

**UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" din TIMIȘOARA  
FACULTATEA de MECANICĂ**

**Ing. MILENCO LUCHIN**

**CERCETĂRI PRIVIND INTERACȚIUNEA  
SISTEM ACTIV-SISTEM PASIV (MEDIU)  
UTILIZÂND METODELE ALE ROBOTICII**

**Teză de doctorat**

**BIBLIOTECA CENTRALĂ  
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"  
TIMIȘOARA**

**Conducător științific:  
Prof. Dr.ing. Dr.h.c. FRANCISC V. KOVACS**

**Timișoara 2003**

## CUPRINS

<i>Cuprins</i> .....	<i>I</i>
<i>Bibliografie</i> .....	<i>VIII</i>
<i>Prefață</i> .....	<i>1</i>
<b>1. Introducere</b> .....	<b>3</b>
<b>1.1 Preliminarii</b> .....	<b>3</b>
<b>1.2 Semnificația termenilor și conținutul conceptelor de robot și robotică</b> .....	<b>3</b>
<b>1.3 Tendințe actuale în dezvoltarea roboticii. Conceptul de robotică avansată</b>	<b>6</b>
<b>1.4 Robotica românească</b> .....	<b>8</b>
<b>1.5 Interacțiunea dinamică dintre sistemele mecanice și mediul înconjurător (aplicațiile de tip “contact-task”)- subiect de studiu în robotica avansată</b> .....	<b>8</b>
<b>2. Stadiul actual al cercetărilor și realizărilor privind modelarea sistemelor și simularea funcționării lor</b> .....	<b>10</b>
<b>2.1 Preliminarii</b> .....	<b>10</b>
<b>2.2 Modelarea și simularea - mijloace moderne și eficiente ale cunoașterii umane</b> .....	<b>11</b>
2.2.1 Despre cunoaștere ([EAC75], [EAC86], [EPO65], [EPO73], [EȘE86], [Luc99e]) .....	11
2.2.2 Observarea și măsurarea ([EPO73], [Eyk77]).....	11
2.2.3 Apariția metodei modelării .....	12
2.2.4 Conceptele fundamentale ale modelării. Prezentare succintă.....	13
2.2.5 Concluzii.....	14
<b>2.3 Elemente de Teoria sistemelor</b> .....	<b>16</b>
2.3.1 Noțiunea de sistem ([Cha85], [Dra79], [EAC75], [EAC86], [EPO65], [EPO73], [Eyk77], [EȘE79], [EȘE80], [EȘE86], [ETE62], [ETE63], [Gun90], [HER93], [Ion94], [McG92], [Nic80], [Voi80]) .....	16
2.3.2 Definiția sistemelor; abordarea matematică de tip algebric-descriptiv a acestora ([Con75], [Dra79], [Ion94], [McG92], [Nic72], [Voi80]).....	17
2.3.3 Precizări asupra sistemelor, relevante pentru teoria generală a modelării..	19
2.3.3.1 Precizări de ordin general .....	19
2.3.3.2 Taxonomia sistemelor.....	19
2.3.3.3 Caracterizarea și descrierea relațiilor dintre mărimile de intrare și cele de ieșire ale sistemelor.....	20
2.3.3.3.1 Abordarea matematică modernă .....	21
2.3.3.3.2 Tipurile fundamentale ale sistem. dinamice-modele matematice... 21	
2.3.3.4 Descrierea structurii sistemelor .....	22
<b>2.4 Conceptele de model, modelare; “încorporarea” conceptului de simulare în Teoria Modelării</b> .....	<b>23</b>
2.4.1 Prezentarea conceptului de model .....	23
2.4.1.1 Semnificația termenului de model ([Nic77], [Nic81], [Ven72]) .....	23
2.4.1.2 Elemente de definiție; conținutul conceptului de model și al celor conexe	

acestua ([Ben95], [Cha85], [EAC75], [EAC86], [EPO65], [EPO73], [EyK77], [EŞE79], [EŞE80], [EŞE86], [ETE62], [ETE63], [Gun90], [HER93], [McG92], [Ter80], [Ter87], [Ven72]) .....	23
2.4.1.3 Concluzii.....	24
2.4.2 Conceptul de modelare.....	25
2.4.2.1 Semnificația și conținutul conceptului .....	25
2.4.2.2 Aprecierea calității modelelor .....	25
2.4.3 Clasificarea modelelor ([Luc99c], [Luc99d]) .....	25
2.4.4 Modelul privit prin prisma esenței sale de sistem .....	28
2.4.5 Caracterizarea sintetică sub formă ierarhizată a modelelor și sistemelor ([Ben95], [Luc99h], [McG92]) .....	29
2.4.6 Modalitățile de descriere și prezentare a modelelor .....	31
2.4.7 Tendințe actuale în abordarea teoriei modelării .....	31
2.4.7.1 Elementele de bază ale teoriei modelării enunțate de Zeigler .....	31
2.4.7.2 Relațiile de modelare .....	32
<b>2.5 Destinațiile modelelor .....</b>	<b>33</b>
2.5.1 Cercetarea.....	33
2.5.2 Proiectarea.....	33
2.5.3 Conducerea sistemelor .....	34
2.5.3.1 Semnificația conceptului de conducere.....	34
2.5.3.2 Incertitudinea în procesele de conducere .....	34
2.5.3.3 Sistemele automate .....	34
2.5.3.4 Regimurile de conducere.....	35
2.5.3.5 Observații .....	35
<b>2.6 Identificarea - proces esențial în construcția modelelor ([Bus92], [Dav86], [EyK77], [EyK81], [Kli95], [Lan90], [Lan97], [Let98], [Pen71], [Rad79], [Ter86], [Ter80], [Voi93]).....</b>	<b>36</b>
2.6.1 Semnificația conceptului de identificare.....	36
2.6.2 Construirea modelelor. Generalități. Proceduri .....	37
2.6.2.1 Etapele identificării.....	37
2.6.2.2 Procedura propusă de P. Eykhoff .....	37
2.6.2.3 Alte proceduri de identificare .....	38
2.6.3 Abordarea procedurilor de identificare ([Ter80], [Ter86]).....	43
2.6.3.1 Preliminarii.....	43
2.6.3.2 Abordarea a priori (prin analiză teoretică) a modelării unui sistem .....	44
2.6.3.3 Abordarea experimentală a identificării.....	47
2.6.3.4 Instrumente software de identificare.....	50
<b>2.7 Simularea. Prezentare generală .....</b>	<b>51</b>
2.7.1 Semnificația noțiunii de simulare .....	51
2.7.2 Categoriile ale simulării.....	52
2.7.3 Raportarea simulării la modele matematice.....	52
2.7.4 Tehnicile de simulare în legătură directă cu categoriile de simulare ([Bar92], [Ben95], [Nic77], [Răd81], [McG92]).....	53
2.7.4.1 Simularea analogică .....	53
2.7.4.2 Simularea numerică.....	53
2.7.4.3 Simularea hibridă .....	54
2.7.5 Ierarhie și taxonomie în procesul de simulare.....	54
2.7.6 Structura unei sesiuni de lucru de tip simulare.....	56
2.7.7 Abordarea metodică a unei probleme de simulare .....	56

<b>2.8 Aplicații și clase tipice de simulare ([Bak76], [Ben95], [Kil97], [Leț98], [Mar87], [Mur96]).....</b>	<b>58</b>
2.8.1 Simularea discretă.....	58
2.8.1.1 Definirea conceptului.....	58
2.8.1.1.1 Elementele componente ale unui sistem discret .....	58
2.8.1.1.2 Dinamica modelului discret.....	58
2.8.1.2 Diferitele abordări de modelare în simularea discretă .....	59
2.8.1.2.1 Modelarea orientată pe entități.....	59
2.8.1.2.2 Modelarea orientată pe evenimente.....	60
2.8.1.2.3 Ciclurile de activitate.....	61
2.8.1.3 Software aferent simulării discrete - blocurile structurale .....	62
2.8.1.3.1 Definirea și setarea modelului .....	62
2.8.1.3.2 Legătura dintre variabilele aleatoare și simularea discretă.....	62
2.8.1.3.3 Avansarea în timp.....	62
2.8.2 Calculul analogic și cel hibrid în aplicații de simulare .....	63
2.8.2.1 Introducere.....	63
2.8.2.2 Componentele unui calculator logic-paralel analogic.....	63
2.8.2.3 Componentele de interfațare.....	64
2.8.2.4 Structura de simulare pentru calcul analogic.....	64
2.8.2.4.1 Modelul unui sistem amortizat aflat în mișcare liberă .....	64
2.8.2.4.2 Modelul unui sistem cu amortizare forțată.....	66
2.8.2.5 Introducere în simularea cu calculatoare hibride .....	66
2.8.3 Simularea continuă cu calculatoare digitale.....	68
2.8.3.1 Caracteristici ale modelelor continue.....	68
2.8.3.1.1 Modalitatea de operare a corespondenței cu calculul analogic.....	68
2.8.3.1.2 Urmărirea rezultatelor .....	68
2.8.3.1.3 Structura de simulare.....	68
2.8.3.1.4 Problemele de implement. care nu se regăsesc la calculul analogic.....	68
2.8.3.2 Sisteme cu parametri distribuți .....	69
2.8.3.2.1 Introducere.....	69
2.8.3.2.2 Discretizarea: conversia PDE în ODE.....	70
2.8.3.2.3 Problemele care apar la simulările care fac uz de discretizări.....	70
<b>2.9 Tendințele actuale în hardware și software pentru simulare ([Bas97], [Ben95], [Eyk81], [Leț98], [Răd81], [McG92]).....</b>	<b>70</b>
2.9.1 Sisteme de calcul - tendințe hardware .....	70
2.9.2 Tendințe software .....	71
2.9.2.1 Caracteristicile fundamentale ale programelor orientate pe simulare.....	71
2.9.2.2 Tehnici grafice specializate de modelare .....	71
2.9.2.3 Limbaje și medii de programare de uz general pentru simulare.....	72
2.9.2.4 Medii integrate de simulare .....	73
2.9.2.5 Modelarea completă, funcțional-geometrică.....	73
2.9.3 Standarde utile pentru modelare ([Sav97]) .....	73
2.9.4 Investigatori.....	74
<b>3. Stadiul actual al cercetărilor privind interacțiunea inteligentă dintre un sistem activ și mediu (aplicații tip "contact-task") .....</b>	<b>75</b>
3.1 Definirea conceptului de aplicație tip "CONTACT-TASK" și conținutul acestuia ([Vuk95a], [Vuk97a], [Vuk97b], [Pot97], [Vuk85a], [Vuk94c], [Vuk97b], [Vuk98a], [Vuk98b], [Luc99f]).....	75

3.1.1	Introducere .....	75
3.1.2	Comportamentul sistemelor aflate în interacțiune .....	76
3.1.3	Evoluția modului de abordare a interacțiunii sistemelor de lucru cu mediul înconjurător .....	76
3.1.3.1	Abordare tradițională .....	76
3.1.3.2	Abordarea actuală .....	77
3.1.4	Domeniile de aplicativitate. Preocupări de studiu .....	78
<b>3.2</b>	<b>Modelarea fenomenului în abordarea actuală. Conexiuni naturale cu Robotica.....</b>	<b>79</b>
3.2.1	Modelul matematic.....	79
3.2.2	Modelul fizic .....	81
3.2.3	Modelul sistemului de conducere/comandă .....	82
3.2.4	Fundamentele teoretice ale conducerii unui sistem aflat în interacțiune cu mediul .....	83
3.2.5	Concluzii.....	85
3.2.5.1	Referitoare la problematică .....	85
3.2.5.2	Referitoare la structura prezentei lucrări.....	86
<b>3.3</b>	<b>Metodele de conducere a roboților în aplicațiile care implică contactul ....</b>	<b>87</b>
3.3.1	Clasificarea conceptelor robotice pentru conducerea mișcărilor constrânse	87
3.3.2	Metodele cu compliantă pasivă .....	89
3.3.2.1	Metodele neadaptabile .....	89
3.3.2.2	Metodele adaptabile .....	90
3.3.3	Metodele cu compliantă activă .....	90
3.3.3.1	Conducerea hibridă poziție/forță.....	90
3.3.3.1.1	Conducerea explicită prin forță .....	91
3.3.3.1.2	Conducerea implicită prin forță.....	94
3.3.3.1.3	Schema de conducere implicit/explicită prin forță.....	96
3.3.3.2	Conducerea prin impedanță .....	96
3.3.3.2.1	Conducerea prin impedanță bazată pe poziție.....	96
3.3.3.2.2	Conducerea prin impedanță bazată pe forță.....	98
<b>3.4</b>	<b>Forme utilizabile ale modelului matematic care descrie aplicațiile de tip “contact-task”([Ben95], [Bir96], [Ghi95], [Ion94], [Rad79]) .....</b>	<b>98</b>
3.4.1	Modelul fizic/mecanic al unei aplicații “contact-task” clasice.....	98
3.4.2	Modelele matematice ale aplicației.....	99
3.4.2.1	Modelul matematic “clasic” al aplicației .....	99
3.4.2.2	Modelele utilizabile în aplicațiile orientate pe simulare.....	101
3.4.2.2.1	Funcția de transfer .....	102
3.4.2.2.2	Modelul “zero-pol” .....	102
3.4.2.2.3	Modelul fracțiilor parțiale .....	103
3.4.2.2.4	Modelul de reprezentare în spațiul stărilor.....	104
3.4.2.2.5	Forma de reprezentare Cauchy .....	104
<b>3.5</b>	<b>Studiu de caz în abordare modernă: suspensia “inteligentă “ a unui autovehicul ([Bir96], [Vuk95a]) .....</b>	<b>105</b>
3.5.1	Prezentarea problemei .....	105
3.5.2	Modelul fizic .....	105
3.5.3	Modelul matematic al unei suspensii inteligente .....	107

<b>3.6 Metoda conducerii hibride – poziție/forță - în robotică, punctul de plecare pentru abordarea modernă a aplicațiilor de tip “contact-task”; începuturi, evoluție, critici și tendințe [Vuk95c] .....</b>	<b>111</b>
3.6.1 Prezentare generală .....	111
3.6.2 Stadiul actual al cercetărilor privind conducerea hibridă tradițională. Analiză critică. ....	113
3.6.3 Concluzii asupra “schemelor” de conducere hibridă .....	119
3.6.4 Conceptele de stabilitate, reciprocitate și ortogonalitate în conducerea hibridă, pași spre abordarea modernă a aplicațiilor de tip “contact-task” .....	120
<b>3.7 Aspecte particulare ale procesului de conducere a sistemelor de lucru aflate în interacțiune cu mediul: efectul complianței asupra stabilității la impact ([Bog98], [Pay91], [Pay92], [Pay93]).....</b>	<b>130</b>
3.7.1 Prezentare generală .....	130
Observație .....	130
3.7.2 Modelarea în buclă închisă .....	131
3.7.3 Analiza stabilității .....	134
3.7.4 Concluzii .....	138
3.7.5 Sistem de coordonate natural pentru proiectarea unui regulator ce conduce sistemul studiat spre o stare lipsită de instabilități în aplicațiile “contact-task” în Robotică .....	138
3.7.5.1 Prezentare generală .....	138
3.7.5.2 Proiectarea unui regulator ce conduce sistemul spre o stare lipsită de instabilități .....	139
3.7.5.3 Model discontinuu natural al sistemului în buclă închisă .....	141
3.7.5.4 Existența soluției .....	144
3.7.5.5 Analiza regulatorului care conduce sistemul spre o stare lipsită de instabilități .....	146
3.7.6 Studiul experimental al sistemului discontinuu .....	152
<b>4. Noi soluții de module de interfețe inteligente sistem activ - mediu cu grad de libertate <math>L = 1</math>. Modelarea matem. și simularea funcționării lor .</b>	<b>153</b>
<b>4.1 Definierea și rolul interfeței inteligente sistem activ - mediu cu <math>L = 1</math> .....</b>	<b>153</b>
4.1.1 Introducere .....	153
4.1.2 Primul și al doilea nivel de structurare .....	153
4.1.3 Modelarea modulului-interfață inteligent cuplă de translație activă .....	155
4.1.3.1 Identificarea parametrilor și a struct. funcționale a sistem. modul-interfață inteligentă cu un singur grad de libertate; modelarea "primară" a acestuia .....	155
4.1.3.2 Modalități de variație a parametrilor impedanței mecanice .....	157
4.1.3.3 Modalități de conducere privitor la parametrii impedanței mecanice ....	159
4.1.3.4 Analiza structurală completă a unui modul-interfață inteligent .....	159
4.1.3.5 Concluzii privind analiza structurală .....	162
<b>4.2 Modelarea submodulelor/parametru ale <math>mI_{IU}</math> .....</b>	<b>165</b>
4.2.1 Submodulul $s_{bmu}$ /masă corespunzător parametrului masă .....	165
4.2.2 Submodulul $s_{bmu}$ /amort corespunzător parametrului coeficient de amortizare .....	166
4.2.3 Submodulul $s_{bmu}$ /elast corespunzător componentei elastice .....	167
<b>4.3 Modelarea submodulelor/parametru ale <math>mI_{IU}</math> .....</b>	<b>168</b>
4.3.1 Submodulul $s_{buM}$ /complex conceput drept sistem unificat .....	168
4.3.2 Submodulul $s_{muM}$ /complex conceput drept sistem sintetic .....	169

<b>4.4 Modelarea submodulului sbmuCC/complex al mI_IU .....</b>	<b>169</b>
4.4.1 Descrierea arhitecturilor hard pentru conducerea și comanda submodulelor/parametru .....	170
4.4.2 Structura și concepția submodulului soft al sbmuCC/complex.....	171
4.4.2.1 Descrierea secțiunilor de program care rezolvă problemele legate de funcțiile (F1-F4).....	172
4.4.2.2 Concepția complet structurată a secțiunilor soft ale sbmE/config.H&S	174
<b>4.5 Concluzii privitor la modelarea și concepția unui mI_IU. Tema de proiectare a standului pentru investigarea aplicațiilor de tip “contact-task”... 177</b>	
<b>4.6 Proiectarea sbmuM/complex al mI_IU .....</b>	<b>180</b>
4.6.1 Prezentare generală a soluțiilor constructive .....	180
4.6.2 Constatări finale asupra temei de proiectare-stand .....	181
4.6.3 Entitățile fizico-mecanice implementate în soluția standului.....	184
4.6.3.1 Soluții de gestiune a forțelor în cadrul standului: generatorul de forță și simulatorul forței preconizate .....	184
4.6.3.2 Structura de rezistență și susținere .....	184
4.6.4 Soluția constructivă a standului experimental (varianta “hidraulică”).....	184
4.6.5 Soluția constructivă a standului experim. (varianta “mecano-electrică”)..	189
4.6.5.1 Prezentarea .....	189
4.6.5.2 Realizarea .....	191
<b>4.7 Determinări preliminare necesare punerii în funcțiune a standului. Standul auxiliar de determinare a caracteristicilor de amortizare a ssmem/amort ([Luc01a]) .....</b>	<b>194</b>
4.7.1 Introducere .....	194
4.7.2 Modalitatea de determinare a coeficientului de amortizare .....	194
4.7.3 Standul auxiliar pentru determinarea variației coeficientului de amortizare vâscoasă .....	195
4.7.3.1 Descrierea standului.....	195
Algoritmul de lucru de utilizat la determinarea variației coeficientului de amortizare vâscoasă.....	198
4.7.4 Concluzii; realizare.....	199
<b>4.8 Mediul soft SOFMINT_AC-T aferent unei aplicații de tip “contact-task” ([Cra98], [Hey96], [Kil97], [Luc98g], [Luc99b], [Luc99g], [Luc00a-f]) .....</b>	<b>201</b>
4.8.1 Introducere .....	201
4.8.2 Prezentare generală și structura mediului soft SOFMINT_AC-T .....	201
4.8.3 Simulatorul virtual complex SMILEC_T - cu control inteligent - al unei aplicații de tip "contact -task" .....	206
4.8.3.1 Introducere.....	206
4.8.3.2 Rezolvarea problemelor ridicate de modelul matematic al aplicației În corelație cu concepția simulatorului virtual. ....	206
4.8.3.3 Concepția și caracteristicile simulatorului virtual SMILEC_T .....	208
4.8.3.4 Interfața grafică a simulatorului.....	215
4.8.3.5 Fereastra “Limitări” .....	217
4.8.3.6 Sesiuni de lucru “simulare”; urmărirea și gestiunea rezultatelor .....	219
4.8.4 Interfața modulului de etalonare/calibrare .....	225

<b>4.9 Modelarea matematică și simularea aplicației “contact-task” conform cu varianta mecano-electrică proiectată/realizată ([Bir96], [Gaw01], [Ghi95], [Har68,69], [Kri01], [Lim01], [Luc98b,c,g], [Luc99b,g], [Luc00c], [Mat94], [Pre01], [Sav00]).....</b>	<b>228</b>
4.9.1 Analiza cinetostatică a schemelor funcționale ale standului .....	228
4.9.2 Modelul matematic particularizat al soluției adoptate.....	230
4.9.2.2 Modelul sistemului SI reprezentat de mI_IU.....	230
4.9.2.3 Legile de conducere-parametru .....	231
4.9.3 Simulatoare virtuale ale aplicației și ale modului mI_IU sub extensia SIMULINK/MATLAB.....	235
<b>4.10 Investigațiile experimentale .....</b>	<b>239</b>
4.10.1 Standul de investigare a aplicațiilor “contact-task” (descriere/recapitulare succintă, completări și modificări).....	239
4.10.2 Mărimile măsurate și de stare .....	241
4.10.3 Parametri reali, corespunzători standului și modului mI_IU realizat... ..	243
4.10.4 Modul de desfășurare al investigațiilor experimentale .....	244
4.10.4.1 Operații preliminare.....	244
4.10.4.2 Tipuri de experimente, desfășurarea și conducerea lor.....	246
4.10.5 Analiza dinamică experimentală a submodulelor/modulului mI_IU.....	248
4.10.6 Estimarea comportamentului și limitelor aplicației contact-task prin simulare cu parametri efectivi ai standului.....	251
4.10.7 Determinări experimentale ale aplicației propriu-zise pe stand.....	253
4.10.7.1 Scop și caracteristici .....	253
4.10.7.2 “Scheme” de investigație și rezultate.....	255
4.10.7.3 Reprezentări grafice.....	255
4.10.8 Concluzii.....	261
<b>5. Modul-interfață inteligent sistem activ - mediu cu 6 grade de libertate (<math>L = 6</math>). Studiu, modelare matematică și concepție constructivă ([Kov69], [Kov77a], [Kov92], [Kov97], [Kov98], [Kov99], [Pre01], [Stö01]) .....</b>	<b>263</b>
5.1 Introducere.....	263
5.2 Conceptul de conexiune în Teoria Mecanismelor.....	263
5.2.1 Definirea conceptului.....	263
5.2.2 Constrângeri introduse de conexiuni în mișcarea relativă a elementelor rigide ale mecanismelor cinematice; consecințe.....	265
5.2.2.1 Constrângeri geometrice .....	266
5.2.2.2 Constrângeri cinetostatice.....	267
5.3 Utilizarea conceptului de conexiune în Robotică .....	269
5.3.1 Generalități.....	269
5.3.2 Modelarea mecanismelor dispozitivelor de ghidare de robot cu topologie paralelă.....	269
5.3.2.1 Analiza și sinteza structurală .....	269
5.3.2.2 Analiza cinematică și sinteza dimensională.....	270
5.3.2.3 Analiza cinetostatică .....	273
5.4 Concepția unui modul-interfață inteligent sistem activ – mediu (sistem pasiv) cu 6 grade de libertate utilizând conexiuni cinematice .....	275
5.4.1 Elemente definitorii ale temei de proiectare .....	275
Concluzii.....	275
5.4.2 Adaptarea/reproiectarea modulelor individuale de tip mI_IU.....	276
5.4.3 Proiectarea sistemului mecanic mobil al M_IIAC_T .....	277
<b>6. Contribuții personale.....</b>	<b>280</b>



**Bibliografie**

- [Abb90] Abbati-Marescotti A., Bonivento C., Melchiorri C., *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol.3, 251-258, 1990.
- [AnC87] An C., Hollerbach J., *Kinematic Stability Issue on Force Control of Manipulators*, Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation, NC, pp. 847-903, Raleigh, 1987.
- [AnC89] An C., Hollerbach J., *The Role of Dynamic Models in Cartesian Force control of Manipulators*, International Journal of Robotic Research, 8 (4), pp. 51-71, 1989.
- [Bak76] Bakhvalov N., *Methodes numeriques*, Edition "Mir", Moscou, 1976.
- [Bal900] Ball R.S., *A Treatise on the Theory of Screws*, Cambridge Univ. Press, London, 1900.
- [Bar92] Barbu Gh., *Modele de simulare cu aplicații în fiabilitate*, Editura Tehnică, București, 1992.
- [Bar97] Barkakati N., *Borland C++ Ghidul programatorului*, Editura Teora, București, 1997.
- [Bas97] Bass J.M., MacKenzie S. A., *New Approaches to Modelling in the Design of Complex Reactive Systems*, Proceedings of Symposium on System Modelling, Fault Diagnosis and Fuzzy Logic and Control, Budapest/Miskolc, Hungary, 1997.
- [Ben74] Ben-Israel A., Greville T., *Generalized Inverses: Theory and Applications*, Wiley, New York, 1974.
- [Ben95] Bennett B. S., *Simulation Fundamentals*, Prentice Hall, London, ..., Munich, 1995.
- [Bir96] Biran A., Breiner M., *MATLAB for Engineers*, Addison-Wesley Publishing Company, Harlow, England, Taipei, 1996.
- [Ble95] Blebea I., Ispas V., *Calculul și construcția roboților industriali*, Ed. Dacia, Cluj Napoca, 1995.
- [Bog96] Bogdanov I., Luchin M., Kovacs F. V., *Intelligent control of variable mechanical impedance units for testing the "contact-task" problem's solution*, Lucrările celui de-al XII-lea Simpozion Național de ROBOTICA cu Participare Internațională, vol 3, pp. 43-46, Reșița, Romania, 1996.
- [Bog98] Bogdanov I., *Conducerea sistemelor robotizate (note de curs)*, Universitatea Politehnica din Timișoara, 1997/98.
- [Bus92] Busenberg S., Forte B., Kuiken H.K., *Mathematical Modelling of Industrial Processes*, Bari, 1990, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, ..., 1992.
- [Buz65] Buzdugan Gh., coord. gen. ș.a., *Manualul inginerului*, Volumul al II<sup>lea</sup>, Editura Tehnică, București 1965.
- [Căl88] Călin S., Popescu T., Jora B., Sima V., *Conducerea Adaptivă și flexibilă a proceselor industriale*, Editura Tehnică, București, 1988.
- [CDK92] \*\*\*, *La Production Europeenne Made in Cadkey Cadkey 3.0*, Division Cadkey, Micro Control System Inc., Malmaison, France, 1992.
- [Cha85] Chandor A., Gragam J., Williamson R., *The Penguin Dictionary of Computers*, Penguin Book Inc., London, England, 1985.

## BIBLIOGRAFIE

- [Che96] Chernorvoko F., Gradetsky I., *Mechanics of Climbing and Crawling Robots*, Proceeding I.C. Advanced Robotics, Vienna, 1996.
- [Chi91] Chiaverini S., Siciliano B., *On the stability of a force/position control scheme for robot manipulators*, Proceeding of Syroco'91, pp. 371-376, Vienna, Austria, 1991.
- [Cla88] Clavel R., *Delta, a Fast Robot with Parallel Geometry*, Proceeding 18th ISIR, Lausanne, 1988.
- [Col93] Colgate E., Hogan N., *Analysis of Contact Instability in terms of Passive Physical Equivalents*, Proceeding of IEEE on Robotics and Automation Conference, pp. 387-391, 1993.
- [Con75] Constantinescu P., Negoită V., *Sisteme informatice, modele ale conducerii și sistemelor de conducere*, Editura Tehnică, București, 1975.
- [Cra79] Craig J.J., Raibert M.H., *Proceeding IEEE Computer Applications Conf.*, Chicago, 1979.
- [Cra98] Craig J. C., Webb J., *Microsoft Visual Basic 5.0. Manualul programatorului*, Editura Teora, 1998.
- [Cur95] Curiac D., Filip I., *Teoria Sistemelor și Automatizări. Lucrari de laborator*, Centrul de Multiplicare U. Politehnica, Timișoara, 1995.
- [Dav86] Davidoviciu A., Drăgănoiu Gh., Moangă A., *Modelarea, simularea și comanda manipuloarelor și roboților industriali*, Editura Tehnică, București, 1986.
- [Dav92] David R., Hassane A., *Du grafcet aux réseaux de Petri*, Hermes, Paris, 1992.
- [DCA90] \*\*\*, *DesignCAD 3-D Version 3.0. Reference Manual*, American Small Business Computers Inc., Pryor/USA, 1990.
- [DeL91] De Luca A., Manes C., *On the modeling of robots in contact with a ynamic environment*, droceeding 5<sup>th</sup> International Conf. on Advanced Robotics, pp. 568-574, Pisa, 1991.
- [DeS88] De Shutter J., Van Brusel H., *Compliant robot motion : A control approach based on external control loops*, Int. J. Robot. Res., 7, 17-25, 1988.
- [Diz68] Dizioglu B., *Getriebelehre*, 3 vol., Ed. Vieweg und sohn, Braunschweig, 1965-1968.
- [Dog88] Dogaru D., *Metode noi în proiectare. Elemente de grafică 3-D*, Editura științifică și Enciclopedică, București, 1988.
- [Dog95] Dogaru D., *Grafica pe calculator. Elemente de geometrie computațională*, vol.I, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1995.
- [Dol93] Dolga V., *Construcția traductoarelor și senzorilor*, U.T.T., Timișoara, 1993.
- [Dra79] Dragomir T.-L., Preitl ș., *Elemente de Teoria Sistemelor și Reglaj Automat*, vol. I și vol al II-lea , Litografia Institutului Politehnic Traian Vuia, Timișoara, 1979.
- [Duf90] Duffy J., *The fallacy of modern hybrid control theory that is based on 'orthogonal complements' of twist and wrench spaces*, Journal of Intelligent and Robotic Systems, 7, pp. 139-144, 1990.
- [EAC75] \*\*\*, *Dicționarul explicativ al limbii române*, Editura Academiei. București, 1975.
- [EAC86] \*\*\*, *Dicționar de neologisme*, Editura Academiei, București, 1986.

- [Eka93] Ekalo Y., Vukobratović M., *Robust and adaptive control position/force stabilization conditions of robotic manipulators in contact tasks*, International Journal Robotica, **11**, pp. 373-386, 1993.
- [Eka94a] Ekalo Y., Vukobratović M., *Adaptive Stabilization of Motion and Forces in Contact-task for Robotic Manipulators with Nonstationary Dynamics*, International Journal of Robotics and Automation, **9** (3), 1994.
- [Eka94b] Ekalo Y., Vukobratović M., *Stabilization Conditions of Robotic Manipulators in Contact with Dynamic Environment*, Journal of Intelligent and Robotic Systems, **11**, 1994.
- [Eka94c] Ekalo Y., Vukobratović M., *Stabilization of robot motion and contact force interaction for third order actuator model*, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Theory&Applications, **10**, pp. 257-282, 1994.
- [Eka95] Ekalo Y., Vukobratović M., *Quality of Stabilization of Robot Interacting with Dynamic Environment*, Journal of Intelligent and Robotic Systems, **14**, pp. 155-179, 1995.
- [Epi92] Eppinger S., Seering W., *Three Dynamic Problems in Robotics Force Control*, IEEE Transaction on Robotics and Automation, **6**, pp.751-758, 1992.
- [EPO65] \*\*\*, *Dicționar enciclopedic român*, Editura Politică, București, 1965.
- [EPO73] \*\*\*, *Mic dicționar filozofic*, Editura Politică, București, 1973.
- [EȘE 79] \*\*\*, *Dicționar de matematică și cibernetică în economie*, Editura științifică și enciclopedică, București, 1979.
- [EȘE80] \*\*\*, *Dicționar al limbii române contemporane*, Editura științifică și Enciclopedică, București, 1980.
- [EȘE86] \*\*\*, *Mic dicționar enciclopedic*, Editura științifică și Enciclopedică, București, 1986.
- [ETE62] \*\*\*, *Lexicomul tehnic român*, **11, 15**, Editura Tehnică, București, 1962.
- [ETE63] \*\*\*, *Dicționar tehnic poliglot*, Editura Tehnică, București, 1963.
- [Eykh77] Eykhoff P., *Identificarea sistemelor*, Editura Tehnică, București, 1977.
- [Eykh81] Eykhoff P. ș.a., *Trends and progress in System identification*, Pergamon Press, Oxford-NY-Toronto-Sydney-Paris-Frankfurt, 1981.
- [Far93] Farin G., *Curves and surfaces for CAGD*, Academic Press, 1993.
- [Fis92] Fisher W., Mujtaba S., *Hibrid position/force control: A corect formulation*, Int. J. Robot. Res., **11** (4), 299-311, 1992.
- [Gaw01] Gawronski W. K., *Dynamics of structures. A modal approach*, Conference on "Responsive Systems for Active Vibration Control", NATO Advanced Study Institute, Brussels, Belgium, sept. 2001.
- [Ghi95] Ghinea M., Firețeanu V., *Matlab. Calcul numeric - Grafică - Aplicații*, Editura Teora, București, 1995.
- [Gol93] Goldenberg A., in *Force and Contact Control in Robotic Systems: A Historical Perspective and Current Technologies*, Tutorial Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Atlanta, pp. 197-212, may1993.
- [Gro97] Gronowicz A., Miller St., *Mechanismy*, Ed. O.W.P.W Wroclaw, 1997.
- [Gun90] Gunton T., *The Penguin Dictionary of Information Technology and Computers Science*, London, England, 1990.
- [Han96] Handra-Luca V., Brișan C., *Direct Positional Analysis for Anthropomorphic Robot*, Proceeding of The Second ECPD International

- Conference on Advanced Robotics, Intelligent Automation and Active Systems, Vienna, 1996.
- [Har68] Harris C. M., Crede C. E., Șocuri și vibrații, vol 1-2, Editura Tehnică, 1968.
- [Har69] Harris C. M., Crede C. E., Șocuri și vibrații, vol 3, Editura Tehnică, 1969.
- [Hey96] Heyman M. S., *Bazele Visual Basic 4.0*, Editura Teora, 1996.
- [HER93] \*\*\*, *Le petit Larousse*, Hermes, Paris, 1993.
- [Hos89] Hoschek J., Lasser D., *English translation: Fundamentals of Computer Aided Geometric Design*, John and Bartlett publishers, 1989.
- [Hos89] Hoschek J., Lasser D., *English translation: Fundamentals of Computer Aided Geometric Design*, John and Bartlett publishers, 1989.
- [Hun78] Hunt, G.M., *Kinematic Geometry of Mechanisms*, Clarendon Press, Oxford, 1978.
- [Hyd93] Hyde J., Cutkovsky M., *Contact Transition Control: An Experimental Study*, Proceeding of International Conference on Robotics and Automation, pp. 363-368, 1993.
- [Hyd94] Hyde J., Cutkosky M., *Controlling Contact Transition*, IEEE Control Systems, **14** (1), pp.25-30, 1994.
- [IFR99] I.F.R.-*Robotics NewsLetter*, ISSN 1400-5972, **33**, ASEI, Stockholm, 1999.
- [IFR99a] I.F.R.-*World Robotics*, I.F.R., U.N., New York/Geneva, 1999.
- [INT99] *Inter. aktiv*, I.P.A., Franhofer/Stuttgart, 1999.
- [Ion94] Ionescu V., Varga A., *Teoria sistemelor*, Editura All, București, 1994.
- [Isp99] Ispas V., *Roboți pentru aplicații speciale*, Ed. Dacia, Cluj-Napoca, 1999.
- [IWB97] I.W.B.-*NewsLetter*, ISSN 1434-3249, TU Munchen, 1997.
- [Ixa79] Ixaru L., *Metode numerice pentru ecuații diferențiale cu aplicații*. Editura Academiei Republicii Socialiste România. Bucuresti, 1979.
- [Jam98] Jamsa K., Schmauder P., Yee N., *Biblioteca programatorului VRML*, Editura All, București, 1998.
- [Kaz90] Kazerooni H., Waibel B. J., Kim S., *On the Stability of Robot Compliance Motion Control: Theory and Experiments*, Transaction of ASME, Journal of Dynamics Systems, Measurements and Control, **112**, 99. 417-426, 1990.
- [Kha86] Khatib O., Burdik J, *Proceeding IEEE J. Int. Conf. on Robotics and Automation, CA*, pp. 1393-1398, S. Francisco, 1986.
- [Kha87] Khatib O., *A unified approach for motion and force control of robot manipulators: the operational space formulation*, IEEE Trans. of Robotics and Automation, **RA-3** (1), 43-53, 1987.
- [Kil97] Kilyeni St., *Metode numerice, vol I, II*, Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 1997.
- [Kli95] Kliemann W., Namachchivaya N. Sri., *Nonlinear Dynamics and Stochastic Mechanics*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1995.
- [Kov69] Kovacs F. V., *Contribuții la elaborarea unei metode unitare de sinteză a mecanismelor*, Teză de doctorat, Institutul Politehnic Timișoara, 1969.
- [Kov70] Kovacs F.V., *Eine neue Methode der Massynthese der ebener Gelenkgetriebe*, Konstruktion, 22 Jhg., Heft 11, pp. 441-443, 1970.
- [Kov71] Kovacs F.V., *Einheitliche Methode zur Syithese der Getriebe*, Proc. 3d International Congress on TMM, vol. **D**, paper D-10, pp 131-160,

- Kupari, 1971.
- [Kov76] Kovacs F.V., Perju D., Savii G., *Metode noi în sinteza mecanismelor*, Ed. Facla Timișoara, 1976.
- [Kov77a] Kovacs F.V., Perju D., Crudu M., *Mecanisme. Sinteza mecanismelor*, Litografia IPT Timișoara, 1977.
- [Kov77b] Kovacs F.V., Perju D., Crudu M., *Mecanisme. Analiza mecanismelor*, Litografia IPT, Timișoara, 1977.
- [Kov82] Kovacs F.V., Cojocaru G., *Manipulatoare, roboți și aplicațiile lor industriale*, Editura Facla, Timișoara, 1982.
- [Kov92] Kovacs F.V., Rădulescu C., *Roboți industriali*, vol.1 și 2, Centrul de multiplicare Universitatea Tehnică, Timișoara, 1992.
- [Kov94a] Kovacs F.V., Grigorescu S., Rădulescu C., *Sisteme de fabricație flexibilă robotizate*, Centrul de multiplicare Universitatea Tehnică, Timișoara, 1994.
- [Kov94b] Kovacs F.V., *Cu privire la predarea disciplinei Mecanisme la specialitatea Roboți Industriali*, Lucr. Simpozionului PRASIC, Brașov, 1994.
- [Kov94c] Kovacs F.V., Perju D., Crudu M., *Mecanisme*, Litografia UTT Timișoara, 1994.
- [Kov96a] Kovacs F.V., *Un nou model geometric al dispozitivelor de ghidare ale roboților*, Lucr. celui de al 12-lea Simpozion Național de Robotică, Reșița Văliug, 1996.
- [Kov96b] Kovacs F.V., Luchin M., Bogdanov I., *Stand for experimental investigations on "contact-task"*, Proceeding of The Second ECPD International Conference on Advanced Robotics, Intelligent Automation and Active Systems, pp.375-381, Vienna, 1996.
- [Kov96c] Kovacs F.V., Luchin M., Bogdanov I., *Experimental Investigations on "Contact - Task" Problems*, Lucr. celui de al 12-lea Simpozion Național de Robotică, Reșița Văliug, 1996.
- [Kov97] Kovacs F.V., *Using the Concept "Conexion" for Structural Analysis/Synthesis of Parallel Topology*, Robots. Proc. SYRoM 97, Bucharest, 1997.
- [Kov97a] Kovacs F.V., *The "Robotic Family"*, Simpozion Internațional "Teoria și practica mecanismelor", SYROM97, București, 1997.
- [Kov98] Kovacs F.V., *Analiza poziție-orientare și a deplasărilor roboților cu topologie paralelă utilizând noțiunea de conexiune*, Lucrările celui de-al 14 Simpozion Național de Robotică, Brașov, 1998.
- [Kov98a] Kovacs F.V., Tripe V., ș.a., *Robotică generală*, vol. I, Manuscris, 1998.
- [Kov99] Kovacs F.V., *Utilizarea noțiunii de "conexiune cinematică" în Teoria Mecanismelor și Robotică*, Disertație prezentată cu prilejul conferirii titlului de doctor honoris causa al Universității Craiova, 1999.
- [Kri01] Krishna S., Gayatri A., *System Design through MATLAB, Control Toolbox and Simulink*, Springer Verlag London Limited, 2001.
- [Lan90] Landau I. D., *System Identification and Control Design*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1990.
- [Lan97] Landau I. D., *Identificarea și comanda sistemelor*, Editura Tehnică, București, 1997.
- [Lei81] Leitmann G., *On the Efficacy of Non-Linear Control in Uncertain Linear Systems*, Journal of Dynamics Systems, Measurements and Control, 102,

- pp. 95-102, 1981.
- [Léo91] Léon J.C., *Modélisation et construction de surfaces pour la CFAO*, Hermes, Paris, 1991.
- [Leț98] Leția T. S., Aștilean A.M., *Sisteme cu evenimente discrete: modelare, analiză, sinteză și construcție*, Grupul Microinformatica, Editura Albastră, Cluj-Napoca, 1998.
- [LiL88] Li L., *Hidden line algorithm for curved surfaces*, *Computer Aided Design*, **20**, pp. 466-470, 1988.
- [Lim01] Lim K. B., *Responsive system for active vibration control: robust control*, Conference on "Responsive Systems for Active Vibration Control", NATO Advanced Study Institute, Brussels, Belgium, sept. 2001.
- [Lip85] Lipkin H., Duffy J., *Transactions ASME J. Mechanism, Transmission, Design*, **107**, pp. 377-387, 1985.
- [Lip88] Lipkin H., Duffy J., *Hibrid twist and wrench control control of a robotic manipulators*, *Transactions ASME J. Mechanisms, Transmission, Automation Design*, **110**, 138-144, 1988.
- [Luc98a] Luchin M., *Abordarea tradițională și abordarea actuală a interacțiunii sistemelor mecanice de lucru cu mediul înconjurător*, *Robotica/Management*, vol. **3** (1), pp. 29-33, Reșița/Timișoara, iunie 1998.
- [Luc98b] Luchin M., *Creation of graphical objects of tabular form for the interactive software's*, *The Romanian Review of Precision Mechanics & Optics*, pp. 453-456, ISSN 1220 - 6830, supplement 2/1998.
- [Luc98c] Luchin M., *Creation of control objects groups for the interactive softwares*, *The Romanian Review of Precision Mechanics & Optics*, pp. 457-460, ISSN 1220 - 6830, supplement 2/1998.
- [Luc98d] Luchin M., *Graphic-user interface "MILINT 1.0" dedicated to engineering applications*, *Proceedings of Symposium of Industrial Engineering*, pp. 51-54, ISBN 86-7083-326-3, Belgrade, 1998.
- [Luc98e] Luchin M., *Referat doctorat nr.2*, Timișoara, 1998.
- [Luc98f] Luchin M., *The Contact-task application. Principles of modeling and simulating*, *Proceedings of Symposium "ROBOTICA '98"*, pp 279-282, ISBN 973-98796-1-6, Brașov, Romania, 1998.
- [Luc98g] Luchin, M., Bivolaru, C., *Simulator virtual - cu control inteligent al unei aplicații tip "contact-task"*, *Lucrările Simpozionului "ROBOTICĂ '98"*, pp. 283-286, ISBN 973-98796-1-6, Brașov, Romania, 1998.
- [Luc98h] Luchin M., Ionescu N., Olteanu D., *Calculation of plane belt drives using software "TRELINT 1.0"*, *Proceedings of Symposium "PRASIC '98"*, pp. 429-434, ISBN 973-98796-0-8, Brașov, Romania, 1998.
- [Luc98i] Luchin M., Olteanu D., *Plane belt drives: software for modeling, design and verifying*, *Proceedings of Symposium "PRASIC '98"*, pp. 425-428, ISBN 973-98796-0-8, Brașov, Romania, 1998.
- [Luc98j] Luchin M., Savii G., Olteanu D., *The soft package "TRELINT 1.1" for design of belt transmissions*, *Proceedings of Symposium of Industrial Engineering*, pp. 55-58, ISBN 86-7083-326-3, Belgrade, 1998.
- [Luc99a] Luchin M., *Analiza structurală a unui modul-interfață inteligent utilizat în aplicații "contact-task"*, *Robotica&Management*, vol.4(2), pp.2-5, ISSN 1453-2069, Reșița, 1999.

- [Luc99b] Luchin M., *Concepția submodulului de conducere a interfețelor inteligente pentru aplicațiile "contact-task"*, Robotica&Management, vol.4(2), pp.6-10, ISSN 1453-2069, Reșița, 1999.
- [Luc99c] Luchin M., *Considerații asupra semnificației și conținutului conceptelor de model și modelare*, A XXVIII-a sesiune de comunicări științifice cu participare internațională – cu prilejul semicenenarului /Academia Tehnică Militară Secțiunea 12/ Informatică și automatizarea conducerii trupelor, pp. 210-217, București, 1999.
- [Luc99d] Luchin M., *Clasificarea și descrierea modelelor*, A XXVIII-a sesiune de comunicări științifice cu participare internațională – cu prilejul semicenenarului/ Academia Tehnică Militară Secțiunea 12/ Informatică și automatizarea conducerii trupelor, pp. 218-223, București, 1999.
- [Luc99e] Luchin M., *Modelarea și procesul de cunoaștere*, Robotica&Management, vol.4(1), pp.25-29, ISSN 1453-2069, Reșița, 1999.
- [Luc99f] Luchin M., *Stadiul actual. Referat doctorat nr.1*, Timișoara, 1999.
- [Luc99g] Luchin M., *Referat doctorat nr.3*, Timișoara, 1999.
- [Luc99h] Luchin M., *Tendențe actuale în abordarea Teoriei Modelării*, Robotica&Management, vol.4(1), pp.30-33, ISSN 1453-2069, Reșița, 1999.
- [Luc00a] Luchin M., *Administration of the soft package GEMOL resources*, Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, Tom 45(59), Mecanică, Timișoara, 2000.
- [Luc00b] Luchin M., *GENER section of the GEMOL integrated soft-package. General presentation*, Proceeding of The 8-th Symposium on Mechanisms and Mechanical Transmission with International Participation, MTM'2000, Timișoara, 2000.
- [Luc00c] Luchin M., *Soft package GEMOL for geometrical modeling. General presentation*, Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, Tom 45(59), Mecanică, Timișoara, 2000.
- [Luc00d] Luchin M., *Stages of the GENER work-session of the GEMOL soft-package*, Proceeding of The 8-th Symposium on Mechanisms and Mechanical Transmission with International Participation, MTM'2000, Timișoara, 2000.
- [Luc00e] Luchin M., *Structure of the soft package GEMOL for geometrical modeling*, Proceeding of The 8-th Symposium on Mechanisms and Mechanical Transmission with International Participation, MTM'2000, Timișoara, 2000.
- [Luc00f] Luchin M., *Work-sessions of the GEMOL soft package*, Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, Tom 45(59), Mecanică, Timișoara, 2000.
- [Luc00g] Luchin M., *Forme utilizabile ale modelului matematic care descrie aplicațiile de tip "contact-task"* Al XV-lea Simpozion Național cu Participare Internațională "ROBOTICĂ 2000", Oradea, 2000
- [Luc01a] Luchin M., Mărgineanu D. T., *Determinarea variației parametrului-amortizare a unui modul-interfață inteligent*, Lucrările științifice ale Simpozionului Internațional "Universitaria Ropet 2001/Inginerie Mecanică, Partea I, vol.2, pag.203-206, ISBN 973-85398-5-4, Editura Focus, Petroșani, 2001.

- [Luc01b] Luchin M., *Soluția constructivă a standului pentru investigarea aplicațiilor "contact-task"*, Lucrările științifice ale Simpozionului Internațional "Universitaria Ropet 2001/Inginerie Mecanică, Partea I, vol.2, pag.245-248, ISBN 973-85398-5-4, Editura Focus, Petroșani, 2001.
- [Man93] Mandal N., Payandeh S., *Experimental Evaluation of the Importance of Compliance for Robotic Impact Control*, Proceedings of IEEE Control Application Conference, 1993.
- [Man95] Mandal N., Payandeh S., *Control Strategies for Robotic Contact Tasks: An Experimental Study*, Journal of Robotic Systems, **12** (1), pp. 67-92, 1995.
- [Man97] Maniu I., Dolga V., *Aționarea roboților industriali și a manipuloarelor*, volum I, Editura MIRTON, Timișoara, 1997.
- [Map86] Maples J.A., Becker J.J., *Experiments in force control of robotic manipulators*, Proceeding of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, CA, pp. 695-703, S. Francisco, 1986.
- [Mar87] Marinescu Gh., ș.a., *Probleme de analiză numerică rezolvate cu calculatorul*, Editura Academiei R.S.R., București, 1987.
- [Mar93] Marth J., Tarn T. J., Bejczy A. K., *Stable Phase Transition Control for Robot Arm Motion*, Proceeding of International Conference on Robotics and Automation, pp. 355-362, 1993.
- [Mas78] Mason T.M., *Master's Thesis*, Massachusetts Institute of Technology, MA, Cambridge, 1978.
- [Mas79] Mason T.M., (*M.s. Thesis with revisions*) {TR 515}, M.I.T. Artificial Intelligence Lab., 1979.
- [Mas81] Mason T.M., *Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators*, IEEE Trans.on Systems, Man. and Cybernetics, **SMC-11**, 418-432, 1981.
- [Mat94] \*\*\*, *Simulink. User's Guide*, The Mathworks Inc., London, 1994.
- [McC88] McClamroch N.H., Wang D., *Feedback stabilization and tracking of constrained robots*, IEEE Transaction on Automatic Control **33** (5), 419-426, 1988.
- [McG92] \*\*\*, *Mc Graw-Hill Encyclopedia of Science&Technology*, vol. 9, 7-th Edition, Mc.Graw-Hill Inc., New York, St. Louis,..., Toronto, 1992.
- [Mer90] Merlet, J.P., *Les robots paralleles*, Ed. Hermes, Paris, 1990.
- [Mil93] Mills J., Lokhorst D., *Control of Robotic Manipulators During General Task Execution: A Discontinuous Control Approach* International Journal of Robotics Research, **12** (2), pp. 146-163, 1993.
- [Mol96] Moldoveanu F., Racoviță Z. ș.a., *Grafica pe calculator*, Editura Teora, București, 1996.
- [Mur96] Mureșan T., Gontean A., Băbăiță M., Demian P., *Circuite integrate numerice. Aplicații*, Editura de Vest, Timișoara, 1996.
- [Nic72] Nicolau E., Popovici Al., *Introducere în cibernetica sistemelor continue*, Editura Tehnică, București, 1972.
- [Nic77] Nicolau E., *Analogie, modelare, simulare. cibernetică*, Editura științifică și enciclopedică, București 1977.
- [Nic80] Nicolau E., *Geneza și dezvoltarea unei discipline contemporane: Teoria Sistemelor*, Revista Forum, **4**, pp. 70-75, București, 1980.
- [Nic81] Nicolau E., *Modelarea ca știință*, Editura științifică și enciclopedică,



- București, 1981.
- [Ohn83] Ohno Y., *A hidden line elimination method for curved surfaces*, Computer Aided Design, **15** pp. 209-216, 1983.
- [Par87] Parker J. K., Paul F. W., *Controlling the Impact Forces in Pneumatic Robot Hand Design*, Transaction of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, **109**, pp. 328-334, 1987.\*
- [Pat96] Patyra M. J., Mlynek D.M., *Fuzzy-logic: implemenation and aplications*, John Willey and sons, New York, 1996.
- [Pay91] Payandeh S., Goldenberg A., *A robust Force Controller: Theory and xperiments*, Proceedings Eof IEEE Robotics and Automation Conference, 1991.
- [Pay92] Payandeh S., *Causality and Robotic Contact Task Problems*, Transaction of IEEE, Journal of Systems, Man and Cybernetics, **22(5)**, 1992.
- [Pay93] Payandeh S., *Loop Gain Definition in a Robust Force Control Problem*, Proceeding of American Control Conference, pp.2499-2503, 1993.
- [Pay96] Payandeh S., *A Method for Controlling Robotic Contact Tasks*, Robotica, **14**, pp.281-288, 1996.
- [Pen71] Penescu C. ș.a., *Identificarea experimentală a proceselor automatizate*, Editura Tehnică, București, 1971.
- [PEN97] \*\*\*, *Helix Design System Microcadam Inc.*, Penton Publishing Inc., Cleveland, Ohio/USA, 1997.
- [Pet98a] Peterson M. T., 3Dstudio MAX. Fundamente, Editura Teora, București, 1998.
- [Pet98b] Petrișor E., *Generarea curbelor și suprafețelor pentru proiectarea asistată de calculator*, Note curs, Timișoara, 1998.
- [Pet01] Petrișor E., *Modelarea geometrică algoritmică*, Editura Tehnică, București, 2001.
- [Pli90] Plitea N., *Kinematische Synthese von verzweigten raumlichen Getrieben mit Sechspunktführung der Industrieroboter mit sechs Freiheitsgraden*, Typ.II Bul. ȘT., Univ. Baia Mare, 1990.
- [Pli91] Plitea N., *Kinematische Synthese von verzweigten raumlichen Getrieben mit Sechspunktführung der Industrieroboter mit sechs Freiheitsgraden*, Typ.II Bul. ȘT. Lucrările celui de-al 10-lea Simpozion National de Robotică, București 1991.
- [POL97] \*\*\*, *Protocol la Contractul de cercetare*, nr. 666/1996/B3, și respectiv A9/Anexa 1/1997, încheiat între Politehnica Timișoara și Ministerul Cercetării Tehnico-științifice, 1997.
- [POL00] \*\*\*, *Protocol la Contractul de cercetare ANS11*, Gr. 6153-Tema 27/2000 încheiat între Politehnica Timișoara și Ministerul Educației și Cercetării, 1997.
- [Pot97] Potkonjak V., Vukobratović M., *Dynamics of free and constrained motion of robots and robotized systems. Part 2: Dynamics of robots and robotized systems*, Naucinie, tehnicieskie i ekonomiceskie problemî, pp.5-14, Moskva, 1997.
- [Pre97] Preitl ș., Precup R.E., *Introducere în conducerea Fuzzy a proceselor*, Editura Tehnică, București, 1997.
- [Pre01] Preumont A., *Active vibration control*, Conference on "Responsive Systems for Active Vibration Control", NATO Advanced Study Institute,

- Brussels, Belgium, sept. 2001.
- [Răd81] Rădăceanu E., *Limbaje de simulare*, Editura Militară, București, 1981.
- [Rad79] Radeș M., *Metode dinamice pentru identificarea sistemelor mecanice*, Editura Academiei R.S.R., București, 1979.
- [Rai81] Raibert M.H., Craig J.J., *Hybrid Position/Force Control of Manipulators*, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 102 (3), 126-133, june 1981.
- [Reb91] Reboulet C., *Robots paralleles*, Technique de la Robotique, Ed. Hermes, Paris, 1991.
- [Ris91] Risler J. J., *Méthodes Mathématiques pour la CAO*, Masson, Paris, 1991.
- [Rob67] Robinson A., *Introduction to model theory and to the metamathematics of algebra*, Firsth edition: North- Holland P.C./Second in Russian translation: Izdatelstvo Nauka, Amsterdam, 1963/Moskva 1967.
- [Rom88] Roman D., Lustig A., Stănescu C., *Algoritmi de automatizare a proiectării*, Editura Militară, București, 1988.
- [Roș66] Roșculeț Marcel, *Analiză matematică*, Volumul al II<sup>lea</sup>, Editura Tehnică, București 1966.
- [Rot84] Roth B., *The First Int. Symp., Robotics Research*, (Brady, M. and Paul, R.P. eds) pp. 679-693, MIT Press Cambridge, Mass., 1984.
- [Saf99] Saftencu D., *Stadiul actual. Referat doctorat nr. 1*, Timișoara, 1999.
- [Sam66] Samal E., *Tehnica reglării*, Editura Tehnică, București, 1966.
- [Sav80] Savii G., *Elemente de calculatoare și programare*, Lito I.P. "Traian Vuia", Timișoara, 1980.
- [Sav97] Savii G., *Bazele proiectării asistate de calculator. CAD*, Editura Mirton, Timișoara, 1997.
- [Sav97] Savii G., *Grafică 3D pe calculatoare PC*, Presa Universitară Română, Timișoara, 1997.
- [Sav00] Savii G., Luchin M., *Modelare și Simulare*, I.S.B.N. 973-8027-59-4, Editura Eurostampa, Timișoara, 2000.
- [Shi69] Shinskey F.G., *Practica sistemelor de reglare automată*, Editura Tehnică, București, 1969.
- [Shi97] Shinskey F.G., *Process-Control Systems. Application. Design. Adjustment*, Mc Graw-Hill Book Company, NY,..., Sydney, 1997.
- [Sim87] Sima V., Varga A., *Practica optimizării asistată de calculator*, Editura Tehnică, București, 1987.
- [Sme95] Smeureanu I., Odăgescu I. ș.a., *Grafică interactivă pe calculatoare personale*, Editura Militară, București, 1995.
- [Sto90a] Stokić D., *Position force control of industrial robots: Implementation problems, Report*, The Fraunhofer Institute, IPK, Berlin, Sept. 1990.
- [Sto90b] Stokić D., Šurdilović D., *Simulation and control of roboting deburring*, *Int. J. Robot. Autom.*, 5 (3), pp.107-115, 1990.
- [Sto91] Stokić D., *Constrained motion control of manipulation robots A contribution*, *Robotica* 9, 157-163, 1991.
- [Stö01] Stöbener U., *Active vibration control of a car body based on experimental evaluated modal parameters*, Conference on "Responsive Systems for Active Vibration Control", NATO Advanced Study Institute, Brussels, Belgium, sept. 2001.
- [Tak96] Takeuchi H., Tani K., *Development of "MELHORS"*, Proc. I.C. Advanced Robotics, Viena 1996.

- [TEO98] \*\*\*, *Autocad 14. Secrete Autocad*, Editura Teora, București, 1998.
- [Ter80] Terișco M., Stoica P., *Identificarea și estimarea parametrilor sistemelor*, Editura Academiei R.S.R., București, 1980.
- [Ter87] Terișco M., Stoica P., Popescu Th., *Identificarea asistată de calculator a sistemelor*, Editura Tehnică, București, 1987.
- [Tod85] Todd D.J., *A Novel Steering Mechanism for Legged Robots. In Robots and Automated Manufacture*, Billingsley J. Ed. P., Exeter, 1985.
- [Tri99] Tripe V., Teză de doctorat, Universitatea "Politehnica" din Timișoara, 1999.
- [VDI99] VDI-Z, *Integrierte Produktion*, ISSN 0931-864X, Springer VDI Verlag-GmbH, Dusseldorf, 1999.
- [Ven72] Venikov. V. A., *Aplicarea teoriei similitudinii și modelării în lectroenergetică*, Editura eTehnică, București, 1972.
- [Vla92] Vlada M., Nistor I., Posea C., Constantinescu C., *Grafică pe calculator în limbajele Pascal și C/ Implementare*, vol. I, Editura Tehnică, București, 1992.
- [Vla92b] Vlada M.; Nistor I., Posea C., Constantinescu C., *Grafică pe calculator în limbajele Pascal și C/ Implementare și aplicații*, vol. II, Editura Tehnică, București, 1992.
- [Voi80] Voicu M., *Teoria sistemelor, vol I și II*, Litografia Institutului Politehnic, Iași, 1980.
- [Voi93] Voicu M., *Sisteme automate multivariabile*, Editura Gh. Asachi, Iași, 1993.
- [Vol89] Volpe R., Khosla P., *Experimental Verification of Strategy for Impact Control*, Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1854-1860, 1989.
- [Vol93] Volpe R., Khosla P., *A Theoretical and Experimental Investigation of Impact Control for Manipulators*, International Journal of Robotics Research, 12, pp. 351-365, 1993.
- [Vuk85a] Vukobratović M., Stokić D., Kirčanski N., *Non-Adaptive Control of Manipulation Robots*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokio, 1985.
- [Vuk85b] Vukobratović M., Tuneski A., *IEEE Trans. on Industrial Electronics, Special Section on Robotic Applications*, 1985.
- [Vuk90] Vukobratović M., și alții, *Biped Locomotion*, Scientific Fundamentals of Robotics, Springer - Verlag, 1990.
- [Vuk93a] Vukobratović M., Ekalo Y., *Unified approach to control laws synthesis for robotic manipulators in contact with dynamic environment*, in *Tutorial S5: Force and Contact Control in Robotic System*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, GA, pp. 213-229, Atlanta, 1993.
- [Vuk93b] Vukobratović M., Šurdilović D., *Control of robotic systems in contact-task: An overview. Tutorial S5: A Historical Perspective and Current Technologies*, Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (in Force and Contact Control in Robotics Systems), GA, pp. 13-32, Atlanta, May 1993.
- [Vuk94a] Vukobratović M., Stojić R., Ekalo Y., submitted to *Automatica the J. of IFAC*, 1994.
- [Vuk94b] Vukobratović M., Tuneski, A., *Contribution to the stability analysis of*

- robotic manipulators in contact with environment (in russian)*, Technical Cybernetics, 1994.
- [Vuk94c] Vukobratović M., Tuneski A., *Contact Control Concepts in Manipulation Robotics-An Overview*, IEEE Transaction on Industrial Electronics, **41** (1), pp. 12-22, Feb 1994.
- [Vuk94d] Vukobratovic M., Tuneski A., *Contact Control Concepts in Manipulation Robotics- on Overview*, IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol **41** (nr.1) /Febr. 1994.
- [Vuk95a] Vukobratović M., *Active dynamic systems and structures interacting with dynamic environment*, written dissertation at the occasion on the "Doctor Honoris Causa" title awarding ceremony-University "Politehnica", Timișoara, Romania, 1995.
- [Vuk95b] Vukobratović M., Ekalo Y., *submitted to ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 1995.
- [Vuk95c] Vukobratović M., Rodić R., *Historical perspective of hybrid control in robotics: beginnings, evolution, criticism and trends*, Mech. Mach. Theory, vol. 30 No.4, pp 519-532, Elsevier Science Ltd., Pergamon Press, U.K., 1995.
- [Vuk95d] Vukobratović M., Rodić A., *Control of Manipulation Robots Interacting with Dynamic Environment: Implementation and experiments*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, **42**, (4), Aug. 1995.
- [Vuk95e] Vukobratović M., Stojić R., *Historical Perspective of Hybrid Control in Robotics: Beginnings, Evolution, Criticism and Trends*, Mechanism and Machine Theory, **30**, pp. 519-532, Pergamon Press, 1995.
- [Vuk96] Vukobratović M., *Adaptive Control of Single Rigid Robotic Manipulators Interacting with Dynamic Environment – An Overview*, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Theory&Applications, **17**, pp.1-30, Kluwer Ac.P., 1996.
- [Vuk97a] Vukobratović M., *How to Control Robots Interacting with Dynamic Environment*, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Theory&Applications, **19**, pp. 119-152, ISSN 0921-0296, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1997.
- [Vuk97b] Vukobratović M., Potkonjak V., *Dynamics of free and constrained motion of robots and robotized systems. Part 1 General Approach to System Dynamics and Coupling of Subsystems*, Naucinîe, tehničke i ekonomičke probleme, pp.3-10, Moskva, 1997.
- [Vuk97c] Vukobratović M., *The Role of Environment Dynamics in Contact Force Control of Manipulation Robots*, submitted to ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, pp. 86-89, **119**, 1997.
- [Vuk98a] Vukobratović M., Matijević V., Potkonjak V., *Control of Robots with Elastic Joints Interacting with Dynamic Environment*, Journal of Intelligent and Robotic Systems, **23**, pp.87-100, Kluwer Ac.P., 1998.
- [Vuk98b] Vukobratović M., Tuneski A., *Mathematical Model of Multiple Manipulators: Cooperative Compliant Manipulation on Dynamical Environments*, Mechanism and Machine Theory, **33**, pp. 1211-1239, 1998.
- [Wad01] Wada B., *Overview of adaptive structures*, Conference on "Responsive Systems for Active Vibration Control", NATO Advanced Study Institute, Brussels, Belgium, sept. 2001.

## BIBLIOGRAFIE

---

- [Wes85a] West H., Asada H., *A method for the design of hybrid position/force controllers for manipulators constrained by contact with the environment*, Proceeding IEEE International Conference on Robotics Automation, **MO**, pp. 251-259, St. Luis, 1985.
- [Wes85b] West H., Asada H., *Robotic and Manufacturing Automation* (M. Donath and M. Leu, eds) ASME Winter Annual meeting, Miami, 1985.
- [Yan96] Yano T., și alții, *Development of Wall Climbing. Robot II with Scanning Type Suction Cups*, Proc I.C. Advanced Robotics, Vienna, 1996.
- [Yos86] Yoshikawa T., in *Proceeding IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, S. Francisco, C.A., pp.1393-1398, 1986.
- [You89] Youcef-Toumi K., Gutz D. A., *Impact and Force Control*, Proceeding of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 410-416, 1989.
- [Zha89] Zhang H., *Kinematic stability of robot manipulators under force control*, Proceeding IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, **AZ**, pp. 80-85, Scottsdale, 1989.

## Prefață

Demersul de cercetare prezentat în lucrarea de doctorat s-a înscris în mod natural în sfera preocupărilor existente în cadrul Departamentului de Mecatronică al Facultății de Mecanică de la Universitatea “Politehnica” din Timișoara, precum și a Colectivului Multidisciplinar de Robotică de la aceeași universitate. Interesul doctorandului – subsemnatul ing. Milenco Luchin, membru al celor două colective - pentru fenomenul interacțiunii sistemelor dinamice cu mediul înconjurător a fost impulsionat în mod hotărâtor de conducătorul acestui Colectiv (precum și al fostei Catedre de Organe de Mașini și Mecanisme, precursora Departamentului menționat), domnul profesor dr. ing. Francisc V. Kovacs, președinte de onoare al Asociației Române de Robotică. Pe lângă remarcabila competență în domeniu, Domnia sa a avut și intuiția să întrevadă spații neexplorate în problematica tratată, larg deschise cercetării, spre care a direcționat, în calitate de conducător științific, munca doctorandului. În acest context, trebuie relevat faptul că pentru merite deosebite în dezvoltarea roboticii românești, Universitatea din Craiova a conferit în anul 1999 Domniei sale titlul de Doctor Honoris Causa al acestei prestigioase instituții de învățământ.

Asupra problematicii interacțiunii sistemelor dinamice cu mediul înconjurător s-a aplecat în mod deosebit și o altă personalitate remarcabilă a roboticii: d-ul prof. dr. ing. Miomir Vukobratović, purtător al distincției “Engelberger Robotics Award”, deschizând noi căi de rezolvare a problemelor din context, dând o nouă interpretare fenomenului, definindu-l astfel într-o nouă modalitate. Chiar denumirea încetățenită: cea de aplicații de tip “contact-task”, îi aparține. Personalitatea d-ului prof. Vukobratović și modul în care a colaborat cu Universitatea noastră a determinat o recunoaștere deosebită din partea acesteia: conferirea – în anul 1995 – a titlului de Doctor Honoris Causa al “Politehnicii” din Timișoara.

Colaborarea celor doi distinși profesori a evidențiat aspecte care merită a fi aprofundate, aspecte pe care a încercat să le studieze și autorul prezentei lucrări. Preocupările în domeniu care au urmat s-au înscris într-un context de investigare mai larg, făcând și obiectul unui contract de cercetare dintre Universitatea “Politehnica” din Timișoara și Ministerul Cercetării Tehnico-Științifice: nr. 666/1996, din păcate, neonorat de către beneficiar în totalitate (din punct de vedere financiar) pe măsura necesităților inițial evaluate. La activitățile desfășurate în cadrul acestui contract, sub îndrumarea domnului profesor dr. ing. Francisc V. Kovacs, au participat mai mulți membri ai Colectivului Multidisciplinar de Robotică. Cel mai mult s-au implicat: d-ul prof. dr. ing. Ivan Bogdanov (de la Facultatea de Automatică și Telecomunicații), d-ul prof. dr. ing. Valer Dolga și d-ul prof. dr. ing. Inocențiu Maniu precum și alți colegi. Majoritatea acestora fiind cadre didactice la Departamentul de Mecatronică, sprijinul

## PREFAȚĂ

---

șefului de catedră (respectiv al directorului de departament), atât în mandatul domnului prof. dr. ing. Dan Perju cât și în cel al domnului prof. dr. ing Inocențiu Maniu a fost necondiționat. Trebuie menționat că la aceste activități au participat și studenții precum și cursanții studiilor de masterat ai Facultății de Mecanică, de la secțiile tutelate de Catedră/Departament, prin lucrările de diplomă și disertație. Responsabil de contract a fost autorul prezentei lucrări. În același context, în anul 2000 a fost obținută o finanțare suplimentară prin grantul ANSTI nr. 6153, tema 27, pentru studenți și absolvenți, cadrul didactic responsabil fiind deasemenea autorul lucrării de doctorat.

Sunt dator a aduce mulțumiri cu totul deosebite domnului profesor dr. ing. Francisc V. Kovacs pentru ajutorul, de excepțională competență, acordat subsemnatului, atât în timpul elaborării lucrării de doctorat cât și în general, în tot timpul evoluției mele profesionale.

Sunt dator a menționa deasemenea sprijinul colegilor de la colectivul de mecatronică (actualmente Catedra de Mecatronică) din cadrul Departamentului - cu o mențiune aparte pentru domnul prof. dr. ing. George Savii - pe tot parcursul elaborării tezei de doctorat și pentru domnii: conf. dr. ing. Aurel Diaconu și drd. ing. Ciupe Valentin la partea experimentală.

# 1. Introducere

## 1.1 Preliminarii

Am părăsit de puțin timp secolul 20. Au existat foarte multe încercări de caracterizare a acestuia din punctul de vedere al culturii și civilizației umane precum și încercări de evidențiere a diferențierilor față de secolele precedente. Încercări ale filozofilor, istoricilor, literaților, oamenilor de știință... Au fost exprimate foarte multe puncte de vedere vizând diferite aspecte particulare din cele mai variate domenii (aspecte care relevă interconexiunea diverselor domenii de activitate umană) sau puncte de vedere la nivel global. Sunt convins însă că dacă cineva ar încerca să analizeze măsura în care părerile exprimate în acest sens coincid, s-ar găsi mult mai multe divergențe de opinie decât un consens al lor. Probabil însă că există o cvasi-unanimitate în ceea ce privește constatarea unei dinamici (și viteze) deosebite de desfășurare a evenimentelor și schimbărilor, respectiv recunoașterea dinamicii și rapidității deosebite cu care evoluează cunoașterea umană în toate domeniile.

Un exemplu elocvent în acest sens îl poate constitui noțiunea de *robot*. Evoluția acesteia poate fi analizată atât din punctul de vedere al semnificației termenului propriu-zis de robot, cât și din cel al conținutului modern al conceptului de *robot industrial*.

## 1.2 Semnificația termenilor și conținutul conceptelor de robot și robotică

La origine termenul de robot provine de la cuvântul “robota” care avea (și are) semnificația (universală) de “muncă” în limba rusă. Evoluția termenului însă devine deosebit de interesantă prin prisma limbii cehe în care acesta avea și semnificația (la origine probabil medievală!) de “corvoadă”. Aceasta până în anul 1923 când dramaturgul ceh Karel Čapek îl lansează într-o piesă de teatru sub forma ușor modificată: “robot” pentru a desemna entități humanoide *artificiale* capabile să desfășoare diferite *activități*. Termenul, în această accepțiune, este apoi preluat de toți autorii de literatură science-fiction. Unul dintre cei mai prestigioși în domeniu, Isaac Asimov, inventează termenul asociat de “robotică”, drept știință care se ocupă cu studiul (și respectiv mai apoi cu implementarea în practică a) roboților, enunțând în 1942 și cele trei (celebre și arhicunoscute) legi fundamentale ale roboticii pe care trebuie să le respecte entitățile “robot” în relațiile lor cu ființele umane.



Datorită - probabil – faptului că și în realitate anumite sisteme tehnice ușurează în ultimă instanță munca oamenilor, iar roboții sunt prin definiție, concepuți pentru a prelua *activități specifice oamenilor*, termenul de robot a migrat aproape natural spre domeniul tehnic, unde prima încercare de realizare datează încă din anul 1938, bineînțeles... sub formă antropomorfă autorul fiind inginerul Wensley din S.U.Ă.

Din anul 1940 însă, forma antropomorfă nu mai este definitorie pentru domeniul tehnic. Pentru că prin apariția primelor manipuloare sincrone pentru manevrarea substanțelor radioactive în laboratoarele nucleare din Franța și apoi S.U.Ă., accentul cade pe desfășurarea de *activități humanoide*. Majoritatea acestora sunt activități industriale astfel că... apare termenul și conceptul de *robot industrial*, fără de care avansul *tehnologic* aducător de progres nu a fost și nu este posibil. Dezvoltarea roboților industriali – *sisteme de concepție multidisciplinară prin excelență* - nu ar fi fost posibilă fără apariția sistemelor de calcul electronice.

Începutul evoluției spectaculoase a roboților industriali propriu-ziși poate fi considerat anul 1959 când Joseph Engelberger (e drept, pe baza unui brevet din 1956 al lui George Devol) construiește primul robot programabil “adevărat”, robotul UNIMATE, care a dat și numele primei companii producătoare de roboți. În competiția care a urmat s-au angajat foarte mulți producători, lansând pe piață denumiri celebre de roboți - a căror performanțe cresc an de an - ca: VERSATRAN, TRALFFA, VICARM, T3/HT3, PUMA, SCARA, ASEA, ș.a. Performanțele cresc nu numai drept urmare a dezvoltării structurilor mecanice, ci și prin indispensabila legătură cu dezvoltarea și implementarea sistemelor electronice de calcul. Începând cu anul 1968, Japonia concurează foarte serios (și apoi depășește prin număr de unități instalate) S.U.Ă., căreia îi revin însă meritele începuturilor. De la mijlocul anilor optzeci, roboții industriali devin tot mai des părți integrate ale sistemelor flexibile de fabricație.

La ora actuală nici nu se mai poate concepe civilizația umană fără roboți industriali, iar futurologii consideră drept indispensabilă prezența acestora în evoluția omului spre stele în etapele viitoare ale erei spațiale (începută în acest secol de referință, 20) pe care – mai mult ca sigur – ființa umană le va parcurge. În aproape toate lucrările de futurologie, pe lângă roboții industriali, prezența roboților *antropomorfi* este subînțeleasă.

Iată deci o evoluție spectaculoasă a termenului de robot: în mai puțin de un secol, de la o *semnificație medievală*, la *era spațială*!

În ceea ce privește **conceptul** de robot, se poate afirma că acesta a urmat o evoluție în “spirală”:

- a pornit de la analogia cu cele prezentate în literatura științifico-fantastică printr-o definire implicită tip “science fiction” în care aspectul antropomorfic era subînțeles,
- a trecut prin faza “mai pământeană” a unor aplicații cât se poate de concrete a căror arie s-a lărgit neconținut (timp în care s-a generalizat cuplarea celui de-al doilea termen în sintagma “robot industrial” pentru a-l diferenția de contextul ficțiunii, cel al “oamenilor artificiali”, cu care – *se sublinia astfel* - nu are nimic în comun) și în cele din urmă,
- a ajuns să înglobeze – la un alt nivel – și aspectul antropomorfic impus (nu numai din punctul de vedere al aspectului fizic) prin unele cerințe din anumite domenii (serviciile nefiind singurul domeniu în care apare necesitatea implementării unora din caracteristicile de acest gen) dar mai ales prin *modul în care este implicată inteligența artificială*.

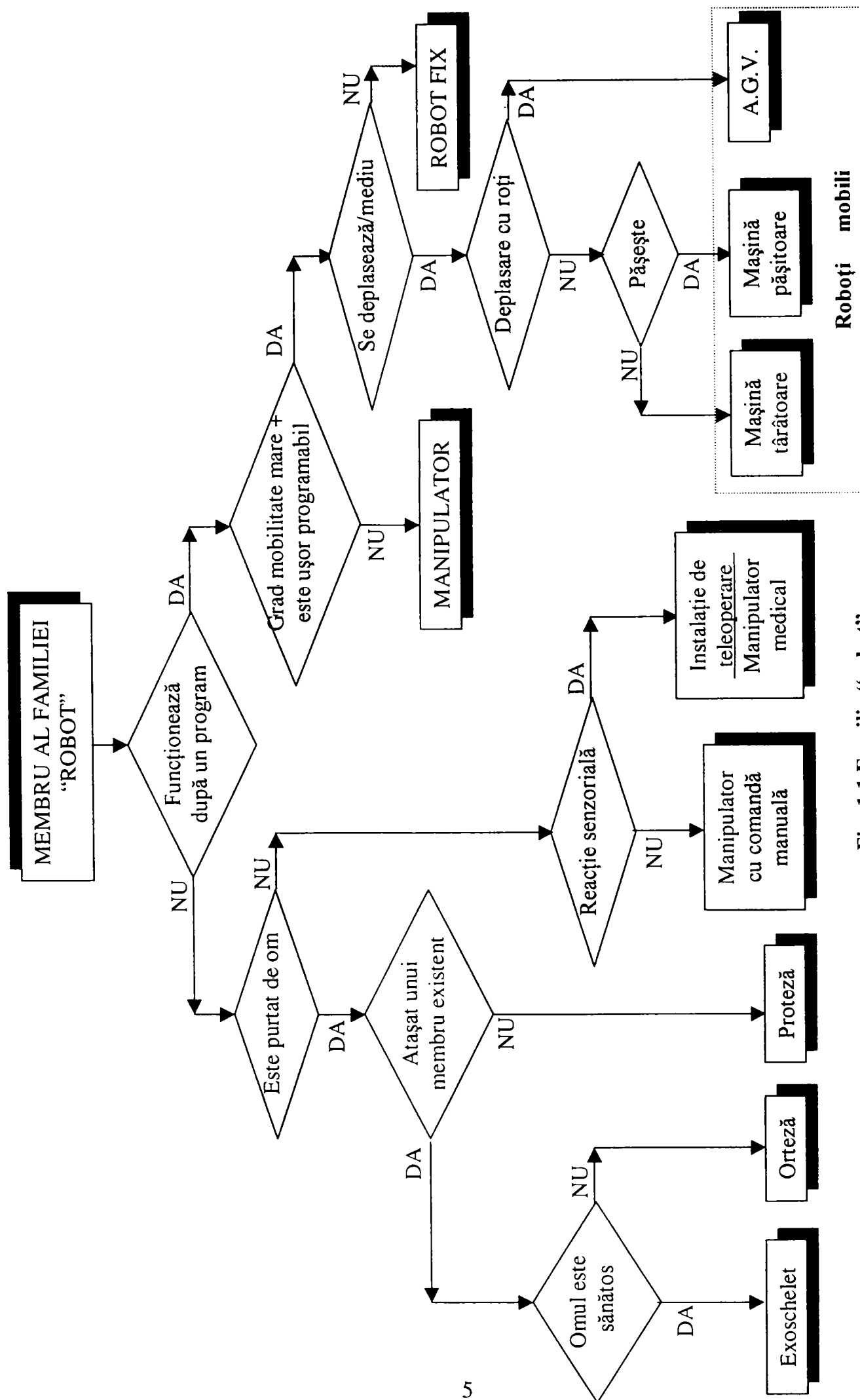


Fig. 1.1 Familia "robot"

La ora actuală se utilizează mai multe definiții pentru conceptul de robot. Cele mai cunoscute și utilizate sunt cele emise de Robot Institute of America (R.I.A.), British Robot Association (B.R.A.), apoi Standardul Francez – (Normalisation française: N.F.), Normele germane (DIN) și cele japoneze, respectiv normele ISO.

Fiecare din aceste definiții pune accentul pe anumite aspecte ale activităților pe care le desfășoară roboții, pe structura lor, respectiv pe modalitatea în care se realizează conducerea acestora și necesită definirea suplimentară a unor concepte conexe/adiacente. În ultimul timp se utilizează tot mai mult și caracterizarea roboților prin includerea în diferite categorii de clasificare. Spre exemplu, clasificarea după diferite domenii industriale a fost realizată în conformitate cu Standardul internațional de clasificare al activităților economice (ISIC), cea după domeniile de activitate conform cu standardul emis de International Federation of Robotics (IFR), acest organism realizând și o clasificare a tipurilor de roboți după structura mecanică/spațiul de lucru și respectiv după modalitatea de conducere a acestora.

Una din cele mai complete încercări de definire a roboților ar putea consta dintr-o definire structurată, prin alăturarea definiției propriu-zise a robotului [Kov98a] și a definiției membrilor familiei “robot” [Kov97a]:

- Robotul este un sistem mecanic mobil condus după un program, capabil să execute automat operații pe care le efectuează omul, folosindu-și mâna și brațul, sub supravegherea ochilor, coordonarea mână-ochi realizându-se de creier. Asemenea operații se definesc drept operații de manipulare. Robotul are în componența sa cel puțin un mecanism articulat.
- Denumirea de robot se aplică unei familii de echipamente din care mai fac parte: manipolatoarele, instalațiile de teleoperare, protezele/ortezele, manipolatoarele medicale, exoscheletele amplificatoare, mașinile pășitoare, mașinile târătoare etc. Definirea sintetică a familiei robot este prezentată foarte sugestiv prin graful din figura 1.1.

O astfel de structurare,

- ◇ respectă filiația inițială privind caracteristicile antropomorfe;
- ◇ realizează totodată un anumit tip de clasificare dependent de:
  - ◆ modul în care se cere sistemului (în totalitate sau parțial) îndeplinirea funcțiilor sale definatorii și chiar;
  - ◆ modul în care interacționează cu mediul;
- ◇ oferă o perspectivă asupra lărgirii extraordinare a domeniilor de utilizare și aplicabilitate a roboților industriali.

## ***1.3 Tendințe actuale în dezvoltarea roboticii. Conceptul de robotică avansată***

Din punctul de vedere al tendințelor, cuvintele cheie care ar putea caracteriza dezvoltarea roboticii în general la ora actuală pot fi *diversificare, generalizare și dinamică*. Generalizarea utilizării roboților industriali în domeniile “tradiționale”, diversificarea implementării roboticii în toate aspectele ce vizează civilizația umană și extraordinara dinamică a ceea ce se numește piață a roboților industriali (atât ca cerințe cât și ca răspândire geografică) *dinamică definatorie și pentru alte aspecte ale civilizației secolului 20*. Ilustrative pentru această caracteristică sunt statisticile periodice publicate la nivel mondial sub egida ONU (a se vedea [IFR99a]). Conform acestora, numărul unităților de tip “robot” instalate anual depășește cifra de 70.000 (în

perioada de după 1995), “cei șase mari” (Japonia, S.U.A., Germania, Italia, Franța și Marea Britanie) având semnificativ cea mai mare pondere în acest sens. Între 1990 și 1998, numărul de unități operaționale pe plan mondial aproape că s-a dublat, iar pentru anul 2002 se estimează că totalul se va situa în apropierea cifrei de 800.000.

Se remarcă îndeosebi în ultima perioadă o migrație a roboților spre *sfera serviciilor* și a altor *domenii neindustriale* și implicarea tot mai pronunțată a *inteligenței artificiale* în robotică. O revenire, pe calea progresului tehnic real legat de cerințele pieței, la conținutul inițial al conceptului de robot la care “visau” cei care scriau ficțiune, conținut legat de *activitățile humanoide*, și – concomitent - o eliberare de obligativitatea utilizării celui de-al doilea termen al sintagmei “roboți industriali” pentru astfel de sisteme tehnice. Trebuie deci accentuată o altă caracteristică a dezvoltării roboticii la acest sfârșit de secol: cerințele pieții direcționează și impulsionează domeniile cercetării științifice prin simplul fapt că pentru domeniile la care există piață, finanțarea este asigurată.

Este interesantă în acest sens o analiză a acestor domenii prin prisma secțiunilor de interes major din cadrul diferitelor manifestări științifice (se pot consulta spre exemplu manifestările științifice din ultimul timp, organizate sub egida O.N.U.: [IWB97], [IFR99], [INT99], respectiv programul simpozionului International Symposium on Robotics, ISR 2000). Astfel, pe lângă aspectele moderne ale preocupărilor “clasice” referitoare la proiectarea structurii roboților, la cinematică/cinetostatică/dinamică și precizie, la senzori și acționari, la conducerea inteligentă a roboților (cu implicarea inteligenței artificiale și a tehnicilor fuzzy), se tratează masiv probleme din sfera sistemelor flexibile de fabricație, a roboților paraleli, a planificării roboților, ale interacțiunii cu mediul și probleme din sfera serviciilor. Se prevede că în perioada următoare cea mai mare dinamică de dezvoltare o va cunoaște acest ultim domeniu specificat: excluzând roboții de curățenie sub vacuum, estimările privind numărul de unități instalate pentru anul 2002 prevăd o creștere cu cca 500% față de stocul existent în anul 1998, numărul total atingând cifra de 23.600. Din această arie de cuprindere, se evidențiază cerințele din medicină și din industria alimentară.

Pe de altă parte, dominante la acest început de secol (și mileniu) pentru sfera roboticii par a fi următoarele:

- ◇ un pronunțat caracter multi-disciplinar (rămas drept “moștenire” din perioada “clasică” a dezvoltării roboticii);
- ◇ o semnificativă întrepătrundere cu sfera mecatronicii și a producției, concepte mai noi în știința și tehnica contemporană;
- ◇ generalizarea metodelor de modelare și simulare în robotică, generalizare posibilă prin:
- ◇ utilizarea masivă a celor mai noi mijloace hard&soft de tehnică de calcul, cu implicarea inteligenței artificiale și a realității virtuale, pe lângă mijloacele clasice aflate în proces continuu de îmbunătățire, sub interfețe grafice, mijloace la rândul lor din ce în ce mai performante;
- ◇ desfășurarea dezvoltării științifice în robotică îndeosebi pe două căi: cea a dezvoltării sistemelor de conducere și cea a dezvoltării aplicațiilor, în strânsă legătură cu cerințele pieții.

Toate aceste caracteristici, consecințe a tendințelor spre performanțe superioare din toate punctele de vedere, au condus la apariția sitagmei “*robotică avansată*”, concept care cuprinde toate preocupările contemporane din robotică incluzând aceste caracteristici prin definiție. După cum se poate observa în referințele de la paragrafele anterioare, chiar manifestările științifice de robotică au loc sub semnul acestei sintagme.

Se poate observa deasemenea că există tot mai multe preocupări privind studiul implicațiilor - în plan educațional și în plan social – pe care le aduce implementarea sistemelor de robotică avansată.

### ***1.4 Robotica românească***

În ceea ce privește locul roboticii românești în evoluția generală a acesteia, se poate afirma că - *având în vedere condițiile de izolare în care au lucrat specialiștii români înainte de căderea comunismului* – după un “demaraj” greu, în anii optzeci, cercetările teoretice au evoluat destul de spectaculos. Se disting în acea perioadă de pionierat lucrările unor distinși cercetători și profesori de la București, Cluj și Timișoara și mai apoi din alte centre: Brașov, Iași, Craiova, Oradea. În centrul universitar Timișoara se înființează în anul 1979 Colectivul Interdisciplinar de Robotică, condus de eminentul om de știință domnul prof. dr. ing. Francisc Kovacs, în cadrul căruia, în colaborare cu uzina “Electromotor” se realizează în 1982 (prioritate națională, distinsă cu premiul Academiei Române) primul robot industrial românesc care a funcționat în cadrul unui proces de producție. Au urmat apoi realizări practice și în alte centre din România, colectivul timișorean continuând deasemenea să promoveze cu succes colaborarea știință-producție industrială. Se publică pe plan național multe lucrări din domeniul roboticii dar foarte puține lucrări au putut fi publicate peste hotare din cauze lesne de înțeles. Se organizează periodic Simpoziul Național de Robotică, cu participarea unui număr impresionant de specialiști.

După 1989, odată cu deteriorarea situației economice și cu reculul activităților industriale, posibilitățile de colaborare cu producția devin tot mai mici astfel că specialiștii din România “revin” la sfera preocupărilor teoretice, având însă la îndemână – de data aceasta - mult mai multe mijloace de informare pentru menținerea contactului cu realizările de vârf pe plan mondial. Datorită însă faptului că există posibilități de achiziție și utilizare de sisteme de calcul la cel mai înalt nivel, metodele de modelare și simulare oferă o șansă roboticii românești să “țină pasul” cu astfel de realizări, chiar dacă racordarea la cerințele unei piețe normale este îngreunată. S-a deschis deasemenea calea pentru participări la manifestările științifice internaționale în domeniu. S-a înființat Asociația Română de Robotică, al cărei actual președinte de onoare este domnul prof. dr. ing. Francisc Kovacs, după ce a fost mai mulți ani președinte în exercițiu al acesteia. Alegerea în această funcție este (și a fost) o recunoaștere a meritelor deosebite ale Domniei sale în dezvoltarea roboticii românești. Universitatea din Craiova a ținut să oficializeze și pe altă cale această recunoaștere, conferindu-i domnului prof. dr. ing. Francisc Kovacs titlul de Doctor Honoris Causa în anul 1999. Domnia Sa a susținut cu această ocazie disertația [Kov99]. Rectorul acestei universități, domnul prof. dr. ing. Mircea Ivănescu este președintele în exercițiu al Asociației Române de Robotică.

### ***1.5 Interacțiunea dinamică dintre sistemele mecanice și mediul înconjurător (aplicațiile de tip “contact-task”)-subiect de studiu în robotica avansată***

Referitor la direcțiile noi de cercetare și dezvoltare a roboticii (incluse în sfera

“roboticii avansate”), mi-aș permite să relev problematica interacțiunii sistemelor mecanice cu mediul înconjurător. În aplicațiile tehnice în general, mediul înconjurător este rareori luat în considerare drept “partener activ” de interacțiune cu sistemul mecanic aflat în studiu, influența acestuia rezumându-se de foarte multe ori la cuantificarea și aplicarea unor coeficienți de siguranță globali (în cazul influențelor atmosferice în aviație spre exemplu). În robotică, mediul înconjurător apare chiar în definiția prezentată mai sus a robotului (încă un merit al acestei definiții!), iar începând cu anii optzeci apar lucrări care tratează implicit și explicit această problematică, prin prisma modalităților de conducere a roboților. Modalități care implică parametri poziție și forță (generalizată) de interacțiune, prin definirea celor trei tipuri de conducere (“clasice”) posibile: “în forță”, “în poziție” și “hibridă”. Odată cu lucrările unor cercetători de prestigiu, în rândul cărora se disting cele ale colectivului condus de d-ul prof. dr. ing. Miomir Vukobratović de la Institutul de Robotică “Mihajlo Pupin” din Belgrad, Iugoslavia, s-a constituit o nouă abordare a acestei problematice, definită a fi cea a “aplicațiilor contact-task”, în care problema controlului inteligent al forței de contact devine unul din scopurile conducerii sistemelor robotice. Această abordare presupune

- ◇ modelarea corectă a dinamicii mediului;
- ◇ implicarea aspectelor de impedanță mecanică ale ambelor sisteme în interacțiune;
- ◇ conducerea “prin forță” în spații de reciprocitate cu cele eliberate de constrângeri;
- ◇ urmărirea activă a stabilității forței de contact.

Pe această cale, la ora actuală, marea majoritate a sistemelor tehnice (de la cele mecanice propriu-zise, la cele din domeniul construcțiilor civile și multe, multe altele) la care interesează modalitatea de control și influențare a forței (generalizate) de contact în timpul interacțiunii cu mediul înconjurător devin sisteme robotice, devin preocupări de robotică avansată.

Și în România au existat preocupări în acest domeniu, inițializate de colaborarea dintre domnii profesori Francisc Kovacs și Miomir Vukobratović, la care ai participat membri Colectivului Interdisciplinar de Robotică de la Universitatea “Politehnica” din Timișoara. O bună parte a acestora au fost cuprinse în cadrul contractului de cercetare ([POL96]) menționat și în Prefața Tezei de Doctorat. Domnului profesor dr. ing. Miomir Vukobratović i s-a conferit titlul de Doctor Honoris Causa al Universității “Politehnica” din Timișoara în anul 1995. Cu acest prilej, Domnia Sa a susținut disertația [Vuk95a] al cărei subiect a fost problematica “contact-task”.

O parte a preocupărilor relevante sunt conținute în capitolele prezentei lucrări, care se dorește a fi o modestă contribuție la studiul aplicațiilor de tip “contact-task” în cadrul conceptului de “robotică avansată”. Pentru atingerea acestui scop, lucrarea – întinsă pe 6 capitole - a fost structurată în continuare pe patru părți mari:

- ◇ prezentarea în manieră monografică a metodelor de modelare și simulare cu relevarea mijloacelor care se vor folosi pentru studiul aplicațiilor “contact-task” (capitolul 2);
- ◇ prezentarea stadiului actual al cercetărilor privind aplicațiile de tip “contact-task” (capitolul 3); informații suplimentare - referitoare la modul în care este structurată această prezentare se regăsesc la subcapitolul 3.2.5.2;
- ◇ studiul aprofundat al aspectului particular al controlului inteligent al forței generalizate de contact prin intermediul impedanței mecanice (capitolele 4,5);
- ◇ modelarea, concepția și dezvoltarea unor module inteligente care au drept scop realizarea controlului forței de interacțiune sistem mecanic-mediul sub formă de simulatoare și standuri experimentale (capitolele 4, 5).

## 2. Stadiul actual al cercetărilor și realizărilor privind modelarea sistemelor și simularea funcționării lor

### 2.1 Preliminarii

**Modelarea și simularea** sunt concepte intrate de foarte mult timp în cotidianul comunicațional datorită unei mase mari de informații cu foarte multe **referințe implicite** asupra acestora, informații provenite din cele mai variate domenii. Din această cauză, există destule aspecte care țin de conținutul propriu-zis al acestor concepte, care necesită - pentru relevare - consultarea literaturii de specialitate care tratează ceea ce poate fi numit generic "**Teoria generală a modelării**". Cea mai mare parte a acestor surse informaționale provin din sfera aplicațiilor și activităților **tehnice și tehnico-informaționale**, sferă în care se va încadra și lucrarea de față.

Dealtfel, chiar referințele implicite induse de astfel de activități au lărgit considerabil acele noțiuni și cunoștințe legate de modelare și simulare care au pătruns fără dificultate în cotidian. Pe această cale, cunoștințele respective au fost impuse într-un evantai din ce în ce mai larg, mai cuprinzător și mai exact. Aspectul este sesizabil și în evoluția volumului, categoriilor și chiar a profunzimii informațiilor referitoare la aceste cunoștințe, oferit de dicționarele și enciclopediile de specialitate și chiar de cele de uz general - atât în străinătate cât și în România. Acesta este motivul pentru care autorul a considerat că este util și instructiv demersul consultării mai atente și a acestor surse bibliografice ([Cha85], [EAC75], [EAC86], [EPO65], [EPO73], [EȘE79], [EȘE80], [EȘE86], [ETE62], [ETE63], [Gun90], [HER93], [McG92]).

Dat fiind faptul că modelarea și simularea sunt bazate pe modele, este evident că tocmai conceptul de **model** este cel care determină, în ultimă instanță, toate activitățile ce țin de modelare și simulare și de procesele și conceptele conexe: identificare, analogie, similitudine, cercetare, proiectare, reglare-conducere, etc.

**Dar**, deoarece modelul – fiind o oglindire/reprezentare a unui sistem-sursă – este prin definiție tot un **sistem**, toate cele ce decurg din conținutul acestui concept se întrepătrund cu cele derivate din "descrierea" acestuia, constituindu-i fundamentul.

În concluzie, nu poate fi abordată **Teoria Generală a Modelării** fără o fundamentare serioasă prin intermediul **Teoriei Sistemelor**. În acest capitol 2 al lucrării de doctorat se prezintă o încercare de **tratate unitară și structurată** a întregii problematice, cu accentuarea aspectelor teoretice generale și a interconexiunilor specifice, precum și a metodologiilor de abordare specifică, cu trimiteri spre surse

bibliografice în cazul acelor probleme, care, deși importante (în opinia autorului) nu au fost relevate din lipsă de spațiu.

## 2.2 Modelarea și simularea - mijloace moderne și eficiente ale cunoașterii umane

### 2.2.1 Despre cunoaștere ([EAC75], [EAC86], [EPO65], [EPO73], [EȘE86], [Luc99e])

Evoluția umanității este intrinsec legată de evoluția modalităților prin care omul a reușit să desfășoare activități specifice având drept finalitate cunoașterea. Cunoștințele dobândite într-un anumit spectru au putut fi apoi valorificate pentru ceea ce se poate denumi, indiferent de epoca istorică la care ne referim, drept “*progres al civilizației*”. Astăzi, astfel de cunoștințe se înscriu în ceea ce se numește generic *domeniul tehnico-științific*.

Din punct de vedere filozofic - în cazul cel mai general - prin cunoaștere se înțelege *acel proces prin care omul realizează însușirea, apropierea și reconstrucția unui aspect al realității*. Dacă este vorba de *cunoașterea generală*, “obișnuită” (sau “general-umană”) a aspectelor variate ale realității, se vorbește despre **gnoseologie**. Dacă este vorba de acel spectru specific relevat mai sus, atunci această cunoaștere, *cunoașterea științifică*, este definită prin conceptul de **epistemologie**. *Mijloacele* prin care s-au desfășurat procesele legate de epistemologie, indiferent de epocă, *se pot înscrie în două categorii esențial diferite*:

- A. mijloacele care țin de interacțiunea, directă sau mijlocită de instrumente, cu aspectul care interesează, caz în care se afirmă că este vorba de *cunoașterea empirică, senzorială*; pe această treaptă a activităților umane are loc ceea ce se numește, în accepțiune modernă, **culegerea datelor** care oglindesc manifestările exterioare ale obiectelor, fenomenelor (proprietățile acestora); metodele cu ajutorul cărora se realizează acest lucru sunt: observarea, descrierea, măsurarea, iar formele prin care se structurează reflectarea cunoștințelor sunt senzațiile, percepțiile, reprezentările;
- B. mijloacele care țin de procesele prin care, *cu ajutorul gândirii*, se poate adânci cunoașterea astfel încât să se poată pătrunde la esența lucrurilor, la cauzalitate, la legitățile care guvernează comportamentul aspectului studiat, caz în care este vorba de *cunoașterea teoretică, rațională*. Pe această treaptă a cunoașterii are loc **prelucrarea datelor** culese cu metodele ei specifice: analiza, sinteza, deducția, inducția; formele prin care se structurează reflectarea cunoștințelor astfel prelucrate sunt de asemenea specifice: noțiunile, categoriile, judecățile, raționamentele, ipotezele, teoriile etc.

### 2.2.2 Observarea și măsurarea ([EPO73], [Eyk77])

Pâna la epoca modernă, activitățile de **observare** și **măsurare** (figura 2.1), cu finalitate determinată, a *unui anumit aspect al naturii*, au fost principalele mijloace prin care omul a desfășurat activități de cunoaștere a naturii aplicând o metodă de încercări succesive de apropiere, prin *tehnicele cunoașterii raționale*, a teoriei construite asupra imaginii aspectului studiat. Nici aspectul real și nici imaginea acestuia nu erau



percepute și nici definite cu ajutorul unor concepte de mare generalitate, fiind diferențiate funcție de fiecare caz în parte.

### 2.2.3 Apariția metodei modelării

Metoda modelării a putut apărea - în termenii de abordare tradițional/clasică a problematicii - după apariția și structurarea teoriei sistemelor, teorie capabilă să confere aspectului studiat (inițial **aspect real** al naturii), indiferent de domeniul de care aparține, trăsături clare, de mare generalitate. Astfel, acest aspect este asimilat cu conceptul de sistem. Din acel moment, datele cu care se opera pe treapta de cunoaștere senzorială/empirică devin date de intrare/ieșire ale sistemului studiat. Mai mult, se deschide și posibilitatea studiului și cunoașterii unor **sisteme virtuale**, prin detașarea acestora de aspectele reale, nemijlocite ale naturii.

Aspectul real sau virtual de studiat este, din punctul de vedere al celui care efectuează cunoașterea, obiectivul, **ținta** investigației. Pentru activitățile desfășurate, acesta este însă **sursa** informațiilor necesare. Din această cauză, obiectivul investigației va fi denumit în continuare **sistem sursă** ([Luc99e], [Luc99g]).

Datorită faptului că de cele mai multe ori sistemul sursă era complex, greu abordabil pentru studiu, s-a încercat finalizarea procesului de cunoaștere prin modele ușor de realizat și studiat.

Astfel, simularea s-a constituit într-o nouă metodă de cunoaștere, cu **tehnici specifice**, care poate acoperi printr-o nouă modalitate, necesitatea de cunoaștere a omului ([Eyk77], după Rosenblueth și Wiener, 1945). Din acest punct de vedere, chiar formularea unei teorii, în sensul tradițional, asupra unui aspect de cunoaștere, se realizează prin intermediul unei metode de cunoaștere, rezultată în mod verbal - sau matematic - al realității (în sens tradițional, sau în cel modern, de *realitate "virtuală"*!).

Dezvoltarea teoriei sistemelor a avut loc în paralel cu ceea ce se înțelege astăzi prin teoria modelării. Trajectoriile (în accepțiunea generală!) de cunoaștere ale celor două domenii s-au întrepătruns și au căpătat noi valențe odată cu dezvoltarea ciberneticii și apariția unor sisteme de calcul din ce în ce mai performante, sisteme care devin mijloacele cu ajutorul cărora investigatorii execută anumite operații. Algoritm general pentru rezolvarea unei

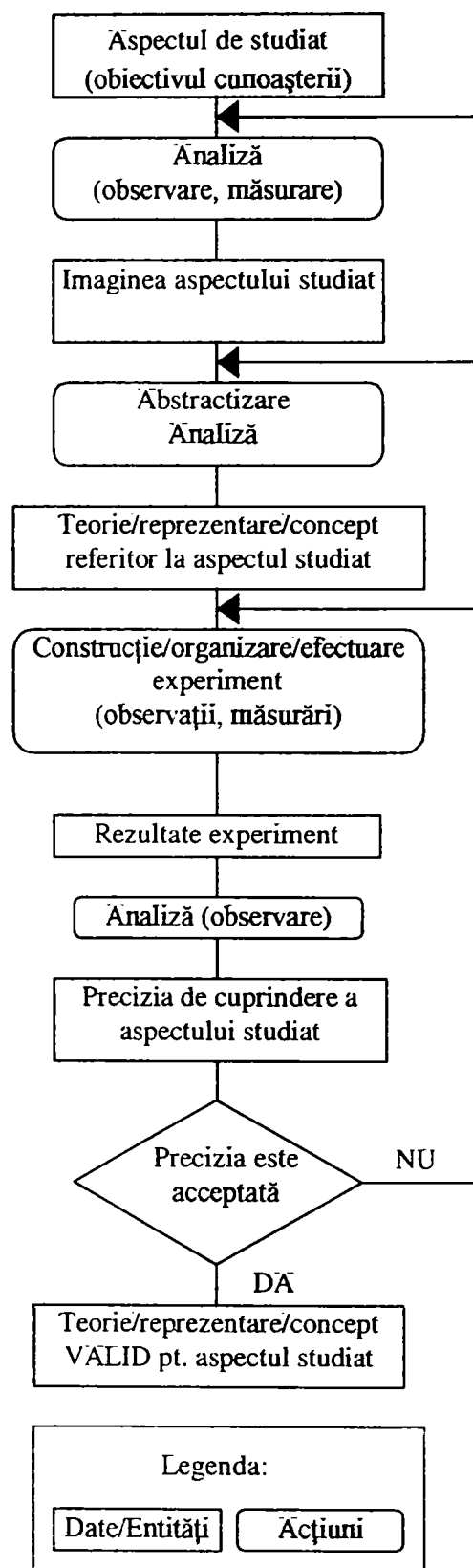


Fig. 2.1. Observarea și măsurarea pentru cunoaștere

probleme cu ajutorul calculatorului (prin modelare și simulare) este prezentat în figura 2.2 ([Sav00]).

Trebuie evidențiată observația că **cunoașterea rațională (teoretică)** este prezentă implicit în procesele de modelare prin toate metodele ce țin de sfera sa de cuprindere: analiza, sinteza, deducția, inducția, silogismul.

**Analiza** este o metodă de cercetare care se caracterizează prin aceea că recurge la descompunerea în părțile componente ale entităților cercetate.

**Sinteza** este o metodă de cercetare care se caracterizează prin trecerea de la particular la general, de la simplu la compus, pentru a se ajunge la generalizare.

**Deducția** este o metodă fundamentală de raționare caracterizată prin trecerea de la general la particular; se obține o judecată nouă (numită concluzie) din două sau mai multe judecăți (numite premise), din care una trebuie să fie neapărat universală; acționează în planul conceptelor, concluzia decurgând cu necesitate din premise. Teoria deducției a fost fondată de Aristotel, prin doctrina *silogismului*, și dezvoltată de Descartes, de Leibnitz și de logica simbolică.

**Inducția** este o metodă fundamentală de raționare caracterizată prin trecerea de la particular la general, de la consecință la principiu, de la efect la cauză, de la fapte la concepte. Inducția este de două feluri: completă sau incompletă, după cum se enumeră sau nu toate cazurile posibile.

**Silogismul** este un tip fundamental de raționament deductiv, alcătuit din trei judecăți: (1) *premissa majoră*, care conține predicatul concluziei (termenul major); (2) *premissa minoră*, care conține subiectul concluziei; (3) *concluzia*, derivată cu necesitate din ele. Legătura dintre termenii major și minor este mijlocită de *termenul mediu*, care figurează în ambele premise, dar nu și în concluzie. Definițiile de mai sus sunt în conformitate cu [EAC75], [EPO73], [EȘE86].

## 2.2.4 Conceptele fundamentale ale modelării. Prezentare succintă

Conceptele cu care se operează în cadrul activităților de modelare ce se desfășoară pentru realizarea scopului generic de cunoaștere sunt redate în cele ce urmează:

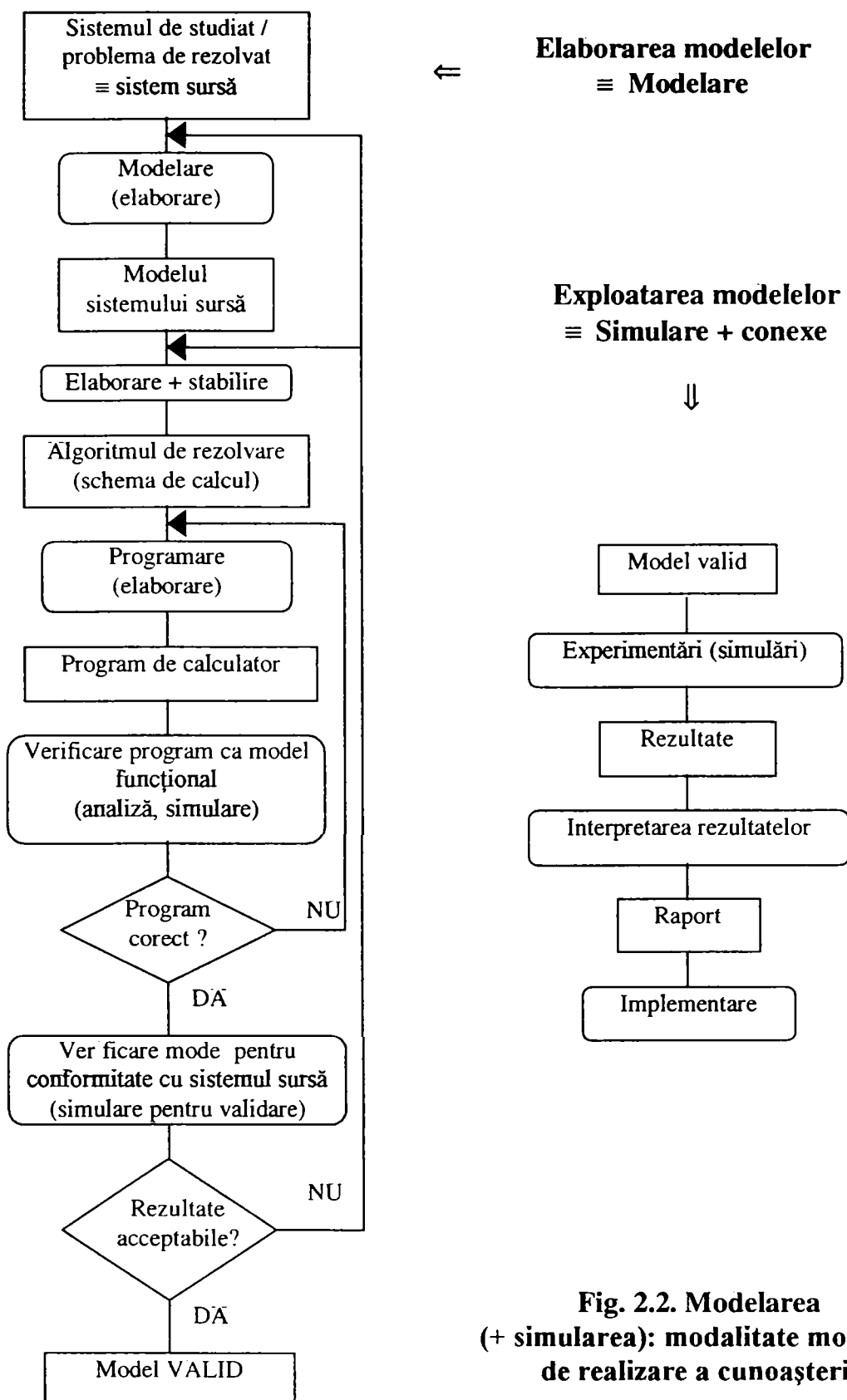
- în cadrul teoriei generale a modelării se operează cu conceptul de **sistem**, modelarea propriu-zisă constituind, în fond, ansamblul activităților prin care, pentru un anumit scop determinat, un **sistem sursă** este înlocuit de un **sistem model** echivalent din anumite puncte de vedere;
- sistemul sursă poate fi **real** sau **virtual**;
- prin **sistem** se înțelege o mulțime ordonată și structurată de elemente între care există conexiuni bine determinate; sistemul este delimitat de mediu prin entitatea frontieră, caracterizată prin relații de intrare/ieșire; concretizarea acestora se efectuează cu ajutorul unor **parametri**;
- **modelul** este un sistem abstract sau material cu ajutorul căruia poate fi studiat indirect un alt sistem, de regulă mai complex (sistemul sursă), cu care modelul prezintă o analogie; se rețin pentru construcția modelului doar acele **caracteristici** ale sistemului sursă, care sunt **esențiale, utilizabile și adecvate scopului**; persoanele care desfășoară activități legate de modelare sunt denumite uzual **modelori, modelatori** ([EȘE80], [EȘE86]) sau, în general, **investigatori de model(e)**;

- activitățile desfășurate de modelori pentru construirea propriu-zisă a modelului pornesc de la proprietățile și caracteristicile sistemului sursă, relevarea acestora are loc prin **identificare**; tehnicile de identificare sunt intrinsec legate de modalitățile de studiu a sistemelor, oferite prin intermediul **teoriei sistemelor**;
- dacă modelul este pus a **opera** în locul sistemului sursă, are loc **simularea** ([Ben95]) sistemului sursă; scopul simulării este cunoașterea comportamentului unui sistem sursă prin mijlocirea comportamentului modelului;
- toate problemele legate de activitățile denumite uzual **activități de modelare-simulare** constituie obiectul de studiu al **Teoriei Generale a Modelării**, care conferă un sens bine determinat activităților propriu-zise de **modelare** (= construcție a modelului) și **simulare** (= "funcționarea" lui), delimitându-le de cele de alt tip;
- prin **identificare** se înțelege totalitatea activităților prin care se stabilește o identitate estimată pentru un sistem sursă, pe baza comportării sale; modalitățile diferite prin care se ajunge la estimarea identității sursei (= un model al ei) diferențiază tehnicile de identificare; identificarea este problema inversă analizei sistemelor;
- indiferent de procedura urmată, investigatorii pot realiza **identificarea** pe o cale **abstractă** (*a priori* în exemplul redat la subcapitolul respectiv, al procedurii Eykhoff), sau pe o cale bazată **pe experimente**, pe datele de intrare/ieșire rezultate în funcționarea sistemului sursă (*a posteriori* în exemplu); în unele surse bibliografice, conținutul conceptului de identificare se restrânge exclusiv asupra acestei căi, experimentale, de cunoaștere;
- există multe cazuri în care activitățile pentru identificare nu pot fi strict delimitate după tip, caracteristicile specifice fiecăruia întrepătrunzându-se; *cea mai completă caracterizare generică a ansamblului de activități acoperite de Teoria Generală a Modelării ar putea fi oferită de triada conceptuală identificare-modelare-simulare*;
- toate tipurile de activități din cadrul procesului de modelare se desfășoară cu un anumit **scop** legat de sistemul sursă, și sunt inițiate tocmai în vederea atingerii acestuia; modelarea se inițiază pentru **cercetarea, proiectarea** (având drept finalitate fabricația, exploatarea, întreținerea) sau/și **conducerea sistemului sursă**;
- se consideră finalitatea activităților de cunoaștere a unui sistem sursă limitată la construirea unui model utilizabil; activitățile desfășurate pentru atingerea scopurilor ("destinația modelelor") relevate mai sus nu fac parte din aceeași sferă cu cele legate de modelare; acestea nu sunt explicitate în ordinograme.

## 2.2.5 Concluzii

Inițial, procesul de cunoaștere s-a desfășurat, din punctul de vedere al **activităților** umane, sub semnul conceptelor de **observare** și **măsurare**. Nu au existat concepte de mare generalitate care să definească **aspectul realității** care trebuie studiat și nici **imaginea acestuia**, rezultată în urma activităților desfășurate pentru cunoașterea epistemologică.

O dată cu apariția și structurarea teoriei sistemelor și a teoriei modelării, pe lângă reconsiderarea obiectivelor și a finalității procesului de cunoaștere (definite drept **sistem sursă real** și respectiv **model** al acestuia), se conferă și acestor activități (diferențindu-le clar în funcție de categorii și finalitate) gradul de generalitate necesar în epoca modernă. Concomitent are loc și reconsiderarea esenței sistemului sursă, acesta nemaifiind legat nemijlocit de realitate: obiectul cunoașterii poate fi **virtual**.



**Fig. 2.2. Modelarea (+ simularea): modalitate modernă de realizare a cunoașterii**

Conceptul, care prin conținutul său are capacitatea să înglobeze activitățile astfel delimitate, este conceptul de **modelare** în sens larg (al teoriei generale a modelării). În subcapitolul 2.2.4 au fost prezentate succint conceptele care definesc astfel de activități: modelarea (în sens restrâns) și toate cele care îi sunt adiacente.

În accepțiunea de-acum devenită clasică, se poate spune că, la această oră, identificarea, modelarea și simularea constituie tehnica general utilizată prin care cercetătorii ajung la cunoașterea unui sistem sursă. În această accepțiune, totuși, se

apelează la mijloace și procedee specifice, dependent de utilizatori și de scopul urmărit de aceștia.

Mijloacele utilizate pentru desfășurarea acestor activități sunt, de regulă, sistemele de calcul electronice, fără de care, astăzi, nici nu se poate imagina un astfel de proces. Tendințele actuale însă, presupun includerea acestora în chiar centrul activităților de modelare ([Luc99e]). **Astfel, calculatorul electronic devine parte a structurii definitorii a teoriei generale a modelării.**

Trebuie accentuat, de asemenea, și faptul că, pentru a finaliza majoritatea activităților din sfera modelării, cercetătorii apelează la **metodele și mijloacele cunoașterii teoretice (“raționale”)**.

## 2.3 Elemente de Teoria sistemelor

### 2.3.1 Noțiunea de sistem ([Cha85], [Dra79], [EAC75], [EAC86], [EPO65], [EPO73], [EyK77], [EȘE79], [EȘE80], [EȘE86], [ETE62], [ETE63], [Gun90], [HER93], [Ion94], [McG92], [Nic80], [Voi80])

Cuvântul **sistem** provine din limba greacă, de la *sin* = cu și *stao* = a sta, corespunzând întru totul latinescului *constitutio*, a cărui semnificație este evidentă cunoscătorilor limbii române. Apoi, această semnificație a evoluat definind o reuniune de principii coordonate astfel încât să formeze un tot științific sau un corp de doctrină. Se cunosc, astfel, sistemele filozofice: al lui Aristotel, al lui Kant; de clasificare: al lui Linné, al lui Mendeleev, anatomice: digestiv, nervos; referitor la teoria dimensională: al lui Kalantarov; referitor la metrologie: sistemul metric; referitor la științele naturii: al lui d'Holbach sau la cele sociale: al lui Laplace; referitor la arte: sistemul artelor frumoase al lui Alain.

Originea semnificației mai noi a termenului se găsește în multe domenii: biologie, matematică, psihologie, tehnică..., pentru care prin sistem se putea înțelege entitatea care este parte a unei anumite realități (fenomen, proces, obiect etc.).

Semnificația actuală, care se bazează pe noțiunile de intrare, răspuns (ieșire) și stare, pornește de la lucrări celebre din domeniul mecanicii (Lagrange), al termodinamicii (Carnot ș.a.) și mai târziu al informaticii (Shannon) etc. Explicarea sensului actual se pare că îi aparține lui Ludwig von Bertalanffy (1937), cu observația că referințe asupra sistemelor dinamice se găsesc mai devreme în lucrările matematicianului G.D. Birkhoff.

Trebuie accentuat însă că studiul rețelelor electrice și cel al automatelor au avut o contribuție esențială la dezvoltarea teoriei sistemelor, doi din autorii uneia dintre lucrările clasice asupra acestei teorii ocupându-se de această problemă: L. Zadeh și C. Desoer.

Pe plan național, sunt cunoscute lucrările mai multor oameni de știință referitoare la sisteme, începând cu Spiru Haret, continuând cu Gh. Cartianu, E. Nicolau, M. Drăgănescu și apoi, colectivele academice-universitare care se ocupă intens de identificarea sistemelor.

### 2.3.2 Definiția sistemelor; abordarea matematică de tip algebric-descriptiv a acestora ([Con75], [Dra79], [Ion94], [McG92], [Nic72], [Voi80])

#### *Definiție.*

**Teoria sistemelor** definește sistemul drept o mulțime ordonată și structurată de elemente între care există conexiuni bine determinate. Sistemele sunt net delimitate de mediul înconjurător prin frontiera lor.

La această definiție se atașează, de obicei, următoarele afirmații:

- tot ce nu aparține sistemului constituie mediul ambiant;
- entitatea de tip frontieră, care face demarcația între mediu și sistem, este caracterizată prin relații de intrare/ieșire prin mijlocirea unor **parametri**.

Ținând seama de afirmația explicită că “ființarea” unui sistem (în cazul celor tehnice: funcționarea) este dirijată, într-un anumit sens, spre un scop sau o țintă (*destinație*), având, deci, o finalitate determinată, completează definiția sistemului și îi oferă o relevanță suplimentară necesară; ea nu este însă menționată ca atare în toate sursele bibliografice consultate.

Exprimarea matematică a definiției unui sistem  $S$  conținând elementele  $E$ , aranjate într-o structură  $s$ , recurge la elemente din teoria mulțimilor (**variabilele** fiind entitățile matematice în directă corespondență cu **mărimile** sistemelor reale):

$$S = (E, s) \quad (2.1)$$

Ținând seama de asocierea mărimi  $\Leftrightarrow$  variabile se realizează prin prisma aspectului cantitativ, conducând la asocierea **sistemului fizic** cu un **model matematic, abstract**. Determinarea acestuia se realizează prin tehnicile și metodele de identificare.

Sistemul este caracterizat printr-un set de mărimi, atributele, cărora le sunt conferite valori. *Atributele statice* sunt caracterizate de valori fixe (constante) și poartă denumirea de **parametrii sistemului**. *Atributele dinamice* primesc diferite valori la momente diferite și în puncte diferite din spațiu, purtând denumirea de *variabile descriptive* ale sistemului.

Există trei clase de variabile descriptive:

- **variabilele de intrare**, reprezentând acțiunea mediului asupra sistemului; sunt dependente de timpul  $t$ , cele  $m$  componente ale vectorului  $u$  fiind prezentate în ecuația:

$$u(t) = \{u_1(t), u_2(t), \dots, u_m(t)\} \in U \quad (2.2)$$

unde  $U$  este mulțimea vectorilor  $u$ .

- **variabilele de ieșire**, reprezentând acțiunea sistemului asupra mediului; sunt relevate prin ecuația similară:

$$y(t) = \{y_1(t), y_2(t), \dots, y_q(t)\} \in Y \quad (2.3)$$

- **variabilele de stare**, oglindind condițiile interne ale sistemului, conform ecuației similare:

$$x(t) = \{x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)\} \in X \quad (2.4)$$

Modificările survenite la intrare provoacă modificări în starea sistemului, care, la rândul lor, sunt observate prin modificările de la ieșire. Se presupune că ieșirea nu influențează intrarea.

Dacă starea sistemului este unică, nu există variabile de stare și nici vector de stare care să descrie condițiile interne ale acestuia.

Vectorul de stare conține oricare set minimal de variabile de stare dacă sunt prezente următoarele două proprietăți:

a) cunoașterea valorilor vectorului de stare  $x(t_i)$  în oricare moment  $t_i$  este suficientă pentru determinarea unică a valorilor oricărui set posibil de variabile de ieșire  $y(t_i)$  la același moment  $t_i$ . Există, deci, o funcție de ieșire:

$$\lambda: X \rightarrow Y \quad (2.5)$$

definită pentru toate momentele  $t_i$  din baza de timp în care sunt evidențiate stările curente în ieșiri curente;

b) cunoașterea valorilor vectorului de stare  $x(t_i)$  la timpul  $t_i$ , concomitent cu cunoașterea valorilor de intrare  $u(t_i)$  pe intervalul de timp

$$[t_i, t_j], \quad t_i \leq t \leq t_j \quad (2.6)$$

este suficientă pentru a determina în mod unic valorile variabilelor de stare  $x(t_j)$  la timpul  $t_j$ . Există, deci, o funcție a tranziției de stare:

$$\delta: (X, U) \rightarrow X \quad (2.7)$$

definită pentru toate intervalele de timp  $[t_i, t_j]$  din baza de timp, în care sunt evidențiate stările și intrările curente în stări viitoare (proprietatea este cunoscută drept proprietatea Markov).

În Teoria Sistemelor, evoluția modificărilor relevate de variabilele de stare sau de cele de ieșire drept răspuns la oricare intrare particulară este cunoscută drept “traietorie” de stare, respectiv de ieșire, a sistemului. Mulțimea tuturor “traietoriilor” de stare sau de ieșire posibile corespunzătoare tuturor intrărilor posibile poartă denumirea de comportament de stare, respectiv la ieșire, al sistemului. Comportamentul sistemului este generat de funcțiile  $\delta$  și  $\lambda$  care depind, la rândul lor, de parametrii sistemului și, posibil, și de localizarea acestora în timp și spațiu.

