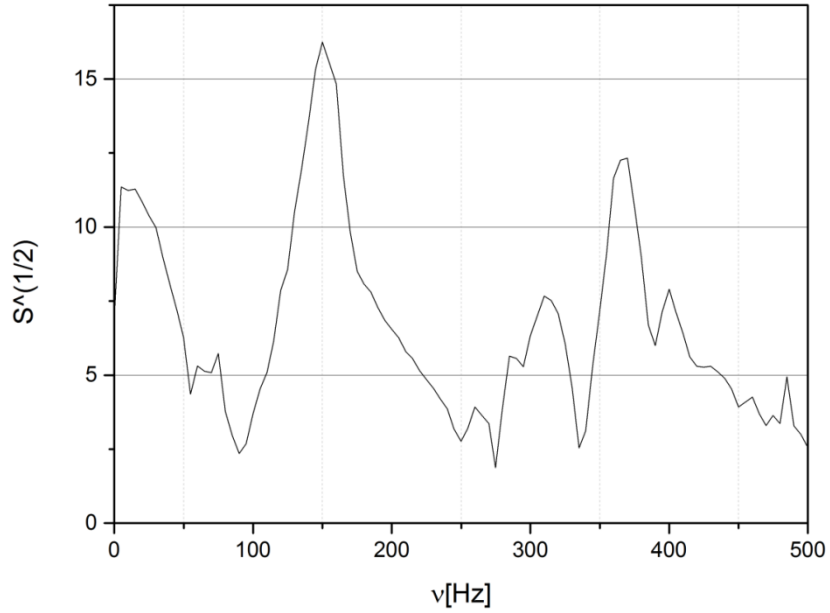


Fig. A.137 - Radicalul puterii spectrale a semnalului
Frecvența puterii spectrale obținută are primul vârf al amplitudinii la $\nu=6.322\text{Hz}$