Relațiile dintre variabilele de intrare, de stare și de ieșire ale sistemului, care dau naștere comportamentului său, sunt cunoscute drept structura sistemului.

În concluzie, sistemul poate fi complet definit de structura sa algebrică:

$$\langle U, X, Y, \delta, \lambda, t \rangle \quad (2.8)$$

unde prin  $U$ ,  $X$  și  $Y$  s-au notat mulțimile variabilelor de intrare, de stare și, respectiv, de ieșire.

**Observație.** Termenul de *traietorie* are pentru specialiștii din domeniul mecanic (inclusiv pentru cei care se ocupă cu Robotica) o cu totul altă semnificație. Utilizarea lui în accepțiunea explicată, din domeniul strict al Teoriei Sistemelor este semnalată prin încadrarea termenului între ghilimele.

### 2.3.3 Precizări asupra sistemelor, relevante pentru teoria generală a modelării

#### 2.3.3.1 Precizări de ordin general

A. În cazul sistemelor tehnice, se face referire de fapt la ceea ce se înțelege prin sistem fizic, elementele fiind obiecte sau corpuri materiale, iar dependența dintre mărimile de intrare și de ieșire are conținut informațional. Mărimile fizice trebuie să aibă proprietăți de esențialitate, necesitate și reproductibilitate, pentru ca experimentele fizice să poată confirma identitatea unui sistem.

B. Evoluția în timp a mărimilor conferă caracter dinamic sistemelor, majoritatea celor din domeniul tehnic fiind implicit sisteme dinamice.

C. Sistemele dinamice au un caracter (dinamic) neanticipativ, respectând principiul general al cauzalității sistemelor fizice (valoarea actuală  $y(t_1)$  de ieșire nu poate fi influențată de o valoare ulterioară de intrare  $u(t_2)$ ;  $t_2 > t_1$ ).

D. Variațiile mărimilor caracteristice sunt mărginite și reale, proprietate care împreună cu cea de la punctul C conferă sistemului fizic realizabilitate.

E. Starea conferă sistemului, dar și relațiilor sale cu mediul, o caracterizare de nivel microscopic (prin mărimile de stare interne, respectiv externe). Starea este definită drept ansamblul valorilor instantanee ale tuturor acestor mărimi; se afirmă că două sisteme dinamice nu pot fi deosebite prin experiențe macroscopice dacă ambele grupuri de mărimi coincid. Vectorul stărilor, pentru un moment  $t$ ,

$$X(t) = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (2.9)$$

descrie spațiul  $n$ -dimensional al stărilor:

$$X = x_1 * x_2 * \dots * x_n \in R^n \quad (2.10)$$

Tandemul  $\{t, x(t)\}$  se numește fază, iar “traectoria” aferentă - “traectoria” de fază, care oferă informații mai complete decât “traectoria” de stare (reamintesc faptul că termenul de traiectorie desemnează un parcurs de variație; nu are nimic comun cu conceptul de traiectorie din Robotică).

F. Variația mărimilor de stare de la un set de valori la altul (de la starea  $i$  la starea  $i+1$ ) relevă un proces fizic în desfășurare. Deci, *prin proces se înțelege trecerea unui sistem de la o stare la alta!*

În plan real, procesele sunt reflectate prin transferuri de substanță sau energie, între elementele de tip acumulator sau de la aceste elemente, prin intermediul celor de tip disipativ spre mediul ambiant. Exprimarea matematică a acestora, sub forma bilanțului de energie sau de substanță, conduce la ecuații de stare, de la care se poate ajunge la ecuațiile de ieșire, care descriu sistemul. Se accentuează faptul că, în general, toate mărimile de stare sunt continue (fizic, este imposibil un transfer instantaneu de energie sau substanță).

#### 2.3.3.2 Taxonomia sistemelor

Clarificarea categoriilor distincte de sisteme este indispensabilă din punctul de vedere al posibilității de inițiere a oricărui proces de modelare. Sistemele pot fi clasificate:



A. funcție de *mulțimile valorilor variabilelor* (respectiv de semnalele corespunzătoare acestora, care reprezintă suportul fizic al informației atașate acestor mărimi):

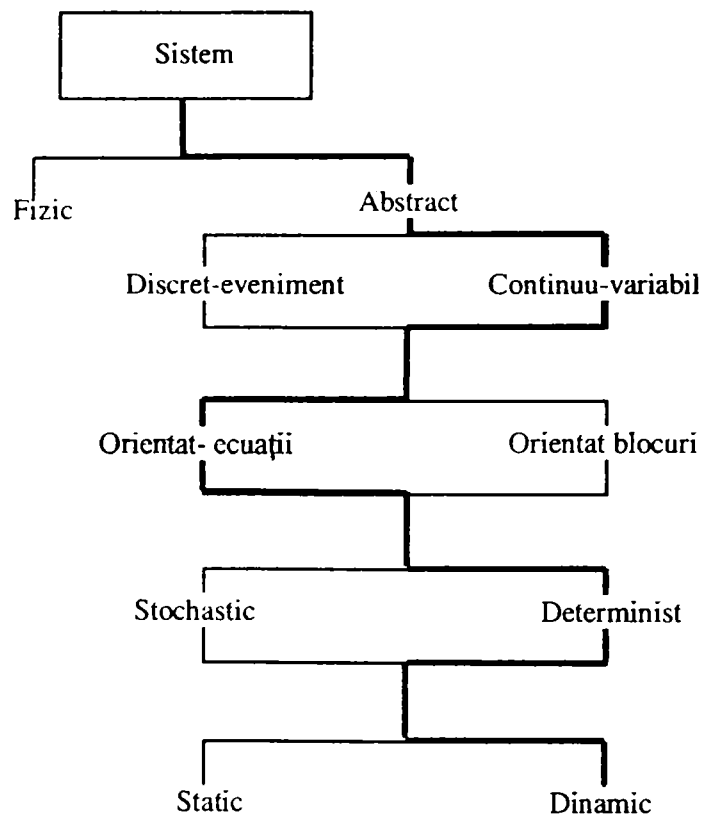


Fig. 2.3 Taxonomia sistemelor

- a) după modul de prezentare, sistemele pot fi cu semnale **analogice** sau cu semnale **digitale**;
- b) după variația în timp a semnalelor se deosebesc sisteme **continue**, **discontinue** și **discrete**;

B. funcție de structură:

- a) după predictibilitatea ieșirii la o intrare deterministă se disting structuri **deterministe**, respectiv **stohastice** ale sistemelor;
- b) după distribuția spațială a parametrilor sistemului, pot exista sisteme cu **parametri concentrați**, respectiv **distribuiți**;
- c) după variația în timp a parametrilor, se deosebesc sisteme **invariabile**, respectiv **variabile**;
- d) după linearitatea operatorilor din cadrul relațiilor dintre variabilele sistemului pot exista sisteme **lineare**, respectiv **nelineare**.

Descrierea tipului de sistem în funcție de criteriile de clasificare de mai sus se realizează cel mai bine cu ajutorul unor structuri ierarhizate (conform cu figura 2.3, [Ben95]). Se va insista mai mult asupra acestui aspect în capitolul următor.

### 2.3.3.3 Caracterizarea și descrierea relațiilor dintre mărimile de intrare și cele de ieșire ale sistemelor

Exprimarea relațiilor dintre mărimile de intrare și cele de ieșire ale sistemelor se realizează, în general, prin:

- ◇ mulțimi de valori asociate ale mărimilor de intrare/ieșire;
- ◇ funcții matematice.

## 2.3.3.3.1 Abordarea matematică modernă

În abordarea matematică modernă (sub formă structurală), de care face uz teoria sistemelor, se caracterizează conexiunea **sistem fizic - model matematic** drept un concept matematic complex, structurat, definit prin axiome asupra mulțimilor:

- ◇ de timp,  $T$  (mulțime ordonată, exprimarea efectuându-se prin intermediul numerelor reale);
- ◇  $U$  și  $\Omega$ , în care  $U$  este mulțimea valorilor variabilelor de intrare ( $u_i$ ,  $i=1,2,\dots,m$ ), iar  $\Omega=\{u(t); T \rightarrow U\}$  - clasa funcțiilor de intrare  $u(t)$ , succesiuni ordonate de valori-componente ale vectorilor  $u$ , în timp;
- ◇  $Y$  și  $\Gamma$ , similare cu cele de mai sus, dar referitoare la variabilele de ieșire ( $y_j$ ,  $j=1,2,\dots,q$ ), cu  $\Gamma=\{u(t); T \rightarrow Y\}$ ;
- ◇ de operatori ce constau în aplicații directe sau compuse pe mulțimile  $T \times \Omega$ , cu valori în  $Y$ .

## 2.3.3.3.2 Tipurile fundamentale ale sistemelor dinamice - modele matematice

Tipurile fundamentale ale sistemelor dinamice (SD) - modele matematice (MM) se diferențiază funcție de prezența sau absența mărimilor de stare astfel:

A. Modelul matematic intrare-stare-ieșire (MM-ISI), care ține cont de legătura compusă:

$$\{u(t), x(t_0) \rightarrow x(t) \rightarrow y(t)\} \quad (2.11)$$

și are următoarea exprimare:

$$\begin{cases} x(t) = f_1\{x(t), u(t), t\} \\ y(t) = f_2\{x(t), u(t), t\} \end{cases} \quad (2.12)$$

unde  $f_1$  este funcția de stare,  $f_2$  - funcția de ieșire, iar  $u(t)$ ,  $x(t)$ ,  $y(t)$  - vectorii de intrare, stare și, respectiv, ieșire. Prima relație este ecuația de stare, a doua - ecuația de ieșire.

Cazurile particulare ale SD survin dacă pentru  $t > t_0$  sunt impuse:

- a)  $u(t) = 0$ , situația fiind cunoscută ca regim liber al SD;
- b)  $x_0(t_0) = 0$ , situație cunoscută drept stare de repaus a SD; pentru ca sistemul să evolueze, se impune o forțare.

Trebuie făcute următoarele precizări suplimentare referitoare la mărimile de stare:

- submulțimea alcătuită din stările fiecărui element component al structurii se numește submulțimea de stare a sistemului;
- dacă  $X_i$  este un element al acestei mulțimi, la rândul ei submulțime alcătuită din starea fiecărui element la un moment dat în intervalul de timp  $[0-T]$  ( $T$ -timp considerat relevant pentru sistemul studiat), atunci mulțimea  $X$  care conține toate aceste submulțimi  $X_i$  este mulțimea tuturor stărilor sistemului în discuție;
- la momentul  $t_0=0$  mulțimea valorilor atributelor elementelor componente constituie starea inițială, iar la momentul  $t_f=T$  - starea finală.

Dacă între starea inițială și starea finală poate fi făcută o trecere guvernată de reguli bine determinate (printr-o relație definită pe mulțimea  $X$  în intervalul  $[0-T]$ ),

atunci fenomenul sau sistemul poate fi controlat. Un sistem, proces controlabil, poate fi caracterizat de stabilitate.

**Stabilitatea** este proprietatea unui sistem de a-și menține starea, sau de a reveni la starea inițială, după ce a suferit o acțiune perturbatoare. Un sistem caracterizat prin stabilitate va avea o evoluție ulterioară în care abaterile mărimilor lui de stare vor fi mărginite, după ce aceste mărimi au fost modificate suficient de puțin printr-o acțiune perturbatoare trecătoare.

Pentru a putea demara și desfășura o identificare de sistem sau de proces, acesta trebuie să aibă și însușirea de a fi observabil. Dacă se vorbește de condițiile în care un sistem, pentru a putea fi identificat, are proprietățile de controlabilitate, stabilitate și observabilitate, aceste condiții se exprimă prin parametri. Din punct de vedere matematic (la model), aceștia se regăsesc sub forma coeficienților care “modelează” sistemul de studiat.

B. Modelul matematic intrare-ieșire (MM-II), care poate fi asociat unui SD în cazul în care caracterizarea cantitativă a stării prezente (în sensul obișnuit al noțiunii de stare) și a tendinței de evoluție a acesteia poate fi efectuată exclusiv cu ajutorul mărimilor de intrare și de ieșire și, eventual, a derivatelor acestora:

$$y(t) = f_3\{u(t), t\} \quad (2.13)$$

cu observația că trebuie cunoscut un set de valori drept condiții inițiale ale SD.

#### 2.3.3.4 Descrierea structurii sistemelor

Reprezentarea grafică oferă un instrument de lucru deosebit de eficient și sugestiv în cadrul operațiilor de modelare. Funcție de nivelul de abordare a sistemului aflat în studiu, reprezentările grafice au un conținut diferit, conținut oglindit și în denumirea de tip a acestor reprezentări:

- a) **schemele funcționale**: sunt cele mai apropiate de realitate și conțin prezentarea schematică, în conformitate cu convențiile domeniului de care aparține sistemul, a componentelor tehnice ale acestuia, care prin legăturile relevate, oglindesc funcționarea sistemului;
- b) **schemele bloc**: relevă prin blocuri funcționale elementele sistemului, iar prin linii orientate și notate - legăturile dintre acestea;
- c) **grafurile de fluentă**: constau dintr-o succesiune de noduri și arce orientate (nodul reprezintă mărimea care transmite informația, iar arcul orientat - relația de transformare); pot fi utilizate la sistemele lineare;
- d) **schemele de principiu**: constau din blocuri geometrice (care reprezintă subansamblurile sistemului) legate prin segmente orientate (reprezentând interacțiunile).

## 2.4 Conceptele de model, modelare; “încorporarea” conceptului de simulare în Teoria Modelării

### 2.4.1 Prezentarea conceptului de model

#### 2.4.1.1 Semnificația termenului de model ([Nic77], [Nic81], [Ven72])

Deoarece noțiunea de *modelare* are în momentul de față mai multe sensuri, este necesară precizarea diferitelor accepțiuni ale noțiunii de *model*, precum și evoluția în timp a acestora.

Termenul provine de la latinul *modulus*, diminutiv al lui *modus* = măsură. În latină el era un termen utilizat de arhitecți pentru a desemna unitatea arbitrară ce servea la stabilirea raporturilor - proporțiilor - între diferitele părți ale unei opere arhitectonice. *Modulus* a suferit, de-a lungul timpului, modificări, devenind în vechea franceză *moule*, în engleza veche *mould*, iar în germana veche (vechea *Hochdeutsch*) *Model* (cu un singur *l*). În secolul al XVI-lea, statuarii francezi au adoptat termenul de *modele* de la italianul *modello*, ce provenea de la rădăcina latină amintită; același cuvânt italian a dat în engleză *model*, iar în germană *Modell* (cu doi *l*). În germana actuală coexistă cele două cuvinte, iar în franceză există *moule* (tipar de turnătorie), *model* și *modul*. În germană *Model* înseamnă modul, tipar, matriță.

Se remarcă faptul că, încă de la început, sensul termenului de model oscila între abstract și concret. În limba franceză actuală verbul corespunzător modelelor abstracte este *modeliser*, termenul de modelare (*modeler*) fiind rezervat artelor plastice, și unor sensuri metaforice (de exemplu a modela viața).

#### 2.4.1.2 Elemente de definiție; conținutul conceptului de model și al celor conexe acestuia ([Ben95], [Cha85], [EAC75], [EAC86], [EPO65], [EPO73], [Eyk77], [EȘE79], [EȘE80], [EȘE86], [ETE62], [ETE63], [Gun90], [HER93], [McG92], [Ter80], [Ter87], [Ven72])

În domeniul științifico-tehnic, la ora actuală modelul se consideră a fi un sistem abstract sau material cu ajutorul căruia pot fi studiate indirect proprietățile unui alt sistem, mai complex (sistemul sursă), cu care modelul prezintă o analogie limitată și orientată.

*Modelul este o reprezentare a aspectelor esențiale ale unui sistem (existent sau virtual).*

Necesitatea construcției modelului este determinată de cele mai multe ori de necesitatea studiului, construcției sau conducerii unui sistem (real sau virtual), în condițiile imposibilității efectuării acestor activități asupra sistemului dat, din motive economice, ecologice, de complexitate, de accesibilitate, de pericolozitate etc.

Sistemul, real sau virtual, de la care se pornește (obiectul investigației) este sursa informațiilor necesare modelării și este numit, în continuare, **sistem sursă** [Luc99g].

Definirea modelului trebuie să țină cont de următoarele:

- ◇ oglindirea sistemului-sursă trebuie făcută printr-o reprezentare *simplificată*, oferind deci și posibilități de studiu mai simple pentru beneficiarul modelului; gradul de simplificare trebuie privit prin prisma posibilității de *construire* a modelului, precum și prin cea a posibilității de *utilizare* a acestuia în scopul propus;
- ◇ în cadrul acestei reprezentări, deseori se consideră necesară relevarea *trăsăturilor caracteristice*, care diferențiază sistemul studiat de alte sisteme;
- ◇ reținerea doar a acelor trăsături care sunt *adecvate scopului*.

Construirea modelelor și simularea se constituie în metode moderne, cvasi-generalizate de cunoaștere a unor sisteme sursă, cu tehnici, procedee și mijloace specifice.

### 2.4.1.3 Concluzii

**A.** Pentru abordarea cu succes a tuturor problemelor teoriei generale a modelării trebuie fixate conceptele de *sistem* și *model*.

**B.** Modelele sunt utilizate la ora actuală în toate disciplinele științifico-tehnice. Un proces de modelare **fidelă** apelează (uneori chiar involuntar) la tot ceea ce reprezintă izvoare filozofice ale cunoașterii umane (epistemologia: originile, natura, metodele și limitele acesteia) pe de o parte, și mijloace ale abordării raționale (metode de lucru logice și științifice) pe de altă parte.

**C.** Generalizarea utilizării modelelor se datorează, în principal, următoarelor avantaje:

- au o accesibilitate, pentru studiu, mai ridicată decât a sistemelor sursă;
- necesită costuri mai mici pentru realizare și testare;
- necesită mai puțin timp pentru realizare și testare;
- schimbările în structura modelului sunt mai ușor de implementat;
- schimbările de comportament sunt mai simplu de izolat, înțeles și comunicat;
- permit, fără probleme, experimentări indiferent de pericolozitatea mediului în care ființează sistemul sursă;
- pot oferi informații și asupra unor sisteme care nu sunt realizate, sau nu pot fi executate cu tehnologiile existente.

**D.** Rolul Teoriei Generale a Modelării constă în a oferi o înțelegere logică și axiomatică a conceptelor care sunt comune și general valabile, pe baza cărora fiecare disciplină și-a dezvoltat propriile modele și abordări pentru oglindirea domeniului de interes specific. Ea include și conceptele și activitățile conexe: identificarea și simularea.

**E.** În unele discipline clasice apar domenii noi (meta-matematica algebrei etc.), care dau noi interpretări conceptelor clasice. Se redă una dintre acestea în cele ce urmează.

Fie  $F$  o teorie (neformală) și fie  $D$  o mulțime nevidă - numită domeniul de interpretare. O interpretare  $I$  a lui  $F$  în  $D$ , face să corespundă fiecărui obiect primitiv din  $F$ , un obiect cu același "caracter" construit în  $D$ .

Fie o interpretare  $I$  a lui  $F$  într-un sistem  $M$ , și fie  $S$  o propoziție în  $F$ . Datorită interpretării  $I$ , termenii primitivi din  $F$ , ce apar în  $S$ , au un anumit sens; este vorba, în acest caz, de o interpretare a lui  $S$  în  $M$ . Dacă o interpretare a lui  $S$  în  $M$  e o propoziție adevărată în  $M$ , se spune că  $S$  este adevărat în  $M$ , sau că  $M$  este un model al lui  $S$ . Dacă  $M$  este un model al mulțimii axiomelor lui  $F$ ,  $M$  este un model al lui  $F$ .

## 2.4.2 Conceptul de modelare

### 2.4.2.1 Semnificația și conținutul conceptului

A. În sens restrâns, **modelarea** reprezintă activitatea de elaborare propriu-zisă a modelului unui sistem sursă; activitățile desfășurate în acest scop sunt materializate și prin:

- ◇ tehnici și proceduri ce derivă din activități de identificare;
- ◇ tehnici ce derivă din activități de simulare;
- ◇ tehnici și proceduri complementare.

Etapele prin care se realizează, la modul clasic, modelarea în sens restrâns sunt, în general, următoarele:

- a) construirea modelului pe baza:
  - ◆ analizei preliminare a sistemului sursă în vederea evidențierii parametrilor relevanți și a legăturilor funcționale dintre ei;
  - ◆ stabilirii unei structuri a modelului;
  - ◆ stabilirii valorilor parametrilor definitorii ai modelului;
- b) analiza modelului, prin simulare;
- c) compararea rezultatelor analizei cu datele de comportare a sistemului sursă în condiții echivalente;
- d) corectarea modelului, în sensul apropierii comportamentului de cel al sistemului sursă.

Activitățile propriu-zise pe care le desfășoară investigatorul țin, în mare măsură, de identificare.

B. În sens mai larg, prin modelare se înțelege metoda de studiu bazată pe utilizarea modelelor, metodă la care apelează, la ora actuală, cvasi-totalitatea cercetătorilor din toate domeniile tehnice (și nu numai). În ultimă instanță, în această semnificație metoda cuprinde conținutul Teoriei Generale a Modelării.

### 2.4.2.2 Aprecierea calității modelelor

**Calitatea** unui model este exprimată, în primul rând, de **fidelitatea** cu care modelul reproduce comportamentul cunoscut al sistemului modelat. Comportamentul modelului este relevat prin *funcționare*, deci în cadrul operațiilor conexe modelării, care țin de **simulare**. Fidelitatea depinde de următoarele :

- corectitudinea cu care s-a efectuat aprecierea a ceea ce este esențial, relevant pentru scopul urmărit;
- procedeele de constituire a modelului;
- calitatea și cantitatea cunoștințelor disponibile care au putut fi și utilizate.

Cele de mai sus se pot constitui în criterii de fidelitate, cu ajutorul cărora pot fi diferențiate calitativ modelele unui sistem sursă. Aceste criterii influențează parcurgerea etapelor c) și d) ale construirii modelului (subcapitolul 2.4.2.1).

Calitatea unui model mai este determinată și de alte aspecte: simplitatea, inteligibilitatea, costul etc.

## 2.4.3 Clasificarea modelelor ([Luc99c], [Luc99d])

În continuare se va analiza modelul exclusiv prin prisma posibilităților sale de oglindire a sistemului sursă (prin calitatea sa de a fi model propriu-zis). Clasificarea prin prisma calității sale de sistem este - prin natura lucrurilor - identică cu cea prezentată în

subcapitolul 2.3.3.2. Alte aspecte ale acestei calități vor fi analizate în subcapitolul următor.

**Esența funcțional-comportamentală** a sistemului sursă este obiectul interesului investigatorilor-modelori; pentru cunoașterea acesteia se inițiază procesul de modelare. În general, prin relevarea acestei esențe, este implicit relevată și *structura configurației geometrico-spațiale* a sistemului sursă mecanic sau mecatronic (la roboții industriali spre exemplu). De foarte multe ori, configurațiile geometrico-spațiale iau forma unor structuri de rezistență pentru susținerea componentelor funcționale, dar pot exista și cazuri în care acestea nu sunt relevante funcțional, fiind totuși **elemente** ale sistemului sursă. Definitivarea completă a acestor configurații geometrico-spațiale se realizează prin procedeele și tehnicile specifice de **modelare geometrică** ([Sav97], [Luc98e]). Modelul geometric rezultat face parte dintr-un subset de modele (în sens general), atașat celui care relevă esența funcțional-comportamentală.

Criteriile de clasificare cunoscute se referă la această din urmă esență și diferențiază modelele, cu observația că, în afara celor prezentate în continuare, pot exista și altele, funcție de specificitatea domeniului din care face parte sistemul sursă. O posibilă prezentare – cu un suficient grad de generalitate - a taxonomiei modelelor este redată în continuare.

A. *Funcție de materialitatea lor*, modelele pot fi **abstracte (teoretice, matematice)** sau **materiale (fizice, replici)**.

AI. Modelele **abstracte** pot fi diferențiate funcție de modul de abordare de către modelor și de profunzimea cunoștințelor sale despre sistemul sursă:

- a) funcție de forma de prezentare, care poate fi:
- clasică, a relațiilor matematice:
    - ◆ **matematic-analitice**, la care sunt luate în considerare cunoștințe despre proprietățile sistemului sursă atât din punct de vedere calitativ, cât și cantitativ; pentru a construi modelele se pornește, de obicei, de la legi fizice care se pot concretiza în relații matematice; legile lui Kepler oferă un astfel de model;
    - ◆ **matematic-analogice**, care utilizează o presupusă analogie cu un sistem cu legi fizice cunoscute, caz în care modelul se bazează pe un ansamblu de ipoteze din care pot fi deduse consecințe comportamentale ale modelului;
  - mulțimi de date corelate de intrare și de ieșire;
  - descriptivă, legată într-o anumită măsură și de o prognoză comportamentală, destinată să explice comportamentul sistemului sursă (răspunde la întrebarea *cum este?* sau *cum va fi ?*); este cel mai des utilizată în medicină;
- b) funcție de aspectul sistemului sursă care interesează:
- ◇ modele la care se urmărește compoziția, structura internă a sistemului de modelat; modelul este numit **conceptual** în unele surse bibliografice; fixează legăturile cu caracter de legitate între variabilele caracteristice ale sistemului sursă;
  - ◇ modele la care interesează doar comportamentul, în sensul cunoașterii intrărilor și ieșirilor corespunzătoare ale sistemului (sistem considerat *cutie neagră*); este denumit și model **informațional**, pentru că la construirea modelului se ține cont doar de informații, sub forma unor valori concrete ale unor variabile de intrare/ieșire (pe baza acestora se pot desfășura operații de conducere a sistemului sursă, modelul servind acestui scop);
  - ◇ modele **hibride**, la care participă ambele aspecte.

Modelul conceptual este, deci, o construcție de legături logico-matematice între variabilele definiției ale sistemului sursă, pe când cel informațional se bazează pe informații care sunt oferite în exterior în timpul funcționării. În practică se preferă modelele hibride, în care se realizează un echilibru adecvat între aspectul informațional și aspectul conceptual.

A2. Modelele **materiale** (fizice, concrete, substanțiale, replici) permit rezolvarea pe cale experimentală a unor probleme care nu pot fi rezolvate pe cale analitică, logico-matematică, fie datorită necunoașterii metodelor de calcul adecvate, fie datorită gradului mare de complexitate a acestora, conducând la activități mult prea laborioase și costisitoare.

Funcție de natura acestor modele, se disting:

- a) modele **similare**, de aceeași natură cu sistemul sursă, care diferă de acesta din urmă doar prin numărul sau valoarea dimensiunilor sau caracteristicilor; se bazează pe *teoria similitudinii*, fiind utilizate frecvent în inginerie (construcții de clădiri/drumuri/poduri, construcții de mașini, hidrotehnică/pneumotehnică); în domenii specifice, precum hidraulica sau aerodinamica, nu se poate concepe nici un studiu serios fără a se apela la astfel de modele, care poartă uzual denumirea de *machete*; au fost chiar dezvoltate tehnici de modelare prin similitudine distincte, adecvate unor subdomenii din hidraulică și aerodinamică;
- b) modele **analoage**, bazate pe fenomene diferite de cele din sistemul sursă, dar la care relațiile matematice care descriu comportamentul modelului au aceeași formă cu cele care guvernează sistemul sursă.

*Analogia* ([Nic77]) este o noțiune ce își are originea în matematici, indicând identitatea raporturilor dintre diferite mărimi. Ea s-a extins la filozofie, unde indică asemănarea raporturilor între lucruri diverse (similare, dar nu egale). Astfel, la Aristotel se întâlnește atât proporția în sens matematic, cantitativ, cât și proporția în sens general, "analogic". Din acest punct de vedere, Aristotel operează și cu raționamentul prin analogie, în sens contemporan, deși acesta nu intervine în gândirea sa sub această denumire. Cuvântul *analogie*, utilizat în numeroase limbi moderne, provine din elinul *analogia*, care la rândul său provine din unirea termenilor *ana* și *logos*, ultimul având și sensul de raport (inițial raport matematic între două numere). Este sigur că termenul de *logos*, înțeles ca raport a două mărimi, a fost tradus în limba latină prin *proportio*. Etimologia este încă discutată.

Actualmente, în *filozofie*, prin analogie se înțelege asemănare parțială sau într-o anumită privință între obiecte sau fenomene ([EPO73]). În *logică*, analogia este o formă specială de raționament, când, pe baza asemănării a două obiecte în ceea ce privește unele caractere, se trage concluzia asemănării lor și în ceea ce privește alte caractere. *Raționamentul prin analogie* este, deci, definit ca o inferență probabilă, care constă în a conchide că unui obiect *B* îi aparține o anumită însușire, pe baza faptului că această însușire aparține obiectului *A* și a constatării că obiectele *A* și *B* au mai multe însușiri esențiale comune.

B. *Funcție de posibilitatea de structurare de modele elementare (subsisteme-model)*, pot fi diferențiate:

B1. modele **sintetice**, la care sunt prezentate proprietățile relevante într-un tot cvasi-unitar;

B2. modele **structurate (modulare)**, constituite dintr-unul sau mai multe modele elementare, acestea din urmă relevând și considerând determinant doar un singur aspect al structurii sau comportării.



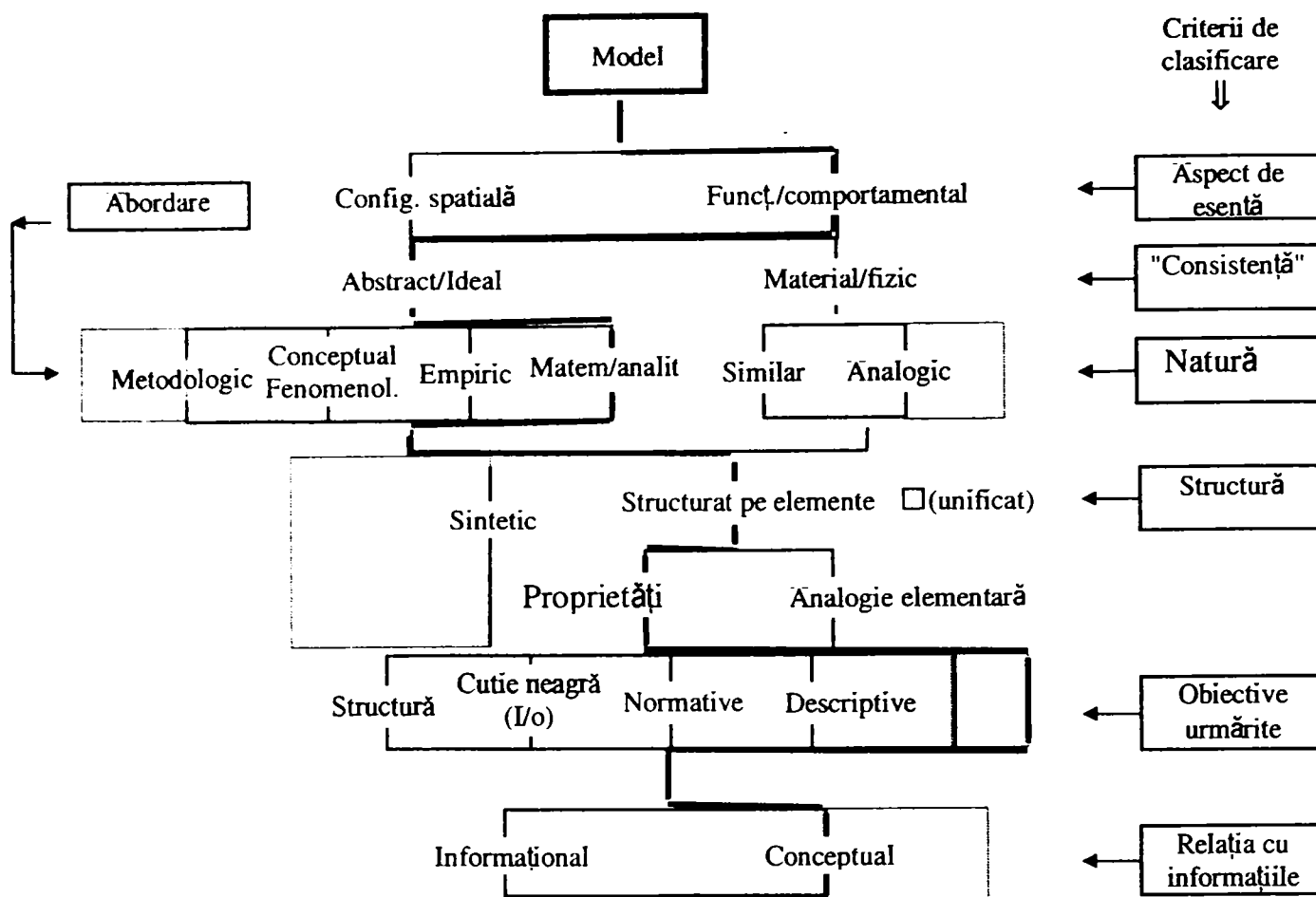


Fig. 2.4 Taxonomia modelelor conform surselor bibliografice

**Observații**

1. Reunirea proprietăților unui model de tipul B2 ("unificarea") conduce la respectivul model structurat. În acest caz operația poate fi denumită de "unificare" și este utilizată sub această denumire pentru a fi relevat modul de structurare a modulului-interfață inteligent, de la capitolul 4.

2. Cercetarea bibliografiei a relevat o multitudine de modalități și criterii de clasificare, dependent de punctul de vedere al autorilor și de domeniul de referință analizat. Din această cauză (conform celor enunțate la subcapitolul 2.4.5) graful ierarhic rezultat drept imagine a taxonomiei modelelor de la figura 2.4 nu are – în opinia autorului – un grad ridicat de generalitate. O posibilă reprezentare care ar satisface într-o mai mare măsură astfel de cerințe de generalitate este prezentată în figura 2.5 (evident, partea care se referă la "esența de tip model").

**2.4.4 Modelul privit prin prisma esenței sale de sistem**

Modelul este, în ultimă instanță, un sistem, care evidențiază și reprezintă aspectele esențiale ale unui sistem sursă, aspecte care relevă cunoștințele asupra acestui sistem sub o formă utilizabilă.

Pe baza celor cunoscute din teoria sistemelor, este evident că dacă sistemul sursă S are structura  $\langle U, X, Y, d, l, t \rangle$ , atunci modelul lui S este doar un alt sistem S' cu structura  $\langle U', X', Y', d', l', t' \rangle$ , utilizat drept înlocuitor al lui S pentru anumite scopuri

specifice. Teoria modelării optează pentru cele mai potrivite relații, din varietatea celor posibile între aceste două sisteme, în vederea realizării scopului propus. Aceste relații oglindesc *echivalența* dintre aceste două sisteme, reprezentată printr-o funcție matematică stabilită pe baza unui **criteriu**, a **pierderilor**, sau a **erorii**. Echivalența dintre sistemul sursă și modelul său se exprimă astfel:

$$E_c = E'(y, y_m) \quad (2.14)$$

unde  $E_c$  este echivalența, iar  $y$  și  $y_m$  - ieșirea sistemului, respectiv a modelului.

Prin analiza echivalenței se pot trage concluzii asupra gradului de fidelitate cu care modelul oglindește sistemul sursă.

### 2.4.5 Caracterizarea sintetică sub formă ierarhizată a modelelor și sistemelor ([Ben95], [Luc99h], [McG92])

Teoria generală a modelării oferă o mulțime de mijloace și tehnici prin care se desfășoară activitățile specifice care duc la cunoașterea unui sistem sursă prin intermediul unui model adecvat. Este de la sine înțeles că există specificități funcție de tipul sistemului precum și de domeniul din care acesta face parte, de asemenea și funcție de modul în care se realizează modelarea propriu-zisă.

Diferențierea modelelor în funcție de mai multe criterii (în cazul în care la identificarea primară a tipului de model se constată o asemenea necesitate), îngreunează înțelegerea și abordarea caracteristicilor sale. De aceea este deosebit de importantă dezvoltarea clară și exactă atât a categoriei din care face parte sistemul sursă, cât și a modalității în care se face oglindirea acestuia. Uzual, această caracterizare se efectuează apelând la metodele de clasificare prezentate în literatură, relevate în subcapitolul 2.4.3.

Mai nou, în unele surse bibliografice ([Ben95]) se propune o prezentare sintetică, sub forma unui graf ierarhic, a caracteristicilor modelelor, prezentare care le conferă o mai mare acuratețe și exactitate. Clasificarea ierarhică a unui model conține aspectele relevante conferite atât prin esența sa de model, cât și prin calitatea de a fi sistem.

În figurile 2.4 și 2.5 se propune o astfel de clasificare ierarhică a modelelor, la care în partea dreaptă a grafului sunt evidențiate - în majoritate - criteriile de clasificare, funcție de care - în dreptul acestora - sunt plasate centrat, categoriile posibile, corespunzătoare, de modele. Graful de identificare sintetică (evidențiat prin linia îngroșată) parcurge un traseu determinat, realizând astfel selecția categoriei de model căruia îi aparține, dependent de criteriul în dreptul căruia se află nivelul de selecție respectiv. În general, pot fi evidențiate și traseele de ocolire la fiecare nivel, în cazul în care criteriul de clasificare nu este relevant pentru un caz concret. Trecerea de la un nivel la altul de clasificare se poate face și direct, fără ramuri suplimentare de legătură.

În partea inferioară a grafului, care se referă la esența de tip sistem a modelului, s-a recurs la un exemplu fără trasee de ocolire, care poate fi aplicat doar dacă criteriul respectiv de clasificare este obligatoriu pentru caracterizarea modelului. Linia de identificare conține în această parte a grafului segmente suplimentare de legătură între nivelurile de clasificare. În funcție de domeniul și cazul studiat, se poate recurge la modalități mixte de trasare a grafurilor, cu observația că pot exista și alte criterii de clasificare decât cele evidențiate în figură. Pentru diferite domenii tehnico-științifice, pot fi alcătuite grile ierarhice unificate, cu ajutorul cărora identificarea sintetică ierarhizată poate fi efectuată rapid, aceasta constituind și un bun indiciu asupra

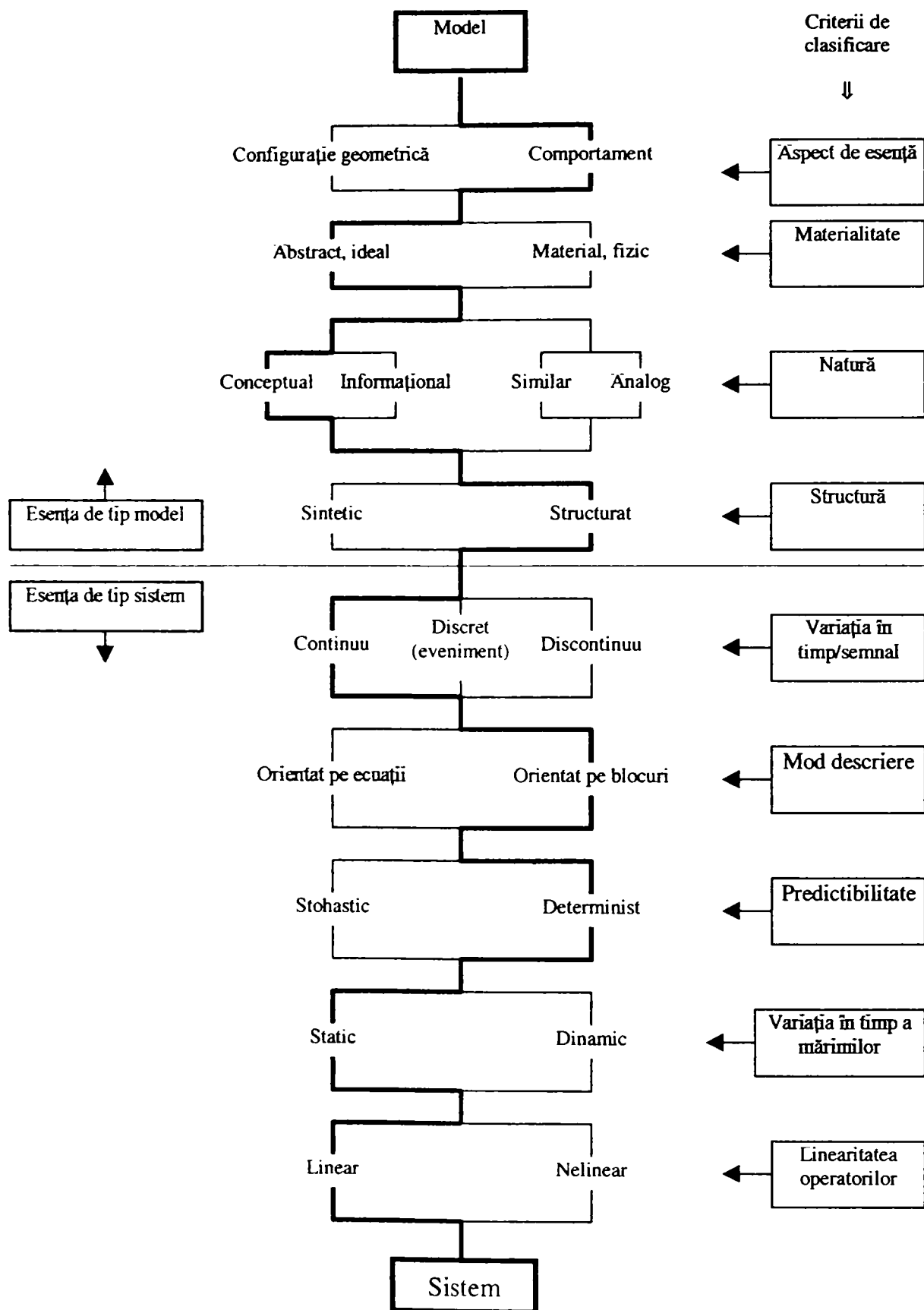


Fig. 2.5 Clasificarea ierarhică complexă a modelelor

procedurilor și activităților concrete de desfășurat pentru realizarea cunoașterii complete a sistemului sursă prin intermediul modelului.

## 2.4.6 Modalitățile de descriere și prezentare a modelelor

Deoarece modelele sunt tratate ca sisteme, se vor aplica modalitățile de prezentare și descriere grafică specifice sistemelor, prezentate în subcapitolul 2.3.3.4: schemele funcționale, schemele bloc, grafurile de fluentă, schemele de principiu etc.

## 2.4.7 Tendințe actuale în abordarea teoriei modelării

O tendință nouă în abordarea teoriei modelării constă în reconsiderarea rolului conferit mijloacelor cu ajutorul cărora se desfășoară majoritatea activităților legate de modelare.

Se distinge în acest sens abordarea lui B.P. Zeigler din 1976 ([McG92]), care a construit **Teoria Modelării** drept o *structură coerentă alcătuită din cinci elemente de bază*, elemente interconectate prin așa-numitele *relații de modelare* specifice (figura 2.6). Această structură integrează în mod natural calculatorul electronic, fără de care nici nu se pot imagina procesele de modelare.

### 2.4.7.1 Elementele de bază ale teoriei modelării enunțate de Zeigler

Elementele de bază ale teoriei modelării sunt definite cu ajutorul conceptelor din teoria sistemelor și constau din:

**A. Sistemul real** (echivalentul sistemului sursă din capitolele precedente), care constituie **sursa** datelor observabile, care sunt, de foarte multe ori, perechi de date intrare/ieșire  $(u(t), y(t))$ .

**B. Modelul-bază**, care constituie imaginea sau modelul mental prin care investigatorul-modelor percepe sistemul real. Este un sistem capabil să redea, în ultimă instanță ipotetic, întregul comportament al acestuia. Complexitatea mare a sistemului real determină o complexitate similară a modelului-bază. De obicei, costurile de realizare a acestuia sunt prohibitive, durata nedeterminată, iar dificultățile de realizare insurmontabile. Practic, din această cauză, structura modelului de bază este, în cel mai bun caz, parțial cunoscută de către investigator.

**C. Cadrul experimental** reprezintă setul de circumstanțe limitate în domeniul cărora sistemul real va fi observat și înțeles cu scopul de a se executa modelarea. Este de fapt un set restrâns al mărimilor comportamentale de la ieșire:

$$(u(t), y(t))_E \subseteq (u(t), y(t)) \quad (2.15)$$

**D. Modelul concentrat** (în limba engleză: *lumped-model*) este conceptul cel mai apropiat de cel de model propriu-zis din abordarea clasică, tradițională. Reprezintă sistemul capabil să reproducă comportamentul la ieșire al sistemului real prin prisma limitărilor impuse de cadrul experimental. Este de fapt o simplificare explicită și realizare parțială a modelului de bază. Structura sa este complet cunoscută de către investigator.

**E. Calculatorul** este mijlocul cu ajutorul căruia este generat comportamentul modelului concentrat. Nu este obligatoriu ca acesta să fie digital (numeric), iar pentru modelele simple, poate fi evitat prin rezolvarea manuală a ecuației modelului pentru obținerea unor soluții analitice explicite. Pentru modele mai complexe, uneori, calculatorul poate necesita generarea unor "traietorii" individuale pas cu pas, algoritmul fiind bazat pe instrucțiuni furnizate de model. Acest proces pas cu pas este asociat din ce în ce mai des cu conceptul de simulare, fiind condus uzual de un

calculator digital.

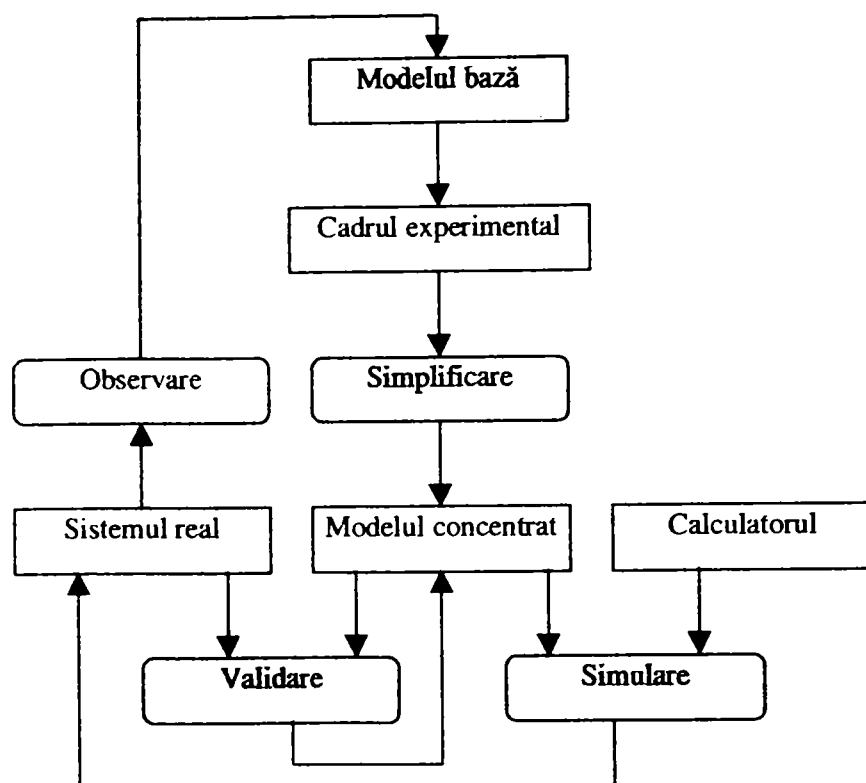


Fig. 2.6 Abordarea structurală a teoriei modelării

#### 2.4.7.2 Relațiile de modelare

Relațiile de modelare sunt stabilite, prin această teorie a modelării, între elementele de modelare, după cum urmează.

**A. Validarea.** Conține relațiile dintre model și sistemul real. Obiectivul validării îl constituie asigurarea faptului că modelul urmărește sistemul real, de fapt constatarea că acele concluzii rezultate din operarea modelului sunt concluzii rezonabile pentru sistemul real. Modelul de bază este deplin valid dacă reproduce cu fidelitate comportamentul sistemului real în toate cadrele experimentale. Pe de altă parte, modelul concentrat este valid dacă urmărește cu fidelitate sistemul real prin acel cadru experimental pentru care a fost definit. Pot exista mai multe modele concentrate valide, iar fiecare dintre aceste modele concentrate poate fi valid doar într-un cadru experimental determinat și nu în altele.

Validarea modelelor este un demers dificil. Există mai multe niveluri diferite de validare și respectiv interpretări diferite ale validării. Pot fi oferite spre exemplu mai multe forme de validare:

- modelul are **validitate aparentă** dacă este acceptat drept rezonabil de către cercetătorii avizați asupra sistemului în cauză;
- modelul este **valid la modul replicativ** (fiind o **replică**) dacă “trajectoriile” sale urmează datele de intrare/ieșire ale sistemului real;
- modelul este **predictiv valid** dacă “trajectoriile” sale urmează date experimentale care nu au fost utilizate în realizarea sa;
- modelul este **structural valid** dacă este comportamental valid și dacă urmează structura modelului de bază; mai exact, dacă are comportamentul generat în cadrul

său experimental într-un mod substanțial asemănător cu cel despre care se crede că va fi generat de sistemul real (sistemul sursă).

**B. Simplificarea.** Conține relațiile dintre modelul de bază și modelele sale concentrate asociate. Obiectivul simplificării este realizarea celui mai eficient model concentrat în interiorul cadrului experimental pentru care a fost definit. Simplificarea se poate efectua în diferite moduri și presupune:

- renunțarea la variabilele relativ nesemnificative și la structurile asociate acestora;
- înlocuirea variabilelor și structurilor deterministe cu variabile aleatoare și funcțiile lor generatoare;
- structurarea unui șir de variabile descriptive;
- agregarea variabilelor și structurilor descriptive în blocuri general funcționale.

De reținut că multe din conceptele formale ale simplificării, cum ar fi cele de isomorfism și omomorfism constituie conservarea similarităților structurale dintre sisteme matematice.

**C. Simularea.** Conține relațiile dintre model și calculator. Obiectivul simulării este asigurarea că mijlocul de calcul reproduce cu fidelitate comportamentul indus de model. Comportamentul modelului concentrat trebuie să ofere posibilitatea distincției dintre modelul bază și cel rezultat în urma implementărilor computerizate sau soluțiilor sale, în același mod în care comportamentul sistemului real poate fi deosebit prin validitatea modelelor sale. În aceeași măsură în care, pentru modelare, trebuie realizat un model valid, este de asemenea necesar a efectua o simulare corectă. Altfel, soluția modelului adoptat nu poate fi utilizată pentru a trasa concluzii asupra sistemului real. Ideile formale asociate cu simularea includ atât consistența cât și ambiguitatea implementărilor prin calculator. Procesul de simulare cu modelul concentrat poate fi o verificare. Multe dintre tehnicile utilizate la validarea modelelor sunt de asemenea utilizate și la verificarea simulărilor.

## 2.5 Destinațiile modelelor

Există uzual trei procese care motivează inițierea procesului de modelare (în sens restrâns): cercetarea, proiectarea și conducerea ([Căl88], [Dra79], [Eyk77], [Rom88], [Sam66], [Sav97], [Shi69], [Shi97], [Sim87], [Voi80]).

### 2.5.1 Cercetarea

Cercetarea urmărește dobândirea unor cunoștințe noi asupra unui sistem, relevarea unor aspecte necunoscute, urmând ca acestea să fie eventual utilizate pentru:

- a) îmbunătățirea condițiilor de rezolvare a celorlalte două procese amintite;
- b) o nouă interpretare, mai adecvată, a cunoștințelor sau datelor de măsurare dobândite;
- c) operații de diagnosticare;
- d) dobândirea de noi cunoștințe în domenii conexe.

### 2.5.2 Proiectarea

Proiectarea poate avea ca finalitate un obiectiv (produs) nou sau sporirea performanțelor unuia existent. În cadrul procesului de proiectare, cunoștințele trebuie

exprimate într-un model compatibil cu criteriile de proiectare: stabilitatea, criteriul erorii, productivitatea, siguranța intrinsecă, fiabilitatea, mentenabilitatea, accesibilitatea. Utilitatea finală a modelării sistemelor pentru proiectare (totodată și urmarea ei firească) este fabricația, urmată de exploatare, întreținere.

## 2.5.3 Conducerea sistemelor

### 2.5.3.1 Semnificația conceptului de conducere

Se definește **procesul tehnic** drept ansamblul transformărilor și transferurilor deterministe sau stohastice de materie, energie sau informație dintr-un sistem fizic ale cărui mărimi caracteristice pot fi măsurate și modificate prin mijloace tehnice. Suma condițiilor care se pun mărimilor de ieșire  $y_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , poartă denumirea de **algoritm de funcționare** (AF).

**Conducerea** unui proces tehnic constă în suma operațiilor efectuate în vederea stabilirii (impunerii) pentru procesul tehnic în cauză, a algoritmului de funcționare.

**Reglarea** reprezintă o conducere a sistemului în funcție de cunoștințele disponibile asupra lui.

### 2.5.3.2 Incertitudinea în procesele de conducere

Un factorul comun și persistent care își face apariția totdeauna în procesele reale este **incertitudinea**. Elementele de incertitudine sunt introduse de **perturbații**. La rândul lor, acestea pot proveni din exterior (din mediu) sau din interiorul procesului studiat (datorită uzării, îmbătrânirii, sau altor cauze). Perturbațiile poartă, în anumite situații, denumirea de zgomot.

**Perturbația** este un factor, (de regulă) de mică intensitate, care modifică, (se precizează din nou: de regulă) foarte puțin, starea sau evoluția normală a unui sistem; este un element care provine de la altă sursă decât cele dorite, o modificare incidentală.

**Zgomotul** este un semnal nedorit care se suprapune peste semnalele utile în timpul transmiterii sau prelucrării acestora.

### 2.5.3.3 Sistemele automate

A. Pentru combaterea incertitudinii, se atașează sistemului - proces tehnic componente, elemente (dispozitive) și legături care se constituie într-un sistem specific: **dispozitivul automat** (DA), iar procesul tehnic devine un sistem automat (cu reglare - SAR) Suma activităților care conduc la astfel de structuri poartă denumirea de **automatizare**.

B. Taxonomia SAR

#### a) SAR funcție de eroare

Funcțiile DA ale acestora sunt următoarele:

- ◇ supraveghează ieșirile procesului tehnic;
- ◇ compară valorile acestora cu valorile dorite (prescrise);
- ◇ funcție de eroarea constatată, comandă procesul tehnic în vederea corectării acestei erori; comanda se desfășoară după un algoritm bine determinat care se numește **lege de reglare** (sau lege de conducere).

Calea de transmitere a informației de la procesul tehnic la DA se numește **cale de reacție**. Existența acesteia este caracteristica fundamentală a unui SAR, iar un astfel

de SAR se numeste SAR după eroare.

#### b) SAR adaptive

La sistemele la care apar perturbații interioare (se modifică parametrii cu valori semnificative), se apelează la identificare pentru determinarea valorilor reale ale parametrilor sistemului, după care DĂ adaptează sistemul modificându-i parametrii la valorile prescrise.

Conducerea adaptivă se poate aplica și în cazuri în care nu apar perturbații interioare, ci doar exterioare, dar pentru care se încearcă o compensare prin modificarea corespunzătoare a parametrilor sistemului.

#### c) SAR cu reglare *optimală*

Ăcestea se întâlnesc, de exemplu, în cazul sistemelor auto-optimizante din economie.

#### C. Proiectarea sistemului de reglare

La proiectarea sistemului de reglare, în primă fază, există, de obicei, cunoștințe puține despre stabilitatea sistemului sursă și despre posibilitățile reale de ameliorare prin procedeele uzuale prezentate. Chiar dacă se cunosc ecuațiile care guvernează sistemul, există de obicei și parametri necunoscuți. De aceea, activitatea de proiectare a sistemului de reglare este în permanentă și strânsă corelație cu activitatea de identificare, apelând la acea latură care, prin efectuarea de experimente, oferă cunoștințele care lipsesc. În final trebuie obținute modelele parametrice necesare.

În teoria clasică a reglării, procedeele utilizate în acest scop au fost procedeele de analiză în frecvență, care reușeau să determine funcția de transfer conținând modelele parametrice în funcție de ecuațiile de stare. Ăceste funcții reprezentau o sinteză de relații matematice și diagrame. Cu ajutorul acestei analize (bazate pe răspunsurile sistemului la anumiți stimuli) se poate estima comportamentul sistemului sursă prin studiul intrărilor și ieșirilor fără a se cunoaște în detaliu structura propriu-zisă a sistemului. Se poate, deci, ajunge la cunoașterea în detaliu a sistemului (inclusiv a prezumtivei sale structuri) prin cunoașterea condițiilor externe și a naturii sistemului (principiul *cutiei negre*).

#### 2.5.3.4 Regimurile de conducere

Ă. Regimul pentru **condiții normale de funcționare**, caz în care se apelează la reglarea cu buclă de reacție inversă sau directă; se uzează de procedee de reglare intermitentă sau adaptivă și se poate urmări o optimizare statică sau dinamică a sistemului.

B. Regimul de **urgență**, care are loc pe baza unor informații despre tipul și gradul urgenței (este evident cazul unor avarii parțiale, nu totale).

C. Regimurile **tranzitorii** (de pornire/oprire etc.) caz în care se face o reglare a treptelor de funcționare tranzitorii în funcție de parametri și de variabilele de stare ale procesului.

#### 2.5.3.5 Observații

Ă. Referitor la procesele de reglare, scopul modelării este de a ajuta la elaborarea unei strategii de conducere.

B. Ăctivitățile desfășurate pentru realizarea sistemului de conducere/reglare se bazează pe **teoria reglării**, aflată în strânsă corelație cu teoria sistemelor.

C. Procedeele utilizate pentru reglare pot fi aplicate diferențiat pe domenii:

a) în domeniul **tehnic**, necesitățile de reglaj cresc în permanență; se reglează de la procesele cele mai simple la cele industriale de mare complexitate;



- b) în **societate**, reglarea poate fi făcută prin procese de conducere (de fapt este o încercare de conducere a unor sisteme);
- c) în sistemele **vii** (inclusiv în procese ecologice care constau dintr-o mulțime de interconectivități de subsisteme) există în mod natural numeroase bucle de reglare.

D. Majoritatea aplicațiilor și studiilor de caz din literatura aferentă domeniului identificare/modelare/simulare se referă la procesele de reglare-conducere a sistemelor din diferite domenii de activitate particulare. Acestea fac apel la tehnici de identificare și simulare, astfel că o delimitare strictă, după titlurile surselor, a zonei de interes, nu se poate realiza, fiecare punând în lumină un aspect particular al activităților care rezolvă problemele studiate prin teoria generală a modelării.

## **2.6 Identificarea - proces esențial în construcția modelelor ([Bus92], [Dav86], [Eyk77], [Eyk81], [Kli95], [Lan90], [Lan97], [Let98], [Pen71], [Rad79], [Ter86], [Ter80], [Voi93])**

### **2.6.1 Semnificația conceptului de identificare**

În 1962, L.Ă. Zadeh a enunțat una din primele definiții formale moderne ale identificării. Potrivit acesteia, identificarea constă în "*determinarea pe baza intrării și ieșirii, a unui sistem dintr-o clasă determinată de sisteme față de care sistemul considerat este echivalent*". Această definiție însă relevă doar una din căile (de cele mai multe ori cale experimentală) prin care sunt dezvăluite caracteristicile sistemului sursă, respectiv una din posibilitățile de oglindire, printr-o abordare de tip "cutie neagră" a modelului său. Abordare justificată prin faptul că există un număr deosebit de mare de aplicații la care tocmai aceasta este modalitatea prin care se realizează identificarea. Din această cauză, în foarte multe surse bibliografice conceptul de identificare se reduce exclusiv la o abordare de acest tip.

O definiție completă a identificării - în contextul Teoriei Generale a Modelării - trebuie însă să țină seama atât de conținutul conceptului de identitate așa cum este definit în literatură, cât și de cel de esență al obiectului investigației - definit drept sistem sursă.

Considerăm că enunțurile prezentate în cele ce urmează se pot constitui într-o astfel de definiție.

**Identitatea** se definește drept starea unui obiect, fenomen, proces (în final sistem sursă) de a fi ceea ce este, de a-și păstra un anumit timp caracteristicile fundamentale, individualitatea; respectiv de a fi el însuși.

Prin termenul de **identificare** în general, se înțelege totalitatea acelor activități și operații prin care se stabilește identitatea unui sistem sursă.

Având în vedere că sursa de la care se pleacă (și care trebuie modelată) are calitatea de a fi sistem, în esență, obiectul procesului de identificare este o descriere cât mai completă cantitativă și calitativă a funcționării, respectiv a existenței și stării sistemului-sursă. Descrierea va trebui să fie cât mai exactă sau măcar cu aproximație suficient de bună atât a caracteristicilor de comportament global (determinat de **structură**) pe de o parte a sistemului real (comportament static și dinamic) cât și

cunoașterea parametrilor respectiv a stării sistemului pe de altă parte. Sinteza celor două aspecte ar trebui redată sub forma unui model matematic și spre această finalitate tind cei care execută identificarea.

Caracteristicile sistemului-sursă (enunțate la capitolul 2.3.3.2: linear/nelinear, static/dinamic, determinist/stochastic etc) impun rezolvări diferențiate pentru problemele care apar în cursul procesului de identificare. Pe lângă acestea, trebuie ținut seama de finalitatea sistemului real, precizia dorită la abordare, mijloacele de investigație disponibile, și - nu în ultimul rând - considerațiile economico financiare.

În ultimă instanță, în contextul teoriei generale a modelării, prin **identificare** se înțelege una din modalitățile (căile) de determinare a modelului unui sistem-sursă. Aceste modalități sunt denumite în literatură **proceduri**. Scopul identificării îl reprezintă, deci, construcția modelului .

## 2.6.2 Construirea modelelor. Generalități. Proceduri.

### 2.6.2.1 Etapele identificării

Etapele ce se parcurg în procesul identificării sunt, în general, următoarele:

- ◇ alegerea structurii modelului pe baza cunoștințelor apriorice;
- ◇ potrivirea parametrilor cu datele disponibile;
- ◇ verificarea și încercarea modelului;
- ◇ aplicarea modelului la scopul dat.

În literatură se recomandă diferite proceduri de identificare/construire a modelelor, bazate pe etapele mari descrise mai sus.

### 2.6.2.2 Procedura propusă de P. Eykhoff

Eykhoff (1977) realizează atingerea unui model utilizabil pentru simulare (figura 2.7) mergând pe două căi distincte.

Ă. *Calea abstractă*, de tip *a priori*, pornește de la un bilanț de substanță, energie, sau informație ce are drept final un model matematic.

De foarte multe ori este dificil de a cuprinde în exprimări matematice întreaga complexitate de comportament a obiectului real. De aceea identificatorul trebuie să încerce simplificarea modelului . Cu cât acest model matematic e mai simplu, cu atât ușurința de studiere a modelului este mai mare.

Greutățile de ordin matematic de rezolvare fac deci utilă și obligatorie efectuarea unor aproximări simplificatoare. Acest lucru se realizează prin linearizarea ecuațiilor nelineare respectiv prin găsirea condițiilor în care procesul rămâne invariant sau prin găsirea condițiilor în care procesul respectiv poate fi descris pe porțiuni cu expresii mai simple.

Metodele acestea teoretice, matematice, impun atât elaborarea principială a modelului tehnic, cât și - obligatoriu - recurgerea la experimentări urmate de o analiză a rezultatelor obținute pentru a se raporta la obiectul/obiectivul real.

B. *Calea bazată pe experiment*, de tip *a posteriori*, oferă posibilitatea de verificare (sau construire și validare) de model pe baza culegerii și prelucrării datelor asupra comportamentului intrare/ieșire.

În foarte multe cazuri, pot fi cunoscute prin mijloace adecvate - cantitativ - doar intrările și ieșirile sistemului-sursă, iar concepția modelului se realizează prin prelucrarea cu ajutorul unui aparat matematic eficient cât mai simplu posibil a unor

rezultate experimentale, rezultate care să constituie o imagine cât mai adecvată a comportării sistemului în ansamblul de situații preconizate.

Etapele și conținutul operațiilor posibil de urmat (în varianta standard) sunt următoarele:

B1. Organizarea și realizarea experimentărilor pe proces constă în studiul comportamentului obiectivului pe baza sau ținând seama de:

a) culegerea informațiilor asupra obiectivului de studiat (chiar dacă sunt informații aproximative);

b) alegerea modalității de experimentare (în laborator sau "normală", asupra sistemului real, dacă este posibil acest lucru);

c) alegerea aparaturii de folosit, precum și

d) estimarea factorilor de perturbație.

B2. Efectuarea experimentului și prelevarea datelor în cursul acestuia.

B3. Interpretarea și prelucrarea datelor experimentale prelevate:

a) selecționarea și sistematizarea datelor obținute;

b) corectarea erorilor (de metodă, aparatură, transmitere);

c) prelucrarea statistică, determinarea funcțiilor de corelație, densitate spectrală, etc.

B4. Deducerea modelului prin utilizarea metodelor de aproximare matematică a rezultatelor interpretate și prelucrate (metode de minimizare a erorilor).

### **Observații.**

*Accentul în această succesiune de operații matematice pe care le execută investigatorul cade pe ante-experiment și post-experiment.*

*De fapt, procesul este iterativ, suportând corecturi succesive în funcție de criteriile impuse (în primul rând cel al erorii).*

*În unele surse bibliografice, conținutul conceptului de identificare se restrânge doar la construcția modelului bazat pe experiment.*

### **2.6.2.3 Alte proceduri de identificare**

A. Procedura Söderström și Stoica (1989) este prezentată sub formă de ordinogramă în figura 2.8 și accentuează etapele mari, principale, de parcurs.

B. Procedura propusă de R. Isermann în 1980 (figura 2.9) pune accentul pe obținerea modelului prin activități/operații orientate pe experiment asupra sistemului-sursă, diferențiind metodele de lucru după momentul de obținere relativ la perioada de funcționare a sursei și de tipul algoritmului. Validarea (implicită) a modelului se face pe baza criteriului eroare.

C. Procedura propusă de Terțişco, Stoica și Popescu (1980), ilustrată în figura 2.10 evidențiază cele două laturi - experimentală și teoretică - a activităților, pe care le detaliază într-o mai mare măsură. Apar distinct activitățile de validare și estimare, acest din urmă termen având o semnificație bine determinată în rândul specialiștilor care se ocupă cu identificarea (legată de parametri în primul rând, dar și de structură).

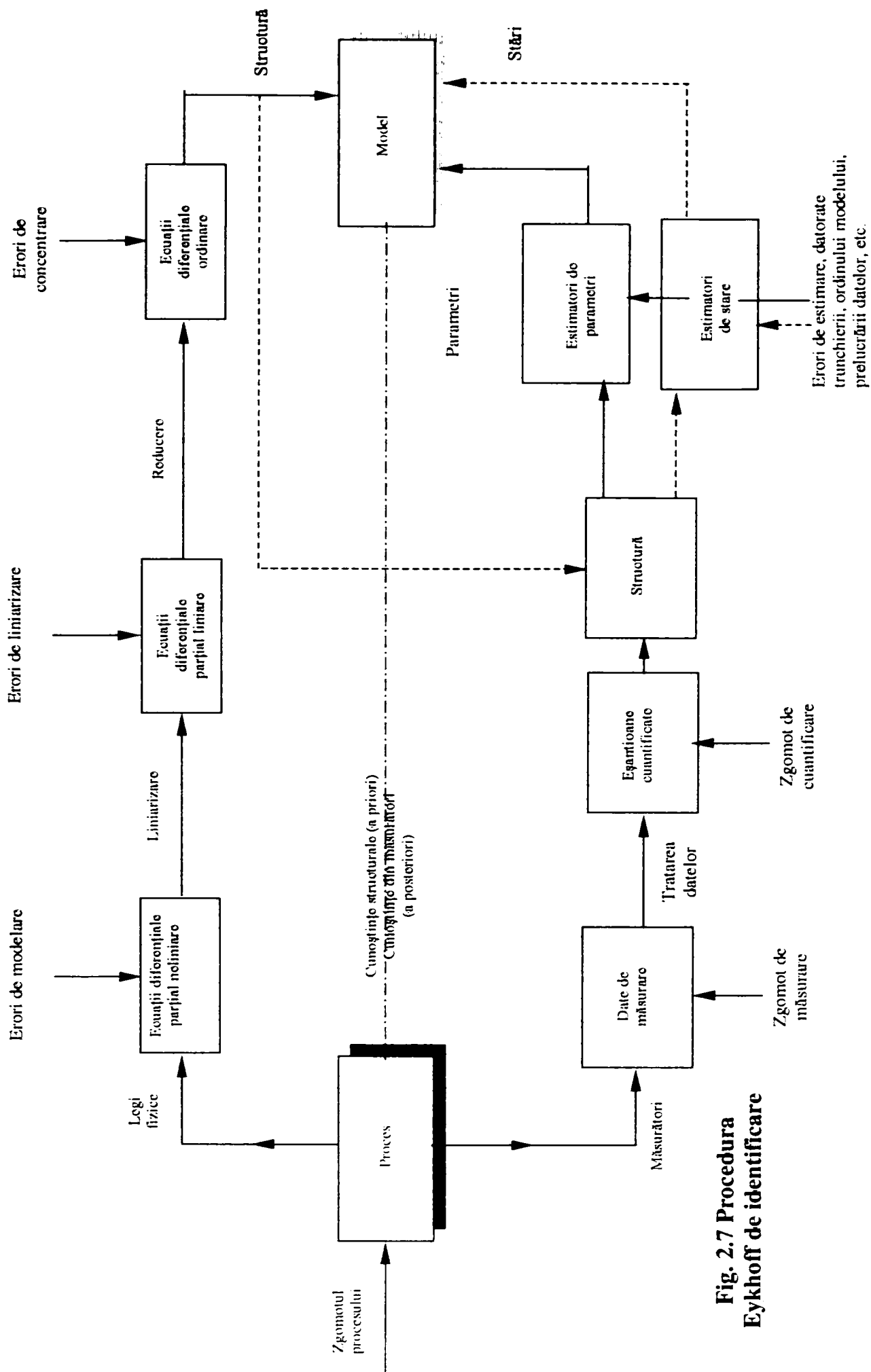


Fig. 2.7 Procedura Eykhoff de identificare

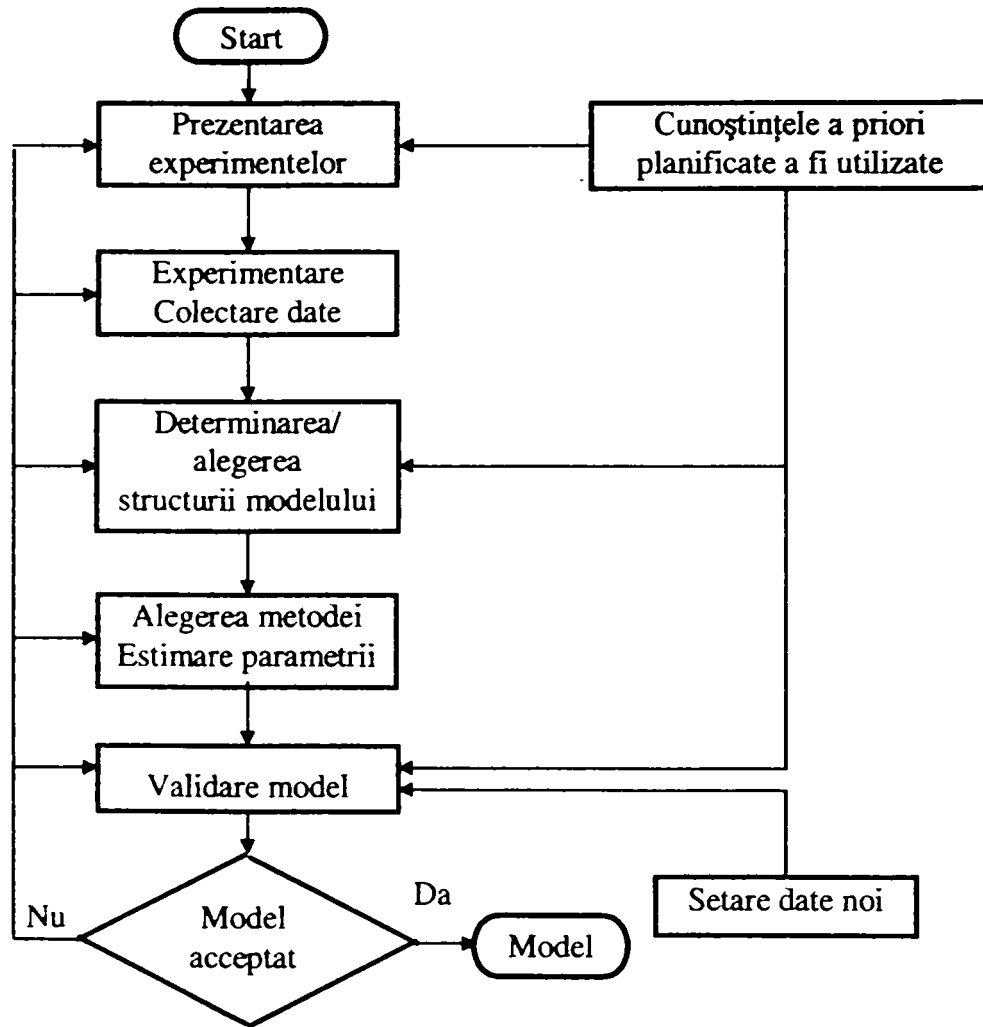


Fig. 2.8 Procedura Söderström și Stoica

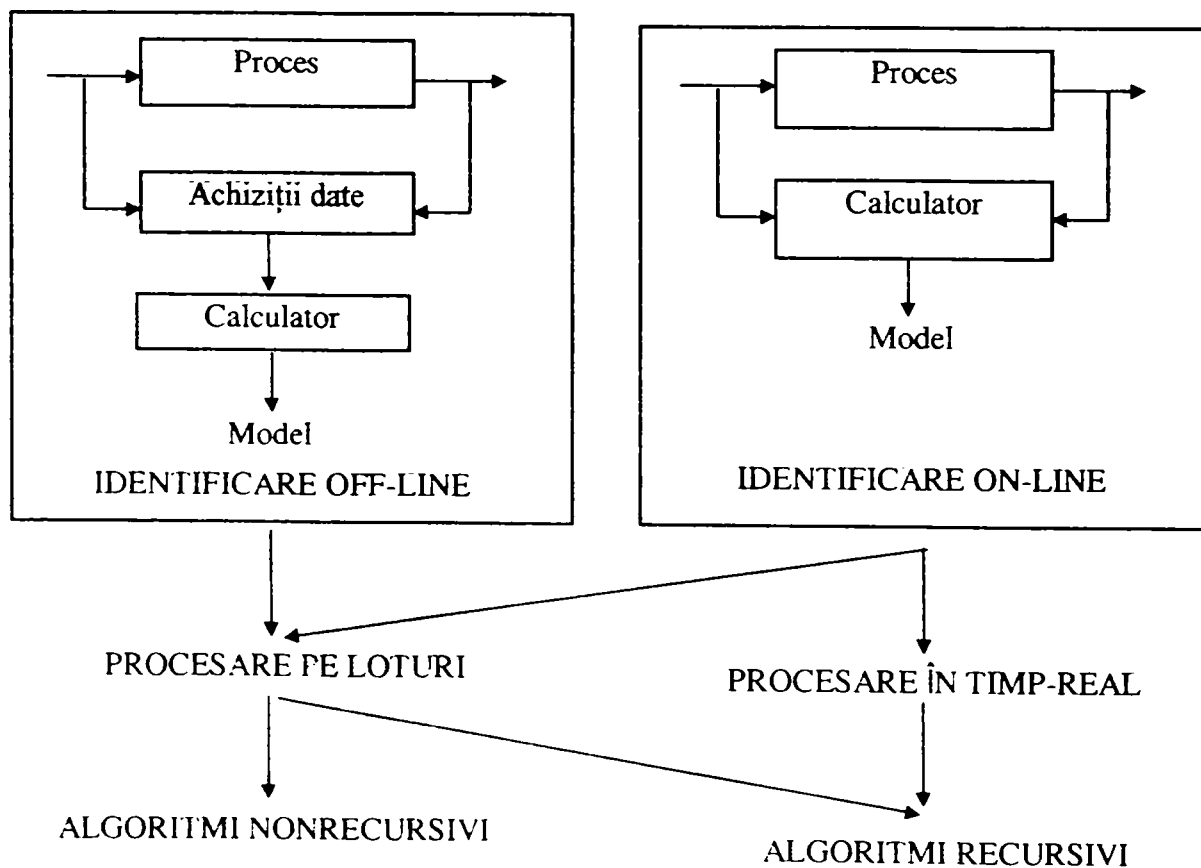


Fig. 2.9 Procedura Isermann

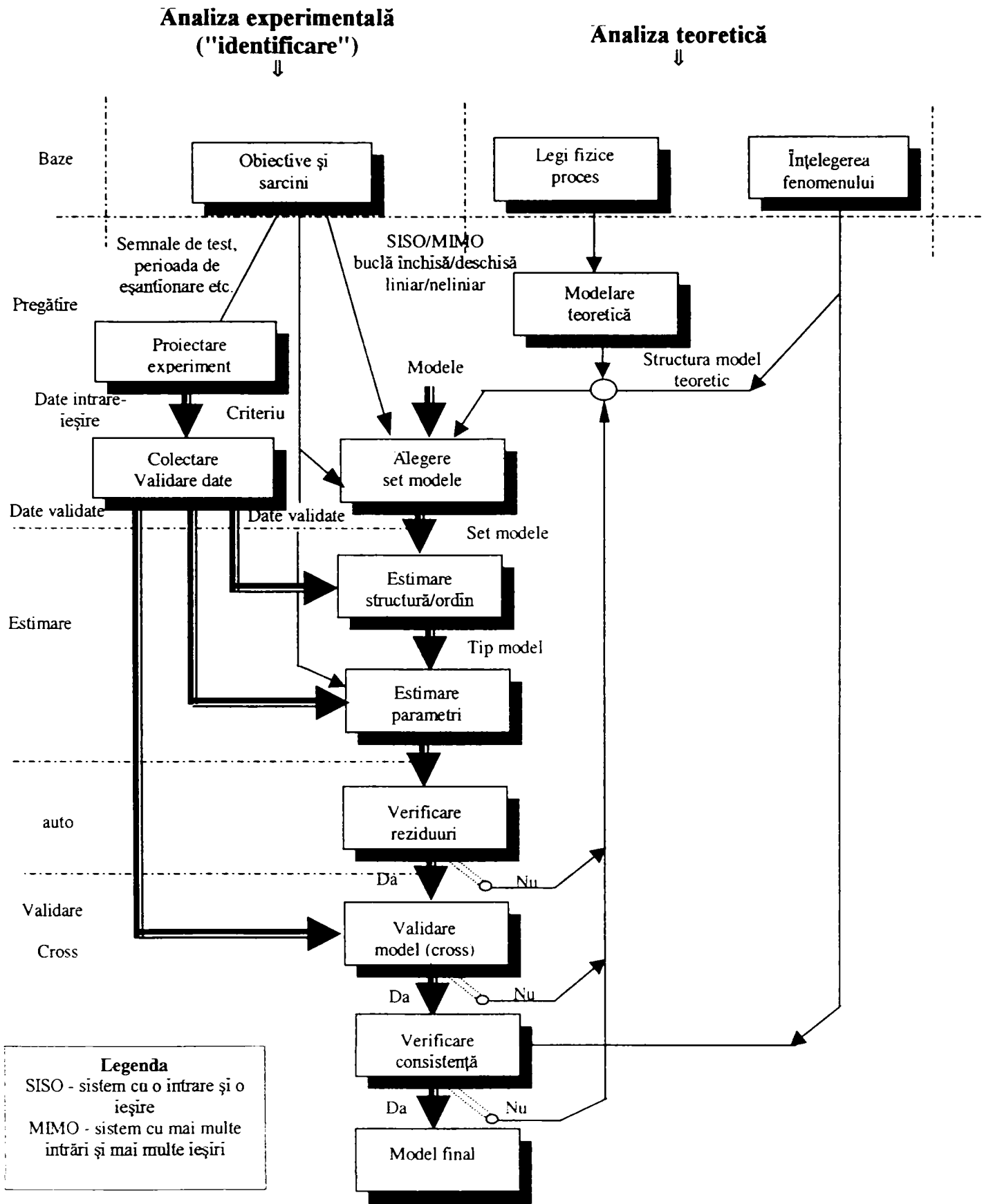


Fig. 2.10 Procedura de identificare Tertișco – Stoica - Popescu

Așa cum rezultă din figura 2.10, identificarea sistemelor reprezintă un proces iterativ, în care se utilizează o combinație adecvată de procedee teoretice și experimentale, a căror succesiune este determinată de rezultatele care se obțin pe parcursul identificării.

Înainte de prezentarea protocolului de identificare, se subliniază faptul că în cadrul aplicațiilor practice de determinare a unui model, reușita acțiunii de identificare depinde în mare măsură de cunoașterea aspectelor specifice ale procesului, de intuiția inginerescă și de experiență. Adesea, multe aspecte nu pot fi formulate în termeni preciși. În consecință, în practica identificării sistemelor trebuie să se realizeze un echilibru între aspectele logice și cele intuitive ale acestei discipline.

**Înțelegerea fenomenului.** În faza inițială a procesului de identificare este esențial ca proiectantul, sau persoana care realizează identificarea sistemului, să dispună de informații a priori reale asupra acestuia și de ipoteze implicite pe care le va face în cadrul procedurii de identificare. Prima decizie pe care acesta trebuie să o ia, și care necesită o atenție deosebită, constă în delimitarea sistemului:

- ce se consideră parte componentă a sistemului, ce este "mediu"?
- care sunt intrările (măsurabile), care sunt mărimile considerate perturbații?

În mod evident, în cadrul situațiilor reale, luarea unor astfel de decizii implică cunoașterea fenomenului, perspicacitate, intuiție.

**Caracterizarea modelului.** Obținerea de informații asupra sistemului, asociată cu determinarea legilor acestuia, depinde de combinarea ingenioasă a unor procedee din mai multe domenii. Simplificări judicioase, de tipul sistem liniar sau cu parametri concentrați etc, joacă un rol important. Pentru scoaterea în evidență a complexității modelului se poate da următoarea listă de caracterizări care, împreună cu perechile lor evidente, exprimă unele din informațiile a priori sau ipotezele care se fac asupra sistemului: *static, continuu în timp (neșantionat), invariant, cu dinamică liniară, liniar în parametri, monovariabil, cu parametri concentrați, determinist* etc. Alegerea dintre aceste caracterizări și perechile lor implică o bună cunoaștere apriori a sistemului.

**Obiective și sarcini.** Așa cum a rezultat din cele prezentate, obiectivele identificării sunt de cea mai mare importanță. Acestea determină într-o mare măsură răspunsurile la următoarele întrebări:

- ce tip de model este adecvat pentru tipul particular de aplicație avut în vedere?
- care este gradul de complexitate indicat al modelului?
- există bucle închise în cadrul sistemului, de care să se țină seamă în cadrul procedurii de identificare?
- pot fi aplicate semnale de test sistemului? În caz afirmativ, care ar fi alegerea optimă a acestora?

**Proiectarea experimentului.** Proiectarea semnalelor de intrare în cadrul unui experiment de identificare reprezintă un instrument util pentru îmbunătățirea preciziei estimațiilor parametrilor modelului.

Datele care rezultă în urma experimentului de identificare urmează a fi validate și corectate, pentru utilizarea în continuare în cadrul procedurii propriu-zise de identificare.

**Alegerea setului de modele.** Această etapă este fără îndoială cea mai importantă și cea mai dificilă din cadrul procedurii de identificare. În această etapă, cunoștințele a priori asupra sistemului, intuiția inginerescă și experimentul proiectantului, completate cu proprietățile formale ale modelelor și metodelor de identificare, sunt utilizate în scopul determinării clasei reprezentative de modele pentru sistemul analizat.

**Determinarea modelului.** Dispunând de datele de măsurare și de setul de modele fixat, se poate trece la determinarea structurii (ordinului) modelului și a parametrilor acestuia, utilizând tehnici de estimare parametrică de tipul metodei celor mai mici pătrate, metodei variabilelor instrumentale, metodelor bazate pe principiul "tally", metodei Bayes, metodei verosimilității maxime etc., sau la determinarea directă

a unui model neparametric, funcție de obiectivul propus.

**Validarea modelului.** Aceasta include, în general, următoarele etape:

- autovalidarea/verificarea reziduurilor; se verifică dacă toată informația conținută în datele de intrare-ieșire ale sistemului se regăsește în model;
- cross-validarea; se verifică capacitatea de predicție a modelului rezultat, pentru un set independent de date intrare-ieșire;
- verificarea consistenței; se verifică concordanța modelului cu informațiile disponibile asupra sistemului.

Considerații asupra celor două tipuri de abordări (cea teoretică și cea experimentală) sunt prezentate în continuare.

## 2.6.3 Abordarea procedurilor de identificare ([Ter80], [Ter86])

### 2.6.3.1 Preliminarii

Modul de abordare al identificării este dependent de caracteristicile sistemelor sursă la care se adaugă - în cazul sistemelor tehnice îndeosebi - diferențierea fundamentală (subcapitolul 2.3.3.3) referitoare la SD-MM: intrare-ieșire (MM-II) pe de o parte și intrare-stare-ieșire (MM-ISI). Tratarea *a priori* (abstractă/teoretică) sau *a posteriori* (experimentală) se poate urmări în mod mai riguros, dacă se apelează și la descrierea ierarhică a modelului (subcapitolul 2.4.5). În funcție de “traseul de clasificare” care se adoptă pentru un model anumit depinde gradul de dificultate cu care se confruntă identificatorii.

În determinarea modelului matematic al unui sistem se utilizează o combinație adecvată de procedee teoretice și experimentale a căror succesiune este determinată în funcție de obiectivul modelării și de caracteristicile sistemului.

Modelele rezultate în urma analizei teoretice și experimentale pot fi comparate (în cazul realizării ambelor tipuri de analize), eventualele neconcordanțe urmând a fi eliminate prin refacerea unor etape din cadrul analizei teoretice sau experimentale, procesul de modelare fiind un proces iterativ.

În cazul în care nu interesează simultan ambele tipuri de modele, se poate alege ca model al sistemului fie modelul teoretic fie cel experimental, funcție de scopul aplicației.

Modelul teoretic conține legătura funcțională dintre datele fizice ale sistemului și parametrii săi și se recomandă să se utilizeze, de exemplu, dacă se dispune de suficiente elemente legate de legile care caracterizează comportarea sa dinamică, sau dacă trebuie simulată comportarea sa. Se subliniază faptul că modelarea analitică (analiza teoretică) permite stabilirea ecuațiilor care descriu dinamica obiectului modelat și în condițiile când acesta este în stadiul de proiect, deci nu este disponibil pentru experimentări.

Modelul experimental conține ca parametri valori numerice a căror legătură funcțională cu datele fizice rămâne necunoscută. Acesta descrie, în general, comportarea dinamică a sistemului, se obține cu un efort redus și poate fi utilizat, de exemplu, în scopuri de conducere sau de predicție a unor variabile.

Analiza teoretică poate utiliza și rezultatele analizei experimentale, în special pentru a verifica exactitatea modelului teoretic sau pentru a determina acei parametri ai modelului care nu se pot obține, altfel, destul de exact. La rândul său, analiza experimentală poate utiliza rezultatele analizei teoretice, aceasta din urmă furnizând în



special, fie structura modelului, fie informații asupra structurii posibile a modelului, în cazul în care ecuațiile de bază care descriu sistemul nu se pot rezolva explicit, sunt prea complicate, sau nu sunt cunoscute complet.

Din cele prezentate, rezultă că pentru determinarea modelului unui sistem nu se poate utiliza exclusiv unul din procedeele de analiză menționate, ci o combinație adecvată de procedee teoretice și experimentale, succesiunea acestora fiind determinată în special de scopul modelării și de caracteristicile sistemului.

Deși analiza teoretică poate furniza, în principiu, mai multe informații despre sistemul sursă, în măsura în care fenomenele ce îl caracterizează sunt cunoscute și pot fi formalizate matematic, analiza experimentală a trezit un interes deosebit în ultimii ani. Acest interes este legat de faptul că analiza teoretică este mai scumpă, chiar și pentru procese relativ simple, fără a putea furniza valorile precise ale unor coeficienți ai modelului, în ciuda faptului că modelul teoretic este cunoscut, iar pentru procese complexe aceasta devine costisitoare. În schimb, identificarea experimentală, care determină modelul matematic pe baza datelor de intrare-ieșire ale sistemului, prezintă avantajul că utilizează aceleași metode și tehnici pentru cele mai diferite tipuri de sisteme, oricât de complicate ar fi acestea. Prin utilizarea datelor de intrare-ieșire se obțin, totuși, numai modele ale comportării intrare-ieșire ale sistemului, care nu descriu structura internă a acestuia, exceptând cazul în care sistemul admite măsurarea variabilelor de stare. Această categorie de modele se dovedește însă de largă utilitate în cadrul aplicațiilor practice.

Forma modelelor (MM pentru identificarea a priori), deci a ecuațiilor - în cazul unor sisteme discrete este mai ușor de controlat din punctul de vedere al calculului digital. Astfel, acolo unde - pentru faza a posteriori - echipamentele de măsură sunt numerice și se utilizează canale de comunicație în timp divizat (și bineînțeles, se utilizează un calculator numeric pentru controlul procesului), modelele discrete (în fapt, discretizate, a se vedea și subcapitolul 2.7 referitor la simulare) constituie o bună aproximare a celor continue.

Este de accentuat, de asemenea, diferențierea de care trebuie ținut cont când se analizează conceptele de liniar/nelinear referitor la dinamicitatea acestuia pe de o parte și respectiv cu referire la evoluția parametrilor unui model matematic. Astfel, cu notațiile uzuale (subcapitolul 2.3), sistemul:

$$y(t) = au^2(t) \quad (2.16)$$

este nelinear dinamic dar linear în parametrul  $a$ , pe când:

$$y(t) = au^b(t) \quad (2.17)$$

este nelinear dinamic și linearizabil în parametri astfel:

$$v(t) = a + bx(t) \quad (2.18)$$

în care  $v(t) = \ln y(t)$ ,  $a = \ln a$ ,  $b = b$  și  $x(t) = \ln u(t)$ .

### 2.6.3.2 Abordarea a priori (prin analiză teoretică) a modelării unui sistem

A. Principiile, modalitățile de lucru și etapele de parcurs urmăresc procedura prezentată în subcapitolul 2.6.2.3 C.

În cazul analizei teoretice a sistemului, proprietățile dinamice ale acestuia (modelul) se determină pe baza ecuațiilor de bilanț care îl caracterizează. În realizarea analizei teoretice ("construcția" modelului) se parcurg, de regulă, următoarele etape.

1. Stabilirea unor ipoteze simplificatoare asupra sistemului, care reduc efortul de analiză sau îl fac posibil în condiții rezonabile.

2. Stabilirea ecuațiilor de bilanț pentru masele, energiile și impulsurile care apar în cadrul sistemului. Acestea pot porni de la aplicarea legilor fizice de bază (legile lui Newton; legile lui Maxwell; legile lui Kirchhoff; echilibrul de masă; echilibrul energie/căldură; echilibrul impulsului). Scrierea acestor ecuații se face pentru întreg sistemul (sau pentru subsistemele componente), în cazul sistemelor cu parametri concentrați, sau pentru un element infinitezimal, pentru sistemele cu parametri distribuiți. Ecuațiile de bilanț, care reflectă variații ale acumulărilor, reprezintă ecuații diferențiale, acestea fiind ecuații de stare ale sistemului. Acestea sunt relații între "forțe" (mărimi intensive) și "curenți" (mărimi extensive), în conformitate cu cele prezentate în tabelul 2.1 ([Eyk77]).

Dacă toate condițiile externe și interne ale sistemului nostru se cunosc cantitativ și dacă cunoștințele noastre fizice asupra sistemului sunt complete, cel puțin în principiu, se poate determina valoarea numerică a tuturor coeficienților (parametrilor) din acele relații.

3. Stabilirea ecuațiilor de stare fizico-chimice.

4. Stabilirea ecuațiilor fenomenologice, în cazul proceselor ireversibile (procese de propagare a căldurii, procese de difuzie, reacții chimice).

Tabelul 2.1

	Forțe	Curenți
<b>Funcție numai de timp</b>	Diferență de temperatură	Debit de căldură
	Diferență de concentrație	Debit de masă
	Diferență de potențial electric	Intensitate de curent electric
<b>Funcție de timp și spațiu</b>	Gradient de temperatură	Densitate (vectorială) de debit de căldură
	Gradient de concentrație	Densitate (vectorială) de debit de masă
	Gradient de potențial electric	Densitate (vectorială) de curent electric

5. Eventual, scrierea ecuațiilor de bilanț pentru entropii, în cazul în care au loc mai multe procese ireversibile.

**B.** Se va exemplifica în continuare succint modul de tratare a sistemelor liniare deterministe într-o sesiune de identificare, prin caracteristica intrare-ieșire (MM-II).

Astfel, fie un sistem discret, cu intrarea  $u(t)$  și ieșirea  $y(t)$ , unde  $t=0, T, 2T, \dots, nT$ ;  $T$  fiind perioada de eșantionare (care se va considera pentru simplificare, *unitară*). Se va considera pe rând sistemul drept unul monovariabil ( $u(t)$  și  $y(t)$  scalari) și apoi multivariabil (la care intrarea și ieșirea sunt vectori  $n$ -dimensionali:  $nu \times 1, ny \times 1$ ).

Tabelul 2.2 prezintă forma ecuațiilor caracteristice.

Tabelul 2.2

Sistemul dinamic MM-II, liniar, determinist	
Modele monovariabile	Modele multivariabile
<i>Modelul discret</i>	
<b>1d. Ecuația cu diferențe</b>	
$A(q^{-1}) \cdot y(t) = q^{-k} \cdot B(q^{-1}) \cdot u(t)$ în care: $A(q^{-1}) = 1 + a_1 \cdot q^{-1} + \dots + a_{na} \cdot q^{-na}$ $B(q^{-1}) = b_0 + b_1 \cdot q^{-1} + \dots + b_{nb} \cdot q^{-nb}$	$A(q^{-1}) = 1 + A_1 \cdot q^{-1} + \dots + A_{na} \cdot q^{-na}$ $B(q^{-1}) = B_0 + B_1 \cdot q^{-1} + \dots + B_{nb} \cdot q^{-nb}$ în care: $A$ = matrice ( $ny \times ny$ ), $B$ = matrice ( $ny \times nu$ ), iar $q^{-1}$ este operator de întârziere: $q^{-1} \cdot y(t) = y(t-1)$ , $k$ este timpul mort, iar $a$ și $b$ sunt considerate prime, $k > 0$ pentru sisteme fizic realizabile
<b>2d. Ecuația de transfer</b> (notație $H$ ), considerând condițiile inițiale nule și proprietățile transformatei $Z$ , pentru $k=0$ , se obține $Y(z)$ din 1d.	
$Y(z) = H(z^{-1})U(z)$ , în care: $Y(z) = Z[y(t)]$ și $U(z) = Z[u(t)]$ $H(z^{-1}) = \frac{\sum_{i=0}^{nb} b_i \cdot z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^{na} a_i \cdot z^{-i}}$	$H(z^{-1}) = A^{-1}(z^{-1}) \cdot B(z^{-1})$
<b>3d. Secvența de ponderare</b> (notație $h(t)$ , obținută de la ecuația $Y(z)$ în domeniul timpului)	
$y(t) = \sum_{i=0}^t h(t-i) \cdot u(i) = \sum_{i=0}^t h(i) \cdot u(t-i)$ unde $h(t) = Z^{-1}[H(z^{-1})]$ este secvența de ponderare ( $h(t)$ se obține simplu din $H(z^{-1})$ prin împărțire infinită). Pentru sisteme fizic realizabile, $h(t) = 0, t < 0$ .	$h(t)$ este matrice ( $ny \times nu$ )
<b>4d. Caracteristica de frecvență</b> , obținută din expresia lui $Y(z)$ , înlocuind $z = e^{j\omega}$ , $\omega \in [-\pi, \pi]$	
<i>Modelul continuu (similar mono/multi-variabil):</i>	
<b>1c. Ecuația diferențială</b>	Înlocuiește în prima relație de la 1d pe $q^{-1}$ , cu operatorul de derivare: $p = d/dt$ . Pentru realizabilitatea fizică, $na > nb$
<b>2c. Ecuația de transfer</b>	Înlocuiește în relația $Y(z)$ de la 2d pe $Z$ cu $S$ (variabila transformatei Laplace)
<b>3c. Funcția de pondere</b>	$y(t) = \int_0^t h(t-\tau) \cdot u(\tau) \cdot d\tau$ , condiții identice ca la 3d.
<b>4c. Caracteristica de frecvență</b>	Înlocuiește pe $S$ cu $j\omega$ , $\omega \in (-\infty, \infty)$ în funcția de transfer 3c.

Un alt exemplu îl poate constitui cazul modelelor de stare (MM-ISI). Pentru

un sistem discret multivariabil, forma generală a ecuațiilor de stare este:

$$x(t+1) = A x(t) + B u(t) \quad (2.19)$$

$$y(t) = C x(t) \quad (2.20)$$

unde:

$x(t)$	este vectorul $n \times 1$ al variabilelor de stare;	iar matricea de transfer și secvența de ponderare sunt:
$A$	- matrice $n \times n$ (cu valori proprii subunitare pentru stabilitate);	$H(z) = C(zI-A)^{-1} B$ (2.21)
$B$	- matrice $n \times nu$ ;	$h(t) = C A^{t-1} B$ (2.22)
$C$	- matrice $ny \times n$ .	

Se cunoaște faptul că relațiile de intrare-ieșire sunt invariante în raport cu o transformare lineară nesingulară a variabilelor de stare, iar faptul că  $H(z)$  nu este afectat de transformare, arată că nu toți parametri ecuației (2.4) vor putea fi determinați din măsurători de intrare-ieșire, deci, modelul general este neidentificabil.

Se pot analiza în detaliu cazurile în care - pentru anumite transformări liniare - ecuațiile de stare conțin un număr mai mic de parametri. Acele forme care sunt identificabile prin măsurători de intrare-ieșire, se numesc *forme canonice*. În literatură sunt analizate de asemenea și **modelele stohastice**.

### C. Definitivarea formei modelului printr-un proces de simplificare

În urma parcurgerii etapelor menționate anterior se obține, în general, un sistem de ecuații diferențiale ordinare și/sau cu derivate parțiale, sistem care reprezintă modelul teoretic al procesului, având structura și parametri determinați. De cele mai multe ori acest model este deosebit de complex și nu poate fi utilizat în această formă în cadrul aplicațiilor ulterioare, impunându-se simplificarea sa. Aceasta se realizează, de regulă, prin parcurgerea următoarelor etape:

- 1<sup>o</sup>. linearizarea ecuațiilor nelineare cu derivate parțiale, atunci când funcționarea sistemului are loc în vecinătatea unui punct nominal;
- 2<sup>o</sup>. aproximarea prin ecuații diferențiale ordinare a ecuațiilor cu derivate parțiale;
- 3<sup>o</sup>. reducerea ordinului ecuațiilor diferențiale ordinale.

Primii pași ai procesului de simplificare pot fi realizați chiar în etapa de stabilire a ipotezelor simplificatoare, la scrierea ecuațiilor fundamentale ale modelului.

Chiar dacă sistemul de ecuații care descrie procesul, în forma finală, nu poate fi rezolvat explicit, ecuațiile furnizează informații utile asupra structurii modelului, care pot fi utilizate în cadrul analizei experimentale.

### 2.6.3.3 Abordarea experimentală a identificării

#### A. Generalități

Analiza experimentală a sistemului - *identificarea* (în sens restrâns, termenul semnifică în unele surse bibliografice, *doar această abordare: experimentală*) - își propune determinarea modelului matematic pe baza măsurătorilor efectuate asupra variabilelor care caracterizează evoluția sa, într-un anumit regim. În această situație, se pleacă întotdeauna de la cunoștințele "apriori" despre proces, care au fost obținute în urma analizei teoretice sau din măsurări anterioare. În continuare, se măsoară mărimile de intrare și de ieșire ale sistemului și se evaluează, printr-o serie de procedee (nu proceduri!) de identificare, legătura dintre variabilele măsurate. Mărimile de intrare pot fi semnale din funcționarea normală a sistemului, sau pot fi introduse în mod artificial.

Identificarea se desfășoară pe baza celor enunțate în subcapitolul 2.2.2 B, iar metodele posibil de utilizat se diferențiază de asemenea funcție de model (deci funcție de sistemul-sursă în ultimă instanță). Pot fi distinse astfel: identificarea statică sau dinamică, continuă sau discretă, identificarea monovariabilă sau multivariabilă, a un model linear sau unul nelinear, identificarea deterministă sau statistică, staționară sau adaptivă, identificarea în timp diferit sau în timp real. Procedeele de identificare utilizate pot fi *parametrice* sau *neparametrice*, după cum *structura* modelului este cunoscută sau nu.

### **B. Metodele utilizate pentru identificarea experimentală**

(cunoscute în literatură sub numele de *procedee* sau *tehnici*) pot fi împărțite în cinci grupe diferite a căror caracteristici se prezintă în continuare.

**Analiza Fourier** se utilizează în special în cazul sistemelor liniare care operează cu semnale continue, pentru determinarea caracteristicilor de frecvență. Se recomandă să se utilizeze la identificarea sistemelor cu valoare relativ mare a raportului semnal/zgomot. Efortul de calcul este redus, în special în condițiile utilizării FFT.

**Analiza de corelație** se aplică în domeniul timp și este identificată în cazul identificării sistemelor liniare care operează cu semnale continue sau discrete. Mărimile de intrare admise sunt semnale stohastice sau periodice. Drept rezultat, se obțin funcțiile de corelație și ca un caz particular al acestora, funcția pondere. Tehnicile de corelație se aplică în special în cazul sistemelor cu valoare mică a raportului semnal/zgomot. Efortul de calcul este redus.

**Analiza spectrală** se aplică în aceleași condiții în care se utilizează și analiza de corelație și are ca rezultat obținerea funcțiilor de densitate spectrală de putere (autospectrul și intraspectrul) și a funcțiilor asociate: caracteristicile de frecvențe (amplitudine-pulsație, fază-pulsație), funcțiile de coerență etc.

Analiza Fourier, analiza de corelație și analiza spectrală furnizează modele neparametrice și singurele ipoteze care se fac asupra sistemului sunt cele privind liniaritatea și proprietățile zgomotului la ieșire. De asemenea, nu se impune o anumită structură a modelului. De aceea, aceste proceduri sunt adecvate identificării atât a sistemelor cu parametri concentrați, cât și a celor cu parametri distribuiți, cu structură oricât de complicată. Ele sunt adecvate de asemenea și pentru verificarea modelelor obținute în urma analizei teoretice, deoarece în această situație nu se face nici o ipoteză asupra structurii modelului.

Ultimele două grupe de procedee de identificare furnizează modele parametrice, ceea ce impune alegerea a priori a structurii modelului. Parametri modelului se obțin astfel încât să fie minimizată o funcțională a erorii dintre model și sistem.

Ca eroare între model și sistem se poate utiliza:

- eroarea de ieșire;
- eroarea de intrare;
- eroarea generalizată.

Din considerente matematice se preferă acele erori care depind liniar de parametri modelului. De aceea, în cazul determinării unui model de tip funcție pondere se utilizează eroarea de ieșire, iar în cazul determinării sau unui model descris prin ecuații diferențiale, ecuații cu diferențe sau funcții de transfer se preferă eroarea generalizată.

**Procedeele de identificare care utilizează modele ajustabile** s-au dezvoltat în special pentru estimarea parametrilor modelelor analogice (coeficienților ecuațiilor diferențiale), care operează cu semnale continue. Condiția unei estimări de calitate constă în utilizarea unor semnale de intrare care să excite toate frecvențele proprii ale sistemului. Astfel de procedee de identificare se utilizează în cadrul sistemului de

conducere adaptivă, dar în ultimele decenii acestea au cedat locul tehnicilor de estimare a parametrilor.

**Procedeele de estimare a parametrilor** furnizează estimări ale parametrilor modelului unui sistem a cărui structură este cunoscută, Astfel de procedee se pot utiliza atât în cazul semnalelor discrete, cât și în cazul semnalelor continue. Semnalele de intrare pot avea în general forme arbitrare, cu condiția ca frecvențele proprii ale sistemului să fie excitate continuu. Ca semnal de eroare între sistem și model se utilizează în mod frecvent eroarea generalizată și eroarea de ieșire, iar complexitatea algoritmilor depinde de gradul în care semnalul de eroare este o funcție liniară de parametrii modelului. Algoritmii de estimare pot fi direcți sau iterativi, determinarea parametrilor făcându-se recursiv sau nerecursiv. Procedeele de estimare a parametrilor sistemelor furnizează modele parametrice și se utilizează, în special, în cazul în care scopul identificării îl

Tabelul 2.3

Procedee și tehnici de identificare						
Procedeele de identificare			Analiza Fourier	Analiză de corelație și spectrală	Model ajustabil	Estimare parametri
Model	ne-parametric	semnale continue	2	2	0	0
		semnale discrete	0	2	0	0
	parametric	semnale continue	0	0	2	1
		semnale discrete	0	0	0	2
Semnale	de test admise	deterministe neperiodice	2	0	1	1
		deterministe periodice	2	2	1	1
		pseudostohastice	0	2	1	2
		stohastice	0	2	2	2
	de perturbație admise	deterministe	1	1	1	1
		stohastice	2	2	2	2
Eroare model-proces	eroare de ieșire		0	0	2	1
	eroare de intrare		0	0	0	0
	eroare generalizată		0	0	1	2
	evaluare	nerecursivi	2	2	2	2
Algoritmi	directă	recursivi	1	1	1	2
	evaluare iterativă	nerecursivi	0	0	0	2
		recursivi	0	0	0	1
Mod de măsurare	on-line	0	1	2	1	1
	off-line	2	2	0	2	2
Notă: 0, 1, 2 au semnificațiile: 0 - neutralizat, nesemnificativ; 1 - puțin utilizat; rar, 2 - mult utilizat, frecvent.						

constituie sinteza unor algoritmi de reglare, în vederea conducerii cu calculator a procesului sau simularea acestuia.

În cadrul celor discutate anterior, s-au prezentat în mod separat procedeele de identificare neparametrică, și cele de identificare parametrică. Este posibilă să se realizeze o combinație a celor două tipuri de procedee de identificare, legând

identificarea unui model neparametric de o estimare de parametri, sau determinarea unui model neparametric de identificarea unuia parametric.

Problematika identificării neparametrice este axată, în cea mai mare parte, pe procedurile de analiză a seriilor de timp, acestea utilizându-se efectiv în practica inginerescă. Evident, aria metodelor de identificare neparametrică este mai largă, în sensul utilizării și a unor structuri de modele care să aproximeze funcțiile pondere sau de transfer prin dezvoltări după sisteme de funcții independente (eventual ortogonale), în scopul reducerii numărului de parametri estimați.

**C. O imagine de ansamblu** a abordărilor și a procedurilor de identificare a sistemelor continue, care include și ponderile de utilizare ale acestora, este redată în tabelul 2.3.

### 2.6.3.4 Instrumente software de identificare

Ultimii ani s-au caracterizat prin eforturi susținute în direcția elaborării unor proceduri și tehnici eficiente de *identificare asistată* a sistemelor-sursă, care utilizează tehnica de calcul. Modele rezultate în urma procesului de identificare (asistată) pot fi utilizate pentru:

- ◇ mai buna cunoaștere a sistemului-sursă;
- ◇ verificarea modelelor teoretice;
- ◇ predicția evoluției unor variabile din sistem;
- ◇ optimizarea proceselor în regim static și dinamic;
- ◇ sinteza sistemelor automate;
- ◇ calculul unor mărimi care nu pot fi măsurate direct (diagnoză).

În special în cazul utilizării calculatoarelor de proces pentru supraveghere, reglare și optimizare a proceselor tehnologice, identificarea sistemelor se dovedește un instrument foarte important pentru adaptarea algoritmilor de conducere la dinamica procesului.

De-a lungul timpului au apărut o serie de programe dedicate activităților de identificare, mai întâi în medii academice și apoi, pachete comerciale performante. Sunt cunoscute în acest sens programele: IDPAC, SATER, CAPTAIN, IDPACK (de la Universitățile din Lund, Eindhoven, Cambridge, Tokyo, și, respectiv, a Institutului pentru Tehnică de Calcul și Informatică, București) din primul grup.

Pachetele software comerciale dedicate aplicațiilor ingineresti oferă proceduri de identificare sub formă de “toolbox”-uri (“cutii” cu instrumente software), având interfețe cu caracteristici “prietenoase” (“*user-friendly*”). Un astfel de pachet este pachetul MATLAB, cu instrumente de identificare deosebit de puternice, precum și extensia de simulare, SIMULINK; o aplicație mai puțin complexă este DYNAMO. Referințe mai largi asupra acestora se găsesc la subcapitolele aferente simulării.

### **Observație**

*Se accentuează faptul că informații suplimentare asupra diferențierii tratamentului modelelor continue și discrete se pot consulta la subcapitolele referitoare la simulare.*

## 2.7 Simularea. Prezentare generală

### 2.7.1 Semnificația noțiunii de simulare

Semnificația noțiunii de **simulare** diferă foarte mult funcție de contextul în care se utilizează. Este cunoscută accepțiunea uzuală care coincide cu cea juridic-medicală. În ceea ce privește conținutul conceptului din punctul de vedere al domeniului nostru de interes, au fost formulate și următoarele definiții.

**A.** Simularea este metoda de a măsura și studia un fenomen (sistem) ce constă în a-l înlocui cu unul mai simplu dar care are un comportament analog ([HER93]).

**B.** Simulare înseamnă o reprezentare matematică a problemelor care oglindesc fenomenele fizice, care permite caracterizarea proceselor fizice în termenii de rezolvare ai acestor reprezentări matematice ([Cha85]).

**C.** Prin simulare se înțelege forțarea unui model pentru a "opera" în aceeași manieră cu un sistem dat (sistem-sursă), în scopul studierii lui ([Gun90]).

Se poate constata însă, din cele expuse preliminar în acest subcapitol 2.7.1 și din cele ce urmează, că aceste definiții relevă câte unul din aspectele esențiale ale conținutului conceptului de simulare, răspunzând la întrebările "ce este simularea?" (C), "cum se execută?" (B), "cu ce se execută?" (A).

Pentru definirea simulării în sensul celor de la punctul C, utilizarea sintagmei "manipularea modelului" s-ar putea să fie "mai adecvată" decât asocierea verbului "a opera" în context. *Se mai spune: "punerea în funcție" a modelului pentru studiul sursei.*

**D.** Toate aspectele relevate sunt de altfel sintetizate prin structurarea teoriei modelării în abordarea modernă a lui Zeigler (subcapitolul 2.4.7) în care simularea este definită drept o relație între elementele de bază, structurale, ale modelării: model și calculator. Acesta este mijlocul, sistemul real cu care se execută operațiile necesare.

Trebuie făcută precizarea că în cazul cel mai general - fapt stabilit în mod curent în cazul abordărilor tradiționale ale modelării/simulării - *un obiect tehnic sau o colecție (combinație) de obiecte tehnice (reale sau virtuale) denumit(ă) uzual simulator, este chiar mijlocul tehnic capabil să execute simularea.* Cele mai cunoscute simulatoare sunt cele aeronautice, "de zbor".

Calculatoarele sunt, în acest sens, cele mai moderne și complexe simulatoare. Din acest motiv, ele constituie și elementul de bază pentru următoarea definiție a conceptului de simulare. Prin opoziție, sistemul care este simulat și care se constituie în subiect al simulării, este denumit *simuland*.

Operatorul-investigator care execută activități de simulare este denumit, în unele surse bibliografice, *simulaționist*, termen care (deși pare puțin forțat în limba română) va fi folosit într-o anumită măsură și în prezenta lucrare.

**E.** Prin simulare se înțelege dezvoltarea și utilizarea modelelor computerizate pentru studiul sistemelor dinamice reale sau virtuale ([McG92]). Definiția focalizează în mod voit atât domeniul în care se utilizează simularea, cât și mijlocul cu care se operează datorită dominației absolute a calculatorului asupra întregului "evantai" de aplicații dinamice (cele statice rareori justifică metode mai sofisticate de lucru). De asemenea, se pune accentul:

- ◊ în mod implicit pe deosebita importanță și utilitate a simulării pentru verificarea unor ipoteze referitoare la sistemele virtuale, care urmează a fi executate (când modelarea se face în scopuri de proiectare sau reglare, subcapitolul 2.5);



- ◇ pe "dezvoltare" pentru a releva continua tendință spre o reprezentare cât mai reală a simulandului pe care trebuie să o aibă în mod necesar investigatorul și o poate realiza fără dificultăți (ceea ce este aproape imposibil în cazul unei abordări empirice a dezvoltării de modele); utilizarea calculatorului permite chiar "construcția" - din aproape în aproape - a unor modele deosebit de sofisticate cu costuri rezonabile;
- ◇ pe posibilitatea de "utilizare" fără necesitatea de a se ține cont de pericolozitatea, accesibilitatea sau costul excesiv în cazul operării cu sistemul real.

## 2.7.2 Categorii ale simulării

Nu se poate vorbi de o clasificare propriu-zisă a activității de simulare, dar se pot distinge diferite modalități de abordare funcție de:

- a) tipul calculatorului utilizat: analogic, digital, hibrid;
- b) natura simulandului: (implicând domeniul în care se operează): navă spațială, proces chimic, sistem economic etc.;
- c) desfășurarea "fluxului" de semnale în simuland: continuă, discretă sau mixtă;
- d) relația temporală dintre evenimentele din simuland (desfășurare în timp real, mai rapid decât, sau mai lent decât această modalitate, desfășurare în timp real cu "monitorizare" prin intermediul frecvenței de ceas sau a tactului propriu al simulandului); dealtfel, tocmai această posibilitate de modificare - practic fără restricții - a corelațiilor temporale este crucială pentru anumite sisteme de simulat.

În fond majoritatea criteriilor depind de categoriile de modele utilizate, iar cazurile particulare de simulare rezultă din combinarea acestor categorii. Se pot da drept exemple: simularea continuă și analogică, în timp real a evoluției unei nave spațiale, sau simularea discretă, digitală la modul mai rapid decât cel în timp real a unui sistem economic.

## 2.7.3 Raportarea simulării la modele matematice

Modelele matematice de forma unor ecuații care descriu relațiile dintre componentele simulandului preced simularea. Pentru a fi utilizate, acestea trebuie prezentate într-o formă care se pretează la procesarea cu calculatorul. Acesta este programat să releve o corespondență identificabilă între propriile sale funcții și dinamica simulandului. Dacă mijloacele matematice sau caracteristicile sistemului de calcul ascund aceste intercorelații, calculatorul procesează informații relative la simuland, dar nu se poate afirma că îl simulează.

Nu totdeauna modelarea matematică precede în mod necesar simularea. Uneori, sistemul nu este înțeles suficient de bine pentru a permite o descriere matematică riguroasă. În astfel de cazuri se pot deschide eventuale posibilități de a postula relații funcționale între elementele simulandului fără specificarea concret-matematică a acestora (fără fixarea *a priori* a valorilor tuturor coeficienților). Se poate apela la abordarea prin blocuri funcționale, care se pretează foarte bine la simularea cu calculatoare analogice. Parametrii corelați cu funcțiile acestor blocuri pot fi ajustați intuitiv, sistematic, sau prin acordare cu unele tehnici stabilite la identificarea sistemelor, până la suprapunerea criteriilor funcționale dorite. Pe această cale, modelul matematic poate fi dezvoltat *ca rezultat al unei simulări*, și nu drept cerință, *punct de plecare necesar pentru simulare*.

## 2.7.4 Tehnicile de simulare în legătură directă cu categoriile de simulare ([Bar92], [Ben95], [Nic77], [Răd81], [McG92])

### 2.7.4.1 Simularea analogică

Acest tip de simulare s-a dezvoltat îndeosebi după cel de-al doilea război mondial, bazându-se pe proprietățile și avantajele modelelor analogice. Cele mai utilizate mijloace cu care s-au efectuat și cu care se efectuează simulările de acest gen au fost calculatoarele analogice, la care semnalele sunt continue și procesarea are loc în paralel. Tehnica de structurare modulară păstrează legătura naturală simulare - simuland, iar operarea paralelă îi conferă viteza necesară pentru o manipulare în timp real a modelului. Rezultatele nu au alterat raportul nemijlocit om-mașină. Popularitatea acestora în anii șaizeci ai secolului al XX-lea s-a datorat în parte și acestor avantaje evidente în fața calculatoarelor digitale, ale căror performanțe și accesibilitate la utilizare au crescut spectaculos abia în ultimul timp.

### 2.7.4.2 Simularea numerică

Simularea numerică (digitală) s-a dezvoltat și s-a impus în timp odată cu dezvoltarea sistemelor de calcul numerice și a limbajelor specializate, orientate pe blocuri funcționale (MIDAS, CSMP și succesoarele acestora). Ea permite o pseudo-corespondență simulare-simuland precum și - datorită vitezelor de operare crescute spectaculos - abordarea chiar a sistemelor ultrarapide și foarte complexe. Facilitățile de intrare/ieșire inadecvate degradau la început interacțiunea operator uman - mașină digitală, echipamentele aferente disponibile pe piață fiind și mult prea scumpe pentru ceea ce puteau oferi ele din acest punct de vedere.

Trebuie precizat că primele programe în domeniu, provenind din medii academice au fost ultraspecializate, fiind destinate să urmărească o anumită aplicație de modelare/simulare. Pasul următor în evoluția ofertei software a fost efectuat odată cu dezvoltarea unor programe de uz general pentru simularea de tip continuu, programe care au încorporat în cadrul unui singur pachet toate modulele clasice necesare pentru urmărirea unor sarcini de modelare-simulare.

Ăceste pachete, provenind atât din medii academice, cât și din cele industrial-economice, sunt scrise la rândul lor într-un limbaj general de programare de nivel înalt, având astfel acces la toate facilitățile compilatorului acestuia, inclusiv funcțiile de depanare. Cel mai des a fost și este utilizat, în S.U.Ă., limbajul FORTRAN, iar în Europa limbajul C/C++, multe pachete software specializate realizând o traducere directă a codului propriu în FORTRAN sau C/C++. Descrierea modelului apare astfel drept o succesiune de subrutine și proceduri ale limbajului de nivel înalt care vor fi compilate în mod normal, fără probleme.

Necesitățile procesului de simulare au impus de la bun început pachetelor software dedicate acestor activități (primind pe parcurs numele de limbaje de simulare) caracteristici specifice care s-au păstrat și în versiunile software moderne. Ăceste caracteristici vor fi prezentate în subcapitolul următor.

Câteva din cele mai cunoscute pachete și limbaje de simulare utilizate în perioada de ascensiune a metodei sunt: CSL, ECSL, HOCUS, CSMP, SIMNON, DYNAMO și GPSS.

La ora actuală, oferta hardware-software performantă nu mai constituie o problemă deosebită, astfel că simularea digitală domină pur și simplu acest domeniu de activitate. Trebuie menționat că pentru sistemele care necesită mare precizie, ori pentru

cele cu dinamicitate deosebită, calculatoarele digitale actuale sunt mai bune decât cele analogice.

### 2.7.4.3 Simularea hibridă

Simularea hibridă este rezultatul dorinței de a combina viteza și raportul adecvat mașină-operator uman de la calculatoarele analogice cu precizia, capacitățile logice și capacitatea de memorare a computerelor digitale. Prin simulare hibridă se procesează amândouă categoriile de semnale: continue și discrete atât la modul serial cât și în cel paralel.

În trecut, multe sisteme hibride de simulare au fost structurate prin conectarea a două calculatoare de uz general: unul analogic, celălalt digital, cu ajutorul unui echipament de interfațare, care consta din convertoare de semnal digital-analogic și analogic-digital.

Ăceastă practică a fost urmată de dezvoltarea și proiectarea unor sisteme hibride puternice și specializate, destinate simulării unor sisteme de foarte mare complexitate. Costul relativ mare al acestora a fost justificat, în primul rând, de viteza deosebită datorată procesării paralele din elementele analogice, îndeosebi la cele de tip integrator, care dau tonul oricărui program de simulare. Ăceasta se evidențiază îndeosebi când simularea implică frecvențe ridicate, sau când sunt necesare multe iterații referitoare la experiment, respectiv când este necesar un număr semnificativ de repetări ale simulării în cazul proceselor stohastice.

În astfel de sisteme de calcul hibride, procesorul digital poate selecta și programa elementele analogice și echipamentul de interfață, respectiv poate controla ieșirile simulării. Din punctul de vedere al operatorului, nu este necesară cunoașterea cu exactitate a repartiției rezolvărilor pe cele două aspecte distincte (digital-analogic) referitor la fiecare componentă specifică a modelului.

## 2.7.5 Ierarhie și taxonomie în procesul de simulare

Taxonomia procesului de simulare, pornind de la cele două modalități de bază

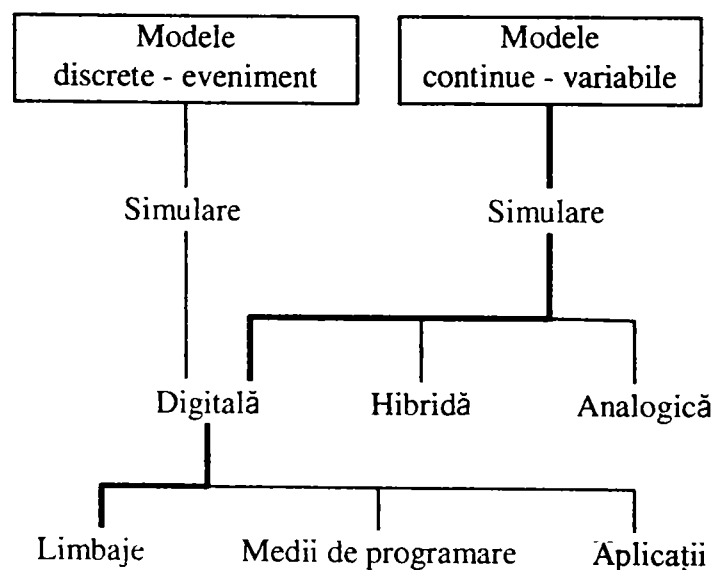


Fig. 2.11 Taxonomia ierarhică a procesului de simulare

ale simulării este prezentată în figura 2.11.

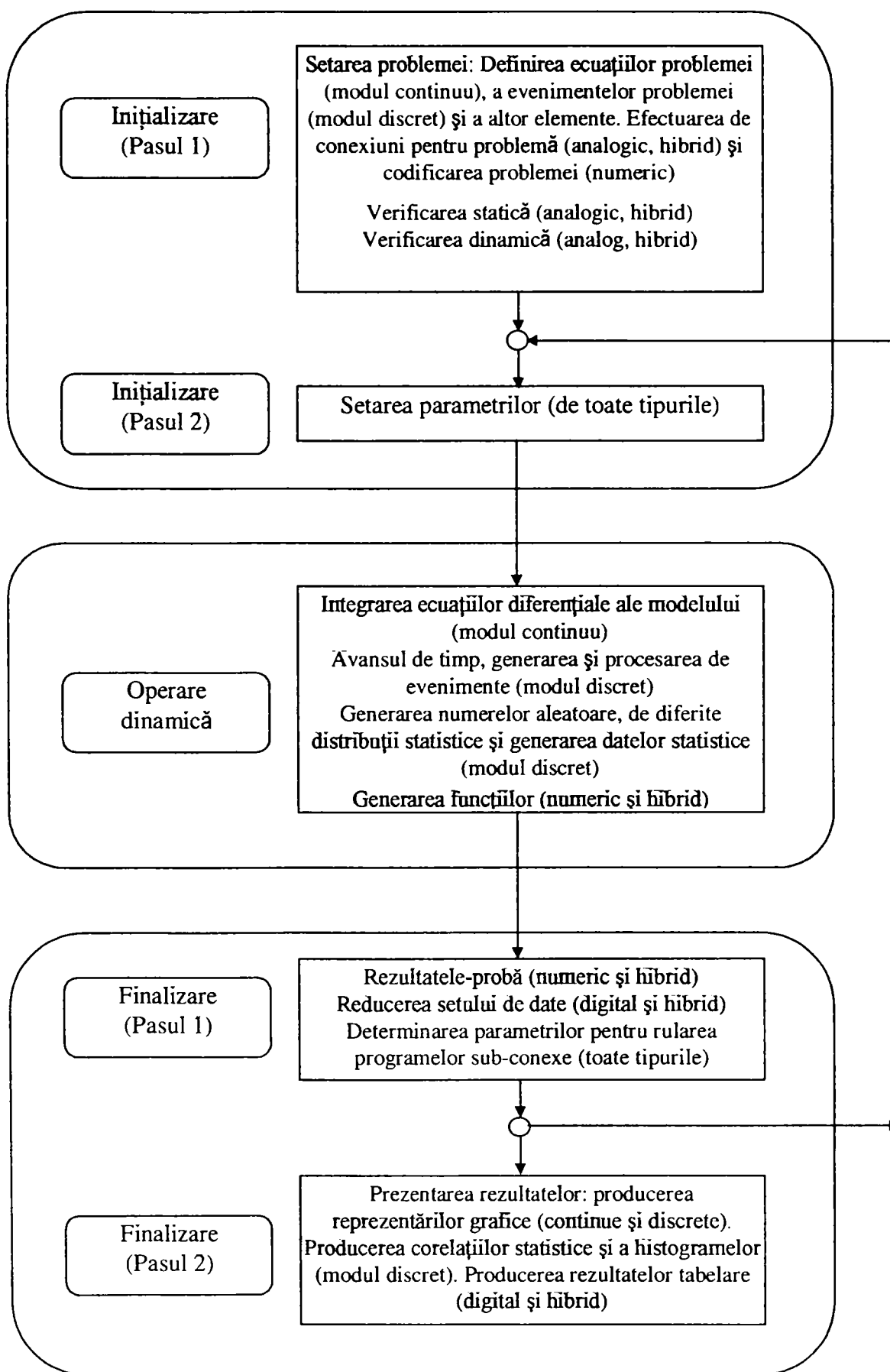


Fig. 2.12 Structura generală a unui proces de simulare

## 2.7.6 Structura unei sesiuni de lucru de tip simulare

În cazul unei aplicații de simulare se pot distinge – în conformitate cu figura 2.12 - trei faze:

**A. Inițializarea**, care constă din implementarea modelului în sistemul de calcul; în această fază:

- modelul abstract definit de investigatorul-simulaționist este manipulat într-o formă disponibilă transunerii în codurile unui limbaj de nivel înalt sau într-un limbaj de simulare, dacă este utilizat un calculator digital;
- se realizează conexiunile fizice dintre blocurile analogice care descriu modelul, dacă se utilizează un calculator analogic.

Faza se încheie prin introducerea datelor de intrare referitoare la parametrii modelului, parametri care se modifică de la o execuție la alta a simulării; aceste date vor include condițiile inițiale ale simulării.

**B. Faza dinamică**, în care modelul este "pus în mișcare", permițând astfel exteriorizarea comportamentului său dinamic sub acțiunea mecanismului de avans al timpului de simulare. Execuția simulării trebuie programată:

- pentru o perioadă bine determinată de timp, sau
- pentru a se încheia la îndeplinirea unor condiții notificate în prealabil în model.

**C. Finalizarea** (încheierea). Când execuția simulării este încheiată - în mod normal sau anormal - sesiunea de lucru poate continua prin urmărirea "post-mortem" a tot ceea ce s-a întâmplat. Aceasta poate avea loc datorită unei secvențe software pre-programate menite a executa o analiză particulară a rezultatelor obținute. Pe de altă parte, modelul-simulaționist poate încerca să examineze aceste rezultate și să ia decizii cu privire la acțiunile ce se impun în continuare. Dacă se cere o execuție suplimentară de simulare, se setează noi valori pentru parametri, iar simularea se reia din stadiul de inițializare. Altfel, sesiunea de lucru continuă cu urmărirea obținerii tuturor informațiilor legate de execuție pentru a le include într-o formă de prezentare a rezultatelor.

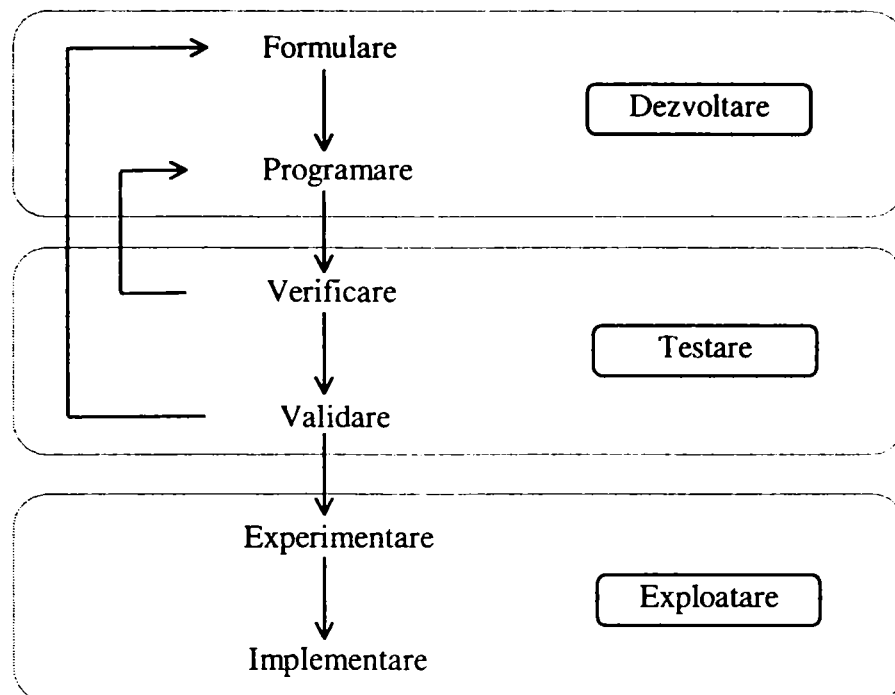
De remarcat că o astfel de structurare a fost concepută încă din anii șaiszeci, fiind considerată esențială pentru concepția de programe de simulare cu primele pachete software care posedau trăsăturile caracteristice necesare simulării, și a rămas valabilă și la ora actuală.

## 2.7.7 Abordarea metodică a unei probleme de simulare

Structura prezentată mai sus se referă la execuția propriu-zisă a simulării. Prin abordare metodică a simulării se înțelege suma de activități prin care se ajunge la forma finală a programului care "execută" prin rulare simularea sistemului-sursă considerat. În figura 2.13 este prezentată desfășurarea procesului de proiectare a aplicațiilor de acest gen, în care se disting trei etape:

### **A. Dezvoltarea modelului**

Scopul acestei etape este de a implementa modelul abstract al sistemului-sursă (obținut prin procedee de identificare - faza de formulare a etapei A) în echipamente de calcul. Pentru aceasta este necesar a se cunoaște sub formă de ipoteze și modul în care ar trebui să se comporte sistemul-sursă, iar ipotezele trebuie formulate într-o manieră accesibilă sistemului de calcul. Accentul se pune, la această etapă, pe posibilitatea de



**Fig. 2.13 Stadiile unui proiect de simulare**

realizare a unei extensii în timp și spațiu a desfășurării procesului prin aceste ipoteze, în vederea identificării variantelor de intervenție avantajoasă (funcție praxiologică a investigatorului).

Cele două aspecte (model abstract + ipoteze) trebuie definite în termenii unui program (funcția gnoseologică) prin care se descrie comunicarea dintre simulaționist și mașina de calcul, fie sub forma unor linii de cod procedurale sau instrucțiuni, fie prin organizarea unei mașini de calcul analogice.

**Implementarea** programului deschide calea pentru efectuarea unei serii de teste asupra modelului.

#### **B. Testarea modelului**

În această etapă are loc **verificarea** comportamentului modelului în condițiile specificate, cu alte cuvinte verificarea dacă implementarea modelului este o corectă încorporare a ipotezelor emise la început.

Într-un anumit sens se poate spune că trebuie efectuată o depanare dacă prin verificare se constată o deviere a comportamentului modelului de la ceea ce se așteaptă a fi reprezentativ pentru sistemul-sursă. Dependent de cerințe, se poate urmări o emulare strictă a acestuia, sau doar una de tip aproximativ. De obicei, în primul caz este necesară urmărirea comportamentului modelului într-o serie întreagă de verificări, procesul fiind cunoscut sub numele de **validare**, la care se cere ca modelul să fie corect în toate zonele sale de operare (nu neapărat până la ultimul detaliu).

*O posibilă definiție a conceptului de validare are în vedere stabilirea modului de adecvare a modelului la realitate, deci modul în care predicțiile concordă cu observațiile.*

Aprecierea asupra corectitudinii modelului în acest sens este una din cele mai dificile sarcini din studiul prin simulare, atât în ceea ce privește coroborarea rezultatelor simulării cu datele achiziționate de la sistemul-sursă, cât și definirea extensiei acestor date. Primul caz este cel aferent simulării unui sistem existent, ceea ce - paradoxal - nu simplifică lucrurile deoarece simularea trebuie să reproducă cu exactitate condițiile în care s-a operat asupra sursei pentru achiziție, precum și identificarea exactă a sursei unor evoluții ale datelor achiziționate (evoluții datorate modificărilor din zona

parametrilor, a structurii etc.), ceea ce se realizează cu activitățile de tip *a posteriori* ale identificării sistemelor. Cel de-al doilea caz este dificil, deoarece nu se cunoaște nimic despre comportamentul sursei, acesta putând fi eventual prezumat, sau relevat printr-un minimum de teste fizice asupra unui sistem tip pilot, sau prin alte modalități de testare considerate relevante de către investigator. Chiar dacă se fac prin simulatoare simplificate, sau verificări parțiale de comportament, reprezintă un punct de plecare și, oricum, "mai mult decât nimic". În problemele de validare în [Ben95] se recomandă consultarea lucrărilor lui Butterfield și Thomas(1986) și Butterfield (1990).

### C. Exploatarea modelului

Presupunând că s-a obținut o simulare funcțională și s-a validat modelul arătând că manipularea sa este o adevărată și corectă reprezentare a funcționării sistemului real, se pot și trebuie efectuate testări multiple pentru a acoperi o cât mai mare arie de experimentare cu modelele de simulare. Prin astfel de activități se obțin informații deosebit de utile referitoare la sistemul-sursă cu mijloace economice rezonabile și într-un timp rezonabil. Aceste informații trebuie interpretate pentru a fi într-adevăr utile.

## 2.8 Aplicații și clase tipice de simulare ([Bak76], [Ben95], [Kil97], [Let98], [Mar87], [Mur96])

### 2.8.1 Simularea discretă

#### 2.8.1.1 Definirea conceptului

##### 2.8.1.1.1 Elementele componente ale unui sistem discret

Elementele componente ale unui sistem discret (și implicit ale unui model al acestuia) poartă uzual numele de **entități**. Calitatea de a fi separate una față de cealaltă, deci **discrete**, conferă și numele clasei respective de aplicații. Entitățile posedă *attribute*, care reprezintă calități, caracteristici, proprietăți care afectează comportamentul entităților din sistem (model). Entitățile pot fi: **ocupate** (**active**, desfășurând o anumă **activitate**), sau **inactive** (fără să "facă" nimic, dar fiind într-o **coadă de așteptare**). Înțelesul termenului de coadă nu este cel din vorbirea curentă, ci semnifică faptul că entitățile respective au încheiat o activitate și nu au început să o desfășoare pe următoarea. În sursele bibliografice de limbă română, se utilizează termenul de **fir de așteptare**. Starea unui astfel de sistem se modifică dacă una din entități își schimbă atributul: din *element ocupat* în *element aflat în așteptare*, sau viceversa. Momentul în care se petrece această modificare se numește **eveniment**.

##### 2.8.1.1.2 Dinamica modelului discret

Mișcarea entităților între diferite puncte ale spațiului modelului, constituie în sine comportamentul dinamic al modelului. Pentru a iniția această mișcare, trebuie să existe un element care să "impulsioneze" sistemul în acest sens. Dacă această sarcină ar reveni unor entități din model, mișcarea ar avea loc până când s-ar epuiza întregul stoc de entități destinate procesării, chiar dacă ar exista o dinamică a elementelor din afara sistemului, apte de a fi procesate în sistem. Una din trăsăturile proeminente ale modelării discrete constă în faptul că un comportament dinamic susținut în interiorul



**Fig. 2.14 Modelul orientat de entități al unui sistem de verificare**

modelului depinde de mișcarea entităților de diferite tipuri. Acestea pătrund în spațiul modelului, posibil prin puncte diferite, și pleacă din model, de asemenea posibil din puncte diferite ale acestuia. Aceste **sosiri** în interiorul mediului sunt factorii care mențin sistemul în mișcare. Ele sunt echivalente cu funcțiile “de forțare” din cazul sistemelor continue. Există mai multe abordări pentru implementarea acestor concepte la sistemele discrete, dar două sunt elementele comune tuturor: avansul timpului de simulare și schimbarea, în consecință, a stării modelului sistemului.

*Evenimentele* au loc în momentele în care starea sistemului se schimbă prin deplasarea entităților între puncte ale spațiului modelului. Starea modelului rămâne neschimbată în toate celelalte momente de timp. Dacă se poate ține o evidență a tuturor evenimentelor din sistem, se poate stabili un mecanism pentru simularea *avansului timpului*. În acest scop, toate evenimentele cunoscute sunt ordonate cronologic, iar timpul simulării va fi avansat de la un eveniment la următorul în secvență cronologică. Pentru că starea sistemului nu se modifică între două evenimente, nu se pierde informații dacă nu se iau în considerare perioadele dintre două evenimente.

### 2.8.1.2 Diferitele abordări de modelare în simularea discretă

Pentru ilustrarea acestor abordări ale simulării discrete, se consideră modelul unei cozi de așteptare simple la un post de verificare a calității. Justificarea studiului pentru managerul fabricii este evident, pentru că oferă răspunsuri la întrebările:

- este lung timpul mediu de așteptare al obiectelor ?
- predomină cozile lungi la verificare ?
- este nevoie de încă un post de verificare ?

Pentru alcătuirea modelului (funcția gnoseologică + praxiologică), se apelează la statisticile disponibile asupra ratelor sosirilor prezumtivelor obiecte a căror calitate trebuie verificată și asupra duratei medii a procesului de verificare. Tratarea problemei de simulare poate urma căi diferite, funcție de modurile de abordare; de menționat că primele două - din cele ce vor fi prezentate în continuare - sunt mai populare în mediile americane, pe când ultima, în cele europene.

#### 2.8.1.2.1 Modelarea orientată pe entități

Aceste modele pun accentul, după cum sugerează și numele, pe entitățile care intră în spațiul modelului. Constau în principal din urmărirea evoluției acestor entități în cadrul modelului (prin spațiul-model), înregistrând toate modificările, întârzierile, așteptările și timpii de lucru (din starea activă) create de entități. Se contabilizează, pe lângă multe alte lucruri, datele statistice referitoare la timpul mediu de așteptare în toate cozile și la numărul de entități procesate de model.

Modelul orientat pe entități pentru exemplul dat este prezentat în figura 2.14 (“cabină telefonică”). Din motive de simplitate, nu a fost reprezentată coada de așteptare pentru plecare după verificare (prin tranzacțiile aferente), timpul de așteptare fiind, aici,



nul.

În contextul acestui tip de abordare, **tranzacțiile** reprezintă sosirile obiectelor, alăturarea la sfârșitul cozii, deplasarea către postul de verificare, executarea verificării și părăsirea spațiului modelului. Nucleul de operare este postul de verificare. Fiecare obiect sosit este automat etichetat, eticheta fiind conexată momentul sosirii, iar timpul consumat cu așteptarea în coadă este înregistrat, de asemenea și durata de ocupare a postului de verificare.

Este relativ ușor de urmat un proiect de simulare în această abordare, dar i se reproșează insuficiența acuratețe de modelare a sistemelor complexe, precum și o insuficientă flexibilitate.

#### 2.8.1.2.2 Modelarea orientată pe evenimente

Acest tip de modelare se bazează pe un mecanism care creează dependența comportamentului modelului, de evenimentele care se desfășoară pe durata execuției dinamice a simulării. Entitățile sosesc în interiorul spațiului modelului și se mișcă spre punctul lui de descărcare. Evenimentele sunt mijlocul prin care mișcarea entităților este "mecanizată" de la un punct la altul. Dacă momentul de timp corespunzător unui eveniment este atins, se întreprind două acțiuni:

**Tabelul 2.4**

EVENIMENTUL	SOSIRE	ÎNCEPERE VERIFICARE	PLECARE
PROCESAREA EVENIMENTULUI	Generare obiect care să se alăture cozii	Extragere obiect din coadă pentru a începe verificarea. Postul e marcat OCUPAT	Extrage obiectul din post. Marchează postul VACANT
PLANIFICAREA ALTOR EVENIMENTE	(1) Următoarea sosire (2) Începerea verificării (dacă coada e nulă)	Plecarea la sfârșitul verificării	Începutul următoarei verificări (dacă există coadă)

- în primul rând, evenimentul în sine este procesat, urmărind ce fel de acțiune este programată a avea loc la momentul îndeplinirii acestuia;
- în al doilea rând, întrucât momentul evenimentului este singurul punct de la care este permisă o modificare a stării, trebuie să aibă loc o (re)programare a evenimentului următor.

Pe această cale, o secvență interactivă de evenimente determină un comportament dinamic al modelului.

Din punctul de vedere al unei astfel de abordări, sistemul din aplicația exemplu are drept "motor" sosirile unui obiect și alăturarea la coada de așteptare. Fiind dată rata medie (preconizată) a sosirilor, se generează o secvență aleatorie de sosiri drept o serie de evenimente. Fiecare sosire o programează pe următoarea din secvență, intervalul între sosiri fiind aproximat printr-o distribuție statistică. Procesarea evenimentelor constă doar în generarea de obiecte care se alătură la coadă.

Logica de desfășurare ulterioară a simulării depinde de circumstanțe. Dacă nu există coadă, **sosirea** va programa și **începutul verificării**, care are loc imediat după sosire. Începutul verificării programează **plecarea**, acesta semnificând sfârșitul procesării (verificării). Durata verificării este stabilită prin generarea unei valori aleatoare conform unei distribuții statistice convenabile. Odată ce evenimentul **plecare**

este atins, verificarea s-a terminat și obiectul părăsește spațiul modelului. Dacă există coadă, este programat următorul eveniment **început verificare**, și astfel procesul se menține tot timpul cât există obiecte care sosesc pentru a fi verificate. Tabelul 2.4 prezintă o sinteză a modelului bazat pe evenimente.

O altă categorie de aplicații care se pretează foarte bine la o astfel de abordare, a unei simulări discrete, este gestiunea stocurilor (de inventar).

### 2.8.1.2.3 Ciclurile de activitate

Ciclurile de activitate centrează modul de desfășurare a unui proces în jurul conceptului de **activitate** care poate fi definită drept starea de "ocupat" a unei entități, stare delimitată de două evenimente. Acestea din urmă poartă denumirea de evenimente **începere** și respectiv **terminare de activitate (start/stop)**. O activitate determinată nu poate avea loc până ce toate entitățile implicate în aceasta nu sunt disponibile, respectiv, entitățile care trebuie să participe la o anumite activitate nu o pot aborda până ce aceasta nu este întreruptă. La fiecare moment de început al unui eveniment, activitățile sunt scanate pentru a se asigura dacă oricare din ele se află în poziție de începere. Se deduce că în momentul-eveniment de începere de activitate are loc o schimbare de stare (de la *inactiv* la *ocupat*) pentru entitățile asociate activității respective. În aceeași manieră se pun problemele la terminarea de activitate, dar modificarea de stare este de la *ocupat* la *inactiv*. Se deduce, de asemenea, că o activitate trebuie să fie precedată și succedată de cel puțin o coadă de așteptare, indiferent de situațiile start/stop.

Pe baza celor enunțate rezultă că o secvență alternantă de cozi de așteptare și activități, pornind de la, și oprindu-se la o coadă, definește așa-numitele cicluri de activitate. Dacă secvența începe și se termină cu aceeași coadă, rezultă un *ciclu închis* de activități.

Noțiunea de **clasă de entități** se înscrie natural într-un astfel de model de sistem. Este nevoie în acest sens de a defini *cicluri distincte* pentru *fiecare clasă* de entități existente, astfel că alcătuirea unui asemenea model constă doar în a constata ce fel de tipuri (clase) de entități trebuie să conțină acesta. Modelul se construiește prin înșiruirea grafică a ciclurilor de activitate corespunzătoare. Conectarea ciclurilor se face și prin activitățile care reclamă entități din mai multe clase diferite, putând fi astfel simulate sisteme foarte mari și complicate.

Ciclurile de activitate pentru aplicația-exemplu sunt de două tipuri, pentru că se raportează la cele două clase de entități existente în sistem: **OBIECTE** și respectiv **POSTUL DE VERIFICARE** (figura 2.15).

Obiectele sunt introduse în mediul-sistem cu ajutorul activității **SOSIRE**. Coada care definește frontiera este etichetată "Lumea înconjurătoare", fiind plasată și la celălalt capăt, unde obiectele execută **PLECAREA** din sistemul modelat. Dacă se dorește, poate fi utilizat un ciclu închis pentru entitatea **OBIECTE**.

Secvența alternantă de cozi și activități este utilă pentru a conferi unei asemenea

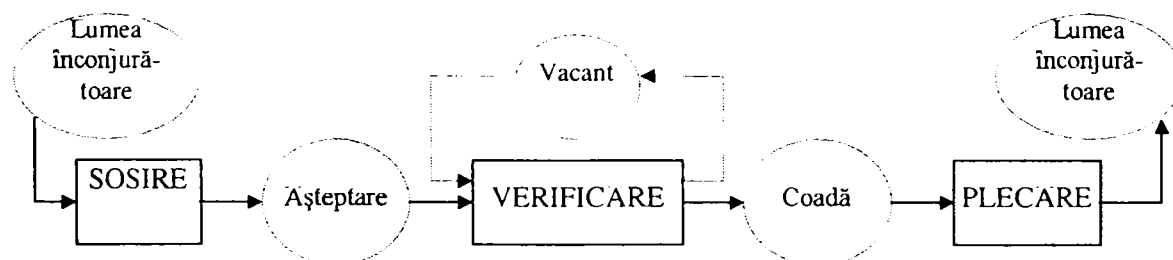


Fig. 2.15 Modelul orientat pe cicluri de activitate

abordări o sintaxă și reguli generale care pot fi aplicate la construcția de modele. Iată câteva dintre acestea:

- ◆ alternanța activitate-coadă este obligatorie;
- ◆ activitatea VERIFICARE este o activitate condiționată, pentru că poate începe numai dacă ambele clase de entități necesare pentru efectuarea sa sunt disponibile;
- ◆ activitatea PLECARE este o activitate frontieră, care va începe numai dacă activitatea VERIFICARE este terminată;
- ◆ coada dintre cele două activități este redundantă, fiind plasată doar din necesitatea de a se respecta sintaxa;
- ◆ activitatea SOSIRE - fiind strict un eveniment - este tratată drept o activitate de durată zero;
- ◆ ciclul pentru POST DE VERIFICARE este un ciclu închis, conectat cu cel pentru OBIECTE prin intermediul activității comune VERIFICARE.

Abordarea de acest tip este cea mai utilizată în aplicațiile de simulare a sistemelor de fabricație ([Kov94a], [Leț98]). O metodă foarte populară pentru simularea sistemelor de fabricație flexibile este cea a rețelelor Petri ([Dav92]).

### 2.8.1.3 Software aferent simulării discrete - blocurile structurale

#### 2.8.1.3.1 Definirea și setarea modelului

Definirea și inițializarea modelului pentru simulare depinde foarte mult de mediul software utilizat.

În unele cazuri se cere încărcarea secvenței de coduri a limbajului pentru descrierea trăsăturilor modelului. Împreună cu datele, aceste secvențe sunt procesate de translatorul de limbaj pentru a furniza un modul executabil pe căi standard, care este constituit din blocuri structural-funcționale.

Unele medii furnizează facilități interactive de intrare, la care implementarea modelului are loc în pași aflați sub controlul unui program ușor de urmărit. Se produc astfel verificări ale modelului înainte de manipularea sa.

#### 2.8.1.3.2 Legătura dintre variabilele aleatoare și simularea discretă

Legătura dintre variabilele aleatoare și simularea discretă trebuie implementată în modelele destinate simulării cu calculatorul.

În aplicația exemplu, sunt două procese aleatoare în funcțiune:

- sosirile persoanelor care se alătură cozii la intervale neregulate (fiind de aceea sosiri *intâmplătoare*);
- durata nedeterminată (*intâmplătoare*) a unui apel.

Informațiile necesare pentru simularea discretă se găsesc cu ajutorul comportamentului mediu-statistic al elementelor modelului, cel individual neavând relevanță, îndeosebi dacă numărul celor considerate este foarte mare. Se poate deci genera variabilitatea aleatorie pentru fenomen dacă se face uz de cea mai apropiată de model distribuție statistică din cele cunoscute și utilizabile (distribuțiile: uniformă, triunghiulară, binomială, exponențială, negativ-exponențială, Poisson, Gauss, normală etc.).

#### 2.8.1.3.3 Avansarea în timp

Avansarea în timp în cazul simulării discrete (la care schimbarea de stare are loc la un timp-eveniment determinat), se realizează prin salturi de la un eveniment la

evenimentul următor în ordine cronologică. Acesta este cazul în care este necesar doar de a consulta coada de evenimente în oricare punct, cu scopul de a se asigura durata următorului eveniment de procesat și timpul (momentul) de avans la acest punct.

Pentru sistemele care lucrează prin manipularea cozilor-eveniment, acest mecanism funcționează bine, dar modelele bazate pe cicluri de activitate apelează la conceptul de *scanare de activități*; astfel că nu este neapărat necesară o capacitate de avansare a timpului din punctul de vedere al funcționabilității modelului.

## 2.8.2 Calculul analogic și cel hibrid în aplicații de simulare

### 2.8.2.1 Introducere

Deși este unanim vehiculată părerea că la ora actuală calculul analogic și cel hibrid sunt depășite și nu se mai utilizează, în sursele bibliografice se fac referiri la acestea din următoarele motive:

- a) calculatorul analogic a fost precursorul mijloacelor hardware în domeniul simulării, fiind utilizat pentru rezolvarea ecuațiilor înaintea dezvoltării tehnicilor digitale; mijloacele software de simulare digitală tind să urmărească un traseu de *emulare analogică* a acestor rezolvări, având avantajul dezvoltării metodelor de integrare numerică (prezentate, de exemplu, de [Bak76], [Ixa79], [Kil97], [Mar87]), care largesc foarte mult aria de utilizare;
- b) tratarea analogică a problemelor se constituie în "lecții" pentru înțelegerea *uneltelor software digitale emulate corespondente* și pentru familiarizarea cu acestea;
- c) adoptarea cvasi-generalizată a interfețelor grafice pentru utilizator (GUI) a condus la dezvoltarea de medii de programare bazate pe conceptul de calcul analogic orientat pe blocuri funcțional-structurale (unul din cele mai utilizate fiind SIMULINK sub MATLAB).

Se accentuează că una din cele mai importante posibilități de lucru a calculatoarelor analogice este executarea foarte rapidă a operațiilor de integrare, strict necesare pentru integrarea ecuațiilor diferențiale descriind evoluția sistemului.

### 2.8.2.2 Componentele unui calculator logic-paralel analogic

Componentele analogice se împart în trei clase distincte, fiind capabile să descrie - cu câteva excepții - modelele continuu-variabile, prin relațiile dintre intrări și ieșiri pe care le pot stabili. Aceste mărimi iau forma unor tensiuni variabile.

**A. Componentele lineare** pot executa operațiile de:

- inversare de semn (printr-un *inversor*);
- sumă algebrică (*amplificator sumator*);
- multiplicare cu o constantă (*potențiomtru*);
- integrare continuă cu una sau mai multe intrări (*integrator*).

**B. Componentele nelineare** pot executa operațiile de:

- multiplicare și divizare de variabile (*multiplicator*);
- generarea unei funcții relativ arbitrare de o variabilă (*generator de funcții cu diode*);
- mecanizarea constrângerilor (*limitatoare*), operații logice elementare, operații speciale (histereză ș.a.).

#### 2.8.2.2.1.1 C. Componentele logice

Componentele logice fac parte integrantă din sistemele de calcul logic-paralele

sub forma fizică a porților ȘI (AND) și SAU (OR), respectiv circuite mono- și bistabile. Cu ajutorul lor pot fi programate pentru execuție cele mai variate acțiuni de simulare. Datorită faptului că numărul componentelor logice disponibile este de obicei limitat, trebuie utilizate regulile algebrei booleene pentru minimizarea funcțiilor logice ale modelului ([Mur96]). Produsul final obținut trebuie studiat pentru însușirea regulilor după care operează sistemul de calcul analogic.

### 2.8.2.3 Componentele de interfațare

Componentele pentru interfațare au deasemenea corespondență în structurile posibil de implementat în calculul digital. Se pot da drept exemple clasice de categorii diferite în ceea ce privește elementele de introdus printr-o interfață:

- comparatorul analogic / construcția condițională DĂCĂ (IF);
- rezolvarea unei ecuații diferențiale ordinare / blocul integrator digital.

### 2.8.2.4 Structura de simulare pentru calcul analogic

Pentru a ilustra modul de lucru al unui calculator analogic, se poate arăta soluționarea ecuațiilor diferențiale prin parcurgerea pașilor necesari derivării așa-numitelor ecuații-mașină. A fost ales un exemplu clasic pentru a releva mecanismul de alcătuire a schemei-program în mediile software de simulare.

#### 2.8.2.4.1 Modelul unui sistem amortizat aflat în mișcare liberă

Ecuația diferențială ce descrie evoluția unui astfel de sistem și condițiile la limită pot fi, de exemplu:

$$\begin{cases} 5 \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + \dot{x} + 10 \cdot x = 0 \\ x_0 = 1; \dot{x}_0 = 0 \end{cases} \quad (2.23)$$

în care indicele 0 se referă la valoarea inițială. Ecuația poate descrie mișcarea unei mase  $m=5$  legată de elementul fix printr-un arc cu constanta  $k=10$  și un amortizor cu  $c = 1$ .

Pentru execuție cu calculatorul analogic, trebuie descompusă ecuația în două ecuații de ordinul întâi, rezultând sistemul (2.24):

$$\begin{cases} \frac{d\dot{x}}{dt} = \frac{-\dot{x} - 10 \cdot x}{5} \\ \frac{dx}{dt} = \dot{x} \end{cases} \quad (2.24)$$

cu aceleași condiții inițiale.

Din punctul de vedere al programării analogice, este mai des utilizată forma de exprimare cu ecuații integrale (pentru că integrarea atenuează discontinuitățile introduse de erori, pe când derivarea le accentuează):

$$\begin{cases} \dot{x} = \int_0^T \left( -\frac{1}{5} \cdot \dot{x} - 2 \cdot x \right) \cdot dt + \dot{x}_0 \\ x = \int_0^T \dot{x} \cdot dt + x_0 \end{cases} \quad (2.25)$$

Rățiunea acestei abordări constă în aceea că pe durata operației de scalare a amplitudinii, aceasta este automat aplicată pentru valoarea inițială cerută. Trebuie ținut cont, de asemenea, de inversiunea de semn de la amplificatorul calculatorului. Dacă se alege (figura 2.16) o rezolvare pentru  $+x$  (pentru aceasta trebuie privită soluția din partea dreaptă), atunci intrarea în integratorul 1 (derivata) va fi negativă. Întrucât s-a inversat ieșirea integratorului 2, intrarea va avea semnul derivatei din prima ecuație integrală, fără nici o schimbare de semn. Aceasta înseamnă că intrarea va fi  $-x$ , și deci va fi nevoie de un inversor în circuit (amplificatorul 3). Algebric, procesul de schimbare de semn este luat în considerare prin scrierea ecuațiilor în următoarea formă:

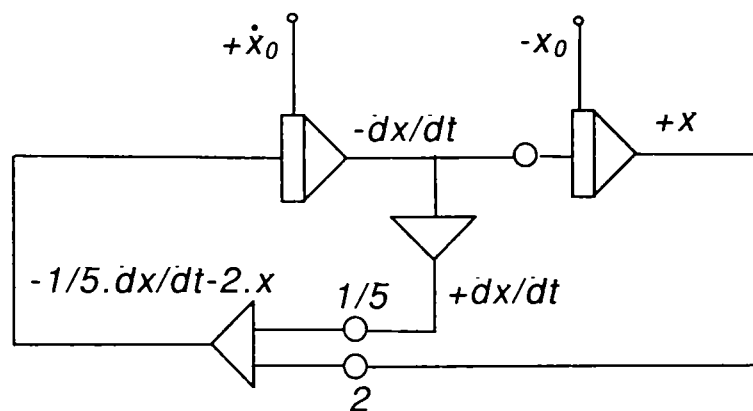


Fig. 2.16 Diagrama model pentru un sistem oscilant amortizat

$$\begin{cases} -(-\dot{x}) = \int_0^T \left( -\frac{1}{5} \cdot \dot{x} - 2 \cdot x \right) \cdot dt + \dot{x}_0 \\ -(+x) = \int_0^T -\dot{x} \cdot dt - x_0 \end{cases} \quad (2.26)$$

În fiecare caz, semnul minus care precede soluțiile este corespondența algebrică

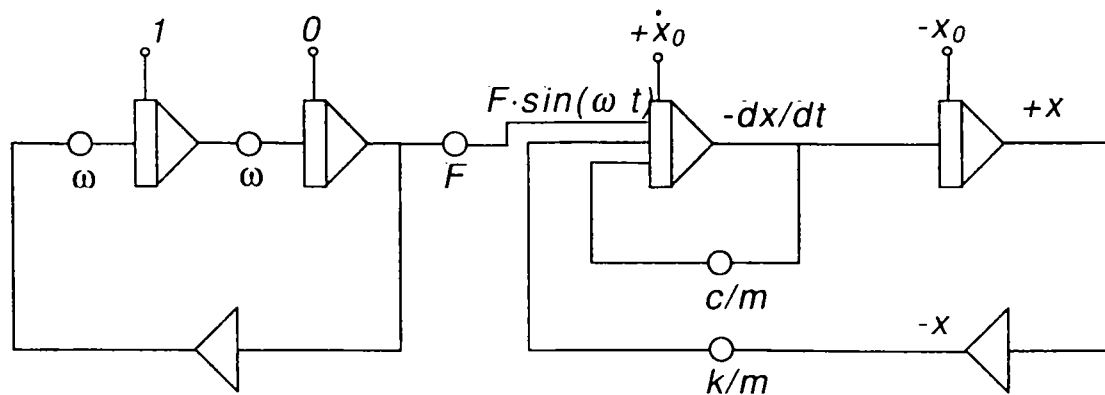


Fig. 2.17 Diagrama model pentru un sistem oscilant cu amortizare forțată

a inversiunii care are loc în amplificator. Există și soluții alternative, de exemplu utilizând integratoare cu mai multe intrări.

#### 2.8.2.4.2 Modelul unui sistem cu amortizare forțată

În figura 2.17 este prezentată schema-program pentru simularea oscilațiilor forțate amortizate ale unui sistem mecanic. Ecuația de mișcare și condițiile la limită sunt:

$$\begin{cases} m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + c \cdot \dot{x} + k \cdot x = F \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ x_0 = 1; \dot{x}_0 = 0 \end{cases} \quad (2.27)$$

Forța exterioară armonică este simulată prin grupul din stânga, unde valorile inițiale sunt  $0 = \sin(0)$  și  $1 = \cos(0)$ .

#### 2.8.2.5 Introducere în simularea cu calculatoare hibride

Sistemele hibride încorporează într-un tot unitar cele două sisteme diferite de calcul - legate printr-o interfață - încercând să le combine avantajele:

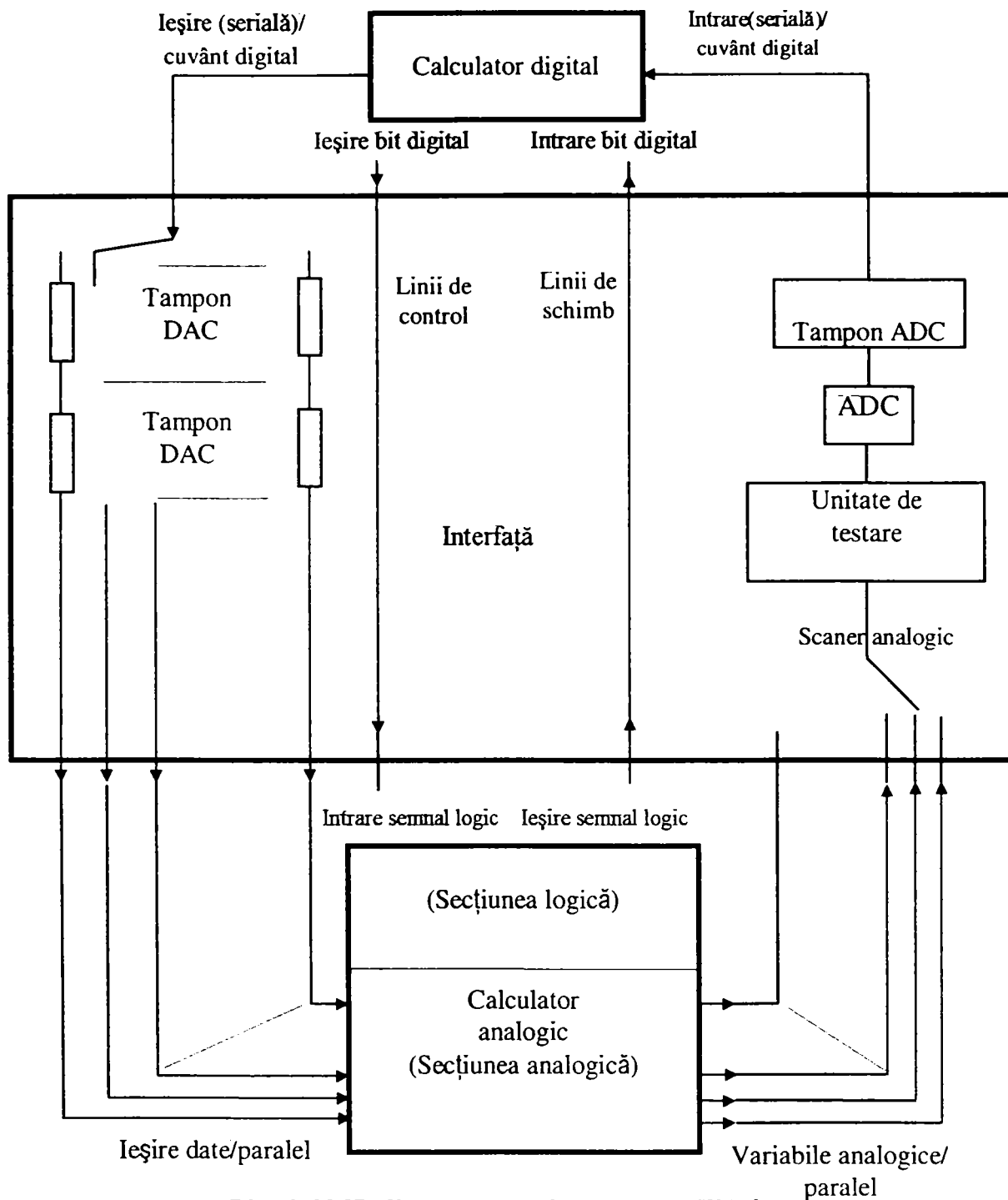
- viteza mare de operare și gradul mare de interactivitate a modului analogic;
- ușurința de programare și depanare, precum și precizia înaltă a calculului numeric.

Arhitectura unui astfel de sistem - prezentată în figura 2.18 - relevă existența a patru linii de comunicație între cele două calculatoare componente, de-a lungul interfeței. Două dintre acestea sunt prevăzute pentru schimbul de informații și două pentru control și notificarea statutului (DAC este convertor analogic-numeric, iar ADC - convertor numeric-analogic).

Se remarcă faptul că pe partea de semnale logice nu sunt probleme la corespondența analogic-numeric sau invers. Ele apar numai la celelalte semnale, din cauza naturii transferului D - A sub forma timpilor de întârziere care pot afecta operațiile de control dintr-un proces de simulare.

Partiționarea modelului la simulare într-un calculator hibrid poate fi efectuată în modul:

- iterativ, când ambele activități (cea numerică și cea analogică) sunt secvențiale reciproc, rezultatele fiind transferate înainte-înapoi alternativ;



**Fig. 2.18** Arhitectura unui calculator hibrid

➤ simultan, când rezultatele sunt transferate înainte-înapoi în același timp.

Există câteva particularități ale simulării hibride de care trebuie ținut seama, particularități care privesc funcția de control a calculatorului digital:

- într-un moment particular al execuției verificărilor de control, ADC trebuie să pună la dispoziția acestuia o valoare de probă pentru variabila de controlat; se presupune că întârzierea datorată conversiei este neglijabilă;
- calculatorul de control va determina erorile de proces relativ la un set de valori dorite ale variabilelor de control;
- pe baza erorilor astfel determinate, algoritmul de control va produce valorile digitale ale acțiunii de control, valoare care rămâne constantă de-a lungul perioadei de control (până la următoarea actualizare), comandând - prin semnalul convertit de DAC - acționarea de control a procesului în timpul perioadei; ciclul acesta de operații se repetă la fiecare interval stabilit de eșantionarea pentru "semnalele de probă".



## 2.8.3 Simularea continuă cu calculatoare digitale

### 2.8.3.1 Caracteristici ale modelelor continue

#### 2.8.3.1.1 Modalitatea de operare a corespondenței cu calculul analogic

În cazul pregătirii unui model pentru calculul analogic, se efectuează o *descompunere a unei ecuații diferențiale de ordin mare într-un sistem de ecuații de ordinul întâi*. Dacă se respectă această tehnică, prin aplicarea unor metode standard de integrare numerică, ținând cont și de performanțele atinse de calculatoarele digitale, nu mai există diferențe semnificative față de metodele analogice.

Corespondența dintre blocurile analogice și cele digitale nu ridică probleme la nici unul din operatorii clasici: ecuații diferențiale, algebrice, funcții arbitrare, funcții speciale sau de transfer, cu observația că la unele din acestea (funcțiile arbitrare spre exemplu) implementarea digitală permite o programare mai ușoară la performanțe superioare.

#### 2.8.3.1.2 Urmărirea rezultatelor

O altă cerință a simulării digitale este posibilitatea unei urmăriri a rezultatelor prin reprezentări grafice inclusiv în timpul perioadei de dezvoltare a modelului. Dealtfel, în oferta mediilor de simulare se subînțelege că producția rapidă de grafice (inclusiv *on-line*) este parte integrantă a setului de unelte software disponibile. Simulaționistul poate astfel să aibă acces la orice comportament inadecvat al modelului și să oprească execuția. Această facilitate deosebită readuce în actualitate era calculului analogic, când exista posibilitatea de urmărire *on-line* a semnalelor într-o secvență de calcul analogic.

În ceea ce privește valorificarea rezultatelor post-experiment, este necesar ca investigatorul să poată indica și realiza o monitorizare a valorilor pentru acele variabile care sunt relevante pentru manipularea modelului. La sfârșitul simulării, prin uneltele grafice oferite de mediul software, modelul trebuie să aibă posibilitatea unei prelucrări interactive a dependențelor dorite (inclusiv cele speciale, cum ar fi cele de analiză spectrală în simulările stohastice).

#### 2.8.3.1.3 Structura de simulare

Structura de simulare (figura 2.12) urmărește și în cazul cel mai general, al calculului digital (și al celui hibrid) pe cea care a fost principial prezentată.

#### 2.8.3.1.4 Problemele de implementare care nu se regăsesc la calculul analogic

Calculatoarele analogice sunt sisteme paralele, la care toate variabilele sunt prelucrate simultan. Implementarea modelelor pentru simulare în calculatoarele digitale trebuie însă să țină cont de faptul că acestea sunt sisteme de tip serial, în care operațiile au loc secvențial. Nu este admisă utilizarea unei variabile într-o linie de program fără ca aceasta să fie definită în prealabil, și deci liniile de program trebuie să fie ordonate într-o secvență determinată.

O altă diferență este relevată de modul de execuție a ciclurilor pentru operațiile de integrare, la care se pornește de la condițiile inițiale și durează un număr determinat de pași de timp, până la epuizarea algoritmului. Ecuațiile participante sunt *ecuații*

*diferențiale ordinare* (notație prescurtată ODE din limba engleză, folosită și pentru modulele de rezolvare). Utilizând algoritmi de rezolvare a ODE se obține un mod de operare cvasi-paralel asupra setului de ecuații, spre deosebire de calculul analogic, în care operația se desfășoară în paralel în mod natural, prin circuitele electronice proprii.

De asemenea, deoarece tratamentul variabilelor algebrice are loc în două situații diferite, când structurile ciclice:

1. abordează ecuațiile algebrice propriu-zise (este inițializată una din variabile, care își modifică valoarea la fiecare iterație);
2. abordează ecuațiile diferențiale în aceeași manieră cu cele algebrice (se efectuează mai întâi substituția și apoi are loc secvența de calcul),

apar dificultăți la structurarea secvenței corecte care să poată emula un calcul cvasi-paralel. Limbajele de simulare moderne previn astfel de dificultăți prin blocurile procedurale implementate (similar cu funcțiile proprii predefinite). S-a încetățenit abreviația DAE (de la inițialele care provin din expresia *ecuații diferențiale și algebrice* în limba engleză) pentru a desemna astfel de blocuri. Ele oferă implicit soluții ale unor ecuații algebrice care conțin manifestări derivative ale modelului, dar se comportă ca o

singură entitate. Soluțiile obținute cu DAE sunt mai apropiate de modul de operare paralel-analogic.

Blocurile integratoare ale limbajelor de simulare oferă variante de algoritmi pe care utilizatorul le poate pre-seta. Pentru exemple simple, se poate constata deosebita sensibilitate a acestor operații utilizând diferiți algoritmi pentru același tip de model. Adecvarea algoritmilor nu este aceeași pentru toate tipurile de modele.

Calculatoarele digitale sunt sensibile și la discontinuitățile care apar în soluțiile operațiilor de integrare. Există algoritmi care le pot depăși fără a perturba vizibil simularea.

În fine, în cazul calculului analogic, fenomenul cunoscut sub numele de *rigiditate* (*stiffness* în limba engleză) nu perturbă desfășurarea calculelor pentru ecuațiile diferențiale. Acesta are loc dacă parametrul cunoscut drept *constantă de timp* (ce caracterizează rata de modificare a soluțiilor ca răspuns al intrărilor în ecuație) este o mulțime vidă. La sistemele de calcul digitale, proprietatea de *rigiditate* conduce la o variație în timp nedorită a variabilelor-soluție (prea rapidă sau prea lentă). Există însă metode care pot diminua acest efect.

### 2.8.3.2 Sisteme cu parametri distribuiți

#### 2.8.3.2.1 Introducere

Considerațiile prezentate au făcut referire la modele dependente exclusiv de timp. Pentru sistemele dinamice care depind concomitent de timp și de spațiu (printr-una sau mai multe variabile) modelul matematic constă în ecuații cu derivate parțiale (abrevierea încetățenită în domeniul simulării fiind PDE, provenind tot de la inițialele din limba engleză). Referințele redete în continuare – privitor la contribuțiile diferiților cercetători în această problemă - pot fi regăsite în sursa [Ben95]. În [Ben95] se afirmă că o listă cuprinzătoare de PDE (și ODE) fundamentale care descriu sisteme din domeniul tehnico-științific a fost prezentată de Hughes și Gaylor în 1964.

Pentru a putea fi folosite mijloacele generale de simulare care stau la dispoziția investigatorilor, trebuie efectuată convertirea PDE în ODE. Pentru aceasta este necesară utilizarea procedurii de discretizare relativ la una din variabilele independente, care reclamă aproximări cu diferențe finite pentru unele derivate ale modelului.

## 2.8.3.2.2 Discretizarea: conversia PDE în ODE

Bekey și Karplus (1968) au prezentat diferite metode de discretizare prin implementarea simulării în calculatoare hibride, la care soluțiile sunt posibil de obținut în secțiunea analogică a sistemului de calcul. Ceva mai târziu, Schuchmann (1970) a prezentat o trecere în revistă cuprinzătoare a problematicii PDE în spațiul cu o singură dimensiune, cu evaluarea soluțiilor prin diferite metode de simulare.

Pentru acest din urmă caz, există două alternative de urmat:

1. discretizarea modelului în lungul dimensiunii respective și rezolvarea setului de ODE cu timpul variabilă independentă;
2. discretizarea modelului prin prisma variabilei-timp și rezolvarea - cu ajutorul facilităților de simulare - a setului de ecuații diferențiale cu coordonatele geometrice variabile independente; în acest caz, trebuie convertit timpul de simulare în variabila independentă distanță.

Se poate da drept exemplu pentru ilustrarea celor două alternative una din ecuațiile fundamentale ale mecanicii fluidelor, ecuația de continuitate pentru fluide compresibile.

## 2.8.3.2.3 Problemele care apar la simulările care fac uz de discretizări

Problemele care trebuie avute în vedere la simulările care fac uz de discretizare sunt legate de:

- stabilitatea numerică a ODE rezultate, ea fiind afectată, chiar dacă ODE – în sine - sunt stabile (provenind de la PDE nelineare, pot conține un șir de constante de timp); trebuie aleși acei algoritmi de integrare numerică ce au un comportament rezonabil cu ajutorul limitărilor de eroare impuse;
- valorile inițiale și limită care trebuie să ia forma unui profil de timp (sau spațiu) pentru a putea fi rezolvate ecuațiile; numărul acestor condiții de impus depinde și de ordinul ecuației discretizate.

## ***2.9 Tendințele actuale în hardware și software pentru simulare ([Bas97], [Ben95], [Eyk81], [Leț98], [Răd81], [McG92])***

### **2.9.1 Sisteme de calcul - tendințe hardware**

Mutația performanțelor înalte a calculatoarelor digitale către minicalculatoare a impulsat - împreună cu oferta de software - generalizarea utilizării metodelor de simulare în multiple aplicații, din cele mai variate domenii.

Dezvoltarea rețelelor de calcul a reprezentat încă un pas semnificativ înainte, deoarece multe centre de calcul au fost proiectate în jurul unor procesoare-server centrale ultrarapide cu posibilități de partajare a timpului de calcul, posibil de accesat printr-o mulțime de terminale specializate cu control de la distanță. Acestea, în cazul procesării de date din domeniul economic sau pentru calcule pur matematice pot fi dispozitive de intrare/ieșire clasice, în cazul proiectării inginerești asistate pot fi periferice de tip grafic, pentru simularea hibridă pot fi terminale cu elemente analogice etc. Apar pe piață și terminale specializate pe procese de instruire.

Terminalele specializate pentru simulare sunt similare funcțional cu sistemele

hibride mici și mijlocii (deci sunt "inteligente") și posedă capacități limitate de calcul sub control local. Creșterea acestor capacități le va transforma în calculatoare-satelit de tip stație de lucru. Uzual însă, ele servesc deocamdată la telecomunicarea utilizatorului cu procesorul central.

Prin rețelele de calculatoare conectate la servere puternice utilizatorii interesați de aplicații de simulare au acces nelimitat la programe specializate din ce în ce mai puternice și la echipamente specializate din ce în ce mai performante.

## 2.9.2 Tendințe software

### 2.9.2.1 Caracteristicile fundamentale ale programelor orientate pe simulare

Multe programe de simulare pot fi scrise în limbaje de nivel înalt, de uz general, care în majoritatea lor, la ora actuală sunt oferite drept medii pentru platforme Microsoft Windows, sau în medii cu limbaje specializate pentru aplicații de simulare. Acestea din urmă trebuie să aibă caracteristicile esențiale ale unor astfel de pachete software, stabilite încă din perioada de debut a metodelor de simulare. Acestea sunt impuse prin existența în pachetul software a:

- ◆ cel puțin unei rutine de integrare numerică;
- ◆ unui modul de intrare pentru descrierea modelului (de obicei tip procedură);
- ◆ unui modul de introducere a datelor;
- ◆ unui modul de ieșire pentru rezultatele simulării;
- ◆ facilităților grafice pentru afișarea dependențelor rezultate prin simulare.

În ultimul timp, la caracteristicile generale se adaugă încă una: posibilitatea de ierarhizare și interconectare a aspectelor diferențiate care coexistă într-un sistem deosebit de complex (în ultimă instanță, este vorba de manipularea interconectată a sub-modelelor elementare ale unui model care integrează comportamente diferite, în sensul celor prezentate în subcapitolul 2.4.3.B).

După cum s-a menționat mai sus, acestea au fost - în majoritate - concepute pe baza unui limbaj de nivel înalt (des utilizat fiind și acum limbajul FORTRAN în S.U.Ă., pe cale de a fi complet înlocuit de limbajul C/C++ în Europa).

La ora actuală se observă o tendință de desprindere virtuală a sintaxei pachetelor software dedicate simulării de regulile și restricțiile impuse de limbajele de nivel înalt (în particular de FORTRAN și C/C++). În aceasta constă caracteristica încorporată de așa numitele **limbaje de simulare**, ale căror module - structurând blocuri procedurale - nu fac altceva decât să emuleze funcții specifice calculatoarelor analogice. Cele mai multe pachete de simulare disponibile pe piața software sunt concepute drept medii de programare cu ajutorul limbajelor din această clasă. Acestea au marele avantaj că utilizatorul nu trebuie să aibă cunoștințe avansate de programare, pe de o parte, și că se utilizează unelte și tehnici de modelare grafice foarte rapide și intuitive (în interfețe grafice pentru utilizator - GUI), pe de altă parte.

### 2.9.2.2 Tehnici grafice specializate de modelare

Pentru a modela sisteme dinamice continue, se recurge la tehnica grafurilor de legătură; acestea permit și interconectarea dintre sistemele elementare ale unui sistem complex care le integrează. Avantajul acestei tehnici constă în faptul că poate realiza

interconectarea unor modele din diferite domenii ingineresti, dar la care apar elemente tip surse de energie, elemente acumulatori, disipatori și elemente de transfer.

Diagramele de stare stau la baza unor sisteme pentru modele discrete orientate pe eveniment precum pachetul Statemate (Harel ș.a., 1988). Modelele Statemate suportă ierarhizări și simulări concurente, ceea ce înseamnă că sistemele foarte complexe pot fi divizate în părți abordabile supuse simultan simulării.

Pentru sistemele discrete se oferă, de asemenea, software care utilizează rețelele Petri, foarte des întâlnite pentru modelarea unei întregi clase de sisteme, inclusiv sistemele de fabricație flexibilă.

### 2.9.2.3 Limbaje și medii de programare de uz general pentru simulare

Oferta actuală de limbaje și medii de programare de uz general pentru simulare este dominată de utilizarea tehnicii diagramei-bloc, posibil de utilizat și în modelarea sistemelor continue. În [Bas97] se oferă informații despre astfel de pachete soft și autorii care le-au conceput. Acestea sunt prezentate în continuare.

a) O astfel de tehnică este utilizată de pachetul ACSL (*Advanced Continuous Simulation Language*) (Mitchell and Gauthier Associates, 1991), disponibil și pentru calculatoarele compatibile IBM PC, și posedă toate caracteristicile cerute de o simulare combinată (*continuă și discretă*).

b) Cel mai popular mediu de programare de acest gen la ora actuală (fiind disponibil și sub sistemele de operare Microsoft Windows) - pentru aplicații ingineresti, inclusiv cele de modelare/identificare/simulare - este mediul MATLAB cu modulul de unelte SIMULINK ([Mat94]). Acesta are, de asemenea, posibilitatea de simulare combinată (*continuă și discretă*). Cu cele două pachete combinate se pot desfășura fără probleme activități de dezvoltare și analiză a sistemelor de conducere.

Este evident că versiunile mai noi ale tuturor programelor/mediilor software în domeniu, funcționând pe platforme Microsoft Windows, oferă posibilități și facilități deosebite pentru utilizatori. Unul dintre acestea este și mediul DYNAMO cu noua sa interfață grafică.

c) Un alt program din această categorie, SystemBuild (Pike și Johnson, 1994), suportă, de asemenea, ierarhizarea și interconectarea unor sisteme diferite. Deși nu dispune de unelte pentru analiza rezultatelor, are avantajul posibilității de lucru cu sistemul Xmath, de proiectare asistată de calculator a sistemelor de conducere (CACSD). Platforma combinată dispune, pe lângă funcții de dezvoltare și analiză a sistemelor de conducere, și de puternice funcții de vizualizare și animație. De remarcat că există și o posibilitate de lucru comună a Xmath cu Statemate.

Dezavantajul principal, pentru toate pachetele prezentate, constă în faptul că modelele obținute (de fapt liniile de cod generate pentru model) nu pot fi direct utilizate într-un sistem funcțional real ("*end-product system*").

d) Pachetul Beacon (Spang ș.a., 1993), pentru prima dată dezvoltat la General Electric Company, S.U.A., are posibilitatea de a genera, pornind direct de la modelul grafic al sistemului de conducere, codurile funcționale ale programului scrise în limbaj C, FORTRAN, ADA sau de asamblare. Cu ajutorul acestuia a fost produs codul programului de conducere a turboreactorului GE90, pentru aeronava Boeing 777. Din păcate, pachetul nu are facilitățile necesare pentru dezvoltarea și analiza propriu-zisă a sistemelor de conducere, astfel că trebuie utilizat mai întâi MATLAB/SIMULINK pentru alcătuirea modelului acestuia și apoi acesta translatat printr-o interfață în Beacon.

#### 2.9.2.4 Medii integrate de simulare

Pentru proiectarea sistemelor de conducere prin calculator, există încercări de dezvoltare a unor medii integrate (deocamdată în medii academice), capabile să realizeze specificațiile, proiectarea și implementarea acestora pentru funcționare în timp real. Un astfel de mediu este Development Framework (Browne ș.a., 1994), realizat la Universitatea din Sheffield, Marea Britanie, având o arhitectură deschisă, la care cercetătorul poate apela concentrându-se în mod deosebit la conexiunile de integrare a modelului, fără a consuma timp cu operațiile cerute de o interfață GUI.

Pentru construirea mediului, au fost utilizate elemente standard (subcapitolul 2.8.3.), mediile de simulare SIMULINK și Statemate și tehnici și instrumente software specializate pentru proiectare, traducere de limbaj și generare de coduri sursă.

#### 2.9.2.5 Modelarea completă, funcțional-geometrică

Un capitol aparte îl constituie simularea sistemelor-sursă care implică combinația dintre aspectul comportamental-funcțional și geometric-spațial al acestuia ([Sav97], [Luc98e]). Pentru aceasta se pot utiliza:

- programele clasice pentru CAD care au posibilitatea de structurare parametrică a obiectelor grafice, precum HELIX ([Pen97]), AUTOCAD, CATIA;
- programe specializate bazate pe element finit și combinații cu alte categorii de medii CAD-CAM
- mediile de simulare moderne care dispun de funcții grafice puternice, de exemplu modulul principal al mediului MATLAB, cu care pot fi construite de către utilizatori module specializate care permit modelări dinamice geometrice, cum sunt pachetele originale GEMOL și TRELINT ([Luc98a÷e], [Luc99h÷j]);
- combinații de medii de simulare cu sistemul Xmath (Statemate, SystemBuild, subcapitolul 2.9.2.3);
- aplicațiile specializate pentru realizarea de animație; din categoria celor posibil de utilizat și în tehnică, un bun exemplu îl constituie familia 3D Studio care pune la dispoziție pachetul pentru design/arhitectură ([Pet98a]);
- medii de dezvoltare pentru limbaje de realitate virtuală, cum este cazul limbajului VRML ([Jam98]).

### 2.9.3 Standarde utile pentru modelare ([Sav97])

Chiar dacă cu pachetele software de uz general de mare performanță (precum MATLAB+SIMULINK) se pot modela sisteme din domenii foarte variate, fiecare din produsele software comerciale are facilități deosebite pentru modelarea sistemelor de anumite categorii. Pentru sisteme foarte complicate, având părți distincte cu particularități deosebite, se recurge la modelarea și analiza fiecărei părți cu tehnicile potrivite. Este foarte probabil ca acestea să nu fie încorporate în unul și același produs. Din acest punct de vedere, ideal ar fi ca toate aplicațiile specializate să aibă posibilitatea de a transfera date și modele între ele, inclusiv să poată produce un cod utilizabil în producție. Pentru aceasta sunt necesare standarde cu referiri la modelare. Unele standarde generale de schimb de date conțin astfel de referiri și stau la baza dezvoltării de norme de comunicare între diferite pachete software.

Astfel, familia de standarde CDIF (*CASE Data Interchange Format*) stă la baza unor protocoale între Statemate și SystemBuild.

Se face apel în multe programe la standarde precum CORBĂ (*Common Object Request Broker Architecture*) pentru schimbul de date referitoare la obiectele ce se distribuie între aceste programe și diverse platforme de calcul.

STEP (*Standard Transfer Exchange Protocol - standard language for information modelling*) prevede modalități de codificare a datelor de modelare, dar merge inclusiv la datele tehnologice. Există și posibilitatea de a verifica dacă informația este corectă (ne-ambiguă și ne-redundantă).

Au fost dezvoltate și standarde specifice pentru unele tipuri specifice de modele, de exemplu *DSBlock neutral dynamics-model description format*.

### 2.9.4 Investigatori

Pentru a obține o simulare suficient de fidelă, simulaționistul trebuie să cunoască foarte bine atât capacitățile sistemului de calcul disponibil, cât și simulandul cu toate informațiile adecvate asupra acestuia, de asemenea și acuratețea necesară a rezultatelor.

În cazul sistemelor-sursă deosebit de complexe, se apelează la o echipă de investigatori pentru a se putea ajunge la rezultate veridice și utilizabile, echipă alcătuită dintr-un expert în domeniul simulandului, un matematician, un programator și - eventual - un analist.

### 3. Stadiul actual al cercetărilor privind interacțiunea inteligentă dintre un sistem activ și mediu (aplicații tip "contact-task")

#### 3.1 Definierea conceptului de aplicație tip "CONTACT-TASK" și conținutul acestuia ([Vuk95a], [Vuk97a], [Vuk97b], [Pot97], [Vuk85a], [Vuk94c], [Vuk97b], [Vuk98a], [Vuk98b], [Luc99f])

##### 3.1.1 Introducere

Prin sistem de lucru se înțelege orice sistem mecanic care are o finalitate funcțională bine determinată, fiind conceput de obicei pentru a rezolva problemele legate de o anumită aplicație. Din acest punct de vedere, roboții industriali sunt cele mai complexe sisteme de lucru.

În interacțiunea sa cu mediul înconjurător, orice sistem de lucru - indiferent de complexitatea sa - este supus acțiunii forței generalizate de contact  $F_c$ , care ia naștere tocmai datorită acestei interacțiuni (figura 3.1).

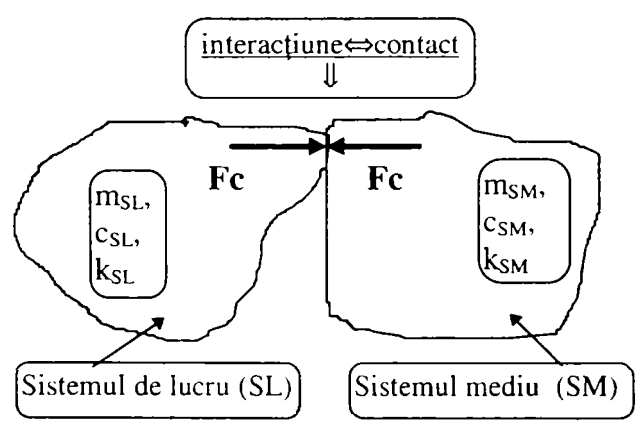


Fig. 3.1 Interacțiunea SL - SM în abordarea tradițională

Mărimea și evoluția în timp a acestei forțe depind de comportamentul dinamic-funcțional al sistemului de lucru pe de o parte și de proprietățile intrinseci (masa, rigiditatea/capacitatea de înmagazinare/disipare de energie, sau capacitatea de amortizare) ale fiecăruia din cele două sisteme aflate în contact pe de altă parte. Efectele



negative pe care le produce forța de contact (deformații, vibrații) se răsfrâng deasemenea asupra ambelor sisteme. Cuvântul "cheie" cu ajutorul căruia poate fi caracterizată interacțiunea celor două sisteme, "contactul", a dat și o denumire specifică utilizată pentru definirea generică a acelor aplicații la care se acordă o atenție deosebită tocmai modalităților de control și influențare a forțelor de contact: **aplicații de tip "contact-task"** (denumire promovată cu o semnificație modernă de domnul profesor Miomir Vukobratović de la institutul "Mihajlo Pupin" din Belgrad). Conceptul este după cum se poate constata, intrinsec legat de interacțiunea sistem de lucru - mediul înconjurător.

Trebuie menționat că domnul profesor Vukobratović a susținut - la ceremonia de decernare a titlului de *Doctor Honoris Causa* a Universității "Politehnica" din Timișoara din anul 1995 - o lucrare chiar pe această temă: [Vuk95a]. Preocupările domniei sale referitor la acest domeniu s-au concretizat prin numeroase studii și lucrări științifice (unele dintre acestea fiind cele specificate în dreptul titlului acestui subcapitol) inducând preocupări de aceeași natură și la Colectivul Interdisciplinar de Robotică – condus de dl prof. dr. ing. Francisc V. Kovacs - de la aceeași Universitate.

#### **Concluzie**

**O posibilă definiție pentru astfel de aplicații poate fi următoarea:** *aplicațiile de tip "contact-task" sunt acele aplicații la care, în cadrul interacțiunii dintre un sistem de lucru dinamic și mediul său înconjurător interesează (în mod deosebit) studiul, cunoașterea și controlul forțelor de contact care apar între cele două sisteme. Prin faptul că scopul acestor activități ale investigatorilor constă în diminuarea adaptivă, ("inteligentă") - cu ajutorul unui sistem de conducere care include sisteme de calcul performante - a forței generalizate de contact (deci și a efectelor negative asupra celor două sisteme a acestei forțe), conceptul (modern) înglobează implicit conținutul sintagmelor "conducere inteligentă" și "conducere activă".*

### **3.1.2 Comportamentul sistemelor aflate în interacțiune**

se diferențiază în primul rând prin capacitatea de a produce forțe care nu depind de energia stocată anterior în elemente acumulative (de tip arc), sau disipată prin elementele corespunzătoare de tip amortizor. În al doilea rând, de capacitatea de a controla și modifica în sensul dorit forțele produse ca răspuns la excitațiile altui sistem mecanic .

Ăcele sisteme care posedă caracteristicile prezentate pot fi denumite **sisteme "active"** din punct de vedere dinamic-funcțional și respectiv "inteligente" referitor la controlul forțelor de contact.

Celelalte sisteme, care se rezumă doar la a înmagazina sau a disipa energie (prin elemente cu caracteristică elastică sau de amortizare) și la care forțele care pot lua naștere sunt doar forțe de răspuns la mișcările relative, de deformație poartă denumirea de sisteme "**pasive**".

### **3.1.3 Evoluția modului de abordare a interacțiunii sistemelor de lucru cu mediul înconjurător**

#### **3.1.3.1 Abordare tradițională**

În abordarea tradițională, la concepția, proiectarea și producția de sisteme mecanice, indiferent de complexitatea lor, rareori se ținea seama de modul în care aceste sisteme influențează mediul înconjurător, respectiv de modul în care mediul influențează

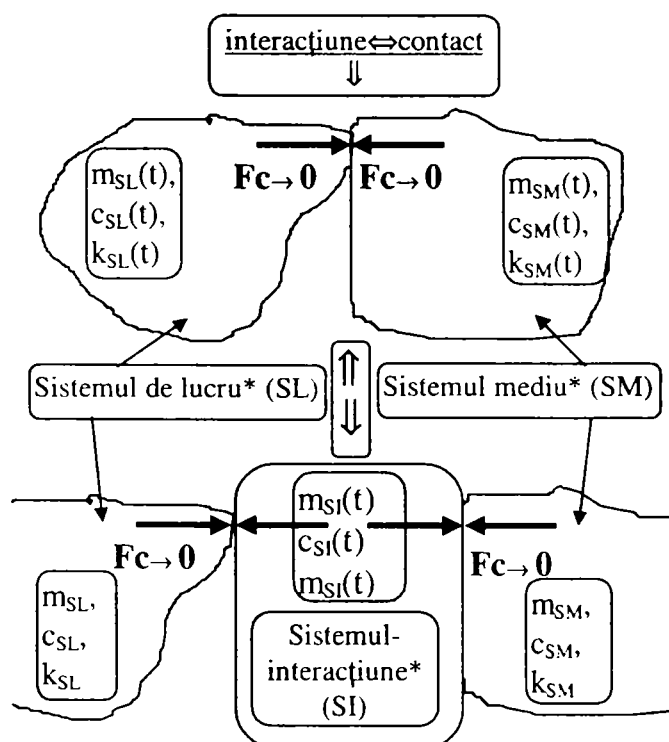
comportamentul acestor sisteme. De cele mai multe ori, îndeosebi în cazul unor sisteme de gabarit foarte mare sau/și care implică siguranță mare în exploatare, se aplicau coeficienți de siguranță de tip global, meniți să prevină efectele unor perturbații deosebite de mediu. Calculul și dimensionarea în acest caz trebuiau să țină seama de cele mai defavorabile condiții pentru a conferi un grad de siguranță maxim posibil. Cu toate acestea, au existat cazuri celebre în istoria tehnicii, de distrugere de astfel de sisteme (unul din cele mai cunoscute fiind cel al catastrofei podului Takoma, din S.U.A., caz prezentat în [Vuk95a]).

Toate aceste distrugeri au fost provocate de faptul că nu a fost "controlată" forța generalizată de contact care apare în timpul interacțiunii dintre sistemul de lucru și sistemul mediu înconjurător. Chiar dacă integritatea sau funcționalitatea sistemului de lucru nu sunt afectate în mod vizibil, efectele negative provocate de această forță pot fi cu totul imprevizibile. Imposibilitatea de a prevedea evoluția forței de contact se datorează faptului că (până nu demult), în marea majoritate a cazurilor, comportamentul celor două sisteme în timpul interacțiunii era considerat un "dat", deoarece:

- caracteristicile mecanice intrinseci ale sistemelor de lucru erau determinate exclusiv de cerințele de proiectare și construcție ale aplicației "primare", pentru care a și fost conceput sistemul mecanic respectiv,
- caracteristicile intrinseci ale mediului (dacă se ținea seama de acestea) erau determinate exclusiv de natura sa, la modul global și aproximativ, proiectanții și cercetătorii nepunându-și problema modelării sale aprofundate.

Se poate afirma că o astfel de abordare păcătuiește în primul rând prin faptul că (deși se admite în general că sistemul "mediu înconjurător" se consideră a fi pasiv), în realitate - prin modul de tratare a interacțiunii - ambele sisteme aflate în interacțiune sunt considerate reciproc pasive.

### 3.1.3.2 Abordarea actuală



\* conține sisteme de acționare suplimentare !!

Fig. 3.2 Abordarea actuală a interacțiunii SL – SM

La ora actuală, se pune problema influențării acestui comportament prin conferirea caracterului de "activ" și "inteligent" unuia din (sau chiar ambelor) sisteme (acest caracter privit doar prin prisma interacțiunii dintre ele!), prevăzând și grade de libertate suplimentare, prin intermediul cărora se acordează, se adaptează ansamblul sistemelor la forța de contact (diminuând în acest fel efectele negative pe care le poate provoca).

Acest lucru se poate realiza prin două modalități diferite, relevate în continuare.

A. Prima modalitate: dispunerea/atașarea unor subsisteme de acționare suplimentare (care reacționează controlat la forța de contact), sau utilizarea celor existente și în acest scop (dacă este posibil). În acest caz "acordarea" celor două sisteme se realizează prin procesul de conducere. În domeniul roboților industriali, aceasta a fost o cale "naturală" de dezvoltare și studiu a problematicii discutate.

B. A doua modalitate: dispunerea/atașarea unor subsisteme suplimentare având posibilități de modificare controlată a impedanței mecanice (a caracteristicilor mecanice intrinseci) a sistemului respectiv *sau/și* (dacă este posibil), exploatarea posibilităților impedanței existente (în același sens) la unul sau ambele sisteme. În domeniul roboților, tratarea problemei din acest punct de vedere se intersectează în mod "natural" cu problema complianței ([Saf99]).

Subsistemele concepute conform cu cele relevate mai sus, se pot grupa într-un "sistem de interacțiune" (SI din figura 3.2) de sine stătător ("activ" și "inteligent" relativ la forța de contact) care însă poate fi atașat - în funcție de circumstanțe - fie sistemului mecanic "primar", de "lucru", fie sistemului "mediu înconjurător".

#### 3.1.4 Domeniile de aplicativitate. Preocupări de studiu

Domeniile de aplicativitate a modului de abordare prezentat sunt extrem de diverse, începând cu cel al roboților industriali propriu-zisi și terminând cu cel al construcțiilor civile: poduri, construcții mari (caz în care gradele de libertate suplimentare conferite pot schimba întreaga filozofie a prevenirii consecințelor unor catastrofe naturale gen furtuni sau cutremure). În acest sens, ar trebui menționat faptul că, la ora actuală, deja se ține cont de implicațiile contactului și în aceste domenii: la cea mai înaltă clădire din lume, blocurile Petronas Twin Towers din Kuala-Lumpur, sunt dispuse în structura de rezistență șase sisteme hidraulice de mari dimensiuni tocmai pentru a compensa (prin modificarea impedanței mecanice) solicitările neprevăzute care pot interveni din partea mediului prin efectul de amortizare vâscoasă. Din informațiile apărute până acum se pare însă că nu există un control "activ" și "inteligent" al acestui sistem de interacțiune, el rezumându-se la a reacționa în limita parametrilor componente de amortizare  $c$  și a componente de elasticitate  $k$  maxim conferite prin construcție, oricum mult superioare caracteristicilor intrinseci ale sistemului clădire propriu-zisă.

Cel mai interesant și probabil cel mai studiat rămâne domeniul de mare interes comercial al optimizării dinamicii unui autovehicol care rulează pe carosabil. Sarcina de conducere și control a unei astfel de aplicații se rezumă la faptul că pasagerii nu trebuie să "simtă" perturbațiile induse de suprafața de rulare (impunându-se un confort sporit), în condițiile asigurării unei manevrabilități foarte bune a autovehicolului și respectiv a unei maxime siguranțe în mers. Se apelează pentru rezolvare la tot "arsenalul" disponibil în cazul acestui tip de aplicație: se controlează "activ" și inteligent interacțiunea atât cu ajutorul unor sisteme de acționare suplimentare cât și prin mijloace de modificare a parametrilor masă, caracteristică de amortizare, caracteristică elastică. Toate aceste mijloace sunt concentrate în subansamblul plasat între roțile

autovehicolului și corpul acestuia (subansamblul "suspensie inteligentă"). În legătură cu această aplicație este de menționat faptul că, în interacțiunea celor două sisteme, sistemul dinamic activ - din punctul de vedere al forței de contact - devine sistemul mediu înconjurător.

În subcapitolul 3.5 se prezintă un studiu de caz din acest domeniu, în abordare modernă. Și în cadrul Universității "Politehnica" din Timișoara există preocupări legate de studiul aplicațiilor de tip "contact-task" **axate îndeosebi pe conducerea și controlul SI prin impedanță.** Această problemă particulară se constituie în subiectul prezentei teze de doctorat.

## 3.2 Modelarea fenomenului în abordarea actuală. Conexiuni naturale cu Robotica

### 3.2.1 Modelul matematic

trebuie să țină cont de ambele componente ale interacțiunii sistem de lucru-sistem mediu.

Ecuția care descrie un sistem mecanic prevăzut cu sisteme de acționare (sistem prin definiție "activ" relativ la aplicație în sensul celor enunțate mai sus) are forma cunoscută:

$$H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = P \quad (3.2.1)$$

unde:

$H$  - este matricea pozitiv definită a sistemului de inerție de tip  $n \times n$

$h$  - funcția  $n$ -dimensională, neliniară a termenilor centrifugali, Coriolis și gravitaționali

$q$  - vectorul  $n$  - dimensional al coordonatelor generalizate

$P$  - vectorul  $n$  - dimensional al forțelor active ale sistemului de acționare în lungul coordonatelor  $q$ .

Considerând ca asupra sistemului acționează forțele  $F$ , în lungul axelor de coordonate:

$$F = (F_1, F_2, \dots, F_n) \quad (3.2.2)$$

corelându-le cu sistemul de coordonate  $q$  și introducându-le în modelul (3.2.1), se obține:

$$H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = P - J^T(q)F \quad (3.2.3)$$

Substituind coordonatele  $q$  cu coordonatele  $s$  și multiplicând ecuația (3.2.3) cu inversul Jacobianului  $(J^T)^{-1}$  se ajunge la exprimarea următoare:

$$k\ddot{s} + b = cP + F \quad (3.2.4)$$

unde:

$$k = (J^T)^{-1} H^s, \quad b = (J^T)^{-1} h^s, \quad c = (J^T)^{-1} P \quad (3.2.5)$$

exprimare care permite introducerea interacțiunii sistemului activ cu mediul înconjurător dacă se reușește separarea acelor componente care definesc chiar interacțiunea în sine.

Ăcest lucru se poate realiza dacă se analizează fiecare din cele  $n$  coordonate în funcție de motivația prezenței gradului de libertate aferent în structura sistemului. Astfel, sistemul posedă în mod obligatoriu un număr de grade de libertate  $n_{apl}$  care îi determină comportamentul dinamic-funcțional legat de necesitățile aplicației, și poate avea  $n_c$  grade de libertate suplimentare, legate exclusiv de forța de contact generalizată care apare datorită interacțiunii cu mediul:

$$\begin{aligned} n &= n_{apl} + n_c \\ \dim(n_{apl}) &\geq 1 \cup \dim(n_c) \leq 6 \end{aligned} \quad (3.2.6)$$

Există posibilitatea ca un număr de grade de libertate din cele  $n_{apl}$  să fie supuse și la constrângeri legate de contactul cu mediul, independent de prezența sau absența gradului de libertate corespondent din celălalt grup,  $n_c$ , legat de o anumită componentă a forței de contact.

Dacă se analizează coordonatele după categoriile de constrângeri la care este în general supus un sistem mecanic real, se poate efectua următoarea separație:

- a)- coordonatele de-a lungul cărora sistemul nu este supus la constrângeri, numărul acestora fiind " $n-m-r$ ";
- b)-constrângeri rigide (geometrice), numărul acestora fiind notat " $r$ ";
- c)-constrângeri determinate de contactul propriuzis cu mediul (cele care ne interesează de fapt; se dă acestora denumirea de "constrângeri soft" din acest motiv), numărul lor fiind notat cu " $m$ ".

Tabloul complet al coordonatelor și forțelor în funcție de constrângerile astfel contabilizate este cel prezentat în tabelul 3.1 (pentru diferențiere s-a adoptat un indice superior).

Rescriind modelul (3.2.4) în funcție de datele din tabelul 3.1, se obține (pentru  $P(t) > 0$ ) sistemul următor:

$$\begin{aligned} K_{11}\ddot{s}^1 + K_{12}\ddot{s}^2 + b_1 &= c_1P \\ K_{21}\dot{s}^1 + K_{22}\dot{s}^2 + b_2 &= c_2P + F^2 \\ K_{31}\dot{s}^1 + K_{32}\dot{s}^2 + b_3 &= c_3P + F^3 \end{aligned} \quad (3.2.7)$$

Tabelul 3.1

Categorie constrângeri		Deplasări	Forțe	$\dim(s') = \dim(F^i)$
1	fără	$s^1 \neq 0$	$F^1 = 0$	$(n-m-r)$
2	"soft"	$s^2 \neq 0$	$F^2 \neq 0$	$m$
3	rigide	$s^3 = 0$	$F^3 \neq 0$	$r$

Țăcest sistem nu este determinat, pentru că număarul ( $n$ ) al acțiunărilor  $P(t)$ , este mai mic decăt număarul coordonatelor însumat cu număarul forțelor ( $s^1, s^2, F^2$  și  $F^3$  sunt în număr de  $n+m$ ).

Observația esențială însă este că forțele  $F^2$  (provenind de la sistemul "mediu"), deasemenea și modelul în totalitate sunt complementare cu dinamica mediului. Altfel spus, sistemul în discuție și mediul sunt cuplate prin intermediul forțelor  $F^2$  și a coordonatelor  $s^2$  în conformitate cu modelul prezentat.

b) Descrierea mediului, considerat a fi pasiv (conform cu cele enunțate), se poate face printr-un model similar celui din ecuația (3.2.1), ținând cont însă de observația de mai sus. Se obține:

$$M(s^2) \ddot{s} + d(s^2, \dot{s}^2) = F^2 \quad (3.2.8)$$

ecuație care depinde de caracteristicile intrinseci ale mediului.

Prin substituirea  $F^2$  din (3.2.8) în (3.2.7), se obține un sistem rezolvabil în ambele moduri:

-direct :

$$\{ s^1, s^2, F^3 \} \Rightarrow \{ P(t) ; \dim(P(t))=n \} \quad (3.2.9)$$

-indirect:

$$\{ P(t) ; \dim(P(t))=n \} \Rightarrow \{ s^1, s^2, F^3 \} \quad (3.2.10)$$

*O insuficiență acuratețe în cunoașterea caracteristicilor de mediu (de masă, de amortizare, elastică) duce la imposibilitatea determinării forței nominale de contact. Totodată, dinamica mediului poate influența în mod hotărâtor stabilitatea mișcării și performanțele "contact-task".*

### 3.2.2 Modelul fizic

Țăvând în vedere faptul că sistemele de lucru pot avea un grad foarte mare de complexitate (mai multe grade de libertate, atrăgând după sine mai multe componente ale forței generalizate de contact de controlat), cea mai convenabilă rezolvare a unui model fizic al interacțiunii este alcătuirea unei structuri modularizate.

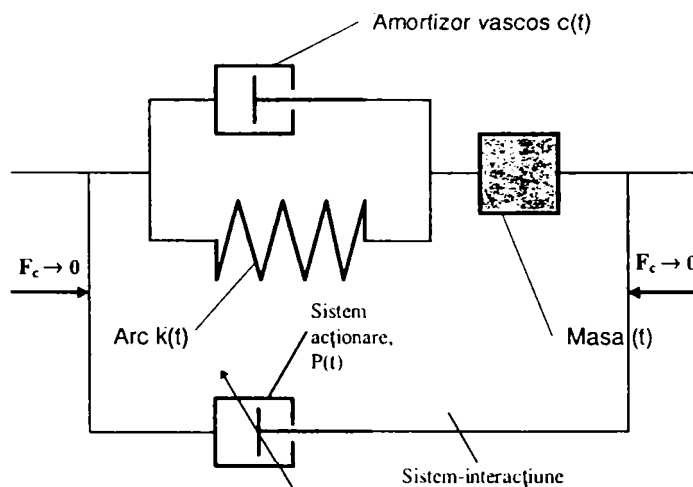


Fig. 3.3 Modelul fizic (mecanic) al SI

În această concepție, pentru fiecare componentă a forței generalizate de contact se prevede un modul (unitate, subsistem), capabil să-și modifice propria impedanță mecanică (caracteristicile intrinseci ale subsistemului), prin acțiunea inteligentă, adaptivă asupra fiecăreia din componentele sale (inerțial-masică, de amortizare și de elasticitate) și să reacționeze cu acționări proprii. O astfel de abordare se regăsește în capitolul 4.

În acest mod, indiferent de complexitatea sistemului de lucru sau/și a mediului (amândouă "pasive" din punctul de vedere al interacțiunii, în sensul celor convenite mai sus), sistemul de interacțiune va putea compensa efectele fiecărei componente a forței generalizate de contact cu câte un modul, adaptat convenabil din punct de vedere constructiv (direcția de acțiune globală pentru componentele impedanței mecanice/de acțiune a sistemului propriu de acționare trebuie să coincidă cu direcția componentei respective a forței de contact; deasemenea și direcția sistemului de acționare suplimentar, sau chiar a celui existent).

Modelarea fizică a acestui sistem - interacțiune este prezentată în figura 3.3.

Se observă că posibilitățile de modificare a parametrilor (analizate în detaliu în capitolul 4) sunt următoarele:

- a) în cazul sistemului de acționare, printr-o modalitate impusă de procesul de conducere;
- b) în cazul impedanței mecanice

-pentru masa  $m$ , singura posibilitate rațională se pare că este introducerea/extragerea unei cantități determinate de lichid,  $m_u(t)$  (care se adaugă la masa inițială,  $m_s$ , constantă, a sistemului ( $m=m_u+m_s$ )) în/din sistem; cea mai convenabilă soluție tehnică în acest caz este utilizarea unui cilindru hidraulic; rămâne însă deschisă problema măsurii în care această soluție poate influența semnificativ/suficient  $m_s$  (proiectantul fiind cel care decide - în funcție de gabaritul componentelor - oportunitatea modificării acestui parametru); în cazuri particulare se poate apela – prin intermediul meselor reduse - la mase care-și modifică poziția în cadrul sistemului

-pentru caracteristica de amortizare  $c$ , soluția tehnică cea mai convenabilă este utilizarea amortizării vâscoase, prin modificarea controlată a unui interstițiu de pasaj hidraulic dispus în sistem (folosind deasemenea cilindri hidraulici);

-pentru caracteristica elastică,  $k$  se poate recurge la utilizarea unui subansamblu alcătuit dintr-un grup de arcuri de caracteristică elastică liniară și/sau neliniară, dispuse într-o structură care să ofere posibilitatea unei caracteristici variabile, la cerere (soluție dificil de realizat). sau, în mod indirect, modificând (cu diferite mijloace) prestrângerea elementului arc. Trebuie menționat că, în acest caz, pentru controlul caracteristicii elastice a sistemului se modifică de fapt valoarea întregului termen legat de această caracteristică:  $kx$  (acceptând un arc de  $k=const$ , deplasarea totală  $x$  rezultă din însumarea micromișcării  $x_s$  a sistemului de lucru în contact cu mediul și deplasarea  $y(t)$  la nivelul arcului având drept scop tensionarea/detensionarea acestuia:  $x=x_s+y(t)$ ).

Analiza detaliată a soluțiilor tehnic-possibile este deasemenea prezentată în capitolul 4.

### 3.2.3 Modelul sistemului de conducere/comandă

Drept legi de conducere a aplicației pot fi alese (sau construite) acele relații dintre marimile caracteristice, care determină diminuarea forței de contact. Structura generală a modelului sistemului de conducere este prezentată în figura 3.4.

Valoarea rezultantei forțelor exterioare generalizate ( $\equiv$ forța de contact), accesibilă prin intermediul traductoarelor (cuprinși în subansamblul senzori/traductoare) reprezintă principalul parametru de comandă pentru sistemul de conducere.

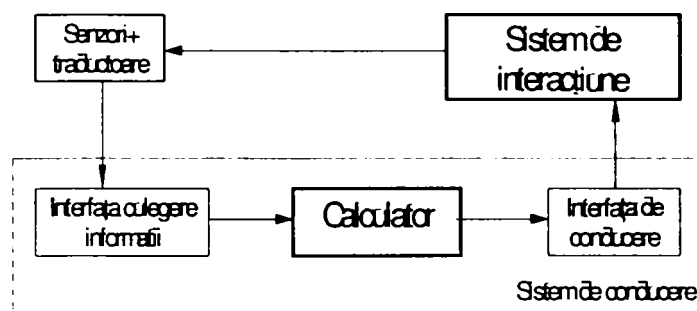


Fig. 3.4 Modelul sistemului de conducere

Legile de conducere (reglare):

a) - în cazul sistemelor clasice rezultă în urma unei analize a reglării combinate în forță și poziție sau prin studiul elementelor de complianță încorporate în sistem din considerente funcționale (subcapitolul 3.3.2);

b)- în cazul controlului prin impedanță - reprezintă de fapt variația: masei  $m$ , coeficientului de amortizare  $c$  și a deplasării  $y$  /respectiv a forței de acționare, în timp, având drept parametri de intrare forța de contact și parametri de stare anterioară. Dacă se exprimă valoarea predictibilă a acestora relativ la timpul curent  $t_i$ , se obțin (în cazul cel mai general) relații de forma (3.2.11), (3.2.12) și (3.2.13).

$$m_{i+1} = m(m_i, \Delta F(t_i), x_i, \dot{x}_i, (k_i, c_i)) \quad (3.2.11)$$

$$c_{i+1} = c(c_i, \Delta F(t_i), x_i, \dot{x}_i, (m_i, k_i)) \quad (3.2.12)$$

$$y_{i+1} = y(y_i, \Delta F(t_i), x_i, \dot{x}_i, (m_i, c_i)) \quad (3.2.13)$$

### 3.2.4 Fundamentele teoretice ale conducerii unui sistem aflat în interacțiune cu mediul

Conducerea/controlul interacțiunii sistemelor de lucru cu un mediu dinamic se poate exprima în cazul unui sistem de tip robot, cu același model dinamic:

$$H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = P - J^t(q)F \quad (3.2.14)$$

unde:  $J^t(q)$  este matricea Jacobiana de forma  $n \times m$  iar  $F$  este vectorul  $m$  dimensional reprezentând forța și momentul generalizat dependent de timp  $F=F(t)$ .

Modelul (3.2.14) se poate rescrie – pentru mediu - sub forma :

$$M(s)\ddot{s} + L(q, \dot{q}) = F \quad (3.2.15)$$

Utilizând conexiunea dintre sistemul de coordonate extern cu cel al coordonatelor generalizate  $s=f(q)$ , modelul (3.2.15) în aceste coordonate ia forma :



$$M(s)\ddot{s} + L(q, \dot{q}) = S^T(q)F \quad (3.2.16)$$

unde:

$M(q)$  este matrice non-singulară de forma:  $n \times n$

$L(q, \dot{q})$  - este un vector-funcție neliniar  $n$  - dimensional și

$S^T(q)$  - este o matrice de forma  $n \times n$  în ipoteza că numărul gradelor de libertate este egal cu numărul componentelor forțelor generalizate de contact ( $n=m$ ).

În cazul contactului cu mediul, sarcina robotului poate fi descrisă drept acea mișcare prescrisă a robotului de-a lungul unei traiectorii programate  $q_p(t)$  reprezentând o funcție dublu și continuu diferentiabilă cînd forța dorită (preconizată) de interacțiune  $F_p(t)$ , acționează între robot și mediu.

Aceste două funcții trebuie să satisfacă următoarea relație:

$$F_p(t) \equiv f(q_p(t), \dot{q}(t), \ddot{q}(t)) \quad (3.2.17)$$

Se poate defini forța de control  $P(t)$  cu ( $t > t_0$ ) drept acea forță care satisface următoarele condiții impuse:

$$\begin{aligned} q(t) &\rightarrow q_p(t) \\ &\text{pentru } t \rightarrow \infty \\ F(t) &\rightarrow F_p(t) \end{aligned} \quad (3.2.18)$$

Există două alternative posibile în această situație:

- alegerea unei legi de conducere care să asigure o calitate dorită trajectoriei în condițiile în care este respectată relația (3.2.18);
- alegerea unei legi de conducere în măsură să asigure forțe de interacțiune determinate în condițiile atingerii scopului conducerii exprimate cu relația (3.2.1).

În cazul primei alternative, soluția este cât se poate de simplă și rezultă din metoda dinamică inversă, care asigură calitatea dorită a traiectoriei fiind în același timp garantată stabilitatea forței de interacțiune.

În ceea ce privește a doua alternativă, sarcina de stabilizare a forței de interacțiune prescrise (FIP)  $F_p(t)$  poate fi ilustrată luând în considerare familia de răspunsuri tranzitorii de forma următoare (condiția respectării forței de contact este valabilă):

$$\dot{\mu}(t) = Q(\mu) \cup \mu(t) = F(t) - F_p(t) \quad (3.2.19)$$

și prin alegerea unei funcții-vector continue  $Q(Q(0)=0)$  de dimensiune  $n$  (stabilitatea asimptotică este asigurată pentru soluția "trivială"  $\mu(t) \equiv 0$ ).

Luând în considerare un control "pur" în forță, acordat cu ipoteza  $m=n$  se poate conveni că atunci cînd se descrie calitatea răspunsurilor tranzitorii (respectând dinamica forței de perturbație) se poate utiliza relația echivalentă:

$$\mu(t) = \mu_0 + \int_{t_0}^t Q(\mu(\omega)) \quad (3.2.20)$$

Se poate adopta  $\mu_0$  pentru că funcția  $\mu(t)$  este stabilă independent de valoarea  $\mu_0$ .

Se consideră doar una din legile de conducere posibile cu legătură feedback la care se utilizează coordonatele inițiale:  $q, \dot{q}, \ddot{q}$  și forța  $F$  din forma (3.2.1), (3.2.2):

$$P = H(q)M^{-1}(q)[-L(q, \dot{q}) + S^T(q)(F_p + \int_{t_0}^t Q(\mu(\mu(\omega))) )] + h(q, \dot{q}) + J^T(q)F \quad (3.2.21)$$

Aplicând acest tip de lege la modelul dinamic al robotului dat de relația (3.2.8) se obține următoarea lege de funcționare a robotului în contact cu mediul:

$$\ddot{q} = M^{-1}(q)[-L(q, \dot{q}) + S^T(q)(F_p + \int_{t_0}^t Q(\mu(\mu(\omega))) )] \quad (3.2.22)$$

sau:

$$M(q) + L(q, \dot{q}) = S^T(q)(F_p + \int_{t_0}^t Q(\mu(\mu(\omega))) )] \quad (3.2.23)$$

Pornind de la modelul (ecuația) (3.2.16) se obține următoarea formă închisă de control a sistemului:

$$S^T(q)(F_p + \int_{t_0}^t Q(\mu(\mu(\omega))) ) = 0 \quad (3.2.24)$$

și pentru că  $\text{rang}(S) = n$ , această ultimă ecuație se mai poate scrie :

$$\mu = \int_{t_0}^t Q(\mu(\mu(\omega))) \quad (3.2.25)$$

de unde ecuația (3.2.19) se deduce direct. Pe această cale, legea de conducere enunțată asigură calitatea dorită a stabilității forței FIP.

#### **Consecință**

*Rezolvarea problemei interacțiunii unui sistem de lucru cu mediul în ipoteza realizării traiectoriei prescrise prin vectorul  $q_p$  duce la obținerea forței generalizate  $F$ . Se analizează vectorul de abatere al forței  $\mu = (F - F_p)$*

*Rezolvarea problemei în ipoteza respectării unor forțe generalizate prescrise duce la obținerea coordonatelor  $q \neq q_p$  adică a unei traiectorii care să fie apropiată de traiectoria prescrisă. În acest caz se analizează vectorul abatere al coordonatei  $\eta = (q - q_p)$ .*

## **3.2.5 Concluzii**

### **3.2.5.1 Referitoare la problematică**

A. Din cele expuse în capitolul 3, este clar că similitudinea cu domeniul roboticii este evidentă, astfel că metodele de analiză, de conducere și control sunt cele cunoscute de la roboții industriali. Abordarea actuală a aplicațiilor de tip "contact-task" permite deci tratarea complexă a interacțiunilor sistem de lucru - mediu cu ajutorul unui aparat teoretic, respectiv cu ajutorul unor mijloace de investigare, conducere și control derivate și dezvoltate din cele ale roboticii.

- B. Scopul final al studiilor referitoare la domeniul generic definit cu sintagma "contact-task" este găsirea legilor de conducere/control a/al fenomenului care să determine diminuarea forței de contact dintre sistemele în cauză. Aceste legi guvernează modificarea "inteligentă" a caracteristicilor intrinseci ale unuia din (sau a ambelor) sisteme (conducere prin impedanță cu implicarea eventuală a complianței) respectiv comandă sistemele de acționare "funcționale" și/sau suplimentare (dispuse exclusiv în vederea "acordării" convenabile a celor două sisteme aflate în interacțiune).
- C. Ceea ce trebuie relevat din punctul de vedere al conducerii unor sisteme de lucru în interacțiunea lor cu mediul în cazul "clasic" (la care nu este prezentă posibilitatea de conducere prin impedanță și nici nu dispun de acționari suplimentare) este faptul că sarcina de conducere (de control) a acestora poate fi descrisă drept acea mișcare presrisă a sistemului de-a lungul unei traiectorii programate  $q_p(t)$  pentru care între sistem și mediu acționează forța preconizată, dorită, de interacțiune  $F_p(t) > 0$ . Această sarcină însă nu poate determina concomitent ambele mărimi.
- D. Pornind de la această constatare, problema interacțiunii unui sistem de lucru (în caz particular, un robot industrial funcționând în modul "clasic") cu un mediu dinamic trebuie analizată și prin prisma conceptului de conducere hibridă. *Prezentarea acestei problematice - efectuată la subcapitolul 3.6 – oferă informațiile necesare pentru relevarea similitudinilor și diferențierilor față de abordarea modernă a conceptului de aplicație de tip "contact-task".*

### 3.2.5.2 Referitoare la structura prezentei lucrări

Demersul autorului s-a constituit într-o încercare de tratare a problematicei "contact-task" desfășurată după o structură prezentată în cele ce urmează.

- A. Definirea conceptului și relevarea aspectelor fundamentale legate de conținutul acestuia (în subcapitolele parcurse: 3.1 și 3.2).
- B. Prezentarea generală a tuturor modalităților de conducere controlată a aplicațiilor din clasa "contact-task" cu particularizările aferente, inclusiv conducerea la modul "inteligent" și "activ" (succint, în subcapitolul 3.3).
- C. Prezentarea și analiza modelelor matematice care oglindesc fenomenul (în subcapitolul 3.4).
- D. Prezentarea unui studiu de caz relevant pentru modalitatea de abordare modernă a aplicațiilor de acest gen (în subcapitolul 3.5).
- E. Referitor la cercetările privind conducerea aplicațiilor de tip "contact-task", prezentarea
- ◇ (și analiza critică a) evoluției cunoștințelor referitoare la problemele de conducere în aplicații care implică contactul a două sisteme cu referiri explicite asupra diferențierii concepției moderne față de conceptul clasic de conducere hibridă (în subcapitolul 3.6);
  - ◇ aspectelor particulare legate de conducerea unor sisteme posedând elemente cu calități compliant și posibilitățile de conducere/control al interacțiunii celor două sisteme în contact la momentul impactului (în subcapitolul 3.7).
- F. Prezentarea preocupărilor autorului (în contextul celor existente la Universitatea "Politehnica" din Timișoara) în capitolele 4 și 5, referitoare atât la aspectele teoretice, de fundamentare și modelare/simulare a unor legi de conducere/control cât și la cele practice, de concepție, proiectare și realizare de module/standuri pentru investigarea fenomenului, incluzând atât aspectele mecanice, cât și cele de automatizare. **Toate aceste preocupări sunt legate de aspectele particulare ale conducerii "inteligente și active" prin impedanță a aplicațiilor "contact-task".**

### 3.3 Metodele de conducere a roboților în aplicațiile care implică contactul

#### 3.3.1 Clasificarea conceptelor robotice pentru conducerea mișcărilor constrânse

Metodele de conducere a roboților pe parcursul mișcărilor constrânse pot fi clasificate – în cazul cel mai general - după diferite criterii. În acest subcapitol se prezintă toate metodele, fără a le diferenția pe cele care țin cont de abordarea modernă. Luând în considerare clasele de complianță se pot distinge două tipuri de bază:

- ◇ metodele complianței pasive la care poziția reală a robotului se apropie de poziția dorită, preconizată doar prin influența forțelor de contact în sine;
- ◇ metodele complianței active la care complianța utilizează legătura de tip "feedback" în forță pentru a-și exercita controlul său asupra forței de interacțiune sau asupra complianței efortului final al robotului, complianță specifică aplicației.

Dependent de sursa dominantă a complianței **metodele complianței pasive** pot fi clasificate în următoarele două grupe:

a) metode neadaptabile:

- ◇ metode bazate pe complianța inerentă a structurii mecanice a robotului;
- ◇ metode care utilizează adaptoare pasive deformabile construite chiar pentru acest scop, atașate în vecinătatea efortului final al robotului sau făcând parte din structura acestuia;

b) metode adaptabile:

- ◇ metode bazate pe dispozitive cu complianță acordabilă;
- ◇ metode bazate pe complianța conferită prin ajustarea servomecanismelor din cuplele cinematice conducătoare.

**Metodele de conducere/control active** prin forță se clasifică la rândul lor în următoarele două grupe:

- ◇ conducerea hibridă poziție/forță la care ambii parametri sunt controlați pe cale neconflictuală în două subspații ortogonale din sistemul de coordonate specific aplicației;
- ◇ conducere/control prin impedanță, metode care sunt în esență bazate doar pe controlul poziției utilizând diferite relații dintre forțele active și poziția robotului.

Luând în considerare modalitatea prin care informația de forță este inclusă în calea de conducere de urmat, metodele de control hibride în poziție și forță pot fi la rândul lor clasificate în următoarele două grupe:

- ◇ metodele explicite, bazate pe forță la care semnalele de forță sunt folosite pentru generarea intrărilor în forță generalizată ale acționărilor din cuplele cinematice conducătoare ale robotului;
- ◇ metode care utilizează algoritmi implicați bazați pe poziție la care abaterea forței de conducere este mai întâi convertită într-o ajustare corespunzătoare a mișcării robotului pe direcțiile controlate prin forță și apoi această poziție este utilizată drept intrare în controler-ul de poziție.

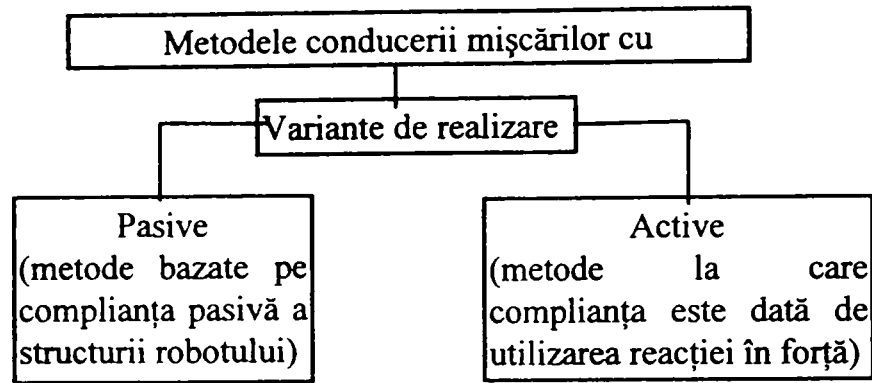


Fig. 3.5 Clasificarea primară a metodelor pentru conducerea mișcărilor cu constrângeri

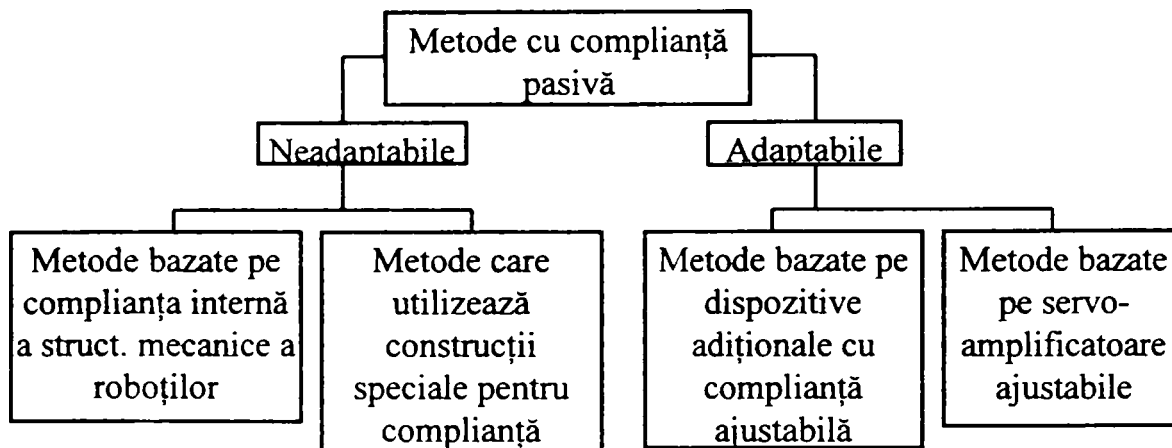


Fig. 3.6 Taxonomia metodelor cu complianță pasivă

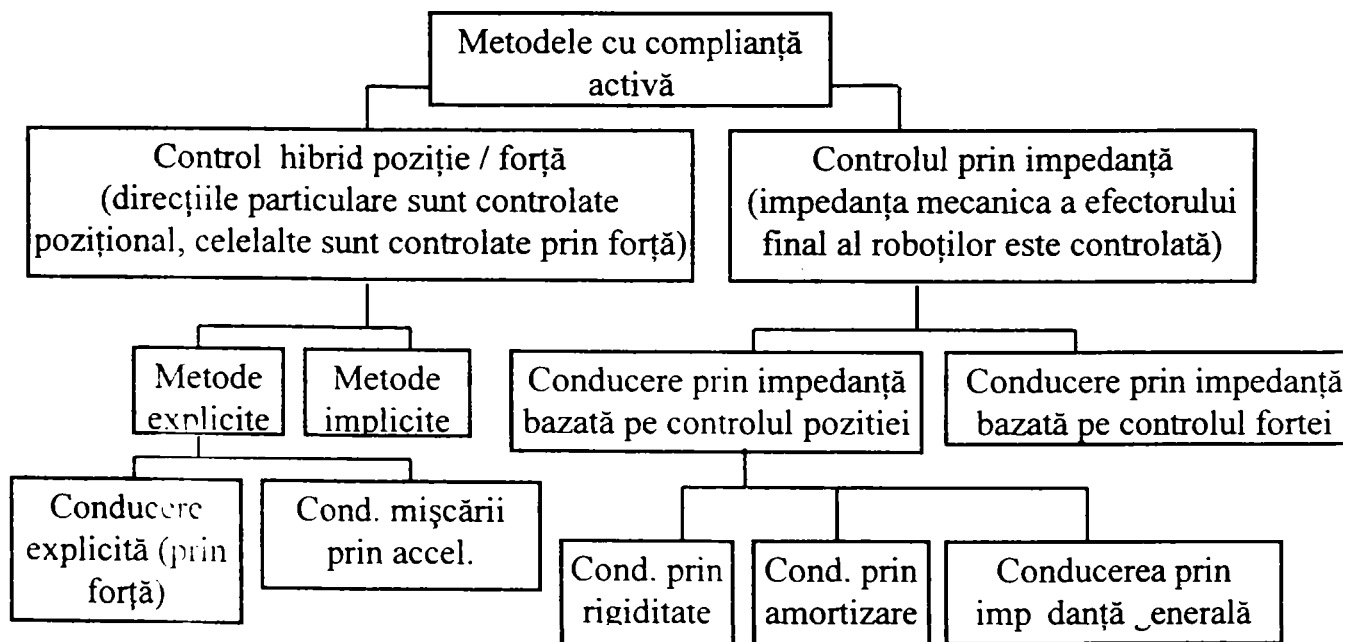


Fig. 3.7 Taxonomia metodelor cu complianță activă

Metodele de conducere prin impedanță se pot clasifica astfel:

- ◇ modul "poziție" sau cu buclă exterioară de conducere la care blocul de conducere a impedanței urmărite care leagă forța exercitată în efectorul final și poziția sa relativă este dispus în interiorul unei bucle de control exterioare pentru robotul controlat în poziție;
- ◇ modul "forță" sau în buclă de control interioară, unde poziția este măsurată și comanda de forță este calculată pentru a satisface obiectivele urmărite prin impedanță.

În ceea ce privește relația forță-mișcare schemele de conducere prin impedanță pot fi categorisite în:

- control rigid ( $F = -K_E \Delta p_E$ );
- control prin amortizare, ( $F = -C_E \Delta p_E$ );
- control general prin impedanță ( $F = - (M_E \Delta p_{PE} + C_E \Delta p_{PE} + K_E \Delta p_{PE})$ ),

unde semnificația termenilor este evidentă. **Analiza detaliată a acestui caz este prezentată în capitolul 4.**

Clasificarea prezentată este relevantă în figurile 3.5÷3.7. Figurile nu includ toate conceptele cunoscute relativ la domeniu. În particular unele din abordările astfel relevate au fost elaborate utilizând combinația a două sau mai multe metode diferite care se pot regăsi individual în categorii distincte: conducere implicit/explicită, conducere directă cu compliantă, conducere hibridă prin impedanță etc.

### 3.3.2 Metodele cu compliantă pasivă

#### 3.3.2.1 Metodele neadaptabile

**A. Complianta structurală** este bazată pe elasticitatea inerentă a structurii robotului (spre exemplu elasticitatea efectorului final, a zonelor de contact a elementelor cuplelor cinematice conducătoare). Această metodă este importantă mai mult din punct de vedere teoretic deoarece sistemele robotice comerciale trebuie să aibe o înaltă acuratețe de poziționare care se obține prin scăderea gradului de elasticitate inerentă a robotului și creșterea rigidității brațelor acestuia.

**B. Dispozitive mecanice cu compliantă**, concept bazat de asemenea pe complianta structurală a robotului dar în acest caz complianta este mărită în mod semnificativ prin utilizarea unor dispozitive construite în mod special pentru acest scop, plasate în efectorul final al robotului. Aceste dispozitive sunt implementate îndeosebi în procesele de asamblare robotizată. Au fost dezvoltate diferite dispozitive de acest gen, unul din cele mai cunoscute fiind RCC (o prezentare largă a problemicii se regăsește în [Saf99]). Avantajul principal constă în faptul că se poate prevedea pentru conducere doar un simplu controler de poziție fără a fi necesari senzori de forță adiționali sau calcule complicate. Trebuie precizat că elementele clasice de compliantă nu pot fi utilizate la sarcini de lucru diferite care reclamă componente de diferite lungimi sau greutate. Soluția practică de rezolvare constă în proiectarea unui set de adaptoare cu compliantă diferită care trebuie modificate pentru acordarea cu aplicația-sarcină respectivă (spre exemplu îmbunătățirea IRCC a dispozitivului RCC, care beneficiază de facilitățile de măsurare ale unor senzori cu mai multe grade de libertate pentru procesele de adaptare necesare).

### 3.3.2.2 Metodele adaptabile

**A.** Dispozitive cu posibilitate de ajustare a complianței mecanice.

Dezvoltarea ulterioară a dispozitivelor clasice de complianță au condus la posibilitatea de ajustare a complianței conferindu-le capabilitatea să localizeze centrul de complianță. Astfel, dispozitivul poate fi controlat mecanic în maniera prescrisă în acord cu componentele de diferite lungimi sau având distribuită diferit masa acestora. Similar cu IRCC aceste dispozitive sunt echipate cu traductoare pentru informații asupra deflecțiilor punctului extrem, informații necesare conducerii robotului.

**B.** Ajustarea amplificării controler-ului: metoda se bazează pe o ajustare relativ simplă a amplificării reacției "feedback" în poziție pentru ajustarea rigidității cuplelor cinematice conducătoare robotului, mai precis pentru a se obține o distribuție dorită a rigidității pe direcții diferite ale mișcării efectorului final. O astfel de ajustare este posibilă pentru că rigiditatea efectorului final depinde de cea a cuplelor cinematice conducătoare și astfel se poate obține rigiditatea dorită a efectorului final prin mijlocirea rigidității necesare a cuplelor cinematice conducătoare obținute prin calcul. Rigiditatea cuplelor cinematice conducătoare este determinată de poziția selectată a amplificării reacției "feedback". Printr-o astfel de ajustare adecvată, se poate asigura maximum de rigiditate pe direcțiile controlate prin poziție și minimum de rigiditate pe direcțiile controlate prin forță.

Ajustarea de acest tip, pasivă, este eficientă dacă sunt îndeplinite următoarele condiții:

- ◇ forțele gravitaționale sunt perfect compensate;
- ◇ dinamica sistemului robotic poate fi neglijată (viteza robotului este mică);
- ◇ sarcina robotului este simplă, clar specificată și testată în prealabil;
- ◇ mediul este precis definit prin caracteristicile sale;
- ◇ metoda se aplică unor construcții robotice specifice (roboți cu acționare directă sau cu dispozitive de prehensiune multideget).

În realitate aplicarea acestei metode este îngreunată datorită:

- efectelor neliniare (fenomenele de frecare și șoc în transmisiile mecanice) care pot distruge într-un grad mare legătura cauzală rigidă poziție-forță;
- sensibilității mărite a întregului sistem la perturbații, prin setarea joasă a amplificărilor de conducere pe anumite direcții;
- amplificărilor înalte ale reacției feedback de poziție care pot cauza oscilații rezonante a structura robotului;
- forțelor statice (cele gravitaționale spre exemplu), care trebuie să fie complet compensate deoarece metoda nu introduce o reacție integrală.

Toți acești factori aduc incertitudine în performanțele abordării cu o astfel de metodă de conducere. Pentru îmbunătățirea metodei ar fi necesare informații adiționale obținute prin traductori de forță sau printr-o buclă de reacție în forță internă. Concomitent însă s-ar pierde unul din avantajele majore ale ajustării pasive: deosebita ei simplitate.

## 3.3.3 Metodele cu complianță activă

### 3.3.3.1 Conducerea hibridă poziție/forță

este un concept de conducere bazat pe teoria referitoare la forța compliantă și controlul poziției al cărei scop este realizarea simultană și independentă a:

- variațiilor în timp nominale ale elementelor matricii de situare a efectorului final în direcțiile controlate prin poziție (direcții pe care există o constrângere naturală prin forța de contact) determinate în prealabil;
- variațiilor în timp nominale ale componentelor de forță generalizată pe direcțiile de conducere prin forță (direcții cu constrângeri naturale în mișcare) determinate în prealabil.

Fiecare aplicație de contact particulară poate fi definită prin introducerea unui sistem de coordonate corespunzător (pentru constrângeri) și prin definirea așa numitelor constrângeri naturale și artificiale. Constrângerile naturale sunt o consecință naturală a configurației sarcinii de executat (a aplicației). Constrângerile artificiale se definesc prin mișcarea preconizată, dorită a robotului sau/și a forțelor pe care efectorul final le realizează. Pentru a conferi simplitate problemei, a fost introdusă matricea diagonală  $S$ , numită matricea de selectivitate a complianței pentru a selecta acele grade de libertate care sunt controlate prin poziție și respectiv acele grade de libertate care sunt controlate prin forță (al  $i$ -lea element de pe diagonală are valoarea 1 dacă direcția  $i$  este controlată prin poziție și 0 pentru controlul în forță). Pentru a defini mișcarea constrânsă trebuie definit următorul set de informații:

- ◇ poziția și orientarea sistemului de coordonate al aplicației;
- ◇ matricea de selectivitate  $S$ ;
- ◇ poziția dorită, preconizată și forța preconizată exprimată în acest sistem de coordonate.

### 3.3.3.1.1 Conducerea explicită prin forță

A. Metoda Raibert&Craig care constă în două seturi paralele, complementare de bucle de reacție (figura 3.8): bucla superioară de poziție și bucla inferioară de forță. Fiecare din aceste bucle face uz de sisteme de senzori/traductoare separate și independente.

Fiecare grad de libertate a efectorului final al robotului este controlat sau prin forță sau prin poziție. Metoda are drept idee principală asigurarea realizării "prin cooperare" a poziției preconizate dorite  $Sx^0(t)$  și a forței preconizate  $(I-S)F^0(t)$ ,  $I$  fiind matricea unitate. În conformitate cu figura 3.8 legea de conducere propusă în literatură poate fi scrisă în spațiul cartezian astfel:

$$u = -K_p S(p - p^0) - K_v S(\dot{p} - \dot{p}^0) - K_{FP} \dot{S}(F - F^0) + K_{FI} \dot{S} \int (F - F^0) dt + F^0 \quad (3.3.1)$$

unde  $u$  este un vector ( $n \times 1$ ) al intrărilor de control;  $K_p$  și  $K_v$  sunt matrici ( $n \times n$ ) ale reacției de amplificare în poziție și viteză în spațiul cartezian;  $K_{FP}$ ,  $K_{FI}$  și  $K_v$  sunt matrici ( $n \times n$ ) a amplificărilor de reacție în forță în spațiul cartezian;  $S$  este matricea ( $n \times n$ );  $\dot{S} = I - S$  unde  $I$  este matricea unitate și  $n$  reprezintă numărul gradelor de libertate ale robotului. Realizarea practică a acestei metode ridică câteva probleme care sunt prezentate în literatură.

#### B. Conducerea mișcării prin descompunerea accelerației.

Conceptul apelează în esență la clasa metodelor identice: metoda spațiului operațional și controlul prin descompunerea accelerației. Schema propusă de conducere este prezentată în figura 3.9. Metoda este în esență similară cu așa numita metodă a



"dinamicii inverse" pentru că în ambele metode dinamica completă a sistemului este inclusă în legea de conducere.

Scopul principal al metodei constă în decuplarea completă, în cadrul aplicației, a comportamentului dinamic al robotului (al sistemului său de coordonate). Legea de conducere poate fi scrisă astfel:

$$P_q = H_q J^{-1} [S \dot{p}^* - J \dot{q}] + h_q + g_q + J^T \ddot{f}^* \quad (3.3.2)$$

unde  $H_q$  este matricea ( $n \times n$ ) inerțială;  $J$  este matricea ( $n \times n$ ) Jacobiană;  $S$  este matricea ( $n \times n$ ) de selectivitate;  $\ddot{f}^* = I - S$  unde  $I$  este matricea unitate;  $h_q$  este vectorul ( $n \times 1$ ) al momentelor centrifugale și Coriolis;  $g_q$  este vectorul ( $n \times 1$ ) momentelor gravitaționale;  $\dot{p}^*$  reprezintă intrările pentru partea de conducere în poziție redată prin relația:

$$\dot{p}^* = \ddot{p}^0 + K_p p(p^0 - p) + K_v (\dot{p}^0 - \dot{p}) \quad (3.3.3)$$

unde  $p^0$ ,  $\dot{p}^0$  și  $\ddot{p}^0$  este respectiv poziția nominală, viteza, accelerația; și  $\dot{f}^*$  este intrarea pentru partea de conducere prin forță a cărei formă depinde de legea de conducere aplicată. Accelerația nominală  $\ddot{p}^0$  este de asemenea inclusă în legea de conducere drept termen de anticipare pentru a compensa modificările care apar în mișcarea nominală pe direcțiile controlate în poziție.

### C. Dezavantajele conducerii explicite prin forță

În primul rând definiția "complementelor ortogonale" care stau la baza schemei de conducere hibridă explicite prin poziție și forță este incorectă pentru că dacă se utilizează principiul ortogonalității pentru a determina dacă cele două mișcări instantanee obținute sunt ortogonale, consecințele sunt:

- ◆ inconsistență dimensională;
- ◆ dependența de alegerea unităților utilizate;
- ◆ dependența de alegerea sistemului de coordonate.

Definiția constrângerilor naturale drept "complemente ortogonale" ale constrângerilor artificiale este practic de neînțeles. Utilizând o astfel de formulare subspațiile care definesc constrângerile naturale sunt dependente de alegerea originii și modificarea dimensiunilor.

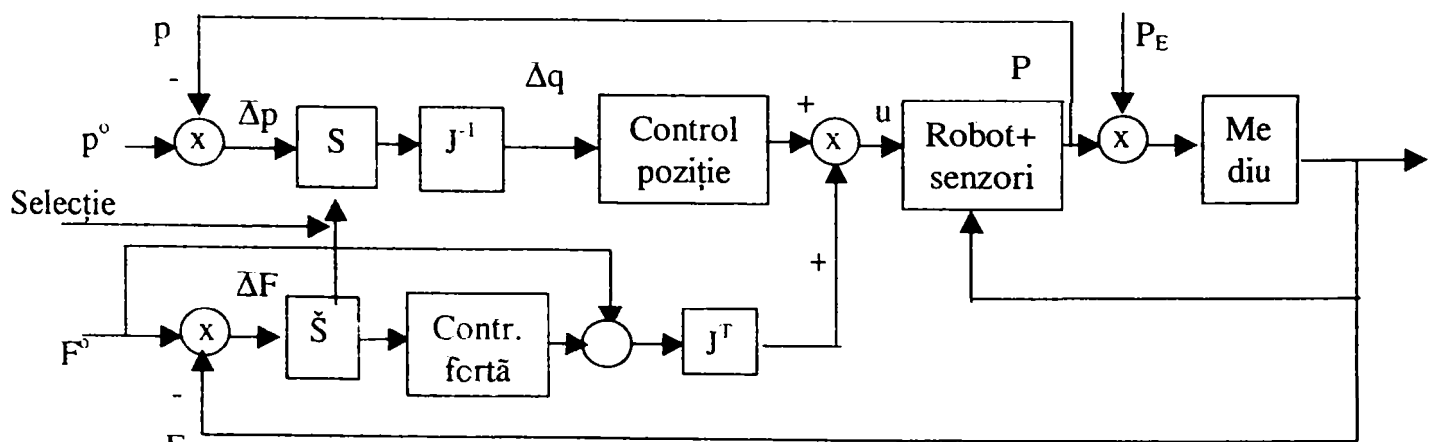


Fig. 3.8 Conducerea explicit hibridă poziție/forță

Principala problemă a conceptului clasic de conducere hibridă este legată de cerințele contradictorii referitoare la subsarcinile de conducere în poziție și respectiv în forță. Conducerea în poziție cere o rigiditate relativ ridicată a servosistemelor din cuplurile cinematice conducătoare ale robotului pentru a asigura o poziționare precisă a efectorului final. În opoziție conducerea prin forță reclamă o rigiditate relativ scăzută a robotului pentru a asigura o complianță cu mediul în comportamentul efectorului final.

Pentru a îmbunătăți posibilitatea realizării practice a conducerii cu această metodă, unii cercetători au reformulat legile de conducere hibridă prin intermediul coordonatelor generalizate, introducând "filtre" (matrici de proiecție ortogonale), care sunt echivalente cu matricile de selectivitate în coordonate externe.

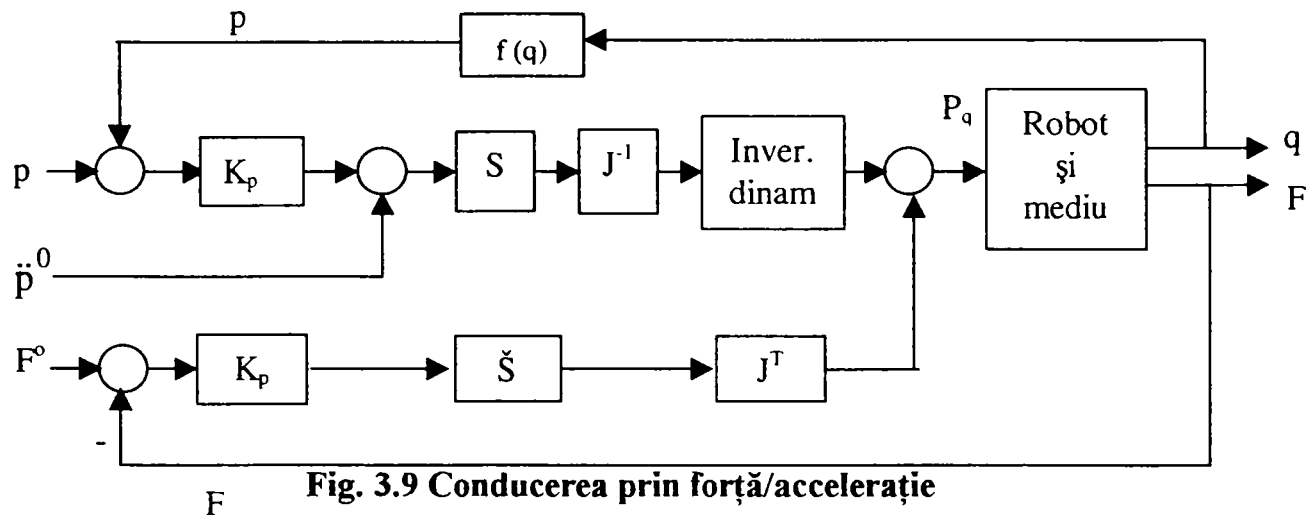


Fig. 3.9 Conducerea prin forță/accelerație

Prezentarea pe larg a acestor aspecte a conducerii hibride prin prisma analizării avantajelor și dezavantajelor din mai multe puncte de vedere este relevată în subcapitolul 3.6. Deocamdată este de menționat că unii cercetători au relevat faptul că următoarele aspecte de dinamică au o mare influență asupra stabilității robotului în sarcinile de mișcare constrânsă:

- ◆ - efectul reacției senzorului de forță este echivalent cu amplificarea superioară a reacției poziție;
- ◆ - contactul (impactul) cu un mediu rigid ridică probleme deosebite (este critic în sine);
- ◆ - în sisteme robotice, datorită "elasticității" senzorilor și a elementelor dispozitivelor de ghidare pot apărea instabilități (oscilații) de frecvență înaltă ne-modelabile, care nu sunt luate în considerare în calcule și procesele de conducere (a se vedea și subcapitolul 3.7).

Aspectele relevate nu sunt legate numai de această metodă - hibridă - de conducere, fiind prezente în toate aplicațiile la care conducerea se face prin forță.

Un alt neajuns al metodei este că aceasta nu este robustă față de schimbările sarcinilor sau variația parametrilor. Este foarte dificil de a concepe unele proceduri numerice sau analitice rezonabile pentru sinteza reacției expicite de amplificare. În plus, performanțele sistemului depind de configurația robotului și de valoarea și direcția forței preconizate.

Dificultatea principală a metodei de conducere hibridă (poziție/forță) constă însă în faptul că necesită un controler complet nou. Nu este posibilă (re)utilizarea unui controler pozițional clasic, care este foarte robust și sigur.

Fenomenul de "instabilitate cinematică" este legat intrinsec de schema de control hibridă și este deasemenea abordată în diferite surse bibliografice.

### 3.3.3.1.2 Conducerea implicită prin forță

este prezentată în figura 3.10. Conceptul se bazează pe identificarea rigidității (respectiv amortizării) de contact utilizând informațiile senzorilor de forță și pe calculul poziției (vitezei) echivalente la o forță preconizată. Intrarea în controler-ul de forță cu funcția de transfer  $g_f$  este constituită de abaterea (eroarea) forței (diferența dintre forța instantanee și cea preconizată în sistemul de coordonate al aplicației). Ieșirea controler-ului de forță este o poziție echivalentă  $p_{EQ}$  pe direcțiile comandate în forță care este supra-impusă în poziția nominală  $p_0(t)$  pe direcțiile comandate în poziție. Suma  $(p_{EQ} + p_0(t))$  este utilizată drept intrare de referință în controler-ul de poziție care rămâne nemodificat. Întrucât acesta furnizează baza pentru realizarea controlului în forță, conceptul face referință la conducerea implicită, sau bazată pe poziție a controlului în forță pe de o parte sau la controlul extern prin forță pe de altă parte.

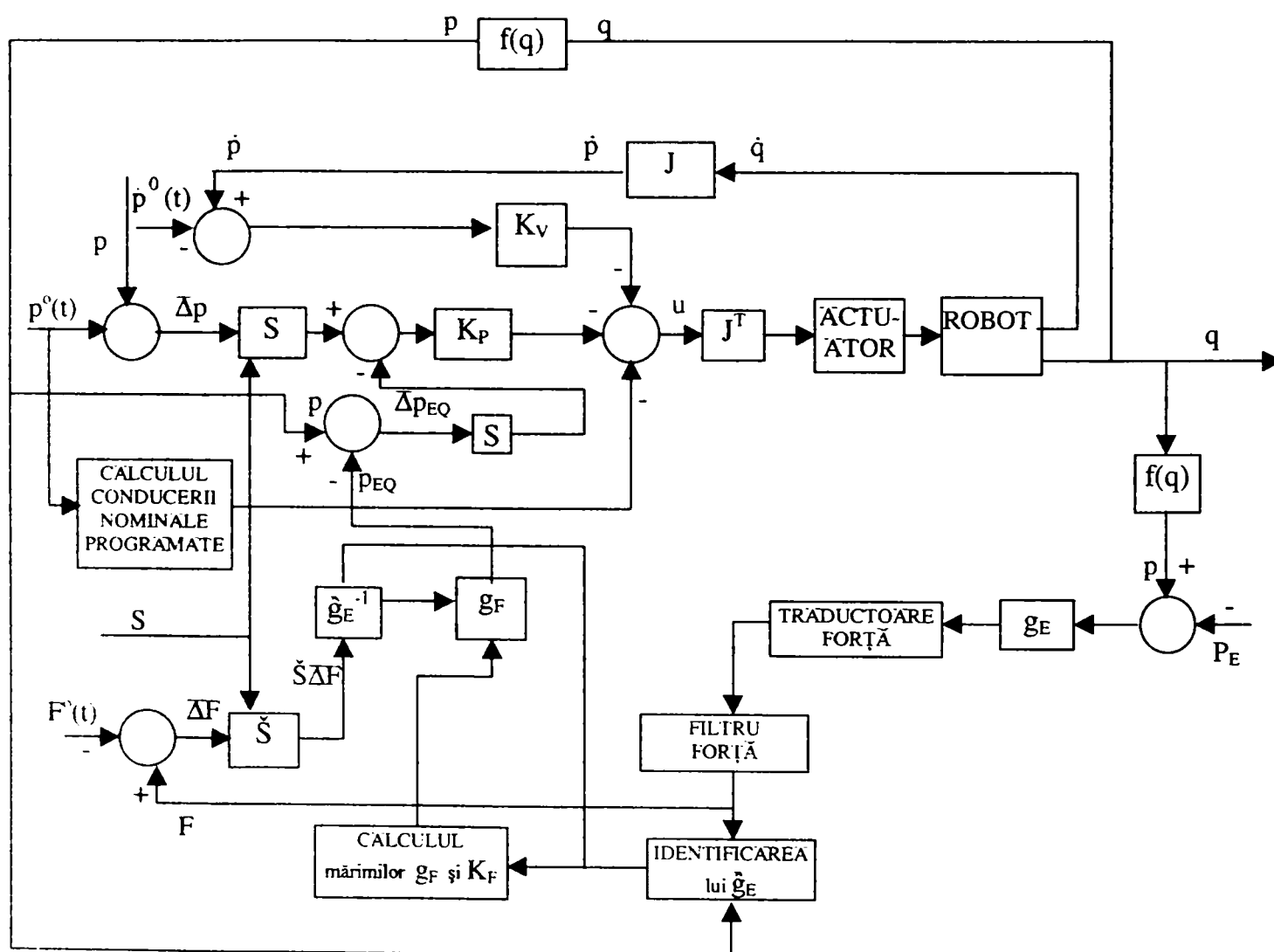


Fig. 3.10. Schema de conducere implicită în forță

Legea implicită de conducere în spațiul cartezian poate fi scrisă astfel:

$$u = u^0 - K_p S(p - p^0) - K_v S(\dot{p}^0 - \dot{p}) - K_p \dot{S}(p - p_{EQ}) \quad (3.3.4)$$

unde  $u^0$  este vectorul ( $n \times 1$ ) de comandă nominal programat ( $u^0 = (u_1^0, u_2^0, \dots, u_n^0)^T$ );  $n$  este numărul gradelor de mobilitate al robotului  $K_P$  este matricea ( $n \times n$ ) reacției amplificării de poziție în spațiul cartezian;  $K_V$  este matricea ( $n \times n$ ) a amplificării de viteză în spațiul cartezian;  $p^0$  este vectorul ( $n \times 1$ ) al poziției dorite a efectorului final;  $p$  este vectorul ( $n \times 1$ ) al poziției reale a efectorului final;  $S$  este matricea ( $n \times n$ ) de selectivitate;  $\check{S} = I - S$  unde  $I$  este matricea unitate;  $p_{EQ}$  este vectorul ( $n \times 1$ ) al poziției echivalente pe direcțiile controlate în forță.

Ăceste poziții echivalente sunt calculate pe baza controler-ului de forță  $g_F$ , a inversului modelului de mediu  $g_E^{-1}$  și a forței dorite  $F^0$  (figura 3.10). Inversul modelului de mediu se bazează pe identificarea parametrilor modelului de forță, iar produsul primului cu modelul real al mediului  $g_E$  nu conduce la entitatea matematică de identitate. Problema centrală a schemei de control prezentate o constituie sinteza controler-ului cu funcția de transfer  $g_F$ . Avantaje:

- ◇ robustețea și siguranța deosebită în funcționare;
- ◇ posibilitatea de utilizare a unui controler pozițional clasic în spațiul coordonatelor generalizate (avantaj față de schema precedentă);
- ◇ un nou element de control  $g_F$  este adăugat în schemă; parametri acestuia conferă destulă libertate pentru ajustarea performanțelor sistemului;
- ◇ sinteza acestei scheme este clară și fără probleme;
- ◇ schema este stabilă în circumstanțe certe de funcționare.

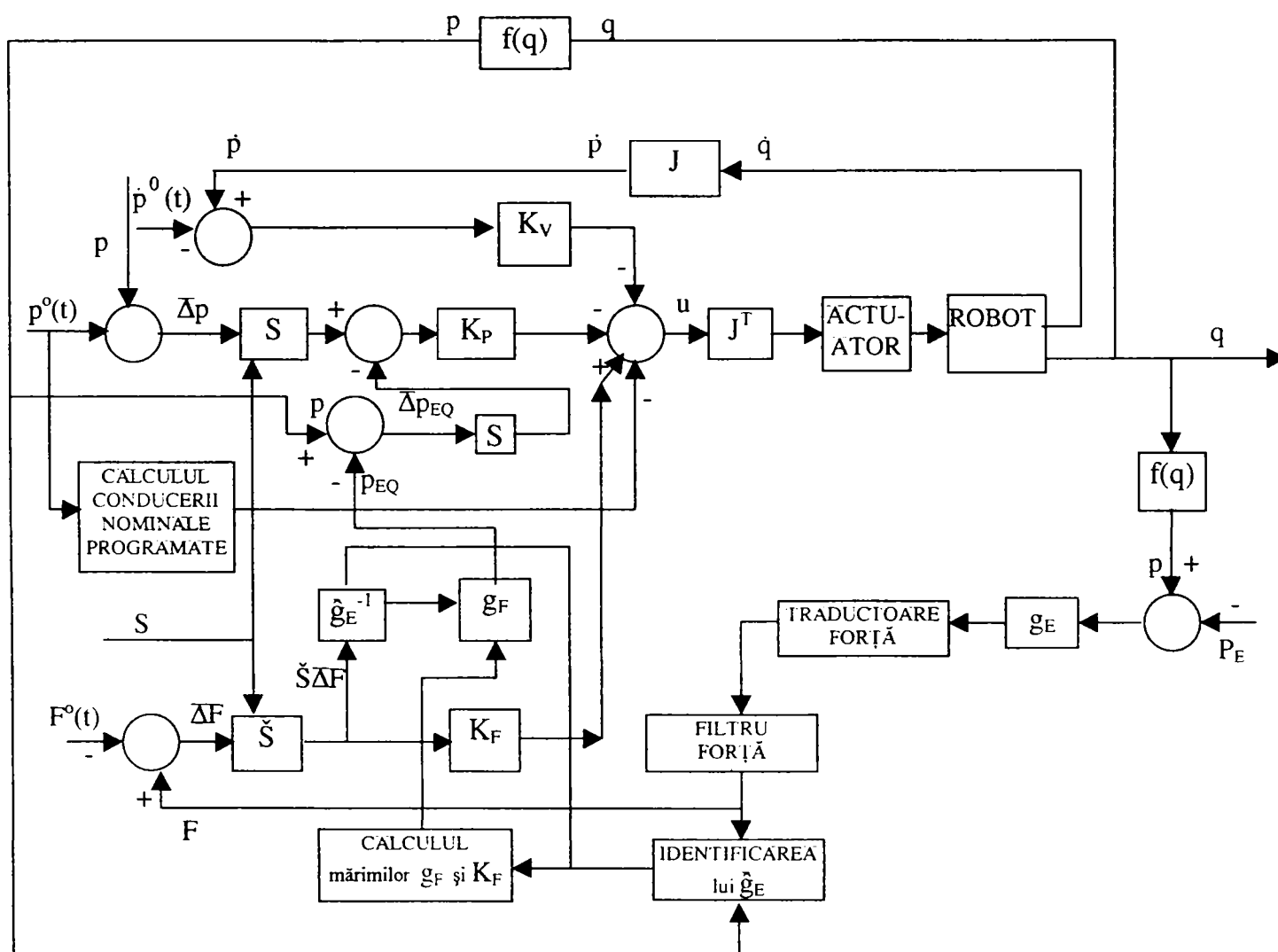


Fig. 3.11. Schema de conducere implicit/explicită în forță

Există totuși și dezavantaje:

- ◆ o funcționare corectă depinde foarte mult de calitatea identificării caracteristicilor forței de contact (stabilitatea sistemului depinde de erorile de identificare);
- ◆ schema oferă răspunsuri relativ lente la perturbațiile de forță datorită prezenței blocului de control  $g_F$ ;
- ◆ acuratețea forței de contact este limitată în principal de precizia de poziționare robotului (rezoluția sensorilor); apar perturbații în mod special dacă se cere un contact cu un mediu foarte rigid;
- ◆ performanțele metodei sunt limitate semnificativ de lățimea de bandă a controler-ului pozițional. Prezența filtrelor de forță care se aplică în fiecare schemă diminuează de asemenea răspunsul sistemului.

### 3.3.3.1.3 Schema de conducere implicit/explicită prin forță

este prezentată în figura 3.11. care încearcă să îmbine avantajele celor două tipuri de schemă de la care provine. Pe structura schemei de conducere implicită s-a încercat implementarea reacției explicite în forță pentru a:

- ◇ îmbunătăți realizarea (atingerea) forței preconizate;
- ◇ crește viteza de răspuns a sistemului la perturbațiile de forță ;
- ◇ corectă erorile de identificare a caracteristicilor forței de contact;
- ◇ compensa efectele frecărilor și a perturbațiilor de forță;
- ◇ conferi sistemului mai multă robustețe la erori și la estimarea parametrilor săi necunoscuți.

Legea de control explicit/implicit prin forță are forma următoare:

$$u = u^0 - K_p S(p - p^0) - K_v S(p - \dot{p}^0) - K_p S(p - p_{EQ}) + K_F S(F - F^0) \quad (3.3.5)$$

unde  $K_F$  este matricea ( $n \times n$ ) pozitiv definită a amplificărilor reacției în forță în spațiul cartezian, ceilalți termeni având aceeași semnificație cu cei de la relația precedentă.

### 3.3.3.2 Conducerea prin impedanță

este preponderent utilizată în acele aplicații "contact-task" la care este cerută o poziționare precisă.

În general, acest tip de conducere trebuie să asigure următorul set de deziderate:

- ◇ poziționarea precisă;
- ◇ controlul forțelor de contact;
- ◇ asigurarea unui comportament al efectorului final adoma cu un sistem care are caracteristicile inertiiale corespunzătoare (un sistem cu mase preconizate, dorite);
- ◇ controlul deplin (complet) al relației dinamice dintre poziția efectorului final al robotului și forțele de contact;
- ◇ luarea în considerare a caracteristicilor dinamice a robotului;
- ◇ realizarea sarcinii prescrise privitor la variația parametrilor robotului, a mediului și a regulatorului.

#### 3.3.3.2.1 Conducerea prin impedanță bazată pe poziție

este relevată în figura 3.12. Ea constă dintr-o buclă de reacție internă directă de la senzorul de poziție care furnizează informații asupra poziției  $p_E$  a punctului de contact, și o buclă de reacție externă, bazată pe senzorul de forță care oferă informații asupra

forței de contact  $F$ . Bucla externă include compensatorul feedback de forță  $g_F$  care este proiectat cu scopul de a asigura stabilitatea întregului sistem robotic. Compensatorul  $g_F$  definește relația dintre forța de contact  $F$  și deplasarea relativă a efectorului final  $\Delta p_F$ . Schema din figura 3.12 include funcția de transfer  $g_E$  (matricea-funcție de transfer a impedanței de mediu, care în practică poate fi reprezentată cu modelele liniare simplificate),  $g_{PE}=p/p^0$  (matricea-funcție de transfer a întregului sistem robotic în interacțiune: regulator+robot+mediu,  $p^0$  fiind vectorul coordonatelor dorite, preconizate ale efectorului final a robotului),  $q_{XE}$  (matricea-funcție de transfer  $p_E/p$  care descrie influența locației punctului de contact dintre robot și mediul său înconjurător).

Conducerea prin impedanță prin controlul poziției (figura 3.12) este similară cu schema conducerii implicite prin forță (figura 3.13). Totuși există diferențe semnificative între aceste două scheme:

- schema prin impedanță/forță nu include partiționarea direcțiilor controlate prin poziție și respectiv forță;
- în schema de control prin impedanță nu există forță de referință precisă.

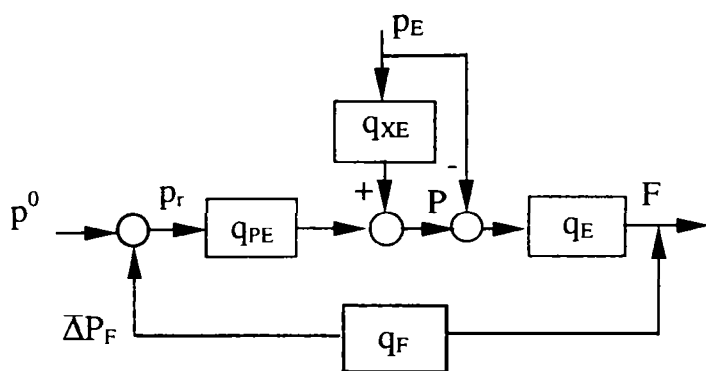


Fig. 3.12. Conducerea prin impedanță bazată pe poziție

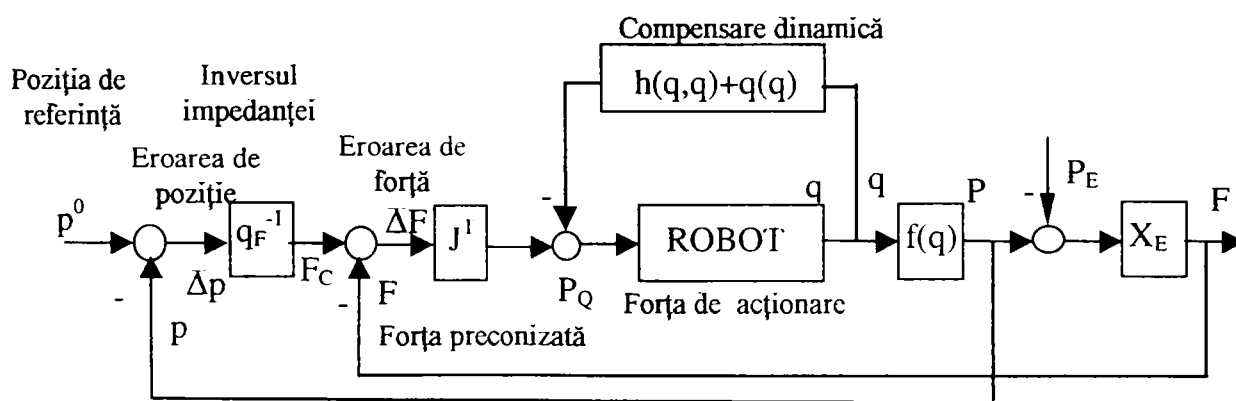


Fig. 3.13. Coducerea prin impedanță bazată pe forță

Conducerea prin impedanță bazată pe poziție are următoarele avantaje:

- ◇ este robustă față de variațiile parametrilor sistemului robotic și față de posibilele perturbații externe;
- ◇ realizează o funcționare în siguranță a întregului sistem robotic;

- ◇ implementarea sa este simplă întrucât schema nu necesită un controler pozițional cartezian, dar un controler pozițional clasic în spațiul coordonatelor generalizate poate fi utilizat;
- ◇ nu sunt necesare calcule complexe;
- ◇ proiectarea compensatorului de forță  $g_F$  în bucla exterioară este relativ simplă.

Principalul dezavantaj constă în inabilitatea de realizare a unei impedanțe suficient de "compliantă", până la limita acurateții sistemului de control pozițional și a "rezoluției" senzorilor.

### 3.3.3.2 Conducerea prin impedanță bazată pe forță

se desfășoară după schema din figura 3.13. În conformitate cu acest concept o forță de referință preconizată este calculată pentru a satisface specificațiile de impedanță preconizate bazate pe erorile de poziție și inversul impedanței țintă  $g_F^{-1}$ :

$$F_c = (M_E s^2 + B_E s + K_E) \Delta p = g_F^{-1} \Delta p \quad (3.3.6)$$

Matricile  $M_E$ ,  $B_E$  și  $K_E$  sunt selectate astfel încât impedanța proiectată a sistemului robotic  $g_F^{-1}$  să corespundă într-o măsură cât mai mare cu impedanța reală.

Această metodă de conducere este utilizabilă rațional pentru aplicațiile la care poate fi proiectată o impedanță redusă a efectorului final  $g_F$ , adică dacă poate fi obținută o forță de reacție  $F$  redusă. Metoda este acceptabilă dacă greutatea robotului este redusă și se cere o mișcare lentă a sistemului. În celelalte cazuri sunt necesare modelări ale robotului în detaliu.

Similar cu conducerea hibridă poziție/forță un dezavantaj semnificativ al conducerii prin impedanță bazată pe forță este faptul că necesită un controler non-standard și complet nou.

## 3.4 Forme utilizabile ale modelului matematic care descrie aplicațiile de tip "contact-task" ([Ben95], [Bir96], [Ghi95], [Ion94], [Rad79])

### Motivație

*Modelul matematic care descrie aplicațiile de tip "contact-task" are forma unei ecuații de mișcare clasice (în conformitate cu subcapitolul 3.1 și respectiv cu cele care se referă la studiul de caz prezentat la subcapitolul 3.5). De aceea s-a considerat că este foarte utilă o prezentare a formelor sub care poate fi întâlnit acest tip de model, în general, cu referiri la modalitățile de control matematic asupra acestor forme și a posibilităților de simulare (apelând la pachete soft accesibile) cu ajutorul acestora, prezentare sistematizată, preluată din [Luc99g].*

### 3.4.1 Modelul fizic/mecanic al unei aplicații "contact-task" clasice

O aplicație "clasică" de tip contact-task este reprezentată de interacțiunea dintre un vehicol și suprafața pe care acesta rulează, descrisă cu ajutorul unui model fizic

prezentat în figura 3.14 a) și b). Se observă că modelul derivă din modelul fizic "general" de tipul celui din figura 3.3. În mod uzual, ansamblul real fizic modelat astfel (ansamblul care "suportă" interacțiunea propriuzisă după cum s-a prezentat la subcapitolul 3.2) este materializat de o suspensie - vehicul.

### 3.4.2 Modelele matematice ale aplicației

#### 3.4.2.1 Modelul matematic "clasic" al aplicației

Modelarea componentei elastice a forței rezultante este relevată în figura 3.14 c) și d), relațiile matematice corespunzătoare fiind:

$$\begin{aligned} F_1 &= k(l_0 - l_1) \\ F_2 &= k(l_0 - l_2) \end{aligned} \quad (3.4.0)$$

Adăugând la aceasta, după redenumirea corespunzătoare a variabilelor, modelul componentei de amortizare (figura 3.14 e) și al celei inerțiale, rezultă imediat expresiile forțelor care intervin în modelul întregului sistem:

$$\begin{aligned} F_j &= -m\ddot{y} \\ F_e &= -k(y-x) \\ F_c &= c \frac{d(y-x)}{dt} = c\dot{y} - c\dot{x} \end{aligned} \quad (3.4.1)$$

Echilibrul forțelor conduce la forma clasică a unei ecuații de mișcare pentru acest caz:

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = c\dot{x} + kx \quad U \quad x = Be^{i\omega t} \quad (3.4.2)$$

unde

$$B = \sqrt{a^2 + b^2} = B(\sin(\omega t) + \cos(\omega t)) \quad U \quad \tan(\omega t) = \frac{b}{a} \quad (3.4.3)$$

Pentru modelul (de variabilă independentă - timp) obținut, variabila  $x$  reprezintă excitațiile prin valorile sale  $x_i$  răspunsurile provocate fiind contorizate de valorile  $y_i$  ale variabilei de ieșire  $y$ . Cele două variabile au aceeași formă, diferențele fiind în amplitudine și fază. Pe baza relațiilor:

$$(\sum x_j \rightarrow \sum y_j) \quad U \quad (y = ae^{i(\omega t + f)} = A e^{i(\omega t)}) \quad (3.4.4)$$

se obține:

$$-(m\omega^2 + i c\omega + k)A = (i c\omega + k)B \quad (3.4.5)$$

Factorul de amplificare complex este:

$$Y(i\omega) = A/B = (i c\omega + k) / \left[ (-m\omega^2 + k) + i c\omega \right] \quad (3.4.6)$$



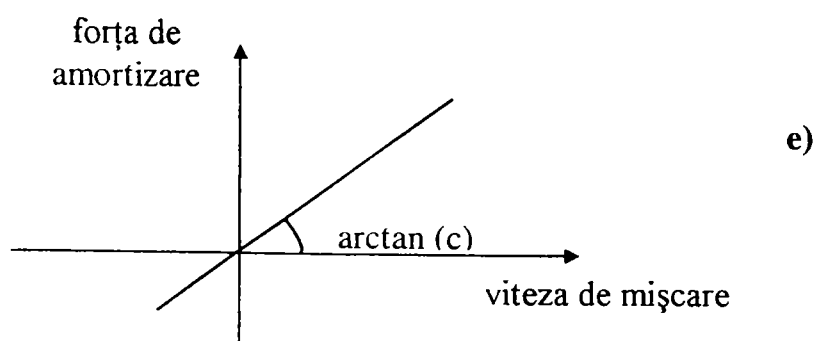
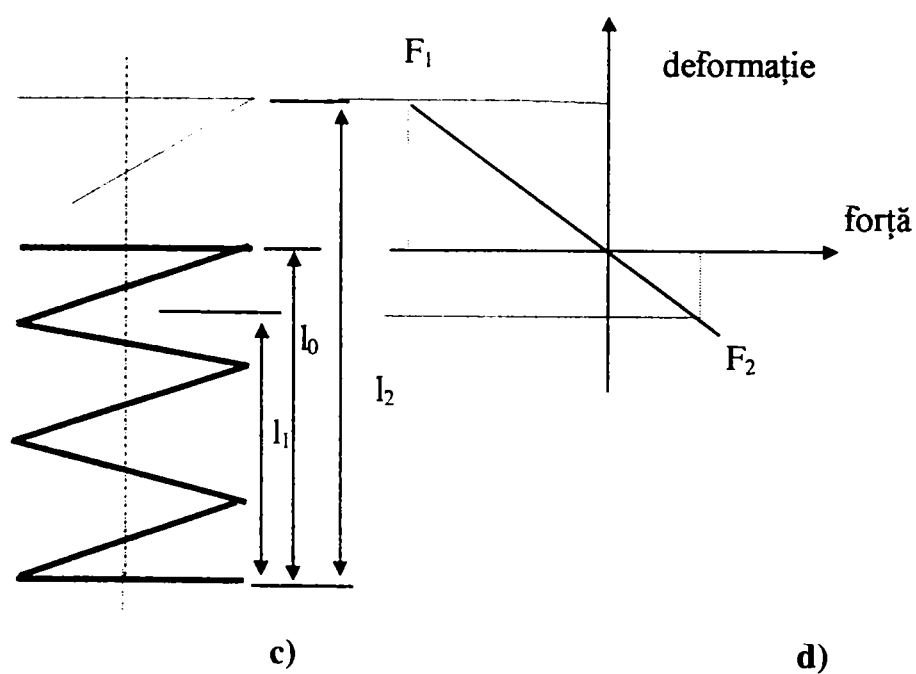
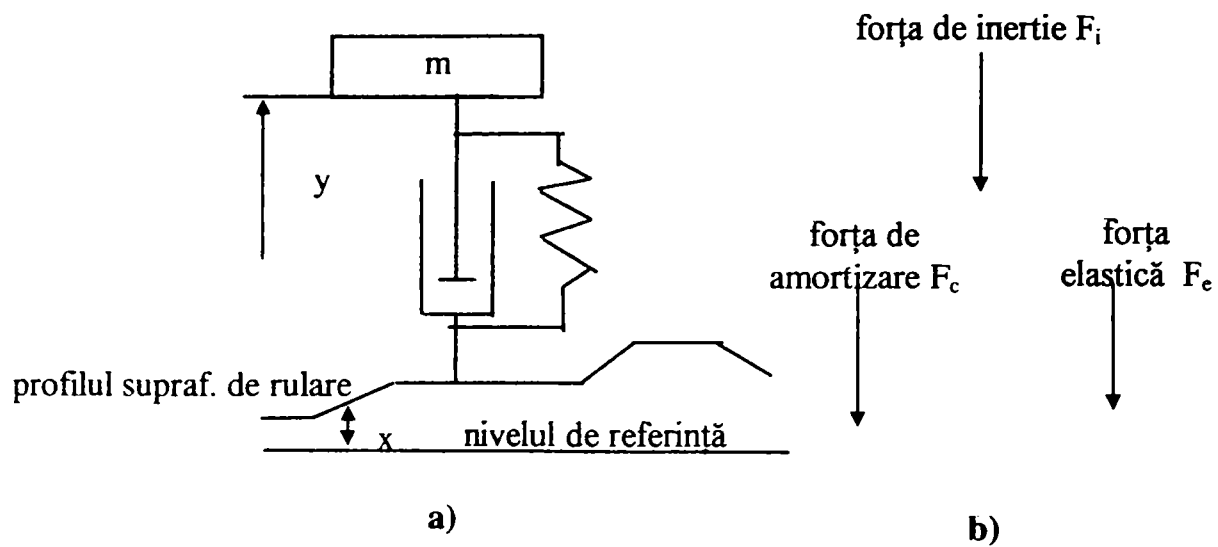


Fig. 3.14 Modelul unei interacțiuni vehicol-cale de rulare

Acesta oferă și răspunsul în frecvență ( $\leftrightarrow$ funcție de transfer). Notând cu  $\omega_n$  frecvența proprie, pentru modelul neamortizat și apoi raportul  $\zeta$ , după cum urmează:

$$\omega_n = \sqrt{k/m} \quad U \quad \zeta = \frac{C}{2\sqrt{k\omega}} = \frac{C}{2m\omega_n} \quad (3.4.7)$$

Se poate exprima:

$$Y(\omega) = [1 + i\zeta(\omega/\omega_n)] / [1 - (\omega/\omega_n)^2 + 2i\zeta(\omega/\omega_n)] \quad (3.4.8)$$

Ecuția respectă forma tip:

$$Y = \frac{N_1 + iN_2}{D_1 + iD_2} = \frac{N_1D_1 + N_2D_2}{D_1^2 + D_2^2} + i \frac{N_2D_1 + N_1D_2}{D_1^2 + D_2^2} \quad (3.4.9)$$

la care poate fi departajat factorul de amplificarea real sub forma:

$$\left| \frac{A}{B} \right| = |Y(\omega)| = \sqrt{\frac{N_1^2 + N_2^2}{D_1^2 + D_2^2}} \quad (3.4.10)$$

precum și defazajul răspunsului față de intrare:

$$\arg \left| \frac{A}{B} \right| = \arg |Y(\omega)| = \arctan \frac{N_2D_1 - N_1D_2}{N_1D_1 - N_2D_2} \quad (3.4.11)$$

Modelul permite utilizarea metodelor clasice de studiu, foarte cunoscute prin literatura de specialitate din domeniul mecanicii/vibrațiilor. Din punctul de vedere al unui utilizator care este interesat de controlul/conducerea unor procese prin intermediul unora din parametri modelului, informații foarte utile sunt oferite în [Rad79] prin prisma activităților de identificare. Utilizarea modelului în cadrul mediilor de simulare nu prezintă dificultăți deosebite. În mediul SIMULINK, pe exemplul Ecuției Van der Pol ([Bir96]), se pot construi diferite variante de control a variabilelor care interesează (se poate consulta în acest sens și capitolul 2).

### 3.4.2.2 Modelele utilizabile în aplicațiile orientate pe simulare

recurg la forme adecvate limbajelor/mediilor de simulare. Exemplele de mai jos fac referire la mediul MATLAB, cu cutia de instrumente CONTROL SYSTEM TOOLBOX (capitolul 2). Pentru aceasta, pornind de la același model fizic/mecanic, prin rescrierea ecuației clasice prin intermediul termenului  $l=y-x$ , introducând totodată notația  $F$  pentru suma forțelor exterioare  $F = c\dot{x} + kx$ , se obține următoarea formă a ecuației:

$$m\ddot{l} + c\dot{l} + kl = F \quad (3.4.12)$$

Notând frecvența complexă cu "s" și transformata Laplace-ană a oricărei variabile  $q$  cu " $\tilde{q}$ ", în condiții inițiale zero, se obține:

$$(ms^2 + cs + k)\tilde{i} = \tilde{F} \quad (3.4.13)$$

care conduce la:

$$\tilde{i} = \frac{1}{ms^2 + cs + k} \tilde{F} \quad (3.4.14)$$

#### 3.4.2.2.1 Funcția de transfer

Expresia:

$$H(s) = \frac{1}{ms^2 + cs + k} \quad (3.4.15)$$

este denumită "funcție de transfer" a modelului (în ultimă instanță, a sistemului), care se pretează foarte bine la modelarea sistemelor SISO, destul de bine la cele SIMO, dar este incomodă pentru sistemele MIMO, notațiile fiind cele consacrate de la Teoria Sistemelor. În conformitate cu notațiile funcțiilor MATLAB pentru numitor și numărător (*num* și respectiv *denum*), valorile celor două funcții-variabilă vor fi dependente de valorile concrete ale parametrilor masă, coeficient de amortizare și respectiv elasticitate:

$$num=1; \text{denum}=[m \ c \ k] \quad (3.4.16)$$

Ăceastă formă de reprezentare se poate utiliza împreună cu funcțiile uzuale din Toolbox-ul MATLAB (precum *rlocus*).

#### 3.4.2.2.2 Modelul "zero-pol"

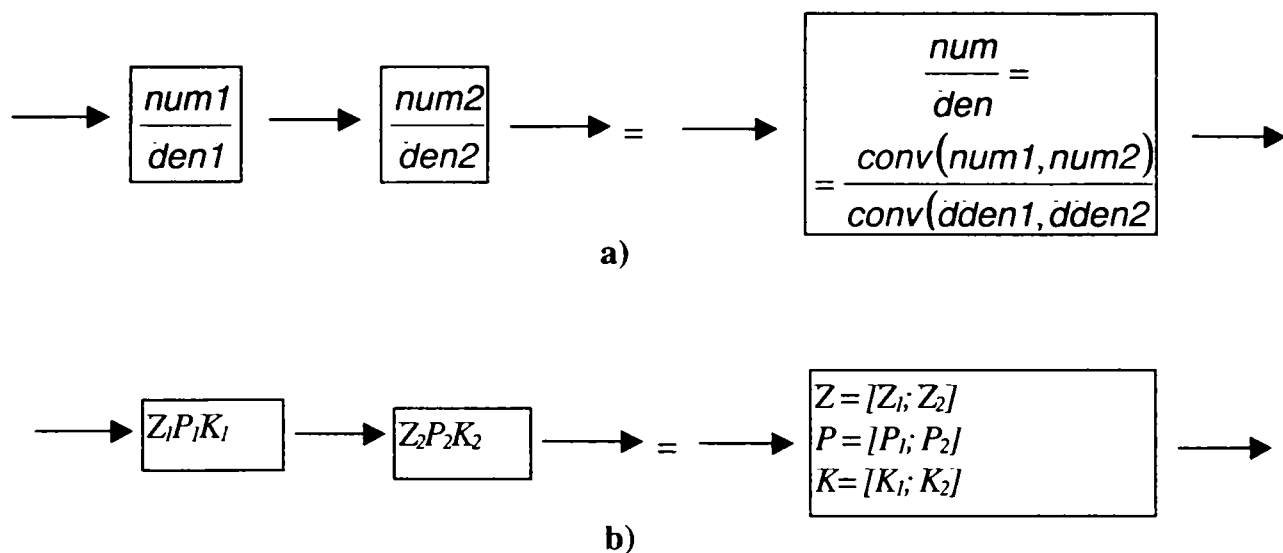
Reprezintă în fond o altă modalitate de reprezentare a funcției de transfer. Forma acesteia este redată mai jos:

$$H(s) = K \frac{(s - Z_1)(s - Z_2) \dots (s - Z_M)}{(s - P_1)(s - P_2) \dots (s - P_N)} \quad (3.4.17)$$

unde  $K$  reprezintă amplificarea, elementele vectorului coloană  $Z$  sunt *zero*-urile, iar elementele vectorului  $P$  sunt *polii* funcției  $H$ .

În cazul aplicației prezentate, funcția nu are zerouri ( $Z=[]$ ), amplificarea  $K=1/m$ , iar polii sunt rădăcinile polinomului de la numitor (care se obțin nemijlocit prin funcția MATLAB *roots*:  $P=\text{roots}(\text{den})$ ). Cu Toolbox-ul specificat, vectorii care interesează se obțin nemijlocit prin utilizarea funcției MATLAB *tf2zp*:

$$[Z, P, K] = \text{tf2zp}(\text{num}, \text{den}) \quad (3.4.18)$$



**Fig. 3.15** Conectarea serie a două sisteme în reprezentare tip funcție de transfer (a) și zero-pol (b)

Algoritmul de calcul care utilizează reprezentarea zero-pol este mai simplu și - numeric - mai precis decât cel care face uz de funcția de transfer. Acest fapt este evident dacă se consideră drept exemplu modalitatea de reprezentare a două sisteme conectate în cascadă (conform cu cele prezentate în figura 3.15, în care se evidențiază și utilizarea funcțiilor MATLAB). Este clar că reprezentarea "zero-pol", care reclamă doar o multiplicare și două operații de compoziție simplă pentru exemplul prezentat (vizibile în ultimul bloc al poziției b din figură), este mult mai stabilă din punct de vedere numeric decât funcția de transfer care face uz de funcția *conv* (o potențială sursă de imprecizie numerică).

#### 3.4.2.2.3 Modelul fracțiilor parțiale

poate reprezenta o funcție de transfer, dacă prin  $P$  se notează vectorul coloană al polilor din reprezentarea "zero-pol", prin  $R$ , vectorul-coloana al reziduurilor, iar  $kk$  un polinom exprimabil prin vectorul-șir al coeficienților acestuia:

$$H(s) = \frac{R_1}{s - P_1} + \frac{R_2}{s - P_2} + \dots + \frac{R_M}{s - P_M} + kk(s) \quad (3.4.19)$$

Conversia formelor de reprezentare "zero-pol" - "fracție parțială" se poate face în ambele direcții prin intermediul funcției MATLAB *residue* astfel:

$$[R, P, K] = \text{residue}(\text{num}, \text{den}) \quad (3.4.20)$$

respectiv:

$$[\text{num1}, \text{den1}] = \text{residue}[R, P, K] \quad (3.4.21)$$

unde  $\text{num}$  și  $\text{den}$  au semnificațiile de la paragraful precedent. Se poate verifica pe un exemplu numeric concret dacă valorile acestor vectori coincid cu cei nou introduși ( $\text{num1}$  și  $\text{den1}$ ).

## 3.4.2.2.4 Modelul de reprezentare în spațiul stărilor

Dacă sistemul poate fi reprezentat în forma:

$$\begin{aligned}x' &= Ax + Bu \\ y &= Cz + Du\end{aligned}\tag{3.4.22}$$

în care  $x$  este vectorul coloană al stărilor,  $u$ , cel al intrărilor,  $y$ , cel al ieșirilor, iar  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ , matricile corespunzătoare, aceasta este o reprezentare în spațiul stărilor. Ecuația diferențială de ordinul doi a sistemului (3.4.22) poate fi transformată în ecuație de stare pe mai multe căi. Spre exemplu, dacă se notează  $x_2=l$ ,  $x_1=l'$ ,  $u=F$  și  $y=l$  (deasemenea), se obțin exprimările matricilor care descriu sistemul:

$$\begin{aligned}A &= \begin{bmatrix} -c/m & -h/m \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, & B &= \begin{bmatrix} 1/m \\ 0 \end{bmatrix}, \\ C &= [0 \ 1], & D &= [0]\end{aligned}\tag{3.4.23}$$

Dacă se utilizează mediul MATLAB, funcția *tf2ss* poate efectua o conversie directă, fără "instabilități" numerice:

$$[A, B, C, D] = \text{tf2ss}(\text{num}, \text{den})\tag{3.4.24}$$

Ceea ce trebuie relevat este faptul că această modalitate de reprezentare este adecvată atât pentru descrierea sistemelor SISO, cât și pentru cea a sistemelor MIMO.

## 3.4.2.2.5 Forma de reprezentare Cauchy

constă în rescrierea modelului matematic sub forma unui sistem de  $n$  ecuații diferențiale de ordinul întâi după cum urmează:

$$\begin{cases} w'_{(1)}(t) = f_{(1)}(t, w) \\ \dots \\ w'_{(n)}(t) = f_{(n)}(t, w) \end{cases}\tag{3.4.25}$$

unde  $t$  este variabila independentă (de obicei timpul), iar  $W(t)$  este vector  $n$ -dimensional. În notație vectorială, sistemul se poate rescrie:

$$w'(t) = f(t, w)\tag{3.4.26}$$

Ăceasta este una din cele mai uzuale forme de reprezentare pentru aplicațiile de simulare cu ajutorul mediilor specializate. De obicei,  $f(t, w)$  se dispune într-un fișier (procedură) separat(ă); în cazul MATLAB, fișierul sursă este de tip \*.m, iar funcțiile de rezolvare sunt *ODE23* și *ODE45*. Nu există restricții de liniaritate, iar forma se pretează la diferite rutine de rezolvare ([Kil97], [Mar87]: Runge-Kutta, predictor-corector, Gear, etc).

În cazul aplicației considerate, se efectuează substituția:  $w_1=l'$  și  $w_2=l$ , și admițând o variație a forței  $F=asin(t)$ , spre exemplu, se obține forma Cauchy:

$$\begin{aligned} w_2' &= w_1 \\ w_1' &= -c/mw_1 - k/mw_2 + a/m \sin(t) \end{aligned} \quad (3.4.27)$$

Pentru orice set de condiții inițiale impuse ( $t(0)$ ,  $w_1(0)$ ,  $w_2(0)$ ), sistemul are soluție unică, obținându-se cu ajutorul funcției ODE23 astfel:

$$[t, w]=ode23('reprez', t0, tf, w0) \quad (3.4.28)$$

### 3.5 Studiu de caz în abordare modernă: suspensia "inteligentă" a unui autovehicul ([Bir96], [Vuk95a])

#### 3.5.1 Prezentarea problemei

În abordare modernă, interacțiunea drum (cale de rulare) - (auto)vehicol rămâne cel mai interesant exemplu care poate fi tratat drept aplicație "contact-task" (figura 3.17 a). Sunt luate în considerare pentru modelare cele expuse la capitolele 3.2 și 3.4.

Sistemul complex drum - vehicul este un sistem dinamic alcătuit din mai multe corpuri. Controlul activ al performanțelor acestuia, reprezintă o sarcină delicată care devine tot mai interesantă și mai atractivă fiind în același timp, o problemă de mare interes comercial. Faptul că vehiculele moderne sunt echipate cu senzori și traductoare foarte variate: accelerometre, traductoare de poziție și de viteză, senzori de forță și moment, deschide calea încorporării tehnicilor utilizate la sisteme robotice (în sens larg) în rezolvarea problemelor care apar în timpul funcționării. Este vorba de fapt de o nouă generație de vehicule care se constituie în sisteme tip robot, capabile să aplice metodologia derivată de la metodologia "contact – task".

#### 3.5.2 Modelul fizic

În figurile 3.16 a și b, sunt ilustrate diferențele dintre cele două modele de interacțiune, primul fiind modelul clasic cu legătură rigidă între componente, celalalt, modelul dinamic cu legături libere și constrângeri având posibilitatea de acordare a forței de contact pe calea impedanței.

Interacțiunea poate fi structurată în două subsisteme. Alegerea celui activ depinde de setul de parametri (sau variabile dinamice) care interesează, dar varianta "naturală" de alegere este: sistemul mediu-activ pe de o parte și vehiculul sistem de lucru care suportă efectele interacțiunii pe de altă parte (figura 3.17 a).

Contactul dintre sistemul de lucru și mediu este descris de forțele dintre roțile vehiculului și drum (dar aceste forțe nu interesează în mod special). Investigatorului îi revine sarcina de alegere a categoriei de forță (din cele ce se transmit pe "traseul forță") care interesează în studiu și cercetare și este relevantă pentru aplicație.

Dacă utilizatorul este interesat de toate forțele care apar între corpul mașinii și roți, acestea reprezintă mediul activ (considerând că ele sunt în contact permanent cu drumul), iar corpul mașinii este sistemul de lucru (sau modelul considerat).

Vehiculul este materializat printr-un corp rigid, cu șase grade de libertate (trei translații și trei rotații). Se poate considera că fiecare roată are două grade de libertate (o translație orizontală și o rotație).

Mecanismul robot cu șase grade de libertate poate să realizeze - deasemenea - trei translații și trei rotații ale efectorului final, în spațiul cartezian. Pe baza acestei considerații, metodele de conducere și control din cazul roboților la contactul cu mediul dinamic, se pot aplica în controlul vehiculului "robotizat", luând în considerare câteva observații.

Strategia de conducere este determinată de setul performanțelor dorite, care de cele mai multe ori constă din următoarele:

- ◇ minimizarea influențelor vibrațiilor asupra corpului vehiculului (mărirea confortului pasagerilor);
- ◇ calitatea conducerii propriu-zise a vehiculului (manevrabilitatea sa);
- ◇ securitatea în rulaj.

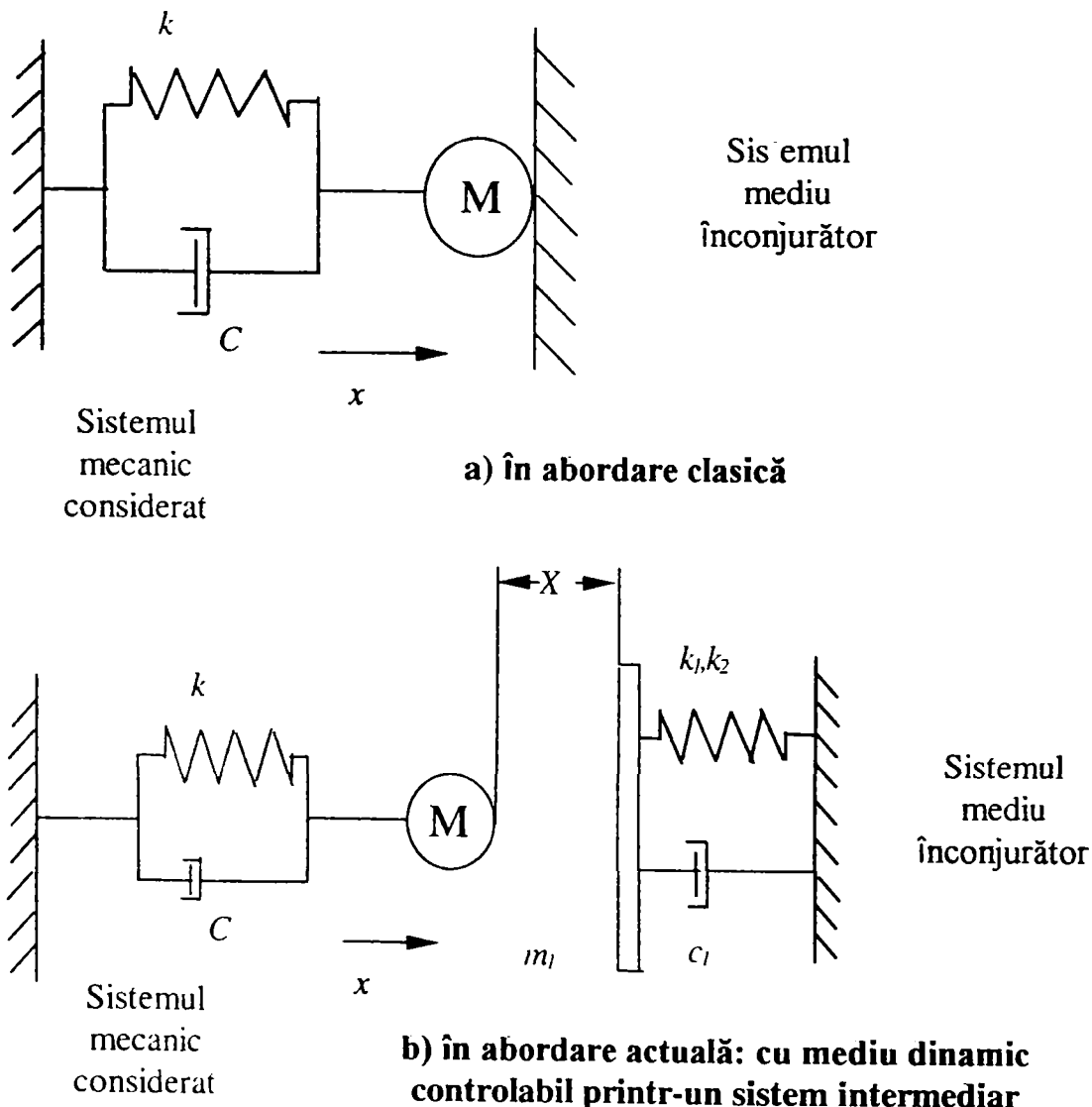


Fig. 3.16 Modelul unei interacțiuni.

Corpul vehicolului este suspendat pe cele patru roți ale sale cu așa-numitul **sistem de suspensie**, proiectat drept un sistem de interacțiune cu control activ asupra elementelor de tip arc, amortizor și sistem de acționare specializat. Se poate consulta și subcapitolul 3.5 pentru relevarea unor aspecte legate de modelarea fenomenului.

### 3.5.3 Modelul matematic al unei suspensii inteligente

Modelul dinamic drum - vehicol poate fi – similar cu cele prezentate exprimat :

$$H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = \tau + F_{\omega}(\dot{q}) \quad (3.5.1)$$

$$\underline{x}^T = [q \quad \dot{q}]^T$$

$$q = [x \quad y \quad z \quad \varphi \quad \theta \quad \varepsilon]^T \quad (3.5.2)$$

$$H(q) = \begin{vmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mh_4 & 0 \\ 0 & m & 0 & -mh_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & -mh_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_x & 0 & -I_x\theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_y & I_y\varphi \\ 0 & 0 & 0 & I_z\theta & -I_z\varphi & I_z \end{vmatrix} \quad (3.5.3)$$

$$h(q, \dot{q}) = [\hat{h}_1 \quad \hat{h}_2 \quad \hat{h}_3 \quad \hat{h}_4 \quad \hat{h}_5 \quad \hat{h}_6] \quad (3.5.4)$$

în care:

$$\begin{aligned} \hat{h}_1 &= -m\dot{y}\dot{\varepsilon} + mg\gamma \\ \hat{h}_2 &= -m\dot{x}\dot{\varepsilon} - m\dot{z}\dot{y} + mg\gamma \\ \hat{h}_3 &= -m\dot{x}(\dot{\gamma}\beta - \dot{\psi}\dot{\gamma}) + m\dot{\psi}\dot{y} + mg \\ \hat{h}_4 &= I_x\dot{\gamma} - (I_y - I_z + I_x)\dot{\theta}\dot{\varepsilon} \\ \hat{h}_5 &= I_y\dot{\gamma}\beta - I_y\dot{\gamma}\dot{\psi} + (I_x - I_y - I_z)\dot{\gamma}\dot{\varepsilon} + (I_x + I_y - I_z)\dot{\varphi}\dot{\varepsilon} \end{aligned} \quad (3.5.4')$$

$$F_{\omega} = [-K_x\dot{x}^2 \quad -K_y\dot{y}^2 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (3.5.5)$$

$$\tau = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^4 F_{Ai} \\ \sum_{i=1}^4 F_{Bi} \\ \sum_{i=1}^4 P_i \\ M_x - \theta M_z \\ M_y - \varphi M_z \\ M_z + \theta M_x - \varphi M_y \end{vmatrix} \quad (3.5.6)$$



### 3. APLICAȚII de tip "CONTACT-TASK" – stadiul actual

În ecuațiile de mai sus simbolurile care s-au folosit:  $m$ ,  $I_x$ ,  $I_y$ ,  $I_z$ , sunt masa vehicolului respectiv momentele de inerție pe direcția axelor directoare ;  $\tilde{h}_1, \tilde{h}_2, \tilde{h}_3, \tilde{h}_4, \tilde{h}_5, \tilde{h}_6$ , sunt parametri geometrici ai vehicolului ;  $\beta$  este unghiul de fugă ;  $g$  este accelerația gravitațională ;  $\psi$  unghiul vitezei vehicolului ;  $K_x, K_y$ , sunt coeficienții de rezistență a aerului ;  $M_x, M_y, M_z$ , momentele care acționează în lungul axelor centrului de gravitație a corpului vehicolului.

Forța  $P_i$ , care acționează pe direcția verticală a corpului vehicolului, poate fi formal divizată în două componente:

$$P_i = \hat{P} + P_{Di} \quad (3.5.7)$$

unde forța  $\hat{P}$ , reprezintă măsura acțiunii pasive a sistemului de suspensie, care are o funcționare neliniară pentru parametri sistemului  $\rho_i$ , deflecția sistemului de suspensie,  $e$  și amplitudinea  $x$ :

$$\hat{P}_i = f(e_i, \dot{e}_i, \ddot{e}_i, x, \rho_i) \quad \text{cu } i = 1, \dots, 4 \quad (3.5.8)$$

iar forța activă de rezistență  $P_{Di}$  din interiorul cilindrului este funcție de un coeficient de rezistență "Di" (rație) și amplitudinile  $e$  și  $x$ . Forțele longitudinale  $F_{Ai}$ ,  $F_{Bi}$  sunt forțe neliniare dependente de mai multe variabile. Aceste dependențe pot fi exprimate în forme variate iar unele dintre acestea sunt funcții complexe cunoscute, având drept parametri: forța de încărcare după direcția verticală  $P_i$ , unghiul spațial al pneurilor (roților)  $\delta_i$ , coeficientul de alunecare  $s_i$  al roților (care depinde de viteza vehicolului și de vitezele unghiulare individuale ale roților), coeficientul de frecare al cauciucului pneurilor relativ la suprafața de rulare, parametri geometrici și mecanici ai roților și de unghiul de alunecare al acestora  $\alpha_i$ , variabil în timpul mișcării, la fel ca și  $s_i$ .

Ținând cont de cele expuse, modelul poate fi exprimat într-o formă adaptată legilor sintetice de control și conducere ale vehicolului. Ecuația va deveni :

$$\tau(P_{Di}) = H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) - F_\omega(\dot{q}) - \tau(\hat{P}_i) \quad (3.5.9)$$

Acordând această ecuație cu ecuația (3.5.7), vectorul  $\tau$  se poate divide la rândul lui în două componente :  $\tau(P_D)$  și  $\tau(\hat{P})_a$ , una reprezentând vectorul rezistenței active din sistemul de suspensie, cealaltă fiind vectorul momentelor și forțelor de acționare (conducere) dependente de forțele pasive ale suspensiei.

În figura 3.17 b, este prezentat modelul funcțional al unui sistem de suspensie activ și inteligent.

Dacă se urmărește îmbunătățirea comportamentului vehicolului în timpul mersului cu viteze relativ ridicate (adică diminuarea pericolului de răsturnare sau alunecare de pe suprafața de rulare), este necesară utilizarea uneia din cele două legi de conducere, în care se regasesc cei doi vectori  $\tau(P_D)$  și  $\tau(\hat{P})$ :

$$\tau(P_{Di}) = H(q)[\ddot{q}_0 + \Pi(\Delta q, \Delta \dot{q}) + h(q, \dot{q}) - F_\omega(\dot{q}) - \tau(\hat{P}_i) \quad (3.5.10)$$

$$\tau(P_{Di}) = H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) - F_\omega(\dot{q}) - \tau(\hat{P}_i + \int_0^1 Q(\Delta \hat{P}_i) dt) \quad (3.5.11)$$

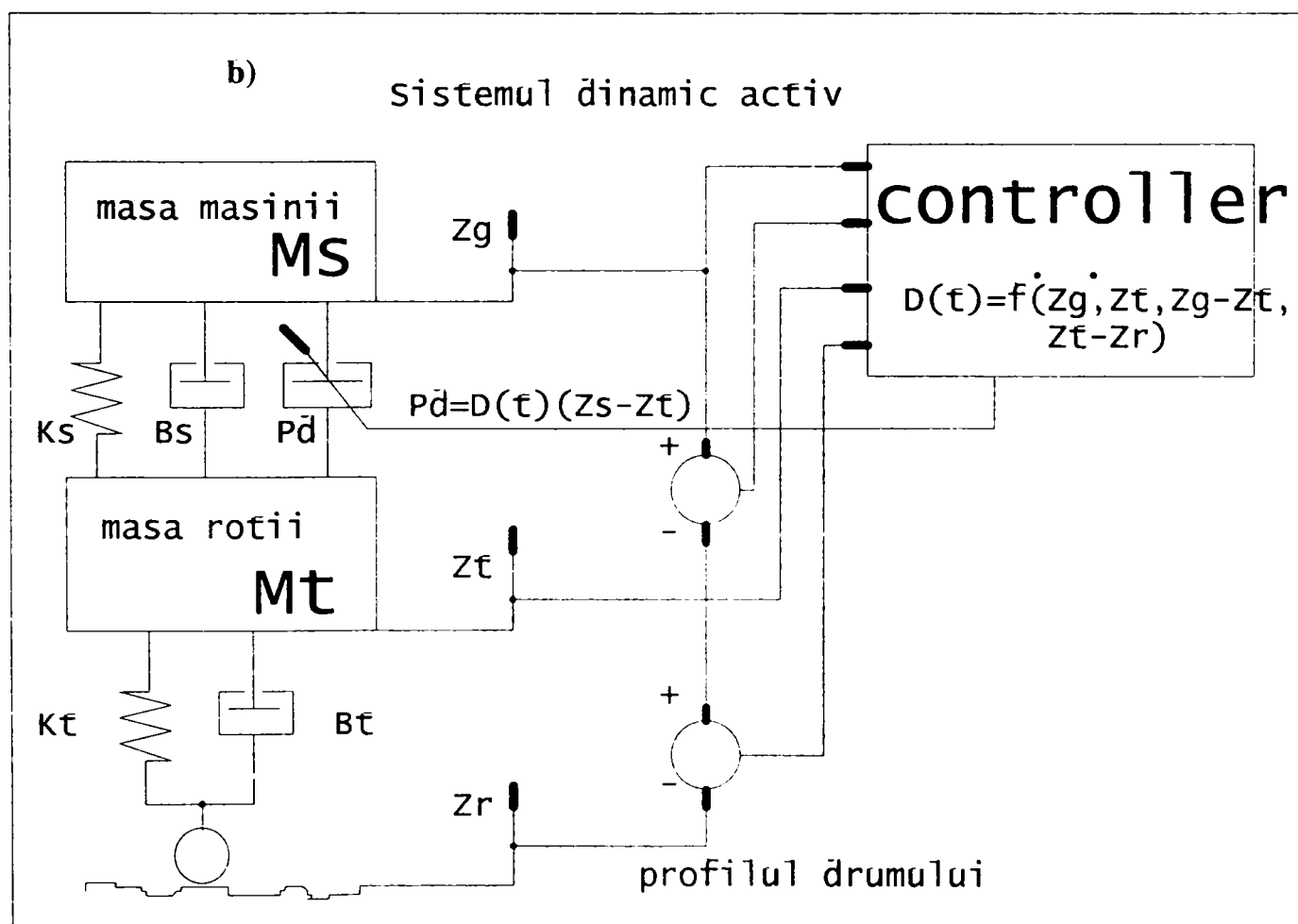
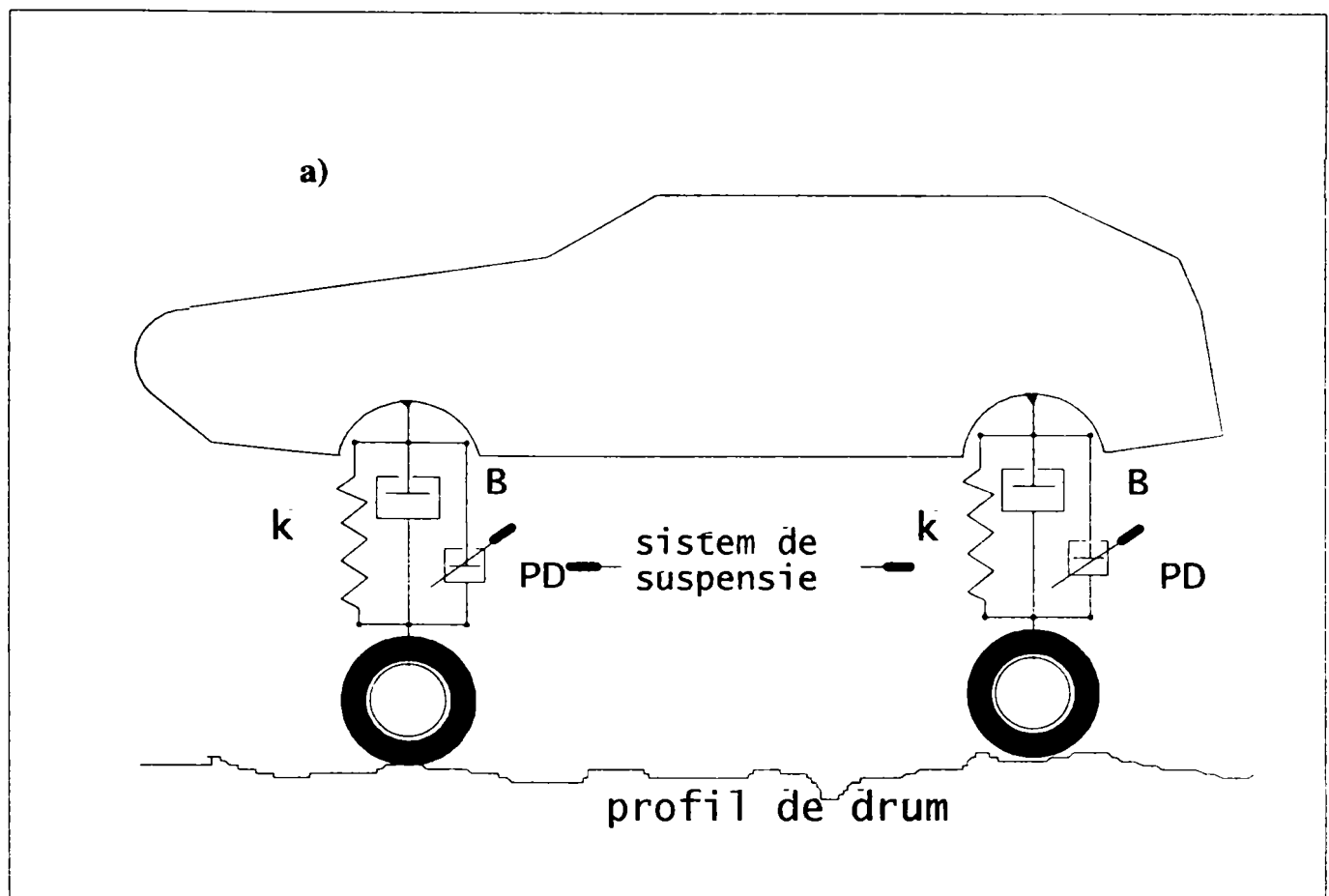


Fig. 3.17 Modelul unei suspensii inteligente

a) fizic/mecanic b) fizic/mecanic împreună cu schema sistemului de conducere/control

Legea de conducere (3.5.10) - care folosește semnalele de intrare  $\Delta q$  și  $\Delta \dot{q}$  (variațiile, abaterile mărimilor de stare de la valoarea lor nominală) - asigură stabilitatea poziției și/sau a orientării cutiei vehicolului CV. Influența forței centrifuge și a momentului corespunzător centrului de greutate CG (influență care tinde să destabilizeze vehicolul la schimbarea direcției de mers, deci a traiectoriei) este cu certitudine mai mică. Mărimile asigurate cu indexul "0" indică valoarea nominală, care desemnează comportamentul vehicolului în condiții ideale ale căii de rulare (suprafață lisă).

Ținând cont de deviațiile  $\Delta \ddot{P}$  ale forței verticale de încărcare a roților, legea (3.5.11) asigură o distribuție mai uniformă a forțelor din articulațiile suspensiei îmbunătățind indirect stabilitatea vehicolului în cazul unor perturbații sau a modificării manevrelor efectuate de către operator (șofer). Similar legilor (3.5.10) și (3.5.11), se poate deduce și legea care minimizează forțele centrifugale și inerțiale care acționează asupra vehicolului. Îmbunătățirea și completarea legilor de conducere menționate este subiectul unor cercetări viitoare.

Familiiile de procese tranzitorii sunt reprezentate de polinoamele  $\Pi$  și  $Q$  care pot avea forme variate. Este posibilă următoarea reprezentare:

$$\Pi(\Delta q, \Delta \dot{q}) = -K_P(q - q_0) - K_V(\dot{q} - \dot{q}_0) \quad (3.5.12)$$

$$Q(\Delta \ddot{P}) = -K_F(\ddot{P} - \ddot{P}_0) - K_{F1} \int_0^1 (\ddot{P} - \ddot{P}_0) \quad (3.5.13)$$

În sinteza proceselor de control/conducere, inginerul-investigator alege coeficienții polinoamelor (coeficienții de amplificare a controlului  $K_P$ ,  $K_F$ ,  $K_{F1}$ ) astfel încât să asigure un comportament dinamic prescris al sistemului. Calculând forțele indirecte de conducere,  $\tau(P_D)$  ale modelului, forțele active ale servomotoarelor  $P_{Di}$  (în toate cele patru roți) vor fi cert determinate.

## **3.6 Metoda conducerii hibride – poziție/forță - în robotică, punctul de plecare pentru abordarea modernă a aplicațiilor de tip "contact-task"; începuturi, evoluție, critici și tendințe [Vuk95c]**

### **3.6.1 Presentare generală**

Creșterea spectaculoasă a numărului de aplicații robotice avansate a mărit considerabil și interesul pentru dezvoltarea diferitelor concepte și scheme pentru conducerea mișcărilor compliante, supuse unor constrângeri. Conceptul de conducere hibridă în poziție/forță (de la apariția sa în urmă cu aproape două decenii) a fost considerat drept o metodă foarte simplă și intuitivă ce părea că oferă o posibilitate de utilizare practică. Din aceste motive, a fost adoptat de mulți cercetători. După publicarea primelor lor lucrări, fondatorii acestui concept ([Mas81], [Rai81]) nu au mai participat la evoluția sa ulterioară și la modificările acestuia. Au existat numeroase critici ale abordării conducerii roboților cu ajutorul conceptului hibrid. Acestea au fost îndreptate

în special către inconsistența sa cinematică, care este bine de luat în seamă, dar care nu relevă neajunsurile de bază ale conducerii poziție /forță.

În cele ce urmează, se prezintă o retrospectivă a dezvoltării conceptului de conducere hibridă al roboților în contact cu mediul dinamic, precum și o perspectivă asupra evoluției și direcțiilor actuale de dezvoltare. Se oferă totodată o nouă metodă, cu formulări adecvate și soluții concrete pentru o acțiune coerentă de conducere aplicabilă roboților industriali.

Conceptul conducerii hibride în robotică presupune împărțirea sarcinilor de conducere dintr-un spațiu de coordonate determinat  $\{z\}$  în două sarcini independente:

- ◇ conducerea mișcării robotului de-a lungul unei părți predeterminate a gradelor de mobilitate  $\{z\}$  (a direcțiilor de acționare)
- ◇ conducerea forței de interacțiune dintre robot și mediu de-a lungul celorlalte gradelor de mobilitate  $\{z\}$  (direcții de acționare).

### **Observații**

*Numărul acestor coordonate în ambele cazuri reprezintă numărul total al gradelor de libertate controlabile ale robotului.*

*Se presupune că există posibilitatea obținerii unor soluții non - conflictuale pentru astfel de sarcini separate ale robotului.*

*Prezentarea se bazează în cea mai mare parte pe demersul autorilor lucrării [Vuk95c]. Referințele bibliografice care apar în acest subcapitol fac parte din bibliografia acestei lucrări.*

Din punct de vedere matematic, esența conceptului conducerii hibride poate fi explicată astfel :

- se presupune că există un spațiu de coordonate  $\{z\}$  și divizarea sa într-o sumă directă de subspații  $\{x\}$  și  $\{y\}$ :  $\{z\} = \{x\} \oplus \{y\}$ ,

astfel încât modelul – cunoscut (conform și cu: 3.2.3/3.2.14) – al robotului dinamic este:

$$H(q)\ddot{q} + h(q, \dot{q}) = \tau + J^T(q)F \quad (3.6.0)$$

unde:

-  $q$  este vectorul  $n$  – dimensional al coordonatelor generalizate ale robotului iar  $H(q)$  matricea pozitivă definită de dimensiuni  $n \times n$  a mecanismului de manipulare;

-  $h(q, \dot{q})$  este funcția  $n$  - dimensională neliniară a termenilor forțelor centrifugale, Coriolis și gravitaționale;

-  $\tau$  este vectorul  $n$  – dimensional al forțelor de conducere (de la intrare);

-  $J^T(q)$  este matricea jacobiană de dimensiuni  $n \times m$  care leagă viteza efectorului terminal cu viteza generalizată a robotului;

-  $F$  este vectorul  $m$  - dimensional al forțelor generalizate, acționând asupra efectorului final dinspre mediu.

Trecând la o formă de exprimare în coordonate  $\{z\}$ , modelul devine:

$$H_z(z)\ddot{z} + h_z(z, \dot{z}) = \tau_z + F_z \quad (3.6.0')$$

fiind împărțit în două subsisteme:

---

$$U_1(x, \dot{x}, \ddot{x}) = \tau_x \quad (3.6.0'')$$

$$U_2(F_y) = \tau_y \quad (3.6.0''')$$

unde  $\tau_x = P_{\tau\{x\}}\tau_z$ ,  $\tau_y = P_{\tau\{y\}}\tau_z$ ,  $F_y = P_{\tau\{y\}}F_z$  și  $P_{\tau\{x\}}$  este operatorul proiecției ortogonale.

Apoi, controlând diferențiat gradele de libertate ale robotului, se rezolvă sarcina separată a conducerii:

- ◇ după  $\tau_x$ , a mișcării în spațiul  $\{x\}$  după modelul (3.6.0''),
- ◇ după  $\tau_y$ , a forței de interacțiune a robotului în spațiul  $\{y\}$  după (3.6.0''').

### 3.6.2 Stadiul actual al cercetărilor privind conducerea hibridă tradițională. Analiză critică.

Fundamentele conceptului de conducere hibridă au fost formulate în lucrările [Mas81], [Rai81]. Acest concept, având cel mai adesea un caracter intuitiv, este bazat pe dualitatea conducerii ținând cont de poziție și forță, ca și de ortogonalitatea subspațiilor posibile de situare și de forța de reacție a robotului în contact cu mediul (adesea desemnate drept subspații de libertate și subspații de constrângere). În lucrarea [Mas81], contactul robotului cu mediul este modelat cu ajutorul așa-numitelor suprafețe  $C$ , care permit doar libertate pozițională parțială. Mișcarea poate fi realizată de-a lungul tangențelor la suprafețele  $C$ , în timp ce forțele de reacție apar de-a lungul normalelor la suprafețele  $C$ . Autorul folosește termenul de “constrângeri naturale” pentru suprafețele  $C$ , în timp ce în mecanică acestea sunt de obicei considerate drept subiect de mișcare pentru conexiuni ideale. În lucrarea [Rai81] a fost propusă o organizare conceptuală a controler-ului hibrid (menționat ca o “schemă” de conducere hibridă) cu o matrice de selectivitate ca element de bază, care corespunde spațiilor de libertate și de constrângere, în timp ce în exemplul prezentat - al unui robot cu două grade de mobilitate - a fost descrisă o structură detaliată a controler-ului. Se subliniază faptul că în aceste prime lucrări teoria conducerii hibride nici măcar nu a fost explicit formulată. Este interesant de remarcat deasemenea că deja cea de-a doua lucrare, în care conceptul a fost și verificat, au fost menționate problemele comportamentului neadecvat al robotului în timpul contactului, astfel încât fondatorii conducerii hibride au introdus operațiunea de conducere a forței nominale și au încercat să rezolve problema stabilității forțelor de contact, folosind o procedură – numită *ad hoc* - explicată în continuare.

Deoarece în bucla de forță nu au fost folosite informații asupra modificării forței de contact, amortizarea a fost realizată integral pe cale mecanică. Deoarece frecarea Coulomb domină, rezultă o viteză a robotului crescută prin reducerea amortizării efective. Pentru a compensa acest efect, a fost inclusă o neliniaritate de saturație, care reduce amplificarea “integrală” (este efectivă pentru valori mari ale erorii în forță). Această măsură a condus la creșterea stabilității controler-ului, în ciuda interacțiunilor dintre forța de frecare Coulomb și amplificarea “integrală”. Fără acest termen, sistemul era stabil doar când era supraamortizat. În prezența acestuia a fost obținut un răspuns amortizat critic aproximativ.

În lucrările de cercetare [Vuk93b], [Vuk94c] au fost menționate multe rezultate din domeniul conducerii hibride, dar în absența unei teorii solide privind acest tip de conducere, au existat alte lucrări care au făcut mari eforturi pentru a clarifica problema conducerii hibride din mai multe puncte de vedere, care priveau:

- ◇ cinematica, geometria și algebra liniară;
- ◇ stabilitatea forțelor de mișcare și contact;
- ◇ introducerea modelului dinamic al robotului.

În analiza formulării inițiale a conducerii hibride definită în lucrările fondatorilor conceptului, autorii lucrării [Wes85] sunt de părere că din punct de vedere al realizării practice schema propusă nu este cea mai potrivită. Ei afirmă că dificultatea în proiectarea unui controler hibrid apare atunci când matricea de selecție  $S$ , care este folosită pentru a separa poziția și direcțiile controlabile ale forței nu poate fi obținută simplu, prin cercetare. Dacă constrângerea mișcării se datorează contactului dintre robot și mediu într-un alt punct decât cel al efectorului final, atunci constrângerea efectivă asupra mișcării efectorului final nu este o constantă, ci este funcție de poziția robotului. De aceea, matricea de selecție  $S$  trebuie recalculată pentru fiecare poziție a brațului. Mason a arătat în [Mas81] cum poate fi calculată constrângerea efectivă la capătul fiecărui efector final al fiecărui robot în cazul unui exemplu simplu, plan, a doi roboți care apucă un obiect, dar, în general, aceasta este o procedură complicată și *ad hoc*. Se constată că problema se complică și mai mult dacă robotul are 6 grade de libertate.

O reformulare a conducerii hibride prin intermediul spațiului "articular" a fost dată în lucrarea [Wes85], cu scopul rezolvării problemelor practice într-un mod mai ușor și totodată, au fost introduse matricile de proiecție ortogonală (denumite filtre), care sunt echivalente, în coordonate externe, matricii de selecție. A fost considerată următoarea presupunere: contactul robotului cu mediul se reduce la un lanț cinematic închis, care poate fi modelat cu ajutorul cuplelor cinematice inferioare.

Ipoteza dualității dintre poziție și forțele de contact pune semnul egalității între modelul robotului în contact și modelul unui mecanism proiectat în special pentru a da posibilitatea unei flexibilități a ghidajului, pentru a reduce frecarea, mersul în gol și efectele dinamice la cuplarea a două sisteme. Se subliniază că în foarte multe aplicații practice acest lucru constituie o idealizare inacceptabilă, dacă ținem seama de condițiile reale, de exemplu în cazul prelucrării metalelor.

În lucrarea [Lip85], dedicată aplicațiilor "contact-task", situațiile posibile și forțele de contact sunt analizate din punctul de vedere al cinematicii instantanee. Autorii introduc de asemenea și descompunerea spațiului în subspații de libertate și de constrângere, bazându-se pe noțiunea "reciprocității șuruburilor". Ei au evidențiat faptul că, de fapt, această descompunere a fost descrisă încă în lucrarea [Mas81], în care distribuțiile controlate și necontrolate ale spațiului sunt descrise fiecare în parte, drept constrângeri artificiale și naturale atât pentru forțe cât și pentru poziții/viteze. Mason evidențiază o metodologie de sintetizare a strategiei de conducere hibridă care depinde de un model predeterminat al mediului aplicației. Utilizând două grade de libertate ale robotului, în a doua lucrare menționată, Raibert și Craig au implementat experimental o asemenea conducere hibridă și au dezbătut aspectele realizării sale practice.

În același timp, lucrarea [Yos86] subliniază faptul că dinamica sistemului trebuie să constituie baza sintetizării conducerii în cazul aplicațiilor de tip "contact-task". Autorul apreciază că din punct de vedere conceptual, metoda conducerii hibride este mult mai clară decât cele premergătoare (părând că se poate pune în practică mult mai ușor). Dar, în această abordare, tocmai datorită faptului că dinamica robotului nu a fost riguros luată în considerare, nu s-a demonstrat că prin intermediul conducerii hibride poziția dorită și traiectoriile forței pot fi obținute simultan. Yoshikawa afirmă că Mason a făcut un studiu extins asupra constrângerilor aplicației. Dar, chiar dacă formularea sa se potrivește studiului cinematic, nu este relevantă pentru tratarea dinamicii mișcării constrânse a robotilor.

În aceeași lucrare ([Yos86]) sunt date ecuațiile dinamicii bazate pe conducerea hibridă, în structura sistemului care o asigură fiind prevăzut un servo-compensator.

În lucrarea [Kha86] autorii se ocupă mai în amănunt de problema soluționării stabilității conducerii hibride, care fusese remarcată deja de fondatorii conceptului de conducere în timpul aplicațiilor practice efectuate de aceștia conform lucrării [Rai81]. Cu scopul definirii unui spațiu operațional, în [Kha86], [Kha87] se tratează un model de robot complet, care păstrează toate atributele conducerii hibride tradiționale. Este propus un controler neliniar bazat pe procedura de conducere neliniară de decuplare, care garantează stabilitatea mișcării, dacă modelul sistemului dinamic este suficient de clar. Stabilitatea forței de interacțiune nu este asigurată în mod necesar, devreme ce formularea spațiului operațional nu ține seama de modelul mediului dinamic. Cu scopul de a obține amortizarea oscilațiilor forței de contact, a fost introdus un termen de amortizare care ține seama de diferențiala forței de contact (sau echivalent, care ține seama de viteza din subspațiile constrânse).

Lucrările menționate arată că, pentru prima dată, importanța dinamicii mediului, neglijată complet sau considerată nesemnificativă în lucrările anterioare, a fost luată mult mai în serios atunci când s-a analizat problema stabilității. Din câte se cunoaște, nu au mai fost făcute încercări pentru a aplica această idee și pentru a o dezvolta mai departe în cadrul conducerii hibride. Autorii lucrării [Kha86] s-au confruntat cu aceeași problemă a stabilității forțelor de contact în momentul verificării experimentale, (la fel ca și Raibert și Craig). Ei afirmă că în legătură cu structura complexă de încovoiere folosită în articulațiile carpiene, prezența unei mase mari duce la vibrații complexe, cu amplitudine semnificativă, care nu pot fi modelate printr-un sistem masă/arc simplu (dacă la nivelul efectorului final decuplat, se utilizează un model elastic simplu pentru a defini vectorul de comandă al conducerii forței active).

Modelele simple sunt doar aproximări ale mișcării reale a robotului în timpul operațiunii controlate prin forță. Flexibilitatea și neliniaritatea din legăturile robotului, sistemele de acționare din cuplele cinematice conducătoare, dispozitivele de prindere ale efectorului final și din senzorii de forță vor contribui la suplimentarea flexibilității și a modurilor de oscilație ale sistemului. Aceste oscilații nemodelate limitează nivelul de performanță care poate fi obținut cu sistemul de conducere bazat pe o modelare simplificată.

Se poate concluziona că problema stabilității robotului în schema de conducere hibridă rămâne unul din punctele sensibile ale conceptului. Autorii lucrării [AnC87] au dat o formulare hotărâtoare în acest sens, prin introducerea noțiunii de "stabilitate cinematică", care diferă de cea dată de predecesori. Ei afirmă că instabilitățile cinematice sunt dependente într-un grad ridicat de geometria robotului. Deasemenea că, controler-ul hibrid creat de Raibert și Craig dă naștere unui sistem instabil atunci când este implementat pe un robot cu cuple de rotație.

Această concluzie s-a obținut prin generalizarea analizei robotului cu 2 grade de libertate. Exemplul a arătat că schema hibridă nu garantează stabilitatea sistemului. Autorul lucrării [Zha89] a ajuns la o concluzie similară printr-o abordare diferită.

În lucrarea [McC88] fundamentarea teoretică a conducerii hibride este prezentată matematic, ceea ce probabil au dorit să obțină și fondatorii conceptului. Autorii lucrării, care oferă o analiză completă a stabilității atunci când consideră aplicațiile de contact, precizează că deși au existat diferite abordări formale ale conducerii precum și descrieri ale experimentelor, demersul prezentat în lucrare poate fi considerat o premieră privind un cadru teoretic care ar putea servi drept bază de studiu a performanțelor robotului cu sarcini constrânse.

Prezentând modelul robotului în contact drept un sistem mecanic supus unor



constrângeri rigide, absolute, ideale, olonome, autorii mai precizează că modelul cu constrângeri studiat în lucrare poate, de asemenea constitui baza pentru o analiză riguroasă a proprietăților buclei închise de reglare care rezultă din utilizarea diferitelor abordări ale conducerii descrise în literatura de specialitate.

La fel ca și în lucrarea [Lip85], în lucrarea [McC88] descompunerea spațiului în subspații libere și constrânse a fost realizată fără folosirea ortogonalității ca o condiție necesară.

În subcapitolul 3.7.4 se arată că prin alegerea unui cadru de aplicație adecvat și a unor constrângeri corespunzătoare, descompunerea într-un caz particular se reduce la abordarea prezentată în lucrarea [Mas81], pe baza căreia autorii lucrării [Rai81] au propus schema de conducere hibridă. În lucrarea [McC88] sunt de asemenea propuse: un controler de cuplu (moment de torsiune) computerizat, modificat, care garantează stabilitatea globală a sistemului și un controler linear, care asigură stabilitatea locală. Referindu-se la controler-ul propus, autorul subliniază că acesta poate fi considerat ca o generalizare a schemei hibride fără matricea de selectivitate introdusă în mod explicit. Rezultatele lucrării [McC88] reprezintă cadrul cel mai larg în care conceptul de conducere hibridă (așa cum a fost definit în lucrările fondatorilor) poate fi teoretic aplicat. Și anume, autorul lucrării demonstrează că sistemul în buclă închisă (robot în contact) este stabil chiar și fără răspunsul în forță, folosind doar termenul de reacție pozitivă. Autorii au introdus răspunsul în forță doar pentru robustețea conducerii.

Această concluzie este practic în contradicție cu rezultatele obținute de cercetătorii care, în pofida introducerii buclelor închise ale forței ([Rai81]) sau al introducerii derivatei forței ([Kha86]) au înregistrat problema instabilității forței în faza de contact (a se vedea și prezentarea – in extenso – a acestei probleme în subcapitolul 3.7.5 în viziunea altor cercetători, cu referire asupra fazei de impact).

Lipsa unei teorii solide în faza de început a dus la implementarea unor controlere cu performanțe scăzute. Acest lucru a motivat, probabil, autorii lucrării [Lip85] să propună o studiere amănunțită a aspectelor cinematice ale conducerii hibride, bazată pe o "strălucită interpretare matematică cu implicații practice clare" (apreciere din [Vuk95c]). Propunând filtrul cinetostatic în locul matricei de proiecție ortogonale (filtru ortogonal), autorii lucrării [Lip88] subliniază faptul că ortogonalitatea, ca presupunere de bază în lucrările [Mas81], [Rai81], [Wes85] este inacceptabilă atât din punct de vedere teoretic, cât și practic.

În această lucrare se pare că este conținută o primă analiză istorico-faptică a teoriei conducerii hibride relevându-se că:

- primele cercetări i se datorează lui Mason ([Mas81], [Mas78], [Mas79]);
- primele verificări experimentale au fost efectuate de Craig și Raibert ([Rai81], [Cra79]);
- generalizări ale teoriei au fost formulate de West și Āsada ([Wes85a], [Wes85b]); folosind pseudoinvertori și matrici de proiecție, bazate pe metode invariabile, și de Lipkin și Duffy ([Lip85]), folosind formulări invariabile.

Prin acestea, s-a relevat că abordările anterioare non-invariabile s-au bazat pe identificarea eronată a "ortogonalității". Din această cauză, formularea care a rezultat pentru conducerea hibridă nu este nici invariabilă față de translația originii și nici invariabilă la schimbarea lungimii unităților (modulelor). Este susținută o abordare similară, prin care – în parte - conducerea hibridă este considerată drept un filtru cinetostatic prin care torsorii cinematic și cel al forței generalizate de contact (urmează a se explicita cele două noțiuni) sunt modificați pentru a asigura corespondența cu modelul cinetostatic al mediului. Prezentarea în această lucrare a evoluției filtrelor cinetostatice satisface toate cele trei proprietăți invariabile necesare.

O notă “cu totul aparte” (apreciere din [Vuk95c]) este prezentă în lucrarea [Duf90] care atacă – pentru prima dată - substanțial conducerea hibridă bazată pe modelarea aplicațiilor cu mișcări constrânse, operațiile de apucare și calibrare a roboților folosind “complemente ortogonale” într-o formă sau alta. Mai mult, se afirmă chiar că – dat fiind faptul că baza acestor lucrări este eronată – toată teoria este eronată, “cu excepția celor în care apare un rezultat corect datorită simplității sau simetriei problemei; în aceste cazuri lucrările devin în mod periculos eronate” (!).

Concluzia rezultată ar fi că teoria modernă asupra conducerii hibride bazată pe definirea ortogonalității prezentată mai sus ca eronată este complet lipsită de sens, atât din punct de vedere al practicii, cât și din cel al geometriei. De aceea, când se folosește o asemenea teorie pentru a determina dacă două mișcări instantanee date sunt “ortogonale” rezultă:

- ◇ inconsistență dimensională;
- ◇ dependența de alegerea unităților de măsură;
- ◇ dependența de alegerea originii coordonatelor.

În [Vuk95c] se afirmă că această lucrare supraestimează importanța ortogonalității, deoarece chiar dacă creatorii conceptului de conducere hibridă și-au bazat schema de conducere pe ortogonalitatea geometrică, trebuie remarcat că ortogonalitatea este doar o posibilă interpretare matematică a constrângerilor ideale.

În acest context, autorii lucrării [Abb90] consideră estimarea conceptului de conducere hibridă dată de autorii lucrării [Lip88] mult prea exclusivă. Ei accentuează faptul că Lipkin și Duffy în [Lip85] au reconsiderat în mod sistematic punctul de vedere asupra acestui subiect, comutându-l de la geometrie la teoria momentelor (lansată încă în [Bal900] și dezvoltată în [Hun78]) substituind conceptul “ortogonalității” cu unul mai potrivit de “reciprocitate” între subspațiile “controlate” prin tursorul cinematic al șurubului echivalent, respectiv prin tursorul forțelor generalizate al acestuia conform cu relațiile (3.6.35') și (3.6.35'') de la subcapitolul 3.6.4.

Un rezultat relevant al lucrării lor este acela că matricile de selecție sunt înlocuite de un filtru cinetostatic prin intermediul căruia evoluția dinamică este modificată pentru a se asigura compatibilitatea cu modelul cinetostatic al mediului.

Este recunoscut la ora aceasta meritul acestor cercetători privind constatarea că evaluările anterioare nu sunt invariabile la translațiile euclidiene și la modificările lungimilor din cadrul unităților (modulelor), ceea ce duce la specificații incomplete ale aplicației în schema hibridă. Se relevă însă în [Abb90] că există și un neajuns: acela că filtrul lui Lipkin și Duffy poate fi aplicat atunci când este posibilă definirea unui spațiu cu 6 dimensiuni corespunzător, obținut prin combinarea “tursorilor cinematici” de libertate și o transformare corespunzătoare a “tursorului forței generalizate” a constrângerilor (a se vedea considerațiile de la subcapitolele următoare referitoare la Propoziția S1). Cercetări ulterioare ale aceluiași autori bazate pe subspații izotropice arată aplicabilitatea tehnicii de filtrare cazurilor în care “spațiul forțelor” este 5-dimensional, în timp ce cazurile 3-dimensional și 4-dimensional mai trebuie cercetate.

Concluzia lucrării [Abb90] este că [Lip85] prezintă o analiză sistematică a performanțelor filtrului lui Mason, cât și a performanțelor filtrului cinetostatic, dar, din păcate, din această analiză rezultă că, acele caracteristici invariabile ale primei abordări pot duce la o filtrare necorespunzătoare în ORICE situație posibilă, în timp ce cazurile în care spațiile sus – menționate, de răsucire și de încovoiere nu degenerază (și, de aceea, teoria lui Lipkin și a lui Duffy poate fi aplicată) coboară la mai puțin de 50%. Ca o consecință a acelei analize, este propusă o nouă metodă de filtrare cinetostatică. Acest filtru constă în filtrul lui Mason modificat corespunzător, cu scopul de a satisface

explicit condițiile de invarianță menționate de Lipkin și Duffy.

Pe de altă parte, se susține că autorii lucrărilor [Lip88] și [Duf90] au avut dreptate atunci când au subliniat incorecta încorporare a ortogonalității în baza conducerii hibride de către Mason ([Mas81]).

În ciuda remarcilor discutabile de aplicabilitate a tehnicii de filtrare cinetostatică propusă în [Lip88], lucrarea [Kha87] a dovedit că, prin simpla încorporare a matricii de transformare și a filtrului ortogonal într-o schemă de conducere hibridă, non-invarianța cauzată de modificarea sistemului de coordonate este evitată.

Mai departe, așa cum s-a arătat în lucrarea [Abb90], invarianța la schimbarea unităților de măsură din lucrarea [Mas81] a fost obținută prin scalarea coordonatelor mișcării de revoluție și a forțelor. Singura remarcă din lucrarea [Duf90] careia nu i s-a dat răspuns în lucrarea [Abb90] este cea referitoare la interpretarea geometrică și fizică. Pornind de la abordarea din lucrările lui Lipkin și Duffy, autorul lucrării [Gol93] susține că metoda de conducere hibridă conform lucrării [Rai81] este definită clar atunci când se discută în contextul variabilelor de mișcare ale spațiului  $R^3$ . Pentru aplicații mai complexe, incluzând mișcarea lineară și unghiulară, ideea fundamentală, ortogonalitatea subspațiilor de libertate și constrângere nu mai este valabilă.

Se remarcă aici și faptul că în timp ce metodele bazate pe ortogonalitate și reciprocitate sunt echivalente într-un sistem particular de referință, doar metodele bazate pe reciprocitate sunt invariante la transformările de coordonate. De aceea, relațiile bazate pe reciprocitate generală se reduc la relații ortogonale echivalente doar în cazul sistemelor particulare de referință. Astfel autorul lucrării [Gol93] este de acord cu autorii lucrării [Abb90], care au folosit această proprietate pentru proiectarea filtrului invariant ortogonal.

De aici rezultă că dacă ceva este greșit în postulatele de bază ale conducerii hibride, atunci răspunsul la întrebarea referitoare la corectitudinea schemei hibride nu poate fi găsit în anvergura polemicii dintre promotorii conceptului ortogonal și al celui reciproc.

În [Vuk94c] se apreciază că rămâne fără răspuns întrebarea dacă cei care au studiat cinematica, fiind promotorii ai conducerii hibride, orientați critic, au acceptat provocarea făcută de autorii lucrărilor [AnC87], [Zha89] în efortul de a găsi un răspuns sau au ignorat pur și simplu aspectul de stabilitate, considerându-l neesențial.

Răspunsul, vine de la promotorii conceptului ortogonal. În lucrarea [Fis92] se afirmă că An și Hollerbach, în lucrarea [AnC87], au dovedit că metodele de control a forței acceptate, care include și conducerea hibridă, sunt instabile. Zhang, în lucrarea [Zha89], a arătat că schema de conducere hibridă poate deveni instabilă în anumite configurații ale robotilor cu cuple de rotație.

Lucrarea [Fis92] examinează mai îndeaproape supoziția că metoda de conducere hibridă este instabilă cinematic. *Se arată însă că problema instabilității cinematice atribuite conducerii hibride nu este fundamentală, așa cum se conchide în lucrările publicate menționate anterior, ci este în mod fundamental rezultatul unei formulări și implementări incorecte a schemei de conducere hibride.* Dealtfel, se recunoaște explicit intenția autorilor de a reinstaura schema de conducere hibridă ca o abordare solidă, stabilă și robustă a conducerii robotului.

Se prezintă apoi modul în care printr-o proiectare/concepție adecvată a matricii de proiecție în spațiul comun, problema descoperită în lucrarea [AnC87], poate fi eliminată. Este interesant de remarcat că s-a folosit un filtru ortogonal, ceea ce a condus la concluzia că autorii, în dezbaterile non-invarianței au super-simplificat considerațiile, neluând în seamă stabilitatea sistemului ca o proprietate relevantă, cu un înțeles fizic pentru conducerea hibridă. *Mai departe, în aceeași lucrare [Fis92], criteriul intuitiv de*

*stabilitate cinematică este propus fără a avea o dovadă riguroasă, confirmând că stabilitatea problemei rămâne deschisă.*

### 3.6.3 Concluzii asupra "schemelor" de conducere hibridă

Problemele relevante ale conducerii hibride într-o formă sintetică trebuie să armonizeze punctele de vedere ale ortogonalității, reciprocității și stabilității. Dificultățile întâmpinate în rezolvarea problemei stabilizării simultane a mișcării programate și a forței de interacțiune programate/preconizate a robotului în interacțiune cu mediul, au constituit probabil motivul pentru introducerea unei idei simplificate de despărțire a sarcinii în: conducerea mișcării independente și conducerea forței de interacțiune.

Pe lângă interpretarea matematică a esenței conducerii hibride, relevată la începutul analizei, trebuie punctate câteva trăsături negative ale acestui tip de conducere, cu care s-a realizat, în fapt, decuplarea conducerii care ține seama de poziție și forță.

Pe lângă această decuplare inacceptabilă a conducerii, un dezavantaj semnificativ al conducerii explicite prin forță este pus în legătură cu cerințele contradictorii privind subsarcinile conducerii poziție și forței. *Pe de o parte, conducerea prin poziție necesită o relativ ridicată rigiditate a servosistemelor din articulațiile robotului. Pe de altă parte, conducerea prin forță necesită o relativ scăzută rigiditate a robotului, cu scopul de a se asigura că efectorul final se comportă "compliant" cu mediul.*

Cu scopul de a evita unele neajunsuri prezentate ale schemei clasice de conducere hibridă, a fost propusă în lucrările [Map87] și [Shu88] așa numita schemă de conducere a forței implicite. Acest concept de conducere este bazat pe identificarea rigidității contactului (amortizare) folosind informațiile date de senzorul forței și *pe calculul poziției (vitezei) echivalente cu cea corespunzătoare forței dorite.* Avantajul principal al acestei scheme este siguranța și robustețea. Oricum, această schemă are și ea dezavantaje. Problema principală a schemei rezidă din identificarea caracteristicilor forței de contact. Această schemă are un răspuns relativ întârziat la perturbațiile forței. Performanța conducerii forței este limitată semnificativ de lărgimea benzii controlerului de poziție.

Ca o consecință logică, în lucrările [Sto90] și [Sto91] a fost propusă schema de conducere a forței implicite/explicite, o combinație a celor două scheme pentru a include avantajele acestora. Avantajele schemei de conducere implicite sunt incluse în mod natural pe când scopul introducerii răspunsului forței explicite este de a :

- a) îmbunătăți obținerea forței dorite;
- b) mări viteza de răspuns a sistemului la perturbația forței;
- c) corecta eroarea în identificarea caracteristicilor forței de contact;
- d) face sistemul mai robust la erorile de estimare a parametrilor sistemului necunoscut.

În baza analizei cercetărilor din domeniu, M. Vukobratović cu colaboratorii R. Stojić și Y. Ekalo au propus în lucrările [Vuk93a], [Vuk95b] și [Vuk94a] o nouă abordare pentru soluționarea acestei probleme de mare complexitate, prin adoptarea dinamicii mediului și rezolvarea simultană a sarcinii de stabilitate atât pentru poziție cât și pentru forța de contact cu mediul înconjurător. Pe baza unui sistem de control al stabilității în buclă închisă, legile de conducere utilizează reacția inversă atât pentru poziție cât și pentru forță, concomitent cu controlul calității răspunsurilor celor doi

parametri. Problema este deplin rezolvată în condițiile impunerii - *a priori* – a unui set de constrângeri asupra mișcării robotului și a forței de interacțiune a acestuia cu mediul înconjurător. S-au obținut astfel suficiente condiții pentru stabilizarea mișcării preconizate a robotului și a forței preconizate de interacțiune în condițiile unor perturbații externe și a erorilor date de senzorii de forță și traductoarele de poziție ([Eka94c], [Eka93]). Au fost deasemenea sintetizate și legi de conducere robuste pentru stabilizarea poziției și forței ([Eka94a], [Eka94c]). Această viziune este prezentată – in extenso – în subcapitolele 3.1 – 3.5.

### 3.6.4 Conceptele de stabilitate, reciprocitate și ortogonalitate în conducerea hibridă, pași spre abordarea modernă a aplicațiilor de tip “contact-task”

Mai întâi trebuie reamintită abordarea teoretică a conducerii hibride din punctul de vedere mecanic și din cel al conducerii propriu-zise.

De fapt, datorită lipsei unei teorii riguroase a conducerii hibride, s-a încercat o reformulare a regulilor de bază, ca o consecință a premizelor fundamentale, precum și dispunerea într-un cadru de lucru comun a diferitelor abordări pentru a se constitui drept bază a unor dezbateri privitoare la relația dintre teorie și aplicațiile practice.

În toate lucrările dedicate conducerii hibride ([Abb90], [AnC87], [Duf90], [Gol93], [Lip85], [Lip88], [McC88], [Mas78], [Mas79], [Mas81], [Rai81], [Wes85a], [Wes85b], [Yos86], [Zha89]) cu excepția lucrărilor [Kha86] și [Kha87], presupunerea că robotul în contact poate fi reprezentat suficient de exact printr-un model de sistem mecanic supus la constrângeri ideale a fost introdusă implicit și explicit.

Pentru definirea conceptelor necesare, se vor introduce relațiile matematice necesare, valabile pentru modelul mecanic. În vederea simplificării derivărilor, se presupune că, în primul rând, constrângerile sistemului sunt staționare. În al doilea rând, că toți vectorii sunt situați în regiuni cu frontiere “deschise” ale spațiului corespondent. Funcțiile folosite admit inverse fiind continuu diferențiabile și toate transformările coordonatelor sunt dublu continuu diferențiabile.

Considerând un robot cu  $n$  grade de mobilitate, a cărui mișcare, datorită contactului cu mediul este constrânsă de conexiuni reprezentate de  $m$  ecuații algebrice, comportamentul robotului este descris de ecuațiile lui Lagrange de ordinul întâi:

$$H(q) \ddot{q} + h(q, \dot{q}) = \tau + F \quad (3.6.1)$$

unde  $q \in R^n$  este vectorul coordonatelor generalizate ale robotului,

$-\tau \in R^n$  este vectorul forțelor conducerii generalizat și

$-F \in R^n$  este vectorul forțelor de reacție generalizate.

Condiția de constrângere poate fi descrisă de ecuația :

$$\Phi(q) = 0 \quad (3.6.2)$$

unde funcția  $\Phi : R^n \rightarrow R^m$  este continuu diferențiabilă și :

$$\text{rang} \frac{\partial \Phi}{\partial q}(q) = m \quad (3.6.3)$$

Ecuția (3.6.2) poate fi interpretată ca o hipersuprafață în  $R^n$  căreia punctul corespunzător vectorului  $q$  trebuie să îi aparțină. Datorită constrângerilor independente  $m$ , hipersuprafața (3.6.2) este  $e$  – dimensională, unde  $e=n-m$ . Menționez că s-au păstrat notațiile din sursa bibliografică pentru variabilele similare (referite însă cu alte notații la subcapitolul 3.2).

Prin diferențierea ecuației (3.6.2) în raport cu timpul se obține:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial q}(q) \dot{q} = 0 \quad (3.6.4)$$

Deoarece sunt presupuse constrângeri ideale, lucrul mecanic virtual al forțelor în contact (reacțiile la constrângeri) este egal cu zero pe deplasările permise de constrângeri, adică:

$$F^T \delta q = 0 \quad (3.6.5)$$

După cum este cunoscut, deplasările virtuale satisfac relația :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial q}(q) \delta q = 0 \quad (3.6.6)$$

Introducând multiplicatorul Lagrange  $F \in R^m$  și înmulțind relația (3.6.6) cu  $F$  se obține:

$$F^T \frac{\partial \Phi}{\partial q}(q) \delta q = 0 \quad (3.6.7)$$

Pentru ca relațiile (3.6.5) și (3.6.7) să fie compatibile este necesar ca:

$$F^T = F^T \frac{\partial \Phi}{\partial q}(q) \delta q \quad (3.6.8)$$

Relația reprezintă forțele de reacție (posibile) la contact care aparțin spațiului  $m$  – dimensional, obținut când  $F \in R^m$  ia valori arbitrare.

Mișcarea sistemului observat poate fi descrisă de ecuațiile Lagrange de ordinul doi. Hipersuprafața determinată de relația (3.6.2) poate fi reprezentată în formă parametrică prin introducerea vectorului parametrilor  $q_e \in R^e$  și funcția  $\Lambda$ , astfel încât :

$$q = \Lambda(q_e) \quad (3.6.9)$$

$$\text{rang} \frac{\partial \Lambda}{\partial q}(q) = m \quad (3.6.10)$$

$$\Phi(\Lambda(q_e)) = 0 \quad (3.6.11)$$

Deoarece  $q_e$  determină complet configurația sistemului mecanic observat, poate fi folosit drept identificator al coordonatelor generalizate. Coordonatele generalizate  $q$

și vitezele generalizate  $\dot{q}_e$  determină complet funcția Lagrange în timp ce rezultanta forțelor de reacție a posibilelor deplasări  $\delta q$  este egală cu zero. Dacă  $\tau_e$  reprezintă vectorul forței active exprimate în coordonate noi date de relația:

$$\tau_e^T = \tau^T \frac{\partial \Lambda}{\partial q}(q_e) \quad (3.6.12)$$

atunci ecuațiile Lagrange de ordinul doi devin :

$$H_e(q_e) \ddot{q}_e + h_e(q_e, \dot{q}_e) = \tau_e \quad (3.6.13)$$

În acest fel mișcarea sistemului observat care este unic determinat pentru forțele de conducere date de condițiile inițiale (coordonate generale și viteze) poate fi descris de ecuațiile Lagrange de ordinul întâi (3.6.1), (3.6.2), (3.6.8) sau de ecuațiile Lagrange de ordinul doi (3.6.13) care, considerând relațiile (3.6.9), (3.6.11) sunt echivalente cu cea de dinainte.

Se demonstrează în continuare că Propoziția S1 este adevărată.

**Propoziția S1**

*Există o transformare de coordonate care descompune spațiul de configurație al sistemul dat într-un subspațiu de libertate  $e$  – dimensional, în care deplasările sunt posibile, dar reacțiunile forței nu sunt posibile, și subspațiul de constrângere  $m$  – dimensional în care reacțiunile forței sunt posibile, pe când deplasările sunt prohibite.*

Deoarece matricea  $\frac{\partial \Phi}{\partial q}(q)$  are rangul  $m$  atunci conform (3.6.3) subvectorul  $q_2$  al vectorului  $q$  există (considerând posibilitatea reordonării variabilelor):

$$q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} \text{ și } \text{rang } \frac{\partial \Phi}{\partial q_2} = m \quad (3.6.14)$$

Ăceasta permite ecuației (3.6.2) să fie rezolvată considerând  $q_2$  o funcție continuă și diferențiabilă a lui  $q_1$ :

$$q_2 = \theta(q_1) \quad (3.6.15)$$

Introducând noile coordonate generalizate  $\tilde{q} = \begin{bmatrix} q_e \\ q_m \end{bmatrix}$  și pe baza celor expuse prin relația (3.6.12):

$$q_e = q_1 \quad (3.6.16)$$

$$q_m = q_2 - \theta(q_1) \quad (3.6.17)$$

Cu aceste coordonate generalizate, ecuația (3.6.2) devine:

$$q_m = 0 \quad (3.6.18)$$

care rezultă direct din relațiile (3.6.2), (3.6.15), (3.6.17). Deoarece (3.6.18) este

satisfăcută la fel de-a lungul traiectoriei oricărui sistem, prin diferențiere se obțin condițiile

$$\dot{q}_m = 0 \quad \ddot{q}_m = 0 \quad (3.6.19)$$

Conform cu (3.6.18) deplasarea virtuală a sistemului este:

$$\delta \tilde{q} = \begin{bmatrix} \delta q_e \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.6.20)$$

Forțele de reacție în noile coordonate  $[\mathbf{F}_e^T, \mathbf{F}_m^T]^T$  datorită constrângerilor ideale satisfac condiția:

$$\delta A = \mathbf{F}_e^T \delta q_e + \mathbf{F}_m^T 0 = \mathbf{F}_e^T \delta q_e = 0 \quad (3.6.21)$$

ceea ce implică direct :

$$\mathbf{F}_e = 0 \quad (3.6.22)$$

În acest fel se arată că în noile coordonate subspațiul de libertate determinat de coordonatele  $q_e$  există. Mișcarea posibilă este reprezentată de vectorul  $\tilde{q}$ , în timp ce forțele de reacție posibile sunt reprezentate de  $\tilde{\mathbf{F}}$ :

$$\tilde{q} = \begin{bmatrix} q_e \\ 0 \end{bmatrix} \quad \tilde{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{F}_m \end{bmatrix} \quad (3.6.23)$$

Ecuatiile Lagrange de gradul doi în noile coordonate generalizate  $\tilde{q}_e$  considerând relațiile (3.6.19), (3.6.22) pot fi scrise sub forma:

$$H_e(q_e) \ddot{q}_e + h_e(q_e, \dot{q}_e) = \tau_e \quad (3.6.24)$$

$$\tau_m + \mathbf{F}_m = H_m(q_e) \ddot{q}_e + h_m(q_e, \dot{q}_e) \quad (3.6.25)$$

unde  $\tau_e; \tau_m$  sunt vectori ai forțelor de conducere generalizate în coordonate  $q_e$ , respectiv  $q_m$ . Ecuatia (3.6.24) este de fapt ecuația de ordinul doi Lagrange (3.6.13), care împreună cu ecuațiile de constrângere (3.6.18) caracterizează complet mișcarea sistemului. Și anume, pentru forțele de conducere date  $\tau_e$  și condițiile inițiale  $q_e(0)$ ,  $\dot{q}_e(0)$ , mișcarea este unic determinată de (3.6.24). Mai departe, (3.6.24) implică faptul că: forțele de reacție  $\mathbf{F}_m$  nu au nici o influență în mișcare. Ținând cont de aceste date Propoziția S2 (care este implicit redată prin (3.6.12)) este formulată în cele ce urmează.

**Propoziția S2**

*Mișcarea unui sistem mecanic supus unor constrângeri ideale, staționare olonomic, poate fi stabilizată cu ajutorul legii de conducere care are  $e=n-m$  bucle de*



reacție.

Luând în considerație mișcarea nominală dată:

$$q_e = q_e^0(t) \quad q_m = 0 \quad (3.6.26)$$

care corespunde conducerii nominale:

$$\tau_e^0 = H_e(q_e^0)\ddot{q}_e^0 + h_e(q_e^0, \dot{q}_e^0) \quad (3.6.27)$$

Este bine cunoscut faptul că pentru sistemul dat (3.6.24) legea reacției de stare  $\Delta\tau_e(q_e, \dot{q}_e)$  poate fi găsită astfel încât cu legea de conducere dată de relația:

$$\tau_e = \tau_e^0 + \Delta\tau_e(q_e, \dot{q}_e) \quad (3.6.28)$$

mișcarea nominală (3.6.26) este asimptotic stabilă. Deoarece  $\tau_e \in R^e$  și  $q_e \in R^e$  mișcarea este stabilizată prin introducerea a  $e=n-m$  bucle de reacție.

Pe de altă parte, egalitatea (3.6.25) redă dependența forței de reacție "de mișcare" de forța de conducere și poate fi interpretată drept relația care redă forța necesară  $F_m$ , forță care, prin eliberarea sistemului din constrângere, trebuie să fie adăugată la forțele active  $\tau_m$  pentru ca mișcarea să rămână nemodificată.

Pe baza (3.6.25) poate fi formulată Propoziția S3.

#### **Propoziția S3**

*Dacă mișcarea unui sistem mecanic supus unor constrângeri staționare olonome este stabil, atunci alegând  $\tau_m$ , poate fi realizată o forță de reacție stabilă, specificată (și "în avans"/apriori) fără reacție din partea forței.*

Dacă se consideră  $F_m^0$  forța arbitrar dată și  $q_e^0(\tau)$  mișcarea dorită, atunci legea de conducere:

$$\tau_m = F_m^0 + H_m(q_e^0)\ddot{q}_e^0 + h_m(q_e^0, \dot{q}_e^0) \quad (3.6.29)$$

realizează forța dorită. Se va arăta că forța dorită (preconizată) va fi stabilă.

Din relațiile (3.6.29) și (3.6.25) rezultă:

$$F_m - F_m^0 = H_m(q_e)\ddot{q}_e + h_m(q_e, \dot{q}_e) - H_m(q_e^0)\ddot{q}_e^0 + h_m(q_e^0, \dot{q}_e^0) \quad (3.6.30)$$

Cum s-a presupus că mișcarea este stabilă:

$$(q_e(t), \dot{q}_e(t)) - (q_e^0(t), \dot{q}_e^0(t)) \rightarrow 0, \quad t \rightarrow \infty \quad (3.6.31)$$

din continuitatea funcțiilor  $H_m$  și  $h_m$  rezultă:

$$\mathbf{F}_m(t) - \mathbf{F}_m^0(t) \rightarrow 0, \quad t \rightarrow \infty \quad (3.6.32)$$

indicând că forța  $\mathbf{F}_m^0$  este stabilă cu legea de conducere dată de (3.6.29).

De aici, conform cu propozițiile S2 și S3 rezultă că pentru obținerea stabilității sistemului considerat sunt necesare doar bucle de reacție care depind de poziția  $q_e$  și viteza  $\dot{q}_e$ . Mai precis, nu sunt necesare mai multe bucle de reacție decât numărul gradelor de libertate permise de constrângeri.

Ca un caz special, s-a considerat dependența forței de reacție în funcție de mișcare și conducere. În acest sens, se consideră structura sistemului mecanic cu constrângerile care satisfac următoarea condiție:

$$H_m(q_e) \ddot{q}_e + h_m(q_e, \dot{q}_e) = 0 \quad (3.6.33)$$

Atunci ecuația (3.6.25) devine :

$$\tau_m + \mathbf{F}_m = 0 \quad (3.6.34)$$

ceea ce înseamnă că reacția nu depinde de mișcare, fapt care demonstrează Propoziția S4.

#### **Propoziția S4**

*Dacă condiția (3.6.33) este îndeplinită, forța de reacție stabilă arbitrar poate fi obținută prin alegerea corespunzătoare a legii de conducere care nu depinde de mișcare.*

În acest caz legea de conducere este :

$$\tau_m = -\mathbf{F}_m^0 \quad (3.6.35)$$

În cele ce urmează se prezintă câteva proprietăți ale ortogonalității și reciprocității care deseori sunt legate de problema conducerii hibride. Prin introducerea conceptului de ortogonalitate din lucrările {Mas81}, [Rai81], [Wes85] și [Map86] sau a conceptului de reciprocitate din lucrările [Lip85], [Lip88] și [Gol93] descompunerea spațiului de configurație al sistemului mecanic considerat care are  $n$  grade de libertate supus la  $m$  constrângeri ideale, olonome se realizează în subspații de constrângere  $m$ -dimensionale și subspații de libertate  $e=n-m$  - dimensionale.

Se poate arăta că atât descompunerea bazată pe reciprocitate, cât și cea bazată pe ortogonalitate sunt echivalente descompunerii în coordonate generalizate menționată mai sus (conform cu relațiile (3.6.16), (3.6.17)).

Se consideră prima relație cinematică de reciprocitate. Se introduce sistemul de coordonate ortogonal cartezian  $D^3$  în spațiul de configurație în care dinamica sistemului (3.6.1), (3.6.2) este luată în considerație. Conform cu teorema lui Chasles, [Rot84], orice mișcare infinitezimală a unui corp rigid (în cazul nostru efectorul final) poate fi efectuată de o singură rotație în jurul unei axe unice combinată cu o translație unică paralelă cu axa.

De asemenea, în conformitate cu teorema lui Poincot, în lucrarea [Rot84] se afirmă că orice sistem de forțe (și momente) aplicat unui corp rigid poate fi înlocuit în

mod unic de o singură forță și moment, în așa fel încât o singură forță este paralelă cu direcția momentului.

În consecință, câmpul vitezelor instantanee al efectorului final poate fi reprezentat de torsorul cinematic atașat șurubului:

$$T = \begin{bmatrix} V \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3.6.35')$$

în timp ce câmpul forțelor instantanee poate fi reprezentat de torsorul forțelor generalizate atașat șurubului:

$$w = \begin{bmatrix} f \\ M \end{bmatrix} \quad (3.6.35'')$$

unde  $\omega$  este viteza unghiulară a efectorului final,  $V$  este viteza punctului corpului care coincide instantaneu cu originea sistemului de referință,  $f$  este rezultanta sistemului de forțe care acționează asupra corpului și  $M$  este rezultanta momentelor de torsiune față de origine. Transformata  $T$  este redată funcție de axele coordonatelor Plücker, în timp ce momentul este dat în coordonate polare.

Prin definiție este reciprocă oricărei  $w$  dacă satisface ecuația:

$$w^T T = f^T V + M^T \omega = 0 \quad (3.6.36)$$

Relația de reciprocitate este invariantă în raport cu sistemul de coordonate  $D^3$ . În lucrarea [Lip85] s-a arătat că toate entitățile posibile de tip torsor cinematic "de libertate" ale efectorului final dau naștere spațiului de libertate, în timp ce torsorul forțelor generalizate de contact dă naștere subspațiului de constrângere, astfel încât cele două tipuri de torsor/subspații sunt reciproce (fiecare față de fiecare). Propoziția următoare este enunțată în [Lip88].

#### **Propoziția S5**

*Dacă sistemul (3.6.1) este supus constrângerilor ideale olonome (3.6.2) atunci posibila deplasare infinitezimală și posibila forță de reacție creează torsori cinematici și de tip forță aflați în relație de reciprocitate.*

Deoarece termenul  $w^T T$  reprezintă lucrul mecanic (și implicit puterea) conform cu lucrarea [Lip88], atunci prin definiție (3.6.36) implică faptul că relația de reciprocitate este determinată de conexiuni ideale.

De aceea, descompunerea pe baza reciprocității va fi echivalentă cu descompunerea introdusă de relațiile (3.6.16) și (3.6.17) dacă sunt luate în considerare constrângerile ideale.

Se consideră descompunerea pe baza ortogonalității. Se introduce produsul scalar a doi vectori în spațiul  $R^n$  dat de relația:

$$(x, y) = x^T y \quad (3.6.37)$$

și se consideră că cei doi vectori sunt ortogonali dacă:

$$(x, y) = 0 \quad (3.6.38)$$

Se interpretează acum relația dintre forță și mișcare. Viteza posibilă  $\dot{q}$  satisface relația (3.6.4):

$$\frac{\partial \Phi}{\partial q}(q) \dot{q} = 0 \quad (3.6.39)$$

unde matricea  $\frac{\partial \Phi}{\partial q}(q)$  este de ordinul  $m \times n$ . Poziția  $q$  este determinată de presupunerea că viteza posibilă  $\dot{q}$  este soluția sistemului omogen de  $m$  ecuații cu  $n$  variabile și de enunțul clasic al algebrei lineare care face ca spațiul  $R^e$  de dimensiune  $e=n-m$  să fie un subspațiu al lui  $R^n$ .

Forțele de reacție posibile  $F$  sunt conform cu (3.6.8) combinații liniare ale vectorului coloană al matricii  $\frac{\partial \Phi}{\partial q}(q)$  și de aceea formează subspațiul  $R^m$ . Orice forță de reacție este determinată de alegerea multiplicatorului Lagrange  $F$ .

Poate fi formulată Propoziția S6.

**Propoziția S6**

*Dacă produsul scalar dat de relația (3.6.37) este introdus în spațiul coordonatelor generalizate ale sistemului (3.6.1) supus constrângerilor staționare olonome (3.6.2), atunci forțele de reacție și deplasarea virtuală sunt ortogonale dacă constrângerile sunt ideale.*

Considerând  $F \in R$  drept forță de reacție, conform cu (3.6.8) se formulează:

$$F^{TT} = f^T \frac{\partial \Phi}{\partial q}(q) \quad (3.6.40)$$

Înmulțind scalar ambii membri cu  $\dot{q}$ , unde  $\dot{q}$  reprezintă viteza posibilă se obține:

$$F^{TT} \dot{q} = f^T \frac{\partial \Phi}{\partial q}(q) \dot{q} \quad (3.6.41)$$

sau ținând cont de (3.6.4):

$$F^{TT} \dot{q} = 0 \quad (3.6.42)$$

Dacă constrângerea este ideală atunci mișcarea virtuală cu deplasarea posibilă este:

$$\delta A = F^{TT} \dot{q} q \delta t = 0 \quad (3.6.43)$$

Relația (3.6.42) se verifică dacă și (3.6.43) se verifică. Aceasta înseamnă că vectorul  $F$  este ortogonal cu vectorul  $\dot{q}$  dacă constrângerea este ideală.

În consecință, Propozițiile S4 și S5 au ca rezultat Propoziția care urmează.

**Propoziția S7**

*Pentru ca, constrângerile olonome staționare să fie ideale este necesară condiția dată de una din următoarele trei formulări echivalente :*

- ◇ *lucrul mecanic al forțelor de reacție al deplasării permise de constrângeri este zero.*
- ◇ *torsorul cinematic este reciproc reacțiunilor torsorului de forță generalizată*
- ◇ *forțele de reacție sunt ortogonale deplasărilor permise de constrângeri.*

În final, în [Vuk95c] se tratează un caz special luându-se în considerare formularea ortogonalității pe care conducerea hibridă se bazează în lucrările de referință ale fondatorilor. În [Mas81] vectorii sunt astfel introduși:

$$v = [ v_x v_y v_z w_x w_y w_z ]^T \quad (3.6.44)$$

$$f = [ f_x f_y f_z g_x g_y g_z ]^T \quad (3.6.45)$$

iar prin aceștia sunt descrise, în conformitate cu sistemul ortogonal cartezian, viteza efectorului final și forța de reacție la contact. În (3.6.44) și (3.6.45)  $v_i, f_i, (i=x, y, z)$  sunt componentele vitezei de translație de-a lungul axei, în timp ce  $w_i, g_i$  sunt componentele vitezei unghiulare și a momentului. Suprafața ideală  $C$  (hipersuprafață în  $R^6$ ) a fost introdusă astfel încât comportarea robotului la contact este echivalentă ecuației de constrângere (3.6.2). Viteza  $v$  este tangențială suprafeței  $C$ , în timp ce forța este ortogonală acesteia. Vitezele posibile în contact  $v$  sunt soluții ale ecuației liniare:

$$Av = 0 \quad (3.6.46)$$

unde  $A$  este o matrice  $6 \times 6$ . Relația (3.6.46) este echivalentă relației (3.6.4). Forțele de reacție derivă drept soluții ale următoarei ecuații liniare:

$$B^T f = 0 \quad (3.6.47)$$

Între  $A$  și  $B$  există o dependență care dovedește că subspațiul vitezelor posibile alcătuiește complementul ortogonal al subspațiului forțelor de reacție posibile. Dacă  $b_1, \dots, b_e$  sunt soluțiile liniare independente ale ecuației (3.6.46), atunci viteza posibilă în zona de contact este:

$$v = B \lambda \quad (3.6.48)$$

unde  $B = (b_1 b_2 \dots b_e)$  și  $\lambda \in R^n$  este un vector arbitrar. Forțele de reacție sunt ortogonale cu vitezele posibile, adică :

$$f^T v = f^T B \lambda = 0 \quad (3.6.49)$$

Deoarece  $\lambda$  este un vector arbitrar, atunci are loc relația:

$$f^T B = 0 \quad (3.6.50)$$

Relația (3.6.49) este un caz special al relației (3.6.42) sau (3.6.43) pentru coordonate generalizate date, în timp ce relația (3.6.50) arată că ortogonalitatea introdusă în lucrarea [Mas81] este echivalentă cu ortogonalitatea introdusă de relația (3.6.38).

#### **Observație**

Analiza expusă arată că dacă următoarele două presupuneri fundamentale constituie baza pentru conducerea hibridă:

- a) pierderea libertății la gradele de libertate ale roborului în contact (dinamica mediului este ignorată),
- b) robotul în contact poate fi tratat ca un sistem mecanic supus constrângerilor ideale (forțele de frecare sunt neglijate),

atunci consecințele vor fi următoarele :

- Presupunerile constituie condiții suficiente pentru descompunerea spațiului de configurație în subspații de libertate și constrângere;
- Relațiile de reciprocitate (în contextul geometriei neeuclidiene) și ortogonalitate (în contextul spațiului euclidian  $n$  – dimensional) sunt interpretări ale presupunerii b). Nu se exclud, așa cum nici geometria euclidiană nu exclude geometria neeuclidiană;
- presupunerile (a) și (b) implică stabilitatea forțelor de interacțiune.

Sunt binevenite câteva comentarii asupra aplicabilității teoriei bazate pe presupunerile (a) și (b) în legătură cu modalitatea în care aceasta corespunde cu comportamentul "practic", real al unei astfel de aplicații. Pentru ca teoria să fie suficient de bună pentru aplicații practice este necesar:

- ◆ ca teoria să fie consistentă, fără afirmații contradictorii, în care axiomele existente să derive logic din presupunerile fundamentale
- ◆ să existe suficiente rezultate/date teoretice pentru a rezolva problemele impuse de practică; în acest caz sarcina este de a da posibilitatea stabilizării traiectoriei dorite și a forței de interacțiune cu calitatea dorită a răspunsului tranzitoriu.

Chiar dacă se omite existența deplasării în constrângeri și a forțelor în subspațiile de libertate, atunci aplicabilitatea teoriei conducerii hibride s-ar putea să nu meargă mai departe de domeniul aplicațiilor practice pentru care stabilitatea nu constituie o problemă sau în care stabilitatea este asigurată prin alte mijloace.

#### **Concluzii**

- A. Nu este posibilă rezolvarea problemei stabilității prin îmbunătățirea teoriei conducerii hibride, devreme ce fiecare nouă extindere trebuie să fie compatibilă cu enunțurile existente.
- B. Dacă se admite existența stabilității ca o problemă practică importantă și se încearcă o rezolvare prin introducerea celor mai potrivite legi de conducere, atunci teoria capabilă să descrie această sarcină, pentru a fi solidă, trebuie să înlăture presupunerile fundamentale (a) și (b), caz în care nu mai este vorba de conducere hibridă propriu-zisă.
- C. Cadrul larg pentru o abordare corespunzătoare a conducerii aplicațiilor de contact ("contact-task") - dacă ne limităm doar la fenomene mecanice - este unul care permite manifestarea forței în subspațiile de libertate, cât și deplasarea în subspațiile de constrângere.

### **3.7 Aspecte particulare ale procesului de conducere a sistemelor de lucru aflate în interacțiune cu mediul: efectul complianței asupra stabilității la impact ([Bog98], [Pay91], [Pay92], [Pay93])**

#### **3.7.1 Prezentare generală**

Sistemele dinamice sunt supuse tranzițiilor de la mișcări libere la configurații de contact cu mediul. Un exemplu de studiu al unei astfel de tranziții poate fi explorarea mișcărilor neconstrânse ale unui robot industrial (conducere după forță) pentru a stabili contactul cu un obiect din mediul înconjurător. Tranziția presupune o fază de impact. Impactul atrage după sine, în mod obișnuit, manifestarea unor instabilități pentru regulatorul în buclă închisă al robotului. Unul dintre principalele mijloace de remediere prin care se ajunge la reglarea în buclă închisă stabilă a robotului este acela de a introduce anumite proprietăți de complianță în sistemul de reglare (prin hardware sau prin legi de reglare cu reacție). Pe baza celei de-a doua metode a lui Lyapunov și a teoriei stabilității garantate a sistemelor incerte, în acest capitol se prezintă efectele complianței la creșterea limitelor de stabilitate ale robotului în timpul fazei de impact

În literatură au fost propuse diferite metodologii pentru a asigura o conducere stabilă a unui robot în timpul fazei de tranziție, pentru care prezența anumitor proprietăți compliante este una din cele mai importante condiții. Aceste proprietăți pot fi introduse fie prin construcția robotului, fie prin implemmentarea unor legi de reacție.

#### **Observație**

*Unul din cercetătorii care s-au ocupat de astfel de probleme, S. Payandeh (referințele bibliografice sunt cuprinse în titlul acestui subcapitol), a efectuat și o scurtă trecere în revistă a modului în care diferiți autori au abordat subiectele importante în domeniu. S-a considerat că este utilă o prezentare a acestei treceri în revistă (reprodusă în continuare) pentru relevarea unor aspecte ale problematicii "contact-task", cu observația că lucrările la care se face referire nu au fost consultate, informația fiind preluată ca atare.*

Referitor la proiectarea reguletoarelor care asigură un impact stabil, S. Payandeh apreciază că Parker și Paul în lucrarea [Par87] au relevat faptul că proprietatea de compresibilitate a aerului în acționările pneumatice și încorporarea reacției de viteză, pot reduce efectul impactului rezultând de aici o performanță de stabilitate crescută. Youcef-Toumi și Gutz în [You89] au modelat dinamica impactului și au sugerat că pentru procesul de conducere stabilă al acestuia, reacția de viteză poate fi folosită pentru a crea și activa amortizarea, în timpul acesteia adăugându-se o reglare integrală în

forță. Utilizând noțiunea de reglare a impedanței, Kazerooni, Waibel și Kim în [Kaz90] au creat o impedanță activă în sistemul lor de reglare cu buclă închisă. Ei au verificat deasemenea pe cale analitică dacă pentru reglare stabilă trebuie asigurată existența proprietăților de complianță fie în sistemul dinamic, fie în mediu. Volpe și Khosla în [Vol89] au verificat experimental faptul că în timpul fazei de impact se poate folosi un regulator cu factor de amplificare explicit în forță pentru a diminua oscilațiile (de exemplu proprietatea de complianță activă). Recent, Hyde și Cutkosky în [Hyd94] au comparat experimental diferite strategii de reglare a impactului pe un robot cu un efector final tip deget compliant și au propus un mijloc de abordare bazat pe modelarea intrării pentru a mări limitele de stabilitate. Un model compliant al robotului în contact cu un mediu rigid a fost propus în [Pay92]. Rezultatele cu privire la efectele complianței în reducerea câstigului în buclă al unui regulator robust sunt redată în [Pay93]. Deasemenea, concluzii cu privire la importanța complianței în stabilitatea regulatorului în sarcinile robotului cu impact (pe baza unor experimentări) sunt prezentate în [Man93].

În continuare se prezintă rezultatele obținute pe baza celei de-a doua metode a lui Lyapunov și a teoriei stabilității sistemelor incerte dezvoltată în [Lei81]. Au fost păstrate notațiile din sursa bibliografică.

### 3.7.2 Modelarea în buclă închisă

Pornind de la modelul cu un regulator robust de forță al unui sistem de lucru (robot spre exemplu) în contact cu un mediu rigid, se impune pentru contactul dintre robot și mediu un model de contact compliant. Sursa presupusă a complianței este constituită dintr-un material pasiv atașat la efectorul final (EF) al robotului.

Fie modelul nelinear al robotului în contact cu mediul, dat de relația cunoscută:

$$M_{\theta}\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}) = \tau(t) - J^T R \quad (3.7.1)$$

unde s-au utilizat notațiile cunoscute:  $M_{\theta}$  pentru matricea de inerție,  $h(\theta, \dot{\theta})$  pentru vectorul forței centrifugale, Coriolis și al forțelor gravitaționale,  $g(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta})$  pentru un vector al incertitudinilor și perturbațiilor, iar  $R$  este forța de contact exercitată asupra mediului.

Exprimând ecuația de mai sus în sistemul de referință al EF (de exemplu un sistem de referință în care vectorul normal la suprafața de contact este coliniar cu axa  $z$ ) folosind următoarele identități:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= J\ddot{\theta} \\ r &= J^T F \\ \ddot{\theta} &= J^{-1}\ddot{x} - J^{-1}\dot{J}\dot{\theta} \end{aligned} \quad (3.7.1')$$

unde  $J$  este o formă de reprezentare a coordonatelor cuplelor cinematice conducătoare (CCC) a robotului în raport cu coordonatele efectorului final  $x$ . Substituind identitățile de mai sus în ecuația (3.7.1) se obține relația



### 3. APLICAȚII de tip "CONTACT-TASK" – stadiul actual

$$M_{\bar{x}} \ddot{\bar{x}} + h_{\bar{x}} + g_{\bar{x}} = F - R \quad (3.7.2)$$

unde :

$$\begin{aligned} M_{\bar{x}} &= J^T M_{\theta} J^{-1} \\ h_{\bar{x}} &= J^{-T} h(\theta(\dot{\theta}) - M_{\bar{x}} J \dot{\theta}) \\ g_{\bar{x}} &= J^{-T} g(\theta(\dot{\theta}, \ddot{\theta})) \end{aligned} \quad (3.7.2')$$

Fie un regulator bazat pe un model neliniar dat de relația:

$$F = M_{\bar{x}} F' + h_{\bar{x}} + g_{\bar{x}} + R \quad (3.7.3)$$

(se presupune o cunoaștere exactă a modelului și a incertitudinilor). Se definește  $F'$  ca:

$$F' = F - \dot{R} - R \quad (3.7.4)$$

Forța de contact ca funcție a complianței efectorului final al robotului poate fi exprimată sub forma:

$$R = K_c (\bar{x} - \bar{x}_\omega) \quad (3.7.5)$$

unde  $K_c$  este o matrice definind proprietățile de complianță ale EF,  $\bar{x}_\omega$  fiind distanța de la EF al robotului la locul inițial de contact cu mediul.

Substituind (3.7.3) și (3.7.4) în (3.7.2) și notând  $\ddot{\bar{x}} = K_c^{-1} R$  rezultă relația:

$$\ddot{R} + K_c \dot{R} + K_c R = K_c F \quad (3.7.6)$$

În cazul în care modelul exact al parametrilor robotului nu este disponibil și există anumite incertitudini și perturbații ce acționează asupra acestuia, regulatorul bazat pe modelul ecuației (3.7.3) poate fi scris astfel:

$$F = \tilde{M}_{\bar{x}} F' + \tilde{h}_{\bar{x}} + \tilde{g}_{\bar{x}} + \tilde{R} \quad (3.7.7)$$

unde  $\tilde{M}_{\bar{x}}$  este matricea de estimare a inerției,  $\tilde{h}_{\bar{x}}$  este o estimare a vectorului forțelor Coriolis și gravitaționale și  $\tilde{g}_{\bar{x}}$  estimarea perturbațiilor și incertitudinilor.  $\tilde{R}$  este o măsură a vectorului forță de contact curentă. În ecuația de mai sus  $F'$  este definit ca:

$$F' = \left[ \left( \ddot{R}^r - \dot{R}^e - R^e \right) / K_c + F \right] \quad (3.7.8)$$

unde  $R^e = R - R^r$ . Aici  $(R)^r$  reprezintă parametri de referință.  $F$  este regulatorul robust de forță care va fi definit mai târziu.

Substituind ecuațiile (3.7.8) și (3.7.7) apoi introducându-le în ecuațiile dinamice în buclă deschisă se obțin următoarele:

$$\begin{aligned}
 & - \left[ (\ddot{R}^r - \dot{R}^e - R^e) K_C + F \right] = \\
 & - \tilde{M}_{\bar{x}}^{-1} M_{\bar{x}} \ddot{\bar{x}} + \tilde{M}_{\bar{x}}^{-1} \left[ (\tilde{h}_{\bar{x}} - h_{\bar{x}}) + (\tilde{g}_{\bar{x}} - g_{\bar{x}}) + (\tilde{R} - R) \right]
 \end{aligned} \tag{3.7.9}$$

Adăugând  $\ddot{\bar{x}}$  în ambii membri ai relației și incorporând în aceștia relația complianței EF al robotului (ecuația (3.7.5)) se obține:

$$\begin{aligned}
 & \ddot{R}^e + \dot{R}^e + R^e - K_C F = \\
 & K_C \tilde{M}_{\bar{x}}^{-1} (M_{\bar{x}} - \tilde{M}_{\bar{x}}) \ddot{\bar{x}} + K_C \tilde{M}_{\bar{x}}^{-1} \left[ (\tilde{h}_{\bar{x}} - h_{\bar{x}}) + (\tilde{g}_{\bar{x}} - g_{\bar{x}}) + (\tilde{R} - R) \right]
 \end{aligned} \tag{3.7.9'}$$

sau,

$$\ddot{R}^e + \dot{R}^e + R^e = K_C F + K_C W \tag{3.7.10}$$

unde incertitudinea  $W$  este definită ca :

$$W = \tilde{M}_{\bar{x}}^{-1} (M_{\bar{x}} - \tilde{M}_{\bar{x}}) \ddot{\bar{x}} + \tilde{M}_{\bar{x}}^{-1} \left[ (\tilde{h}_{\bar{x}} - h_{\bar{x}}) + (\tilde{g}_{\bar{x}} - g_{\bar{x}}) + (\tilde{R} - R) \right]$$

Ecuția de mai sus poate fi pusă în următoarea formă adecvată spațiului stărilor:

$$\dot{x} = Ax + Bu + BW; \quad y = Cx \tag{3.7.11}$$

unde  $x = (R^e; \dot{R}^e)^T$  iar  $B$  conține modelul compliant al efectorului final EF.

Combinând cele de mai sus cu un model auxiliar dinamic de forma:

$$\dot{\xi} = \Lambda \xi + \beta R^e \tag{3.7.12}$$

ecuația de mai sus poate fi folosită pentru a modela intrările exogene (intrările de origine exterioară sistemului), care pot acționa asupra sistemului. Polii acestor modele sunt localizați în partea dreaptă a axei imaginare. Se obțin apoi următoarele relații dinamice:

$$\begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\xi} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ \beta C & \Lambda \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ \xi \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} W \tag{3.7.12'}$$

la care ieșirea  $y$  a modelului matematic este definită ca:

$$y = [C \quad 0] \begin{Bmatrix} x \\ \xi \end{Bmatrix} \tag{3.7.12''}$$

respectiv se poate scrie sub forma:

$$\dot{z} = \bar{A}z + \bar{B}u + \bar{B}W \tag{3.7.13}$$

În cele ce urmează, efectul forței de impact  $\Gamma$  care este o forță în impuls având o amplitudine mare și de durată scurtă se presupune a fi modelat drept componentă aditivă a forței de contact  $R$  sau:  $R=R+\Gamma$ . Folosind o derivare similară ca în cele de mai sus, dinamica sistemului, incluzând termenul aditiv de impact, poate fi descrisă astfel:

$$\dot{z} = \bar{A}z + \bar{B}u + \bar{B}\Phi + \bar{B}\bar{\Gamma} \quad (3.7.14)$$

unde  $\bar{\Gamma}$  înseamnă o reducere de prim rang a efectului forței de impact prin inversa matricii maselor sau  $\bar{\Gamma} = \tilde{M}_x^{-1} \Gamma$ .

Obiectivul urmărit este proiectarea unei intrări de comandă  $u$  care poate produce stabilitatea sistemului în buclă închisă în prezența incertitudinilor limitate definite de  $W$  (de exemplu  $|W| \leq \rho$ ) și în prezența forței de impact  $\Gamma$ .

Se definește un controler de forma :

$$u = Kz + \rho \quad (3.7.15)$$

la care matricea factor de amplificare  $K$  se alege astfel încât să stabilizeze poliile de instabilitate ai sistemului definiți în ecuația (3.7.11) și poliile de instabilitate ai dinamicii auxiliare definiți în ecuația (3.7.12). Intrarea  $\rho$  a regulatorului este definită:

$$\rho = \begin{cases} -\frac{\bar{B}^T P_z}{\|\bar{B}^T P_z\|} \rho & \text{dacă } \|\bar{B}^T P_z\| > \varepsilon \\ -\frac{\bar{B}^T P_z}{\|\bar{B}^T P_z\|} \rho & \text{dacă } \|\bar{B}^T P_z\| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (3.7.16)$$

unde  $\varepsilon$  este un număr mic pozitiv determinat de proiectant.  $P$  este o matrice pozitivă definită simetric reprezentând soluția următoarelor ecuații Lyapunov pentru  $Q > 0$ :

$$P\bar{A} + \bar{A}^T P = -Q \quad (3.7.17)$$

### 3.7.3 Analiza stabilității

În subcapitolul precedent s-a prezentat modelul robotului combinat cu o componentă dinamică auxiliară în contextul unui sistem dinamic incert. În cele ce urmează se va prezenta stabilitatea sistemului în buclă închisă. Mai întâi trebuie analizată stabilitatea regulatorului în absența forței în impuls care apare în urma coliziunii dintre robot și mediu. În al doilea rând trebuie arătat modul în care proprietatea compliantă a robotului poate influența sensibilitatea buclei închise la aplicarea forței în impuls și stabilitatea buclei închise.

Se consideră o funcție Lyapunov de forma :

$$V = z^T Pz \quad (3.7.18)$$

Implementând regulatorul definit de (3.7.5) în ecuația (3.7.13), derivata funcției-candidat Lyapunov pe parcursul de variație în timp a soluției poate fi scrisă astfel:

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \dot{z}^T Pz + z^T P\dot{z} \\ &= -z^T Qz + 2\alpha^T (u + W) \\ &\leq -\lambda_{\min}(Q)\|z\|^2 + 2\alpha^T (u + W)\end{aligned}\quad (3.7.19)$$

unde s-a definit  $\alpha = (\bar{B}^T Pz)$ . Conform principiului lui Rayleigh ( $Q$  fiind o matrice definită pozitiv), rezultă  $\lambda_{\min}(Q) \leq z^T Qz$  și  $\lambda_{\min} > 0$ .

Considerând acum un regulator conform cu ecuația (3.7.16) pentru  $|\alpha| > \varepsilon$ , în ecuația (3.7.19) se poate scrie :

$$\begin{aligned}\alpha^T (u + W) &= \alpha^T \left( \frac{-\alpha\rho}{\|\alpha\|} + W \right) \\ &= \alpha^T \left( \frac{-\alpha\rho}{\|\alpha\|} \right) + \alpha^T W \\ &\leq \left\| \alpha^T \left( \frac{-\alpha\rho}{\|\alpha\|} \right) \right\| + \|\alpha^T W\| \\ &= -\|\alpha\|\rho + \|\alpha\|\rho = 0\end{aligned}\quad (3.7.20)$$

Pentru  $|\alpha| \leq \varepsilon$  se obține :

$$\begin{aligned}\alpha^T (u + W) &= \alpha^T \left( \frac{-\alpha\rho}{\varepsilon} + W \right) \\ &\leq \alpha^T \left( -\frac{\alpha\rho}{\varepsilon} \right) + \|\alpha\|\rho \\ &= -\|\alpha\|^2 \rho / \varepsilon + \|\alpha\|\rho \\ &= \left( -\|\alpha\|^2 / \varepsilon + \|\alpha\| \right) \rho\end{aligned}\quad (3.7.21)$$

Valoarea maximă în cele de mai sus se obține pentru  $|\alpha| = \varepsilon/2$ . Prin urmare :

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min}(Q)\|z\|^2 + \varepsilon\rho/2 \quad (3.7.22)$$

și ca rezultat este posibil:  $\dot{V} < 0$ .

În timpul fazei de impact se presupune că efectul forței de impact poate fi reprezentat drept componentă aditivă a forței de contact. Folosind modelul din ecuația (3.7.14), regulatorul redat de ecuația (3.7.15) și funcția candidat Lyapunov, rata schimbării acestei funcții candidat de-a lungul domeniului de variație în timp a soluției poate fi descrisă astfel:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -z^T Qz + 2\alpha^T (u + W + \bar{\Gamma}) \\ &\leq -\lambda_{\min}(Q) \|z\|^2 + \|\alpha\| \|(u + W + \bar{\Gamma})\| \end{aligned} \quad (3.7.23)$$

Din ecuația (3.7.23) se poate vedea că efectul forței în impuls cauzate de impactul robotului cu mediul se manifestă ca o rată de schimbare a funcției Lyapunov. De altfel efectul ei conține un factor de magnitudine  $|\bar{B}^T Pz|$  care include modelul complianței efectorului final al robotului dat prin definirea lui  $\bar{B}$ . Fînd date valorile  $P$  se poate reduce efectul forței de impact asupra stabilității buclei închise a regulatorului prin introducerea unei structuri mai compliante sau a unui alt gen de material (cu mărime mică a lui  $K_c$ ). Introducerea complianței EF în proiectarea robotului este o soluție acceptată. Drept rezultat mărimea lui  $|\bar{B}^T Pz|$  poate fi redusă prin procesul de proiectare a structurii mecanice a robotului.

Se definește o constantă  $\eta > 0$  astfel încât pentru  $P$  și  $K_c$  date și un vector de eroare limitat  $z$  să fie îndeplinită condiția  $|\bar{B}^T Pz| < \eta \leq \varepsilon$ . Apoi din definiția regulatorului robust dat de ecuația (3.7.16), rata schimbării funcției Lyapunov poate fi scrisă după cum urmează:

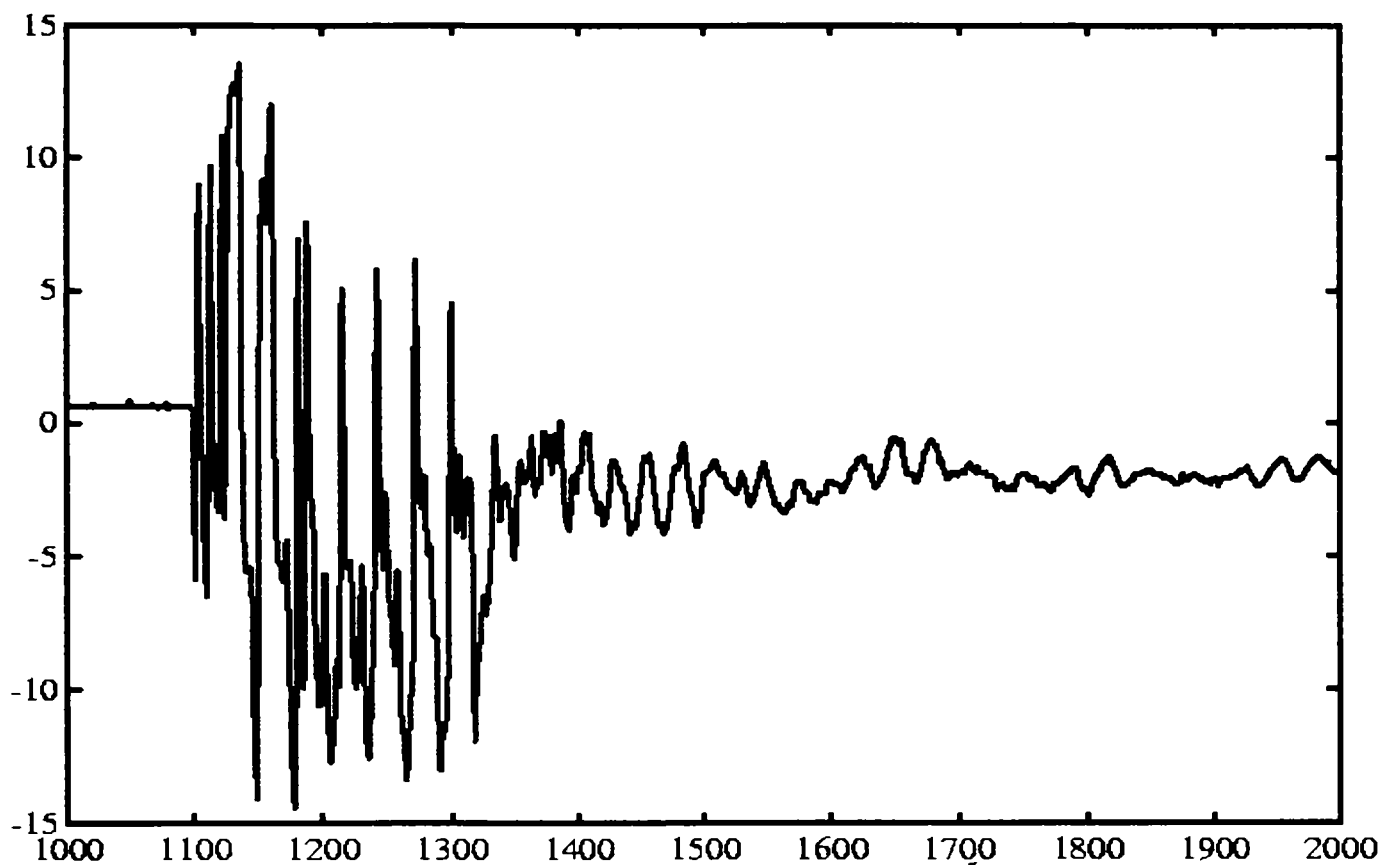
$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\lambda_{\min}(Q) \|z\|^2 + 2\alpha^T (u + \varphi + \Gamma) \\ &\leq -\lambda_{\min}(Q) \|z\|^2 + \|\alpha\| (-\|\alpha\| \rho / \varepsilon + W + \bar{\Gamma}) \end{aligned} \quad (3.7.24)$$

Se presupune în continuare că mărimea forței de impact e limitată, presupunere corectă deoarece forța de impact este funcție de viteza de apropiere a robotului de mediu și deasemenea  $\bar{\Gamma}$  este rezultatul reducerii de rang întâi al forței de impact (de exemplu  $|\bar{\Gamma}| \leq \rho$ ). Drept rezultat al presupunerii de mai sus și al ecuației (3.7.24) se obține:

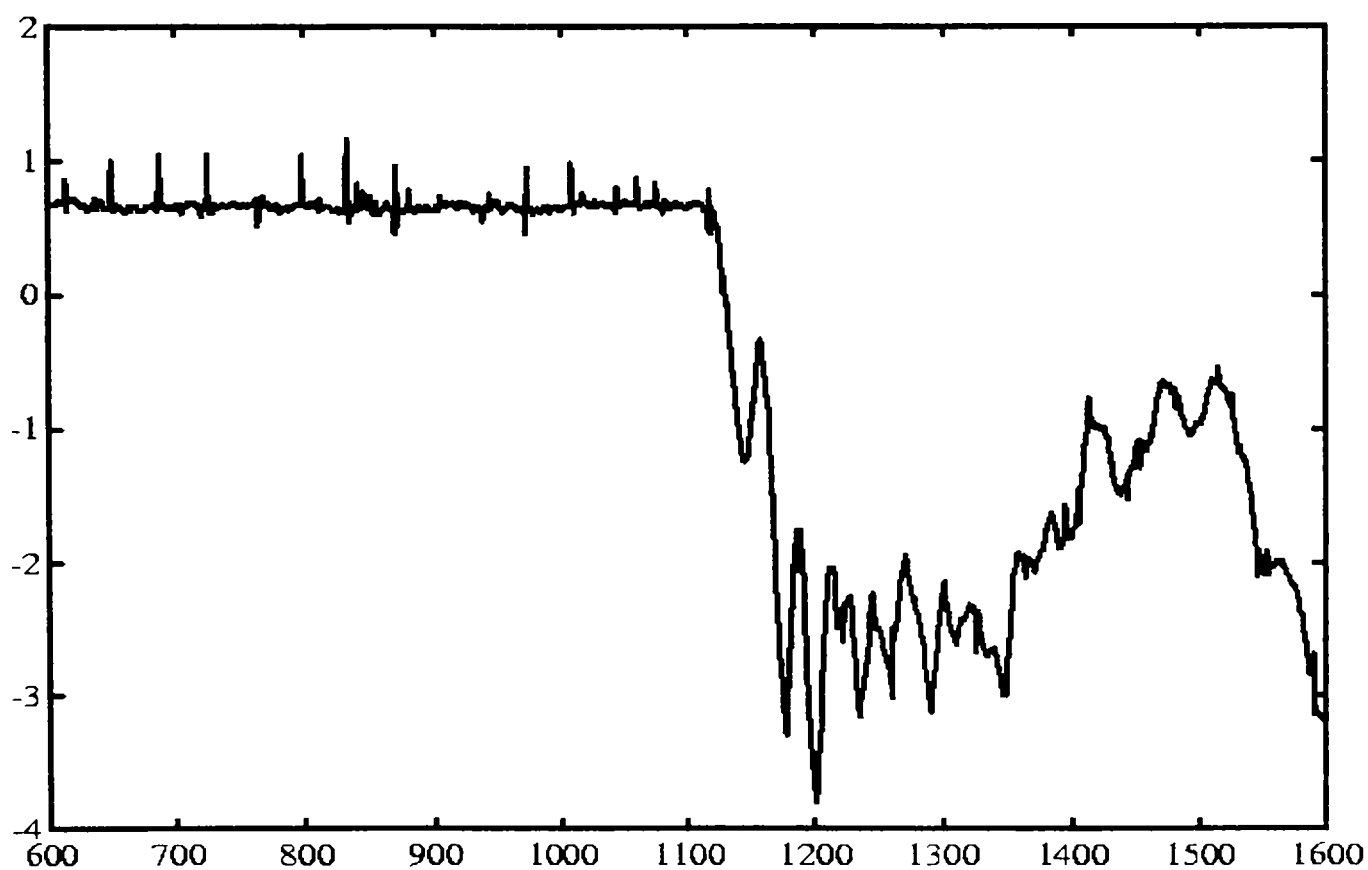
$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\lambda_{\min}(Q) \|z\|^2 + \|\alpha\| (-\|\alpha\| \rho / \varepsilon + \rho + v) \\ &\leq -\lambda_{\min}(Q) \|z\|^2 + 3\varepsilon \end{aligned} \quad (3.7.25)$$

și în consecință  $\dot{V} \leq 0$ .

Pentru a examina în continuare efectul complianței în răspunsul stabil al regulatorului în timpul fazei de impact al robotului cu mediul, se efectuează o serie de experiențe. În aceste experimente, robotul se apropie de mediul rigid cu o viteză dată. Când se detectează un contact, robotul comută din modul de conducere cu reglare prin poziție în cel de conducere cu reglare prin forță.



**Fig. 3.18. Răspunsul robotului în timpul fazei de impact când nu este introdusă nici un fel de complianță**



**Fig. 3.19. Răspunsul robotului posedând complianță în punctul de contact**

În figura 3.18 este arătat răspunsul robotului în cazul în care nu există nici o complianță efectivă, nici în robot, nici în mediul cu care acesta se află în contact. În

mod clar, răspunsul este unul instabil întrucât robotul "saltă" de pe mediu (valori pozitive ale forței indică pierderea contactului). Figura 3.19 arată răspunsul robotului care se apropie cu aceeași viteză dar în cazul în care s-a introdus un material compliant la punctul de contact. Acest răspuns este unul stabil.

#### 3.7.4 Concluzii

Există mai mulți factori care influențează stabilitatea fazei de tranziție de la mișcarea liberă la mișcarea constrânsă a unui sistem dinamic (în particular, robot). Între acești factori se disting: prezența complianței în corpurile care se află în interacțiune, viteza de apropiere, viteza de eșantionare atât pentru robot cât și pentru senzorul de forță și efectul coeficientului de comutare de la modul de conducere cu reglare de poziție la modul de conducere cu reglare de forță, în timpul impactului și după impact.

#### 3.7.5 Sistem de coordonate natural pentru proiectarea unui regulator ce conduce sistemul studiat spre o stare lipsită de instabilități în aplicațiile "contact-task" în Robotică

##### 3.7.5.1 Prezentare generală

În [Pay93] se propune un nou sistem - original - de coordonate utilizabil la proiectarea reguletoarelor din aplicațiile de tip "contact-task" din robotică. Acest sistem de coordonate conferă un mod natural de studiu al performanțelor regulatorului. Metoda propusă combină proprietățile compliante pasive încorporate în sistemul de lucru aflat în interacțiune (de pildă un robot), în contact cu mediul, cu cele ale unui regulator de bază cu scopul de a se obține, în mod hibrid, starea lipsită de instabilități. Se va utiliza termenul de instabilitate pentru a desemna oscilațiile rezultate din funcționarea "neadecvată" a combinației sistem dinamic – regulator. Mediul înconjurător este folosit drept suprafață naturală de comutație pentru regulatorul discontinuu. Se afirmă că aplicațiile pentru sistemul de coordonate propus sunt verificabile prin experimentări.

În general există o mare varietate de sarcini care pot fi îndeplinite de un sistem robotic. O aplicație interesantă în contextul problematicii "contact-task" poate fi impunerea unei mișcări autonome cu conducere după forță a roboților pentru a detecta obstacole în mediul lor și de a menține contactul cu acestea.

În afara celor cunoscute și relevate la începutul capitolului, și alte inițiative de cercetare au fost focalizate spre dezvoltarea unor legi de conducere care să impună un regulator stabil pentru robotul care trece de la mișcarea liberă la mișcarea cu constrângere. Se prezintă în continuare unele dintre acestea pentru a clarifica contextul noii abordări de studiu a reguletoarelor.

Astfel, Kazerooni și colaboratorii în lucrarea deja amintită [Kaz90] cercetează și stabilitatea robotului folosind teorema factorului de amplificare mic. Mills și Lokhorst în lucrarea [Mil93] propun un regulator discontinuu precum și analiza performanțelor sale bazată pe noțiunea sistemelor dinamice generalizate. În această schemă mediul este modelat printr-un arc și un amortizor (un model compliant al mediului). În lucrarea [Pay96], Payandeh propune un mod practic de reglare a tranziției la contact. În această metodă valorile factorului de amplificare regulatorului sunt comutate în timpul diferitelor faze ale mișcării pentru a se obține o reglare cu forță de contact stabilă. Diferite metode de a regla tranziția de la mișcarea liberă la mișcarea cu constrângere cu obiectivul de a minimiza oscilațiile sarcinii din EF în timpul tranziției au fost investigate

de Hyde și Cutkosky într-o altă lucrare: [Hyd94]. S-a propus un regulator adecvat pe baza formatării comenzii de intrare. S-au efectuat experimente pentru a demonstra performanțele de stabilitate ale regulatorului folosindu-se un robot cu un grad de libertate. Marth, Tarn și Bejczy în [Mar93] au propus un algoritm bazat pe un model combinat cu o reglare explicită de forță pentru a regla tranziția de fază. Regulatorul de forță este comutat când se stabilește contactul. Rezultatele stabilității s-au prezentat în faza de impact a robotului cu un mediu rigid. Efectele non-colocative între senzori și sistemele de acționare s-au studiat în lucrările [Col93] și [Epi92]. Un studiu complet al reguletoarelor de forță în robotică s-a dezvoltat în lucrările [Vol93] și [Man95].

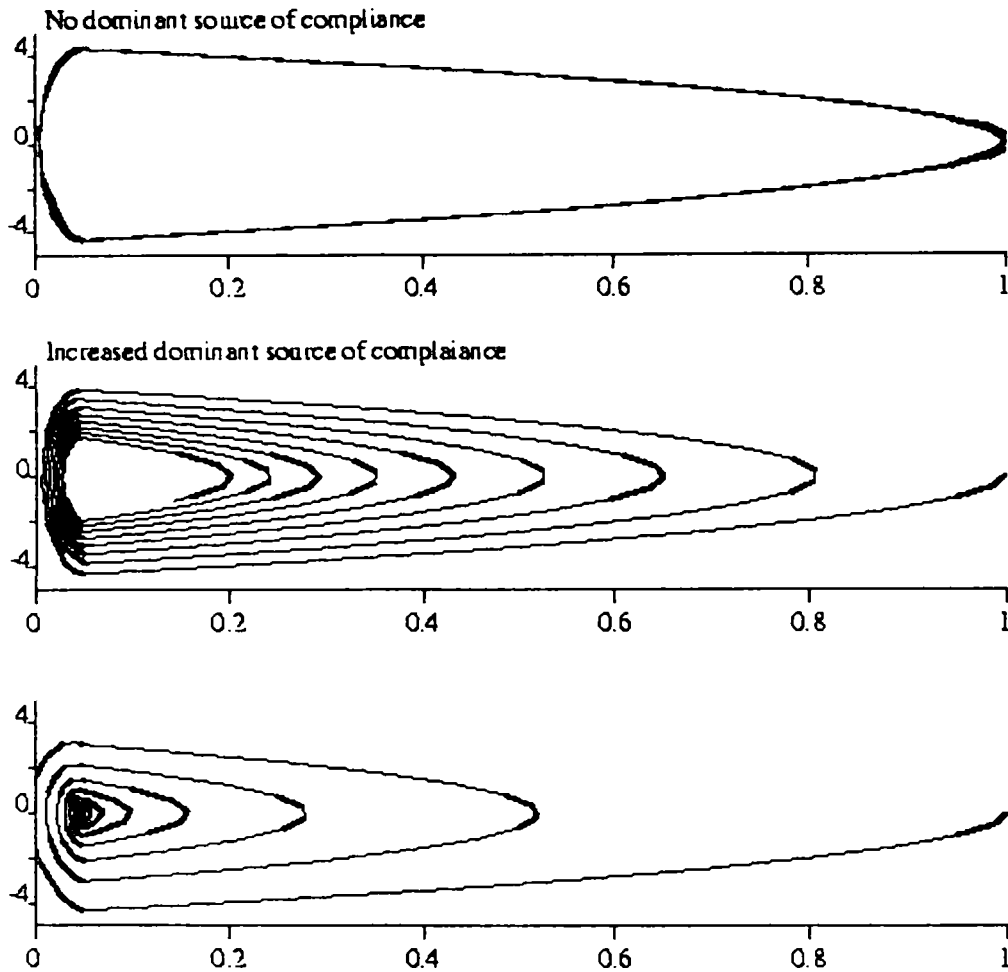
Așa cum corect au subliniat Kazerooni, Mills și Payandeh, în tranziția de la mișcarea liberă până la contact, dinamica sistemului în buclă închisă se schimbă și măsurătorile forței de contact externe (care nu s-au constituit drept parte a sistemului de reglare cu reacție în cazul mișcării libere) devin acum părți ale regulatorului. De altfel metodologia de a folosi semnalul de forță ca indicație naturală a fenomenului de contact a fost incorporată în diferite moduri. Mills a folosit semnalul de forță pentru a comuta regulatorul de la modul de reglare de poziție "PD" la modul de reglare "PDF" de forță. Kazerooni a folosit semnalele de forță drept parte a buclei de reacție menținând structura regulatorului neschimbată (numită reglare de impedanță). Astfel regulatorul de poziție poate fi folosit drept regulator de forță prin parametrizarea impedanței. Payandeh a folosit măsura contactului instantaneu pentru a schimba factorul de amplificare al regulatorului menținând structura regulatorului robust stabilită în faza de mișcare liberă, impact sau mișcare constrânsă.

În noua abordare, cu sistemul coordonatelor de lucru care este propus, semnalul de forță va fi folosit pentru a comuta regulatorul de la modul de reglare de poziție la modul de reglare de forță. Se presupune că modelul general mișcare liberă - mișcare cu contact a robotului este cel mai bine reprezentat utilizând noțiunea incluziunilor diferențiale, aceasta fiind o clasă de sisteme dinamice cu discontinuități în planul drept. Prin aceasta suprafața de contact fizică poate fi folosită ca o suprafață de contact naturală pentru regulator.

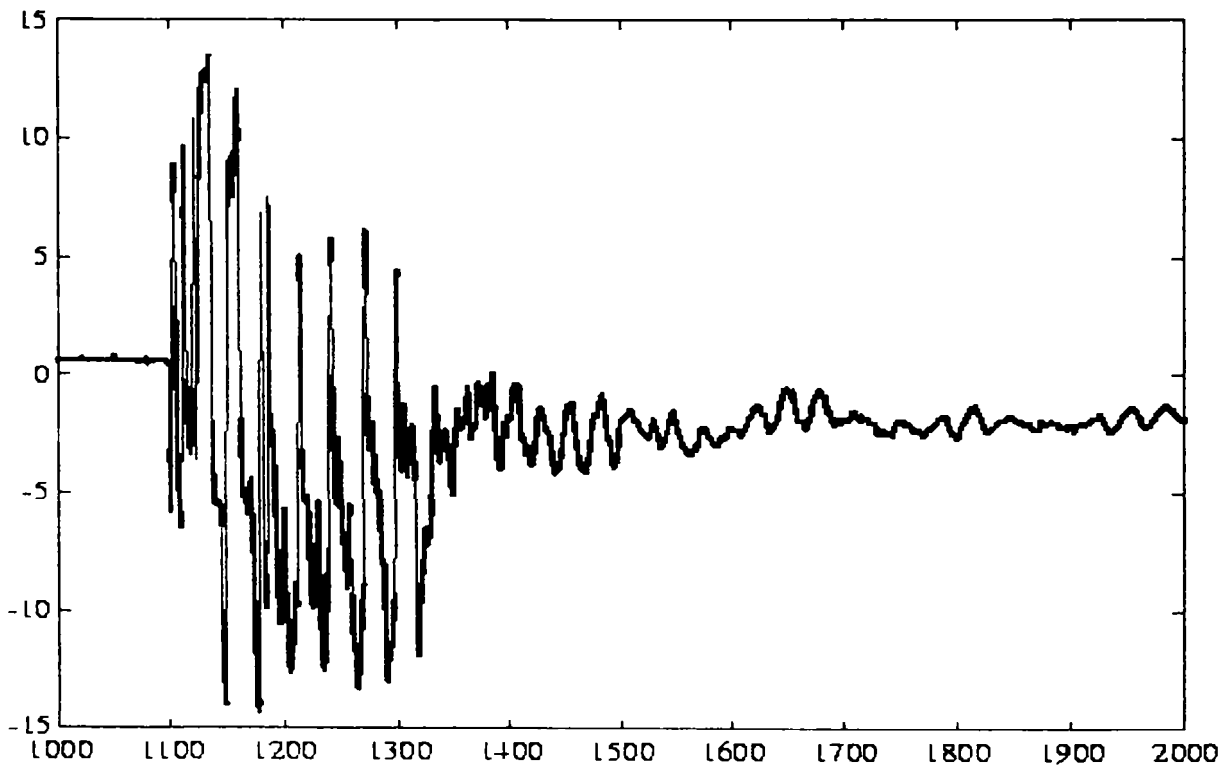
### *3.7.5.2 Proiectarea unui regulator ce conduce sistemul spre o stare lipsită de instabilități*

În general, s-a constatat că pentru a se obține un regulator practic ce conduce sistemul spre o stare lipsită de instabilități în aplicațiile contact-task (din robotică), se impune existența unei complianțe fie în structura materialului (adică flexibilitate structurală), fie în mediul cu care acesta este în contact (deci mediu compliant) sau în regulatorul în buclă închisă (regulator de rigiditate). Primele două categorii de complianță pot reduce forțele de impuls care cresc în timpul coliziunii între două corpuri solide. Complianța are ca efect reducerea dinamicii de contact de la modul infinit la un mod finit și poate reduce din punct de vedere cantitativ instabilitățile (le pot chiar elimina). Spre exemplu, în figura 3.20 este reprezentat un răspuns simulat în poziție pentru un robot ideal când se apropie de un mediu rigid:

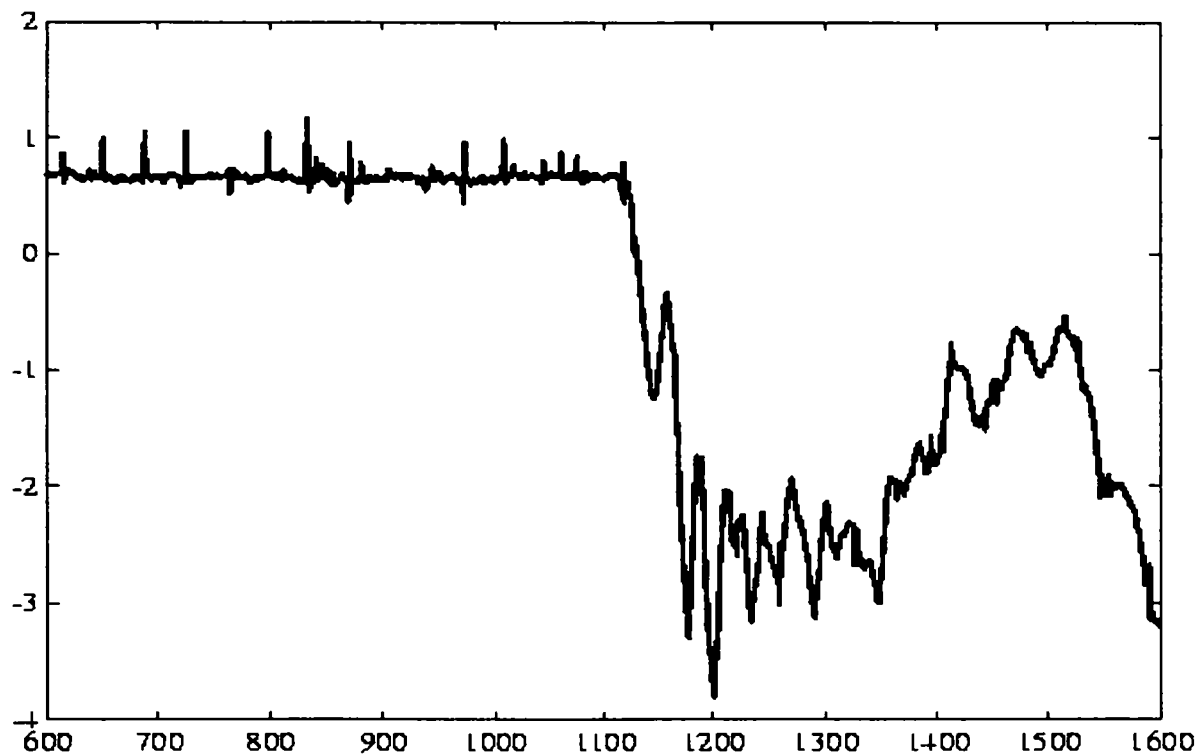




**Fig. 3.20. Simularea interacțiunii între un robot ideal și un mediu rigid pentru diferite grade de complianță**



**Fig. 3.21 Răspunsul forței de contact a robotului în timpul fazei de impact când nu există nici un fel de complianță**



**Fig. 3.22 Răspunsul forței de contact a robotului în timpul fazei de impact când este introdusă o sursă de complianță**

În general, prezența complianței în corpurile aflate în contact (fie în mediu, fie în robot) permite creșterea lățimii de bandă în buclă închisă și în consecință creșterea limitelor factorilor de amplificare doriți ai regulatorului. De exemplu în figura 3.21 și în figura 3.22 este reprezentat răspunsul curent al robotului când se apropie de un mediu rigid cu reglatoare identice. Se poate observa că pentru cazul în care nu avem prezența unei complianțe dominante robotul "saltă" de pe suprafața de contact cu mediul (valorile pozitive reprezintă faza de non-contact, orice valori mai mici decât aceasta reprezintă faza de contact).

În cele ce urmează s-a folosit un mod de abordare prin care se introduce efectul pasiv al complianței în modelul robotului împreună cu un regulator robust pentru a se obține o tranziție stabilă de fază și o reglare de forță în aplicația contact-task.

### 3.7.5.3 Model discontinuu natural al sistemului în buclă închisă

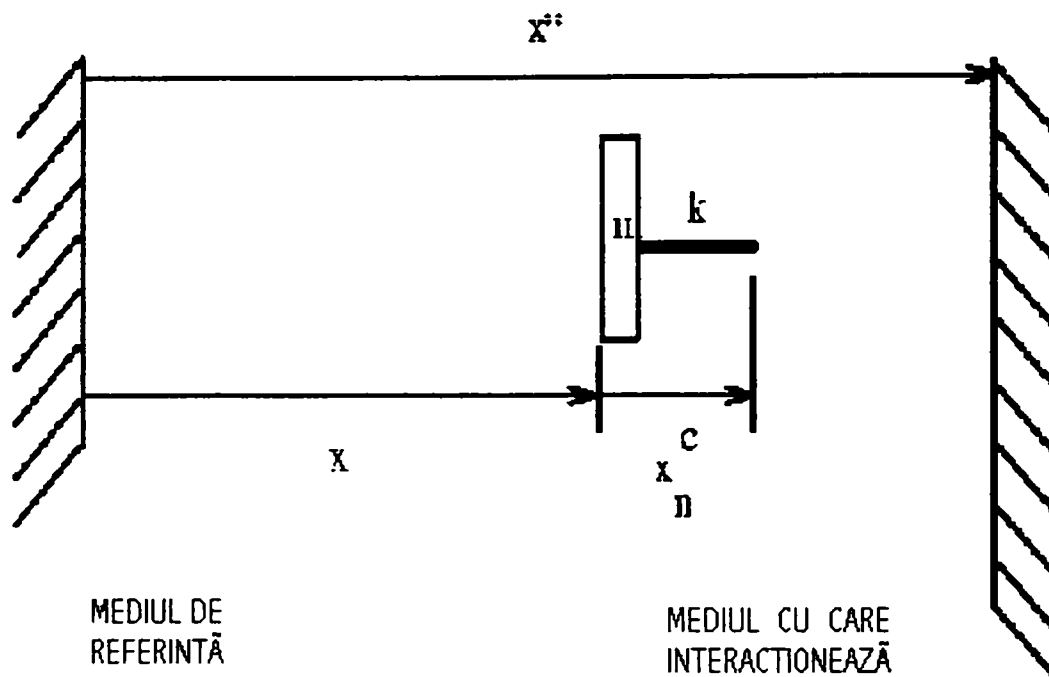
Se consideră un mecanism compliant unidimensional (cu un grad de libertate) cu acționare în forță. Ecuația dinamică a sistemului în faza neconstrânsă poate fi scrisă ca:

$$m\ddot{x}(t) = -r + u(t) \quad (3.7.26)$$

unde pentru acest caz forța de reacție din partea mediului în timpul fazei de contact este zero sau  $r = 0$ . Ecuația dinamică a sistemului în contact cu mediul rigid poate fi scrisă astfel:

$$m\ddot{x}(t) = -r + u(t) \quad (3.7.27)$$

unde  $r = k_c(x^* - x)$  pentru  $(x^* - x) < x_n^c$  este forța de reacție care acționează asupra masei în timpul interacțiunii cu un mediu rigid iar  $k$  este un model al complianței.



**Fig. 3.23 Variabilele de poziție implicate în interacțiune**

Se definește în continuare un regulator atât pentru faza de contact cât și pentru faza de non-contact de forma:

$$u(t) = \begin{cases} u(t)^1 = k_p(x^d - x) - k_d \dot{x} & \text{pentru } r < 0 \\ u(t)^2 = k_p(r - r^d) - k_d \dot{x} & \text{pentru } r > 0 \end{cases} \quad (3.7.28)$$

unde  $x^d$ ,  $\dot{x}^d$  este traiectoria dorită a EF, iar  $r^d$  este forța de contact dorită spre a fi exercitată asupra mediului ( $x^d$  este generat conform unei strategii de explorare planificată pentru a localiza mediul necunoscut). În momentul în care contactul este detectat regulatorul reglează forța de contact preconizată/dorită și specificată prin  $r^d$ . Luând în considerare relația între forța de contact și variabilele de stare ale mecanismului, regulatorul  $u(t)^2$  poate fi scris ca:

$$u(t)^2 = k_p(k_c x^d - k_c x) - k_d k \dot{x} \quad (3.7.29)$$

Definind de exemplu  $e = (x^d - x) - x_c$ , o reprezentare a intrărilor de comandă din ecuațiile (3.7.28) și (3.7.29) poate fi stabilită ca în figura 3.24.

Se poate observa în această reprezentare că regulatorul este discontinuu în jurul originii când contactul inițial dintre robot și mediu este detectat.

În general, cele două modele dinamice ale obiectului în ambele regiuni poate fi scris ca în relația:

$$m\ddot{x}(t) = -r + u(t) \quad (3.7.30)$$

Planul drept al sistemului descris cu ecuația diferențială de mai sus este discontinuu. Discontinuitatea provine atât datorită prezenței reacției de forță din mediu cât și din cauza naturii regulatorului la  $x+x_n^c = x^*$ .

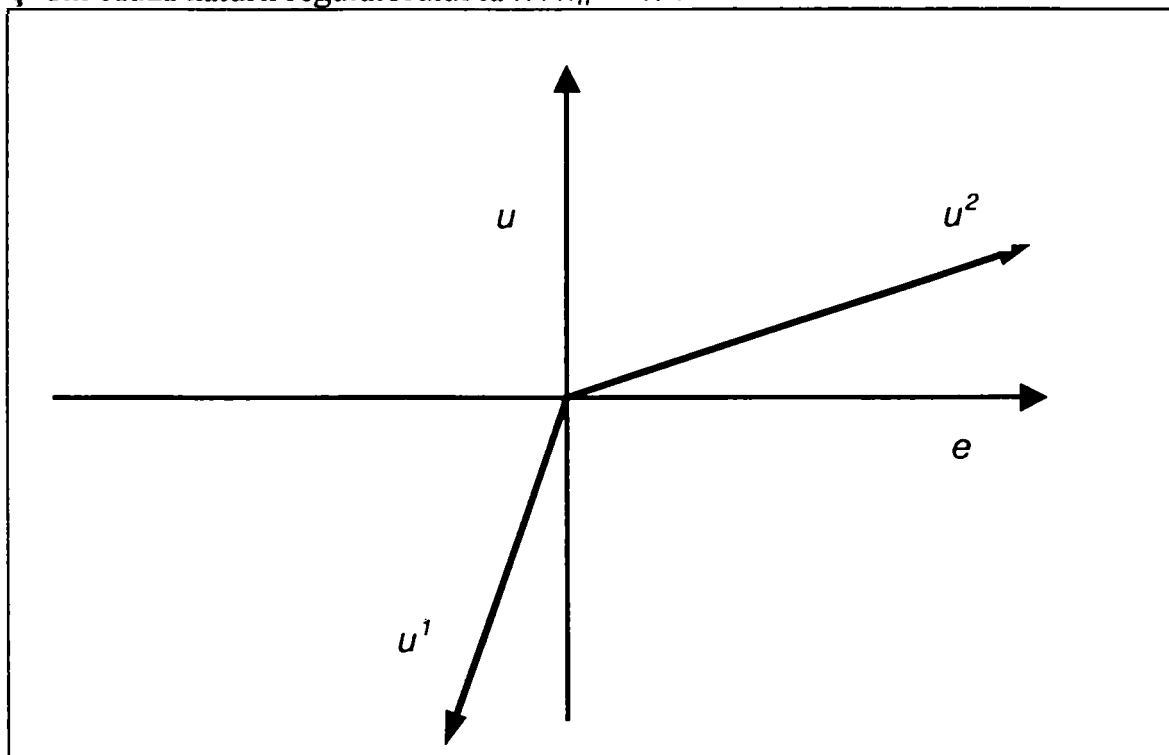


Fig. 3.24 O definiție a unui regulator discontinuu

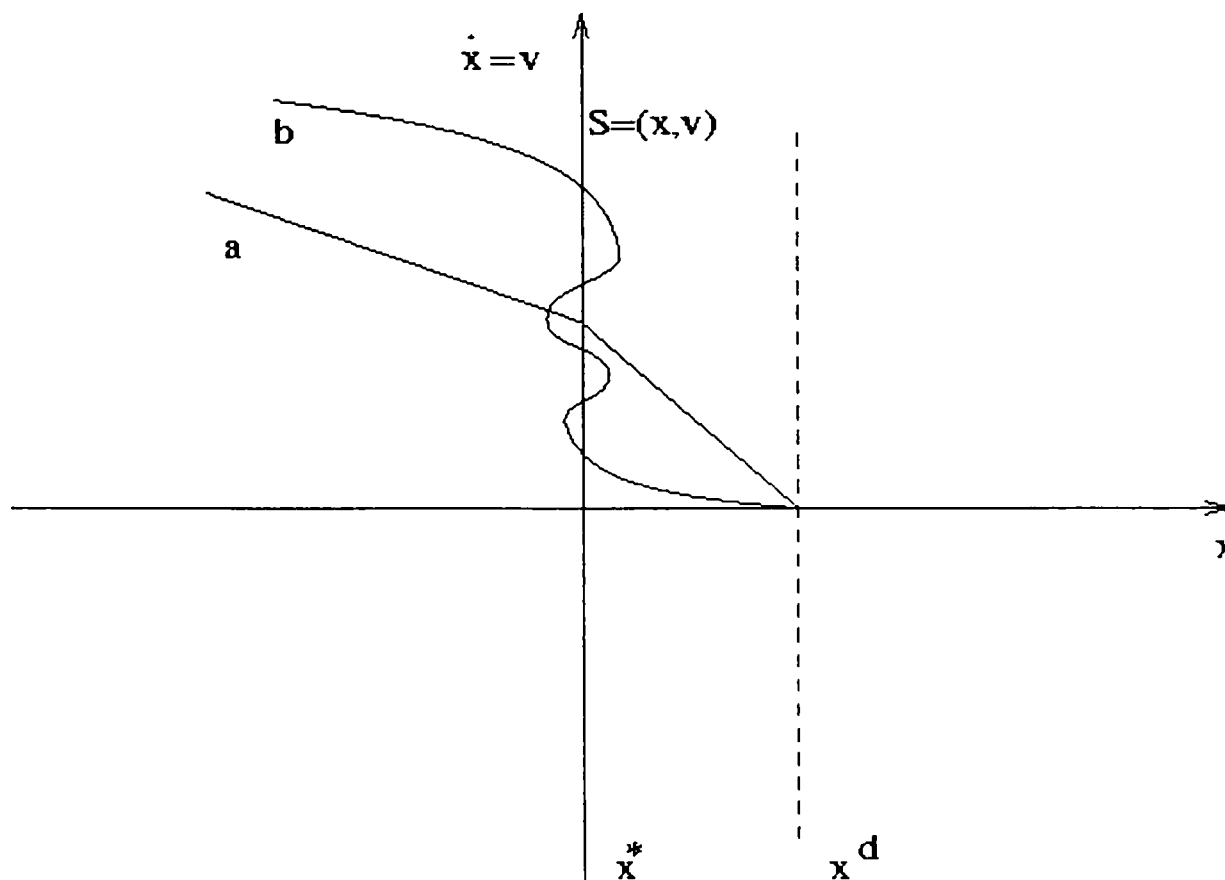


Fig. 3.25 Definiția discontinuității în variabilele de stare

Setul de puncte din spațiul stărilor unde planul drept al ecuației (3.7.30) este discontinuu se numește o suprafață de discontinuitate similar cu cea ce s-a relevat în teoria structurilor variabile. Pentru acest exemplu, suprafața de discontinuitate  $S$ , poate fi reprezentată de relația

$$S = \{(x, v) \in R^2 \mid s(x, v) = 0\} \quad (3.7.31)$$

Această suprafață împarte spațiul fazei în două regiuni deschise,

$$R^+ = \{(x, v) \in R^2 \mid s > 0\} \text{ și } \{(x, v) \in R^2 \mid s < 0\} \quad (3.7.31')$$

În interiorul acestor regiuni, planul drept al figurii 3.24 satisface condiția Lipschitz și astfel este garantată existența, unicitatea și dependența continuă a soluției pentru condițiile date. Parcurșurile de variație în timp a soluțiilor sunt bine definite și continue până în momentul în care ating suprafața de discontinuitate  $S$  unde derivatele de stare sunt discontinue. Noțiunea de soluție pentru (3.7.30) trebuie generalizată pentru parcursuri de variație în timp ale acestora care au derivate discontinue. Figura 3.25 prezintă două tipuri de parcursuri de variație. Variația  $b$  corespunde cazului în care robotul oscilează la suprafața discontinuă  $s(x, v) = 0$  și regulatorul comută de la mișcarea liberă la mișcarea coarșrânsă. Variația  $a$  reprezintă mișcarea după o traiectorie a robotului care nu are nici un fel de salturi la suprafața naturală de discontinuitate.

#### 3.7.5.4 Existența soluției

Fie  $\dot{x} = f(x, t)$  o reprezentare a sistemului dinamic (reprezentare în spațiul stărilor a dinamicii sistemului fizic) unde  $x \in R^n$ . Expresia  $f(x, t)$  unde  $f: R^n \times R \rightarrow R^n$  reprezintă o funcție cu valori vectoriale, continuă pe porțiuni într-un domeniu finit  $G$  acesta constând la rândul lui dintr-un număr finit de domenii  $G_i$ . Fie  $M$  un set de puncte limită ale acestor domenii. Pentru fiecare punct  $(t, x)$  ale domeniului  $G$ , se specifică un set  $F(t, x)$  acesta fiind un spațiu  $n$ -dimensional. Dacă în punctul  $(t, x)$  funcția  $f$  este continuă, setului  $F(t, x)$  îi corespunde un punct; acesta are o valoare care coincide cu valoarea funcției  $f$  în punctul respectiv. Dacă  $(t, x)$  este un punct de discontinuitate al funcției  $f$ , setul  $F(t, x)$  trebuie definit. Soluția ecuației  $\dot{x} = F(t, x)$  este numită soluția incluziunii diferențiale:

$$\dot{x} \in F(t, x) \quad (3.7.32)$$

Obiectivul urmărit este construcția lui  $(t, x)$  în punctul de discontinuitate al funcției  $f$ , prin care incluziunea diferențială (3.7.32) poate fi aplicată pentru a aproxima descrierea procesului.

Se consideră cazul din exemplul în care  $f(t, x)$  este discontinuă pe o suprafață netedă  $S$  dată de  $s(x, v) = 0$ . Suprafața  $S$  separă vecinătatea sa din spațiul  $x$  în domeniile  $G^-$  și  $G^+$  (înainte și după contactul cu mediul), pentru  $t = ct$  și pentru punctul  $x^*$  apropiindu-se de punctul  $x \in S$  din domeniul  $G^-$  și  $G^+$ . Dacă pentru funcția  $f(t, x^*)$  valorile limită sunt definite astfel (soluția lui Filippov):

$$\lim_{x^* \in G^-, x^* \rightarrow x} f^-(t, x^*); \quad \lim_{x^* \in G^+, x^* \rightarrow x} f^+(t, x^*)$$

atunci setul  $F(t, x)$  este un segment linear care leagă capetele vectorilor  $f(t, x)$  și  $f^+(t, x)$  (figura 3.27).

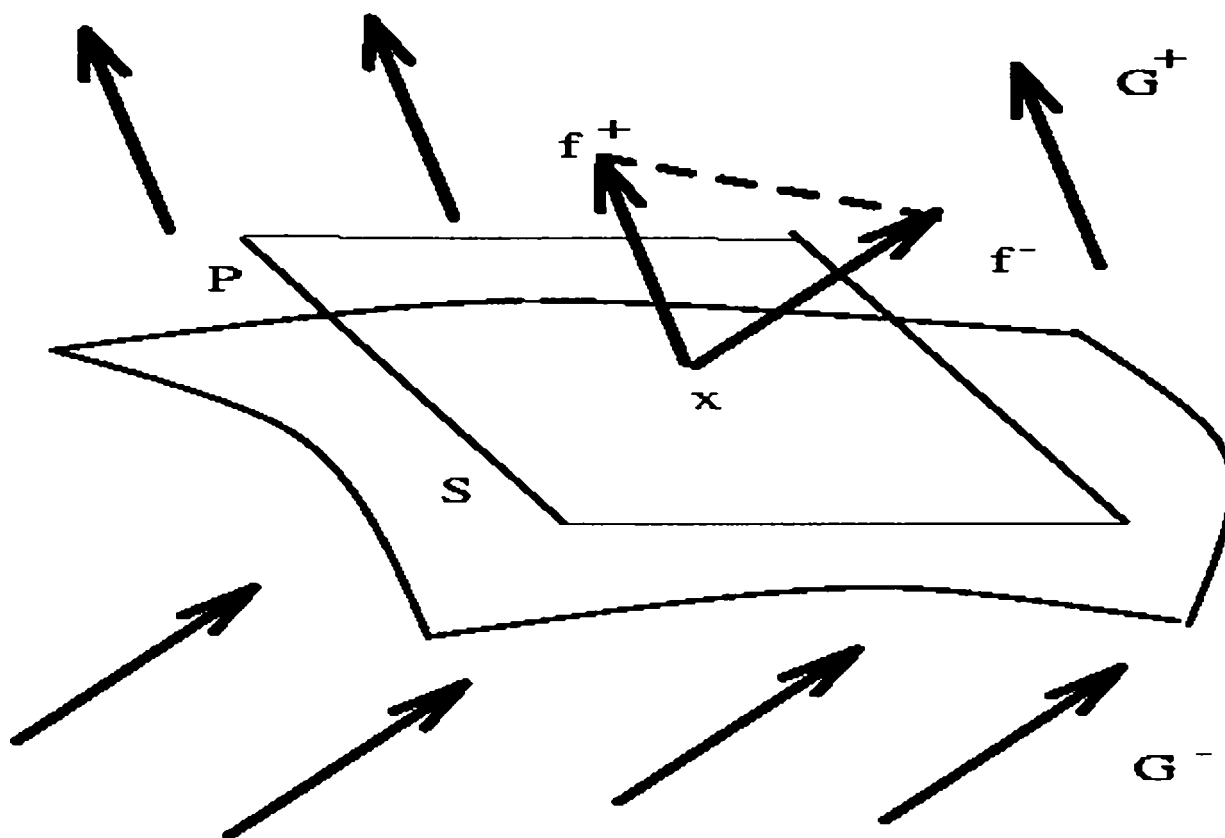


Fig. 3.26 O soluție a incluziunilor diferențiale

Acesta poate fi definit și drept un vector funcție de  $x$  și se numește soluție în intervalul  $[t_0, t_1]$  dacă este absolut continuu în intervalul respectiv pentru cele mai multe valori  $t \in [t_0, t_1]$ :

$$\dot{x} \in K[f](x) \tag{3.7.33}$$

unde:

$$K[f](x) = \overline{co} \{ \lim f(x^*) \mid x^* \rightarrow x : x^* \in N_f \cup N \} \tag{3.7.34}$$

iar  $N_f \subset R^m, \mu N_f = 0$ .

Semnificația soluției Filippov este aceea că vectorul tangent la acea soluție, dacă există, trebuie să se afle în vecinătatea convexă a valorilor limitative ale câmpului de vectori în vecinătăți progresiv mai mici în jurul punctului soluție ( $B(x, \delta)$ ) sau

$$K[f](x) \equiv \bigcap_{\delta > 0} \bigcap_{\mu N = 0} \text{cof}(B(x, \delta) - N, t) \quad (3.7.34')$$

Se menționează că Filippov a prezentat un algoritm pentru calculul incluziunii diferențiale care apoi a fost verificat.

### 3.7.5.5 BAnai za reguiatoruiiu care conduce s stemui spre o stare i ps tă de nstab i tă

Fie modelul robotului în faza de non-contact exprimată în sistemul de coordonate a efectorului său final:

$$M_{\bar{x}} \ddot{\bar{x}} + h_{\bar{x}} + g_{\bar{x}} = F \quad (3.7.35)$$

cu semnificațiile termenilor enunțate anterior.

Fie un regulator nelinear dat de relația:

$$F = \tilde{M}_{\bar{x}} F_1' + \tilde{h}_{\bar{x}} + \tilde{g}_{\bar{x}} \quad (3.7.36)$$

unde  $F = (\ddot{x}^f - \dot{e}_1 - e_1 + F_1)$  și  $F$  se vor fi defini mai târziu., iar mărimile notate cu "tilda" reprezintă estimări ale vectorilor Coriolis și gravitațional, și respectiv a parametrilor curenți.

Substituind legea de reglare dată de ecuația (3.7.36) în ecuația dinamică în buclă deschisă, apoi extinzând și simplificând se obține:

$$\ddot{e}_1 + \dot{e}_1 + e_1 = F_1 + \tilde{M}_{\bar{x}}^{-1} (\tilde{M}_{\bar{x}} - M_{\bar{x}}) \ddot{\bar{x}} + \tilde{M}_{\bar{x}}^{-1} ((\tilde{h}_{\bar{x}} - h_{\bar{x}}) + (\tilde{g}_{\bar{x}} - g_{\bar{x}})) \quad (3.7.37)$$

În faza de contact, ecuația dinamică a sistemului poate fi scrisă ca:

$$M_{\bar{x}} \ddot{\bar{x}} + h_{\bar{x}} + g_{\bar{x}} = F - R \quad (3.7.38)$$

unde  $R = K_c x$  este forța de contact exprimată ca o deformare a efectorului final compliant de la dimensiunile sale nominale. Regulatorul neliniar dat de relația (3.7.36) poate fi scris ca:

$$F = \tilde{M}_{\bar{x}} F_2' + \tilde{h}_{\bar{x}} + \tilde{g}_{\bar{x}} + \tilde{R} \quad (3.7.39)$$

unde  $\tilde{M}_{\bar{x}}$  este o estimare a matricei de inerție,  $\tilde{h}_{\bar{x}}$  este o estimare a vectorului forța Coriolis și gravitațională și  $\tilde{g}_{\bar{x}}$  este o estimare a perturbațiilor și incertitudinilor.  $R$  este o măsură a vectorului forța de contact curent. În ecuația de mai sus  $F_2'$  este definit ca:

$$F_2' = \left[ (\ddot{R}^r - \dot{R}^e - R^e) / K_C + F_2 \right] \quad (3.7.40)$$

unde  $R^e = R - R^r$ . Aici  $(R)^r$  semnifică parametri de referință, iar  $F_2$  "rond" este regulatorul robust de forță care va fi definit mai târziu.

Înlocuind ecuațiile (3.7.40) și (3.7.38) și apoi în ecuațiile ce exprimă dinamica în buclă deschisă se va obține:

$$\begin{aligned} & - \left[ (\ddot{R}^r - \dot{R}^e - R^e) / K_C + F_2 \right] = \\ & = -\tilde{M}_{\bar{x}}^{-1} M_{\bar{x}} \ddot{\bar{x}} + \tilde{M}_{\bar{x}}^{-1} \left[ (\tilde{h}_{\bar{x}} - h_{\bar{x}}) + (\tilde{g}_{\bar{x}} - g_{\bar{x}}) + (\tilde{R} - R) \right] \end{aligned} \quad (3.7.40')$$

Adăugând  $\ddot{\bar{x}}$  în ambii membri și încorporând relația referitoare la complianța EF a robotului se obține relația :

$$\begin{aligned} & \ddot{R}^e + \dot{R}^e + R^e - K_C F_2 = \\ & = K_C \tilde{M}_{\bar{x}}^{-1} (M_{\bar{x}} - \tilde{M}_{\bar{x}}) \ddot{\bar{x}} + K_C \tilde{M}_{\bar{x}}^{-1} \left[ (\tilde{h}_{\bar{x}} - h_{\bar{x}}) + (\tilde{g}_{\bar{x}} - g_{\bar{x}}) + (\tilde{R} - R) \right] \end{aligned} \quad (3.7.40'')$$

sau

$$\ddot{R}^e + \dot{R}^e + R^e = K_C F_2 + K_C W \quad (3.7.41)$$

unde  $W$  este un vector al incertitudinilor defint mai sus. Ecuația de mai sus poate fi scrisă în următoarea formă specifică spațiului stărilor:

$$\dot{x} = Ax + Bu + BW \quad ; \quad y = Cx \quad (3.7.42)$$

unde  $x = (R^e; \dot{R}^e)^T$  și  $B$  conține modelul compliant al EF. Se combină forma de mai sus cu un model auxiliar dinamic:

$$\dot{\xi} = \Lambda \xi + \beta R^e \quad (3.7.43)$$

Ecuația de mai sus este folosită pentru a modela intrările exogene ce pot acționa asupra sistemelor (polii acestor modele sunt localizați în planul drept al axei imaginare). Se obțin următoarele ecuații ale unui sistem dinamic:

$$\begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\xi} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ \beta C & \Lambda \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ \xi \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} W \quad (3.7.43')$$

unde ieșirea este definită ca:



$$y = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ \xi \end{Bmatrix} \quad (3.7.43'')$$

sau putem scrie sub forma:

$$\dot{z} = \bar{A}z + \bar{B}u + \bar{B}W \quad (3.7.44)$$

Efectul forței de impact reprezentat cu  $\Gamma$ , de mărime limitată și de durată scurtă este presupus a fi modelat ca o componentă aditivă a forței de contact  $R$ . Urmând aceeași derivare ca și în cele de mai sus, dinamica sistemului, prin includerea termenului aditiv de impact poate fi exprimată astfel:

$$\dot{z} = \bar{A}z + \bar{B}u + \bar{B}W + \bar{B}\bar{\Gamma} \quad (3.7.45)$$

unde  $\bar{\Gamma}$  este exprimat ca o reducere de ordinul I a efectului forței de impact fiind inversa matricii masice sau :  $\bar{\Gamma} = \tilde{M}^{-1} \bar{x} \Gamma$

Obiectivul devine proiectarea unei intrări adiționale de comandă  $u$  care să confere sistemului în buclă închisă stabilitate în prezența unor incertitudini limitate definite prin  $W(|W| \leq \rho)$  și apoi în combinație cu prezența unei forțe limitate de impact  $\Gamma$ . Obiectivul demersului în plan real, devine proiectarea unui regulator care să conducă la performanțe stabile și robuste ale robotului în diferite etape ale mișcării. Apoi pe baza performanțelor regulatorului în diferite regiuni de discontinuitate se pot deduce performanțele la suprafața de discontinuitate. Se definește un regulator de forma  $u$ :

$$u = Kz + p \quad (3.7.46)$$

În general matricea factorilor de amplificare  $K$  poate fi aleasă astfel încât aceasta să stabilizeze polii de instabilitate ai sistemului definit în ecuația (3.7.36) și apoi polii de instabilitate ai ecuațiilor dinamice auxiliare definite în (3.7.37). Fie noul sistem în buclă închisă definit conform relației :

$$\begin{aligned} \dot{z} &= [\bar{A} + \bar{B}K]z + \bar{B}p + \bar{B}W \\ &= \tilde{\bar{A}}z + \bar{B}p + \bar{B}W \end{aligned} \quad (3.7.47)$$

Pentru cazul unei forțe de contact limitate se poate defini sistemul în buclă închisă ca în relația (3.7.48):

$$\dot{z} = \tilde{\bar{A}}z + \bar{B}p + \bar{B}W + \bar{B}\bar{\Gamma} \quad (3.7.48)$$

Intrarea  $p$  a regulatorului este defintă ca

$$p = \begin{cases} -\frac{\bar{B}^T P_x}{\|\bar{B}^T P_x\|} \rho & \text{dacă } \|\bar{B}^T Pz\| > \varepsilon \\ -\frac{B^T P_x}{\varepsilon} \rho & \text{dacă } \|\bar{B}^T Pz\| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (3.7.49)$$

unde  $\rho$  este limita pentru incertitudini iar  $\varepsilon$  este un număr pozitiv mic determinat de proiectant.  $P$  este o matrice simetrică definită pozitiv reprezentând soluția ce urmează ecuația Lyapunov pentru  $Q > 0$  :

$$P\tilde{A} + \tilde{A}^T P = -Q \quad (3.7.50)$$

Trebuie menționat că valorile factorilor de amplificare  $K$  sunt alese astfel încât  $\tilde{A}$  este asimptotic stabil adică  $\lambda(\tilde{A}) \in C$ , unde  $C$  corespunde semiplanului stâng al planului complex. În cele ce urmează se va arăta că regulatorul de forma  $p$  definită în (3.7.43) conferă sistemului (3.7.41) și apoi (3.7.42) o stabilitate globală practică. Aceasta implică una din cele două alternative privind soluția sistemului: aceasta trebuie să fie uniform limitată sau uniform definitiv limitată.

*Teorema 1.*

*Sistemul definit în ecuația (3.7.45) cu  $|W| < \rho$  cu controlerul definit în (3.7.46) este un sistem cu stabilitate globală practică unde soluția este uniform definitiv limitată.*

*Demonstrație*

Se consideră funcția candidat Lyapunov de forma :

$$V = z^T P z \quad (3.7.51)$$

Implementând regulatorul definit cu (3.7.43) în ecuația (3.7.41) derivata funcției candidat Lyapunov pe parcursul de variație în timp a soluției poate fi scrisă astfel:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{z}^T P z + z^T P \dot{z} \\ &= -z^T Q z + 2\alpha^T (u + W) \\ &\leq -\lambda_{\min}(Q) \|z\|^2 + 2\alpha^T (\rho + W) \end{aligned} \quad (3.7.52)$$

unde s-a definit  $\alpha = |\bar{B}^T P z|$ . Prin inegalitatea Rayleigh-Ritz (notând că variabila  $Q$  este o matrice definită pozitiv) se impune:  $\lambda_{\min}(Q) z^T z \leq z^T Q z$  și  $\lambda_{\min} > 0$ . Dacă se consideră regulatorul din ecuația (3.7.43) pentru  $|\alpha| > \varepsilon$  impus în ecuația (3.7.46) se poate exprima:

$$\begin{aligned} \alpha^T (u + W) &= \alpha^T \left( \frac{-\alpha \rho}{\|\alpha\|} + W \right) \\ &= \alpha^T \left( \frac{-\alpha \rho}{\|\alpha\|} \right) + \alpha^T W \\ &\leq \left\| \alpha^T \left( \frac{-\alpha \rho}{\|\alpha\|} \right) \right\| + \|\alpha^T W\| \\ &= -\|\alpha\| \rho + \|\alpha\| \rho = 0 \end{aligned} \quad (3.7.53)$$

și pentru cazul  $|\alpha| \leq \varepsilon$  se va respecta relația :

$$\begin{aligned}
 \alpha^T(u+W) &= \alpha^T\left(\frac{-\alpha\rho}{\varepsilon} + W\right) \\
 &\leq \alpha^T\left(-\frac{\alpha\rho}{\varepsilon}\right) + \|\alpha\|\rho \\
 &= -\|\alpha\|^2\rho/\varepsilon + \|\alpha\|\rho \\
 &= \left(-\|\alpha\|^2/\varepsilon + \|\alpha\|\right)\rho
 \end{aligned} \tag{3.7.54}$$

Valoarea maximă a expresiei de mai sus se obține când  $|\alpha| = \varepsilon/2$ , atunci când este validă relația :

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min}(Q)\|z\|^2 + \varepsilon\rho/2 \tag{3.7.55}$$

și prin urmare

$$\dot{V} < 0 \tag{3.7.56}$$

unde  $\lambda_{\min} > 0$  deoarece  $Q$  este definit pozitiv. Astfel condiția (3.7.50) este întâlnită în orice moment și pentru orice  $z$  respectându-se relația:

$$\lambda_{\min}(Q)\|z\|^2 - \varepsilon\rho/2 > 0 \tag{3.7.57}$$

Limitele pentru eroare pot fi obținute astfel:

$$\|z\| \geq \left(\frac{\varepsilon\rho}{2\lambda_{\min}(Q)}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{3.7.58}$$

*Teorema 2.*

*Dat fiind modelul din ecuația (3.7.42) cu limitele asupra vectorului incertitudine  $W$  și  $\Gamma$ , regulatorul definit ca  $\rho = -(\alpha / |\alpha|)\bar{\rho}$  și  $\rho = -(\alpha / \varepsilon)\bar{\rho}$  unde  $\rho$  este noua limită pentru vectorul incertitudinilor și al forței de impact iar  $\varepsilon$  este un nou scalar ales de proiectant pentru cazul sarcinilor de impact rezultă că sistemul în buclă închisă este practic global stabil și soluția, adică vectorul eroare  $z$  este uniform și definitiv limitat.*

*Demonstrație*

Se ia în considerare funcția candidat Lyapunov în forma definită de ecuația (3.7.45) Rata schimbării în această funcție candidat pe parcursul de variație în timp a soluției poate fi scrisă conform cu relația:

$$\dot{V} = -z^T Qz + 2\alpha^T(\rho + W + \bar{\Gamma}) \tag{3.7.59}$$

respectiv inegalitatea Rayleigh-Ritz poate fi scrisă sub forma relației:

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min}(Q)\|z\|^2 + 2\alpha^T(\rho + W + \bar{\Gamma}) \tag{3.7.60}$$

Din ecuația (3.7.54) se poate observa că efectul forței în impuls cauzată de impactul robotului cu mediul intervine ca rată de schimbare a funcției Lyapunov. De altfel efectul ei este multiplicat cu un factor de magnitudine  $|\bar{B}^T P z|$  care include modelul complianței EF al robotului dată în definiția lui  $B$ . Fiind dat  $P$  efectul forței de impact asupra stabilității sistemului în buclă închisă poate fi redus prin introducerea unei structuri mai complante sau a unui material mai compliant (mărime diminuată a lui  $K_c$ ). De exemplu proiectantul poate recurge la introducerea unui EF compliant în proiectarea robotului. Concluzia: mărimea lui  $|\bar{B}^T P z|$  poate fi redusă prin proiectarea adecvată a structurii mecanice a robotului:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\lambda_{\min}(Q) \|z\|^2 + 2\alpha^T (u + \varphi + \Gamma) \\ &\leq -\lambda_{\min}(Q) \|z\|^2 + \|\alpha\| (-\|\alpha\| \rho \varepsilon + W + \bar{\Gamma}) \end{aligned} \quad (3.7.61)$$

Urmând argumente similare ca și în teorema anterioară pentru  $|\alpha| \geq \varepsilon$  rezultă ecuația:

$$\begin{aligned} \alpha^T (\rho + W + \bar{\Gamma}) &= \alpha^T \left( \frac{-\alpha \bar{\rho}}{\|\alpha\|} + W + \bar{\Gamma} \right) \\ &\leq \left\| \alpha^T \left( \frac{-\alpha \bar{\rho}}{\|\alpha\|} \right) \right\| + \|\alpha^T (W + \bar{\Gamma})\| \\ &= \|\alpha\| (-\bar{\rho} + \|W + \bar{\Gamma}\|) = 0 \end{aligned} \quad (3.7.62)$$

Întrucât  $\lambda_{\min} > 0$  ecuația de mai sus și ecuația (3.7.54) implică  $W < 0$ . Argumente similare pot fi aduse și pentru a dovedi stabilitatea sistemului în buclă închisă pentru cazurile în care  $|\alpha| \leq \varepsilon$ . În ecuația (3.7.55) se poate scrie

$$\begin{aligned} \alpha^T (\rho + W + \Gamma) &= \alpha^T \left( \frac{-\alpha \bar{\rho}}{\|\alpha\|} + W + \bar{\Gamma} \right) \\ &\leq \left\| \alpha^T \left( \frac{-\alpha \bar{\rho}}{\|\alpha\|} \right) \right\| + \|\alpha^T \bar{\rho}\| \\ &= (-\|\alpha\|^2 / \bar{\varepsilon} + \|\alpha\|) \bar{\rho} \end{aligned} \quad (3.7.63)$$

Valoarea maximă a expresiei de mai sus se atinge când  $|\alpha| = \varepsilon / 2$ . Prin urmare  $\dot{V} \leq -\lambda_{\min}(Q) \|z\|^2 + \bar{\varepsilon} \bar{\rho} / 2$  pentru care  $\dot{V} < 0$ , unde  $\lambda_{\min} > 0$  (întrucât, după cum s-a specificat,  $Q$  este definită pozitiv). Astfel condiția de stabilitate de mai sus se menține pentru toate valorile timpului și ale lui  $z$ . Drept consecință, întrucât  $\lambda_{\min} > 0$  este posibilă exprimarea limitei erorii:

$$\lambda_{\min}(Q) \|z\|^2 - \bar{\varepsilon} \bar{\rho} / 2 > 0 \quad (3.7.64)$$

respectiv:

$$\|z\| \geq \left( \frac{\bar{\varepsilon} \rho}{2\lambda_{\min}(Q)} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.7.65)$$

Un regulator similar poate fi folosit și în cazul mișcării libere înainte ca robotul să intre în contact cu mediul. Pentru acest caz se poate arăta că există deasemenea o funcție candidat Lyapunov de forma  $V_1 = z_1^T P_1 z_1$  astfel încât  $\dot{V}_1 < 0$ . Drept rezultat în această regiune se poate obține un sistem în buclă închisă cu stabilitate practică globală. În punctul de discontinuitate teorema de stabilitate asimptotică globală a lui Lyapunov pentru continuitatea sistemelor se poate modifica înlocuind derivata  $\dot{V}(\cdot)$  cu derivata Dini  $D^* V(\cdot)$  unde steluța reprezintă patru derivate Dini posibile.

În fiecare punct în care derivata  $V$  există, toate cele patru derivate Dini vor avea valori comune egale cu derivata în acel punct. În punctele aparținând lui  $S$  trebuie examinate derivatele Dini. Toate discontinuitățile sunt simple și de aici atât limitele din dreapta cât și cele din stânga există în afara lui  $S$ . Derivatele Dini sunt valori limitative simple. Întrucât  $\dot{V}$  este negativă și semidefinită pentru toate punctele din afara lui  $S$  derivatele Dini sunt negative și semidefinite pentru puncte în  $S$ .

### 3.7.6 Studiul experimental al sistemului discontinuu

În sursele consultate, se menționează că fezabilitatea regulatorului studiat a fost demonstrată printr-o serie de experimente. Obiectivele experimentului au fost să se investigheze performanțele modelului discontinuu al sistemului definit prin ecuațiile (3.7.40) și (3.7.41) în care regulatorul este comutat din faza de non-contact în faza de contact în urma detectării contactului. Pentru aceste experimente factorii de amplificare și momentele de comutare au fost apriori selectate. În toate elementele mișcarea robotului s-a efectuat de-a lungul unei singure axe a sistemului de coordonate a EF.

Sistemul de calcul utilizat a fost un calculator compatibil IBM-PC drept calculator gazdă și o placă Spectrum 320C30DSP ca servocontroler. Utilizatorul scrie legea de reglare în limbajul de programare C sub DOS și îl descarcă în placa DSP pentru execuție. În timpul rulării, DSP-ul execută secvența fără întrerupere din partea gazdei. DSP-ul are memorie dual port ceea ce înseamnă că poate accesa această memorie pentru a citi sau a scrie fără a întrerupe DSP-ul sau viceversa. Generarea de traiectorie pentru robot este făcută pe calculatorul gazdă care a calculat punctele de referință pentru regulator spre a fi urmărite. Aceste puncte de referință se transferă regulatorului aflat pe DSP. S-au folosit două sisteme de acționare NSK Megatorque cu acționare direct drive pentru a mișca cele două elemente. Motoarele sunt capabile să genereze cuplu de mare putere (cuplul maxim = 249Nm), au frecare scăzută și sunt echipate cu traductor de poziție unghiular de precizie (153600 impulsuri/tură). S-a folosit un senzor forță-cuplu pe 6 axe (ATI 15/50) pentru măsurarea forțelor de contact. Acest senzor pe 6 axe poate citi forțe până la 8 kgf și are o frecvență de eșantionare maximă de 2500Hz (aceasta este rata care s-a și folosit în experimente). Elementele robotului sunt confecționate din aluminiu, cu secțiuni transversale în formă de semi-I, reducând practic flexibilitatea elementelor la zero (construcție cu elemente foarte rigide).

## **4. Noi soluții de module de interfețe inteligente sistem activ - mediu cu grad de libertate $L = 1$ . Modelarea matematică și simularea funcționării lor [Bog96], [Bog98], [Dra79], [Kov92], [Kov96b], [Kov96c], [Kov97], [Kov97a], [Kov98], [Kov98a], [Kov99], [Man97], [Vuk95a]**

### **4.1 Definiția și rolul interfeței inteligente sistem activ - mediu cu $L = 1$**

#### **4.1.1 Introducere**

Controlul activ și inteligent al forței generalizate de contact care apare în timpul interacțiunii dintre un sistem activ și mediu se poate realiza (în conformitate cu cele expuse pe larg în capitolul 3) prin două modalități distincte:

- ◇ acțiunea asupra gradelor de libertate (funcțional-dinamice sau/și suplimentare) ale sistemului activ cu mijloacele/modulele de conducere ale acestuia (în cazul sistemelor moderne realizată prin configurația hard&soft proprie și a propriilor mijloace de acționare);
- ◇ intercalarea unui (sub)sistem-interacțiune suplimentar (de sine stătător) între cele două sisteme, subsistem dedicat exclusiv controlului forței de contact; acesta se constituie practic într-o interfață a sistemelor aflate în contact.

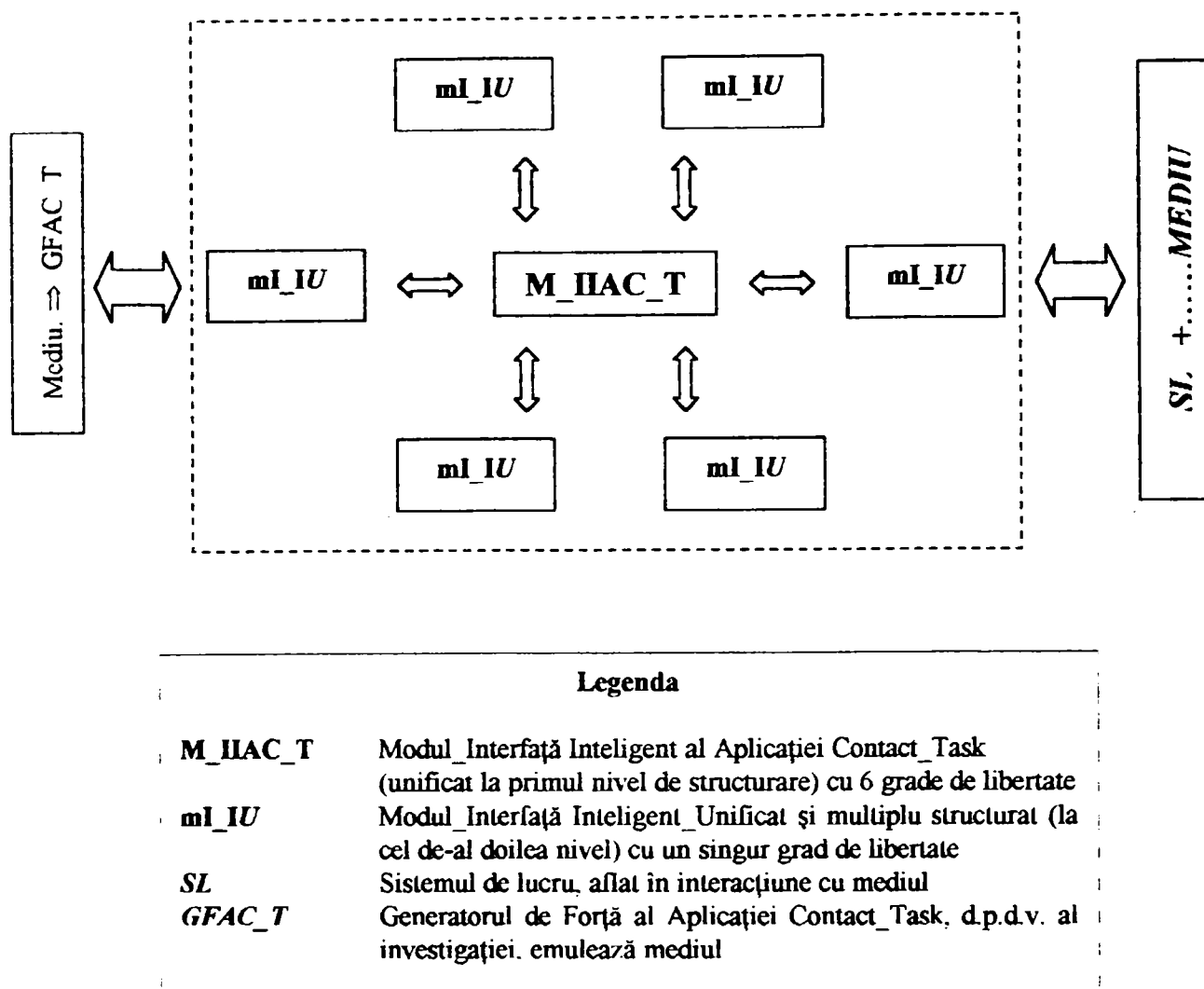
Prin tematica lucrării de doctorat, este impusă cea de-a două modalitate drept obiect al studiului și investigației de față. Scopul urmărit (relativ la forța de contact) poate fi atins în acest caz dacă se acționează în mod "inteligent" (într-un sens relevant pentru evoluția forței de contact) asupra parametrilor adecvați ai acestei interfețe. Din punct de vedere structural-constructiv, o astfel de interfață inteligentă se constituie într-un modul inteligent complex, care are nevoie - în cazul cel mai general - de șase grade de libertate pentru a-și putea exercita controlul asupra tuturor componentelor forței generalizate de contact. Acest fapt se poate constitui drept un serios handicap în procesul de construire a unor astfel de module.

#### **4.1.2 Primul și al doilea nivel de structurare**

Evitarea dificultăților ce decurg din această constatare poate fi realizată prin structurarea - la rândul său - a modulului-interfață complex în șase module simple, posedând fiecare câte un singur grad de libertate, în corespondență cu cele șase componente ale forței de contact.

#### 4. NOI SOLUȚII de MODULE-INTERFAȚĂ INTELIGENTE

Pentru rezolvarea completă a problemei de tip "contact-task", în cazul cel mai general - adoptând soluția impusă prin modalitatea de tratare a aplicației - este necesară parcurgerea următoarelor etape distincte, dar conexe:



**Fig. 4.1 Structura generală a unei aplicații contact task**

- realizarea unui modul-interfață inteligentă cu un singur grad de libertate ( $L=1$ ) capabil să realizeze controlul unei mărimi de tip forță sau moment, cea ce implică o structură activă de tip cuplă de translație sau cuplă de rotație; fiind evident faptul că prin atașarea adecvată a unei cuple de rotație (pasive) la un braț determinat, se poate controla o mărime de tip moment prin intermediul unei mărimi de tip forță, simplificarea maximă poate fi realizată prin optiunea pentru un modul-interfață inteligent de tip translație activă; prezentarea acestui modul se efectuează pe parcursul capitolului 4;
- conceperea unui modul complex, capabil să înglobeze structural și constructiv șase module de translație activă având capacitatea de control inteligent asupra tuturor componentelor forței generalizate de contact (atât a celor trei mărimi de tip forță cât și a celor trei mărimi de tip moment); prezentarea acestuia este subiectul capitolului 5.

Cele două etape pun în evidență două nivele de structurare diferite. Ținând cont de gradul de complexitate înglobat în modulele care rezultă (**M\_IIAC\_T** și **mI\_IU** în conformitate cu notațiile de la figura 4.1, notații care vor fi utilizate pe parcursul expunerii), ierarhia nivelelor de structurare este inversă ordinii în care au fost prezentate

expunerii), ierarhia nivelelor de structurare este inversă ordinii în care au fost prezentate aceste etape: prin “destructurarea” de nivel I a  $M_{IIAC\_T}$ , rezultă 6 module  $mI_{IU}$ . Acestea vor fi analizate și “destructurate” la rândul lor la nivelul al doilea de complexitate.

### 4.1.3 Modelarea modului-interfață inteligent cuplă de translație activă

Din punctul de vedere al **Teoriei Sistemelor** și respectiv al **Teoriei Modelării**, (conform capitolului 2) o astfel de abordare se încadrează în studiul sistemului-interacțiune (SI din capitolul 3) drept sistem (în fapt model) unificat, constituit din (sub)sisteme elementare. Acestea, la rândul lor reprezintă modele unificate pentru modelele elementare constitutive, după cum va fi relevat în continuare. Prin această prismă, procesul de modelare atât a  $M_{IIAC\_T}$ , cât și a  $mI_{IU}$  poate fi reprezentat schematic sub forma “procedurii” de la figura 4.2.

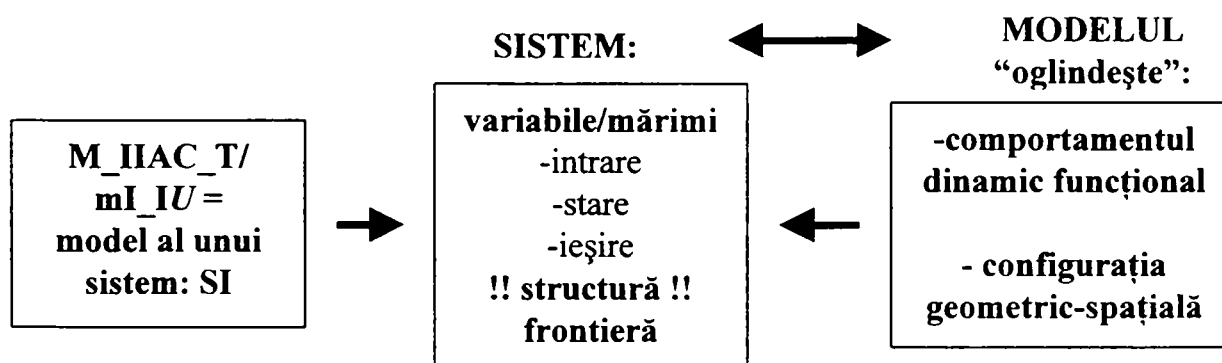


Fig. 4.2 Procesul de modelare a sistemului-model  $M_{IIAC\_T} / mI_{IU}$

Acceptând opțiunea enunțată mai sus, primul pas în rezolvarea aplicațiilor de tip “contact-task” este definirea completă a unui modul-interfață inteligent de translație activă, urmând traseul procesului de modelare, apoi validarea ca urmare a simulărilor efectuate. Aceasta presupune - la rândul său - rezolvarea următoarelor probleme:

- ◇ identificarea parametrilor și a structurii funcționale a unui sistem care - interpus fiind între sistemul activ și mediu - are posibilitatea să rezolve problemele legate de forța de interacțiune
- ◇ modelarea fizică, structural-funcțională și matematică adecvată a acestuia
- ◇ simularea sistemului apelând la modelul elaborat
- ◇ elaborarea soluției constructive a modului în conformitate cu modelul structural-funcțional cu care se efectuează investigații experimentale.

#### 4.1.3.1 Identificarea parametrilor și a structurii funcționale a sistemului modul-interfață inteligentă cu un singur grad de libertate; modelarea “primară” a acestuia

În cazul cel mai general, orice sistem este caracterizat de parametri impedanței mecanice pe de o parte (în conformitate cu figura 3.1) la care se adaugă cei termodinamici, (termo)chimici, electromagnetici, de radioactivitate etc., pe de altă parte. Prin modul în care s-a definit problematica aplicațiilor de tip “contact-task”, marea majoritate a acestor aplicații face parte din sfera aplicațiilor mecano-tehnice, la care influența determinantă este exercitată de mărimi de tip mecanic, prin impedanța



radioactivitatea și nici parametri termochimici sau termodinamici nu au o influență relevantă asupra procesului de interacțiune. Singura excepție - în anumite condiții - o constituie parametrul temperatură dacă este semnificativ variabil în timp sau/și în spațiu parametru care poate influența comportamentul dinamic al ansamblului prin intermediul mărimii poziție/deplasare.

Pot exista însă aplicații de tip mecanic, la care intervin și parametri hidro-, sau aerodinamici în funcție de mediu.

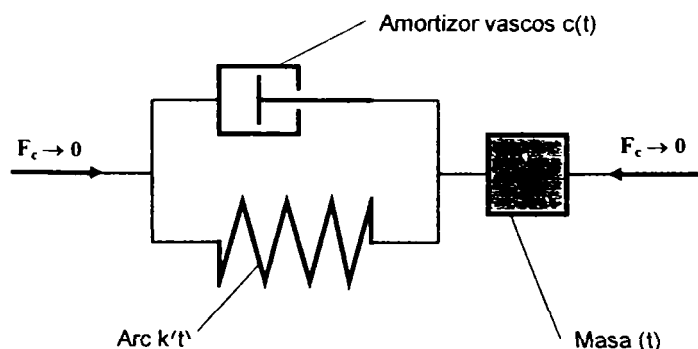
Drept urmare, identificarea sistemului-interacțiune SI (sursă virtuală a investigației de identificare, care se constituie în modulul-interfață inteligent **mI\_IU**) conduce la un model dinamic-funcțional mecanic. Parametri care intervin sunt deci cei determinați de aspectele impedenței mecanice: de masă, elasticitate, amortizare.

Asupra acestor parametri trebuie acționat pentru acordarea inteligentă a modulului la mărimea de tip forță la care este supus în timpul interacțiunii. În general - din punct de vedere structural (în conformitate cu Teoria Sistemelor) - pot exista două modalități distincte de rezolvare a variației controlate, necesare, a acestor parametri:

- ◆ printr-un model sintetic, care are posibilitatea de variație a mai multor parametri; este puțin probabil ca o astfel de abordare să conducă la module structural-funcționale realizabile
- ◆ printr-un model unificat, alcătuit din modele elementare, fiecare din acestea având responsabilitatea de a controla câte unul din parametrii impedenței mecanice; această abordare permite alcătuirea unui modul structural-funcțional realizabil dacă se concepe o structură-suport adecvată pentru integrarea rațională - din punct de vedere constructiv - a submodulelor elementare corespunzătoare (figura 4.3).

În cadrul prezentei lucrări, s-a recurs la cea de-a doua modalitate, prin adoptarea unui model unificat care scoate în evidență comportamentul (la nivel global) al sistemului sursă alcătuit din submodule elementare. Acestea vor fi prezentate în subcapitolele următoare. Modelul matematic corespunzător este un model de tip ecuație de mișcare. În subcapitolul 3.5 este analizat pe larg acest tip de model matematic, prezentându-se formele utilizabile în diferite situații. Forma uzuală - cu semnificația cunoscută a termenilor - este următoarea:

$$mx'' + cx' + kx = F \quad (4.1)$$



**Fig. 4.3 Modelul mecanic unificat al sistemului-interacțiune; se disting submodulele elementare componente**

Ecuția exprimă în mod relevant aspectul mecano-tehnic al aplicațiilor de tip "contact-task", dar forma definitivă a acesteia depinde de forma finală a modelului prin definirea submodulelor structural-tehnice (în conformitate cu subcapitolele următoare). Această procedură de urmat este obligatorie pentru modelele foarte complicate, multiplu structurate, caz în care etapele care au fost parcurse se pot constitui în modelarea "primară" a sistemului-sursă.

#### 4.1.3.2 Modalități de variație a parametrilor impedanței mecanice

Pentru a-și îndeplini funcția, sistemul-interacțiune trebuie deci să aibe capacitatea de a-și modifica propria impedanță mecanică prin acțiunea inteligentă, adaptivă asupra fiecăreia din componentele sale (inerțial-masică, de amortizare și de elasticitate) cu sisteme de acționare proprii asupra acestor parametri.

O analiză a posibilităților lor de modificare (inițiată la subcapitolul 3.2) relevă aspecte care sunt prezentate în paragrafele următoare.

**A.** Pentru masa  $m$  este necesară introducerea în - sau extragerea din - structura dinamic activă a sistemului, a unor entități purtătoare de masă. Dificultatea rezidă în faptul că cererile aleatorii - din punctul de vedere al mărimii masei de introdus - impun necesitatea unui control fin, precis al acestei mărimi și deci, adăugarea unor entități purtătoare de masă în fracțiuni suficient de mici pentru satisfacerea acestei necesități. Purtătorul de masă variabilă poate fi o incintă specializată atașată structurii modulului-interfață.

Dacă se optează pentru entități solide, o posibilitate este utilizarea unor pulberi din diferite materiale, caz în care adaptarea are loc în mod discretizat. Incinta specializată trebuie proiectată pentru cantitatea maximă de material ce trebuie introdus, iar granulația pulberii trebuie corelată cu posibilitățile sistemului tehnic de manipulare (discretizată) a acesteia pe de o parte și cererile de modificare a masei, pe de altă parte. Este însă puțin probabil să poată fi realizate soluții tehnice performante (cu suficientă precizie în timp real) de astfel de sisteme.

Dacă se optează pentru o entitate fluidă, adaptarea poate fi efectuată în mod continuu. Un avantaj constă în faptul că există totodată și incinte specializate standardizate, larg experimentate și utilizate în sistemele robotice, care (alături de alte componente specializate) pot îndeplini exigențele de precizie și promptitudine impuse: incinta variabilă a cilindrilor hidraulici sau pneumatici. Controlul cantității de fluid introdus (deci și al masei) se efectuează prin volumul acestor incinte, iar alegerea fluidului de utilizat este determinată de asigurarea unui raport stabil dintre volum și masă. Din această cauză cilindrii pneumatici nu pot fi utilizați, aerul (ca de altfel orice alt gaz sau amestec gazos) fiind compresibil.

În concluzie, în ceea ce privește parametrul masă, singura posibilitate rațională de influențare **directă** a inerției este introducerea/extragerea în/din sistem a unei cantități determinate de lichid incompresibil (ulei hidraulic),  $m_v(t)$ . Lichidul se adaugă la masa inițială,  $m_s$ , constantă, a sistemului, determinată de masa tuturor componentelor ("solide") din structura modulului. Masa rezultată:  $m = m_v + m_s$  este cea care intervine drept parametru în modelul matematic al interacțiunii. Cea mai convenabilă soluție tehnică în acest caz este utilizarea unui cilindru hidraulic în combinație cu o componentă specializată. Rămâne însă deschisă problema măsurii în care această soluție poate influența semnificativ/suficient  $m_s$  (proiectantul fiind cel care decide - în funcție de gabaritul componentelor - oportunitatea modificării acestui parametru).

Există însă posibilitatea de influențare **indirectă** a inerției sistemului - pentru cazuri particulare - prin intermediul unor mecanisme care modifică adecvat **masa redusă**

a unor componente deja existente constructiv, respectiv dispuse special pentru acest scop.

**Observație:** în contextul celor expuse, trebuie precizat că în cazul cel mai general, parametrul în discuție este masa generalizată; pentru acordarea la valorile cerute ale momentelor de inerție masice aferente unor module cu cuple de rotație, există posibilitatea suplimentară de variație a distribuției adecvate a masei față de axa de rotație,

**B.** În cazul caracteristicii de amortizare  $c$ , există două posibilități tehnice distincte: utilizarea fenomenului de frecare uscată și respectiv a celui cu frecare vâscoasă. Amândouă au fost studiate și îndelung experimentate datorită faptului că sistemele care fac uz de aceste fenomene intră în componența suspensiilor autovehiculelor. La cele cu frecare uscată s-a renunțat din cauza dezavantajelor constatate, care le fac practic de neutilizat, chiar și în cazul autovehiculelor. Cu atât mai mult în cadrul unui sistem de tip robotic.

În concluzie, soluția tehnic-posibilă poate recurge exclusiv la utilizarea fenomenului de frecare vâscoasă a unui fluid care trece forțat printr-un interstițiu de pasaj hidraulic dispus între două incinte incluse în sistem. Interstițiul se constituie în rezistență hidraulică, cele două incinte sunt specializate iar fluidul de lucru care le umple, incompresibil. O astfel de soluție este folosită și de constructorii suspensiilor de autovehicole, cu observația că există pe piață foarte multe variante constructive. Pentru a putea fi utilizate în aplicația care interesează, cilindrii hidraulici folosiți de regulă drept astfel de incinte trebuie să fie - din punct de vedere constructiv - adaptate pentru a fi adecvate scopului urmărit, scop diferit de cel al suspensiilor mai sus menționate.

În cazul cel mai general, și fenomenul de frecare vâscoasă oferă două posibilități de a realiza modificarea caracteristicii de amortizare: prin variația vâscozității propriuzise a fluidului de lucru și prin modificarea dimensiunii interstițiului, care atrage după sine variația rezistenței hidraulice a acestuia. Nu se exclude o acțiune combinată. În ambele cazuri se impune - din aceleași motive cu cele expuse la parametrul masă - utilizarea unui lichid incompresibil.

Parametrul temperatură - de care depinde vâscozitatea unui lichid - nu poate fi utilizat în acest scop atât datorită plajei limitate de variabilitate dar mai ales din cauza inerției disproporționate a fenomenelor termice (relativ la cerințele în timp real a sistemului). Pentru impunerea unei variații semnificative a vâscozității însă, pot fi utilizate proprietățile fluidelor magneto/electro-reologice (cu condiția necesară să fie incompresibile; figura 4.8).

Dacă se optează pentru cea de-a doua variantă, soluția impune utilizarea principiului aplicat la amortizoarele autovehiculelor. Cu observația esențială însă, că, modificarea controlată a caracteristicii de amortizare presupune - obligatoriu - posibilitatea de control a interstițiului-rezistență hidraulică, cu ajutorul unor elemente plasate în interiorul, sau în exteriorul cilindrului hidraulic respectiv (figurile 4.7 și 4.8)

**C.** Pentru caracteristica elastică, există posibilitatea utilizarea unei entități de tip arc. Aceasta se poate constitui într-un (sub)ansamblu alcătuit dintr-un grup de arcuri de caracteristică elastică liniară și/sau neliniară, dispuse într-o structură care să ofere posibilitatea unei caracteristici variabile **în mod direct**, la cerere (soluție dificil de realizat) sau **în mod indirect**, modificând (cu diferite mijloace) **prestrângerea** elementului arc.

Trebuie menționat că, în acest caz, pentru controlul caracteristicii elastice a sistemului se modifică de fapt valoarea întregului termen legat de această caracteristică din modelul matematic relevant:  $kx$ . Acceptând un arc de  $k=const$ , deplasarea totală  $x$  rezultă din însumarea micromișcării  $x_i$  a sistemului de lucru în contact cu mediul și

deplasarea  $y(t)$  la nivelul arcului având drept scop tensionarea/detensionarea acestuia:  $x = x_s + y(t)$ .

Soluțiile tehnic-posibile - în conformitate cu această analiză - sunt prezentate în subcapitolul 4.2.

#### 4.1.2.3 Modalități de conducere (acțiune asupra parametrilor impedanței mecanice)

Pentru a-și îndeplini rolul, modulul-interfață inteligent **mI\_IU** trebuie să aibe posibilitatea de conducere inteligentă prin operațiuni de:

- ◇ sesizare a variației mărimii de tip forță;
- ◇ comandă - în sensul cerut de aplicație - a modificării parametrilor impedanței mecanice la nivelul fiecărui submodul (cu entitățile/elementele sale active), pe baza unor legi de conducere determinate, adecvate, implementate în prealabil; operațiunea trebuie să se bazeze pe principiul de reglare cu legătură inversă, iar sistemele de acționare trebuie să opereze prompt în conformitate cu comanda emisă;
- ◇ sesizare a mărimii și variației parametrilor impedanței mecanice pentru fiecare submodul în parte.

Aceste sarcini pot fi duse la îndeplinire cu ajutorul unui modul complex de conducere a cărui parte de comandă este alcătuită în principal cu ajutorul unei configurații hard/soft. Structura generală a modelului poate fi prezentată în forma relevantă prin figura 3.4 de la subcapitolul 3.2.3.

Drept legi de conducere a aplicației pot fi alese (sau construite) acele relații dintre marimile caracteristice, care determină diminuarea forței de contact.

Valoarea rezultantei forțelor exterioare (=forța de contact), accesibilă prin intermediul senzorilor (cuprinși în subansamblul sistem de traductoare) reprezintă principalul parametru de comandă pentru sistemul de conducere.

Legile de conducere (reglare) - în cazul adoptat, al controlului prin impedanță - reprezintă de fapt variația: masei  $m$ , a coeficientului de amortizare  $c$  și a deplasării  $y$  /respectiv a forței de acționare, în timp, având drept parametrii de intrare forța de contact și parametrii de stare anterioară. Dacă se exprimă valoarea predictibilă a acestora relativ la timpul curent  $t_i$ , se obțin relații de forma celor prezentate la subcapitolul 3.2.3 (relațiile 3.2.11, 3.2.12 și 3.2.13) reproduse în continuare:

$$m_{i+1} = m(m_i, \Delta F(t_i), x_i, \dot{x}_i, (c_i, k_i)) \quad (4.2)$$

$$c_{i+1} = c(c_i, \Delta F(t_i), x_i, \dot{x}_i, (m_i, k_i)) \quad (4.3)$$

$$y_{i+1} = y(y_i, \Delta F(t_i), x_i, \dot{x}_i, (m_i, c_i)) \quad (4.4)$$

Pentru aplicarea acestor legi în acțiunea nemijlocită de conducere a sistemului-interacțiune SI este nevoie de implementarea unor algoritmi specifici prin secvențe soft adecvate.

#### 4.1.2.4 Analiza structurală completă a unui modul-interfață inteligent [Luc99a]

Conferirea posibilității de sesizare/control asupra parametrilor în cadrul submodulelor elementare mecanice aferente fiecărui parametru, presupune - la acest nivel - atașarea de submodule specializate pentru aceste operațiuni, astfel că - în final -

submodulul elementar/parametru este la rândul său un modul unificat "pe orizontală" dintr-un (sub)submodul mecanic/comportamental și unul de sesizare/control. La nivelul modulului mecano-tehnic complex, sistem unificat în felul explicat mai sus, o acțiune de conducere inteligentă poate fi conferită doar prin atașarea unui sistem specializat capabil să "unifice" (pe verticală) acțiunile (sub)submodulelor elementare de sesizare/control/parametru. Acesta poate fi denumit modul complex de conducere.

Dintr-un astfel de punct de vedere, modulul-interfață inteligent de translație activă este dublu structurat:

- ◇ pe "orizontală"
- ◇ la nivel superior (după tipul acțiunilor și sfera în care se încadrează comportamentul): modulul mecanic complex și modulul de conducere complex
- ◇ la nivel elementar (pentru fiecare parametru): submodulele de tip mecanic și respectiv de sesizare/control
- ◇ pe "verticală", deoarece fiecare dintre cele două module complexe este la rândul său un model unificat din submodule elementare

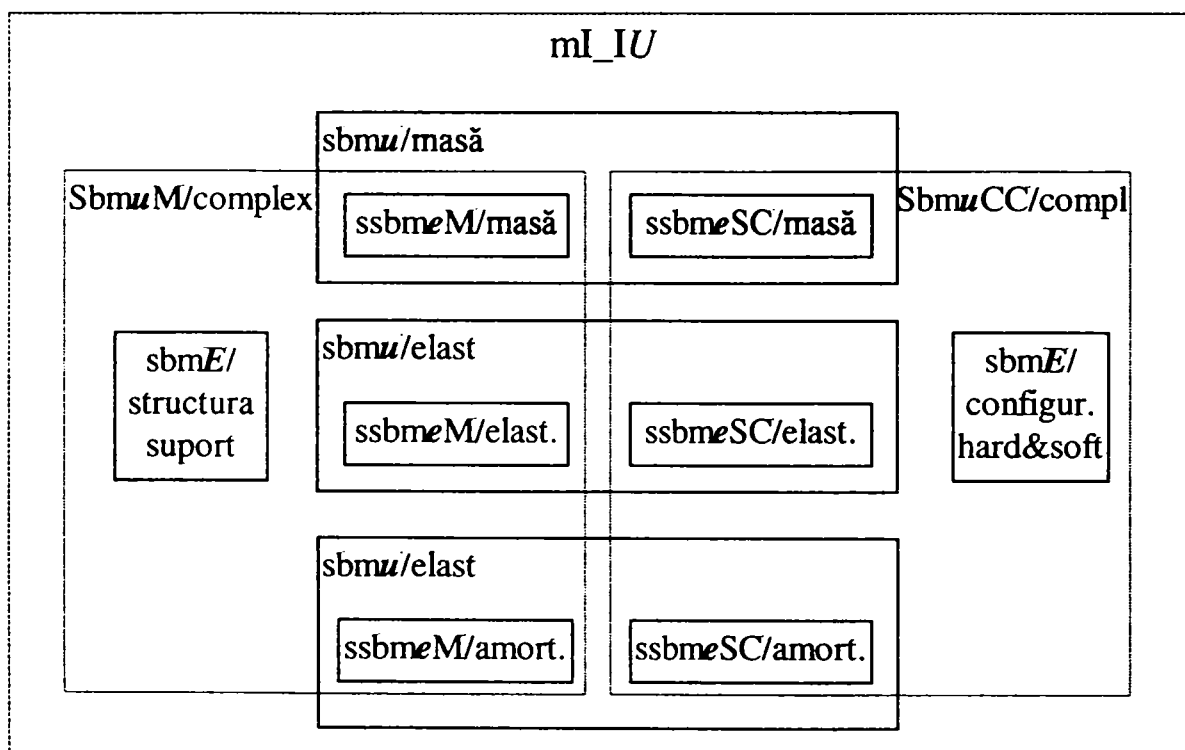


Fig. 4.4 Modulul-interfață inteligent ml\_IU (unificat și multiplu structurat)

În figura 4.4 este redată o posibilă reprezentare schematică a structurii complete a modelului unui astfel de modul-interfață inteligent (notat în continuare cu ml\_IU) în care prin dreptunghiuri s-au reprezentat entitățile de tip modul.

S-au notat cu "sbm" entitățile submodul, cu observația că prefixul suplimentar "s" indică un nivel inferior pentru acestea (subsubmodul), sau/și faptul că acestea participă la o dublă structurare: pe orizontală și pe verticală. Notățiile cu caractere bold-italice au următoarele semnificații

*e* - entitate elementară de nivel inferior (cu dublă subordonare)

*E* - entitate elementară de nivel superior (cu simplă subordonare)

*u* - entitate unificată de nivel inferior (care face parte la rândul ei dintr-una de nivel superior, sau este alcătuită exclusiv din entități elementare)

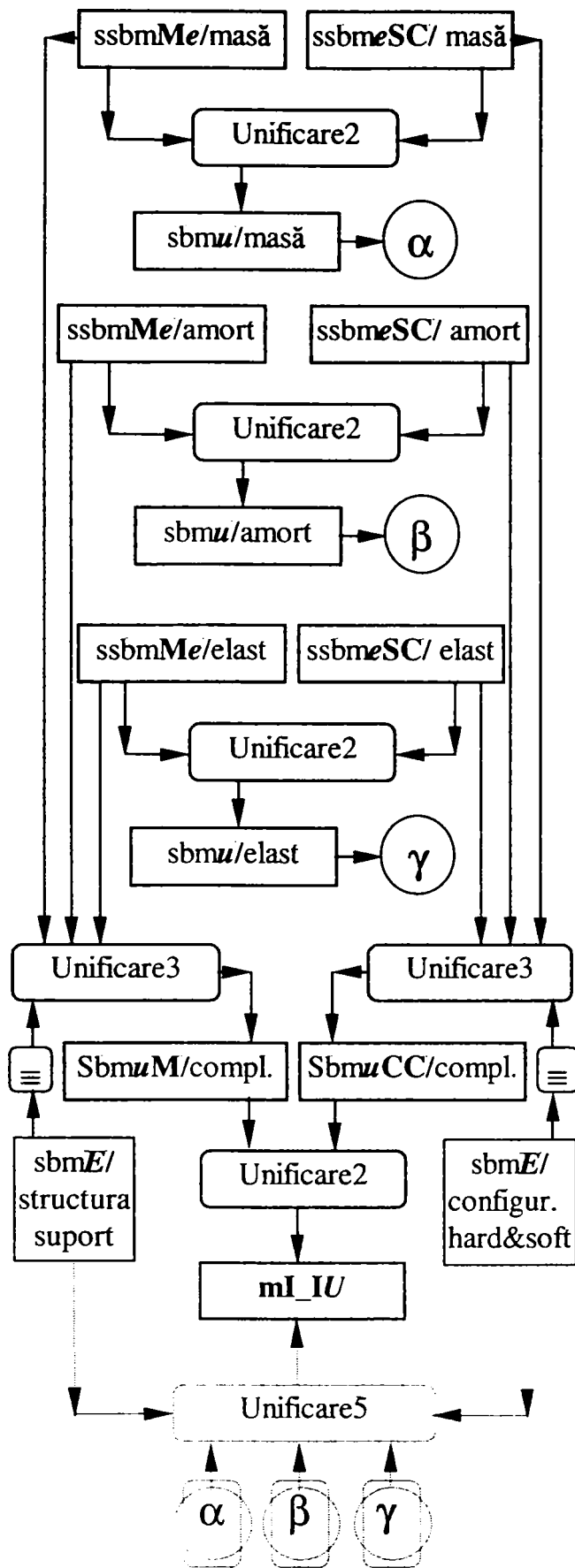


Fig. 4.5 Structura mI\_IU prezentată în maniera mediilor de simulare

*U* - entitate unificată de nivel superior (în a cărei alcătuire intră cel puțin o entitate unificată)

Caracterele- majuscule plasate înaintea caracterului "/" au următoarele semnificații:

M - entitate de tip mecanic

SC - entitate având drept scop acțiuni de sesizare/control

CC - entitate având drept scop acțiuni de conducere/comandă.

Pe măsură ce vor fi analizate în detaliu modulele functionale, se va constata că de fapt și entitățile elementare pot fi structurate fizic sau/și funcțional. Implicarea laturii funcționale atrage după sine modificarea calității entității respective, de la elementar la unificat.

Pentru maniera aceasta de prezentare, pot fi imaginate și alte modalități de notație pentru indicarea structurii concrete a unui sistem: utilizarea - spre exemplu - a caracterelor majuscule pentru indicarea unei entități de nivel superior. Dealtfel, se poate observa că în figură este dublată diferențierea pe nivele prin notație (la modulele complexe), dar și prin stilul liniei care definește dreptunghiurile-entităț.

Dacă adoptăm o manieră de prezentare similară cu cea din mediile soft de simulare, în care esențială este și "prelucrarea" entităților-figură cu ajutorul operatorilor (figurați prin blocuri geometrice), o posibilă reprezentare a structurii mI\_IU poate fi cea din fig. 4.5. Toate entitățile de tip modul au fost reprezentate prin blocuri-dreptunghi normal figurate, pe

când operatorii, prin blocuri cu colțuri rotunjite. Numărul entităților reunite (a intrărilor în blocurile operator) poate fi - eventual - indicat și prin cifre alături de denumirea ("unificare" a) operatorului. O astfel de denumire semnifică operațiunea/ile care realizează "reunirea" funcțională a entităților de la intrare într-o entitate-ansamblu.

În plan real, operatorul "unificare" poate fi materializat printr-o entitate-modul (cum este cazul *sbmE/structura suport*, respectiv *sbmE/config hard&soft*). Conferirea calității de operator unei entități-modul a fost relevată printr-un alt operator (de tip logic-mental) de echivalare (echivalență), în blocul corespunzător fiind inscripționat caracterul "≡". După cum s-a arătat în paragrafele anterioare, *mI\_IU* este multiplu structurat. Nivelul "superior" de structurare (cel normal-funcțional) are "traseele" de structurare prezentate cu linie continuă. Nivelul "inferior" este relevant pentru modul în care este fizic realizată gruparea configurației geometrice, "traseele" de structurare fiind prezentate cu linie punctată.

#### 4.1.3.5 Concluzii privind analiza structurală

##### A. De ordin general

Modelele de genul celor prezentate în figurile 3.1 și 4.3 ale *mI\_IU*, sunt uneori doar modele general explicative ale sistemului sursă, pe baza cărora se poate construi o primă variantă a modelului matematic al acestuia. Pentru oglindirea fidelă a sistemului-interacțiune (deocamdată sistem-sursă virtual în sensul considerațiilor referitoare la Teoria Modelării), acest model trebuie reprezentat în maniera din figurile 4.3 și 4.4, pentru evidențierea clară a structurii sale. Se poate conferi eventual și denumirea de modele multiplu structurate pentru acestea.

Pe baza lor, se poate trece la pasul următor: detalierea - deasemenea schematică - a modului în care se pot realiza tehnic toate submodulele. Operațiunea precede, sau se desfășoară în paralel cu alcătuirea schematică a tuturor (sub)modulelor unificate, pe baza soluțiilor tehnic-posibile de unificare la toate nivelele. În acest stadiu, modelul poate fi denumit model/schemă structural-tehnic/ă. La finalizarea acestuia, se verifică validitatea modelului matematic și, dacă este necesar, se aduc corecturile necesare.

Abia după verificarea validității, este posibilă abordarea soluției constructive a modelului adoptat (pe baza schemei structural-tehnice). Dacă modelarea are drept scop activități de proiectare, urmate de execuție, aceasta poate fi transpusă direct la scară, fără modificări, într-o documentație desenată (de execuție). În cazul unor sisteme mai complicate însă, îndeosebi atunci când la soluția-ansamblu lucrează mai mulți specialiști, poate apare necesitatea de a se alcătui în prealabil o "schemă" suplimentară, simplificată a soluției constructive. În figura 4.6 sunt prezentate etapele de parcurs pentru finalizarea procesului de modelare, în sensul prezentei analize.

Pentru mai multă claritate, se poate completa imaginea modelelor multiplu structurate cu un tabel de corespondență între entitățile-bloc structurale și echivalentul lor fizic. Această corespondență însă poate fi relevată în totalitate abia după realizarea modelului schemei constructive, și poate direcționa fără echivoc procesul de elaborare a documentației desenate.

##### B. Privitor la modelarea mI\_IU

În ceea ce privește modelarea propriuzisă a *mI\_IU*, ea va fi continuată în subcapitolele următoare începând cu elaborarea schemei structural-tehnice pe submodule.

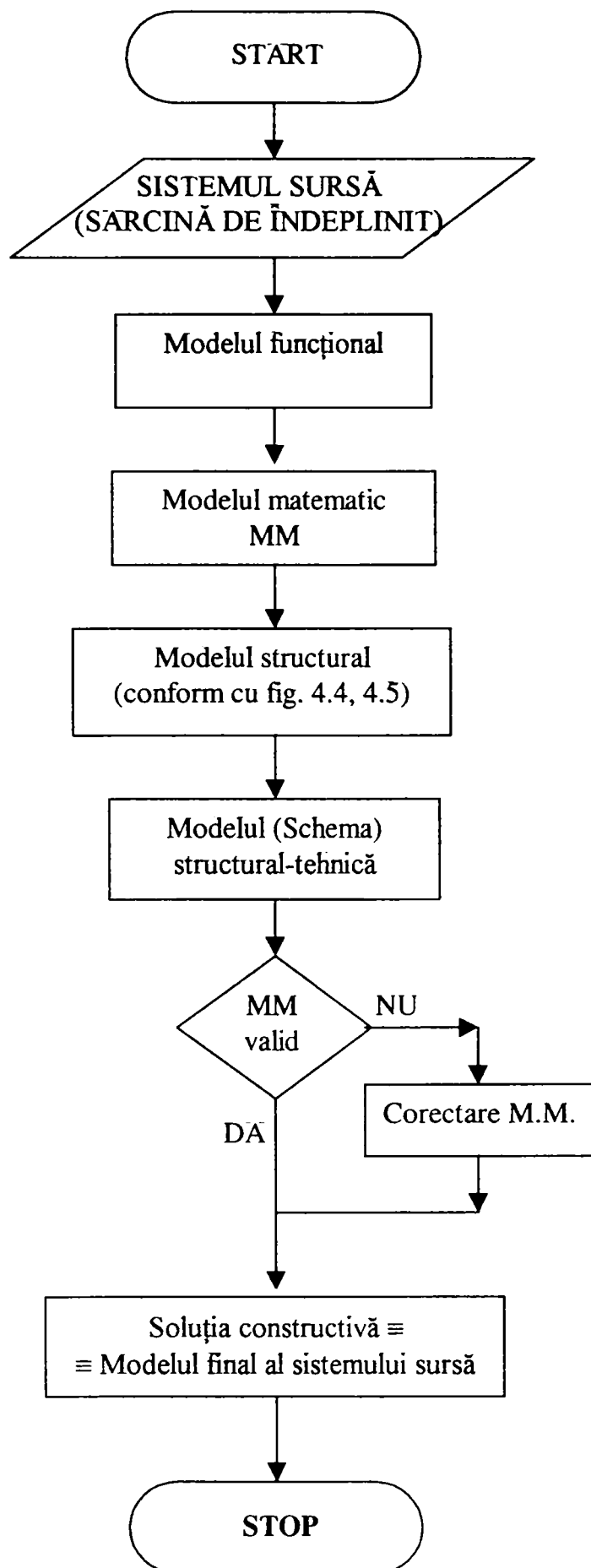


Fig. 4.6 Etapele procesului de modelare în cazul sistemelor puternic structurate



#### 4. NOI SOLUȚII de MODULE-INTERFAȚĂ INTELIGENTE

Se prefigurează câte patru funcții distincte pentru submodulele complexe, prezentate în tabelul 4.1.

**Tabelul 4.1**

<b>Sbm<math>\mu</math>M/complex (partea “mecanică+acționare”)</b>	<b>Sbm<math>\mu</math>CC/complex (partea “conducere+control”)</b>
-funcția de susținere+mișcare de translație -cele trei funcții de modificare/parametru	- achiziție de date - modelare/simulare proces - controlul algoritmilor pentru implementarea legilor de conducere - calcul/convertire digital-analogică/emitere a semnalului de comandă către componentele de execuție ale <b>ssbmCe/parametru</b>

#### **Observație**

*Considerațiile expuse în acest subcapitol se pot constitui în contribuții originale la reprezentarea și descrierea sistemelor din Teoria Sistemelor, și respectiv din Teoria Generală a Modelării.*

*Peste structura relevantă în cadrul acestei analize, se poate suprapune – la faza de proiectare - gruparea componentelor mecanice după apartenența acestora la diferitele categorii specializate de piese (hidraulice, organe de mașini etc.), în conformitate cu subcapitolele 4.6 și 4.7.*

## 4.2 Modelarea submodulelor/parametri ale ml\_IU

s-a efectuat în conformitate cu rezultatele analizei privind variația parametrilor, prezentate la subcapitolul 4.1.2.2. și respectiv cu cele ale analizei multiplu-structurale de la subcapitolul 4.1.2.4. Activitatea de modelare urmează etapele prezentate în figura 4.6 și are drept scop construirea schemelor structural-tehnice, pornind de la modelele "primare" apoi verificarea, corectarea respectiv validarea modelului matematic aferent, precum și (ulterior), alcătuirea soluțiilor constructive pentru fiecare submodule.

### 4.2.1 Submodulul sbmu/masă corespunzător parametrului masă

Variația parametrului masă se realizează prin mijlocirea unor cilindri hidraulici. Scopul enunțat pentru submodulele aferente acestei variații este realizarea unor reacții prompte și exacte la stimuli de tip forță. Sistemele de acționare hidraulice din robotică reprezintă soluția ideală pentru realizarea acestui scop, deoarece parametrul care se controlează (și comandă) este deplasarea pistonului, prin alimentarea cu servovalve (sau distribuitoare proporționale) a cilindrilor hidraulici. Controlul alimentării este implicit și un control al cantității uleiului hidraulic introdus, deci al masei sale,  $m_u$ , care se va adăuga la masa  $m_s$  aceasta din urmă rezultând prin însumarea maselor tuturor componentelor lui ml\_IU aflate în mișcare de translație. Sistemul de conducere trebuie să facă uz de dependența deplasare-masă, dependență oglindită prin relația matematică dintre acestea, ținând cont de construcția unui cilindru:

$$m = \Omega \rho x \quad (4.5)$$

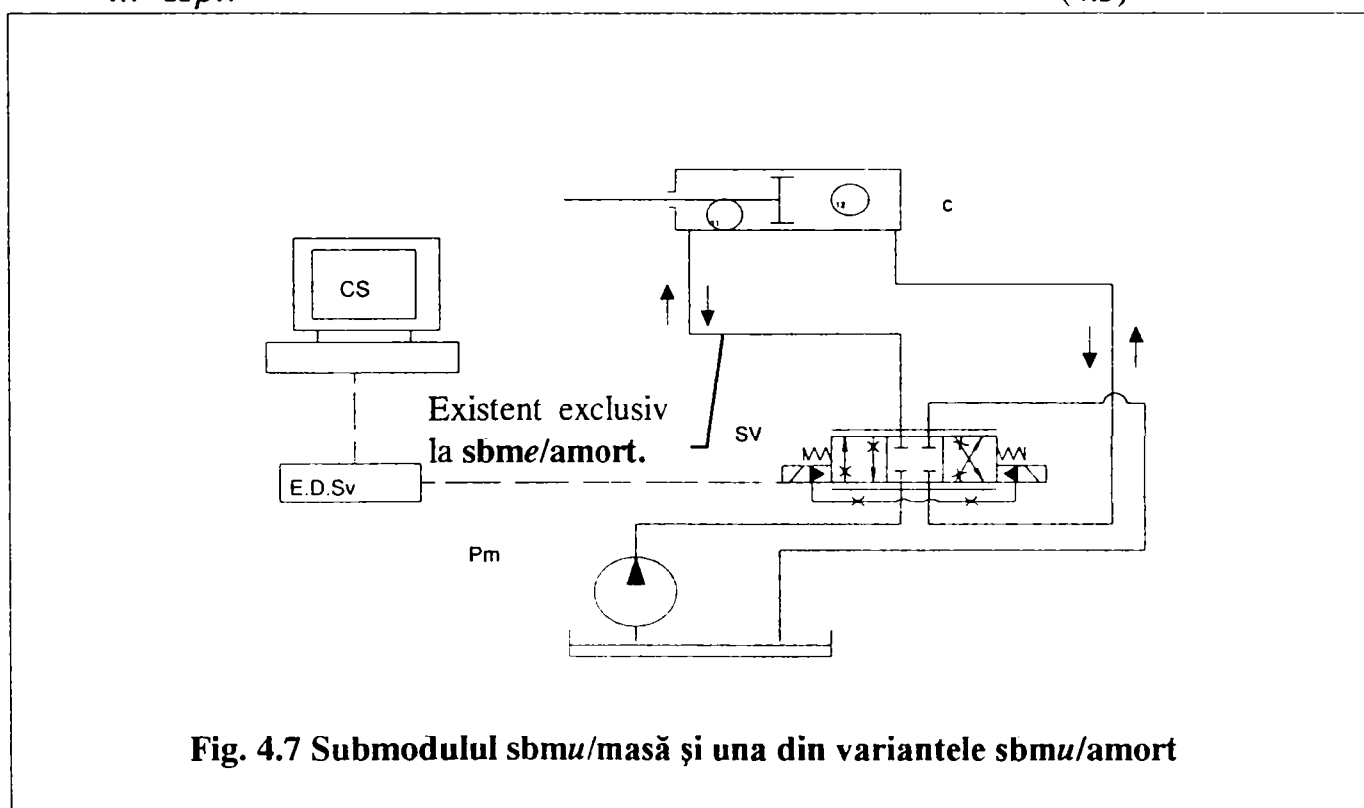


Fig. 4.7 Submodulul sbmu/masă și una din variantele sbmu/amort

unde  $\Omega$  reprezintă aria secțiunii active a cilindrului,  $\rho$ , densitatea uleiului hidraulic, iar  $x$ , deplasarea ce poate fi comandată. În modelul matematic unificat, fiecare termen va fi completat cu un indice pentru identificarea cilindrului la care se referă.

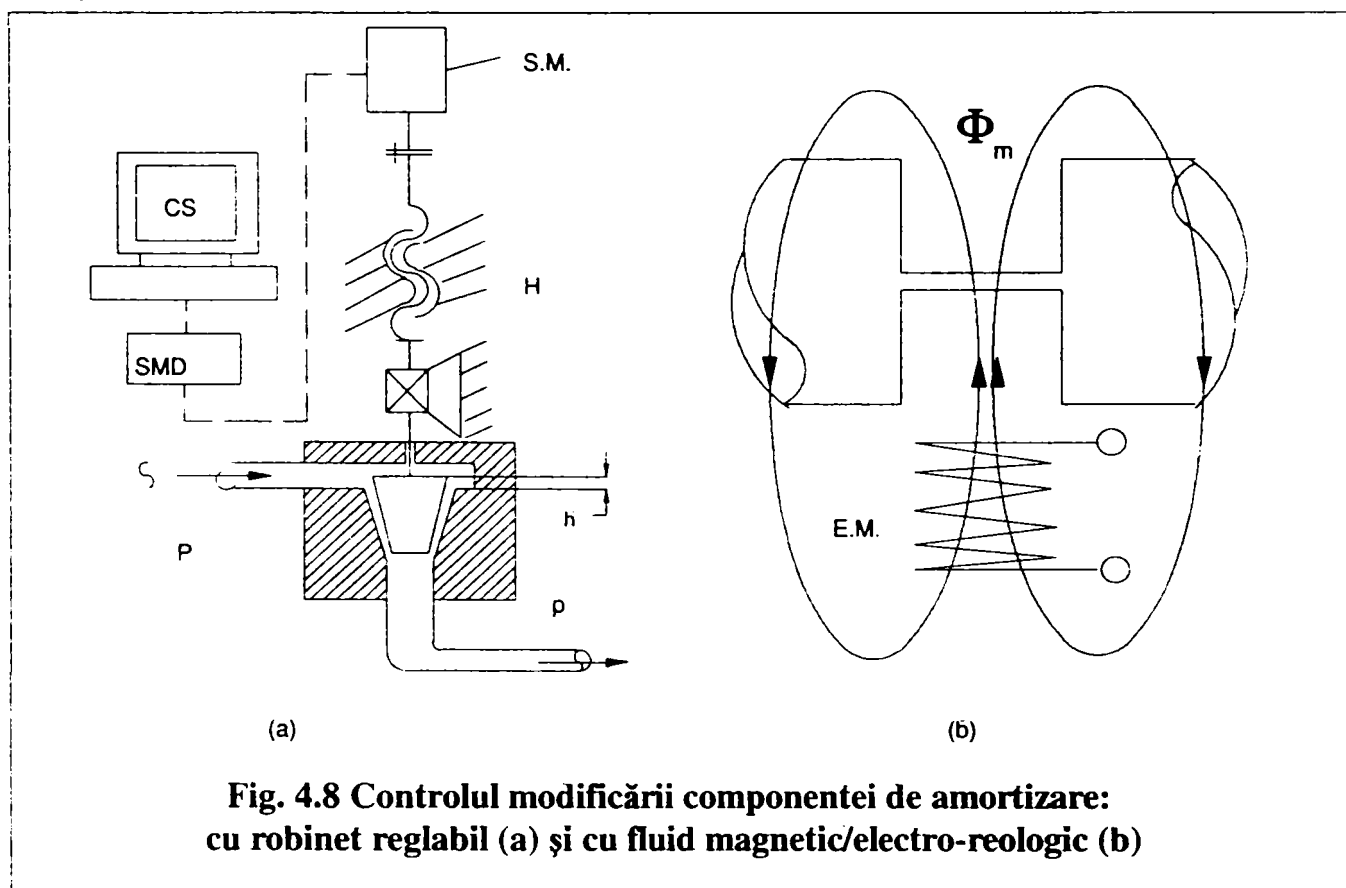
Submodulul unificat **sbm $u$ /masă** este alcătuit, după cum este prezentat în figura 4.7, din:

- ◇ componentele **sbm $Me$ /masă**: cilindrul C, servovalva Sv, blocul hidraulic (pompa Pm + rezervorul și conductele hidraulice aparținătoare, nenotate)
- ◇ componentele **sbm $SCe$ /masă**: calculatorul dedicat SC, și elementele de interfațare și senzorii înglobați în subansamblul E.D.Sv

## 4.2.2 Submodulul **sbm $u$ /amort** corespunzător parametrului coeficient de amortizare

Pentru realizarea funcțiilor sale, modulul trebuie să aibe posibilitatea de a modifica în mod continuu coeficientul de amortizare  $C$ , care este o expresie a efectului frecării vîscoase a fluidului care trece printr-o rezistență hidraulică  $R$  introdusă în circuitul hidraulic aferent. Elementul de execuție finală este întotdeauna un cilindru hidraulic, modalitățile de execuție depinzând de tipul elementului activ relativ la amortizare și a componentelor necesare pentru ca acest element să fie funcțional. În principiu, schema structural tehnică completă a unui **sbm $u$ /amort** este într-una din variante pentru elementul activ, reprezentată în fig. 4.8.

Se poate face uz de cele două modalități de realizare a rezistenței hidraulice variabile  $R$ :



**Fig. 4.8 Controlul modificării componentei de amortizare: cu robinet reglabil (a) și cu fluid magnetic/electro-reologic (b)**

A. Prin modificarea fizică a interstițiului de pasaj hidraulic

a.) Prin **utilizarea unui robinet reglabil**, controlat de computerul CS prin intermediul interfeței motorului pas cu pas de acționare SM, în conformitate cu legea de control impusă (fig. 4.8.a )

Motorul pas cu pas SM comandă deschiderea h a ventilului V care obturează curgerea fluidului prin racordurile p ale unui cilindru hidraulic, nefigurat.

$$c = c_a h \quad (4.6)$$

Din **sbmMe/amort** mai face parte subansamblul H alcătuit din componentele care materializează cupla elicoidală și ghidajele ei, iar SMD este parte constitutivă a **sbmSCe/amort**. Robinetul activ poate fi materializat printr-un drosel obișnuit, sau - în cea mai bună variantă - drosel proporțional (caz în care chiar motorul pas cu pas SM și subansamblul H sunt inutile). Se poate recurge însă și la proiectarea unui robinet de tip drosel, specializat, în cazul în care se constată că există posibilitatea unei soluții constructive mai bune decât cele prezentate și larg utilizate.

b.) Prin **utilizarea unei servovalve** în locul robinetului reglabil.

Urmărind sensul săgeților din dreptul conductelor de pe fig. 4.7, fluidul circulă între camerele (11) și (12), iar servovalva Sv preia rolul robinetului reglabil adică introduce rezistența hidraulică controlată.

B. Prin modificarea proprietăților fizice ale fluidului de lucru, prin **utilizarea unui fluid magnetic/electro-reologic** care circulă prin racordul ce leagă două incinte ale elementelor de execuție de tip cilindru hidraulic (montaj spate în spate, conform cu detaliul reprezentat parțial în fig. 4.8 b). Vâscozitatea poate fi modificată în acest caz în mod continuu prin modificarea fluxului  $\Phi_m$  al cîmpului electromagnetic produs de subansamblul aferent E.M., pentru care:

$$c = c_{0\phi} \Phi_m \quad (4.7)$$

### 4.2.3 Submodulul **sbmU/elastic** corespunzător componentei elastice

În urma analizei efectuate, a rezultat că elementul activ - cu acțiune indirectă - al **sbmMe/elastic** al **sbmU/elastic** poate fi un arc (de preferat cu caracteristică liniară) la care se modifică în mod controlat, prestrângerea. Elementul de execuție al acestei operații trebuie să asigure variația controlată a poziției unui capăt al arcului. Exigențele privind promptitudinea și precizia impun posibilitatea utilizării fără restricții a modulelor de translație de la roboții industriali. Dacă însă se optează pentru componente hidraulice la celelalte submodule (aferente parametrilor masă/amortizare), utilizarea unui servomotor/cilindru hidraulic se impune de la sine și pentru **sbmU/elastic**, conducând cu cea mai mare probabilitate la cele mai simple structuri posibile pentru **mI\_IU**. În acest caz, soluțiile de utilizat sunt următoarele:

- ◇ cu arcul elicoidal plasat în exteriorul servomotorului, având fixat unul din capete de capătul tijei pistonului, celălalt fiind atașat la structura mecanică aflată în mișcare de translație; tija pistonului ghidează concomitent arcul, acesta fiind plasat în exteriorul cilindrului hidraulic
- ◇ cu arcul elicoidal plasat adecvat în interiorul servomotorului, caz în care prin ansamblul tijă-cilindru se propagă forța suportată **mI\_IU**.

Soluția se complică dacă se cere un control al prestrângerii arcului pentru ambele sensuri ale forței de contact.

#### *Observație*

Din punct de vedere funcțional, o servovalvă poate fi înlocuită în acest context cu un distribuitor proporțional, alegerea finală depinzând de posibilitățile de achiziție.

## 4.3 Modelarea submodului $sbuM/complex$ al $ml\_IU$

### 4.3.1 Submodulul $sbuM/complex$ conceput drept sistem unificat

Urmărind ideea conceperii  $sbMU/complex$  drept sistem unificat al submodulelor elementare prezentate (idee dezvoltată până acum în acest capitol 4), se ajunge la modelul structural-tehnic prezentat complet în figura 4.9. În figură este semnalată (sub formă simplificată, ca și în cazul modelelor elementare din figura de mai sus) și partea aferentă  $sbuCC/complex$ ; detalierea tuturor modulelor pe partea electric-electronică (sesizare-control și respectiv conducere-comandă) urmează a se efectua în subcapitolele următoare.

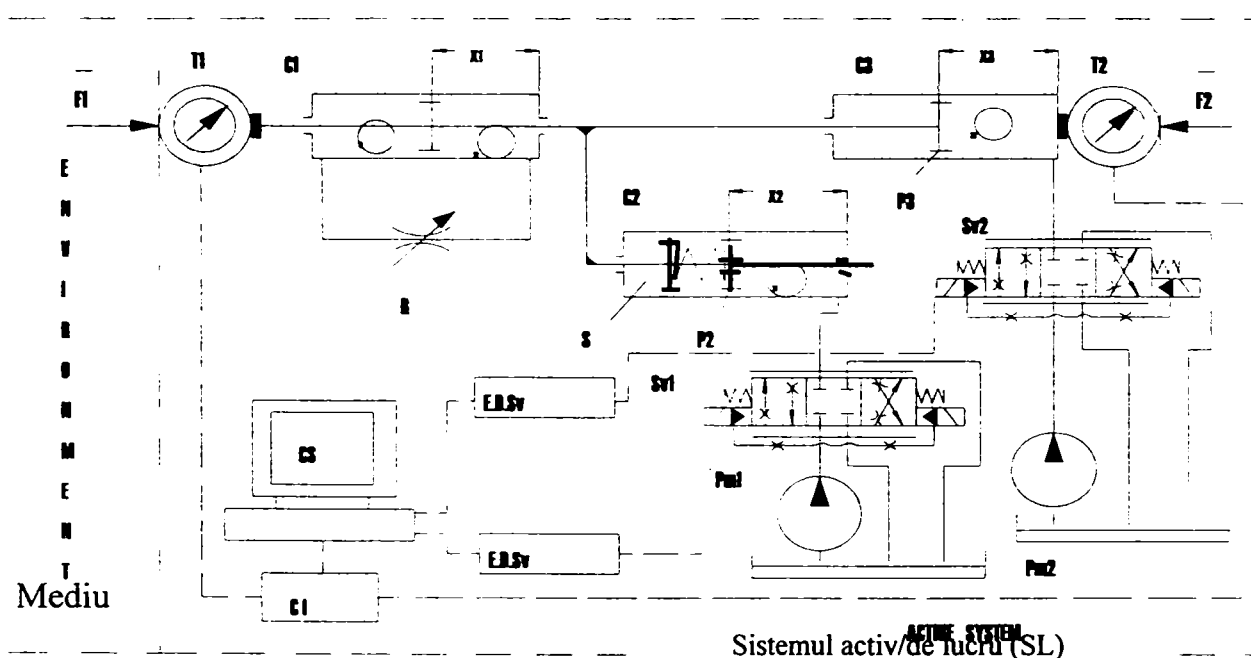


Fig. 4.9 Modelul unui  $ml\_IU$  la care  $sbuM/complex$  este unificat

Prin unificarea modulelor matematice elementare corespunzătoare (operatorul de unificare fiind identic în acest caz cu operatorul de sumare în matematică), echilibrul dinamic al părții în mișcare a  $sbuM/complex$  va fi dat de relația următoare:

$$F_1 = F_{e0} - k(x_1 + x_2 + x_0) + (m + \Omega_3 \rho_3 x_3) \ddot{x}_1 - c\dot{x}_1 + F_2 \quad (4.8)$$

Masa  $\Omega_3 \rho_3 x_3$  a fluidului din camera (32) a cilindrului  $C_3$  poate fi modificată de către pompa  $Pm_3$  și servovalva  $Sv_3$ . Masa constantă  $m$  este dată de suma maselor pistoanelor  $P_1$  și  $P_2$ , masa modulului de conectare dintre  $P_1$  și  $P_2$ , masa elementului de legătură dintre tija cilindrului  $C_1$ ,  $C_2$  și  $C_3$ . Deplasarea  $x_1$  corespunde cu cea notată  $x_s$ ,  $x_2$  este în corespondență cu  $y(t)$  (ambele de la subcapitolul 4.1.3.2), pe când  $x_0$  reprezintă prestrângerea arcului încorporat în cilindrul  $C_2$ .

### 4.3.2 Submodulul $sbuM/complex$ conceput drept sistem sintetic

În cazul în care se dorește realizarea  $sbuM/complex$  sub forma unui submodul sintetic, soluțiile tehnic-posibile trebuie astfel combinate încât componentele prezentate drept factori activi/parametru individual să participe concomitent la variația a mai mult de un parametru! Dificultățile ridicate de această cerință îngustează foarte mult "câmpul de manevră" al proiectanților. Dacă se utilizează componente de aceeași natură (în speță, componente hidraulice) una din puținele soluții de sistem sintetic care ar putea îndeplini într-o măsură mai mare sarcinile unui  $sbuM/complex$  este cea din fig.4.10.

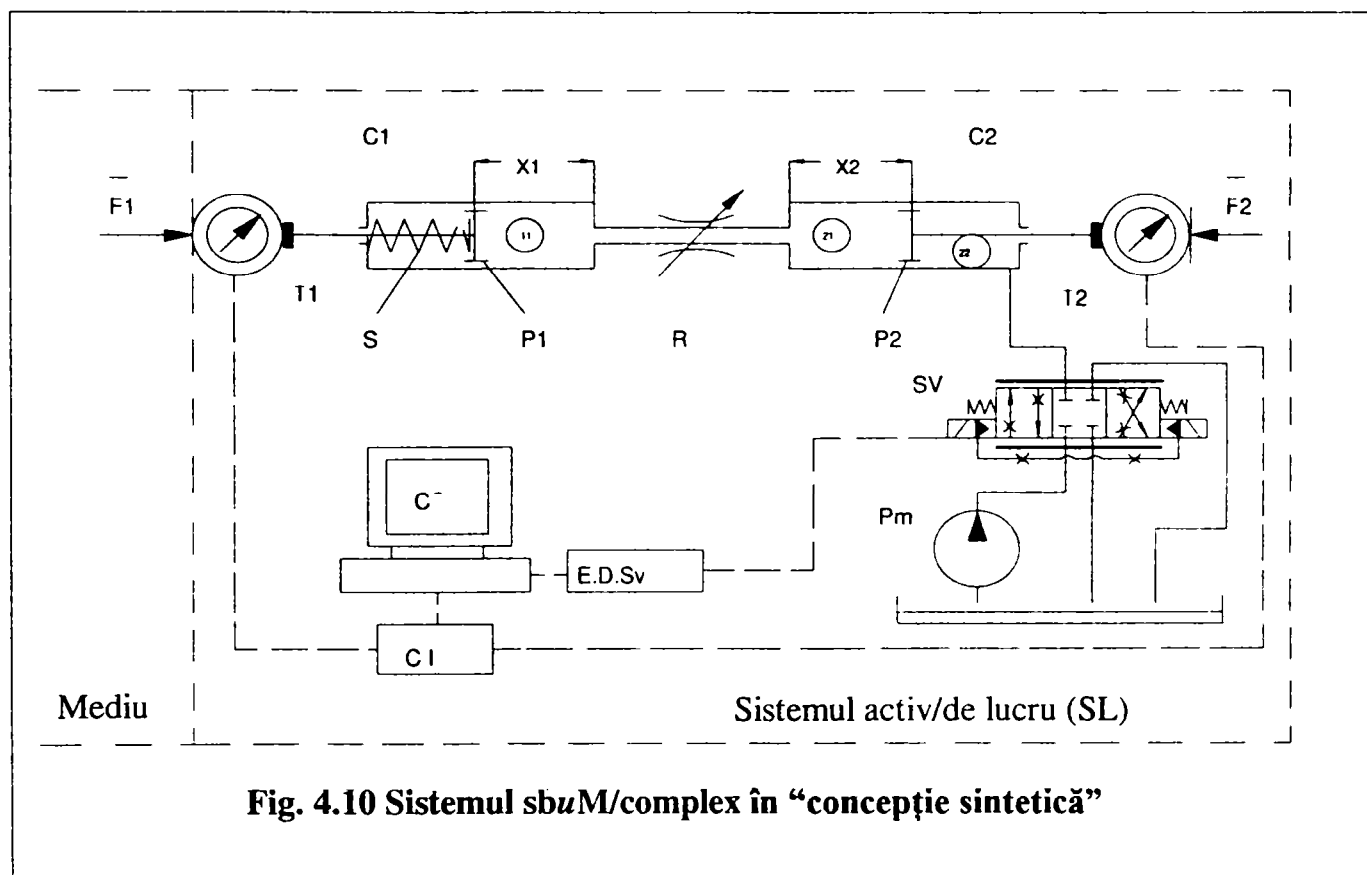


Fig. 4.10 Sistemul  $sbuM/complex$  în "concepție sintetică"

### 4.4 Modelarea submodulului $sbmCC/complex$ al $ml_{IU}$

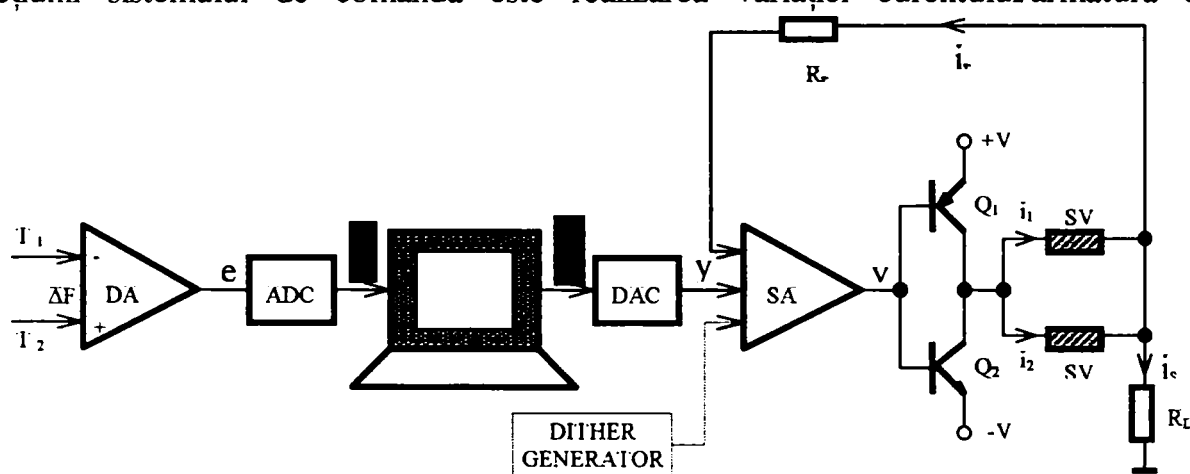
În figurile care urmează (4.11, 4.12 și 4.7) sunt reprezentate principial componentele submodulelor  $sbmSCe/parametru$ , împreună cu componenta centrală a  $sbmE/config.H\&S$  (un calculator electronic digital). Având în vedere situația de pe piața calculatoarelor, cea mai convenabilă alegere pentru acesta o reprezintă cu siguranță - din punctul de vedere al raportului performanțe/preț - un calculator PC compatibil IBM. O componentă indispensabilă a  $sbmE/config.H\&S$  este ansamblul-traductori, prin intermediul căruia se controlează mărimea exterioară de tip forță care guvernează - în ultimă instanță - procesul de conducere al aplicațiilor "contact-task", precum și mărimea

poziție. Senzorii/traducătorii de utilizat sunt de asemenea cei din robotică, semnalul furnizat de aceștia fiind un semnal continuu. Toate aceste componente formează împreună **sbmuCC/complex** al **mI\_IU**.

#### 4.4.1 Descrierea arhitecturilor hard pentru conducerea și comanda submodulelor/parametru

Având în vedere posibilitățile tehnice de structurare a submodulelor **sbmMe/parametru**, expuse la capitolul 4.2, sarcina de execuție a **sbmSCe/parametru** constă în ultimă instanță din controlul curentului/armătură a servovalvei sau respectiv a alimentării circuitelor unui motor pas cu pas (funcție de cerințele de conducere ale **mI\_IU**). Drept urmare există două variante posibile de alcătuire a **sbmuCC/complex**, prezentate în continuare.

**A.** **SbmuCC/complex** la care elementul de execuție al conducerii este o servovalvă, în conformitate cu modelul structural-tehnic din fig. 4.8, la care scopul final al acțiunii sistemului de comandă este realizarea variației curentului/armătură a



**Fig. 4.11 Submodulul de conducere/comanda (pentru servovalva)**

servovalvei SV, într-o manieră adecvată.

Semnalele electrice de intrare de tip analogic  $T_1$  și  $T_2$  sunt furnizate de cei doi senzori de forță corespunzători. Semnalul continuu  $T_1$  este proporțional cu forța activă  $F_1$  de contact, iar  $T_2$  este acordat cu forța preconizată  $F_2$ . Amplificatorul diferențial DA calculează eroarea ( $e$ ), proporțională cu diferența  $\Delta F$ , care este convertită într-un semnal digital/număr\_impulsuri.

Din acest moment, intră în acțiune calculatorul, care trebuie să realizeze - printr-un pachet soft adecvat - următoarele funcții:

(F1) achiziția de date: prelevarea valorilor curente ( $e$ ) ale erorii și încărcarea cu parametri principali ai procesului

(F2) modelarea și simularea procesului, utilizând ecuația aferentă variantei funcționale

(F3) calculul algoritmilor de control adaptiv: programele executate de calculator generează o multitudine de algoritmi - cu coeficienți ajustabili - care urmăresc studiul on-line sau off-line al comportamentului sistemului (prin modificarea a diferiți parametri); se pot implementa și controller-e de tip fuzzy ([22], [26]).

(F4) Calculul parametrului final de comandă (în forma sa digitală) și convertirea sa într-un semnal analogic ( $y$ ). Acesta este remis amplificatorului sumator SA, care furnizează tensiunea de acționare ( $v$ ) pentru tranzistoarele de putere ( $Q_1$ ) și ( $Q_2$ ); la

rândul lor, acestea alimentează servovalva prin curentul/armătură. Un semnal sinusoidal la (200 Hz) este deasemenea adăugat la intrarea SA.

Un sistem similar este necesar pentru cazul în care se utilizează un fluid magnetic/electro-reologic. În locul servovalvei, armăturile electromagnetului necesar în acest caz sunt alimentate de tranzistoarele ( $Q_1$ ) și ( $Q_2$ ); nu este utilizat în această variantă generatorul de semnal sinusoidal.

Un calculator PC compatibil IBM de configurație - spre exemplu - *DX4/120, PCI bus, 8 Mbyte RAM memorie, 1Gbyte HDD* este satisfăcător pentru coordonarea unui astfel de sistem. O configurație superioară oferă un comportament mai bun al ansamblului.

**B. Sbm $\mu$ CC/complex** la care elementul de execuție al conducerii este un robinet reglabil, în conformitate cu modelul structural-tehnic din fig. 4.8

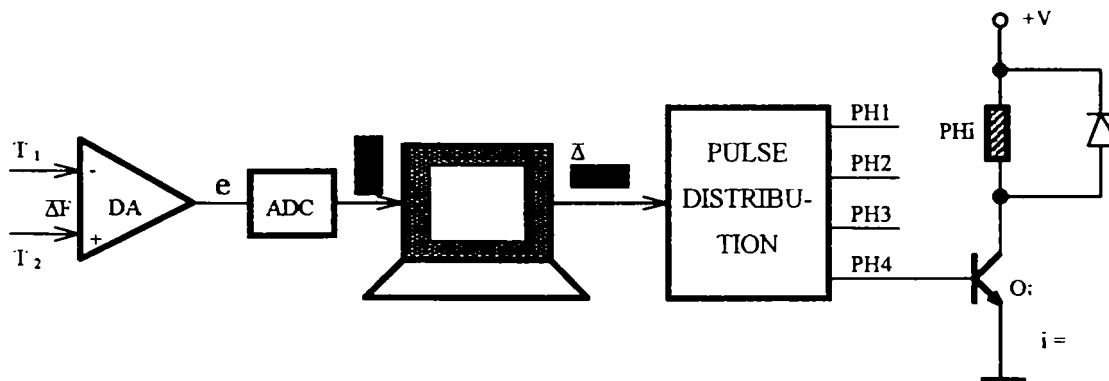


Fig. 4.12 Schema bloc a sistemului de comanda (pentru motor pas cu pas)

În acest caz, partea adaptată a schemei bloc a sistemului conține doar circuitele de alimentare a motorului pas cu pas (fig. 4.9). Calculatorul furnizează, dependent de valoarea instantanee a erorii ( $e$ ), numărul de pași necesari motorului pentru a modifica deschiderea robinetului și, în consecință, pentru a asigura valoarea adecvată a coeficientului de amortizare vâscoasă  $c$ .

Deasemenea, calculatorul generează pulsurile de comutare și realizează distribuția corectă spre tranzistoarele de putere  $Q_i$ . Astfel armăturile de fază ( $Ph_i$ ) ale motorului pas cu pas sunt alimentate secvențial, iar motorul execută o rotație cu un număr întreg, preconizat de pași.

#### 4.4.2 Structura și concepția submodulului soft al sbm $\mu$ CC/complex

În conformitate cu modelul structural general, programul care are drept sarcină realizarea funcțiilor prezentate la subcapitolul 4.3.1 se constituie într-un submodul care intră în componența **sbm $\mu$ CC/complex** prin mijlocirea **sbmE/config.H&S**.

Uzanțele moderne din robotică impun - de cele mai multe ori - utilizarea unui limbaj structurat de programare de nivel înalt (limbajul C în varianta C++ spre exemplu) și o gestionare simplă a funcțiilor de realizat prin intermediul obiectelor grafice ale unei interfețe grafice-utilizator performante. Facilitățile de ultimă oră ale mediului Visual Basic oferă modalități mai simple de realizare a interfețelor grafice GUI precum și unelte de programare capabile să controleze un proces on-line. La realizarea modulului au fost utilizate toate modalitățile de lucru relevante.



#### 4.4.2.1 Descrierea secțiunilor de program care rezolvă problemele legate de funcțiile (F1-F4)

Datorită faptului că funcțiile (F1) și (F4) sunt nemijlocit legate de componentele fizice ale **sbme/parametru**, programele corespunzătoare acestora pot fi concepute drept secțiuni-soft de nivel inferior, care pot "dialoga" individual cu secțiunea principală (de nivel "superior") aferentă celorlalte două funcții: (F2) și (F3). În cazul cel mai general se poate ivi necesitatea unui control off-line a procesului, respectiv necesitatea ca operatorul uman (OU) să poată realiza conducerea/comanda manuală a **ml\_IU** pentru verificarea unor algoritmi de calcul, respectiv pentru executarea unor calibrări. Din această cauză, este recomandabilă și conceperea unei secțiuni soft capabilă să realizeze și aceste sarcini. O posibilă reprezentare în maniera-programator este relevată în figura 4.13, care dezvăluie cele două modalități de lucru distincte, descrise în continuare.

**A.** Prima modalitate ("AUTOMAT") presupune existența unui model matematic apriori calculat pe baza căruia se face conducerea automată a sistemului, existând posibilitatea selectării unuia din mai multe astfel de modele, sau chiar a introducerii de noi modele matematice. În acest caz este apelată o funcție "model()" care lucrează "on-line". Se poate selecta o monitorizare a parametrilor prin apelarea unei funcții "urmărire/achiziție()".

**B.** Cea de-a doua modalitate ("MANUAL") se referă la comanda manuală prin care OU controlează propriu-zis parametri sistemului. În ultimă instanță, se poate afirma ca se realizează astfel o simulare a procesului. Pentru aceasta se crează două funcții numite "servo()" (pentru controlul servovalvei) și "mpp()" (pentru controlul robinetului cu ajutorul MPP). Acestea sunt în fapt secțiuni care realizează funcția de nivel inferior (F4). Modelul acestor secțiuni (fiind, cu modificările adecvate, valabil și pentru modalitatea de lucru "AUTOMAT") poate fi detaliat după cum urmează.

Funcția servo are ca parametri de intrare valoarea mărimilor caracteristice prescrisă de operatorul uman, valoare care poate fi dată în milimetri sau în volți. Plaja de prescriere (în mm sau V) depinde de cursa pistonului hidraulic. Spre exemplu, la o cursă de 80 mm și o tensiune maximă dată de DAC1200 de 10 V, plaja de prescriere este de 0-80 mm sau 0-10 V. Funcția realizează conversia mărimilor de intrare (fie milimetri, fie volți) într-o secvență binară de un cuvânt. Prezintă importanță doar primii 12 biți; întrucât pe portul paralel sunt disponibile doar 10 ieșiri (8 de date și 2 pentru control latch-uri) funcția realizează multiplexarea în timp a secvenței. Iată modelul mecanismului de multiplexare:

- se trimite la portul de date secvența pe 16 biți;
- se activează bitul de control corespunzător primelor 2 latch-uri (/Strobe);
- se inhibă bitul de control corespunzător primelor 2 latch-uri;
- se face o permutare cu 8 biți la dreapta a secvenței pe 16 biți;
- se activează bitul de control corespunzător celui de-al treilea latch (/Init).

În acest moment secvența de comandă corespunzătoare mărimii introduse ajunge la intrarea DAC-ului. Și în cadrul funcției de comandă a servovalvei există posibilitatea apelării funcției de achiziție de date.

Funcția "mpp()" este cea care realizează controlul manual al motorului care rotește mecanismul robinetului, parametrul de intrare fiind numărul de rotații (1 rotație = 100 pași). În funcție de această mărime, se calculează numărul de pași necesari. Secvența de comandă a fazelor acestui motor este memorată în variabila \*secv sub forma unui șir de numere (9,10,6,5). Această secvență de comandă este transmisă portului după ce în prealabil a fost activat registrul paralel de deplasare (74LS194).

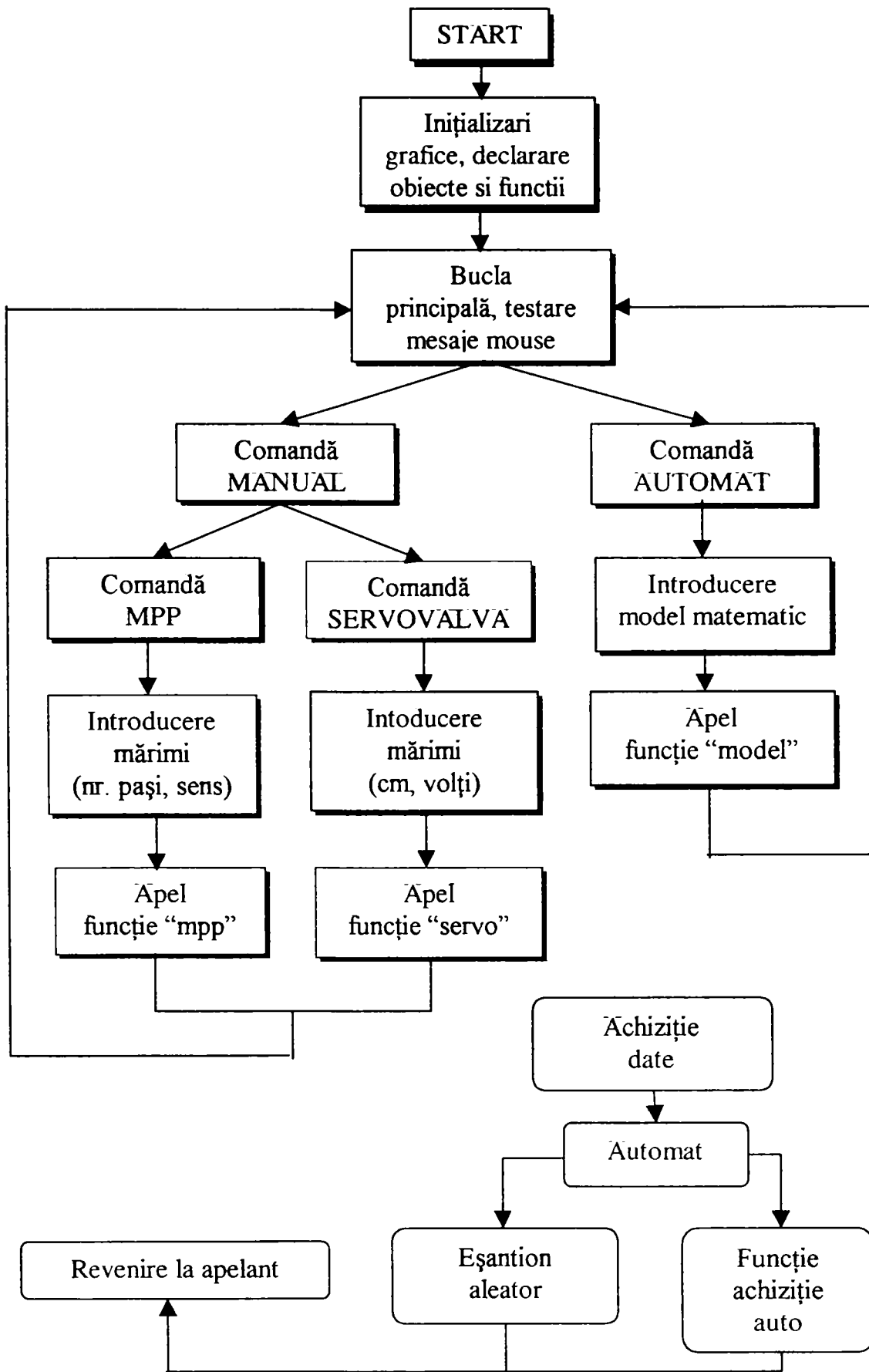


Fig. 4.13 Ordinograma în maniera-programator a secțiunilor soft a programului aferent submodulului de conducere

Există posibilitatea selectării unui număr determinat de motoare. Pentru fiecare este rezervat un anumit cod, motorul fiind acționat cu secvența de comandă doar dacă cei mai semnificativi 4 biți de date conțin codul corect. Sensul de rotație al motorului este selectat de operatorul uman în fereastra corespunzătoare funcției.

Funcția de achiziție de date (*F1*) se realizează printr-o secțiune soft separată și este indispensabilă pentru funcționarea programului de conducere. Sarcina acesteia constă în citirea valorilor date de către senzorii amplasați pe sistemul mecanic, fiind de importanță crucială pentru controlul în buclă închisă al sistemului. Secțiunea va trebui să furnizeze mărimi care vor fi introduse în ecuația modelului matematic, pe baza semnalelor primite de la senzori cu ajutorul unei plăci de achiziție de date situată în calculator. Comunicarea cu placa de achiziție se poate realiza pe bus-ul intern ISA al calculatorului, obținându-se astfel o independență între partea de conducere/comandă propriu-zisă și cea de achiziție.

#### 4.4.2.2 Concepția complet structurată a secțiunilor soft ale *sbmE/config.H&S*

Analiza modalității în care secțiunile soft prezentate conlucrează pentru rezolvarea sarcinilor date de funcțiile (*F1-F4*) impune cu necesitate o structurare multiplă. Numai în acest fel se poate realiza desfășurarea în siguranță a procesului de interacțiune precum și conducerea și controlul permanent al acestuia. Pentru aceasta trebuie concepută o secțiune specializată care monitorizează și gestionează procesul în sine și resursele soft proprii ale *mI\_IU*. Ordinogramele din fig. 4.15a) și 4.15b) prezintă o posibilă structurare complexă a resurselor soft, în care această secțiune specializată este denumită MONITOR (ordinograma din fig. 4.14).

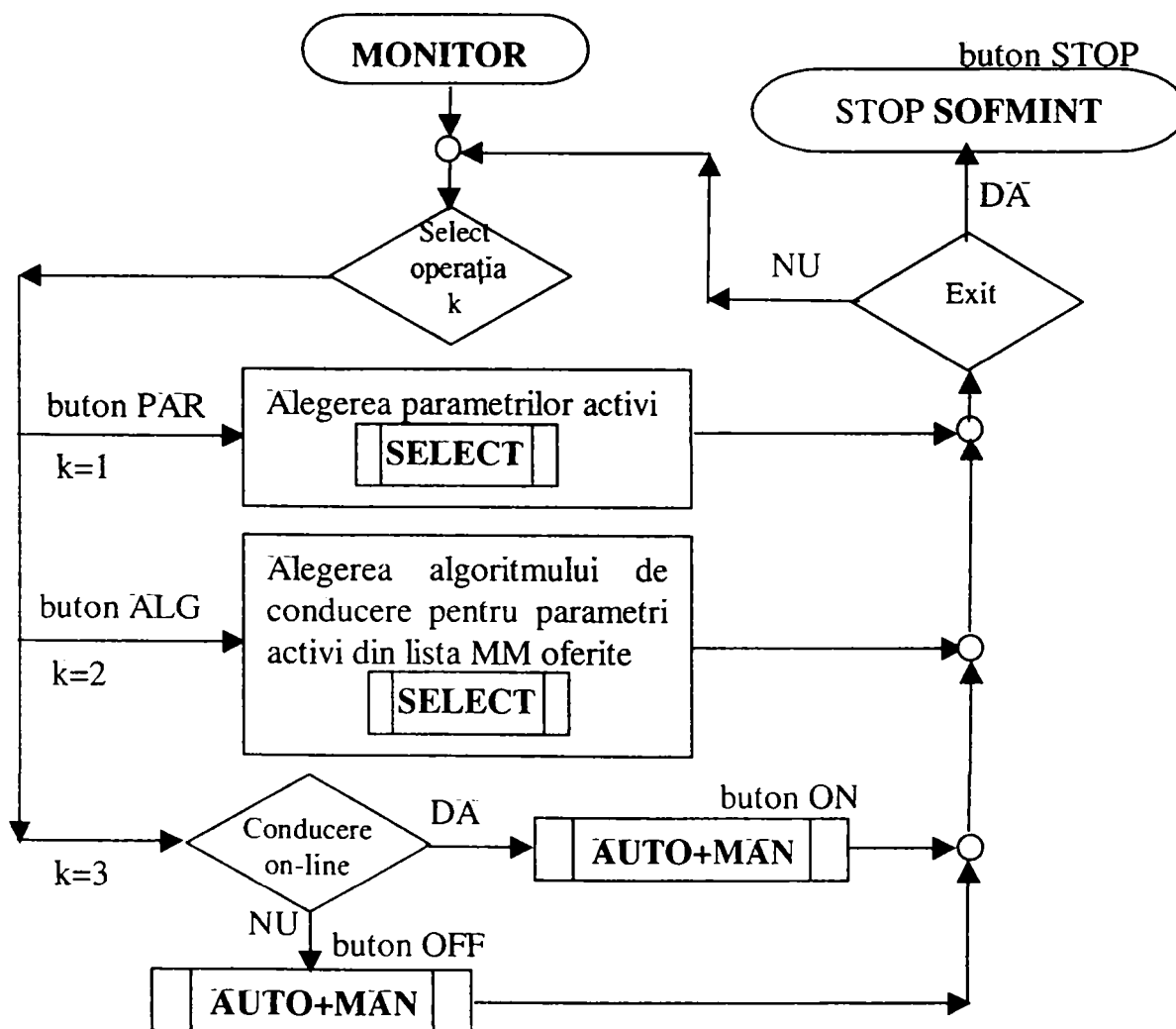


Fig. 4.14 Programul MONITOR al mediu'ui SOFMINT

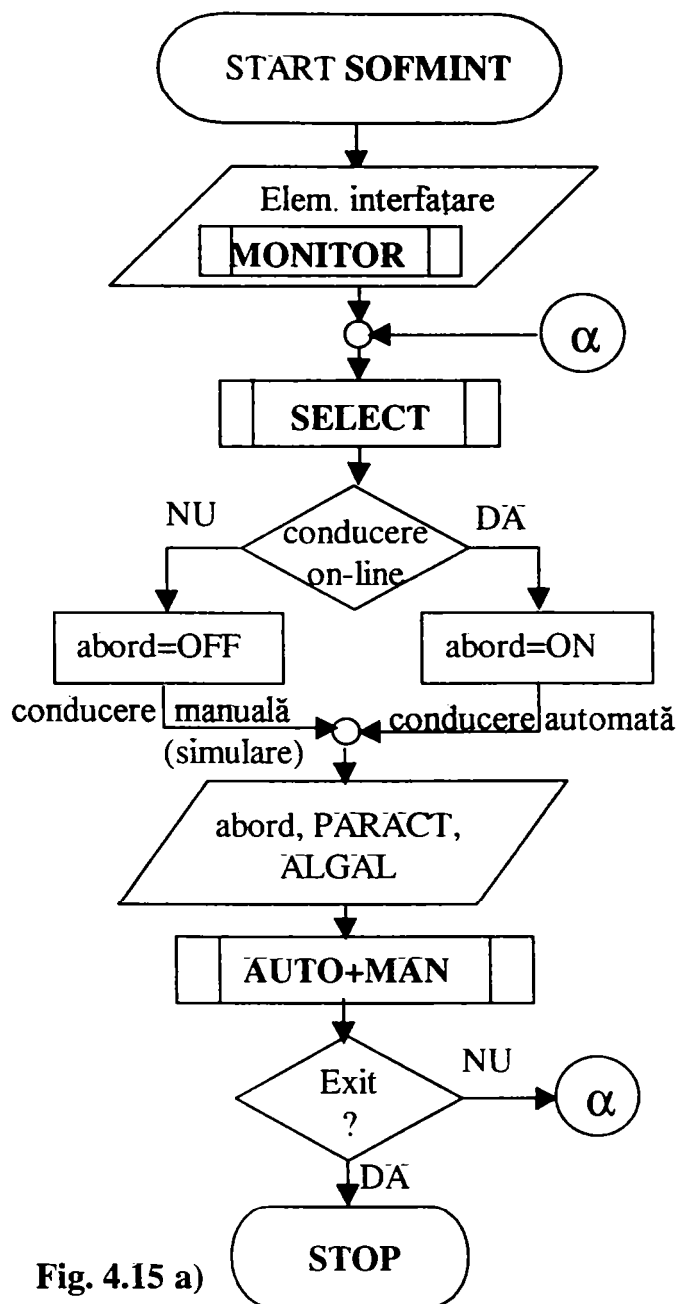


Fig. 4.15 a)

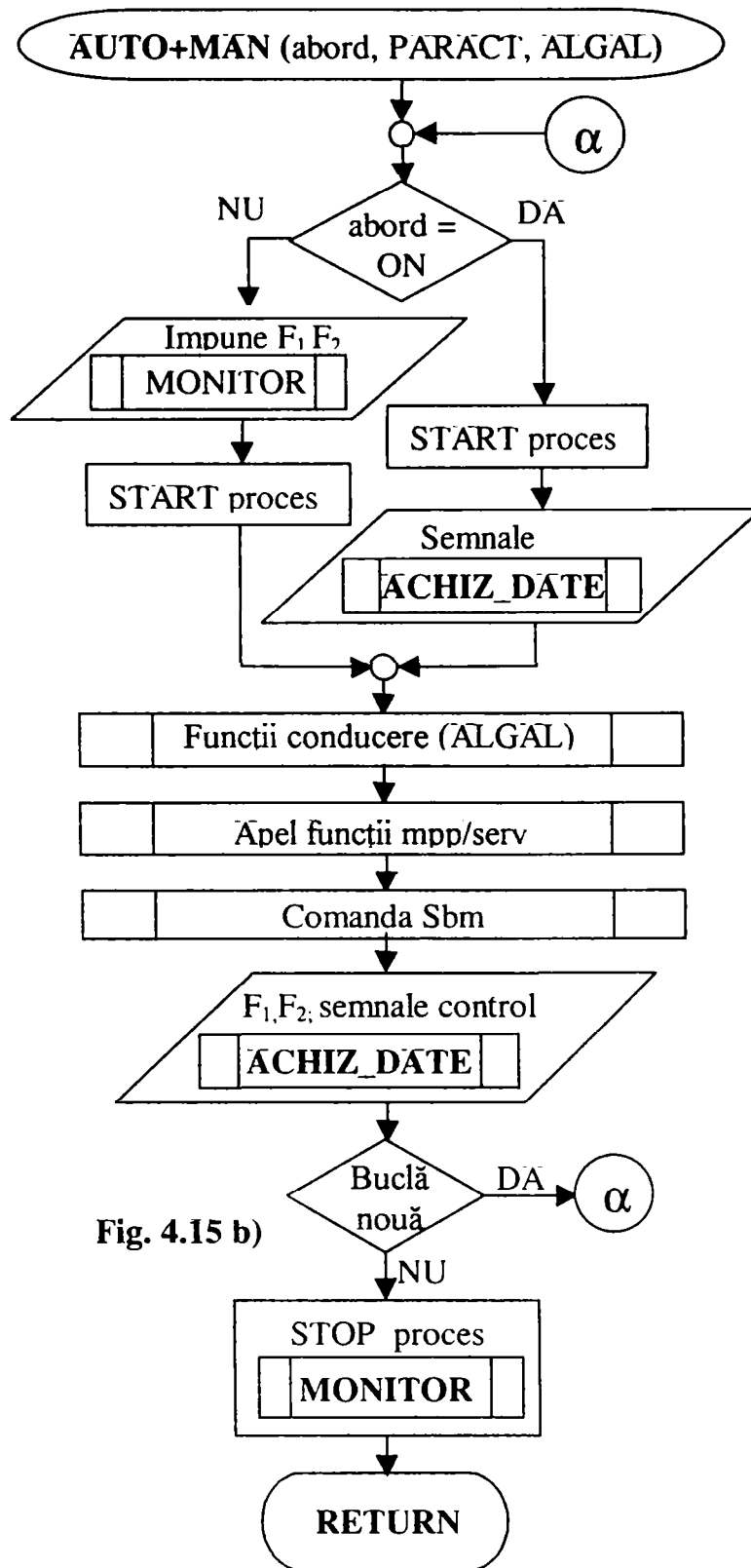


Fig. 4.15 b)

**Legenda:**  
 SOFMINT programul (mediu-soft) general de conducere al mI\_IU  
 MONITOR programul/procedură de interfațare  
 PARACT variabila vector care evidențiază parametri activi  
 VARALG id....., r.f..ri.. la algoritmele de cond.alese din listele/param. oferite  
 MM vect.identific./modele matematice  
 ALGAL algoritmul ales  
 SELECT procedura de selecție  
 AUTO+MAN proced. de execuție

Fig. 4.15 Mediul-soft SOFMINT (4.15a), submodul al mI\_IU, și procedura AUTO+MAN (4.15b)

La ora actuală, uzanțele de programare reclamă - pentru un astfel de program- generarea unei interfețe grafice cu obiecte de tip control specializate, prin intermediul cărora utilizatorul poate activa procedurile soft de:

- ◇ selecție a parametrului/ilor impedanței mecanice pe care dorește să-i controleze (variabila-vector de control fiind  $\text{PARACT}(1,3)$ ), precum și a algoritmului de urmat pentru fiecare din parametri activați în timpul procesului de conducere a submodulelor /parametru, dintr-o listă a modelelor matematice accesibilă prin intermediul interfeței grafice; variabila-vector de control a algoritmului de conducere ales este  $\text{VARALG}(3,1)$
- ◇ selecție a modului de lucru: on-line, în timp real pentru interacțiune, sau off-line, în maniera-simulare a procesului variabila de control fiind *abord*; toate aceste operații se execută cu ajutorul procedurii SELECT (figura 4.16)

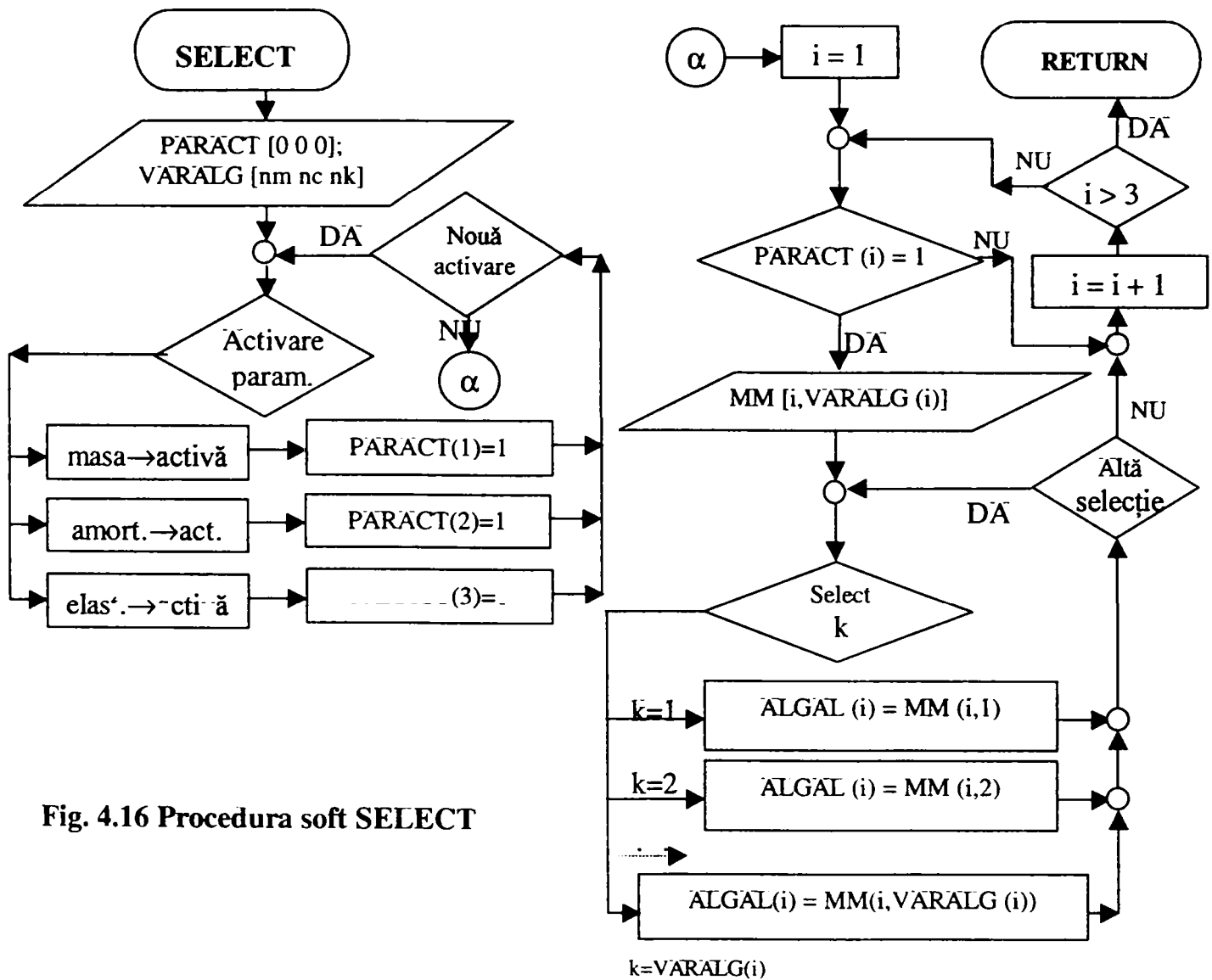


Fig. 4.16 Procedura soft SELECT

Cea din urmă selecție activează procedura de lucru  $\bar{\text{AUTO}}+\text{MAN}$ , care forțază pornirea procesului și conducerea inteligentă a  $\text{ml\_IU}$  cu ajutorul algoritmului ales (în prima variantă de lucru), și respectiv simulează procesul de conducere/comandă prin a doua modalitate de lucru, caz în care operatorul poate controla procesul de interacțiune pas cu pas, în "secvențe discrete".  $\bar{\text{AUTO}}+\text{MAN}$  oferă o mai bună gestionare soft decât structura prezentată în fig. 4.13, deoarece multe din secvențele secțiunilor  $\bar{\text{AUTOMAT}}$  și  $\text{MANUAL}$  sunt comune. Procedura  $\bar{\text{AUTO}}+\text{MAN}$  (de nivel inferior, dar structurată la rândul ei) are drept argumente variabilele de control *abord*,  $\text{PARACT}$  și  $\text{VARALG}$ .

Programul MONITOR (procedură de nivel superior) lucrează sau se află în așteptare în background, deasemenea și ACHIZ\_DATE (aceasta fiind însă procedură de nivel inferior); secvențele de execuție nemijlocită *mpp()* și *servo()* sunt secvențe de nivel inferior, fiind cel mai apropiate de nivelul fizic al **mI\_IU**.

**Observație**

Toate referirile la algoritmi matematici și respectiv modelele matematice din descrierea submodulului soft sunt legate de modalitatea în care este rezolvată modelarea funcțiilor de conducere (conform cu cele expuse în subcapitolul 4.1, respectiv cu modelarea finală de la subcapitolele următoare).

### 4.5 Concluzii privind la modelarea și concepția unui **mI\_IU**. Tema de proiectare a standului pentru investigarea aplicațiilor de tip “contact-task”

Din cele expuse până acum la capitolul 4, se poate desprinde o imagine sintetică a funcțiilor unui **mI\_IU**, imagine prezentată în figura 4.17.

Apoi, trebuie ținut cont de observația că pentru studiul efectiv și complet al unui astfel de modul **trebuie controlată structura întregii aplicații de tip “contact-task”,** aplicație de la care s-a pornit pentru modelarea **mI\_IU**.

O astfel de structură completată a **mI\_IU** (cu modelul sistemului de lucru - SL - și cel al mediului *incorporate*) constă din trei grupuri de entități. Acestea sunt prezentate în trei modalități distincte: prin enumerare (în continuare), respectiv, mai sugestiv în tabelul 4.2 și apoi în figura 4.18.

A. Primul grup:

- cele trei submodule/ parametru – prezentate;
- un submodule de tip generator de forță.

**Tabelul 4.2**

Entități preponderent fizico-mecanice		submodule mixte, de comunicare-trecere		Entități preponderent virtuale	
<i>sisteme de acționare + elemente de execuție</i>	Structura de rezistență	fizico-mecanice	virtuale	fizică & virtuală	natură virtuală
trei submodule/ parametru – (prezentate) submodulul generator de forță		senzori/ traductoare	legi de etalonare/ parametru + forță	Structura hard-soft a sistemului de conducere	modelul matematic & algoritmul ales ----- legea de variație a forței ----- legile de conducere/parametru

**Funcțiile Sbm $\mu$ M/complex**

( $F_{M1}$ ) -capacitatea de susținere și efectuare a mișcării de translație  
(funcție “externă” a modului, aparține întregii aplicații)

**Solutia tehnică aleasă:**

- ansamblu de translație INĂ + structură multifuncțională

+ capacitatea de modificare a componentelor/parametri ai impedanței  
mecanice a SI/mI IU (functii “interne”)

( $F_{M2}$ ) -pentru componenta inerțiala (de masa):

( $F_{M3}$ ) -pentru componenta de amortizare:

( $F_{M4}$ ) -pentru componenta de elasticitate:

**Soluțiile tehnic posibile-alese:**

- introducerea controlată a unei mase de lichid într-un cilindru hidraulic
- amortizare viscoasa/trecerea controlată a unui fluid printr-un robinet specializat
- indirect, prin prestringerea controlată a unui arc

**Funcțiile Sbm $\mu$ CC/complex :**

( $F1$ ) - achiziția de date: prelevarea valorilor curente ale variației forței de contact ( $\Delta F$ ), ale poziției și încărcarea cu parametri principali ai procesului

( $F2$ ) - modelarea și simularea procesului, utilizând ecuația aferentă variantei funcționale

( $F3$ ) - calculul algoritmilor de control adaptiv; programele executate de calculator generează o multitudine de algoritmi - cu coeficienți ajustabili - care urmăresc studiul on-line sau off-line al comportamentului sistemului (prin modificarea a diferiți parametri); se pot implementa și controller-e de tip fuzzy

( $F4$ ) - calculul parametrului final de comandă (în forma sa digitală) și convertirea sa într-un semnal analogic. Acesta este remis componentelor electrice/electronice ale ssbmCe/parametru.

De reținut ca au fost elaborate două variante distincte legate de elementul de execuție pentru submodulul/parametru de conducere:

- element de tip servovalvă/distribuitor proportional (notația: servo)
- motor pas cu pas (notația: mpp).

Sunt necesare :

**Legi de conducere/parametru :** “algoritmi” după modele matematice satisfăcătoare în sensul diminuării forței de contact - funcții de variabilele cinematice ale procesului și de evoluția forței de contact

**Legi de “etalonare”:** convertirea valorilor necesare (de obținut) pentru fiecare componentă mecano-electrică în parametri de acționare a submodulelor/parametru

**Modele Matematice** ale procesului, inclusiv metode de rezolvare adecvate a acestora

**Fig. 4.17** Imagine sintetică a funcțiilor unui mI\_IU

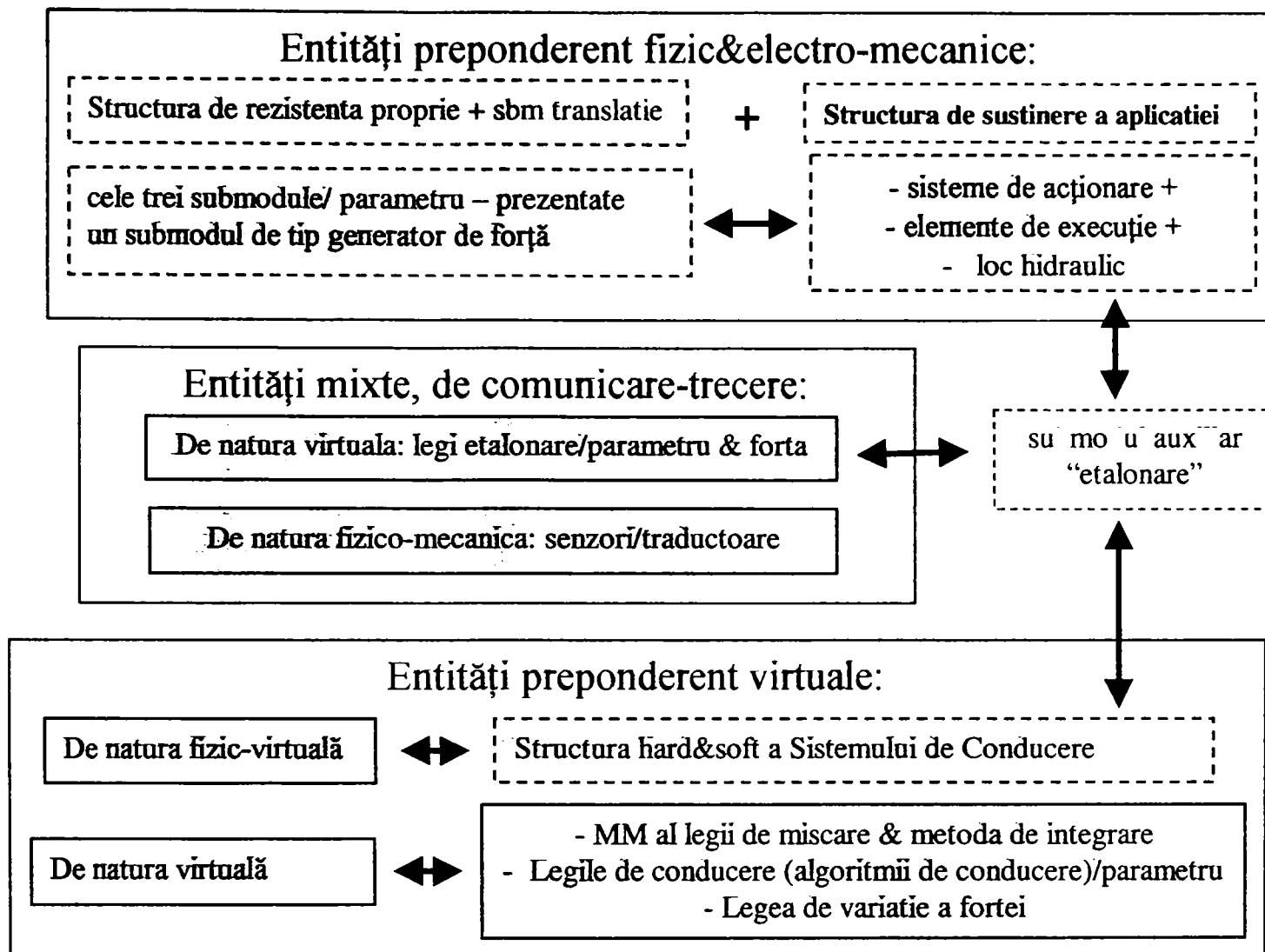


Fig. 4.18 Tabloul general al entităților care alcătuiesc structura unei aplicații de tip "contact-task"

B. Al doilea grup:

- structura de rezistență;
- submodule de comunicare/trecere: senzori/traductoare + "legile de etalonare";
- structura hard-soft a sistemului de conducere.

C. Al treilea grup

- modelul matematic & algoritmul ales;
- legea de variație a forței – impusă;
- legile de conducere/parametru.

Pe baza acestor "imagini sintetice" ale unui **mI\_IU** încorporat într-o aplicație de tip "contact-task", se va desfășura în continuare modelarea și proiectarea "finală" a submodulelor de tip mecanic (care înglobează și entitățile electro-mecanice), a entităților virtuale de trecere (legile de conducere/parametru) și a mediului soft general de conducere-control a întregii aplicații. Pentru realizarea funcției (F4) a **sbmUCC/complex** este necesară modelarea de submodule auxiliare, de "etalonare".

**Concluzie finală**

Conținutul acestui subcapitol dezvăluie elementele necesare pentru tema de proiectare referitoare la realizarea unui stand complex pentru studiul aplicațiilor de tip "contact-task", stand care înglobează un **mI\_IU**. Tema de proiectare va fi realizată în subcapitolele următoare.



## 4.6 Proiectarea sbmuM/complex al ml\_IU ([Luc99g], [Luc01b], [Pet98a], [POL97], [POL00], [TEO98], [Stö01], [Wad01])

### 4.6.1 Prezentare generală a soluțiilor constructive

Procesul de proiectare s-a desfășurat pe baza celor expuse în subcapitolele 4.3 și 4.2 și pe sinteza de la subcapitolul 4.5. În conformitate cu acestea, precum și cu disponibilitățile existente, drept elemente de acționare active au fost alese MPP autohtone, respectiv cilindrii hidraulici în execuție proprie, precum și cele ale firmei ATOS, de la aceasta fiind alese și distribuitorii proporționale necesare. Celelalte elemente hidraulice (blocul hidraulic, racorduri, nipluri, conducte rigide și flexibile) fiind preluate din disponibilul existent la Catedra de Organe de Mașini și Mecanisme a Facultății de Mecanică (blocul hidraulic fiind de producție autohtonă: “Balanța” Sibiu).

Proiectarea propriu-zisă s-a efectuat în AUTOCAD\_14 și 3D\_STUDIO\_MAX. Utilizând ghidajele de translație INA, există două posibilități de abordare: tija în mișcare și respectiv ghidajele în mișcare de translație. Reluând modelele prezentate la modelarea submodulelor/parametru, cele două posibilități conduc la schemele prezentate în figurile 4.19 și 4.20.

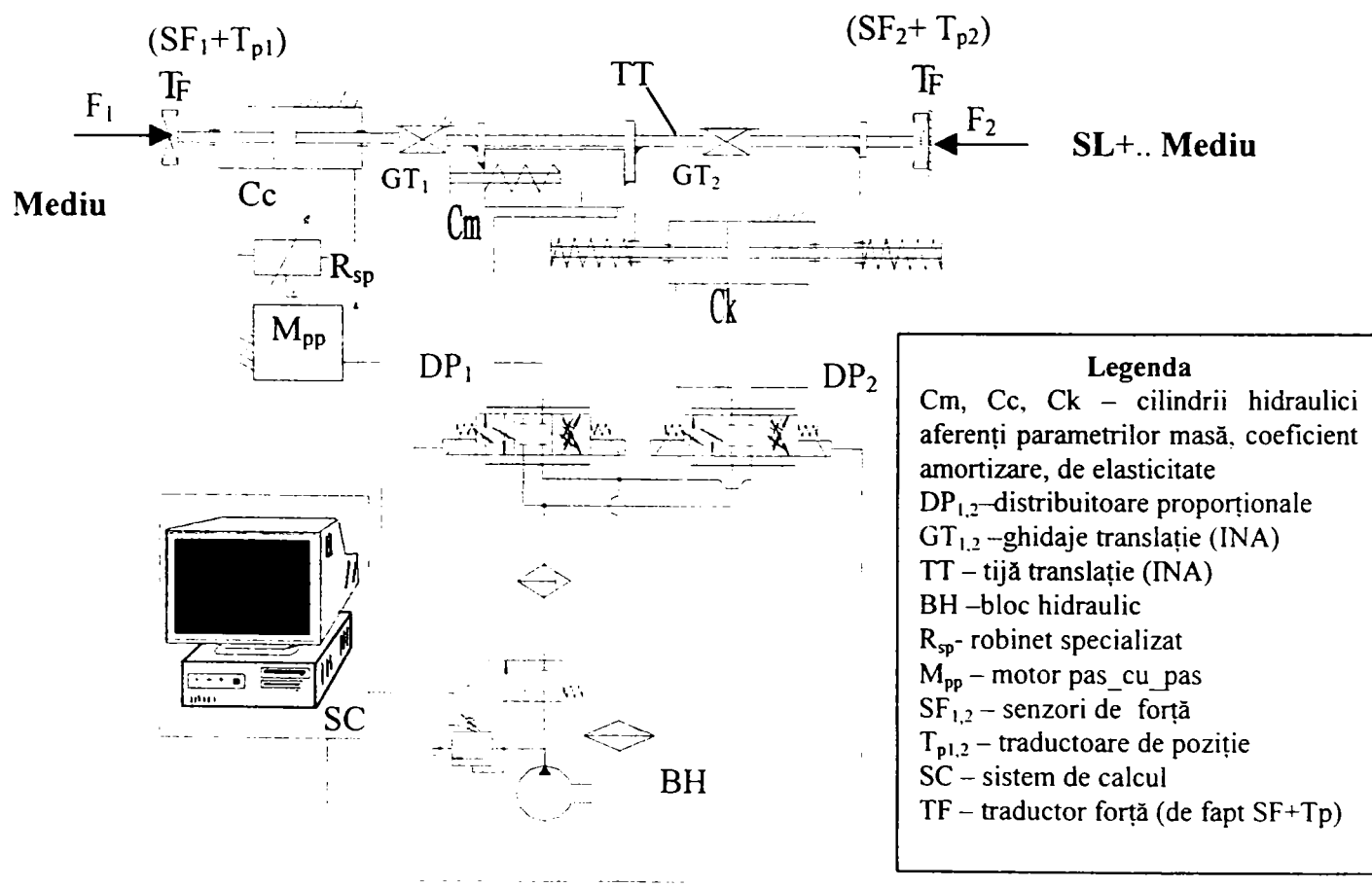
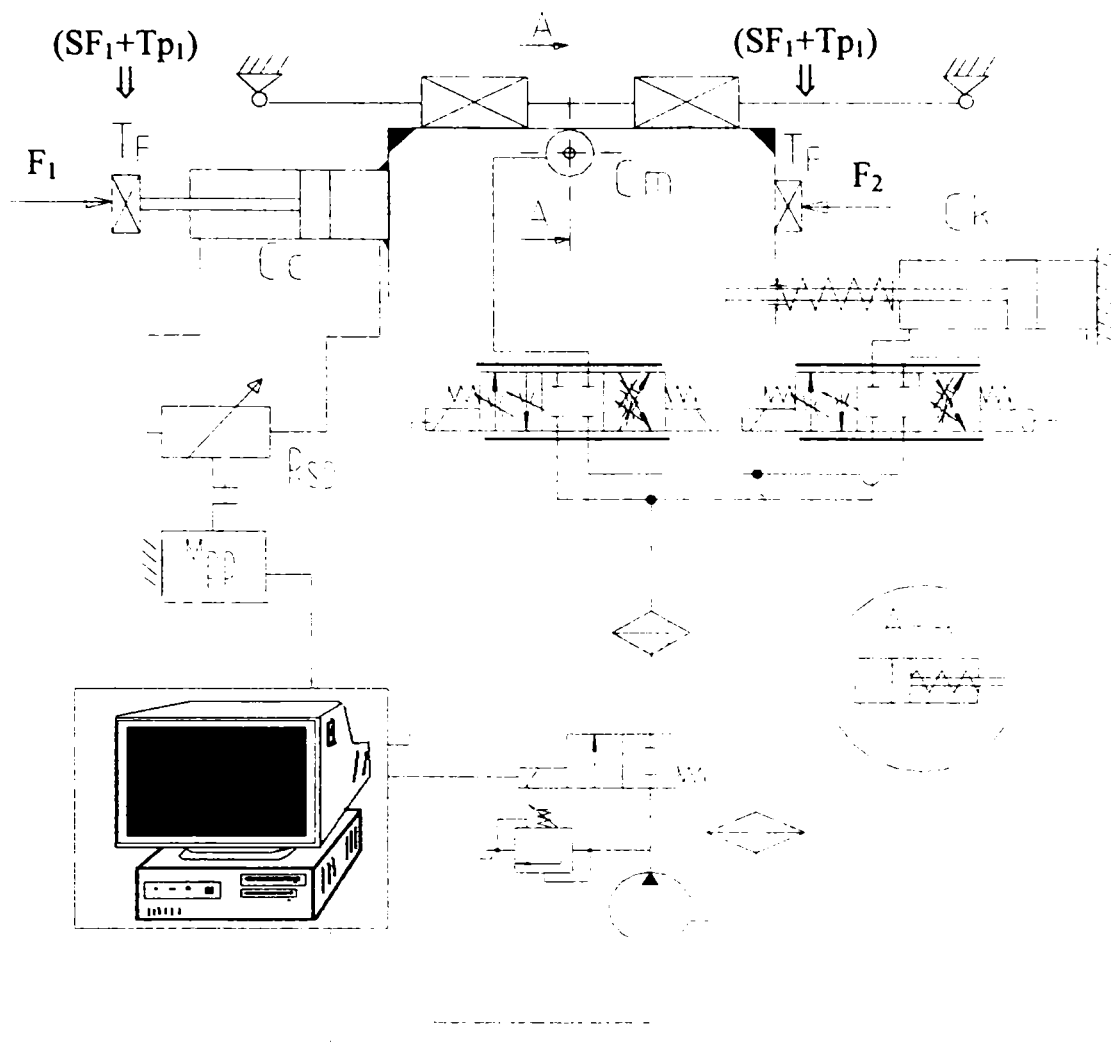


Fig. 4.19 Un posibil model structural-schematic al ml\_IU - varianta “tija în mișcare de translație”



**Observație:** elementele constitutive ale schemei sunt identice cu cele din figura precedentă; pentru a mări lizibilitatea desenului nu au fost reproduse toate notațiile acestor elemente

**Fig. 4.20** Un posibil model structural-schematic al mI\_IU - varianta "ghidaj in mișcare de translație/tijă fixă"

## 4.6.2 Constatări finale asupra temei de proiectare-stand

Din rațiuni financiare, a apărut o soluție de înlocuire a elementelor de acționare hidraulice (servomotoare-cilindrii hidraulici) prin servomotoare electrice lineare de tip STRONG, model SRTA 8, având traductori de deplasare încorporați (în figuri, asigurați prin: "actuator"). În acest caz, soluțiile structural-schematice se simplifică foarte mult, ne mai fiind necesare componentele auxiliare hidraulice. O rescriere a schemelor pe parte mecanică este superfluă, astfel că toate rămân valabile și pentru procesul de proiectare propriu-zisă. Modificările pe parte electrică vor fi relevate mai târziu.

### Concluzie

*Alegerea finală a soluției constructive s-a oprit asupra variantei "ghidaj in mișcare de translație/tijă fixă". Operând modificări asupra acestui model în sensul apropierii de soluția constructivă a acestuia, se obțin succesiv modelele structural-funcționale din figurile 4.21, 4.22, 4.23 care stau efectiv la baza soluției constructive și a proiectării propriu-zise a standului.*

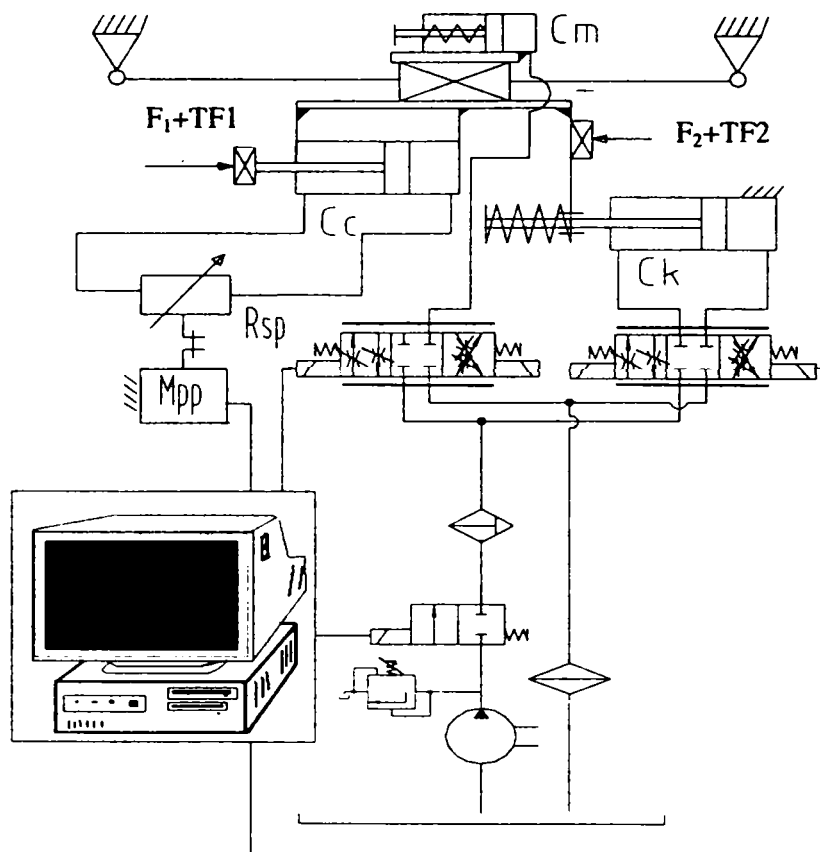


Fig. 4.21 Un posibil model structural-schematic al mI\_IU - varianta "ghidaj in miscare de translație/tijă fixă" cu elemente de soluție constructiva (în condițiile observației de la fig. 4.20)

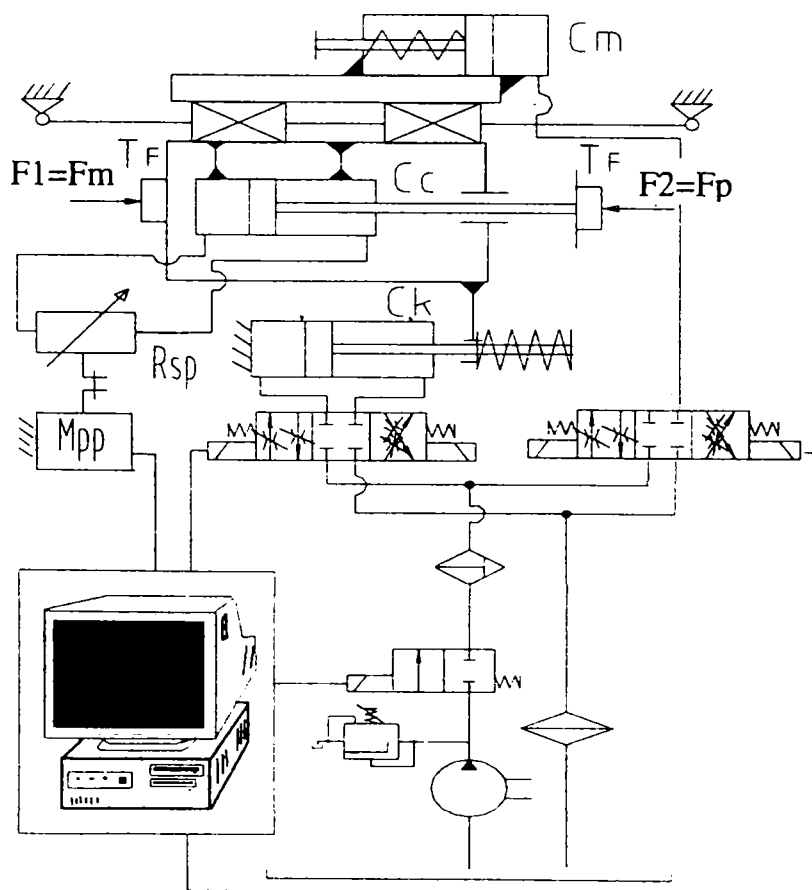
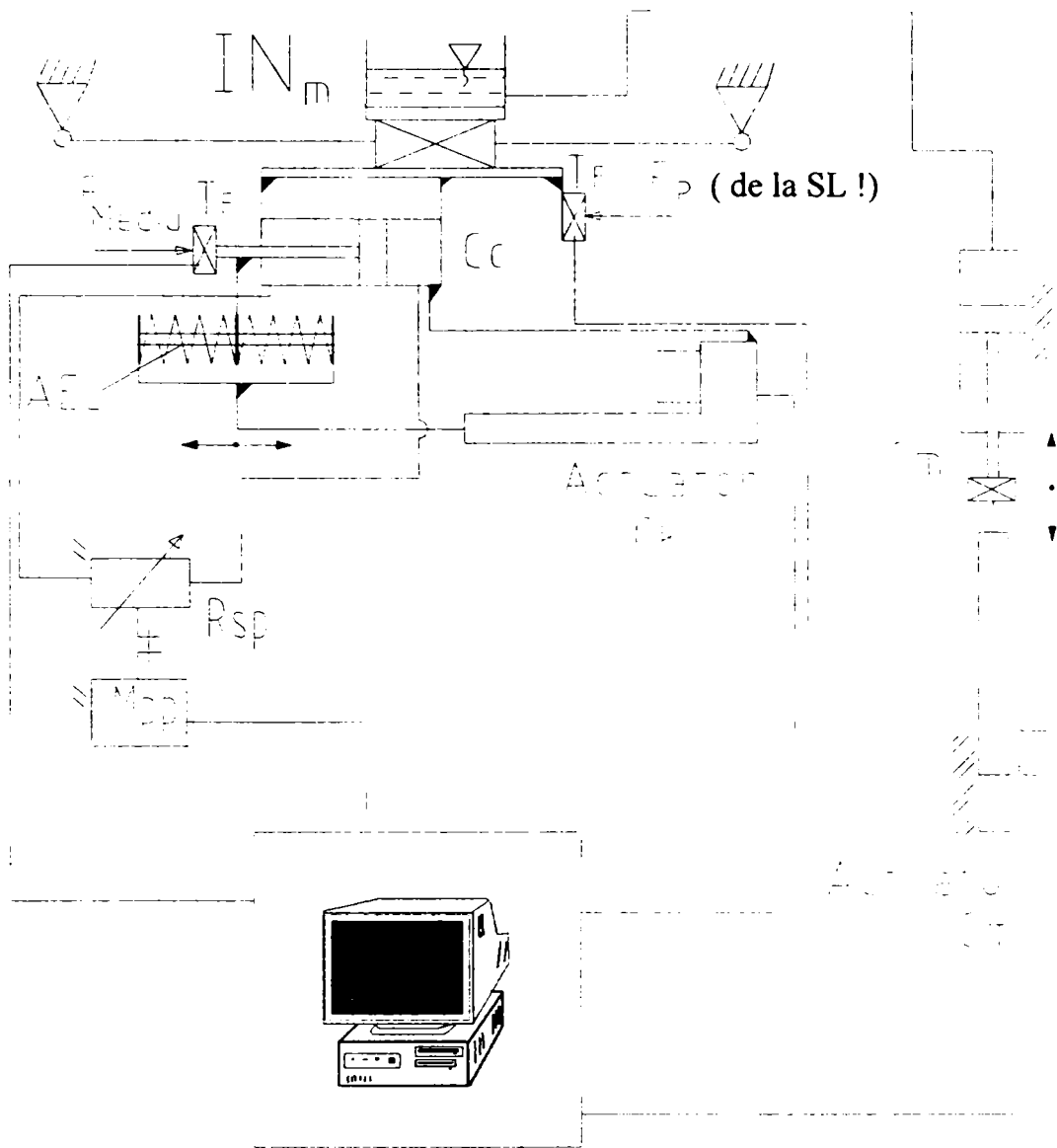


Fig. 4.22 Un model structural-schematic similar al mI\_IU - varianta "ghidaj in miscare de translație/tijă fixă" **DAR** cu elementele de soluție constructiva detaliate (în condițiile observației de la fig. 4.20)



**Fig. 4.23 Un model structural-schematic al mI\_IU - varianta “ghidaj in miscare de translație/tijă fixă” cu elementele de soluție constructiva detaliate (în condițiile observației de la fig. 4.20)**

În figura de mai sus (4.23), apare soluția alternativă relevantă pentru servomotoare (‘actuator’, în cazul de față, pentru  $C_m + C_k$ ) și – în plus – o soluție simplă de activare a parametrului de elasticitate pentru ambele senzori ale rezultantei forțelor exterioare sistemului de interacțiune: două arcuri de compresiune care lucrează în opoziție (AEL), fiecare activându-se pentru unul din senzori (pentru vederea din figură, arcurile stânga-dreapta).

### 4.6.3 Entitățile fizico-mecanice implementate în soluția standului

#### 4.6.3.1 Soluții de gestiune a forțelor în cadrul standului: generatorul de forță și simulatorul forței preconizate

Pentru simularea aplicațiilor este nevoie de generarea forței exterioare ( $F_1=F_{\text{mediu}}$ ) corespunzătoare celei care apare în aplicațiile reale, la funcționarea unui sistem de lucru. S-a optat pentru inducerea unei variații mai complexe a forței exterioare. Pentru aceasta, cea mai comodă variantă este atașarea unui sistem vibrator. Disponibilul de echipamente din cadrul Departamentului de Mecatronică a oferit două soluții: un vibrator electric și respectiv unul de tip mecano-electric. Acestea vor apărea în schițele soluției finale a standului redate în subcapitolele următoare.

În cazul forței preconizate, dorite ( $F_2=F_p$ =forța de contact urmărită a se realiza în cadrul aplicației) s-a optat pentru o forță constantă. Cea mai simplă variantă spre adoptare este dispunerea unei contragreutăți care “trage” peste un sistem de tip scripete (prin intermediul unui fir inextensibil) partea mobilă a standului. Pot fi executate experimentări cu mărimi diferite ale forței preconizate prin modificarea masei contragreutății. Rolele-scripete nu sunt necesare pentru o axă de translație verticală (spre deosebire de variantele prezentate în care axa este – însă - orizontală).

Controlul forțelor se realizează – în conformitate cu schemele prezentate – cu ajutorul senzorilor de forță  $TF_1$  și  $TF_2$ . Este clar că – ținând cont de cele prezentate mai sus – pentru realizarea experimentului, este nevoie de un singur senzor:  $TF_1$  pentru controlul forței induse de mediu. Realizarea senzorului s-a făcut în mai multe variante: elemente de tip arc (mini-grinzi de diverse forme supuse la încovoiere sau la solicitări compuse)+timbre tensometrice calibrate, respectiv arcuri elicoidale cu controlul săgeții acestora.

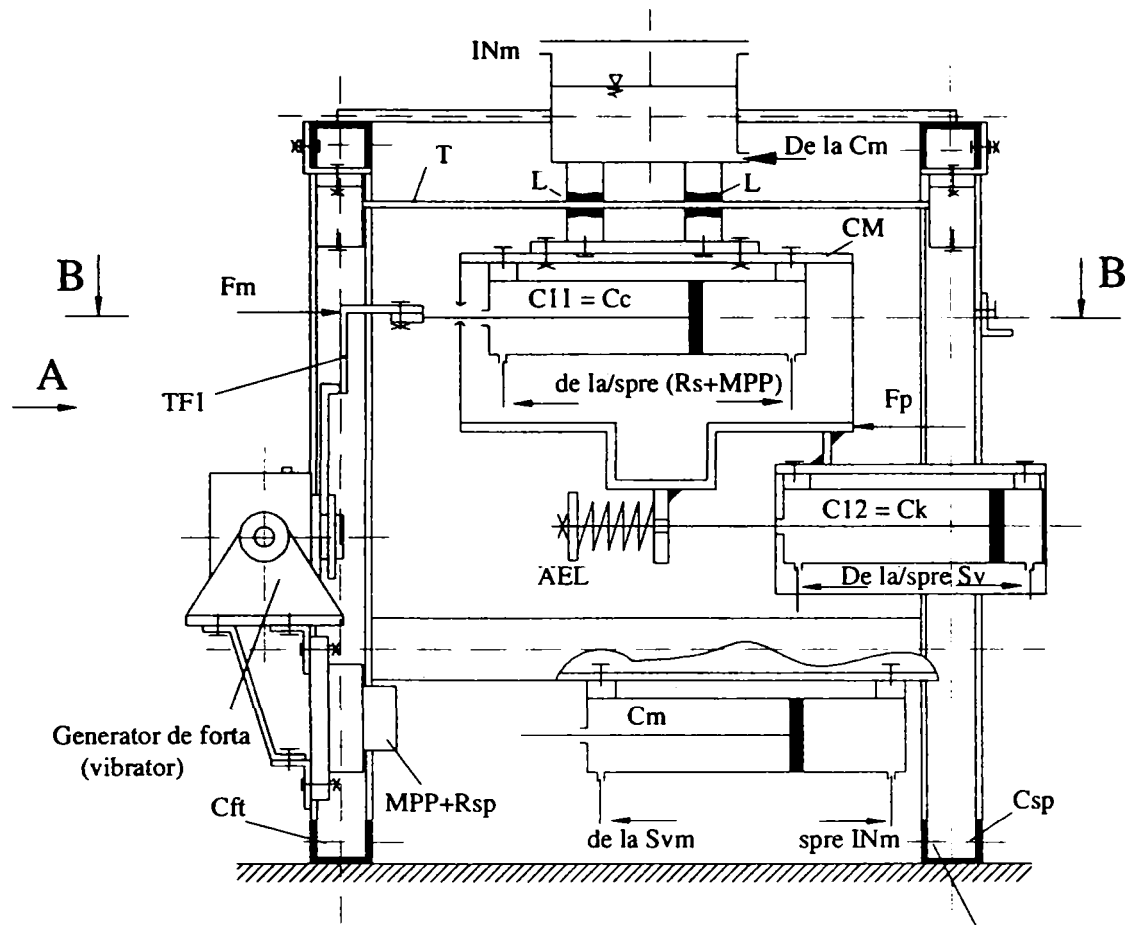
#### 4.6.3.2 Structura de rezistență și susținere

trebuie să asigure stabilitatea spațială a întregului stand, dar să ofere totodată posibilitatea de implementare facilă a mai multe variante executate după schemele soluțiilor prezentate cu modificări minime, respectiv prin atașarea unor elemente simple de îmbinare și asamblare. S-a optat pentru construcția unui cadru spațial care va fi prezentat în subcapitolul 4.6.4, odată cu prezentarea soluției constructive a uneia din variantele impuse de tema de proiectare a standului.

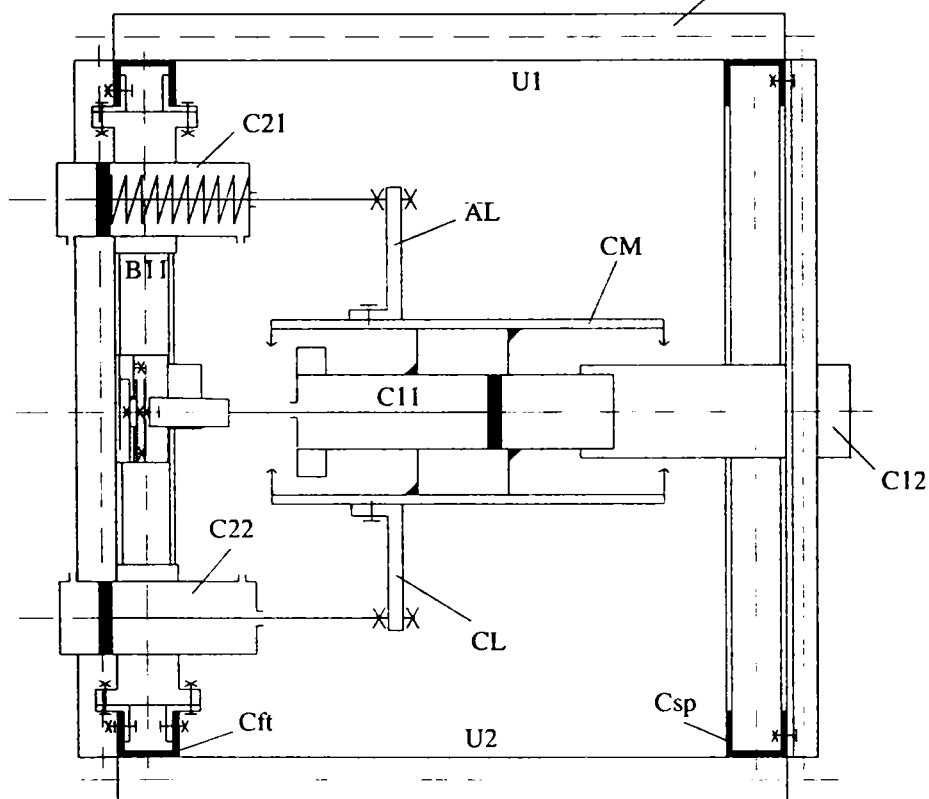
### 4.6.4 Soluția constructivă a standului experimental (varianta “hidraulică”)

Pe baza modelelor prezentate ale **mI\_IU**, a fost dezvoltată soluția constructivă - în manieră obișnuită – a standului pentru investigarea aplicațiilor de tip “contact-task” prezentată în figurile 4.24 și 4.25.

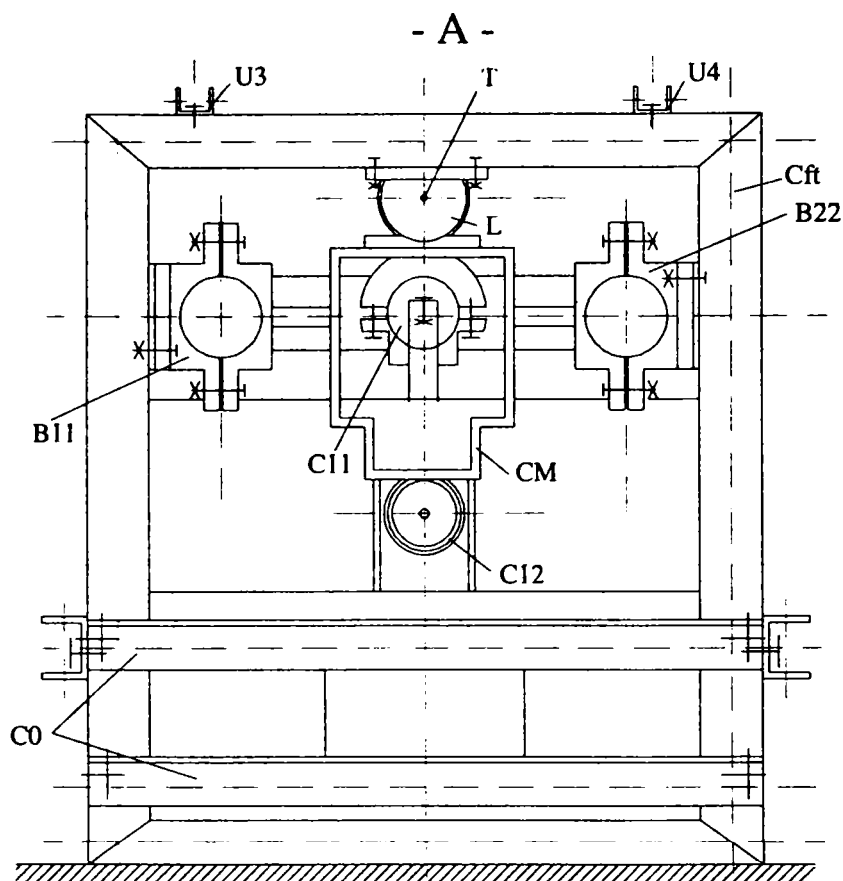
Se poate observa că s-a recurs la o soluție cu controlul pretensionării unilaterale a arcului drept element de execuție pentru **ssbmMe/elast**, plasat – în conformitate cu cele două variante relevate mai jos – în interiorul sau respectiv exteriorul cilindrilor  $C_k$ , indiferent de varianta lor constructivă (aceștia fiind elementele active de control ale **ssbmMe/elast**). Variantele constructive ale cilindrilor se diferențiază prin primul indice plasat după acronimul “C”.



**B - B** ansamblu SRS  
(cu Generatorul de forta si sbs. Cm indepartat)



**Fig. 4.24** Soluția constructivă a standului în varianta mecano-hidraulică



**Fig. 4.25 Soluția constructivă a standului în varianta mecano-hidraulică (continuare; o serie de componente sunt îndepărtate pentru a ușura urmărirea soluției)**

Pentru modificarea caracteristicii de amortizare s-a adoptat soluția utilizării unui drosel (existent), modificat corespunzător, acționat prin intermediul unui subansamblu cu motor pas cu pas (MPP).

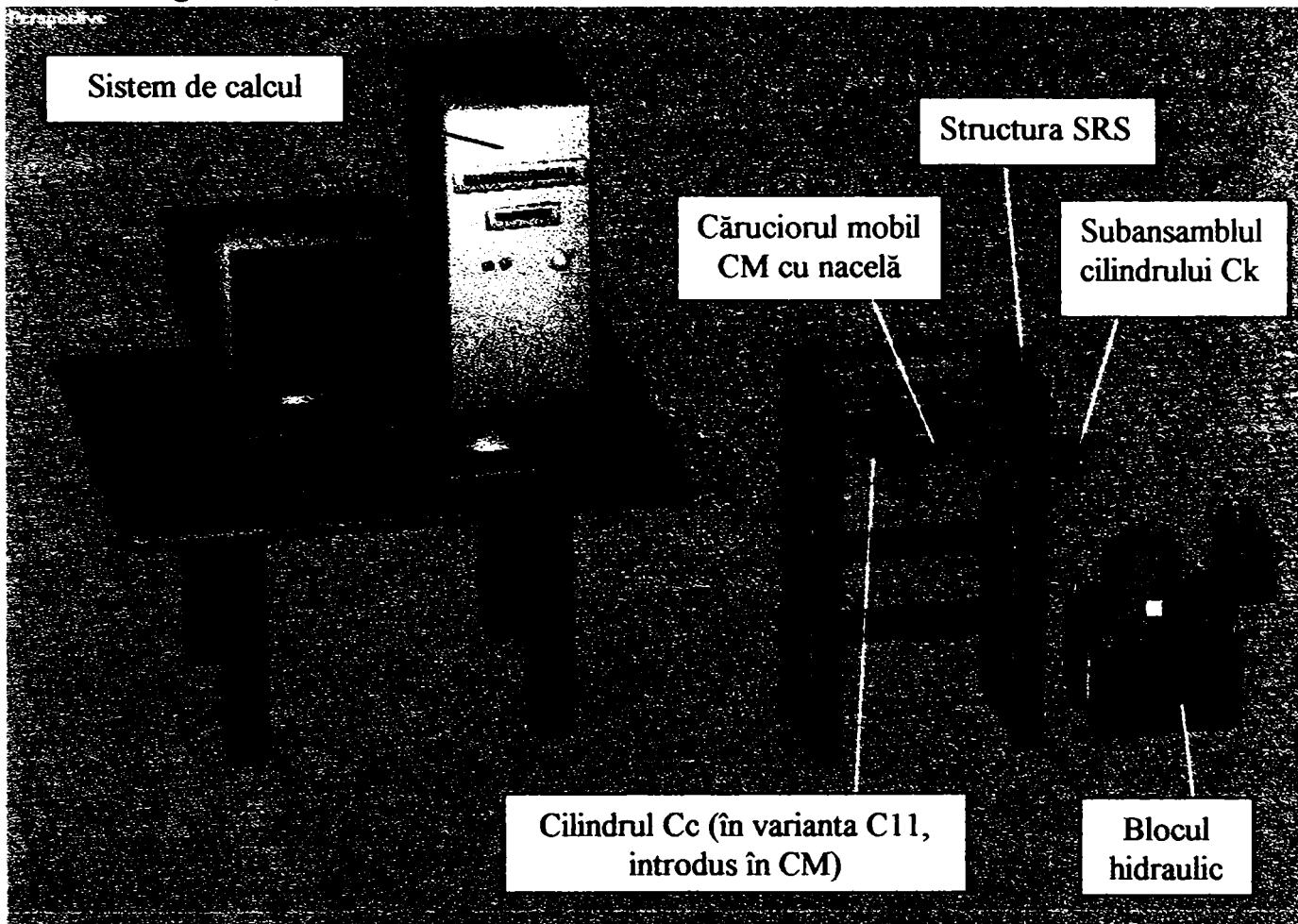
Există mai multe variante proiectate ale standului pe baza acestei scheme, variante care pot fi consultate în [POL97]. Construcția propriu-zisă a standului însă a fost tributară posibilităților de achiziționare a componentelor, cele existente determinând în ultimă instanță și concepția acestuia. Din această cauză, în continuare sunt prezentate variantele care s-au concretizat prin execuție.

Schema – relevată – a soluției constructive permite următoarea grupare a componentelor, grupare care se suprapune peste structura relevată a submodulelor de la subcapitolul 4.1 (fără a coincide în totalitate cu aceasta):

Ä. componentele hidraulice:

- ◇ blocul hidraulic, nefigurat în schemă, pentru simplificare (structura detaliată este enunțată la subcapitolul 4.7.3, blocul fiind un ansamblu preluat din dotarea Departamentului de Mecatronică);
- ◇ conductele rigide și elastice, nefigurate în schemă;
- ◇ cilindrii hidraulici, de două tipuri diferite: C11, C12 și respectiv C21, C22 (elementele active ale *ssbmMe/amort* și respectiv *ssbmMe/elast*; pentru relevarea diferențierii lor s-au atașat notațiile funcționale Cc și Ck) grupate astfel:

- ◆ elementul activ pentru **ssbmMe/elast** este combinația cilindru (indiferent de tipul constructiv) + servovalvă (Sv);
  - ◆ elementul activ pentru **ssbmMe/amort** este un drosel DN 10 modificat (D\_DN10) + subansamblul MPP;
  - ◇ o incintă (INm) destinată modificării masei prin injectarea unei cantități determinate de ulei prin intermediul unui cilindru hidraulic figurat în schemă cu notația funcțională Cm; pentru această rezolvare constructivă a **ssbmMe/masă**, amplasamentul elementului activ Cm nu mai este legat de partea mobilă; cantitatea de ulei este controlată prin intermediul unei servovalve Svm;
- B. ansamblul translație, alcătuit dintr-un ghidaj sub formă de tijă cilindrică T, și un cărucior mobil CM, susținut de o structură spațială 3D, pentru o mai mare rigiditate;



**Fig. 4.26 Modelarea/proiectarea 3D a principalelor subansamble ale mI\_IU; pentru mai multă claritate nu sunt evidențiate legăturile**

- C. structura de rezistență și susținere SRS, care poartă toate componentele (parte a **sbmeM/structură suport** din **sbmuM/complex**);
- D. subansambluri de fixare a componentelor;
- E. subansamblul de gestiune al forțelor alcătuit (în conformitate cu subcapitolul 4.6.3): generatorul de forță, contragreutatea+scripetele (nereprezentat, pentru simplificare), senzor+traductor pentru  $F_1=F_m$  (entități “de trecere”, care leagă fizic și virtual submodulele elementare/parametru unificate de fenomenul interacțiunii propriu-zise).

Structura de rezistență și susținere SRS – prezentată și prin componentele sale în figurile 4.24/4.25, susține componentele “active” ale standului. Este alcătuită din două



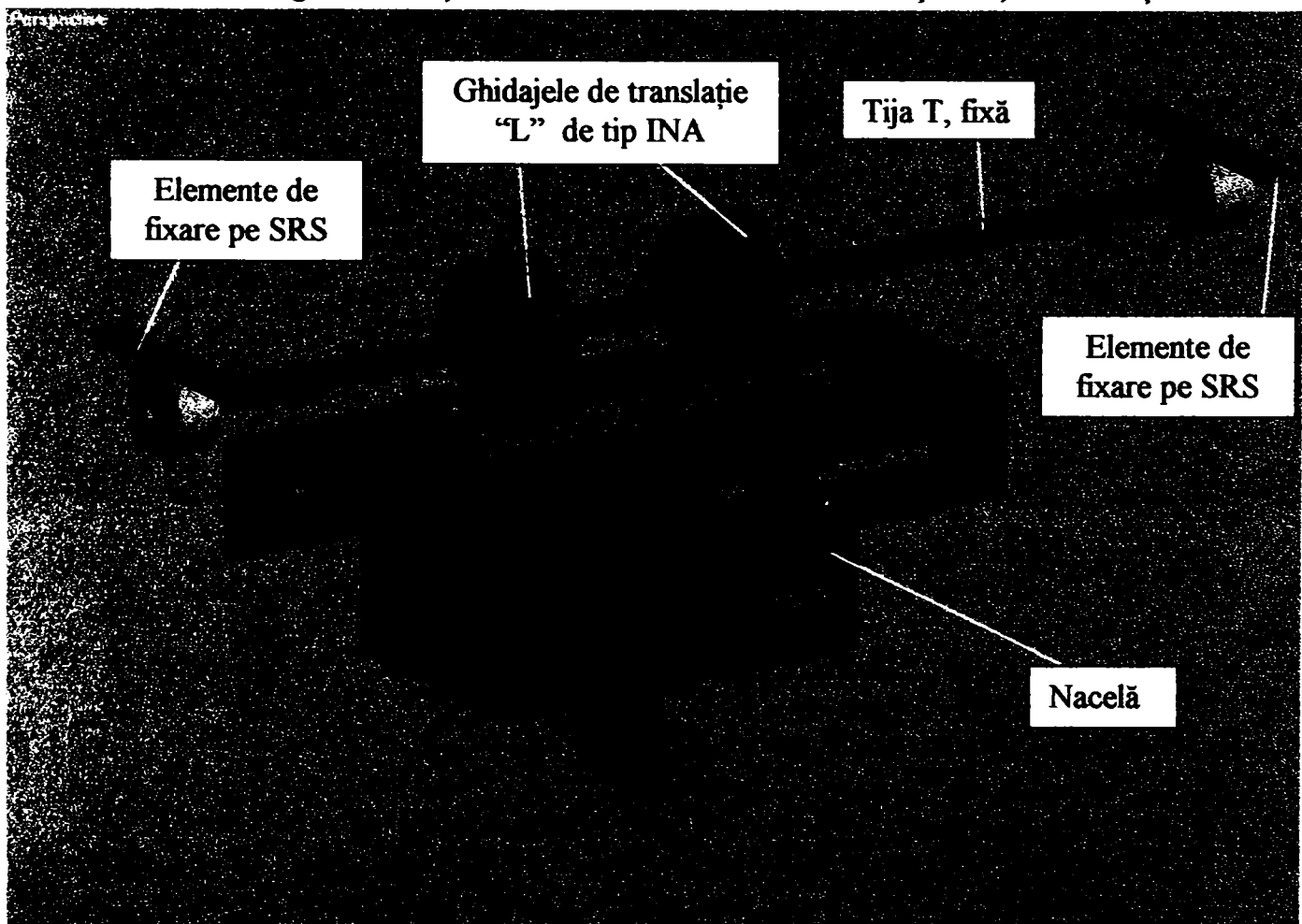
cadre dreptunghiulare sudate din profile U (față/spate): CF<sub>f</sub>/CSp, rigidizate cu ajutorul profilelor U1-4, și CO prin utilizarea unor îmbinări filetate. Prin acest aranjament spațial, se oferă posibilitatea de a fixa în foarte multe variante componentele de tip cilindru și subansamblul motorului pas cu pas. După cum se poate observa, ambele tipuri de cilindri sunt fixați concomitent pe structură, putându-se conecta după cerințe la căruciorul mobil CM prin intermediul celor două tipuri diferite de conexiuni tip bridă:

- ◇ B11+AL/C21 sau C12 +îmbinare pentru modificarea pretensionării arcului
- ◇ B22+CL/C22 sau C11 +îmbinare pentru modificarea amortizării

Tija T este fixată rigid, longitudinal, în interiorul spațiului delimitat de structura de rezistență (pe partea lui superioară) cu subansambluri specializate la care se utilizează îmbinări filetate.

Căruciorul mobil CM are posibilitatea de a executa mișcarea de translație datorită celor două ghidaje-lagăre de translație L, susținute de două elemente-ghidaj INA cu bile, care sunt fixate pe structura spațială a CM. Au fost menționate cele două variante pentru activarea elementelor Ck și respectiv Cc. Analizate din punctul de vedere al părții mobile, acestea pot fi astfel enunțate:

- ◇ CM poartă cilindrul C11 (pentru modificarea amortizării) de care este fixat cu elemente îmbinate; pretensionarea arcului este asigurată de cilindrul C12, purtat deasemenea de CM (CL și AL neactivate!)
- ◇ CM are activate conexiunile îmbinate CL și AL pentru cilindrii C21=Ck (cu arcul de pretensionare montat în interior) și C22 = Cc (legat de Rsp+MPP); nu există legătură funcțională în acest caz cu cilindrii C11 și C12, dezafecțați.



**Fig. 4.27 Modelarea/proiectarea 3D a CM sub forma unei "nacele" susținute de ghidajele de translație**

conducerea aplicației. Figura 4.27 prezintă structura căruciorului mobil CM sub forma unui subansamblu “nacelă” care poartă - în mișcare de translație - părțile mobile ale mI\_IU.

### Concluzie

*Elementele active ale submodulelor mecanice/parametru sunt (după cum se poate observa din figurile 4.24-4.28): câte un cilindru hidraulic pentru componentele de masă (Cm) și elasticitate (Ck) comandate prin servovalvele Sv și un motor-pas-cu-pas + drosel modificat pentru componenta de amortizare (Cc) a impedanței mecanice.*

*Există o diferență de model mecano-matematic între cele două variante, cea validă și utilizabilă rămânând prima, după cum se va constata la subcapitolul 4.9.*

## 4.6.5 Soluția constructivă a standului experimental (variantea “mecano-electrică”)

### 4.6.5.1 Prezentarea

standului este efectuată în figurile 4.28 și 4.29. Aceasta preia de la varianta anterioară:

- ◇ elementele de bază de la structura de rezistență și susținere SRS, la care s-au atașat prin îmbinări alte elemente în funcție de necesități; acestea sunt deasemenea notate pe figuri pentru o identificare mai facilă a orientării standului;
- ◇ căruciorul mobil CM într-una din variantele sale;
- ◇ elementele de execuție-parametru pentru masă și amortizare din cadrul **ssbmMe/masă** respectiv **ssbmMe/amort** (cilindrii Cm și Cc= C11);
- ◇ incinta purtătoare de masă INm, controlul cantității de ulei introduse/extrase din incintă (prin intermediul unor conducte flexibile) fiind asigurat prin legătura volum-cursă a cilindrului hidraulic Cm;
- ◇ mecanismul de translație (lagărele/ghidajele INĀ+tija T rigid legată de SRS);
- ◇ **ssbmMe/amort** (elementul de execuție, D\_DN10 și cel activ, MPP), dar într-o altfel de dispunere.

Țu fost nou adoptate sau/și concepute următoarele ansambluri/componente/soluții:

- ✓ generatorul de forță, electro-mecanic, este preluat din dotarea Departamentului de Mecatronică; acesta este atașat standului cu ajutorul cadrului CDĀ1;
- ✓ aplicarea forței Fm generate de mediu se efectuează prin intermediul unui arc elicoidal de compresiune (ĀFm+TF1), la care controlul săgeții oferă și posibilitatea controlului forței propriu-zise
- ✓ aplicarea și menținerea forței preconizate Fp se efectuează cu ajutorul unei contragreutăți G=Fm care “tractează” permanent partea mobilă prin intermediul unui fir inextensibil cu ajutorul unui mecanism de tip scripete alcătuit din două role atașate de SRS prin mijlocirea unui cadrului CDĀR; se elimină astfel senzorul TF2;
- ✓ elementele active ale **ssbmMe/masă** și **ssbmMe/elast** sunt servomotoarele electrice liniare de tip STRONG achiziționate și modificate corespunzător în cadrul Departamentului de Mecatronică - (“actuatoare” electro-mecanice în locul cilindrului hidraulici);

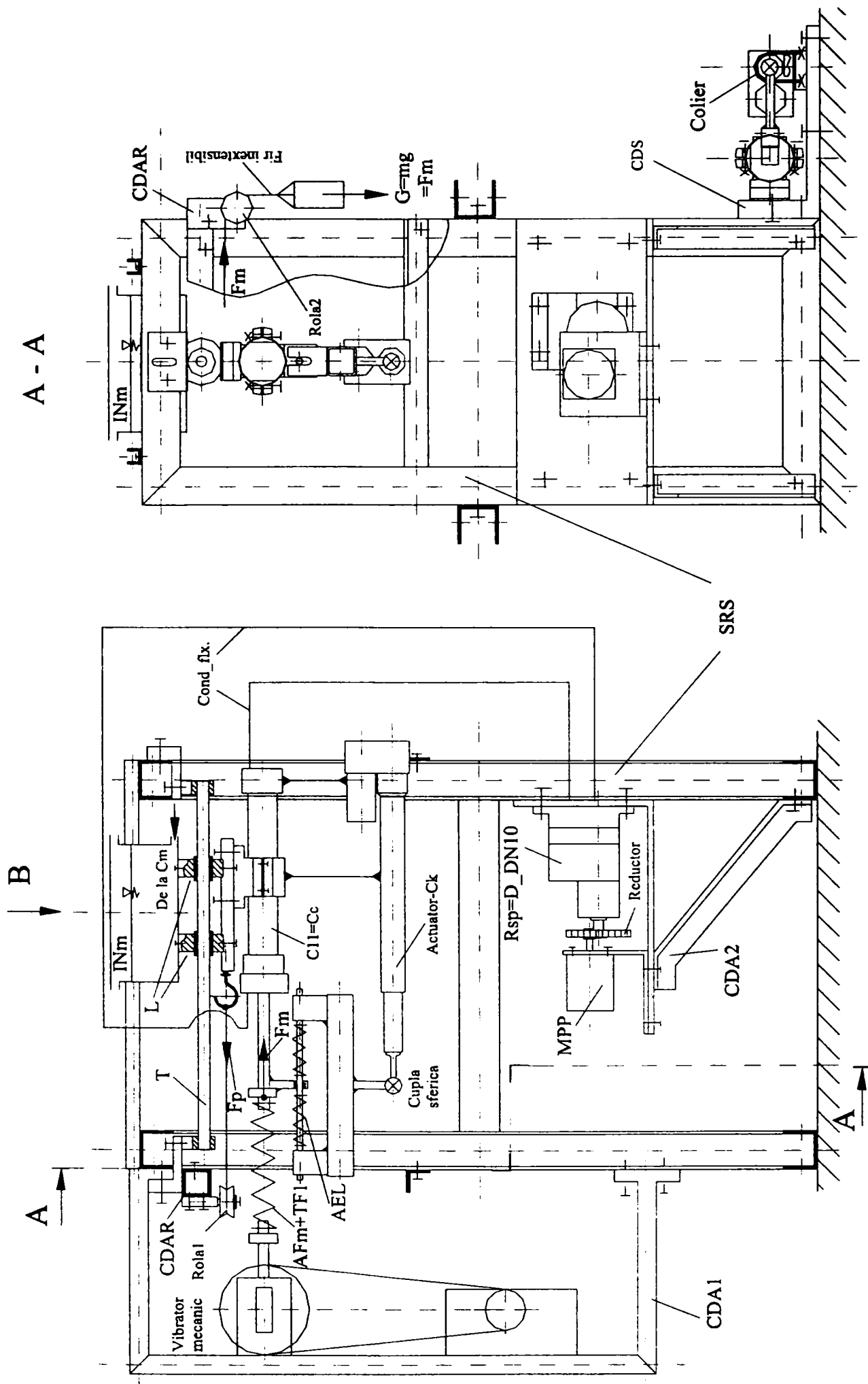
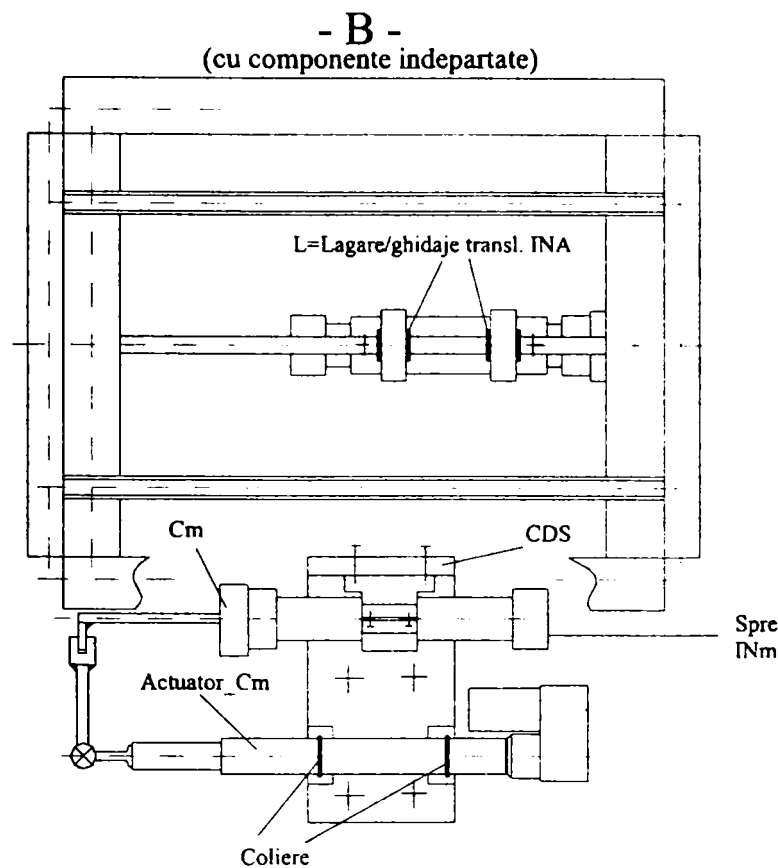


Fig. 4.28 Soluția constructivă a standului în varianta mecano-electrică



**Fig. 4.29 Soluția constructivă a standului în varianta mecano-electrică (continuare)**

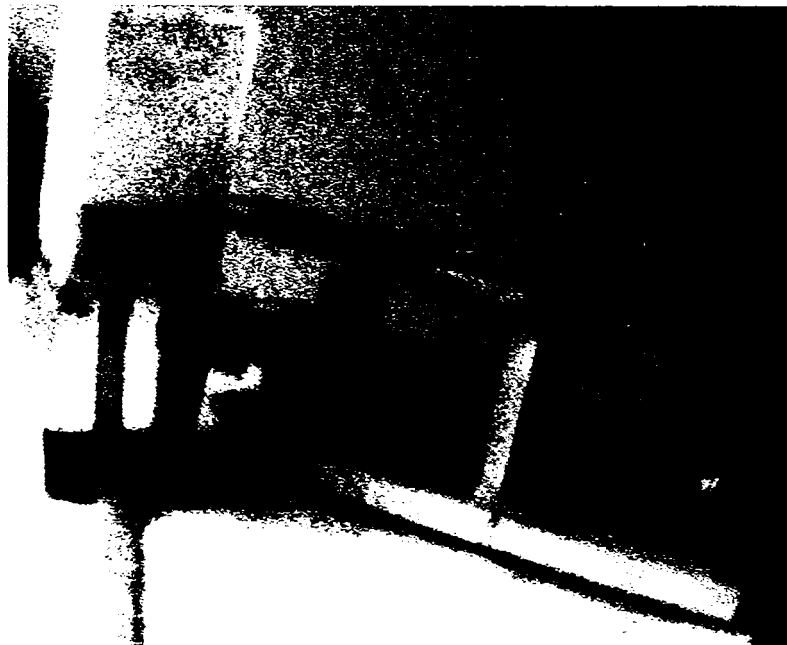
- ✓ ambele componente funcționale ale *ssbmMe/masă* (elementul de execuție+cel activ) sunt fixate pe un cadru suplimentar CDS; acesta poate fi plasat lângă SRS, nefiind necesară atașarea lui de SRS (legătura se efectuează prin conducte flexibile);
- ✓ componentele funcționale ale elementului activ al *ssbmMe/amort* (MPP+D\_DN10 cu un reductor intercalat) sunt plasate pe cadrul atașat CDA2; părțile acestuia sunt preluate de la standul auxiliar, prezentat la subcapitolul 4.7; și în acest caz componentele pot fi detașate de SRS, putând funcționa de pe masa standului auxiliar;
- ✓ pentru modificarea parametrului de elasticitate există două arcuri; soluția permite pretensionarea bilaterală a elementelor arc AEL pentru a putea reacționa individualizat la fiecare sens al forței de contact (fiecare arc lucrează exclusiv la compresiune, pentru câte unul din sensurile acesteia).

#### 4.6.5.2 Realizarea

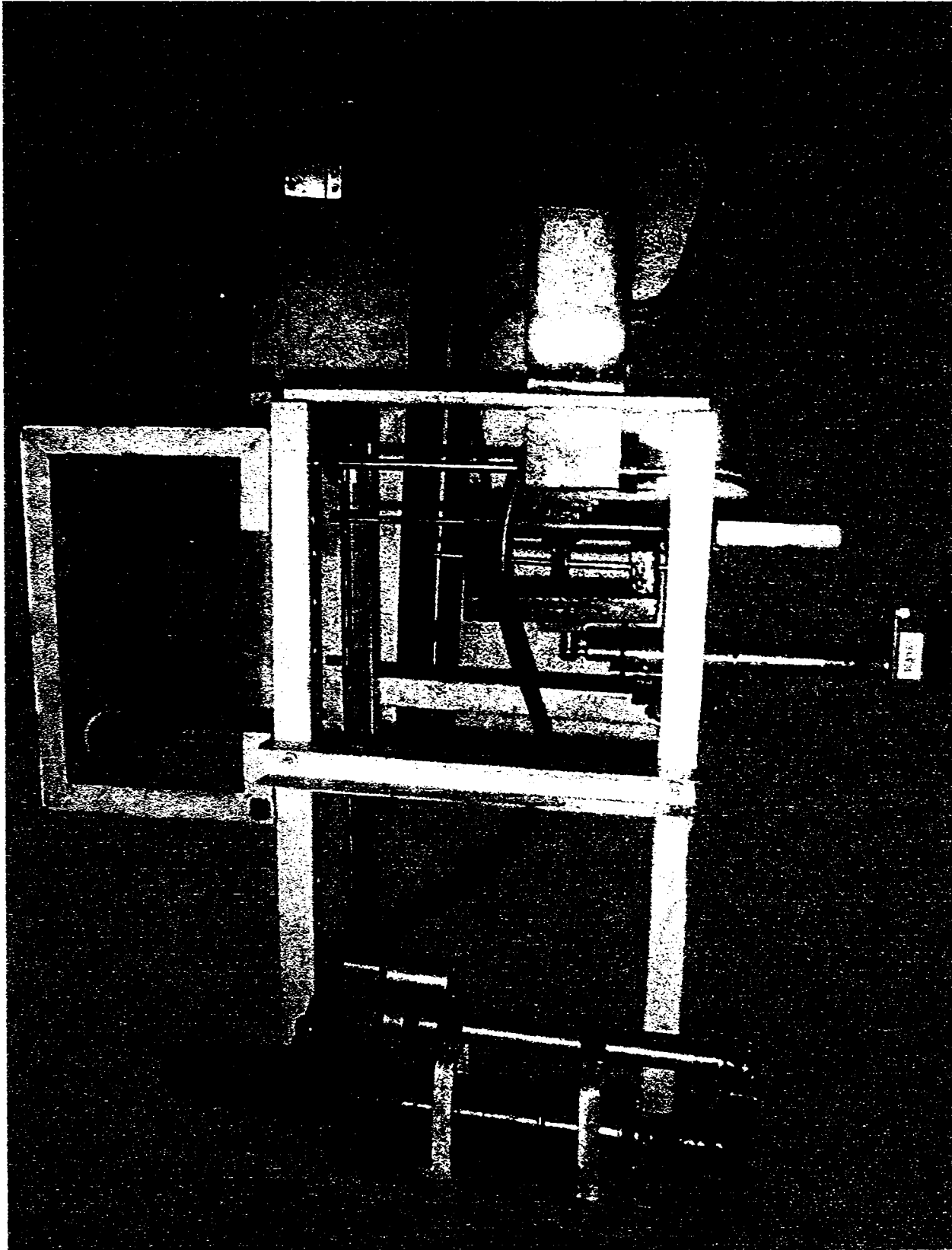
standului poate fi observată în câteva imagini preluate în figurile următoare.



**Fig. 4.30 Vedere a standului mecano-electric la montaj: structura SRS, cu mecanismul de translație (tija T și lagărele/ghidaje INA), respectiv cadrul CDA1 și vibratorul mecanic încorporate**



**Fig. 4.31 Vedere a componentelor sbmMe/masă a standului mecano-electric: incinta INm, actuatorul Cm și cilindrul de execuție Cm**



**Fig. 4.32 Vedere a standului mecano-electric cu majoritatea subansamblelor montate; sbmMe/amort funcționează cu elementele active (statice) direct de pe standul auxiliar (vizibil în fundal)**

## 4.7 Determinări preliminare necesare punerii în funcțiune a standului. Standul auxiliar de determinare a caracteristicilor de amortizare a sbmeM/amort ([Luc01a])

### 4.7.1 Introducere

Legile de conducere impun o valoare determinată pentru fiecare din parametrii impedanței mecanice la un moment dat. Aceste valori pot fi atinse prin intermediul elementului activ care realizează modificarea efectivă a parametrului respectiv. În cazul parametrilor masă și rigiditate/elasticitate, acest lucru nu ridică probleme deosebite (rezumându-se la realizarea unei deplasări după legi cunoscute din relația deplasare-volum, respectiv săgeată-forță în cazul utilizării drept element activ al unor servomotoare liniare, indiferent dacă sunt cilindrii hidraulici sau electro-mecanici: “actuatoarele” din schemele soluțiilor constructive). În cazul componentei de amortizare a impedanței mecanice însă, este nevoie de o determinare prin experiment a variației coeficientului de amortizare funcție de parametrul de conducere al elementului activ pentru circuitul hidraulic concret care intră în componența modulului inteligent al aplicației “contact-task”. Pentru soluția concretă este vorba de variația coeficientului de amortizare funcție de gradul de obturare al droselului D\_DN10 (=rezistența hidraulică  $R_{sp}$ ), în ultimă instanță de numărul de pași ai MPP care-l comandă.

### 4.7.2 Modalitatea de determinare a coeficientului de amortizare

În modelul matematic general al sistemului - interacțiune (ecuația de mișcare), fiecare termen reprezintă o mărime fizică de tip forță. Termenul corespunzător amortizării:

$$F = c \cdot \dot{x} \quad \text{U} \quad \dot{x} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (4.9)$$

relevă și modalitatea prin care este posibilă determinarea practică a coeficientului de amortizare vâscoasă pentru o deschidere determinată a droselului dispus pe parcursul intrare-ieșire a cilindrului hidraulic (în by-pas) aferent, din componența standului:

- impunând drept cursă  $\Delta x = l$  ( $l$  fiind lungimea de deplasare adoptată a tijeii pistonului);

- impunând o forță determinată  $F (=mg)$ , masa  $m$ , cunoscută se deplasează pe verticală);

- măsurând intervalul de timp  $\Delta t$  în care tija pistonului cilindrului hidraulic parcurge distanța  $l$  (trecerea prin dreptul a două repere) sub acțiunea greutății  $mg$ ;

- calculând coeficientul de amortizare pentru deschiderea curentă a droselului:

$$c = \frac{F}{l} \cdot \Delta t \quad (4.10)$$

Reluând procedura pentru alte deschideri ale droselului, se poate obține variația coeficientului de amortizare în funcție de deschiderea droselului (respectiv funcție de numărul de pași ai motorului de acționare a droselului).

### 4.7.3 Standul auxiliar pentru determinarea variației coeficientului de amortizare vâscoasă

#### 4.7.3.1 Descrierea standului

Standul - după cum se poate observa în schema din fig. 4.33 și soluția constructivă din figurile 4.34, 4.35 - este alcătuit din:

- a) subsistemul de comandă: Calculator+soft aferent;
- b) subsistemul hidraulic de alimentare (panou hidraulic "Balanța" Sibiu, care se utilizează și la standul propriu-zis în varianta "hidraulică", capitolul 4.6); acesta conține:
  - ◇ -un motor electric de acționare a pompei;
  - ◇ -o pompă hidraulică;
  - ◇ -un distribuitor cu 4 căi, 3 poziții;
  - ◇ -o supapă de siguranță reglabilă;
  - ◇ -un manometru pentru măsurarea presiunii;
  - ◇ -un filtru de ulei;

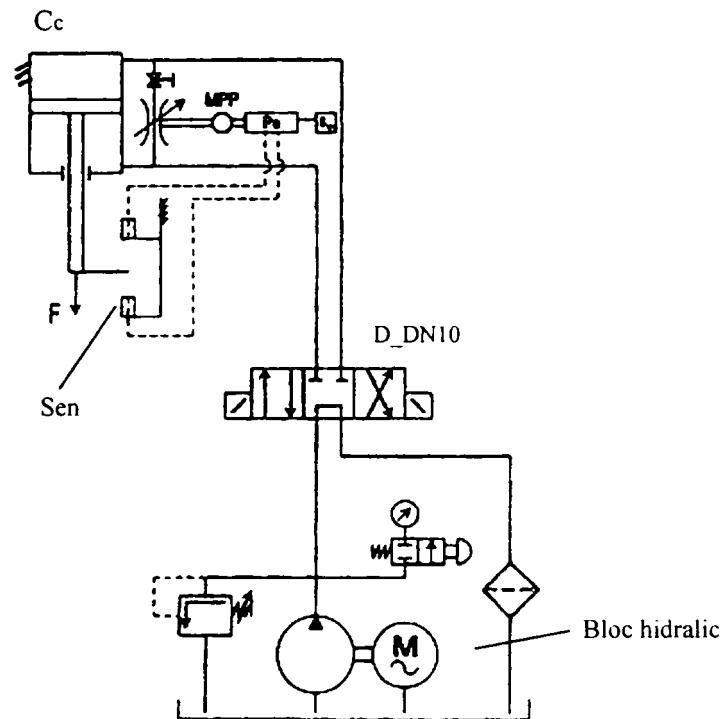


Fig. 4.33 Schema standului auxiliar, de determinare a variației coeficientului de amortizare vâscoasă funcție de numărul de pași MPP (stand "etalonare/calibrare")

- c) subsistemul de experimentare propriu-zis (de fapt **ssbmMe/amort**):
  - ◇ -un motor pas cu pas (MPP);
  - ◇ -un drosel D\_DN10, (tip 1P10M modificat);
  - ◇ -un robinet cu cap sferic RS10;
  - ◇ -un cilindru hidraulic  $\phi 25 \times \phi 8 \times 200$ ;
  - ◇ -cuplajele elastice;
- d) traductoare de poziție și relee de sesizare a trecerii peste reперele stabilite la distanța  $l$  (entități de trecere, "Sen" în figuri);



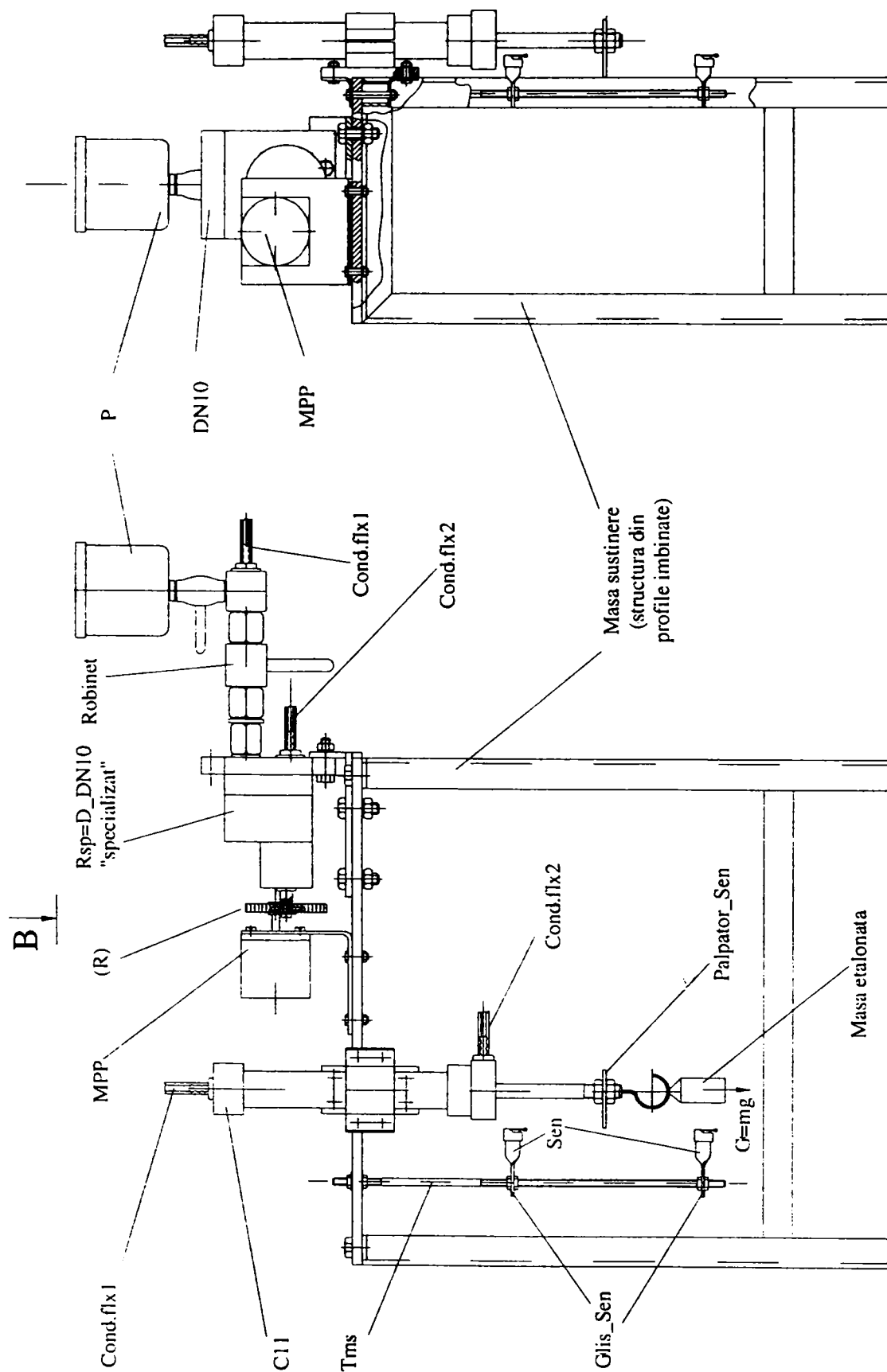
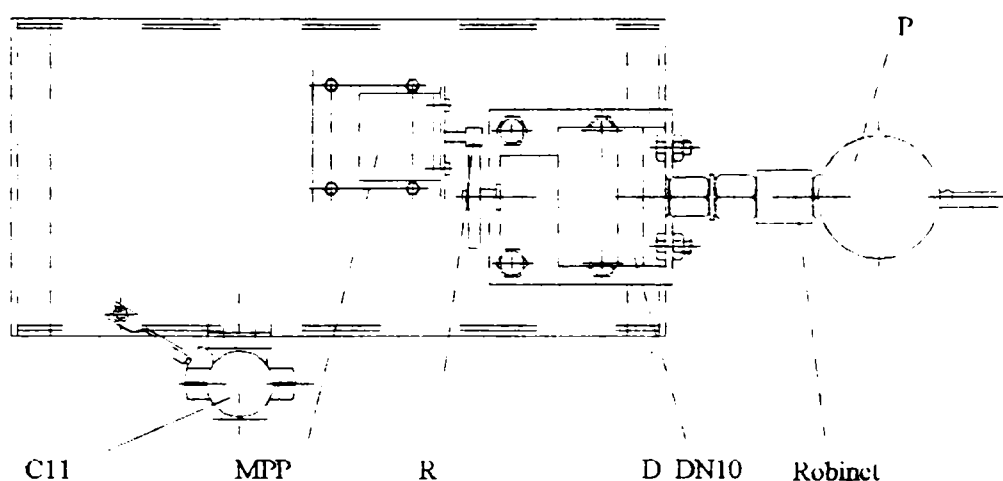


Fig. 4.34 Soluția constructivă a standului auxiliar

- B -



**Fig. 4.35 Standul auxiliar, continuare (vedere de sus)**

e) părți mecanice auxiliare:

- ◇ -o tijă metalică  $T_m$  pentru amplasarea senzorilor;
- ◇ -conduțe de presiune, reducții;
- ◇ - o incintă de umplere P
- ◇ -o structură metalică de susținere ("masă susținere");

f) subsistemul electric nerelevat în figuri (plasează în apropierea structurii mecanice, prezentate) format din :

- ◇ -un transformator;
- ◇ -o punte redresoare și filtrare (24 V pentru partea de forță și 7 V pentru alimentarea părții de comandă dacă se utilizează un micro-calculator/controler);
- ◇ -auxilare (siguranțe, etc).

Standul auxiliar a fost realizat în colaborare cu foști absolvenți ai "Politehnicii" de la S.C. "Hidrotim" Timișoara, prin amabilitatea cărora ne-au fost împrumutate mai multe din componentele necesare. Soluția constructivă a acestui stand este prezentată în figurile 4.34 și 4.35.

#### **Observație**

*O simplificare maximă se poate obține realizând manipularea manuală (la ridicare) a tijei cilindrului având notația funcțională din scheme Cc (cilindrul realizat în varianta C11). Dispar cu totul componentele de acționare hidraulică din acest stand, aceasta fiind și varianta de lucru realizată și prezentată în schemele soluțiilor constructive și imaginile din figuri.*

4.7.3.2 Algoritm de lucru de utilizat la determinarea variației coeficientului de amortizare vâscoasă

În conformitate cu ordinograma din figura 4.36, se vor parcurge următoarele etape pentru determinarea variației coeficientului de amortizare vâscoasă cu ajutorul standului (cilindrul care va fi utilizat în cadrul investigației aplicației de tip contact-task este chiar cel care intră în alcătuirea standului prezentat la capitolul 4.6):

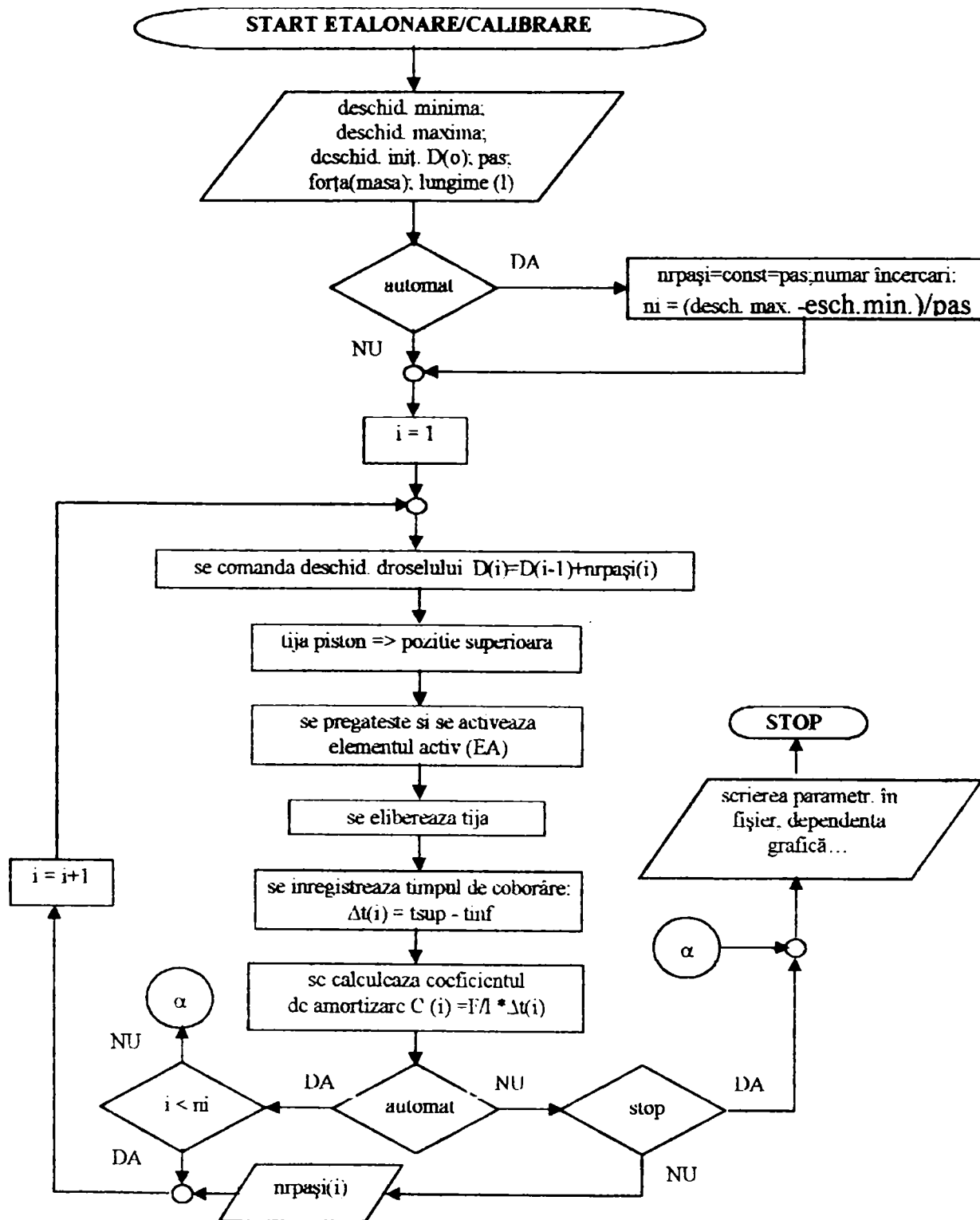


Fig. 4.36 Algoritm de lucru utilizat la determinarea variației coeficientului de amortizare vâscoasă funcție de numărul de pași ai MPP

- ◇ -se comandă și se realizează o deschidere determinată a droselului (calculator-panou electric-motor pas cu pas-reductor);
- ◇ -se dispune și se blochează tija pistonului cilindrului hidraulic în poziție superioară (cu distribuitorul în poziție “zero”);
- ◇ -se atârână masa  $m$  de capătul tije (dacă nu a fost încă dispusă pe sistemul de susținere aferent);
- ◇ -se acționează asupra robinetului cu MPP (comandat de sistemul de conducere al standului auxiliar);
- ◇ se deblochează tija pistonului (drept urmare, aceasta începe să coboare sub acțiunea greutatei  $mg$ );
- ◇ -este înregistrat timpul de coborâre (semnale de la traductoare-interfață+program);
- ◇ -se calculează și se afișează (la cerere) valoarea coeficientului de amortizare,  $c$  (program) pentru deschiderea curentă a robinetului, exprimată prin numărul de pași ai MPP;
- ◇ -se comandă ridicarea tije pistonului în poziție inițială (închidere robinet-distribuitor în poziție “unu” - ulei hidraulic-acționare și mișcare piston);

Se repetă ciclul de câte ori hotărăște investigatorul, traseul concret urmat la etalonare având două variante distincte: MANUAL și AUTOMAT; acestea diferă în principal prin faptul că la cea de-a doua variantă numărul de pași nu poate fi modificat la fiecare iterație funcțională a algoritmului. Rezultă o dependență coeficient de amortizare vâscoasă-deschidere drosel (exprimată prin numărul de pași la MPP) care este utilizată pentru comanda modificării parametrului “ $c$ ” în cadrul studiului aplicațiilor de tip “contact-task” pe standul prezentat la capitolul 4.6.

Programul de conducere al standului auxiliar care oferă posibilitatea urmăririi on-line, prin algoritm, a determinărilor, realizând totodată înregistrarea și prelucrarea rezultatelor, a fost conceput în două variante: una mai simplă (sub DOS) și a doua, sub VISUAL\_BASICS. Cea de-a doua variantă va fi prezentată în subcapitolul 4.8 și este încorporată în pachetul-soft SOFMINT\_ACT.

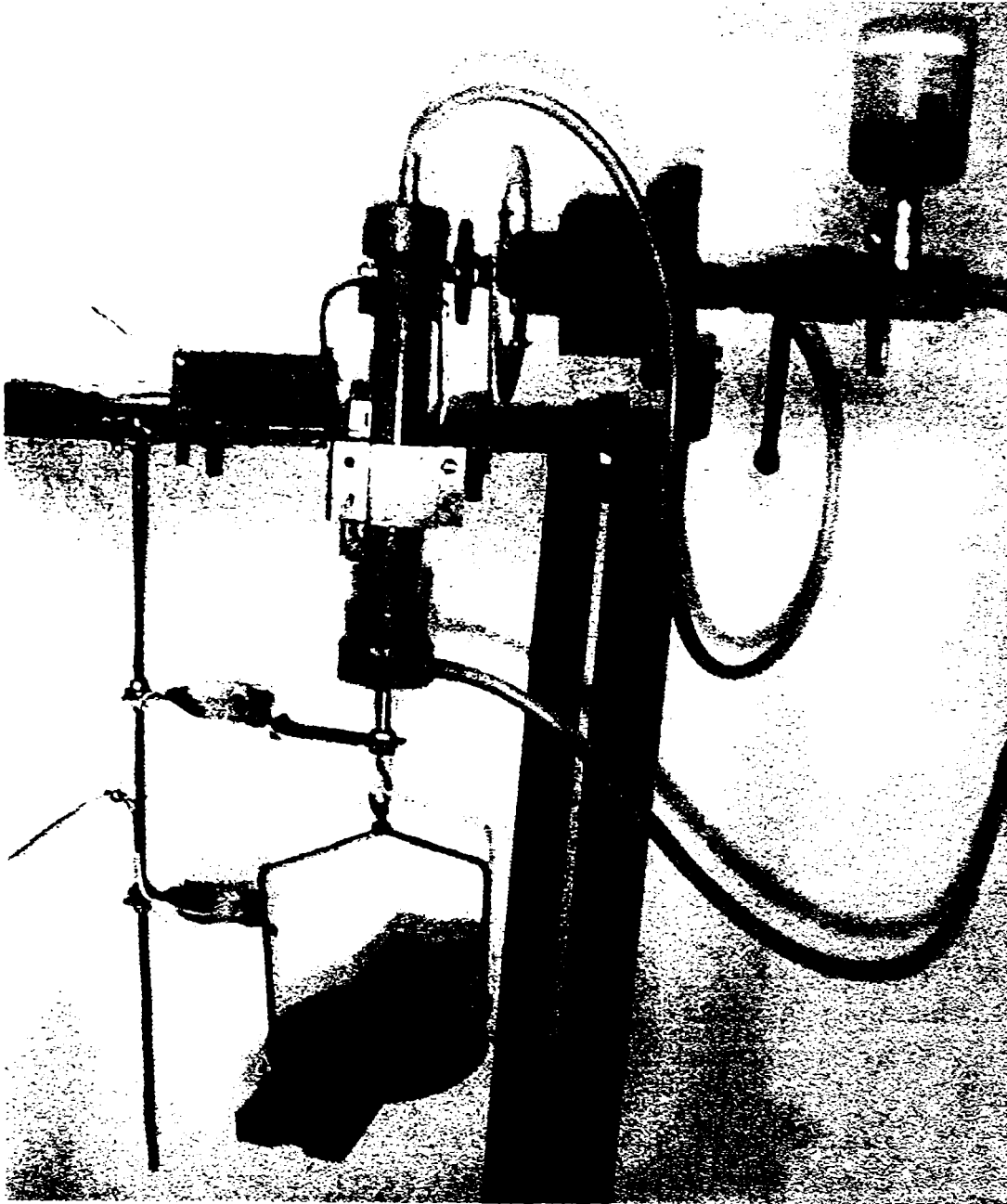
#### 4.7.4 Concluzii; realizare

Determinarea experimentală a variației parametrului de amortizare funcție de parametrul de comandă al elementului activ la un circuit hidraulic utilizat drept submodul de amortizare a standului pentru investigarea aplicațiilor “contact-task” este absolut necesară, determinarea teoretică a acestuia nefiind posibilă.

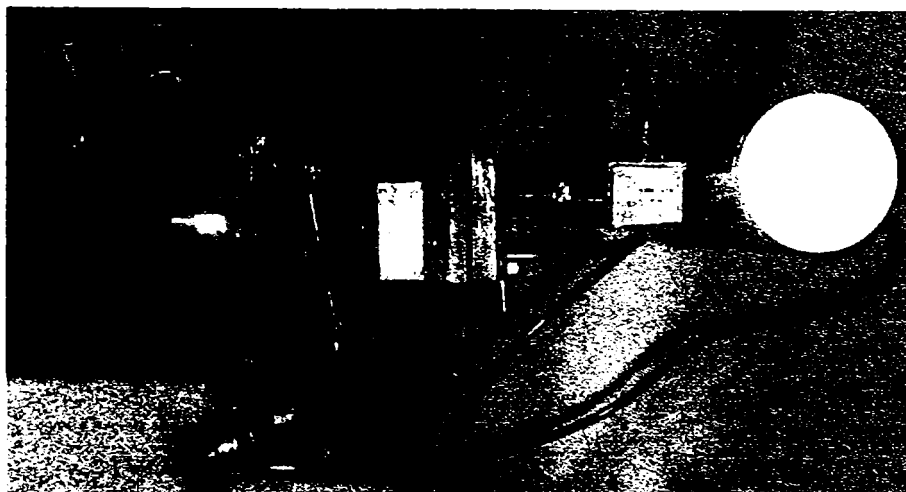
Standul dedicat acestei determinări are două moduri de funcționare: automat și manual și este monitorizat și condus - în varianta 1.1 - de pachetul de soft conceput sub VISUAL\_BASICS 6.0 - prin intermediul unui modul software utilizat de ETALONARE/CALIBRARE, preconizat a fi dotat cu o interfață de comunicație în conformitate cu cele prezentate la capitolul 4.8).

Rezultatul investigației experimentale pentru structura funcțională a submodulului aferent modificării coeficientului de amortizare este o dependență “coeficient de amortizare-număr\_de\_pași\_la\_MPP” care este utilizată sub formă adecvată în cadrul algoritmului de conducere al investigației experimentale contact-task propriu-zise.

În figurile următoare sunt prezentate imagini ale standului auxiliar realizat.



**Fig. 4.37** Vedere a standului auxiliar în timpul determinării dependenței coeficientul de amortizare ("c") și numărul de pași de executat de MPP



**Fig. 4.38** Vedere de sus a componentelor standului auxiliar: MPP, reductor, D-DN10 și incinta P

## 4.8 Mediul soft **SOFMINT\_AC-T** aferent unei aplicații de tip “contact-task” ([Cra98], [Hey96], [Kil97], [Luc98g], [Luc99b], [Luc99g], [Luc00a-f])

### 4.8.1 Introducere

Pornind de la modelul și conceptul prezentat al modulului cu un singur grad de libertate, dedicat interacțiunii inteligente dintre un sistem de lucru și sistemul mediu înconjurător, pe baza celor expuse la modelarea complet structurată a sbmE/config\_hard&soft (subcapitolul 4.4.2.2) a fost conceput - în mediul de programare **VISUAL BASIC 6.0** (VB în continuare)- pachetul **SOFT**ware aferent unui Modul interfață-**IN**Telligent al unei Aplicații **CONTACT-TASK**” (abrevierea fiind – evident - **SOFMINT\_AC-T**), capabil să gestioneze complet o aplicație de tip “contact-task”, având drept scop diminuarea forței de contact ce apare între cele două sisteme (implicit și diminuarea efectelor negative provocate de această forță) - prin acțiunea controlată, pe baza unor legi impuse, asupra caracteristicilor intrinseci ale mediului.

### 4.8.2 Prezentare generală și structura mediului soft **SOFMINT\_AC-T**

După cum se observă în ordinograma din figura 4.40, utilizatorul are posibilitatea unui acces ușor și interactiv la o sesiune de lucru, datorită unei interfețe grafice performante (**GUI** – “Graphic User Interface”). Diferitele sesiuni de lucru sunt accesate prin obiectele buton de comandă ale interfeței **GUI** de tip “meniu principal” (prezentată în figura 4.39 și instalată prin procedura de interfațare **MONITOR\_AC-T**), care oferă posibilitatea de:

- realizare a conducerii “on-line” (în timp real) al modulului **mI\_IU**;
- simulare a fenomenului (cu simulatorul **SMILEC\_T**);
- determinare a curbei de etalonare/calibrare (variația coeficientului de amortizare vâscoasă funcție de numărul de pași ai MPP) a unui circuit hidraulic care va funcționa drept submodul pentru modificarea coeficientului de amortizare vâscoasă;
- obținerea informațiilor despre modul de tratare a fenomenului, modul de lucru cu pachetul soft prin intermediul **GUI** (modulul de tip “help” clasic) precum și despre autor (modulul de tip “about”);
- modificare/stabilire a setărilor aferente unor legi noi de conducere/parametru;
- ieșire din program;

În varianta 1.0 a pachetului **SOFMINT\_AC-T** au fost implementate modulele soft “personalizate” (relativ la standul executat, pentru conducere “on-line” și calibrare)

din punctul de vedere al parametrilor și legilor de conducere, fără interfațare. Accesul la parametrii pentru prelucrarea și prezentarea rezultatelor se realizează direct prin secvențele de program care urmează algoritmi prezentați în ordinogramele aferente.

Varianta 1.1 are în plus o interfață grafică pentru modulul de calibrare/etalonare (prezentată în figura 4.55) și posibilitatea de a accesa un modul suplimentar de alegere a categoriilor de legi utilizate în sesiunea de lucru pentru: generatorul de forță, conducerea inteligentă (“algor” în ordinograme) referitor la parametrii impedanței mecanice și a algoritmului de integrare (singular deocamdată: Runge\_Kutta 4). Butonul “Legi\_noi” este preconizat pentru dezvoltări ulterioare de implementare a diferitelor categorii de legi necesare sesiunii de lucru. Dezvoltarea aceasta se prevede pentru simularea unor sisteme cu diferite submodule-execuție-parametru. Pentru modulul de lucru “on-line” varianta finală de interfațare va fi utilizarea ferestrei simulatorului SMILEC\_T, după cum se observă și în ordinograma pachetului general. Varianta funcțională, de lucru, este prezentată la subcapitolul 4.10.

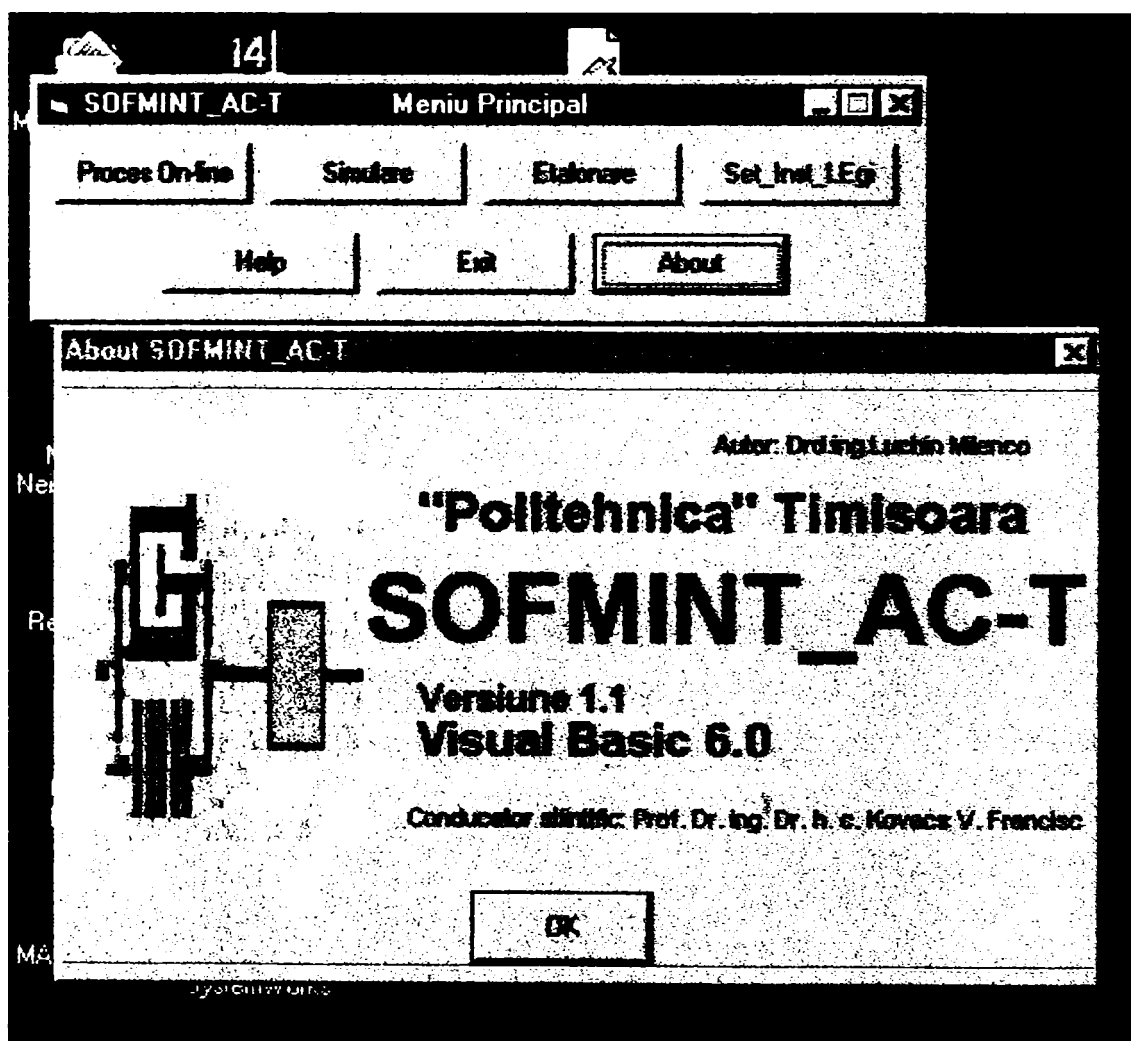


Fig. 4.39 Meniul principal al mediului SOFMINT\_AC-T din care s-a accesat fereastra About

Modulul soft de conducere “on-line” lucrează cu modelele matematice “personalizate” după cum s-a menționat anterior. Aceste modele sunt prezentate și analizate la subcapitolul 4.9.

Simulatorul SMILEC\_T este prezentat integral la subcapitolul 4.8.3, iar interfața GUI a modulului de calibrare/etalonare (care lucrează în conformitate cu algoritmul din figura 4.36) este prezentată la subcapitolul 4.8.4

#### 4. NOI SOLUȚII de MODULE-INTERFAȚĂ INTELIGENTE

Modulul soft de informare a fost conceput – pentru simplificare – în format Word și MS\_Explorer (în două variante, cea de-a doua, mult mai compactă) cu utilizarea funcției “hyperlink”. În figurile 4.41 și 4.42 sunt reproduse ferestrele “help” în cele două variante, cu indicarea unuia din cuvintele cheie legat cu textul său de referire.

Utilizarea etichetelor în limba engleză pentru obiectele-buton de comandă din partea inferioară a meniului principal - precum și a altor etichete de acest gen sesizate în prezentările care urmează - a survenit doar din rațiuni de obișnuință a utilizatorilor soft.

Pachetul soft **SOMINT\_AC-T** nativ este structurat în următoarele fișiere/grupuri de fișiere:

**Tabelul 4.3**

Nr.	Denumire/ număr de fișiere	Extensie	Cantit. de informație [kb]	Observații
1)	<i>sofmint</i>	<i>vbp</i>	1,037	Proiectul VB
2)	<i>smstart</i>	<i>bas</i>	5,548	Modulul simulare
3)	<i>calstart</i>	<i>bas</i>	0,616	Modulul de start pentru etalonare/calibrare
4)	14 fișiere	<i>frm</i>	0,186	Ferestrele de lucru/about/atentionare
5)	7 fișiere	<i>frx</i>	0,082	
6)	2 fișiere	<i>ico</i>	2,166	Obiectele-săgeți specializate
7)	<i>Sofmint</i>	<i>vbw</i>	0,598	
8)	<i>act_online</i>	<i>exe</i>	65,200	Modulul de conducere on-line (fișier extern)
9)	<i>calib</i>	<i>exe</i>	12,940	Modulul de calibrare (fișier extern)
10)	<i>Sofmint_hlp</i>	<i>htm</i>	23,347	Help-ul pachetului (fișier extern)

Transformarea în fișier “\*.exe” a proiectului **VB** a condus la fișierul *sofmint\_act.exe* de 270,336 kb.



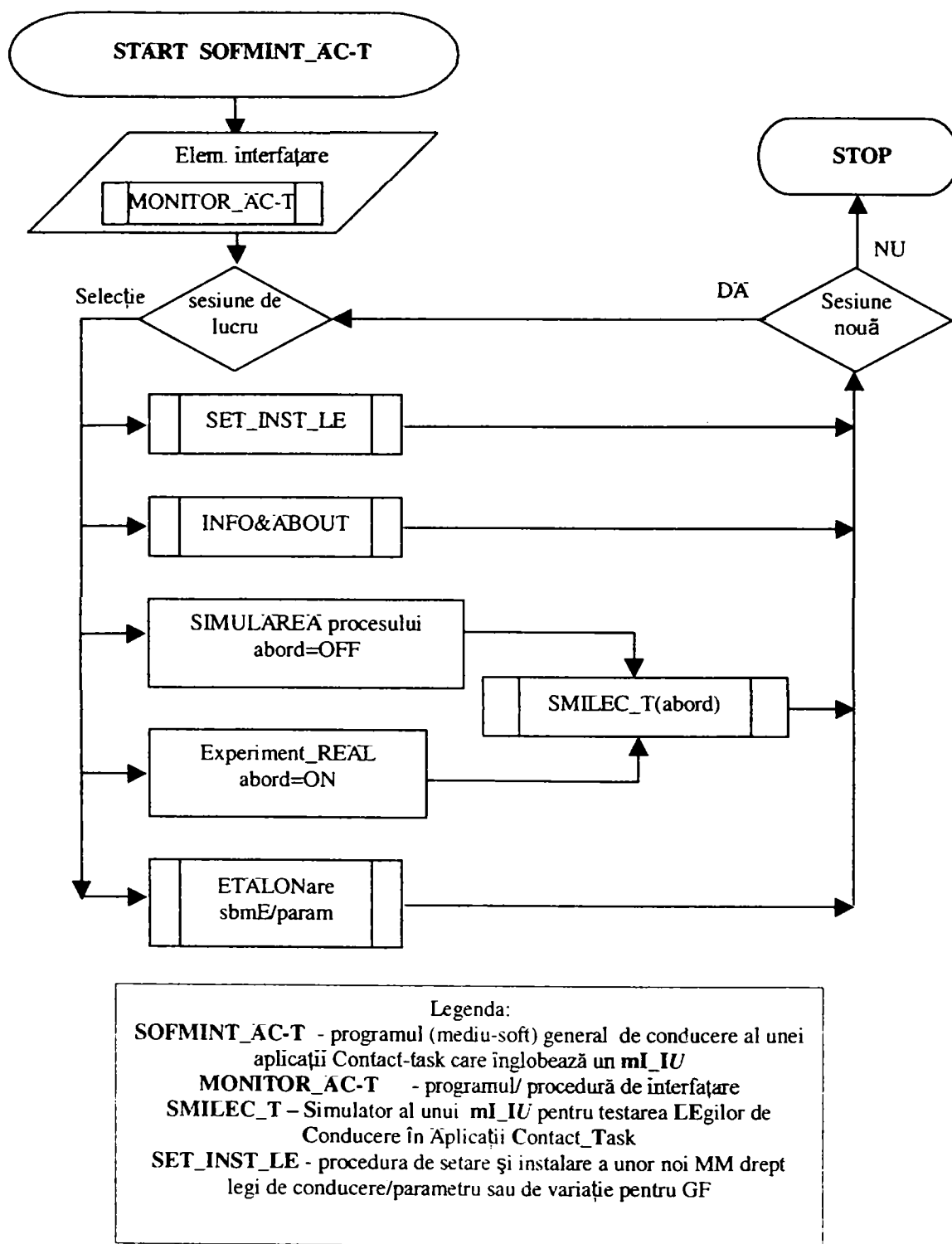


Fig. 4.40 Ordinograma mediului-soft SOFMINT\_AC-T

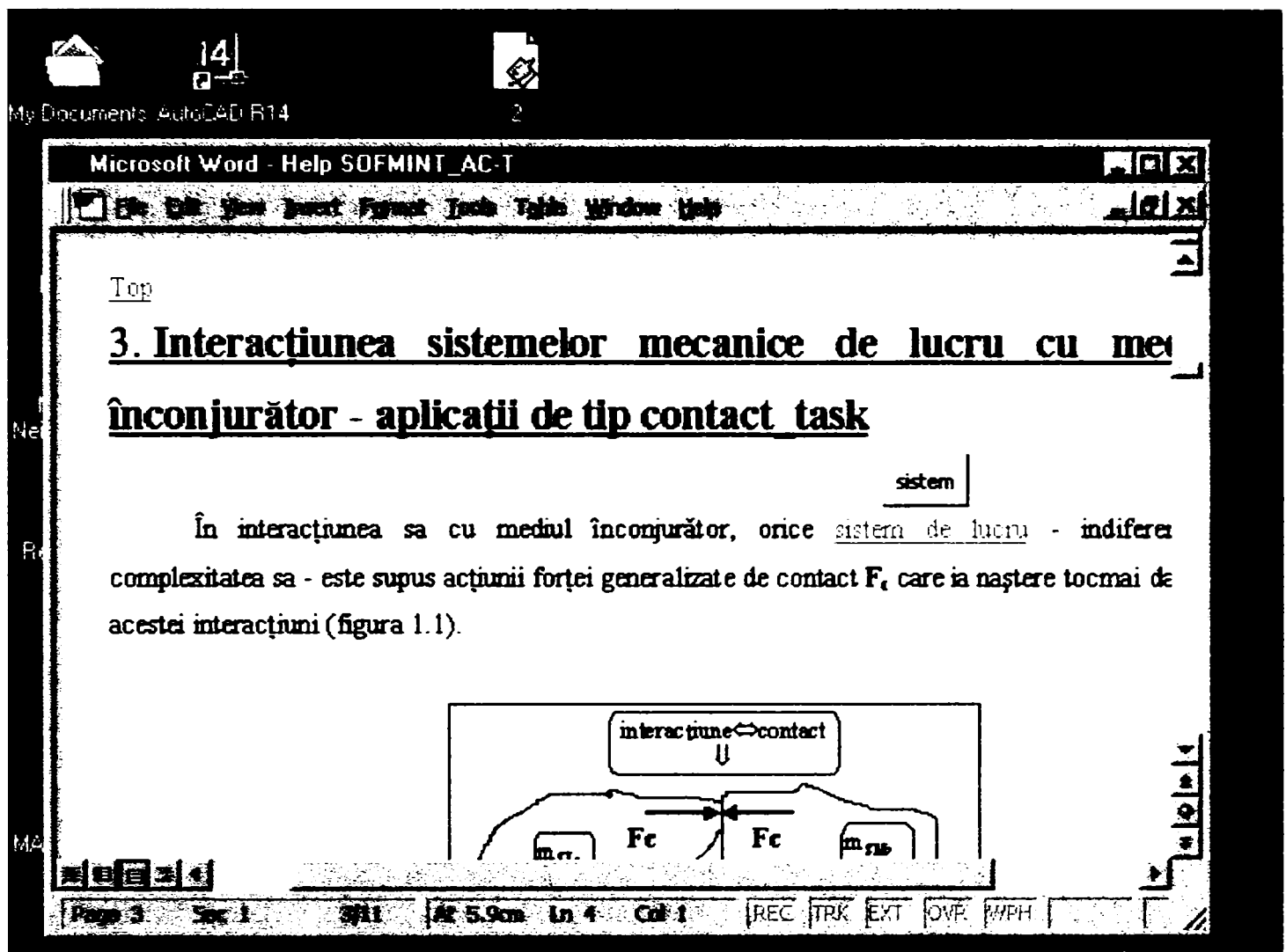


Fig. 4.41 Fereastra "help" sub Word a pachetului SOFMINT\_AC-T

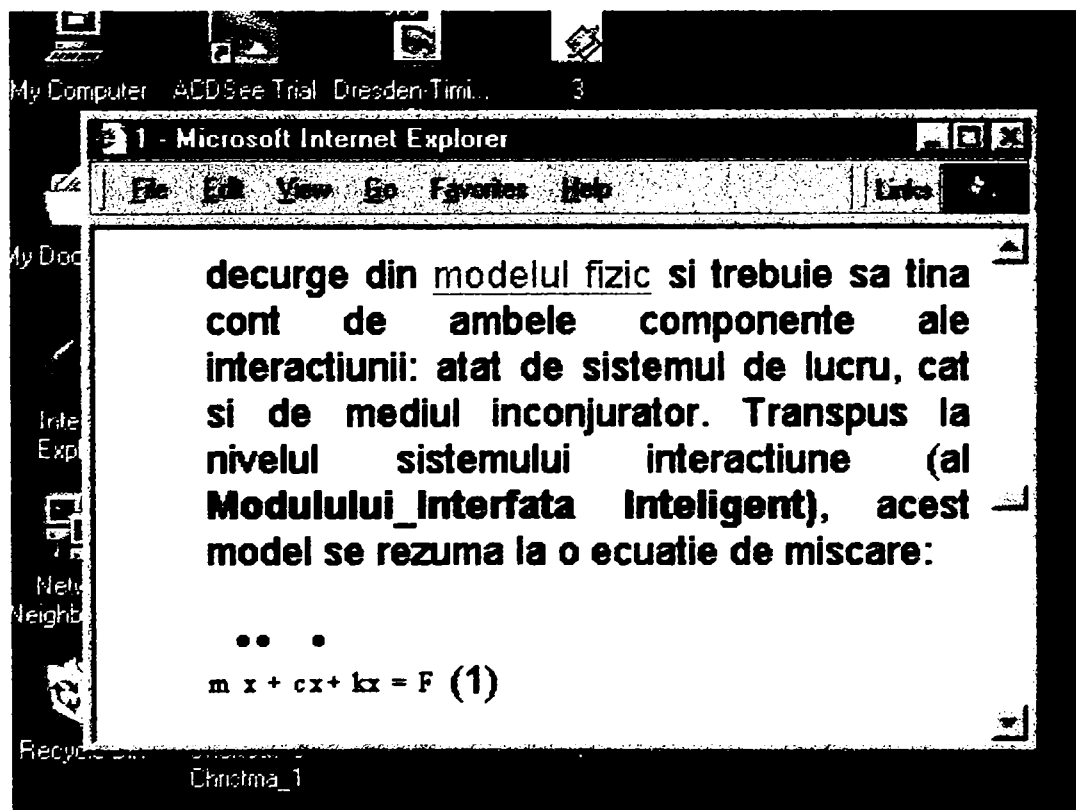


Fig. 4.42 Fereastra "help" sub MS\_Explorer a pachetului SOFMINT\_AC-T

### 4.8.3 Simulatorul virtual complex SMILEC\_T - cu control inteligent - al unei aplicații de tip "contact -task"

#### 4.8.3.1 Introducere

Pornind de la modelul și conceptul prezentat al modulului cu un singur grad de libertate, dedicat interacțiunii inteligente dintre un sistem de lucru și sistemul mediu înconjurător a fost conceput – deasemenea în mediul de programare **VISUAL BASIC 6.0 (VB)**- simulatorul inteligent **SMILEC\_T**, capabil să simuleze fenomenul care permite controlul/diminuarea forței de contact ce apare între cele două sisteme (implicit și controlul/diminuarea efectelor negative provocate de această forță) - prin acțiunea controlată, pe baza unor legi impuse, asupra caracteristicilor intrinseci ale mediului. Utilizatorul are posibilitatea unui acces ușor și interactiv la o sesiune de lucru, datorită unei interfețe performante **GUI** precum și posibilitatea de a crea și imprima un raport al simulărilor cu reprezentări grafice. În timpul sesiunii de lucru, utilizatorul are la dispoziție multiple posibilități de alegere și setare a condițiilor inițiale, a parametrilor, și a limitărilor impuse aplicației virtuale.

#### Concluzie

*Se poate afirma că, optând pentru acest mod de lucru, simulatorul SMILEC\_T se constituie într-un stand virtual dedicat aplicațiilor de tip contact-task, capabil să realizeze un experiment virtual, respectiv este un Simulator al unui Modul Interfață Inteligent pentru testarea LEgilor de Conducere în aplicațiile Contact\_Task. El este încorporat pachetului soft SOFMINT\_AC-T.*

#### 4.8.3.2 Rezolvarea problemelor ridicate de modelul matematic al aplicației În corelație cu concepția simulatorului virtual.

Având În vedere că mediul de dezvoltare **VB** în care a fost scris programul **SMILEC\_T** - nu dispune de module pentru rezolvarea numerică a ecuațiilor diferențiale, a fost implementat prin program algoritmul de calcul pentru metoda Runge-Kutta de ordinul patru pentru sisteme de ecuații diferențiale ordinare prezentat în continuare.

Se rescrie modelul generic al aplicației:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_m - F_p \quad (4.11)$$

sub forma:

$$\ddot{x} = g(t, x, \dot{x}) \quad (4.12)$$

cu condițiile inițiale:  $x(t_0) = x_0$  și  $\dot{x}(t_0) = z_0$ , unde  $F_m$  și  $F_p$  sunt forța perturbatoare (provenind de obicei din mediu) și respectiv forța preconizată de contact.

Cu notația  $\dot{x} = z$ , ecuația diferențială se reduce la sistemul:

$$\dot{x} = z \quad U \quad \dot{z} = g(t, x, z) \quad (4.13)$$

pornind de la condițiile inițiale:  $x(t_0) = x_0$  și  $z(t_0) = z_0$ . Acesta este echivalent cu sistemul:

$$\dot{x} = f(t, x, z) \quad U \quad \dot{z} = g(t, x, z) \quad (4.14)$$

cu aceleași condiții inițiale.

Calculul soluțiilor sistemului este iterativ, iterațiile având următoarea formă:

$$K_1 = h \cdot f(t_i, x_i, z_i) \quad (4.15)$$

$$L_1 = h \cdot g(t_i, x_i, z_i) \quad (4.16)$$

$$K_2 = h \cdot f\left(t_i + \frac{h}{2}, x_i + \frac{K_1}{2}, z_i + \frac{L_1}{2}\right) \quad (4.17)$$

$$L_2 = h \cdot g\left(t_i + \frac{h}{2}, x_i + \frac{K_1}{2}, z_i + \frac{L_1}{2}\right) \quad (4.18)$$

$$K_3 = h \cdot f\left(t_i + \frac{h}{2}, x_i + \frac{K_2}{2}, z_i + \frac{L_2}{2}\right) \quad (4.19)$$

$$L_3 = h \cdot g\left(t_i + \frac{h}{2}, x_i + \frac{K_2}{2}, z_i + \frac{L_2}{2}\right) \quad (4.20)$$

$$K_4 = h \cdot f(t_i + h, x_i + K_3, z_i + L_3) \quad (4.21)$$

$$L_4 = h \cdot g(t_i + h, x_i + K_3, z_i + L_3) \quad (4.22)$$

$$x_{i+1} = x_i + \frac{1}{6} \cdot (K_1 + 2 \cdot K_2 + 2 \cdot K_3 + K_4) \quad (4.23)$$

$$z_{i+1} = z_i + \frac{1}{6} \cdot (L_1 + 2 \cdot L_2 + 2 \cdot L_3 + L_4) \quad (4.24)$$

Pasul de calcul  $h$  reprezintă timpul scurs între două operații de calcul ale deplasării și vitezei, iar pentru modelul fizic, timpul scurs între două ajustări ale parametrilor  $c$  și  $y$  comandate de calculatorul din sistemul de comandă al aceluiași model.

Legile de conducere (reglare) reprezintă de fapt variația coeficientului de amortizare  $c$  și a deplasării  $y$  în timp având drept parametri de intrare forța de contact (perturbatoare), deplasarea  $x$ , viteza  $\dot{x}$ , deplasarea  $y$  curentă și coeficientul de amortizare curent  $c$ .

Se poate observa că algoritmul prezentat calculează valorile deplasării și vitezei funcție de valorile imediat anterioare, deci parametri  $m$ ,  $c$  și  $y$  se pot modifica la fiecare iterație fără a se pierde continuitatea. Legile de conducere (reglare) reprezintă de fapt variația acestora în timp având drept parametri de intrare forța de contact (perturbatoare), deplasarea  $x$ , viteza  $\dot{x}$ , deplasarea  $y$  curentă și coeficientul de amortizare curent  $c$ .

Se accentuează faptul că acțiunea "inteligentă" (referitor la forța de contact) a simulatorului **SMILEC\_T** prezentat poate avea loc utilizând concomitent, sau separat,

prin legile de reglare aferente posibilitățile de comandă și control asupra caracteristicii inerțiale, elastice și/sau a caracteristicii de amortizare. Pot fi implementate diferite forme de variație pentru parametri ceruți.

Legile de conducere (de variație impusă a parametrilor impedanței mecanice) sunt introduse drept secvențe de program începând cu variații simple, liniare, până la cele care provin din cele testate și determinate prin simulări în mediul **MATLAB/SIMULINK** – prezentate la subcapitolul 4.9.

Simulatorul **SMILEC\_T** este conceput în structură modulară astfel încât să poată fi implementate fără probleme secvențe de program cu algoritmi alternativi pentru rezolvarea ecuației și legi alternative pentru legile de conducere/parametru, noi algoritmi de rezolvare a ecuației, respectiv noi facilități de raportare și prelucrare a rezultatelor. În subcapitolul 4.8.3.4 sunt redate exemple ale sesiunilor de lucru cu **SMILEC\_T**.

### 4.8.3.3 Concepția și caracteristicile simulatorului virtual **SMILEC\_T**

Prin intermediul interfeței grafice ale cărei ferestre (principală și toate celelalte) sunt vizibile în figurile din subcapitolul 4.8.3.4, simulatorul **SMILEC\_T**,

**A.** oferă utilizatorului posibilitatea de:

- a) - vizualizare a oscilațiilor sistemului cu și fără conducere inteligentă;
- b) - calcul a unor marimi caracteristice ale oscilațiilor: valoarea maximă, valoarea minimă, amplitudinea maximă, anvergura, valoarea medie;
- c) - comparație între cazurile cu și fără conducere inteligentă;
- d) - alcătuirea și tipărirea de rapoarte cu rezultatele simulărilor, cuprinzând grafice și valori caracteristice calculate;

**B.** pune la dispoziția utilizatorului următoarele opțiuni :

- a) - alegerea între evoluția de tip aleatoriu, armonic, dreptunghiular pentru forța de contact;
- b)- modificarea coeficienților sistemului dinamic;
- c)- modificarea limitelor de variație a mărimilor de comandă;
- d)- modificarea intervalului de afișare a graficelor și de calcul al valorilor caracteristice;
- e)- stabilirea preciziei algoritmului de calcul prin modificarea intervalului de eșantionare (pasul  $h$ );
- f)- precizarea unor viteze maxime de reacție a echipamentelor care realizează modificarea marimilor de comandă; acestea devin limitări ale modelului matematic prin algoritmul de rezolvare a ecuației.

Structura modulară a pachetului soft **SMILEC\_T**, se realizează prin intermediul procedurilor care pun în funcție secvențele de program pentru fiecare din caracteristicile prezentate mai sus. Modul de alcătuire și conlucrarea acestor proceduri în cadrul pachetului soft al simulatorului este relevat în ordinogramele din figurile 4.43-4.51. Simulatorul este înglobat în pachetul **SOFMINT\_ĂC-T**.

#### **Observație**

Prin “sistem dinamic normal” (acronim **SDN** în ordinograme) se înțelege simularea unui model fără răspuns inteligent al parametrilor impedanței mecanice la acțiunea unei forțe perturbatoare din mediu în timp ce prin “sistem dinamic inteligent” (acronim **SDI** în ordinograme) se înțelege prezența răspunsului inteligent, parametrii fiind variabili.

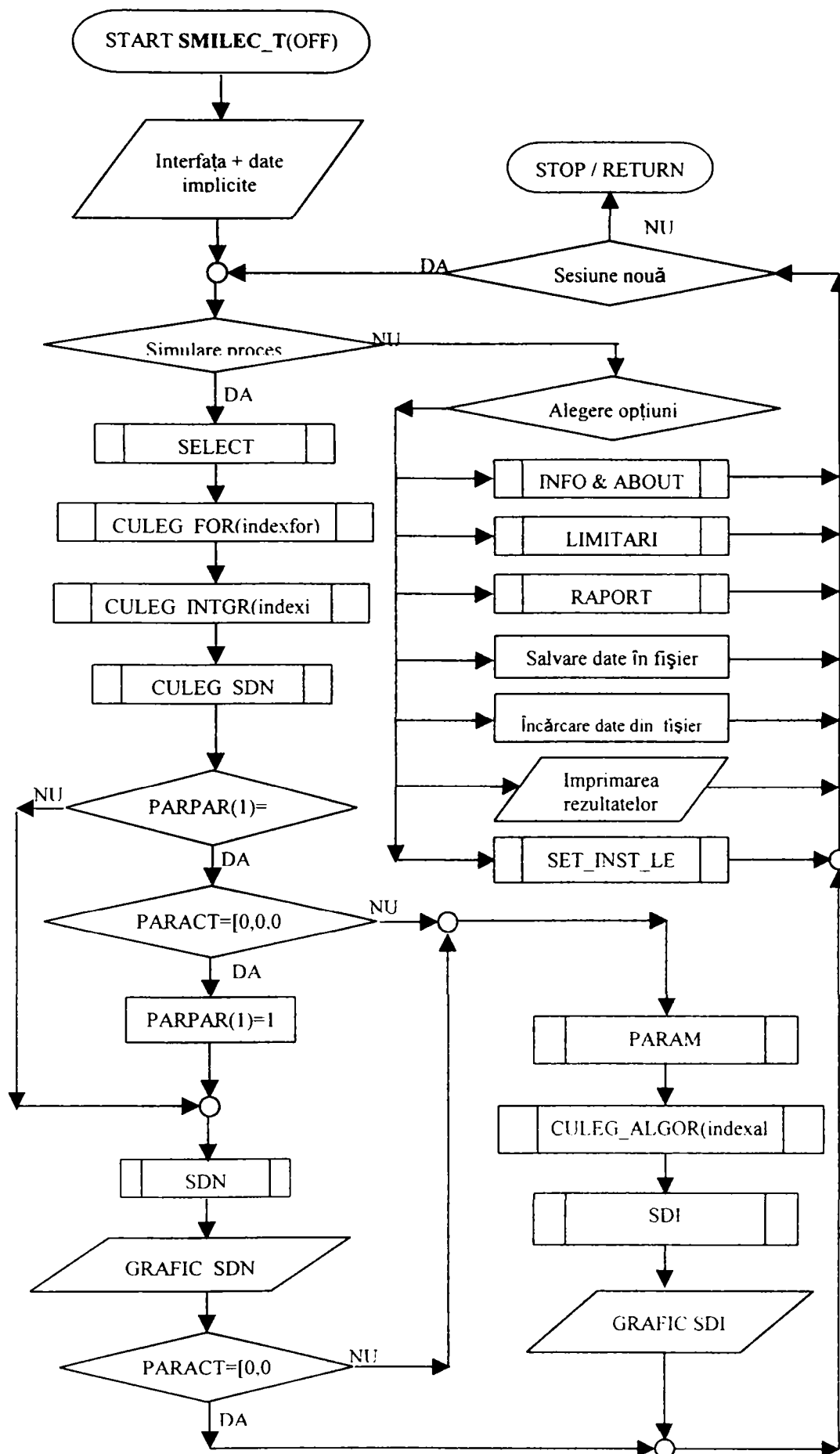


Fig. 4.43 Ordinograma pachetului SMILEC\_T

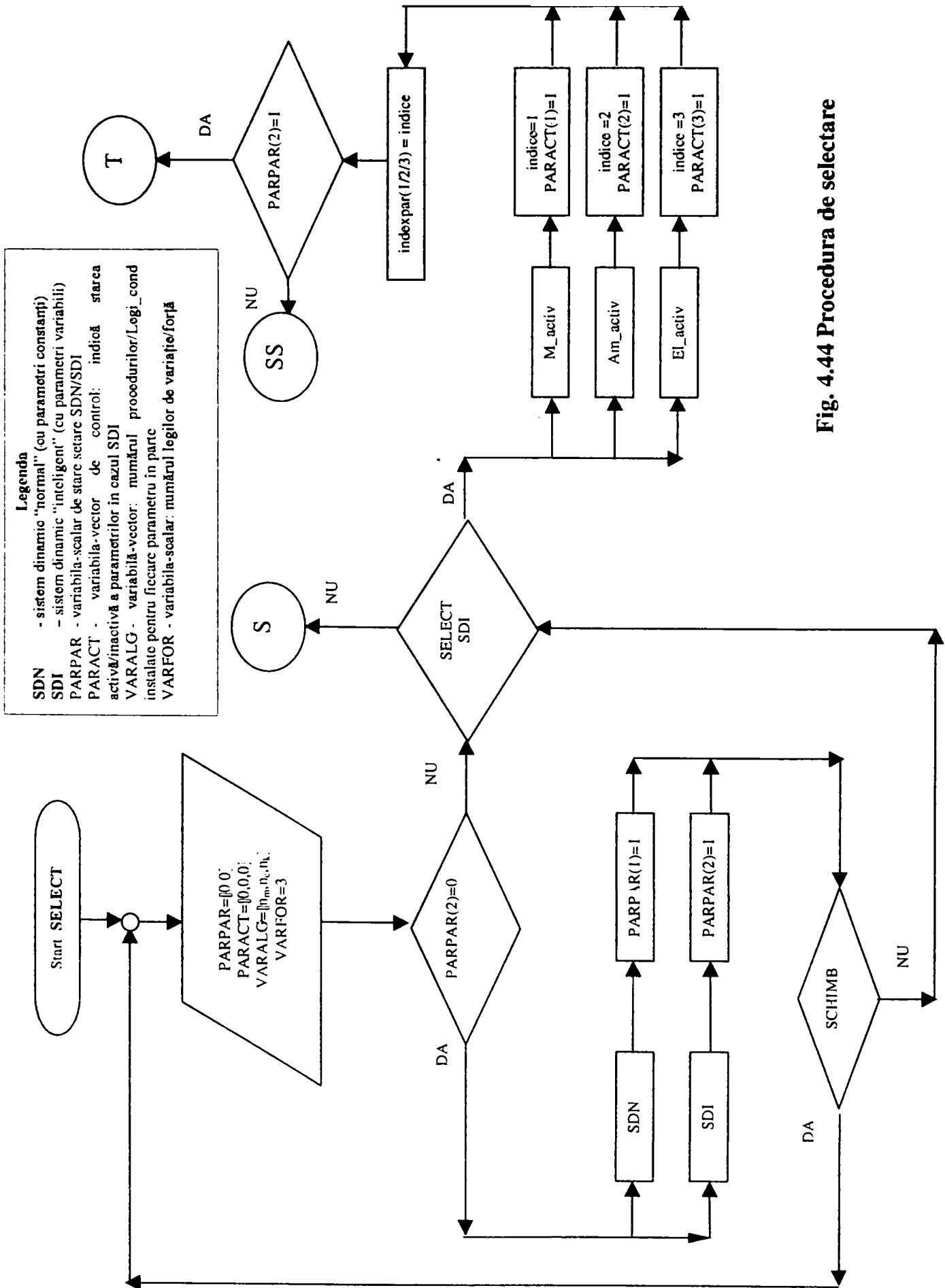


Fig. 4.44 Procedura de selectare

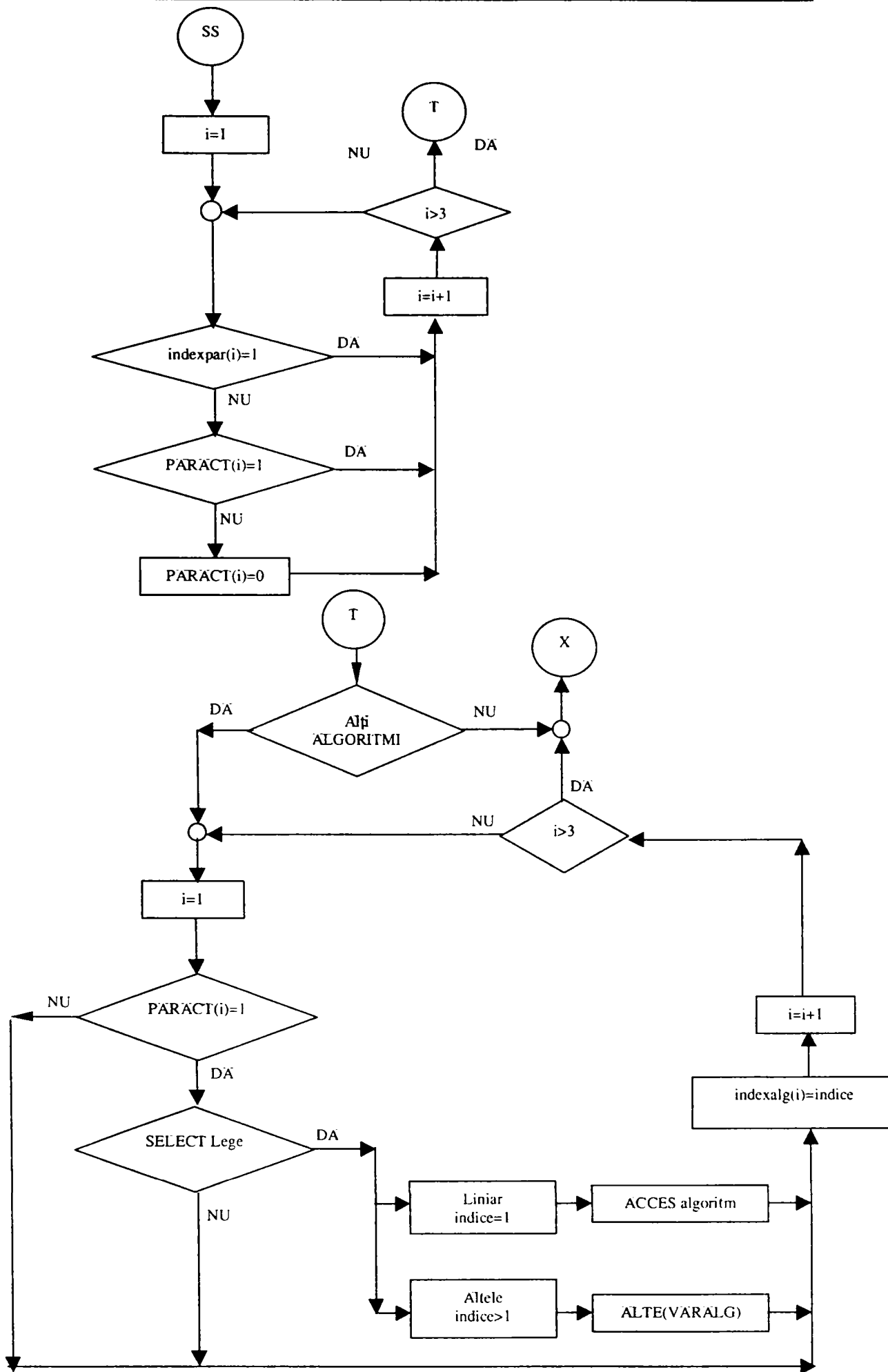


Fig. 4.45 Procedura de selectare (continuare\_1)



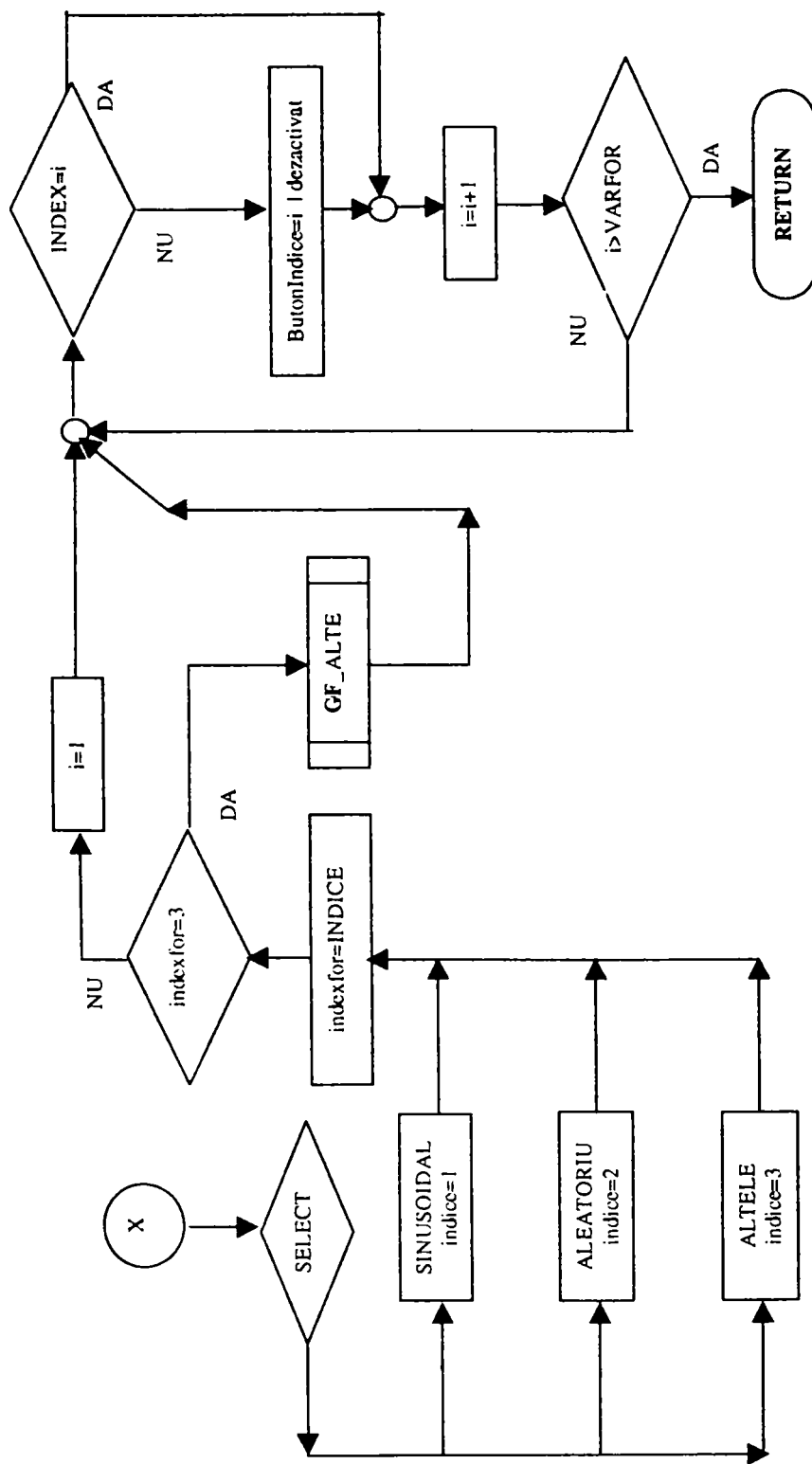
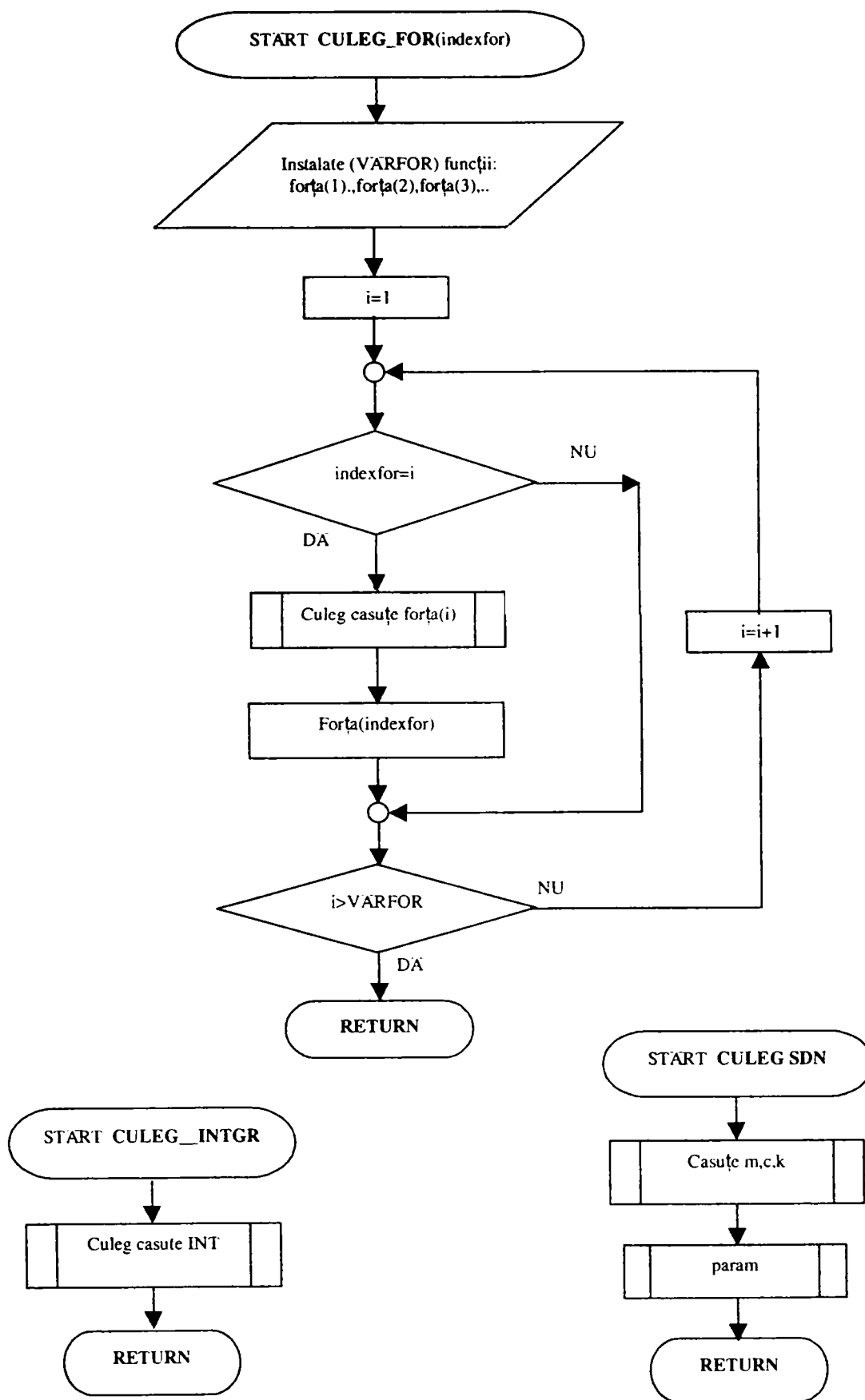


Fig. 4.46 Procedura de selectare (continuare\_2)



**Fig. 4.47** Procedurile de culegere a datelor/parametrilor generatorului de forță, respectiv cele necesare algoritmului de rezolvare a ecuație-model și cele aferente SDN

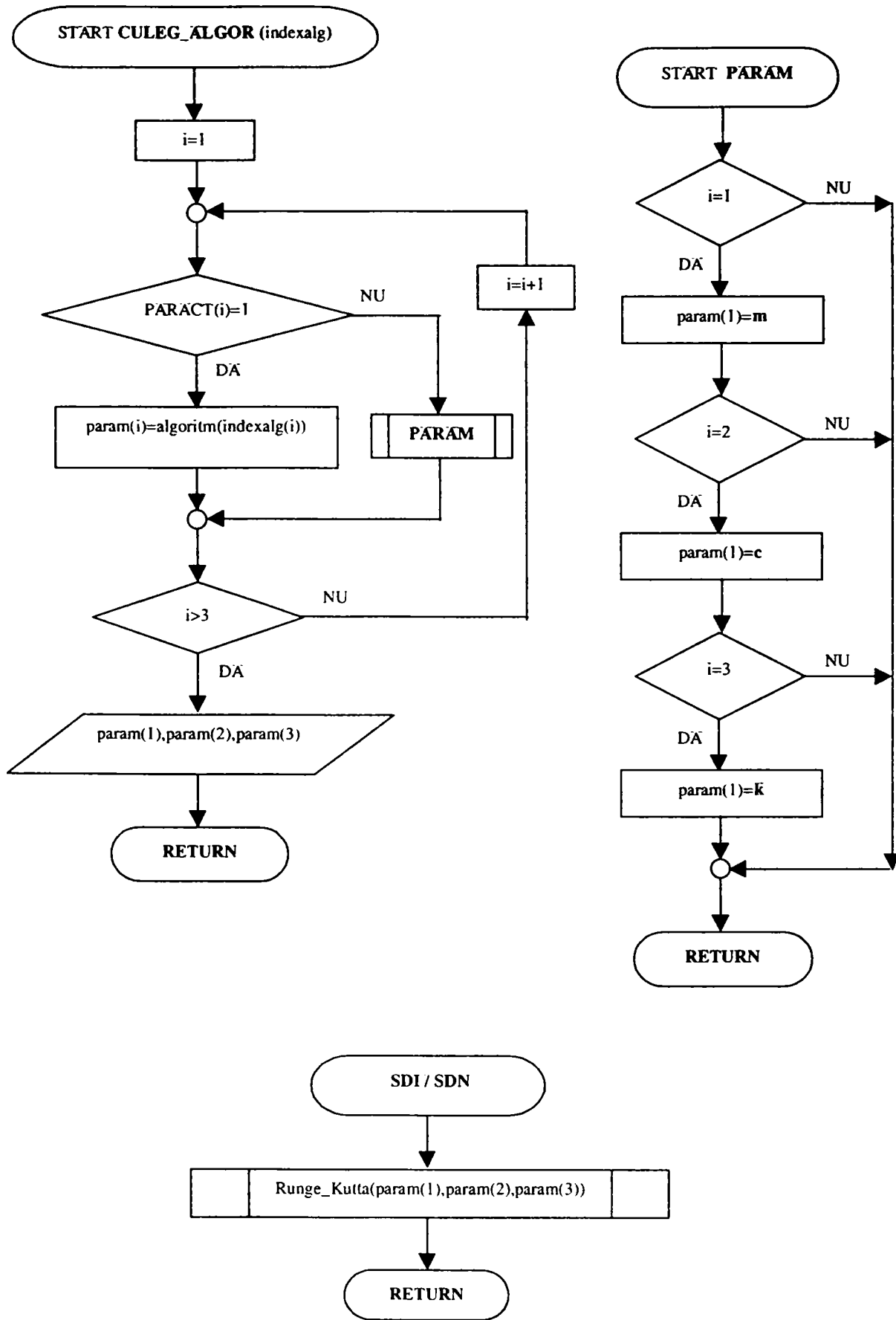


Fig. 4.48 Procedura de alegere a algoritmului de conducere inteligentă pentru parametrii, respectiv de stabilire ecuației cu care se va lucra (SDN sau SDI)

#### 4.8.3.4 Interfața grafică a simulatorului

Simulatorul *SMILEC\_T* se prezintă utilizatorului prin intermediul unei ferestre care conține panoul principal de comandă, introducere și afișare a datelor și un spațiu rezervat trasării graficelor. Din panoul principal se pot apela prin intermediul butoanelor de comandă ferestrele “SMILEC\_T - Raport”, “SMILEC\_T – Set\_Legi”, “SMILEC\_T-Help și About”, “SMILEC\_T - Setări”. Salvarea în fișiere și încărcarea din fișiere a opțiunilor și datelor aferente unei sesiuni de lucru, se efectuează prin intermediul unor ferestre - resurse Windows prin intermediul comenzilor mediului de programare. Ferestrele grafice sunt prezentate în continuare.

##### 4.8.3.4.1 Fereastra principală

este alcătuită din panoul principal care conține 4 grupuri de obiecte și o bară de butoane de comandă, după cum urmează:

**A. Grupul “SDN: Sistem dinamic normal”**- conține trei câmpuri de editare prezentate în tabelul 4.4.

Tabelul 4.4

Nr.	Mărime/ Denumire	Tip	Semnificație
1	m	câmp editare	masa părții mobile
2	c	câmp editare	coeficientul de amortizare pentru cazul fără “conducere inteligentă”
3	k	câmp editare	constanta elastică a arcului

**B. Grupul “GENERATORUL DE FORTĂ”** conține obiectele de tip control prezentate în tabelul 4.5.

Tabelul 4.5

Nr.	Mărime/ Denumire	Tip	Semnificație
Legea sinusoidală			
1	$F_0$	câmp editare	Forța inițială (preconizată) = $F_p$ din ecuație
2	$A$	câmp editare	amplitudinea componentei armonice
3	$w$	câmp editare	pulsația componentei armonice
Legea dreptunghiulară			
1	$F_0$	câmp editare	Forța inițială (preconizată) = $F_p$ din ecuație
2	$A$	câmp editare	Amplitudinea componentei armonice
3	$T$	câmp editare	Perioada de aplicare a semnalului
Legea aleatorie			
1	$F_0$	câmp editare	Forța inițială (preconizată) = $F_p$ din ecuație
2	$A$	câmp editare	constanta componentei aleatorii
3	$B$	câmp editare	constanta componentei aleatorii
4	$T$	câmp editare	perioada perturbației aleatorii

C. Grupul “ALGORITMUL DE INTEGRARE” conține obiectele prezentate în tabelul 4.6.

Tabelul 4.6

Nr.	Mărime/ Denumire	Tip	Semnificație
Parametrii de integrare&afișare			
1	$t_0$	câmp editare	timpul de start simulare
2	$t_f$	câmp editare	timpul de stop simulare
3	$t_{el}$	câmp editare	pasul elementar de iterație pt integrare(notat cu “ $h$ ” în capitolul precedent)
4	$t_{afis}$	câmp editare	timpul curent pt parametri afișati
5	triunghi sus-jos	Butoane de comandă	comută cu un pas (multiplu de $h$ =pas integrare) timpul curent pentru mărimile afișate
Afișare curenta pentru mărimile caracteristice			
1	$x_c$	câmp editare	deplasarea curentă
2	$F_0$	câmp editare	forța curentă
3	$m_0$	câmp editare	masa curentă
4	$c_c$	câmp editare	coeficientul de amortizare curent
5	$y_c$	câmp editare	deplasarea de piston curenta
6	Trimite garficul la imprimanta suprapus	comutator	selectează suprapunerea graficelo succesive si trimiterea acestora la imprimantă (buton ascuns, setat pe “on” în figură)

D. Grupul “SDI: Sistem dinamic inteligent” conține obiectele prezentate în tabelul 4.7.

Tabelul 4.7

Nr.	Mărime/ Denumire	Tip	Semnificație
Masa variabilă			
1	$m_0$	câmp editare	masa inițială
2	$m_{min}$	câmp editare	limita inferioara pt masa variabila
3	$m_{max}$	câmp editare	limita superioara pt masa variabila
Coeficientul de amortizare vascoasa variabil			
1	$c_0$	câmp editare	coeficientul de amortizare vâscoasă inițial
2	$c_{min}$	câmp editare	limita inferioara pt coeficientul de amortizare vascos variabil
3	$c_{max}$	câmp editare	limita superioara pt coeficientul de amortizare vascos variabil
Termenul de elasticitate variabil			
1	$k_0$	câmp editare	coeficientul de elasticitate
2	$y_{min}$	câmp editare	limita inferioara a deplasări pistonului
3	$y_{max}$	câmp editare	limita superioara a deplasări pistonului

#### 4. NOI SOLUȚII de MODULE-INTERFAȚĂ INTELIGENTE

	Legea de conducere "m"		
1-3	$C_{m1}, C_{m2}, C_{m3}$	câmpuri editare	parametri legilor de conducere (se vor activa numai cei reali)
	Legea de conducere "c"		
1-3	$C_{c1}, C_{c2}, C_{c3}$	câmpuri editare	parametri legilor de conducere (se vor activa numai cei reali)
	Legea de conducere "yk"		
1-3	$C_{y1}, C_{y2}, C_{y3}$	câmpuri editare	parametri legilor de conducere (se vor activa numai cei reali)

**E. Bara de butoane** conține butoanele de comandă ale programului, în conformitate cu tabelul următor.

**Tabelul 4.8**

Nr.	Denumire	Tip	Semnificație
1	Graf:x(t)	buton comandă	lansează simularea și trasarea graficului
2	Setări	buton comandă	activează fereastra "SMILEC T. - Setari"
3	Raport	buton comandă	activează fereastra "SMILEC T - Raport"
4	Tiparire	buton comandă	trimite graficele de pe ecran la imprimantă
5	Iesire	buton comandă	iesirea din program
6	Set_legi	buton comandă	activeveaza fereastra "SMILEC_T -Set_Legi"
7	Help	buton comandă	activeveaza fereastra "SMILEC_T -Help"
8	About	buton comanda	activeveaza fereastra "SMILEC_T -About"
9.	<i>SIMULARE</i>	Etichetă	Indicator din obiectul-cadru "Mod de lucru"
10.	<i>ON_LINE</i>	Etichetă	Indicator din obiectul-cadru "Mod de lucru"

#### 4.8.3.5 Fereastra "Limitări"

conține 2 grupuri de obiecte, un câmp de editare și 2 butoane de comandă.

**Tabelul 4.9**

Nr.	Denumire	Tip	Semnificație
1	Viteza de reacție: la coeficientul de amortizare (c)	câmp editare	viteza maximă de reacție a ansamblului care modifică coeficientul de amortizare
2	Viteza de reacție: pentru deplasarea pistonului (y)	câmp editare	viteza maximă a pistonului cilindrului hidraulic CH2
3	Viteza de reacție: cilindrul cu aport de masă (m)	câmp editare	viteza maxima a elementului activ care modifica masa
4	Timp de pornire pentru calcule statistice	câmp editare	timpul scurs de la inceputul simulării in care valorile calculate nu se iau in considerare pentru marimile caracteristice

#### 4. NOI SOLUȚII de MODULE-INTERFAȚĂ INTELIGENTE

5	Memoreaza	buton comanda	memoreaza modificarile facute și închide fereastra
6	Renunță	buton comanda	închide fereastra fara a memora modificarile facute

##### 4.8.3.5.1 Fereastra "SMILEC\_T - Raport"

Fereastra "A.I.V. - Raport" conține grupul de obiecte "Statistica" și un buton de comanda. Grupul de obiecte – prezentat în tabelul 4.10 - este împărțit în 3 subgrupe referitoare la aceleași mărimi caracteristice (anume:  $x_{maxim/minim/mediu}$ , și respectiv "anvergura" oscilațiilor). Prima subgrupă afișează valorile mărimilor caracteristice pentru cazul fără "conducere inteligentă", al doilea pentru cazul cu "conducere inteligentă", iar al treilea raportul mărimilor de la cele două cazuri.

**Tabelul 4.10**

Nr.	Denumire	Tip	Semnificație
1	xmaxim	câmp afișare	valoarea maximă a oscilațiilor
2	xminim	câmp afișare	valoarea minimă a oscilațiilor
3	xmediu	câmp afișare	valoarea medie a oscilațiilor
4	Ānvergura	câmp afișare	anvergura oscilațiilor (xmax-xmin)

##### 4.8.3.5.2 Fereastra "SMILEC\_T – Set\_Legi"

Deschide fereastra cu setarea legilor de variație pentru generatorul de forță și a legilor de conducere pentru parametri, în conformitate cu tabelul următor.

**Tabelul 4.11**

Nr.	Denumire	Tip	Semnificație
Grupul generator de forță			
1	Variație sinusoidală	Buton-radio	Setează legea specificată
2	Variație dreptunghiulară	Buton-radio	Setează legea specificată
3	Variație aleatorie	Buton-radio	Setează legea specificată
Trei grupuri pentru legi conducere/parametru (cu câte 3 butoane fiecare)			
1-3	Variație liniară c, m, y, respectiv lege_1,2	Butoane-radio	Setează legea de conducere specificată
Grupul algoritm de integrare			
1	Metoda Runge-Kutta_4	Buton radio	Setează algoritmul de rezolvare specificat

##### 4.8.3.5.3 Ferestrele "SMILEC\_T – Open file" și, "SMILEC\_T – Save to file"

sunt ferestrele (resursă-Windows) uzuale prin care se salvează respectiv se citește întregul set de opțiuni/parametri aferenți unei sesiuni de lucru stabiliți de starea în care sunt setate/se află obiectele de tip control din fereastra principală și din cele auxiliare ale pachetului *SMILEC\_T*. Utilizatorul trebuie să specifice numele de cale al fișierului, extensia implicită fiind "\*.sci". La deschiderea unui fișier salvat anterior într-

o sesiune de lucru, procedura implementată va seta toate opțiunile/obiectele de tip control din fereastrele simulatorului identic cu situația din sesiunea de lucru în care s-a efectuat salvarea.

#### 4.8.3.6 Sesiuni de lucru “simulare”; urmărirea și gestiunea rezultatelor

La pornire, *SMILEC\_T* încarcă și setează implicit toate obiectele de tip control din toate ferestrele proprii cu valori valide, aferente tuturor mărimilor necesare.

Utilizatorul – pe baza caracteristicile pachetului (prezentate la subcapitolul 4.8.3.3) - poate opta pentru sesiuni de lucru:

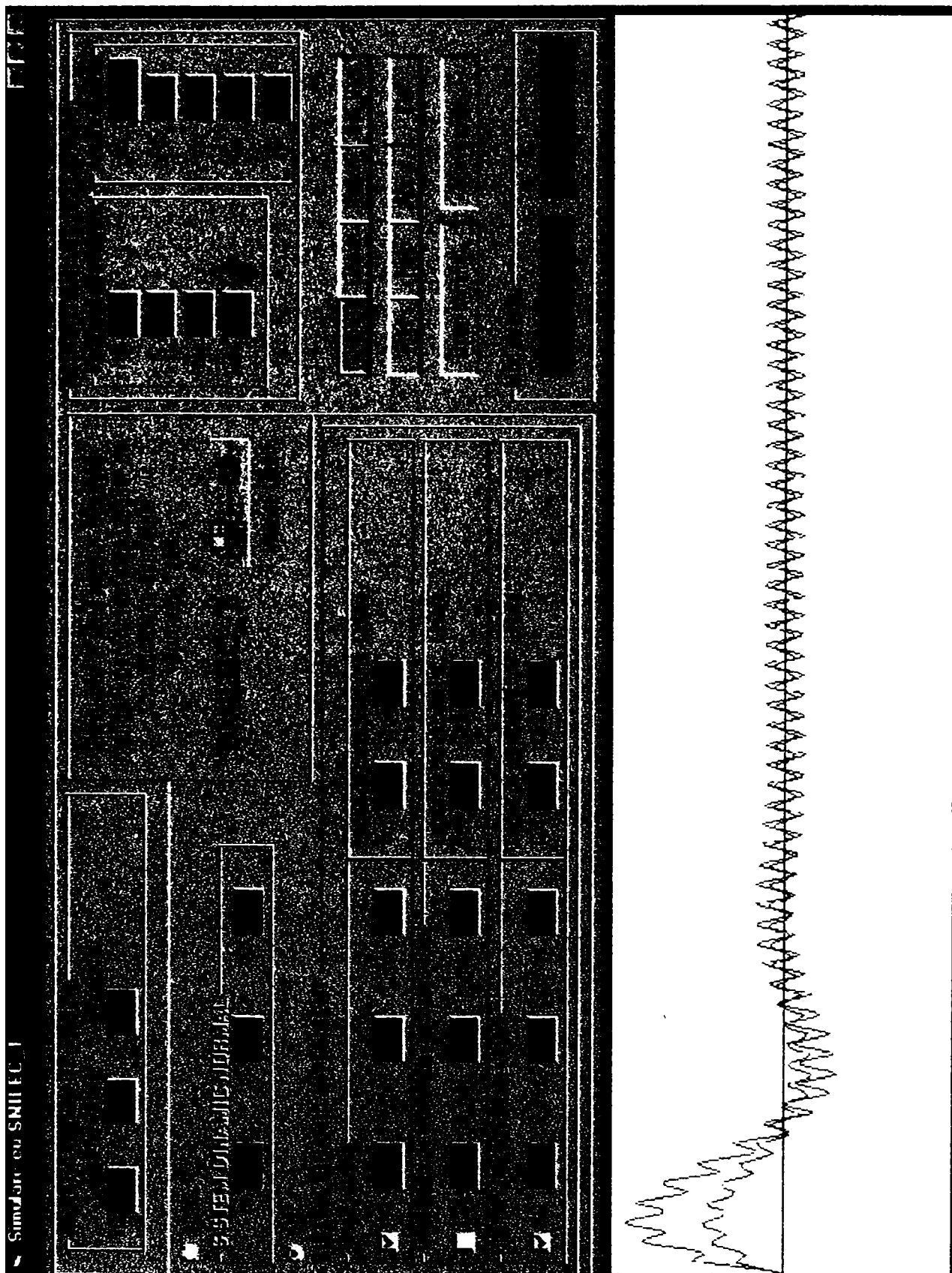
- ✓ de tip informare prin:
  - ◆ prospectarea modulului “help”;
  - ◆ vizitarea/observarea setărilor curente din ferestrele principală și auxiliare; oricând se pot executa setări noi pentru toți parametrii aplicației;
    - ✓ de tip simulare, racordată ulterior cu modalitățile de urmărire a rezultatelor; sesiunea nu se activează dacă în ferestrele *SMILEC\_T* nu sunt setate opțiuni valide, în caz contrar se emit mesaje de atenționare.

O sesiune de lucru de tip simulare propriu-zisă se efectuează prin apăsarea butonului de comandă “Graf:x(t)” după care rezultatele pot fi urmărite/analizate de către utilizator în modalitățile expuse în continuare.

- ◇ Evoluția spațiului  $x(t)$  poate fi urmărită în mod direct, prin observarea/imprimarea graficului plasat în partea inferioară a ferestrei principale/imprimat; secvențele de trasare a graficului (activate prin apăsarea butonului în cauză) scalează implicit mărimile abscisă și ordonată astfel încât acesta să ocupe cât mai rațional spațiul afectat.
- ◇ Valorile efective ale spațiului, ale forței de contact și ale parametrilor impedanței mecanice pot fi vizualizate pentru fiecare valoare a timpului de afișare (prestabilit prin pasul de afișare=multiplu al pasului  $h$  de calcul din algoritmul Runge\_Kutta\_4) din intervalul  $(t_0-t_f)$ , în zona-cadru a grupului “ALGORITMUL DE INTEGRARE”, prin apăsarea butoanelor triunghiulare sus\_jos.
- ◇ Valorile sintetice ale dependenței  $x(t)$ , prin afișarea ferestrei “Raport”.
- ◇ Datele aferente mărimilor afișate pot fi preluate și prelucrate prin intermediul fișierului salvat.

În continuare sunt redate figurile cu exemple de sesiuni de lucru cu *SMILEC\_T*.





**Fig. 4.49 Fereastra principală a simulatorului SMILEC\_T în timpul unei sesiuni de lucru de tip SDI (generator de forță sinusoidal)**

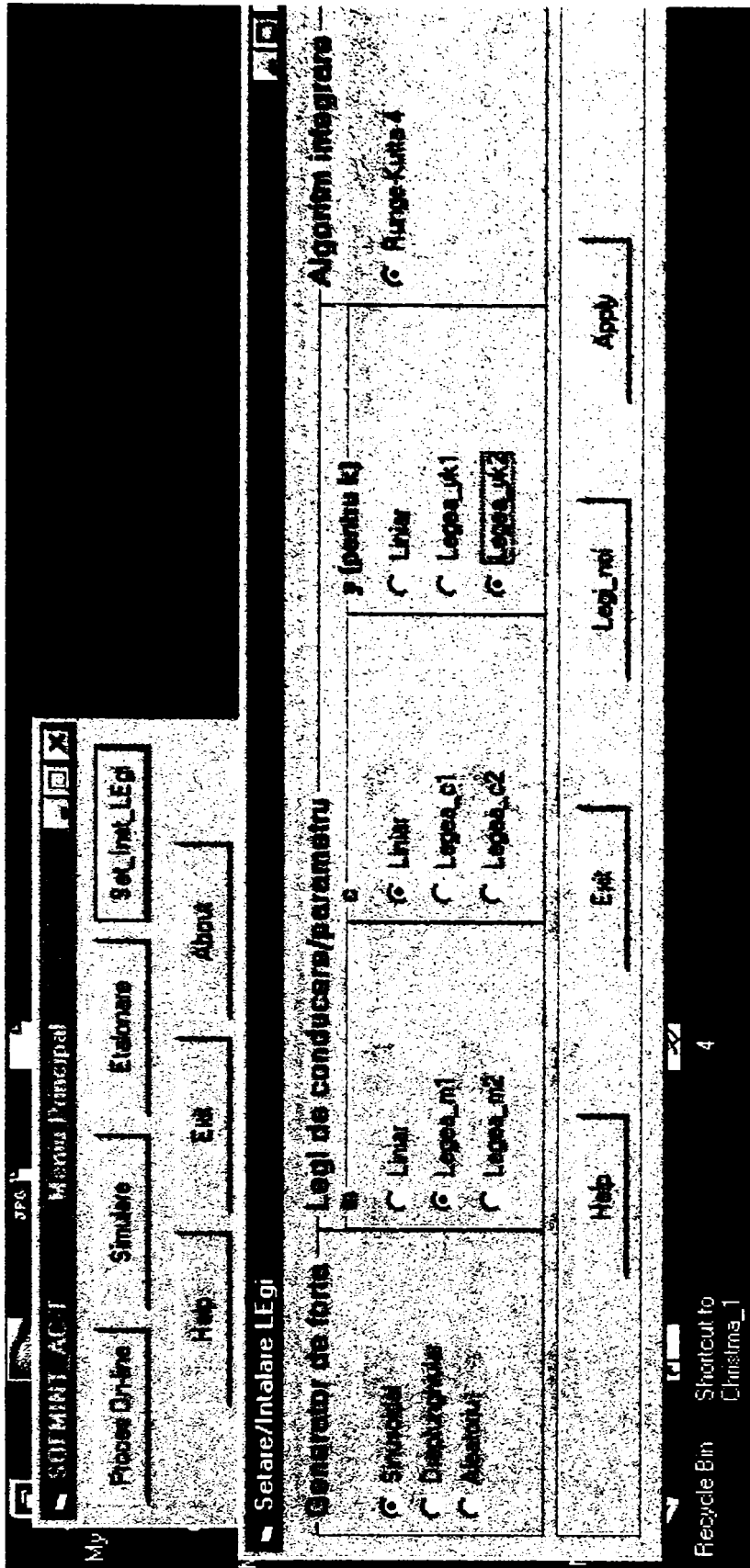


Fig. 4.50 Fereastra de setare a categoriilor de legi utilizate în sesiunea de lucru pentru: generatorul de forță, conducerea inteligentă ("algor" în ordinoграме) referitor la parametrii impedanței mecanice și algoritmul de integrare

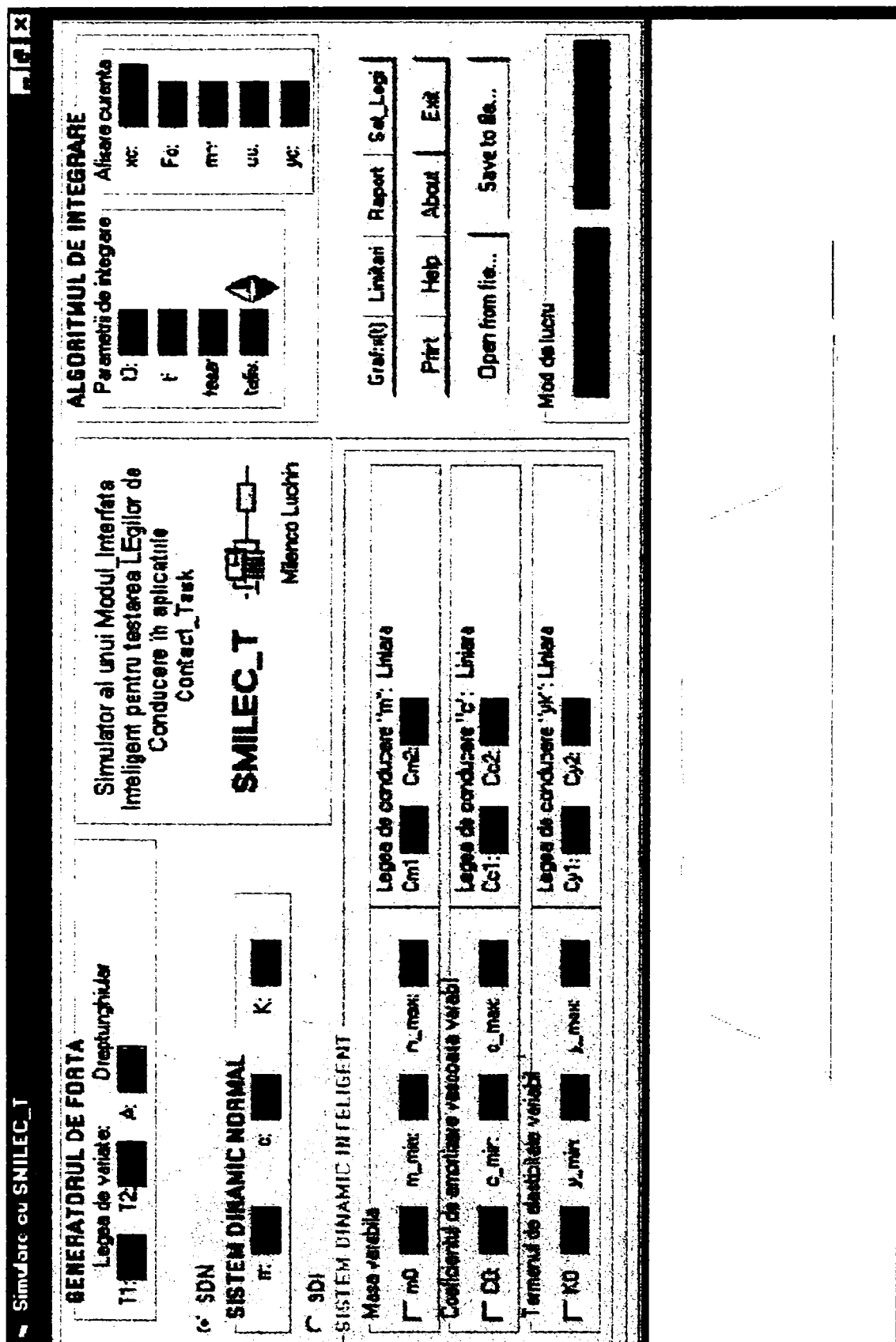


Fig. 4.51 Sesiune de lucru de tip SDN cu simulatorul SMILEC\_T (generator de forță dreptunghiular)

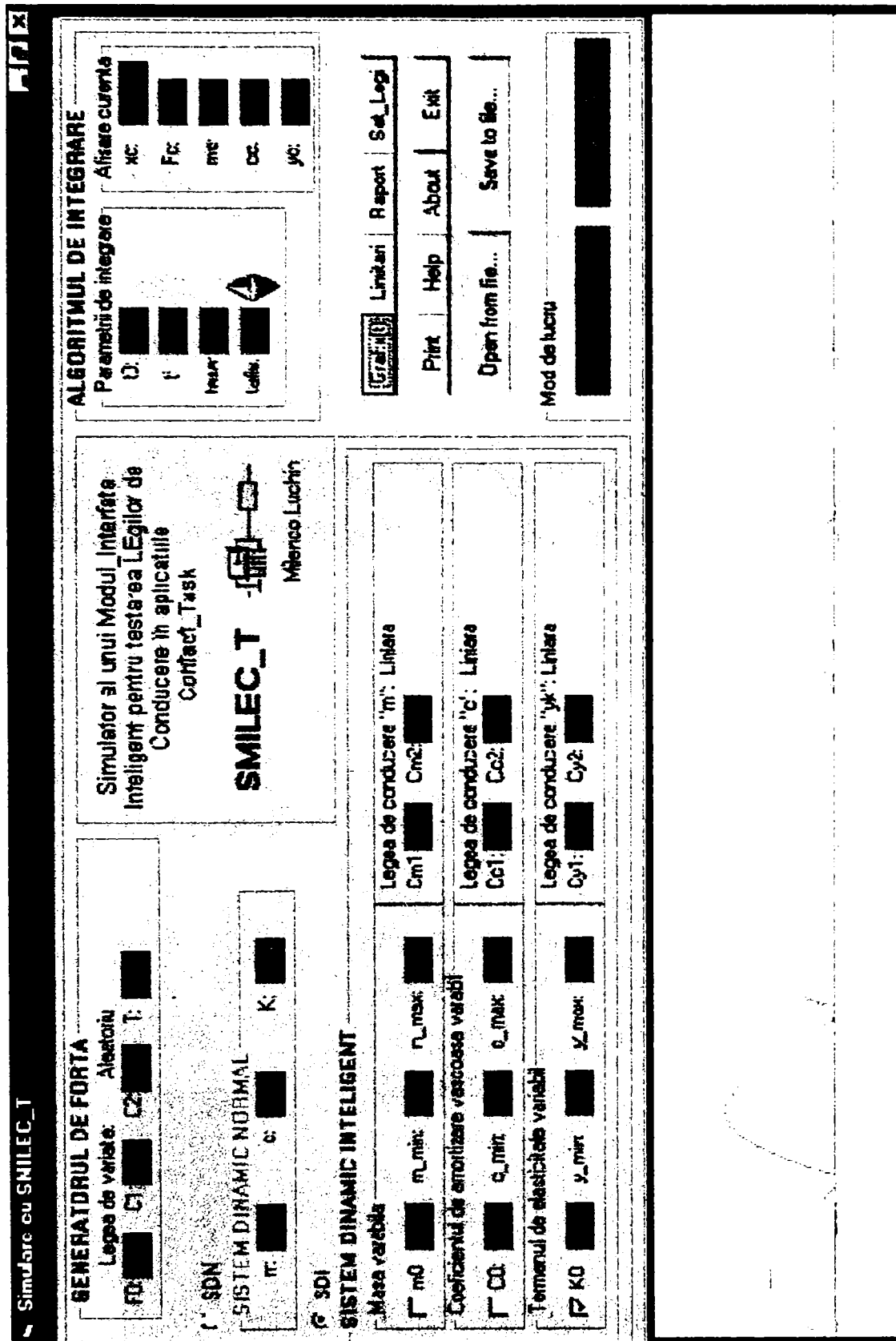


Fig. 4.52 Sesiune de lucru de tip SDNI cu simulatorul SMILEC\_T (generator de forță aleatoriu)

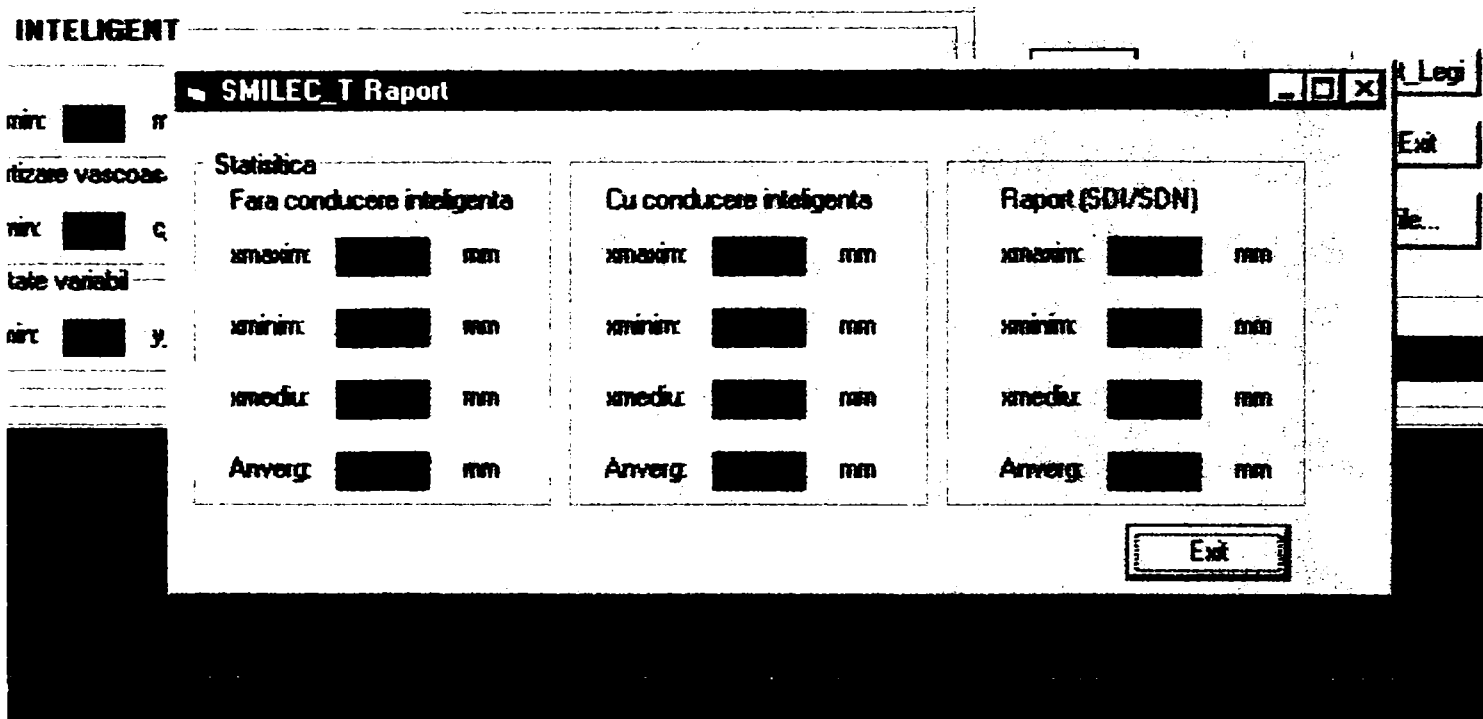


Fig. 4.53 Fereastra “Raport” care oferă informații sintetice despre evoluția spațiului  $x$  (prezentat în grafic) după caz, pentru sistemul SDN, SDI, și raportul mărimilor corespunzătoare dintre situația cu sau fără conducere inteligentă

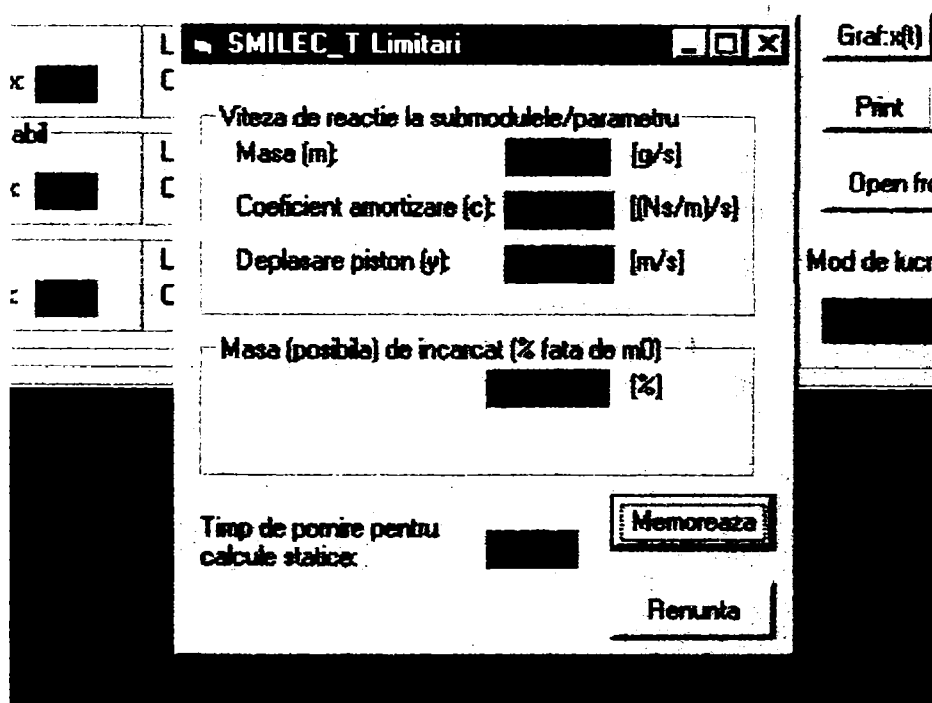


Fig. 4.54 Fereastra “Limitări” care oferă posibilitatea setării vitezei de reacție la elementul activ-parametri în cazul SDI (sistem cu conducere inteligentă)

#### 4.8.4 Interfața modului de etalonare/calibrare

Oferă utilizatorului posibilitatea să gestioneze determinarea experimentală a dependenței dintre coeficientul de amortizare  $C$  și numărul de pași ai motorului MPP a  $\frac{ssbmeM}{amort}$  (în conformitate cu notațiile de la subcapitolul 4.1.3.4) cu ajutorul standului prezentat la subcapitolul 4.7. Modulul urmează algoritmul specificat și prezentat în figura 4.33 din cadrul subcapitolului menționat. Interfața este alcătuită din fereastra-panou principală care conține 3 grupuri de obiecte și o bară de butoane de comandă, prezentate în continuare.

**A. Grupul “Automat”** – conține 6 câmpuri de editare, 2 butoane radio și un buton de comandă prezentate în tabelul 4.12.

Tabelul 4.12

Nr.	Denumire	Tip	Semnificație
1	Nr. pași_min	Câmp editare	Numărul minim de pași de la care se va începe sau se va sfârși măsurătoarea (în funcție de direcție)
2	Nr. pași_max	Câmp editare	Numărul maxim de pași de la care se va începe sau se va sfârși măsurătoarea (în funcție de direcție)
3	Nr. pași_exec	Câmp editare	Numărul de pași care se vor executa automat
4	F	Câmp editare	Forța de acționare asupra tijeii cilindrului
5	l	Câmp editare	Distanța dintre reperele în dreptul cărora se măsoară timpul
6	t	Câmp editare	Timpul măsurat
7	Apply	Buton comandă	Se execută aplicația de calibrare în forma automat
Direcție			
1	Inchidere	Buton radio	MPP se va roti în sensul acelor de ceasornic
2	Deschidere	Buton radio	MPP se va roti în sens invers acelor de ceasornic

**B. Grupul “Manual”** – conține 6 câmpuri de editare, 2 butoane radio și un buton de comandă prezentate în tabelul 4.13. Spre deosebire de modul de lucru “Automat”, pasul, forța și lungimea pot fi modificate manual după fiecare execuție până nu se ajunge la Nr. pași\_max (sau Nr. pași\_min în funcție de poziția butonului de “Direcție”).

Tabelul 4.13

Nr.	Denumire	Tip	Semnificație
1	Nr. Pasi_min	Câmp editare	Numărul minim de pași de la care se va începe sau se va sfârși măsurătoarea (în funcție de direcție)
2	Nr. pasi_max	Câmp editare	Numărul maxim de pași de la care se va începe sau se va sfârși măsurătoarea (în funcție de direcție)

#### 4. NOI SOLUȚII de MODULE-INTERFAȚĂ INTELIGENTE

3	Nr. pasi_exec	Câmp editare	Numărul de pași care se vor executa la fiecare etapă
4	F	Câmp editare	Forța de acționare asupra tijeii cilindrului
5	l	Câmp editare	Distanța dintre reperele în dreptul cărora se măsoară timpul
6	t	Câmp editare	Timpul măsurat
7	Apply	Buton comandă	Se execută aplicația de calibrare în forma manual
Direcție			
1	Inchidere	Buton radio	MPP se va roti în sensul acelor de ceasornic
2	Deschidere	Buton radio	MPP se va roti în sens invers acelor de ceasornic

**C. Grupul “Afișare curentă”** - conține 4 câmpuri de editare prezentate în tabelul 4.14.

**Tabelul 4.14**

Nr.	Denumire	Tip	Semnificație
1	Contor	Câmp editare	Contorizează și afișează de câte ori s-a executat măsurătoarea
2	alfa	Câmp editare	Unghiul de rotire curent la MPP
3	c	Câmp editare	Coeficientul de vâscozitate calculat la etapa curentă
4	NP	Câmp editare	Nr. de pași curent

**D. Bara de butoane** conține butoanele de comandă ale programului, în conformitate cu tabelul 4.15.

**Tabelul 4.15**

Nr.	Denumire	Tip	Semnificație
1	Stop	Buton comandă	Oprește secvența de citire a timpului de coborâre
2	About	Buton comandă	Afișează informațiile despre autori
3	Help	Buton comandă	Activează secvența de help a sesiunii de Calibrare
4	Exit	Buton comandă	Ieșire din programul Calibrare

În figura următoare se prezintă fereastra-panou și un exemplu de sesiune de lucru cu pachetul soft *ETALONARE/CALIBRARE*.

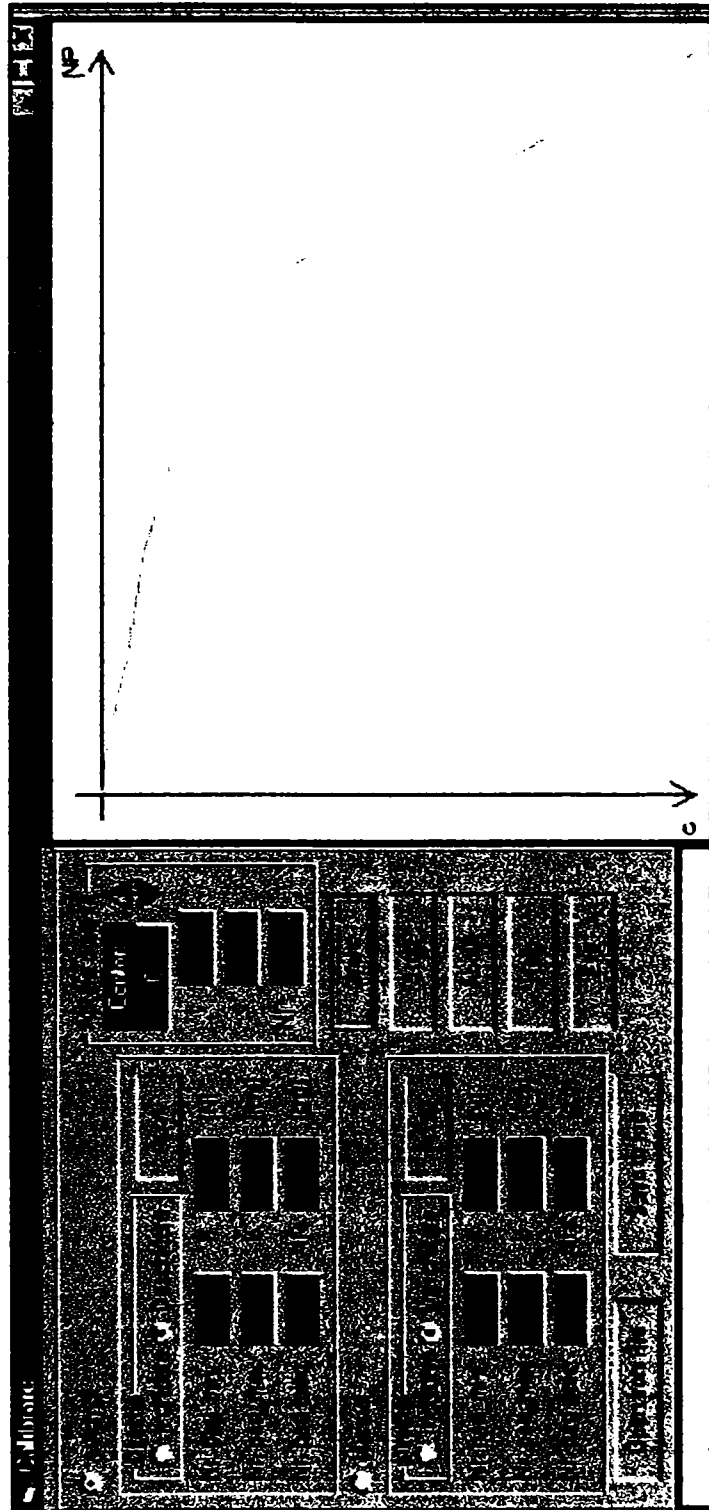


Fig 4.55 Fereastra-panou a pachetului de  
*ETALONARE/CALIBRARE*



## 4.9 Modelarea matematică și simularea aplicației “contact-task” conform cu varianta mecano-electrică proiectată/realizată ([Bir96], [Gaw01], [Ghi95], [Har68,69], [Kri01], [Lim01], [Luc98b,c,g], [Luc99b,g], [Luc00c], [Mat94], [Pre01], [Sav00])

### 4.9.1 Analiza cinetostatică a schemelor funcționale ale standului

Înainte de a se trece la modelarea matematică și simularea aplicației “contact-task” materializate prin stand (soluția din figura 4.28 și imaginile care îi urmează), trebuie efectuată o analiză a modelelor fizice prezentate în figurile 4.9÷10 și respectiv 4.19÷23 din punct de vedere structural-tehnic. Este necesară o astfel de analiză pentru a releva dacă soluția dispune de caracteristicile indispensabile unei interpretări tehnice corecte a scopului aplicației: controlul forței de contact care apare între sistemul de

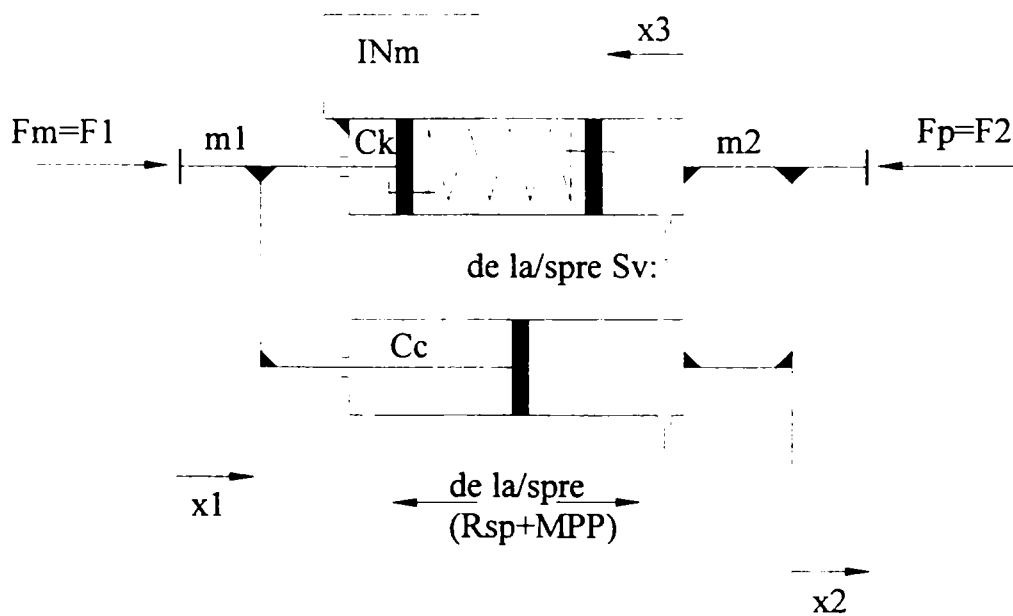
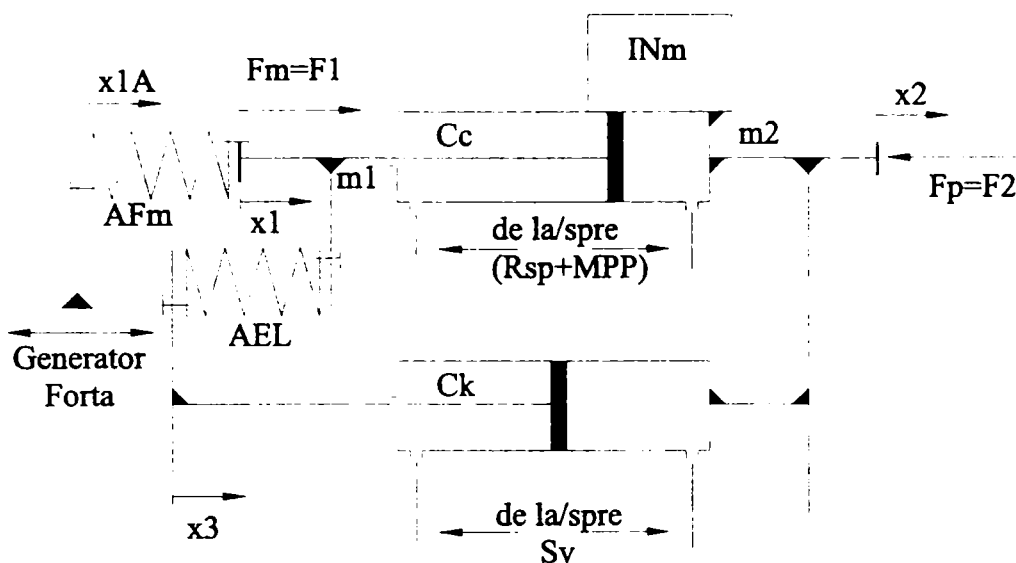


Fig. 4.56 Schema structurală a aplicației (arc încorporat în  $C_k$ )

lucru SL și mediul înconjurător M (de la stânga spre dreapta, în conformitate cu figurile 3.1 și 3.2 de la capitolul 3).

Dacă luăm drept exemplu de sistem de lucru (SL) un robot care trebuie să execute operații de polizare asupra unui ansamblu de geometrie variabilă (o caroserie auto), forța de apăsare trebuie să fie constantă. Modulul inteligent  $mI_{IU}$  este o materializare a sistemului-interacțiune SI, al cărui scop este tocmai menținerea acesteia în parametrii de toleranță admiși. Perturbațiile care apar (la o traiectorie determinată a robotului) provin de la caroserie, care – în acest caz (pentru interacțiune!! - deci pentru  $SI=mI_{IU}$  conform notației de la capitolul 4.1) - reprezintă *mediul înconjurător, generator de forță exterioară*. În schemele de la capitolul 4, forța aceasta, externă din

punctul de vedere al SI ( $F_m = F_1$ ) este plasată – din considerente de obișnuință didactică – în partea stângă, iar forța de contact (cea preconizată,  $F_2 = F_p$ ) în dreapta. SI își exercită rolul exclusiv prin intermediul variației controlate a parametrilor de impedanță mecanică, fiind o interfață inteligentă între cele două sisteme menționate. La nivelul modelului matematic (ecuația de mișcare), aceasta poate avea loc prin intermediul elementelor de execuție și a celor de activare ale **ssbmMe/param**, după cum a fost deasemenea prezentat în capitolul 4.



**Fig. 4.57 Schema structurală a standului cu modulul MI\_IU realizat (arc exterior elementului Ck)**

Prin controlul forței, dependent de structura sistemului, rezultă poziția acestuia.

Pentru parametrul masă și amortizare elementele de execuție sunt (în notația funcțională)  $C_m$  și  $C_k$ . În mod natural, prin structura schemelor, poziția SI nu este afectată de modul de dispunere a acestor elemente pe ansamblul mobil.

În cazul parametrului de elasticitate, variația are loc indirect, prin intermediul modificării poziției elementului de prestângere a arcului elicoidal (indiferent dacă elementul de execuție  $C_k$  este cilindrul hidraulic sau “actuator”). Reacțiunea la prestrângere (de la celălalt capăt al arcului) trebuie să parvină de la o componentă a SI, altfel fluxul de forțe are loc pe două trasee diferite spre mediu: prin punctul de sprijin al elementului  $C_k$  (pentru prestângerea arcului) și cel inițial de la SL (robot) pentru forța de contact preconizată. Cu alte cuvinte, corpul componentei  $C_k$  trebuie deasemenea să aparțină ansamblului mobil.

Schema din figura 4.23 după care a fost elaborată soluția prezentată în figurile 4.28-29 (soluție realizată în final), respectă acest deziderat. Constructiv există două modalități de încorporare a arcului în ansamblul mobil (ambele fiind prezentate în schemele menționate mai sus): în exteriorul elementului  $C_k$  (figura 4.57, indiferent de tipul elementului de execuție) sau în interiorul său (figura 4.56, numai dacă este vorba de cilindrul hidraulic). Nu există incompatibilitate principială între ele. Diferă doar repartiția maselor purtate. Deasemenea nu există diferențe principiale nici în cazul acționării bilaterale a arcului din soluțiile constructive prezentate.

## 4.9.2 Modelul matematic particularizat al soluției adoptate

### 4.9.2.1 Modelul sistemului SI reprezentat de $mI_{IU}$

“Instrumentele” de modelare sunt cele oferite de disciplina de mecanică, domeniul vibrații mecanice. Pentru modelarea matematică se pornește de la ecuația de mișcare 3.2.3 care descrie modelul fizic general al SI cu parametrii variabili (conform figurii 3.3) la care se operează particularizările dependent de structura concretă a schemei utilizate, cu parametrii aferenți.

Transcrierea ecuației generale pentru un grad de libertate conduce la forma cunoscută:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_1 - F_2 \quad (4.25)$$

Se rescrie și se particularizează ecuația pentru cazul schemei structurale cu arcul încorporat în elementul  $C_k$  spre exemplu. Ambele scheme (din figurile 4.56, 57) sunt prezentate simplificat. Se pot distinge clar cele două subansambluri mobile de mase diferite care sunt puse în mișcare de acțiunea (diferențiată) a celor două forțe. Se obțin următoarele relații ale forțelor  $F_{1,2}$  dependent de aceste mase și ceilalți doi parametri ai impedanței mecanice:

$$\begin{aligned} F_1 &= m_1\ddot{x}_1 + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k(x_1 - x_2 + x_3) \\ F_2 &= -m_2\ddot{x}_2 + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k(x_1 - x_2 + x_3) \end{aligned} \quad (4.26)$$

Echilibrul forțelor conduce la relația simplificată:

$$F_1 - F_2 = m_1\ddot{x}_1 + m_2\ddot{x}_2 \quad (4.27)$$

Pentru problema modelării, datele inițiale, cunoscute, sunt evident: mărimile de tip masă și forță precum și mărimile cinematice ale ansamblului mobil de masă  $m_1$  (acelerație, viteză și spațiu, subansamblul “1” fiind structurat exclusiv cu elemente rigide). Expresia accelerației subansamblului mobil “2” de masă  $m_2$  se poate deduce din relația corespunzătoare (4.26) a forței preconizate:

$$\ddot{x}_2 = \frac{c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k(x_1 - x_2 + x_3) - F_2}{m_2} \quad (4.28)$$

sau, mai simplu, din relația 4.27:

$$\ddot{x}_2 = \frac{(F_1 - F_2 - m_1\ddot{x}_1)}{m_2} \quad (4.29)$$

de unde se pot explicita succesiv:

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= \int \ddot{x}_2 \\ x_2 &= \int \dot{x}_2 \end{aligned} \quad (4.30)$$

**Observație**

În cazul soluției constructive a standului, la care  $F_p$  se impune simplu, printr-un sistem contragreutate-scripete nu este nevoie de control prin senzor de forță. În schimb, mărimea deplasare ( $x_2$ ) devine parametrul de intrare obligatoriu pentru **sbmuCC/compl**, necesar pentru algoritmul de conducere, de unde și necesitatea instalării unui traductor de poziție în acest scop.

**4.9.2.2                      Legele de conducere-parametru**

**A. Legea de conducere pentru parametrul de amortizare (reglare “directă”)**  
se poate exprima prin prisma forței  $F_2$  din relația 4.26, în locul căreia însă se introduce expresia corespunzătoare din relația 4.27:

$$c = \frac{F_1 - m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 - k(x_1 - x_2 + x_3)}{(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)} \quad (4.31)$$

**B. Legea de conducere pentru parametrul de elasticitate**  
se poate obține printr-o procedură similară, dar pornind de la expresia forței  $F_1$ :

$$x_3 = \frac{F_1 - m_1 \ddot{x}_1 + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)}{k} - x_1 + x_2 \quad (4.32)$$

Relația poate fi dezvoltată în continuare astfel:

$$x_3 = \frac{F_1 - \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (\ddot{x}_1 - \ddot{x}_2) + c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)}{k} - x_1 + x_2 \quad (4.33)$$

$$x_3 = k \int \Delta F dt \quad (4.34)$$

**Observație**

Trebuie reamintit faptul că reglarea este indirectă, prin deplasarea (de prestrângere) controlată a arcului suplimentar, în conformitate cu cele expuse la capitolul 4.1; s-a introdus noua notație  $x_3 = y(t)$  pentru a accentua apartenența la axa (“x”), axă care definește direcția de “manifestare” a gradului de libertate adoptat.

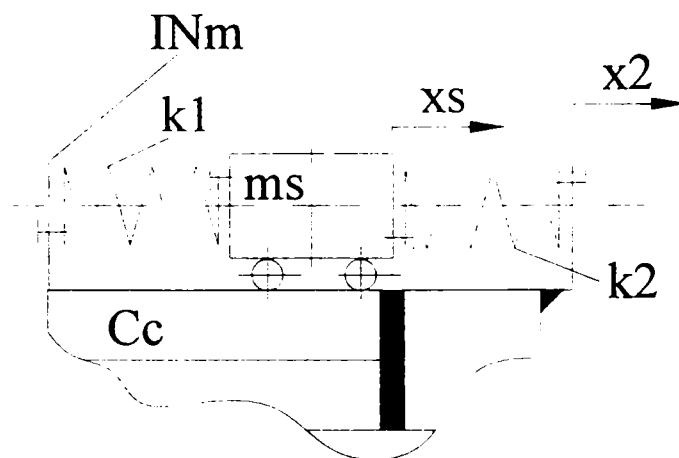
**C. Legea de conducere pentru parametrul inerțial (masă)**

În cazul parametrului masă se cere o analiză suplimentară care ține seama de natura parametrului și de promptitudinea răspunsului elementului de execuție  $C_m$ . Orice modificare a deplasării  $x_2$  care ar surveni peste capacitatea de “atenuare” provenind de la celelalte două module/parametru presupune o injecție suplimentară de masă  $m_s$  în incinta INm (în fazele tranzitorii) pentru a întârzia deplasarea și a nu perturba lanțul dimensional al sistemelor plasate (în schemele utilizate) în ordine, de la stânga la dreapta: mediu, SI (**mI\_IU**), SL (robot) și din nou mediu. Perturbație care ar induce (la

SL) o forță suplimentară relativ la  $\tilde{F}_p$  prin luarea în considerare a lanțului de sisteme în întregime sa.

Promptitudinea submodulului **sbmu/masă** depinde de capacitatea de reacție a lanțului de componente: traductor de deplasare, sistem de calcul, element de acționare (cilindrul  $C_m$ +actuator\_  $C_m$  în ultima variantă constructivă), sistemul de conducte flexibile prin care lichidul de masă  $m_s$  ajunge la destinație (INm).

Există însă posibilitatea de utilizare a unor sisteme auto-compensatorii care au capacitatea de a executa “de la sine”, prin modul de acțiune naturală, contracararea forțelor din fazele tranzitorii, utilizând tot caracteristicile de inerție, utilizate la



**Fig. 4.58 Sistem auto-compensator cu masă auxiliară/suplimentară “ms”**

compensarea vibrațiilor.

Un astfel de sistem este prezentat în figura 4.58, aplicație a așa-numitor “absorbitori de vibrații cu masă auxiliară” (conform [Har68]). Sistemul constă în montarea unei incinte în cadrul căreia translatează (fără frecare) o masă legată de pereții incintei prin două arcuri caracterizate de parametrii  $k_{1,2}$ . Se poate judeca capacitatea de compensare pornind de la ecuația de mișcare particularizată pentru acest caz:

$$\Delta F_2 = m_s \ddot{x}_s + (k_1 + k_2)x_s \quad (4.35), \text{ unde}$$

$$\Delta F_2 = m_2 \ddot{x}_2 \quad (4.36)$$

Modul în care se dorește desfășurarea investigației relativ la aplicația “contact-task” este însă acordarea posibilității de conducere a **mI\_IU** prin intermediul fiecărui parametru al impedanței în parte (cu subsisteme elementare deci). Din acest punct de vedere soluția nu se încadrează în tema de proiectare deoarece acționează combinat asupra a doi parametrii: masă și elasticitate. Există și un dezavantaj: dacă se dorește modificarea limitelor de acoperire a domeniilor de lucru pentru aceștia, soluția trebuie modificată din punct de vedere constructiv, conducând la modificarea constructivă a o serie de componente: masă+cărucior\_specializat+arcuri+elemente de îmbinare).

O altă soluție de sistem auto-compensator este deasemenea menționată în [Har68], însă domeniul de aplicativitate de la care este preluat operează la o scară diferită (mare și deosebit de mare) comparativ cu robotica uzuală: construcția navelor. Este vorba de sistemele anti-ruliu, la care purtătorul de masă este o incintă dublă cu fluid (se utilizează apa, de care navele în exploatare nu duc lipsă, dar și aerul). Cele două camere ale incintei, plasate lateral, de o parte și alta a corpului navei, sunt umplute

parțial și comunică între ele. Comunicarea se efectuează prin două conducte: una în partea superioară, pentru transferul aerului, cealaltă, în partea inferioară pentru cel al apei. Ambele conducte pot fi prevăzute cu modalități de modificare a rezistenței pneumatice/hidraulice în calea transferului fluidelor (transfer forțat din cauza mișcărilor de rulu) prin dispunerea de robinete, după cum se poate observa în figura 4.59.

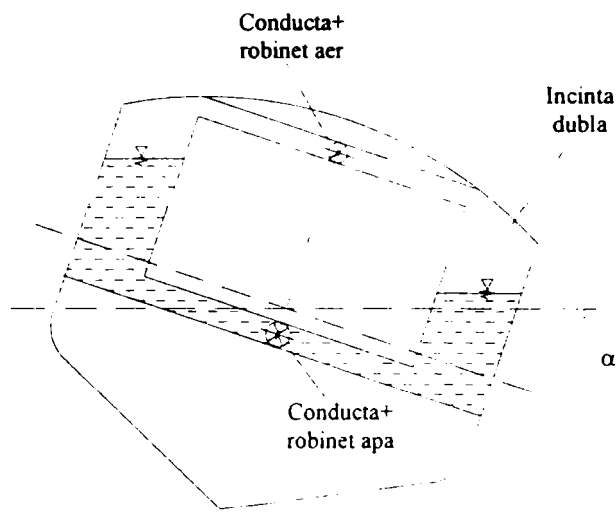


Fig. 4.59 Sistem auto-compensator al ruliului navelor

Și această soluție însă (așa cum este utilizată în industria navală) acționează - în afară de masă - și prin mijlocirea unui al doilea parametru (de data aceasta - spre deosebire de soluția anterioară - fiind vorba de amortizarea vâscoasă). După cum se menționează în sursa bibliografică indicată, și la vremea editării cărții, soluția a fost considerată depășită. Dar, acest lucru s-a datorat și domeniului în care a fost aplicată: pentru un efect semnificativ, se consuma prea mult spațiu util pentru a compensa o mică parte din rulu. Spațiu care pe o navă... este întotdeauna insuficient și destinat din start să transporte altceva decât... apă.

La ora actuală însă, ideea utilizării auto-compensării cu fluid este preluată în domeniul de vârf al tehnologiilor din construcții: proiectarea așa numitor “construcții extreme” civile (a “super-turnurilor”; informație de ultimă oră, conform imaginilor vizualizate din timpul unui experiment - la scară - pe [www.discoveryeurope.com](http://www.discoveryeurope.com)). Diferența apare prin faptul că incinta cu două camere nu este prevăzută cu rezistență

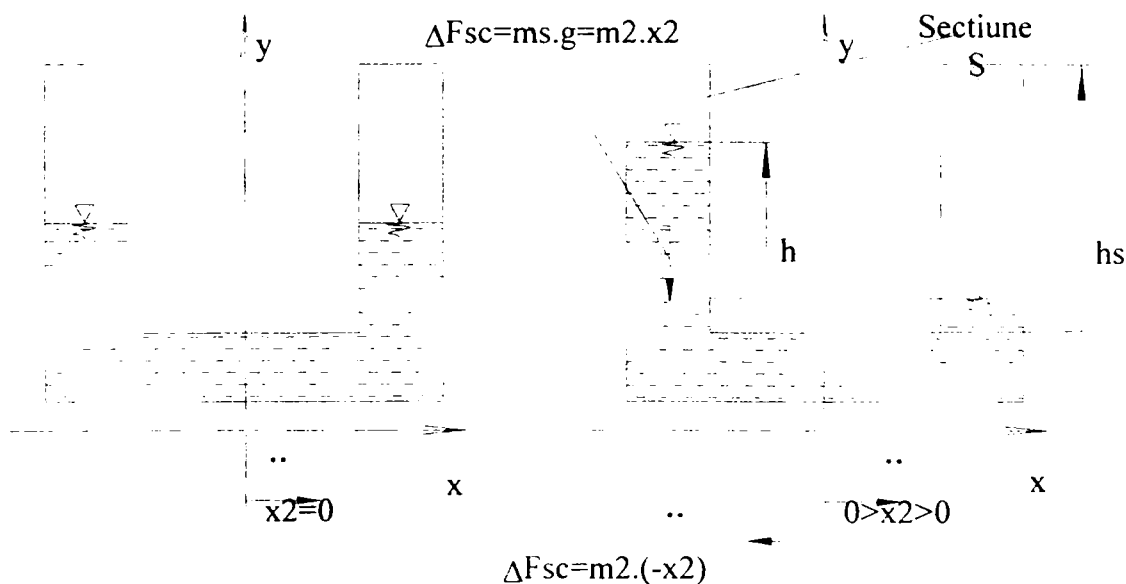


Fig. 4.60 Sistem auto-compensator inertial

hidraulică pe canalul de comunicare dintre ele. Acesta devine o incintă intermediară de secțiune mare, după cum se poate observa în figura 4.60.

Nu au fost găsite referințe asupra utilizării acestei soluții în alte domenii și nici asupra modelării mecanice a sistemului. În figură s-a încercat evidențierea unei astfel de modelări din punct de vedere mecano-fizic, ținând cont de faptul că fluidul are calitatea de a transmite sarcini (mijlocit prin presiune) pe traseele curbilinii ale incintelor prin care circulă. Prin intermediul unei astfel de scheme de modelare se poate estima capacitatea de auto-compensare a perturbațiilor de forță. Exprimarea matematică este următoarea:

$$\Delta F_{SC} = m_S \cdot g = V\rho g = h_S S\rho g \quad (4.37)$$

unde  $\Delta F_{SC}$  este forța perturbatoare posibil de auto-compensat inerțial prin intermediul masei suplimentare  $m_S$ ; în condițiile în care mărimea  $h_S$  (admisă) se acceptă în contextul dimensiunilor de gabarit ale **mI\_IU** (secțiunea S fiind impusă exclusiv de acest gabarit!). În condițiile respectării acestei limite, auto-compensarea este liniară, controlabilă și cuantificabilă, putând fi pusă în corelație cu conducerea-controlul celorlalți doi parametri ai impedanței mecanice. Dacă însă se depășește această limită, suprafața liberă (din stânga) a fluidului ajunge pe canalul de comunicare orizontal dintre camerele incintei și nu se mai asigură linearitatea interdependenței relativ la forța de compensat.

### Concluzii

- A. Referitor la **sbmw/masă**. Sistemul din figura 4.60 permite compensarea perturbației (în forță) care apare pe direcție orizontală, prin greutatea unui volum determinat de fluid care se manifestă pe direcție verticală. O astfel de auto-compensare respectă condiția temei de proiectare: posibilitatea de conducere-control a fiecărui parametru al impedanței mecanice în mod independent (în acest caz auto-conducere și control pentru parametrul inerțial, de masă). Promptitudinea sistemului este maxim posibilă: acesta lucrează instantaneu, "de la sine". O modificare a masei suplimentare este de o simplitate banală: introducerea unei cantități mai mari de fluid, singura condiție fiind asigurarea unei înălțimi  $h_S$  suficient de mari în condițiile unei secțiuni impuse de gabarit a incintei. Și încă o facilitate deosebită: se poate folosi - bineînțeles - apă.
- B. Referitor la concepția generală a **mI\_IU**. Se confirmă faptul că finalizarea unui proiect tehnic este un proces iterativ, cu multe "feed-back"-uri prin care se rezolvă problemele neprevăzute inițial în procesul de proiectare. În acest caz, paradigma proiectantului (prin prisma **roboticii**): "există trei submodule, acestea trebuie proiectate și conduse inteligent" a fost amendată (în cazul **sbmw/masă**) pe parcursul procesului de modelare matematică (modelare bazată pe instrumentele din domeniul **vibrațiilor mecanice**) printr-o soluție care nu a fost utilizată în domeniul roboților industriali. Rămâne ca investigația experimentală să constate eficacitatea și oportunitatea soluției.

### 4.9.3 Simulatoare virtuale ale aplicației și ale modulului $mI\_IU$ sub extensia *SIMULINK/MATLAB*

Pentru modelarea și simularea aplicațiilor ingineresti, conform celor constatate la capitolul 2, mediul soft cu cea mai largă răspândire (datorită în primul rând ofertei generoase a uneletelor sale de lucru) îl constituie pachetul **MATLAB** cu extensia

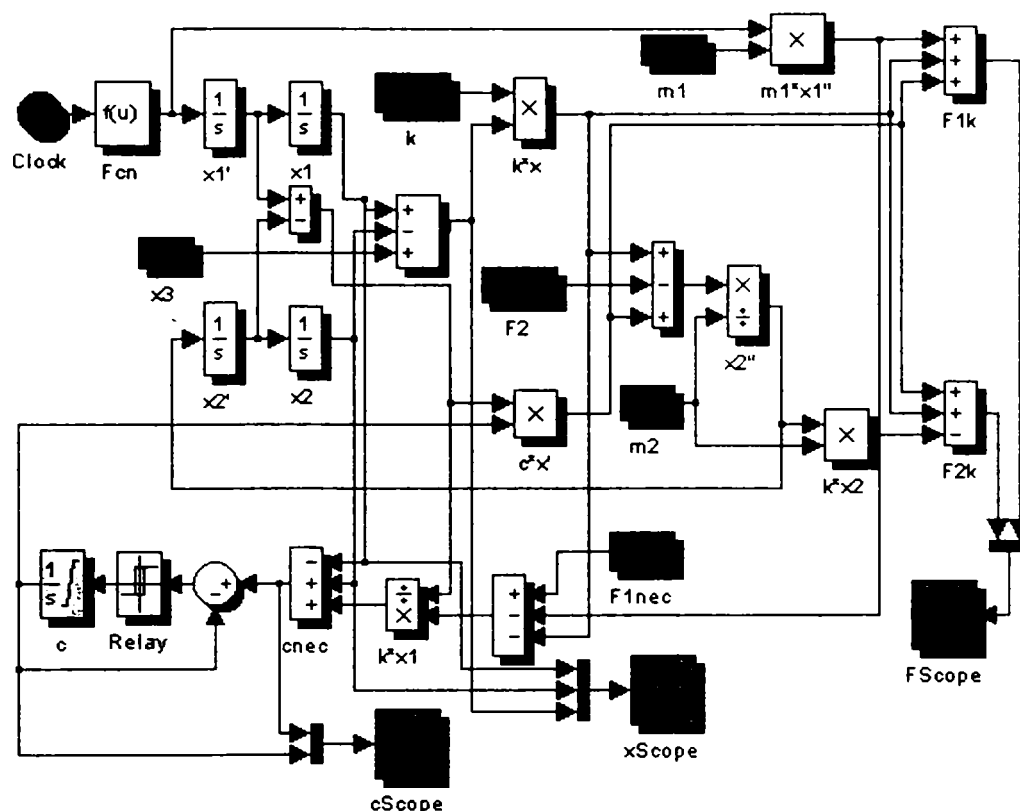


Fig. 4.61 Simulatorul modelului aferent schemelor structurale prezentate, pentru cazul amortizare inteligentă

**SIMULINK.** Din această cauză acesta este și mediul utilizat pentru simularea aplicațiilor “contact-task”. Notațiile funcționale utilizate sunt cele de la teoria sistemelor (prezentate deasemenea la capitolul 2). Au fost concepute mai multe variante de model **SIMULINK**. Se prezintă în continuare două dintre acestea.

Simulatorul-model cu blocuri funcționale din figura 4.61, a fost conceput inițial – pentru testare - în următoarele condiții:

- ◇ evoluție cosinusoidală pentru forța provenită din mediu (dar, doar într-un interval dat de timp, ceea ce asimilează într-o măsură și un semnal treaptă!):  
 $50 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot u) \cdot (u(1) > 0.1) \cdot (u(1) < 0.3)$ ;
- ◇ valoare constantă pentru forța preconizată;
- ◇ prestrângere constantă a arcului; valoare constantă pentru  $k$ ;
- ◇ conducere inteligentă în *funcție de parametrul amortizare*.

Valorile mărimilor constante sunt vizibile în blocurile modelului. S-a ales drept algoritm de rezolvare ODE15s (stiff/NDF) cu pas variabil.

În figurile următoare, 4.62-3 se prezintă diagramele caracteristice ale modelului.

Intervalul funcțional este de 0.6 s, semnalul cosinusoidal al forței  $F1$  (nevizualizat) fiind aplicat în intervalul 0.1-0.3 s. Se poate observa din evoluția mărimii  $x2$  modul în care lucrează submodulul de amortizare.



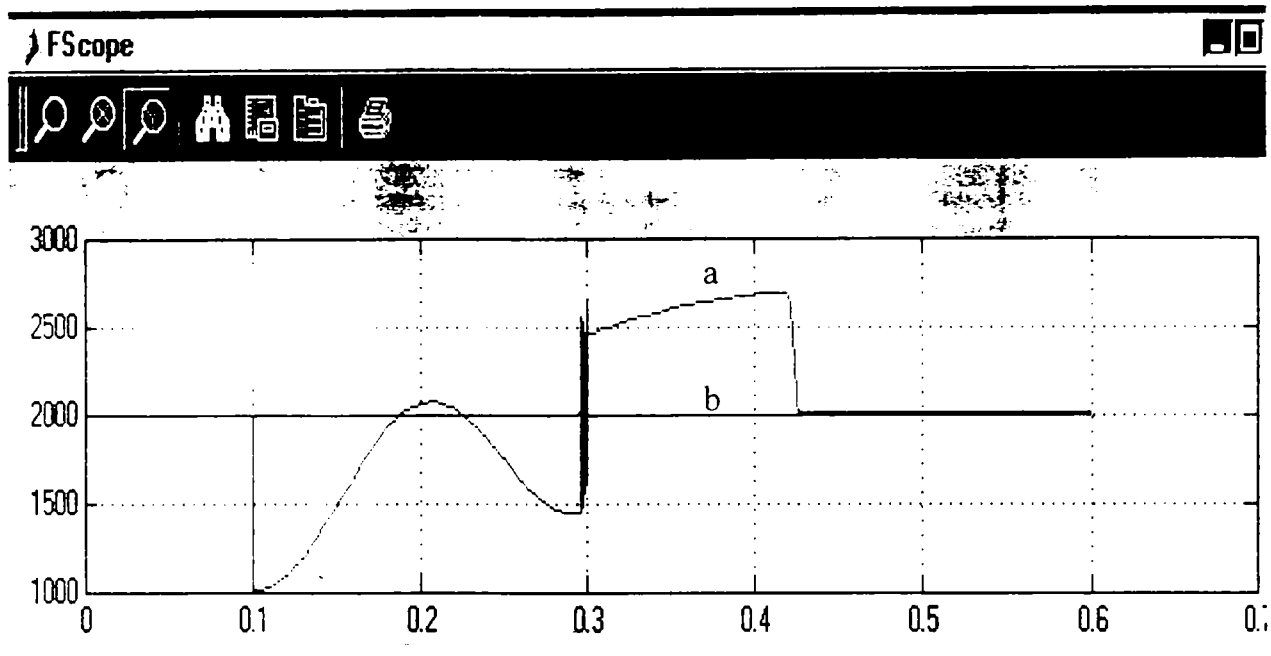


Fig. 4.62 Evoluția forțelor  $F_{2k}$  (b) și  $F_{1k}$  (a)

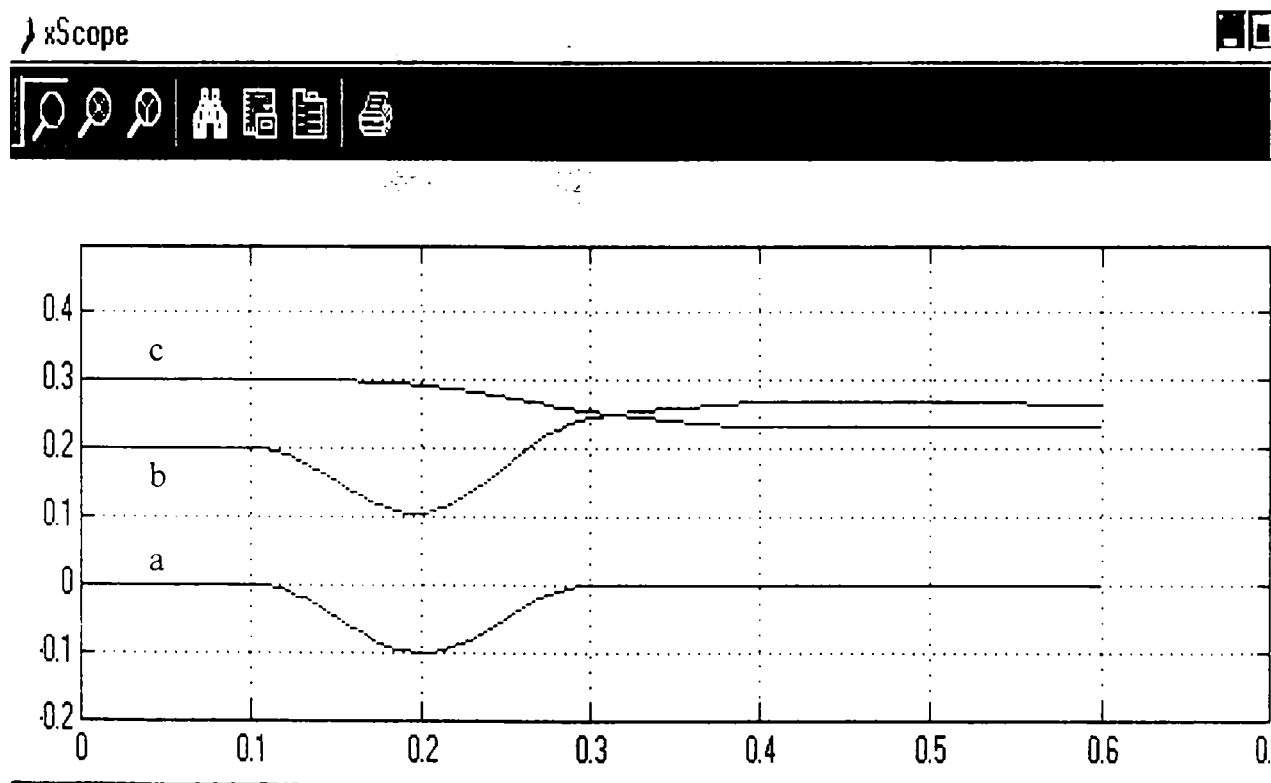


Fig. 4.63 Evoluția deplasărilor  $x_1$  (a),  $x_2$  necompensat/neamortizat (b) și  $x_2$  sub conducerea inteligentă a parametrului de amortizare (c)

Pentru parametrul de elasticitate a fost adoptat un model Simulink/MATLAB având implementat un regulator Fuzzy (conform figurii 4.64) ale cărui 5 reguli adoptate sunt vizualizate în figura 4.65.

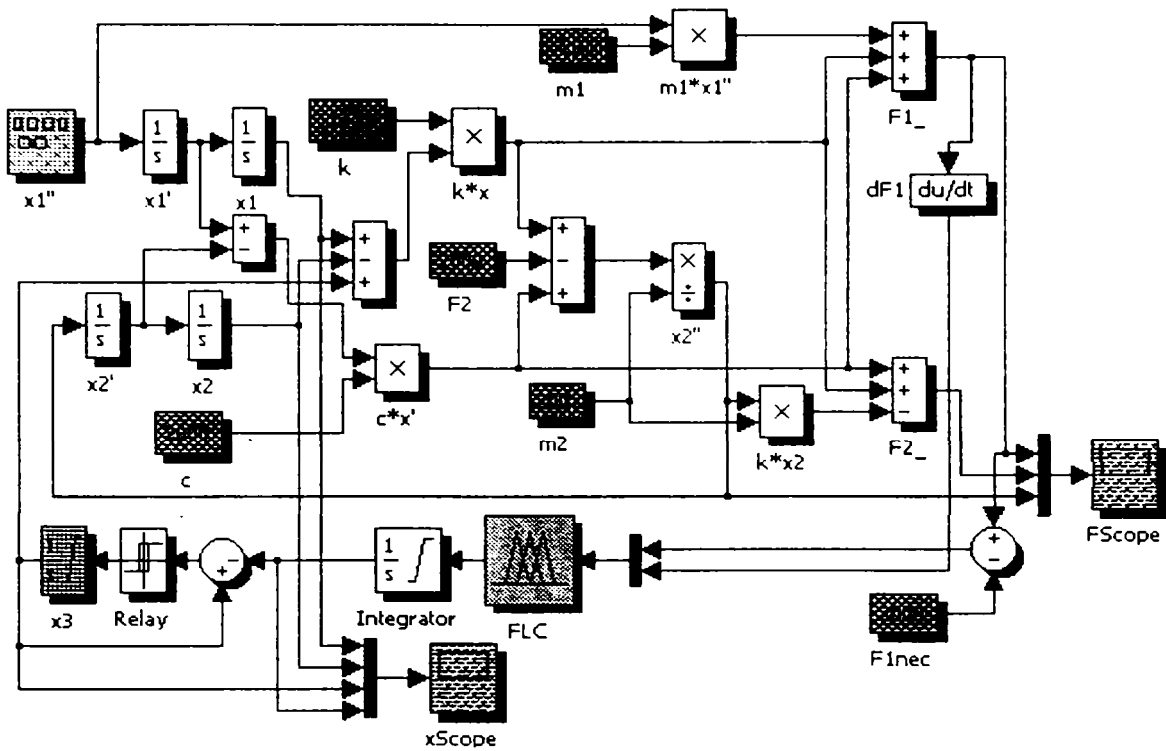


Fig. 4.64 Simulatorul modelului aferent schemei structurale, cu conducerea inteligentă aplicată parametrului de elasticitate prin intermediul unui *regulator Fuzzy*

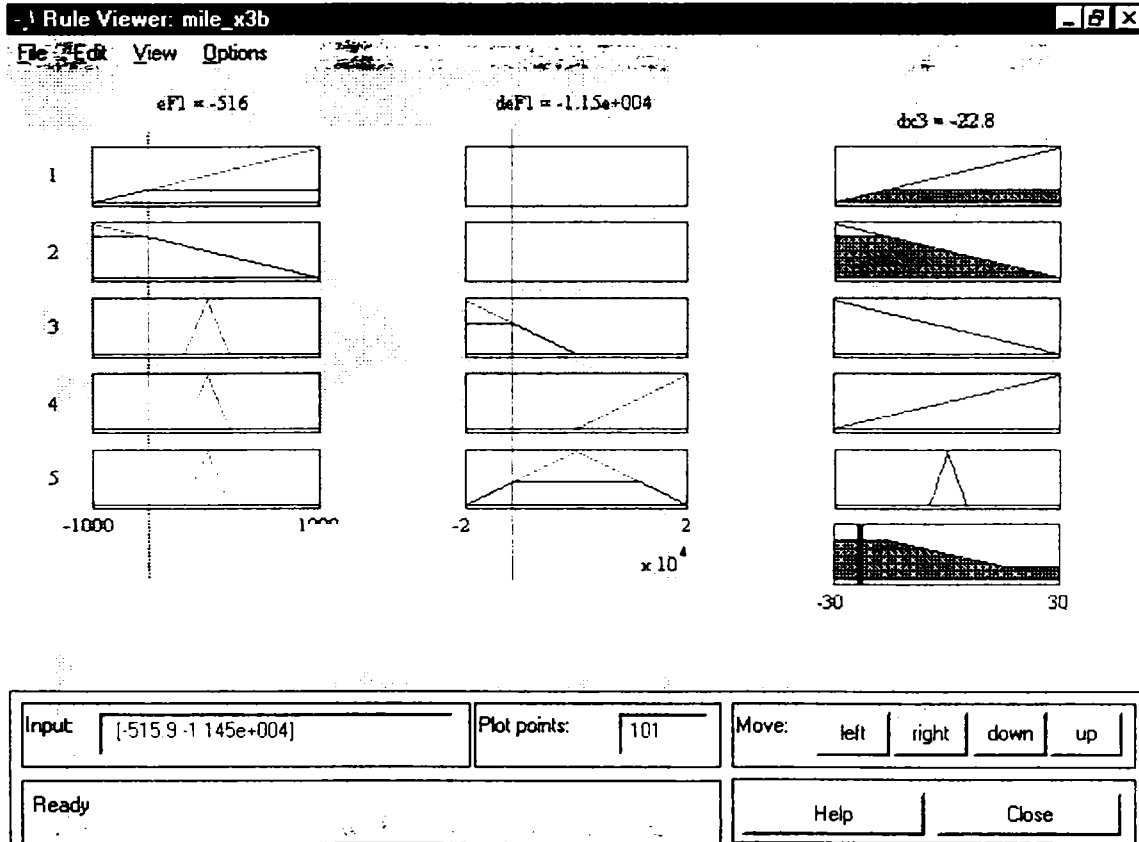


Fig. 4.65 Captură de ecran cu regulile *Fuzzy* adoptate

În figura 4.66 sunt prezentate diagramele aferente evoluției forțelor din proces (în partea superioară):  $F_2$  real ( $v$ ),  $F_1$  ( $a$ ), deviația de la  $F_p$  ( $r$ ), în corelație cu toate evoluțiile parametrului spațiu (în partea inferioară):  $x_1$ ( $m$ ),  $x_2$  ( $v$ ),  $x_3$  comandat ( $r$ ),  $x_3$  executat de actuator ( $a$ ).

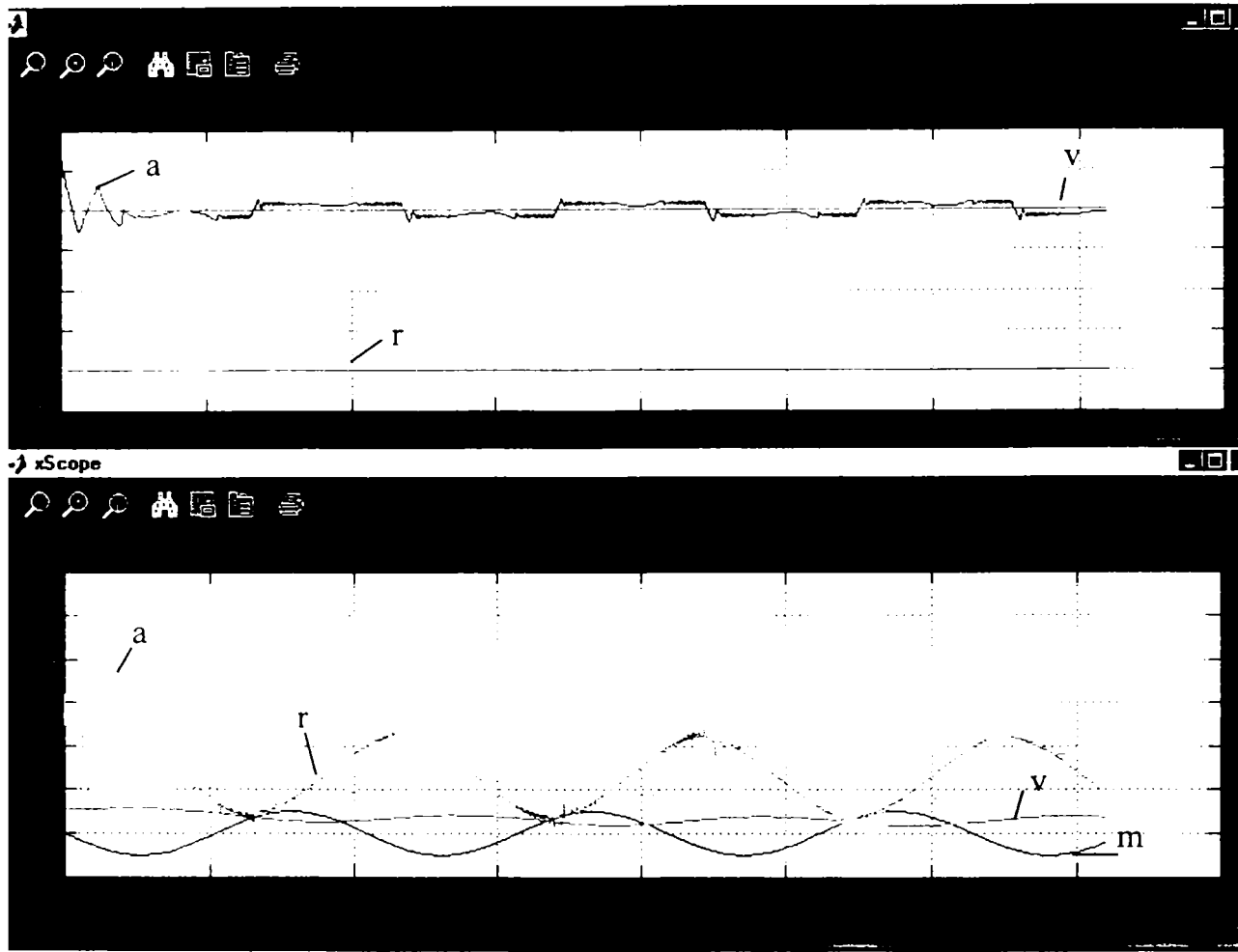


Fig. 4.65 Captură de ecran cu diagramele forță și respectiv deplasare (culoare verde pentru răspunsul la “ieșire” cu conducere inteligentă Fuzzy)

#### Concluzii

- A. Au fost concepute mai multe simulatoare pentru cei doi parametri ai impedanței mecanice, având implementate mai multe tipuri de legi de conducere, testându-se și comportamentul lor pentru diferite valori ale datelor inițiale, inclusiv pentru datele variantelor de standuri proiectate, respectiv realizate.
- B. Din punct de vedere calitativ, (indiferent de datele de intrare) comportamentul sistemelor relevă faptul că parametrul de amortizare “răspunde” mai lent acțiunii exterioare. Limitarea intervine din punct de vedere fizic prin capacitatea de modificare reală a componentelor utilizate, ceea ce îngustează plaja de reglare.
- C. Deosebit de interesant însă se comportă la conducere parametrul de elasticitate. Există o mare promptitudine de reacție și o foarte bună “atenuare” la evoluția spațiului de la ieșire. În plus tehnica Fuzzy este superioară reguletoarelor clasice (modelele concepute în această manieră nu au mai fost figurate), indiferent de legea de conducere adoptată pentru acest parametru, prin gradul de “netezire” pe care îl oferă.

## 4.10 Investigațiile experimentale

s-au desfășurat pe standul executat în varianta mecano-electrică, prezentată la subcapitolul 4.6.5. la care au fost aduse modificări – respectiv completări – motivate prin cele expuse la subcapitolul 4.9. Varianta finală, funcțională a standului este prezentată în figura 4.66.

### 4.10.1 Standul de investigare a aplicațiilor “contact-task” (descriere/recapitulație succintă, completări și modificări)

Schema structurală a standului este prezentată în figura 4.4/pagina 160 iar soluția sa constructivă în figurile 4.28/29 de la paginile 190/91. Imaginile cu soluția realizată – la montaj - se găsesc în figurile 4.30/32 de la paginile 192/193. Standul constă din:

- ◇ modulul interfață inteligent **mI\_IU** (cu un grad de libertate); schema-model a acestuia este prezentată în figura 4.57, pagina 229; varianta proiectată 3D pentru încorporare în modulul **M\_ILAC\_T** cu 6 grade de libertate se poate consulta în figura 5.8; prin intermediul submodulelor sale, modulul real are posibilitatea de:
- ✓ modificare inteligentă a elasticității proprii (**sbmu/elast.**) prin prestrângerea controlată a arcurilor AEL determinată de acțiunea comandată a actuatorului **Ck**, de tip **STRONG**, modificat, cu traductor incremental de poziție încorporat; alimentarea motorului de curent continuu al acestuia (tensiune nominală de 36 V) se realizează

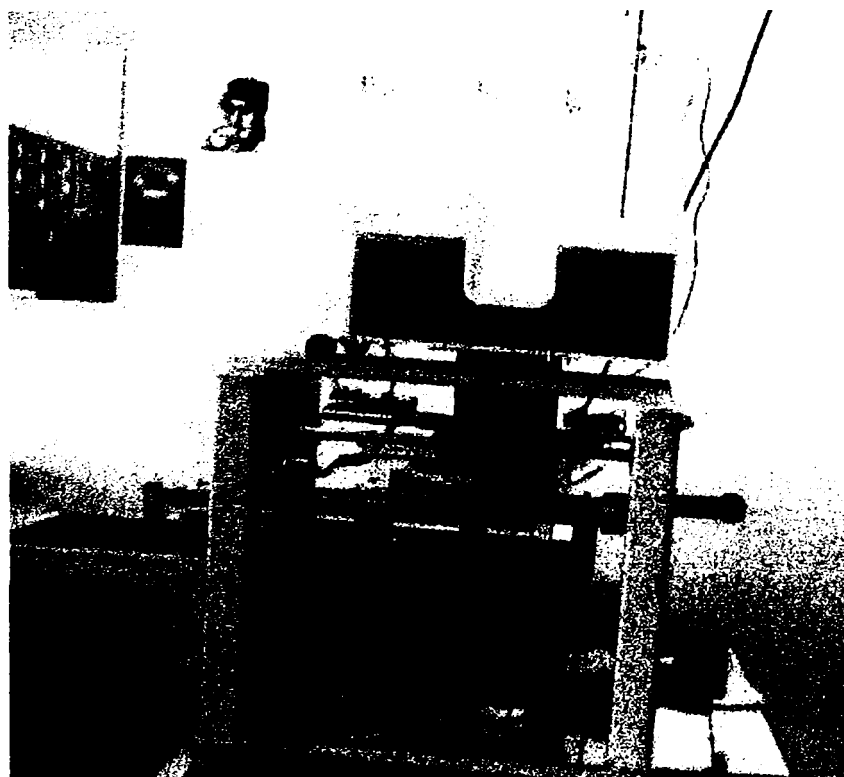


Fig. 4.66 Vederea standului cu fluidul vizualizat în incinta INm

- cu o sursă dublă de tensiune, prin intermediul unui sistem de rele, urmând a se implementa ulterior – în locul acestuia - o punte cu tranzistoare;
- ✓ modificare inteligentă a caracteristicilor de amortizare (**sbmu/amort.**) prin modificarea controlată (acțiunea comandată a unui motor pas cu pas, MPP) a interstițiului unei rezistențe hidraulice variabile de tip drosel din circuitul cilindrului Cc; componentele submodulului (plasate în mod normal pe cadrul CDA2 de pe stand, figura 4.28) sunt vizibile și în figurile 4.34/35, paginile 196/7 respectiv 4.37/38 de la pagina 200, în timpul determinării și eliminării variației coeficientului de amortizare;
  - ✓ modificare adaptivă a masei reduse a modulului (auto-compensare cu fluid prin **sbmu/masă**) prin modificarea de tip inerțial, a masei în mișcare a unui fluid din incinta *Inm* (conform schemei simplificate din figura 4.60, pagina 233); pentru monitorizarea auto-compensării s-a atașat un plutitor care – prin intermediul unei tije pe care se fixează elementul mobil al unui traductor - poate indica oscilațiile fluidului în timpul experimentelor;
    - ◇ generatorul de forță (GF= simulatorul fizic al mediului înconjurător, al cărui comportament induce forța de contact); este preluat din dotarea Departamentului de Mecatronică și constă dintr-un vibrator mecanic (atașat cu ajutorul cadrului CDA1 de SRS fiind vizibil în figurile 4.30/32 de la paginile 192/93), cu excentric (cursa sa este amplificată cu ajutorul unei pârghii, nefigurate); este acționat prin intermediul unei transmisii prin curele de la un motor electric monofazat, alimentat cu un auto-transformator variabil; pot fi obținute mai multe trepte pentru cursa corespunzătoare mărimii  $x1A$  (a se vedea explicația de la subcapitolul 4.10.3);
    - ◇ simulatorul fizic al sistemului activ la care se manifestă forța preconizată; constă dintr-un sistem de scripeți (pe subansamblul CDS din figura 4.28) peste care este tensionat un fir inextensibil cu o contragreutate dispusă pe talerul de la un capăt al acestui fir, forța fiind aplicată asupra masei în mișcare  $m2$ , la celălalt capăt al firului;
    - ◇ structura de rezistență și susținere SRS (**sbmE/structura suport**) având o configurație spațială adecvată unui montaj modularizat al subansamblelor nemobile; este vizibil în majoritatea figurilor menționate; în partea superioară este fixată tija subansamblului-translație de tip INA;
    - ◇ căruciorul mobil fixat de ghidajele de translație de tip INA poartă modulul **mI\_IU**, de masă  $m2$ ;
    - ◇ sistemul de traductoare (prezentat în detaliu în subcapitolul următor);
    - ◇ sistemul de calcul utilizat în final pentru determinările experimentale (**sbmE/configur.hard&soft**) constă dintr-un calculator de tip PC cu procesor la 550 MHz dispunând de 320 MB memorie RAM și HDD de 40 GB; este prevăzut cu 3 porturi seriale pentru preluarea semnalelor de la traductoare și un port paralel pentru preluarea de semnale și emiterea de comenzi.

Incinta *INm* prevăzută inițial să funcționeze prin "injectare" controlată de (masă de) fluid conform figurii 4.28, a fost înlocuită cu o incintă dublă cu cale de comunicație fără rezistență hidraulică pentru a facilita modificarea adaptivă a masei (auto-compensarea inerțială), în conformitate cu cele rețevate la subcapitolul 4.9.2 (figura 4.60). Incinta – fixată pe căruciorul mobil CM cu ajutorul unui suport de configurație spațială adecvată - este vizibilă în figura 4.66. Pe partea inferioară a acesteia sunt montate (și vizibile deasemenea în figură, stânga jos față de *INm*) două role având

posibilitatea de ghidare a deplasării pe profilele longitudinale superioare ale SRS, pentru a preveni balansul în jurul tijei mecanismului de translație. Dispare cu totul varianta de submodul plasat pe cadrul CDS (figurile 4.28/29 și 4.31, pagina 192).

Actuatorul Ck de tip STRONG a fost prevăzut - din construcție - cu un reductor în două trepte pentru acționarea cuplei sale elicoidale, fiind astfel relativ lent: putea atinge cel mult 10-11 mm/s viteză liniară la o tensiune de alimentare de 36 V. Din această cauză, reductorul a fost îndepărtat și înlocuit cu o transmisie prin curele (o singură treaptă). Au fost executate mai multe seturi de roți de curea, astfel că performanțele actuatorului pot fi adaptate la dinamica dorită a experimentului. În figura 4.68 (stânga) se prezintă blocul de alimentare/putere și comandă prin intermediul unui controler (în varianta inițială de experimentare) al actuatorului.

În varianta finală, toate comenzile aferente standului au fost transferate sistemului de calcul de tip PC (amintit) pentru o mai mare comoditate în modificarea parametrilor de program necesari.

Informațiile referitoare la parametrii reali ai standului sunt prezentate la subcapitolul 4.10.3, cele referitoare la mărimile de măsurat la subcapitolului următor (4.10.2), iar modul de desfășurare al experimentelor la subcapitolul 4.10.4.

### 4.10.2 Mărimile măsurate și de stare

Pentru mărimile necesare a fi măsurate (în conformitate cu figura 4.57, pagina 229 de la subcapitolul 4.9), au fost prevăzute traductoare incrementale de poziție. Acestea s-au construit utilizând (și adaptând) componente ale dispozitivelor periferice de tip mouse. Traductoarele sunt legate două câte două ("abscisă"/"ordonată"-mouse), la porturile COM1, COM2 și COM3 ale sistemului de calcul. Excepție face traductorul care măsoară deplasarea efectivă a actuatorului STRONG (legat la portul paralel), acesta fiind - la primele experimentări - cel original (încorporat) al actuatorului. Dacă se cere o sensibilitate mai mare, există posibilitatea dispunerii unui traductor similar cu toate celelalte (dar legat la "ordonata" portului COM3), în locul celui original.

În tabelul 4.16 se prezintă datele referitoare la modalitatea și mijloacele de măsurare a tuturor mărimilor care intervin în experiment.

În cazul mărimilor-deplasare  $x_1$  și  $x_{1A}$ , există mai multe situații posibile între care se poate opta:

- ◆ pot fi obținute prin calcul, pornind de la datele funcționale ale generatorului de forță și indicațiile traductoarelor;
- ◆ pot fi obținute prin calcul, plecând de la poziția "acasă" a modulului (relația 4.38 și 4.39) utilizând indicațiile traductoarelor și dimensiunile caracteristice;
- ◆ pot fi măsurate direct și monitorizate cu ajutorul unui traductor legat la portul COM3;
- ◆ nu este necesar a fi cunoscute (cea mai convenabilă variantă!) în cazul conducerii de tip "fuzzy".

În figura 4.67 se pot observa montajele traductoarelor aferente mărimilor  $x_2$  (stânga) și  $\Delta F_k$  (dreapta).

În figura 4.68 (dreapta) se prezintă traductorul care monitorizează nivelul  $h$  al auto-compensării cu fluid, suspendat deasupra incintei  $INm$ , cu elementul de incrementare fixat pe tija plutitorului.

Pentru transmiterea comenzilor la actuator și la motorul pas cu pas (submodulele amortizare și elasticitate) s-a utilizat portul paralel al sistemului de calcul.

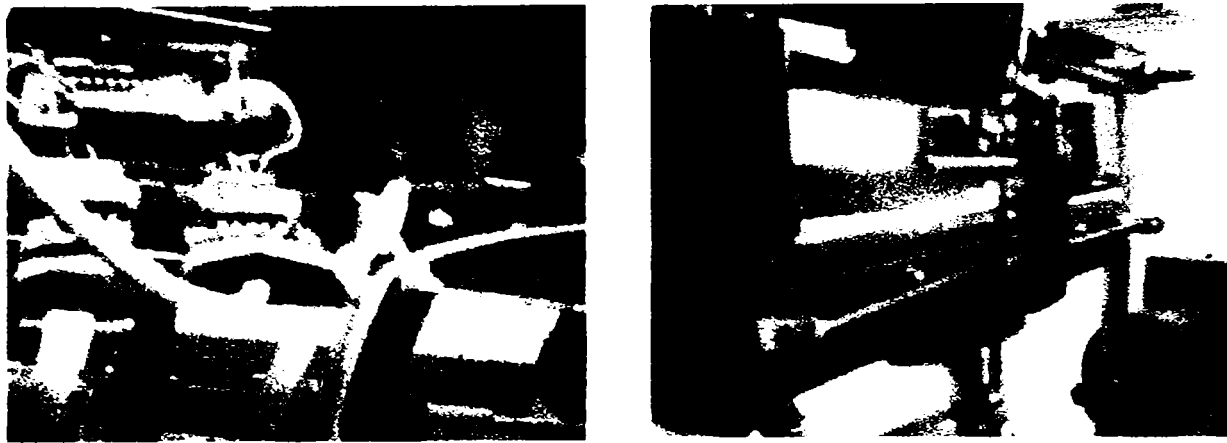


Fig. 4.67 Traductoarele incrementale pentru mărimile  $x_2$  și  $\Delta F_k$

Tabelul 4.16

Nr. crt.	Mărimia de măsurat	Mijlocit prin:	Elementul la care se măsoară (conf. fig. 4.57)	Parametru/Port	Sens pozitiv:	Rezoluție [incr/mm]
1.	$F_m=F_1$	Deplas. rel. $x_{1A_k}$	Arcul AF <sub>m</sub> acționat de GF (deform., față de m <sub>1</sub> )	Abscisa/COM2	Dinspre GF spre m <sub>2</sub>	8,57
2.	$\Delta F_k$	Deplas. rel. $x_{3k}$	Arcurile AEL de param. $k$ (deform., față de m <sub>1</sub> )	Ordonata/COM2	Idem	9,55
3.	$x_2$	$x_2$	Căruciorul mobil (masa purtată: m <sub>2</sub> )	Ordonata/COM1	Idem	9,4
4.	$F_p=F_2$	Nu se măsoară	Taler = contragreutate constantă	-	-	-
5.	$h$ (fig. 4.60)	$h$	Tijă plutitor (față de $IN_m$ )	Abscisa/COM1	De sus în jos	15.44
6.	$x_3$	$x_3$	Actuator C <sub>k</sub> STRONG (mărime de stare)	LPT1	Dinspre m <sub>2</sub> spre GF	4
7.	$x_{1A}$	ori/ori	$x_{1A}$	Abscisa/COM3	Idem	8.5
	$x_1$		$x_1$			



Fig. 4.68 Blocul de alimentare și comandă a actuatorului STRONG (stânga) și vederea traductorului de monitorizare a auto-compensării (dreapta)

### 4.10.3 Parametrii reali, corespunzători standului și modulului mI\_IU realizat

sunt extrași din soluția constructivă realizată a standului și prezentați în cele ce urmează și în tabelele 4.17 (gabarit/dimensiuni liniare caracteristice) și 4.18 (distribuția maselor).

Notațiile corespund cu cele din soluția constructivă din figurile 4.28/29, paginile 190/91 și din figura 4.57.

**Tabelul 4.17**

Nr. crt.	Componentă/ (Sub)ansamblu	Parametru/mărime	Dimensiuni [mm]
1.	Stand	Gabarit total (exclusiv tijă-plutitor și taler)	760x380x1250
2.	Cadru SRS	Gabarit interior, disponibil	346x218x646
3.	Cărucior mobil CM	Gabarit longitudinal	140
4.	Mecanism translație	Idem	375
		Cursă maxim posibilă	235
5.	Actuator Ck	Gabarit longitudinal maxim (deschis)	600
		Cursă	200
6.	Cilindru Cc	Gabarit longitudinal maxim (deschis)	410
		Cursă	150
7.	Incinta INm	Secțiunea S aferentă auto-compensării	110x132
		Volumul de la bază ("neutru" inerțial)	315x40x132
8.	Traductoare x1Ak și h	Cursă maximă	140
9.	Traductoare x3k și x2	Cursă maximă	175
10.	Arcurile AEL	Lungime/stare nedeformată	63
		Deformație maximă (=cursa)	33
11.	Suport AEL	Gabarit liniar (interior) disponibil	2x63
12.	Arcul Afm	Lungime/stare nedeformată	45
		Deformația maximă (=cursa)	30
13.	Generatorul de forță GF	Gabarit disponibil cadru CDA1	240x290x400
		Distanța dintre axe /transmisia prin curea	225
		Raport maxim pârghie	180/40
		Cursă maximă	23

Limitele forței  $F_m$  posibil de aplicat în timpul investigațiilor pot fi modificate prin două modalități:

- ◇ prin reglarea cursei cvasi-liniare a elementului final al generatorului de forță GF = tija de ghidare și acționare a arcului prinsă de "capătul" de pârghie atașată vibratorului mecanic (se mută punctul de legătură dintre aceste două componente); deplasarea punctului caracteristic al acestui element (notația x1A din figura 4.57, respectiv x1aK, relativă, tabelul 4.16) poate varia de la 5 mm până la 23 mm în mai multe trepte posibile;
- ◇ prin dispunerea unor arcuri (notație AFm) de rigidități diferite la acest element final; arcurile disponibile sunt arcuri elicoidale de compresiune-întindere având caracteristicile  $k$  de 350 și 950 N/m, respectiv 3120 și 1180 N/m; ultimele două au fost utilizate la primele determinări experimentale.

Viteza maximă a actuatorului STRONG *modificat* (la alimentare normală a motorului său de curent continuu) este de 120 mm/s.



În această situație, generatorul de forță este limitat la execuția a maximum 156 curse\_duble/min pentru o deformație maximă a arcului AFm ( $\omega$  semnal  $\sim 16$  rad/s ).

Forța preconizată ( $F_p=F_2$ ) se aplică prin intermediul unor contragreutăți; în cadrul experimentărilor a fost utilizată cel mai des valoarea de 12 N prin masa etalonată de 1,2 kg. Această masă influențează totodată inerția subansamblului  $m_2$ , după cum se poate observa din tabelul 4.17.

Valoarea medie a coeficientului de amortizare  $c$  pe domeniul utilizabil al submodulului de amortizare este de 1312 Ns/m, cu raportul dintre valorile minimă și maximă de 1:7,2. Diagrama obținută experimental este redată în subcapitolul următor.

În ceea ce privește submodulul adaptiv de masă, dependent de gradul de umplere al incintei  $INm$  pot fi efectuate compensări cu diferite mase suplimentare-fluid. Aceasta este determinată de nivelul fluidului din secțiunea/ile  $S$  aferentă/e auto-compensării. În tabelul 4.18 este trecută una din variantele utilizate (fiind vorba de apă) în timpul experimentului. Porțiunea de la baza incintei permite 1,6632 kg masă de apă. Suma celor două ( $m_f$  din tabel) influențează inerția totală a subansamblului de masă  $m_2$ .

**Tabelul 4.18**

Nr. crt.	Subansamblu de masă:		Masa aferenta [kg]
1.	m1		0,240
	2.1	Componente $m_2$	$INm$
	2.2		Tijă + plutitor + traductor
	2.3		Masa contragreutății
	2.4		Masa totală fluid $m_{ff}$
	2.5		Componente mecanice
2.	m2		13,475
3.	ms (max.-utiliz. a fluidului)		1.5

#### 4.10.4 Modul de desfășurare al investigațiilor experimentale

##### 4.10.4.1 Operații preliminare

###### 4.10.4.1.1 Stabilirea lanțului de dimensiuni al standului și poziția “acasă” a acestuia

Pentru desfășurarea și conducerea experimentului este necesară o corelare dimensională corectă a mărimilor măsurate în conformitate cu schema-model din figura 4.57, pagina 229. Există mai multe posibilități pentru aceasta. Cel mai convenabil și natural mod de lucru este cel în care se consideră drept punct de referință (poziția “acasă” a modulului  $mI_{IU}$ ) poziția “zero” a mărimii-deplasare  $x_2$ , caz în care este suficientă utilizarea primelor 5 traductoare de poziție din tabelul 4.16. Alternativa (variantea în care se pleacă de la generatorul de forță GF) implică utilizarea unui traductor suplimentar (unul din cele două de la poziția 7, tabelul 4.16).

Pentru primul mod de lucru, pot fi calculate valorile absolute ale mărimilor care nu se măsoară (ținând cont de sensul stabilit pentru cele măsurate cu ajutorul traductoarelor) astfel:

$$x_1 = (G_{ref} + x_{30}) + x_3 - (x_{3k} + x_2) \quad (4.38)$$

$$x1A=x1+x1Ak$$

(4.39)

unde  $G_{ref}$  este gabaritul axial al actuatorului  $Ck$  în poziția închis (retras),  $x30$  - poziția sa "acasă",  $x3$  - deplasarea (curentă) comandată a acestuia. Poziția  $x30$  "acasă" se alege ținând cont de mijlocul cursei proprii și respectiv a cursei cilindrului  $Cc$ . Celelalte mărimi sunt măsurate cu traductoarele existente pe stand.

Înainte de începerea experimentelor însă, trebuie ținut cont și de poziția de start a celor două arcuri, a generatorului de forță și a traductoarelor.

La submodulul de amortizare, poziția "acasă" desemnează poziția inițială a droselului care determină interstițiul rezistenței hidraulice "de start" la circuitul cilindrului  $Cc$ . Aceasta nu este legată de lanțul de dimensiuni al standului, alegerea sa fiind la latitudinea utilizatorului dacă nu apar alte cerințe exprese.

### Concluzie

Poziția "acasă" stand semnifică dispunerea în poziții determinate ("acasă"):

- ✓ a ("corpului") modulului  $mI_{IU}$ ;
- ✓ a actuatorului său;
- ✓ corelarea acestei din urmă poziții cu cea convenabilă a arcurilor
  - ◆ AFM
  - ◆ AEL și a
  - ◆ generatorului de forță GF, precum și
- ✓ intercorelarea pozițiilor traductoarelor urmată de o setare a acestora (punere la "zero" soft).

#### 4.10.4.1.2 Determinări experimentale preliminare: caracteristica submodulului de amortizare

Pentru a putea aborda investigația aplicației `contact_task`, a fost necesară determinarea - în prealabil - a caracteristicii submodulului de amortizare (în fapt. `ssbmeM/amort` conform studiului de structură de la subcapitolul 4.1.3.4). Aceasta constă în variația coeficientului de amortizare funcție de valorile rezistenței hidraulice de tip drosel inserate în circuitul de fluid al submodulului, posibil de modificat prin motorul MPP.

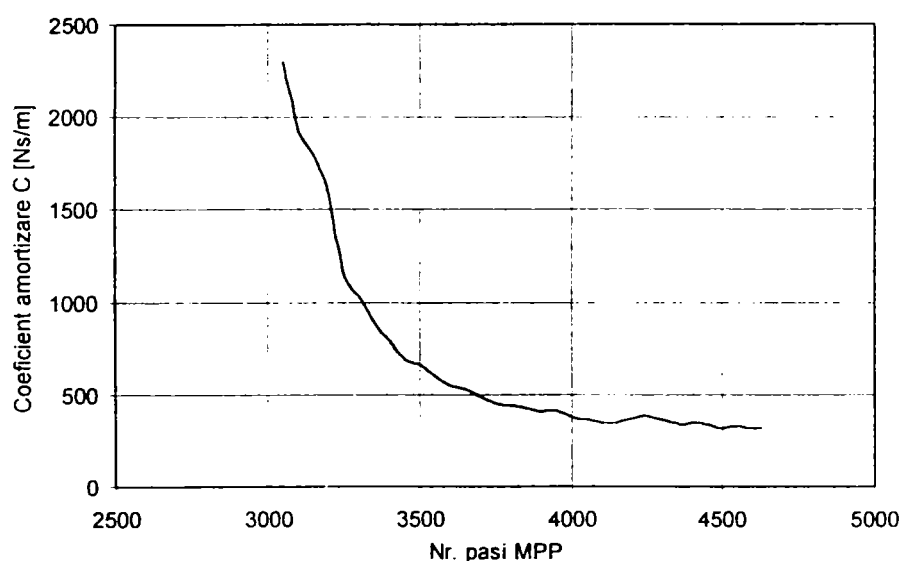


Fig. 4.69 Variația experimentală a coeficientului de amortizare ( $C$ ) funcție de nr. de pași la MPP (este reprezentat domeniul utilizabil în aplicație)

Determinările experimentale au fost efectuate cu standul auxiliar după metodologia și algoritmul expuse la subcapitolul 4.7, fiind prezentate în figura 4.69. Se apelează la această variație determinată după modul amintit mai sus în cadrul experimentărilor “on\_line” ale aplicației propriu-zise.

#### 4.10.4.2 Tipuri de experimente, desfășurarea și conducerea lor

Cu ajutorul standului pot fi efectuate două tipuri de experimente:

- A. Experimente pentru efectuarea analizei dinamice a modulului **mI\_IU** (=identificarea subsistemelor componente). Operațiile care se desfășoară sunt următoarele:
- a) se pornește procedura soft “Experiment-real”;
  - a) se dispune standul în poziție “acasă”;
  - b) se descarcă forța preconizată ( $F_p=F_2$ ; talerul trebuie să fie gol);
  - c) se scoate din poziție corpul modulului **mI\_IU** cât permite sistemul;
  - d) se eliberează brusc, aplicându-se astfel un semnal treaptă în timp ce:
  - e) se înregistrează semnalele traductoarelor cu procedura soft de urmărire;
  - f) se prelucrează semnalele obținute, în vederea identificării propriu-zise (după procedura expusă la subcapitolul 4.10.5).
- B. Investigații experimentale ale aplicației “contact-task” propriu-zise. Acestea se desfășoară astfel:
- b) se pornește procedura soft “Experiment-real”;
  - c) se dispune standul în poziție “acasă”;
  - d) se stabilește tipul de încărcare a forței perturbatoare prin setarea parametrilor generatorului de forță GF;
  - e) se stabilește valoarea încărcării cu forța preconizată  $F_p$  și se dispune contragreutatea corespunzătoare pe taler;
  - f) se alege tipul de conducere dorit al aplicației;
  - g) se apasă butonul “Read ports” al interfeței procedurii;
  - h) se pornește generatorul de forță;
  - i) procedura soft conduce procesul și înregistrează în fișiere informațiile provenite de la traductoare, afișând totodată – în timp real – evoluția acestora;
  - j) după expirarea timpului de investigare ales se opresc (hard și soft) toate sistemele;
  - k) se culeg, se prelucrează și se interpretează datele experimentale.

Procedura soft de urmărire și conducere a investigațiilor (“Experiment\_real”, subcapitolul 4.8.2. figura 4.40) scrisă – în varianta finală – în limbajul **VISUAL BASIC 6.0** (fișierul act\_online.exe, tabelul 4.3) se poate activa de la butonul “Proces ON-Line” al interfeței **SOFMINT\_AC-T** (figura 4.39).

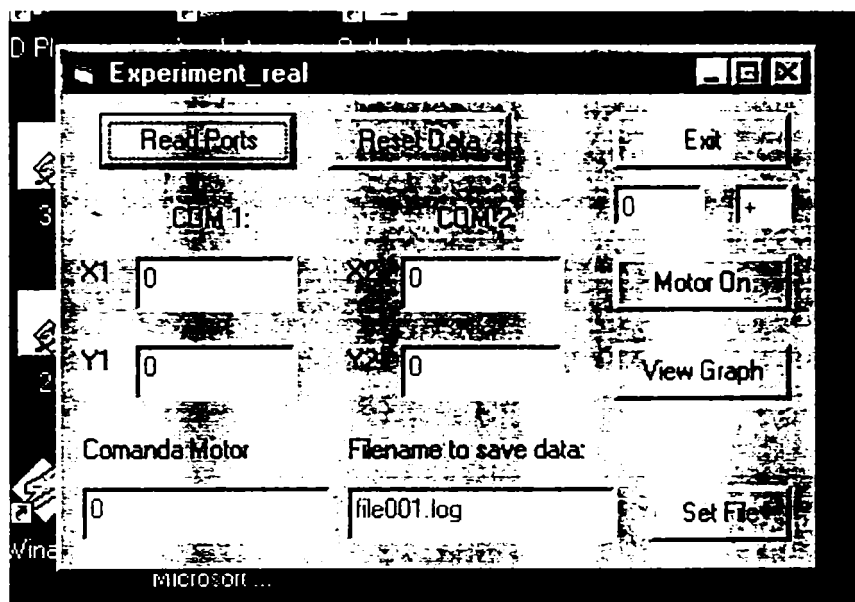
Prin fereastra de dialog inițială (neprezentată) se pot alege patru moduri diferite de lucru:

- ◇ urmărirea/monitorizarea simplă (lucrează doar partea de înregistrare/afișare a semnalelor de la traductoare); cu această modalitate este pus în lucru submodulul de modificare adaptivă a masei reduse (cu auto-compensare);
- ◇ conducere inteligentă singulară:
  - ✓ cu submodulul de amortizare activ, sau
  - ✓ cu submodulul de elasticitate activ;
- ◇ conducere inteligentă combinată, cu ambele submodule active.

La intervale determinate de timp, procedura înregistrează semnalele provenite de la traductoare, calculează valorile necesare comenzilor și le transmite la MPP/actuatorul Ck. În fiecare din cazurile de conducere inteligentă, se poate opta pentru legile de conducere relevante la subcapitolul 4.9.2.2 sau legi de tip “fuzzy” simplificat.

În prima situație, pentru **sbmulamort**, procedura calculează valoarea  $C_{nec}$  (relația 4.31, pagina 231), comanda efectivă de la MPP rezultând prin interpolare din datele diagramei din figura 4.69. Pentru **sbmul elast**, se calculează valoarea  $x_3$  (relația 4.32/33), care devine comandă la actuator.

Experimentul se desfășoară sub controlul interfeței de lucru a procedurii. Pentru cazul conducerii submodulului de elasticitate aceasta este prezentată în figura 4.70.



**Fig. 4.70 Interfața procedurii “Experiment\_real”**

- ◇ Interfața are – în partea stângă jos - plasate căsuțe de editare pentru:
  - ◆ afișarea în timp real a
  - ✓ semnalelor traductoarelor de la cele două porturi seriale active;
  - ✓ comanda motorului de la actuator;
  - ◆ afișarea identificatorului de fișier pentru stocarea datelor (poate fi modificat de utilizator) și alături butonul de setare fișier pentru înregistrare.
    - ◇ În partea superioară se află butoanele de comandă pentru gestiunea experimentului:
      - ◆ citirea porturilor;
      - ◆ resetarea de date.
        - ◇ În partea dreaptă, de sus în jos se află butoanele de:
          - ◆ ieșire din procedură;
          - ◆ manevrarea tijei actuatorului (în afara experimentului, inclusiv pentru dispunerea în poziția “acasă” a acestuia) funcție de setările din căsuțele de editare de deasupra acestui buton pentru:
            - numărul de pași de executat;
            - sensul deplasării;
    - ◆ afișarea grafică în timp real, pe un panou suplimentar, a evoluției semnalelor provenite de la traductoare.

Fișierele de date rezultate pot fi utilizate – pentru prelucrări – în mediile soft **MATLAB** sau **EXCEL**.

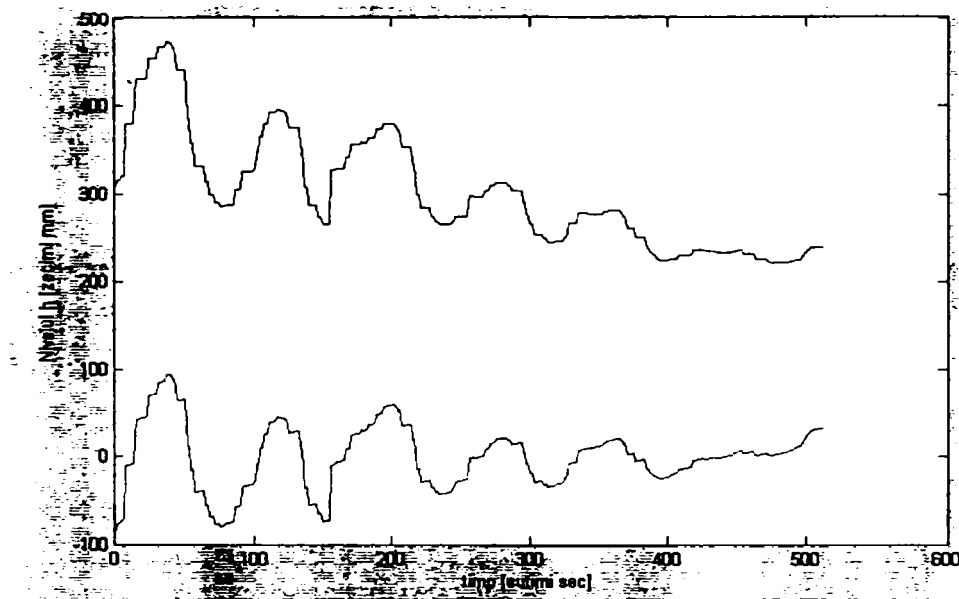
**Observații**

Dacă se dorește efectuarea unui experiment fără auto-compensare, trebuie efectuată o manevră manuală de către utilizator: demontarea incintei INm și (eventual, dacă se dorește o comparație în aceleași condiții de masă redusă, în mișcare) dispunerea unei contragreutăți echivalente pe suportul INm.

Operațiile pentru dispunerea în poziție “acasă” a standului nu sunt automatizate.

### 4.10.5 Analiza dinamică experimentală a submodulelor/modulului mI\_IU

este necesară în vederea identificării (funcționale) a sistemului **mI\_IU**, a subsistemelor componente și în final a aplicației în sine. Considerentele teoretice care stau la baza operațiilor necesare au fost expuse în cadrul subcapitolului 2.6. În urma identificării se



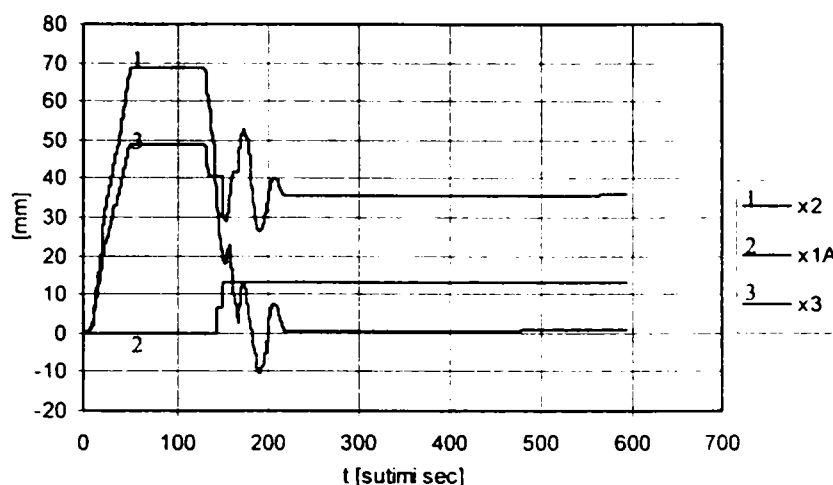
**Fig. 4.71 Comportamentul submodulului/masă cu fluid de auto-compensare (sus-înălțimea  $h$  din incinta INm, jos-semnalul filtrat)**

poate constata – printre altele - dacă (sub)sistemele se află sau nu în rezonanță, respectiv care regim dinamic trebuie evitat în timpul investigațiilor experimentale pe stand.

Experimentele realizate pentru analiza dinamică au avut drept scop evidențierea răspunsului acestor (sub)sisteme la un semnal treaptă.

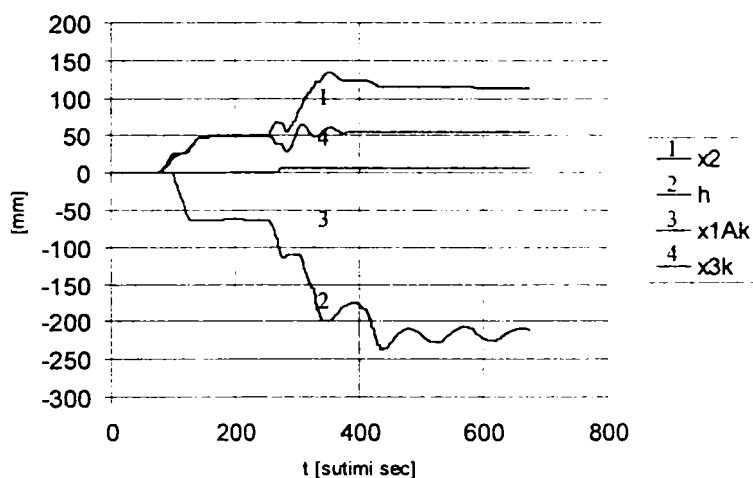
Identificarea experimentală trebuie efectuată îndeosebi pentru submodulul de masă (în fapt pentru **ssbmeM/masă** modificat în conformitate cu cele expuse la subcapitolul 4.9.2.2 C, unde s-a efectuat o modelare teoretică simplificată).

În cazul subsistemului adaptiv (**ssbmeM/masă**), acesta a fost scos din echilibru și, la momentul “0” a fost eliberat urmărindu-se variația în timp a nivelului  $h$  din incinta INm. Pentru a elimina componentele de ordin 0 (dezaxarea) și respectiv 1 (deriva cu viteză constantă), s-a aplicat un filtru corespunzător cu ajutorul funcției *dtrend* din **MATLAB**. În figura 4.71 este prezentat graficul aferent măsurătorilor (în partea superioară) și respectiv cel cu rezultatele filtrării (în partea inferioară). Aceste date pot fi utilizate pentru identificarea structurii și parametrilor sistemului.



**Fig. 4.72 Semnal treaptă aplicat modulului mI\_IU, fără fluidul de auto-compensare**

utilizat două metode, ambele bazate pe regresia neliniară. În prima metodă, se încearcă stabilirea parametrilor unei funcții clasice care descrie comportarea unui sistem de ordinul doi, exprimată sub formă de armonică amortizată. A doua metodă încearcă stabilirea parametrilor funcției complexe (MATLAB) *step*, care descrie răspunsul unui sistem la semnale treaptă.



**Fig. 4.73 Semnal treaptă aplicat modulului mI\_IU, cu fluidul de auto-compensare**

Prima funcție are forma:

$$A \sin(\omega(t-t_0))e^{-\beta t} \quad (4.38)$$

Pentru determinarea valorilor parametrilor funcției, a fost utilizată funcția *uifit* creată de Jean-Michel Rousseau pentru mediul MATLAB. Au rezultat valorile:  $A=100$ ;  $\omega=9$ ;  $t_0=0,25$ ;  $\beta=0,4$ . Ținând cont de rezoluția traductorului de deplasare, rezultă ecuația mișcării:

$$y(t) = 0,00648 \sin(9(t-0,25))e^{-4t} \quad (4.39)$$

A doua funcție are forma:

$$y(t) = \text{step}([p_1], [p_2 \ p_3 \ p_4], t) + p_5 \quad (4.40)$$

pentru care valorile parametrilor sunt:  $p_1=98,28$ ;  $p_2=0,0127$ ;  $p_3=0,0134$ ;  $p_4=1$ ;  $p_5=-99,1$ . Rezultă funcția de transfer (de excentricitate -99,1):

$$h(s)=(98,28/(0,0127s^2+0,0134s+1)) \quad (4.41).$$

În mod similar s-a efectuat analiza dinamică experimentală a modului  $mi\_IU$  în două variante: cu submodulul/masă și respectiv fără acesta, pentru a se vedea modalitatea în care auto-compensarea interacționează cu celelalte subsisteme ale aplicației în ansamblu.

În figura 4.72 sunt prezentate evoluțiile deplasărilor înregistrate de traductoare la aplicarea unui semnal treaptă (în modalitatea expusă anterior) asupra  $mi\_IU$  pentru situația în care submodulul  $sbmeM/masă$  aferent a fost înlocuit cu o masă echivalentă rigidizată de ansamblu. Se analizează mărimea-deplasare  $x_2$ . Utilizând forma a doua de ecuație, dar cu 4 parametri:

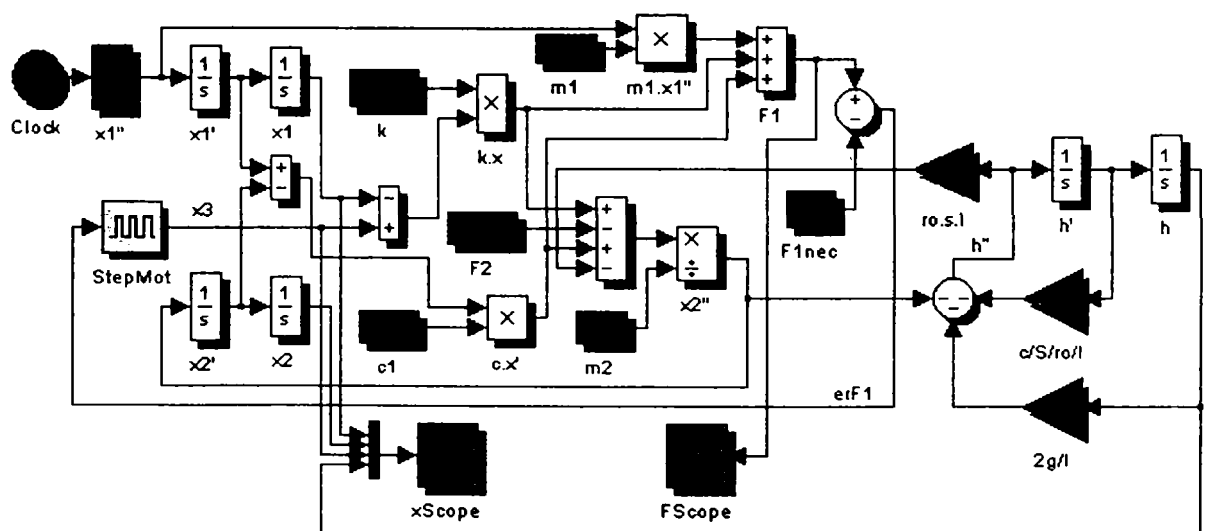
$$y(t) = step([p_1],[1 p_2 p_3],t)+p_4 \quad (4.42)$$

au rezultat - prin utilizarea funcției *uifit* - următoarele valori ale parametrilor:  $p_1=3405,783$ ;  $p_2=3,8375$ ;  $p_3=224,4146$ ;  $p_4=-15,2703$ .

În figura următoare, 4.73 se prezintă situația în care acționează și fluidul de auto-compensare. Pentru același tip de ecuație, funcția calculează următoarele valori ale parametrilor:  $p_1=3687,2121$ ;  $p_2=3,9889$ ;  $p_3=260,9979$ ;  $p_4=12,6089$ .

În urma rezultatelor obținute, poate fi efectuată modelarea subsistemelor reale cu ajutorul pachetului **MATLAB/SIMULINK** și verificarea acestora, în relație cu modelul teoretic.

Astfel, în figura 4.74 submodelul de masă adaptiv este inclus în simulatorul modului interfață inteligent – cu parametrii rezultați în urma acestei modelări - în situația funcționării unui regulator de tip clasic pentru actuatorul  $C_k$ .



**Fig. 4.74 Simulator al modului  $mi\_IU$  cu submodulul de masă (blocurile din partea dreaptă) atașat celui de elasticitate, în varianta clasică de reglare.**

### 4.10.6 Estimarea comportamentului și limitelor aplicației contact-task prin simulare cu parametrii efectivi ai standului

Cu ajutorul simulatoarelor realizate sub mediul **SIMULINK/MATLAB** poate fi estimat acest comportament pentru a evalua limitele sistemului înaintea efectuării experimentelor propriu-zise, dacă se utilizează parametrii reali, efectivi ai standului (subcapitolul 4.10.3) conform cu “schema” de experimentare (subcapitolul 4.10.7.1).

Odată ce modelul simulatorului a fost conceput, tehnica obiectelor de tip bloc funcțional implementată în pachetul **SIMULINK** permite setarea tuturor parametrilor din model într-un mod foarte simplu, prin dublu-click asupra blocului și înscrierea noii valori a parametrului său funcțional în căsuța de editare corespunzătoare. După validarea acesteia, ea devine vizibilă în schema modelului.

Sunt disponibile cele 3 simulatoare prezentate la subcapitolele 4.9 și 4.10, care pot fi utilizate pentru estimarea comportamentului fiecăruia din submodulele/parametri. **Interesează în primul rând restricțiile** (combinațiile de parametri incompatibili funcțional) pentru a se constata cu care parametrii nu se pot efectua experimente.

S-au efectuat simulările pentru cele două tipuri de încărcare: semnal treaptă și continuu variabil (sinusoidal), încărcări la care se preconizează a fi supus modulul **mi\_IU** în cadrul încercărilor pe stand.

În cazul semnalului treaptă, acesta se aplică – printr-un impuls mecanic - cu generatorul de forță GF de pe stand. În realitate impulsul nu poate fi instantaneu ci va genera un semnal pseudo-treaptă. Din această cauză modelul acestuia poate fi de formă

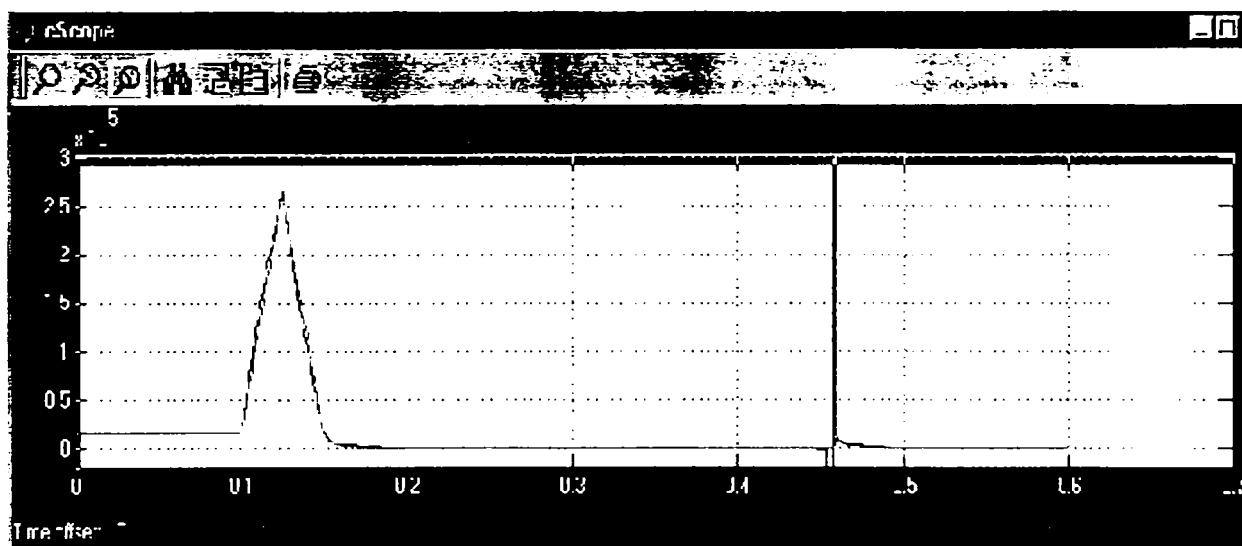


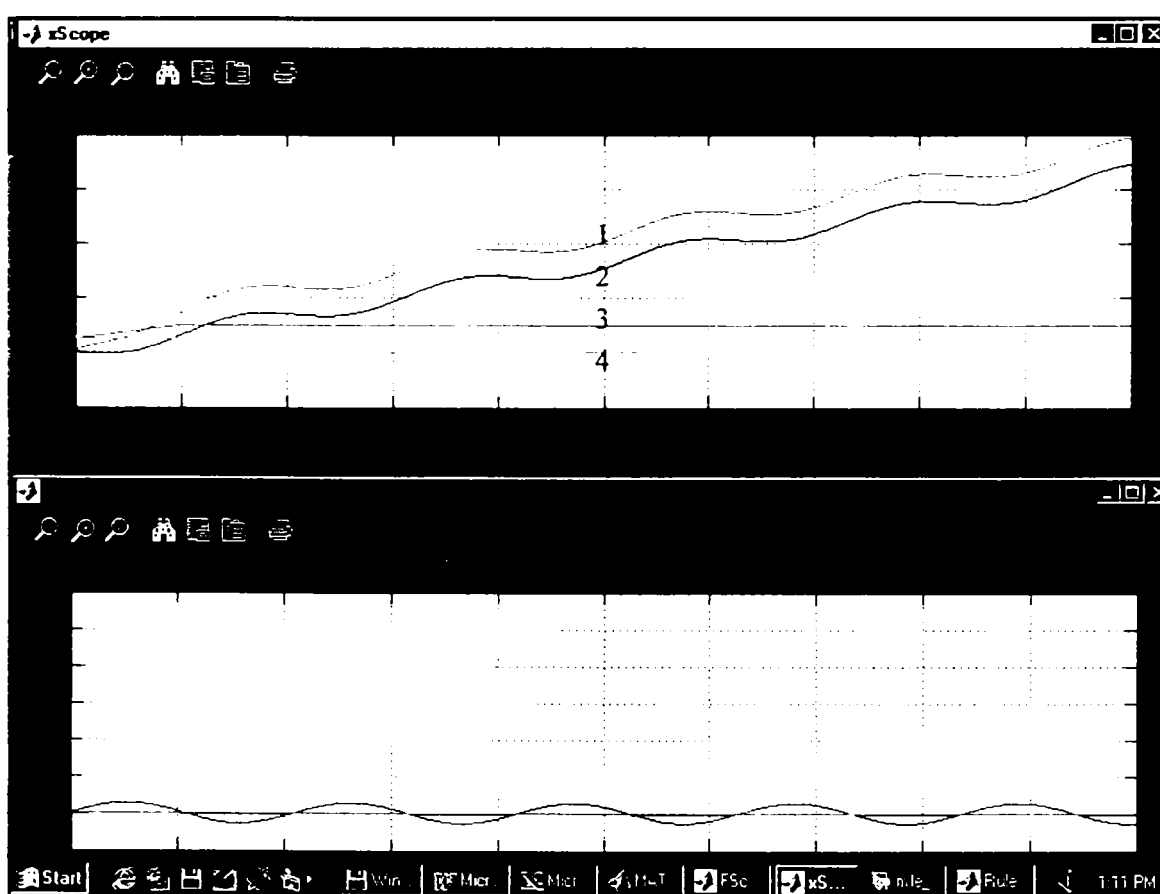
Fig. 4.75 Variația optimă a coeficientului de amortizare pentru conducere

armonică, în maniera prezentată la simulatorul *submodulului de amortizare* din figura 4.62, pagina 236, dar cu amplitudinea egală cu jumătate din cursa pârghiei (=11,5 respectiv 5 mm), în timp de o jumătate de secundă. Cu notațiile utilizate în mediul **MATLAB**, o posibilă expresie a semnalului devine:  $11,5 * \cos(4 * \pi * u) * (u(1) > 0.1) * (u(1) < 0.5)$  reprezentând în fapt pseudo-treapta cu care se încearcă apropierea de realitate. La aplicarea acesteia (încărcare cu valoarea medie a forței  $F_p=12$  N) comportamentul sistemului este pentru ambele curse calitativ similar cu cel prezentat deja în figura 4.63 de la pagina 237.



Analiza diagramei din figura 4.75 privind coeficientul de amortizare necesar relevă însă faptul că valoarea necesară a acestuia – pentru un reglaj optim în conformitate cu legea enunțată la subcapitolul 4.9 - depășește ordinul miilor, fiind un prim avertisment asupra modului de armonizare a parametrilor modulului cu ceilalți parametri ai standului. Avertisment care – dat fiind faptul că sistemele fizice reacționează mai lent/diferit decât se preconizează teoretic (semnal-treaptă “pur” nu există în natură, există frecări suplimentare datorită soluției constructive, etc) – poate fi contrazis de realitate.

Al doilea indiciu negativ poate fi însă și intervalul de timp foarte mic (o sutime de secundă) în care trebuie să reacționeze motorul MPP pentru a realiza reglajul. Elementul de execuție implementat (droselul) trebuie să parcurgă 3 turații complete pentru a acoperi domeniul de variație utilizabil (diagrama din figura 4.69) prin intermediul unui reductor cu raport de transmitere 4 (interpus pentru momentul de torsiune necesar). Chiar dacă presupunem că timpul real disponibil este de 3-4 ori mai mare, la submodulul de amortizare componentele existente nu fac față dinamicii cerute. Situația nu se schimbă semnificativ nici dacă se micșorează amplitudinea semnalului.



**Fig. 4.76** Submodulul de elasticitate în situația încărcării cu cursa pârghiei de 11,5 mm, la 56 curse duble la GF

Din păcate această estimare s-a dovedit reală, astfel că trebuie înlocuită acționarea pentru ca submodulul să funcționeze.

Estimarea comportamentului sistemului la același semnal treaptă pentru *submodulul de elasticitate* se poate efectua cu ajutorul simulatorului din figura 4.74, în prezența submodulului de masă, la care (după cum se observă) s-au efectuat setările cu parametrii reali de pe stand (după legea de reglare de la subcapitolul 4.9), sau cu cel “fuzzy” din figura 4.64, pagina 237, cu aceiași parametrii. Pentru cei setați, chiar în situația măririi intervalului de timp al semnalului pseudo-treaptă, simulatoarele oferă

indiciul că nici submodulul de elasticitate n-ar trebui să funcționeze (e vorba de frecvențele și amplitudinile utilizate). Ceea ce în realitate nu se întâmplă, pentru că s-a dovedit prin experiment că acesta funcționează (se pot consulta în acest sens diagramele de la subcapitolul următor).

Pentru un semnal de tip armonic, rămâne să se estimeze doar comportamentul submodulului de elasticitate dat fiind faptul că cel de amortizare nu este compatibil. Dacă utilizăm simulatorul de tip “fuzzy” pentru *ssbm/elastic* și introducem parametrii de mișcare reali conform “schemei” de experimentare, se obțin diagramele din figura 4.76 la care în partea de sus sunt reprezentate semnalele deplasare: 1- la GF ( $x1A$ ), 2- la ieșire ( $x2$ ), 3 și 4 fiind semnalele necesare și respectiv cel executat de actuator (cursa GF=11,5; nr. curse duble=75). Sistemul este deci instabil pentru cursele și frecvențele mai ridicate de pe stand.

Pentru frecvențe și curse mai mici, sistemul devine stabil.

O influență foarte mare este exercitată de diferența forțelor  $F1$  și  $Fp$ . Dacă aceasta este mică, și situațiile de instabilitate, chiar peste limita figurată mai sus, redevin stabile, forțele tinzând să se echilibreze reciproc.

Prezența submodulului de masă îmbunătățește în general evoluția modulului. Restricția o reprezintă apropierea frecvenței oscilațiilor proprii de cele ale modulului *mi\_IU*, la aproximativ 90 de curse-duble apărând semne de rezonanță.

## 4.10.7 Determinări experimentale ale aplicației propriu-zise pe stand

### 4.10.7.1 Scop și caracteristici

Există mai multe “scheme” de experimentare posibile în cazul unor astfel de aplicații. Explicațiile expuse în continuare fac uz de notațiile din soluția constructivă, respectiv din schema de la figura 4.57, pagina 229.

Dacă se ia în considerare faptul că aplicația de la care s-a pornit pentru modelare este spre exemplu o suspensie inteligentă a unui autovehicul, atunci neregularitățile căii de rulare induc forța de contact  $F1$ , nedorită (=generatorul de forță GF al standului), greutatea autovehiculului este forța preconizată (simulată prin contragreutatea constantă de pe taler), iar deplasările pe verticală (=x2 din cadrul standului) sunt cele care produc disconfortul pasagerilor. Analogia cu standul este perfectă, dacă acesta se dispune pe verticală. Mărimea țintă de monitorizat (și condus) pe stand este în acest caz deplasarea  $x2$ , iar cauza de producere a acesteia este mișcarea alternativă a pârghiei (provenită de la vibratorul mecanic) care se traduce în final printr-un semnal de forță datorat deformării arcului  $Afm$ .

Cea mai simplă schemă posibilă de urmărire a comportamentului aplicației ar fi deci urmărirea evoluției în timp a mărimilor forță ( $F1$ ) și deplasare ( $x2$ ), pentru o forță preconizată  $Fp(=F2)$  constantă. În continuare se prezintă modalitățile prin care pot fi modificate aceste mărimi precum și parametrii utilizați în timpul funcționării standului.

#### A. Modificarea valorii forței preconizate $Fp=F2$

se poate efectua în trepte, prin dispunerea de contragreutăți de masă diferită pe taler, tensionând astfel firul inextensibil legat de căruciorul mobil CM. S-a lucrat cu 3 valori diferite de masă la stand: 0.71/1,25/1.96 kg.

**B. Posibilitățile de modificare a parametrilor forței F1**

Derivă din modul de funcționare al generatorului de forță GF al standului, putând fi modificată mărimea forței, frecvența de aplicare a acesteia și tipul de semnal.

În tabelul 4.19 se prezintă sintetic legătura dintre parametri care intervin din punctul de vedere al mărimii forței generate. La nivelul pârghiei există mai multe puncte de legătură cu vibratorul; în timpul experimentului au fost utilizate doar cele două valori specificate ale cursei (pentru o diferență relevantă a reacțiilor sistemului).

**Tabelul 4.19**

Elementul sursă (=mediu)	Mărime	Posibilit. de modificare	Elem. Măs./ Mijloc măs.	Mărimea măsurată	Parametru fizic transmis
Pârghie (la punctul caracteristic)	Cursă:	Puncte de legătură diferite cu vibratorul	Arcul Afm ( $k=3,12 \text{ N/mm}$ )	Deformația arcului: $\times 1Ak$	Amplitudine forță
	23 mm 10 mm		Traductor: abscisă COM2 (tab.4.16)		

Pot fi aplicate două tipuri de încărcare cu forța F1: cu semnal pseudo-treaptă și semnal continuu variabil, sinusoidal.

Pentru cel de-al doilea caz, frecvența poate fi modificată prin variația tensiunii de alimentare a motorului electric monofazat de acționare a vibratorului mecanic. Limita inferioară a acesteia (cu componentele electrice disponibile pe stand) depinde de valoarea de "încărcare" a forței preconizate (deci de contragreutate).

Pentru cea mai mică contragreutate (7,1 N) motorul de pe stand a putut fi pus în mișcare stabilizată fiind alimentat cu 90 V de la autotransformator, rezultând cea mai coborâtă limită de frecvență, corespunzătoare la 52-54 de curse duble/min la pârghie. Limita maximă a fost impusă de oscilația apei din incinta *INm*. La configurației acesteia, volumul utilizat de fluid a intrat în instabilitate (pentru aceeași contragreutate) la 90 curse duble/min. Cea mai des utilizată valoare pentru frecvență a fost cea corespunzătoare la 65 curse duble/min.

**C. Caracteristicile de impedanță și tipuri de experimente. Pe stand se disting:**

- a) pentru elasticitate, arcurile AEL de caracteristică  $k=1,18 \text{ N/mm}$ ; există două situații distincte:
  - ✓ este activ submodulul de elasticitate și actuatorul deformează suplimentar arcul AEL funcție de comanda rezultată în urma informațiilor de la traductoare;
  - ✓ nu este activat submodulul de elasticitate (parametrul  $k=\text{constant}$ ), actuatorul Ck nu primește nici o comandă;
- b) pentru parametrul-amortizare există 2 situații distincte:
  - ✓ utilizarea dependenței coeficientului de amortizare de deschiderea comandată a droselului din circuitul cilindrului Cc, dacă funcționează submodulul de amortizare (conducere inteligentă a acestui parametru); valorile coeficientului de amortizare (pentru componentele concrete ale submodulului, graficul din figura 4.69 de la pagina 245) se pot situa între valorile 400 și 2500 Ns/m; din păcate, valorile sunt mari față de ansamblul celorlalți parametri, rezultând incompatibilități funcționale;
  - ✓ utilizarea unor valori (constante) mai mici, compatibile cu restul parametrilor; s-a lucrat cu valorile de 150 și 300 Ns/m;
- c) pentru parametrul masă, în tabelul 4.18 este prezentată repartiția acestuia în varianta cea mai des utilizată:  $m_1=0,24 \text{ kg}$ /  $m_2=13,475 \text{ kg}$ /  $m_3=1,5 \text{ kg}$ ; există deasemenea două situații distincte:

- ✓ această ultimă valoare reprezintă masa standard a fluidului când lucrează submodulul adaptiv (incinta  $INm$  fiind fixată pe căruciorul mobil);
- ✓ dacă se lucrează fără acest submodulul, incinta se îndepărtează și în locul acesteia se dispune o masă (de aceeași valoare) rigidă, fixată de căruciorul mobil.

### 4.10.7.2 “Scheme” de investigație și rezultate

În contextul celor expuse, s-a procedat la aplicarea unei “scheme” de investigare experimentală prin punerea în funcție a standului realizat, expusă în continuare. Experimentele se desfășoară după modul explicat la subcapitolul 4.10.4.

- A. Funcționarea standului cu submodulele de elasticitate, masă și amortizare active pe rând la 3 încărcări cu forța  $F_p$  și respectiv sub acțiunea a 2 evoluții diferite ale forței  $F_1$  impuse prin cursa pârghiei generatorului de forță  $GF$ , așa cum a fost expus în subcapitolul 4.10.6.1. La fiecare din cele două poziții ale pârghiei pot fi aplicate două tipuri de încărcare (treaptă și semnal sinusoidal). Din păcate, la aceste încercări s-a constatat că submodulul de amortizare, prin natura componentelor avute la dispoziție nu își armonizează valorile parametrilor cu celelalte subsisteme. Cu acestea, din cele 36 seturi posibile (diferite) de date, pot fi realizate 24.
- B. Funcționarea standului cu parametrii de impedanță mecanică constanți, pentru a se putea compara funcționarea submodulelor/parametru cu datele rezultate (alte 12 seturi posibile).

#### **Concluzie**

*A rezultat un număr total de 46 de seturi de date achiziționate. Din considerente de depășire a limitelor funcționale, la anumite combinații de parametrii, îndeosebi la încărcarea cu forța maximă  $F_p$ , există și seturi de date care nu au relevat rezultate concludente, valoarea acesteia reprezentând limita superioară de funcționare stabilă din punctul de vedere al acestei forțe. Cu seturile disponibile, s-au efectuat reprezentările grafice pentru analiză. Având în vedere că ordinul de mărime al valorilor (numeric) este aproximativ același s-au putut prezenta de cele mai multe ori în același grafic atât mărimile de tip deplasare cât și cele de tip forță.*

*Fiind rezolvate problemele de principiu privind schema și soluția constructivă, respectiv funcționalitatea și conducerea submodulului de amortizare, acesta poate fi pus în funcțiune fără probleme după achiziționarea unor componente adecvate.*

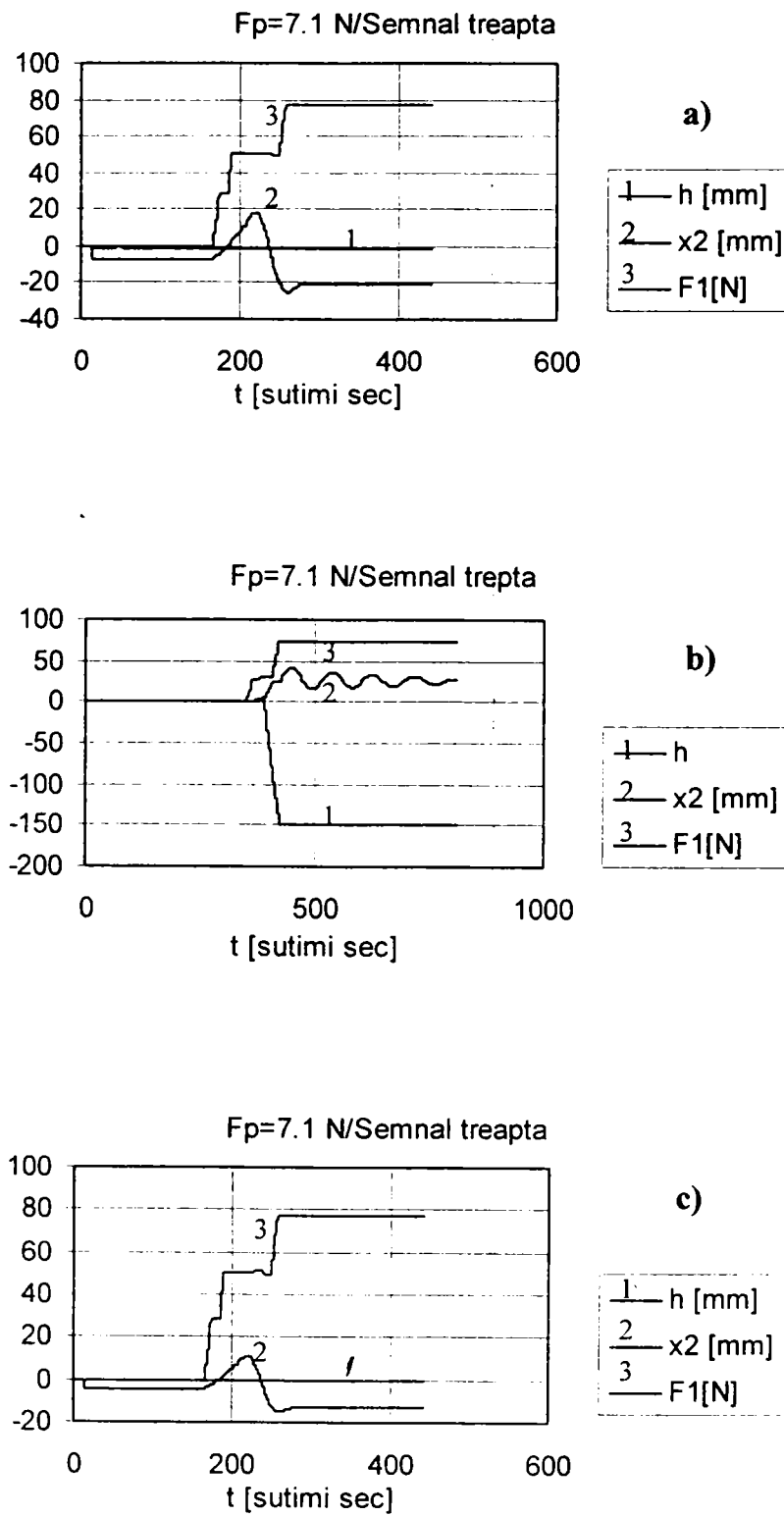
### 4.10.7.3 Reprezentări grafice

În continuare se prezintă reprezentarea grafică a mărimilor semnificative  $F_1$ ,  $x_2$  și  $h$  (conform cu schematizarea enunțată la subcapitolul 4.10.6.1) pentru câteva din seturile de date rezultate.

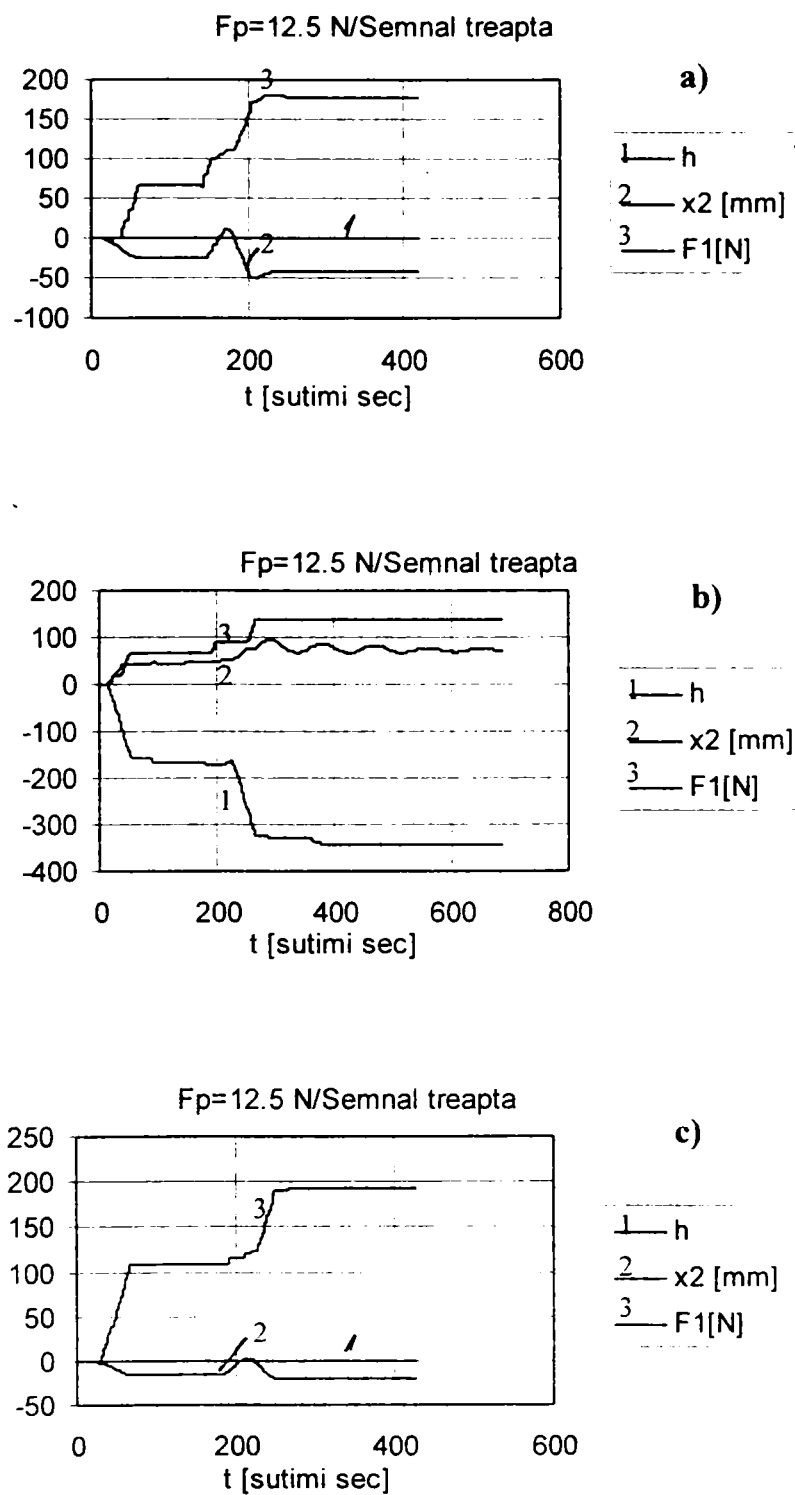
Astfel în figurile 4.77/78 și 81 sunt plasate reprezentările corespunzătoare unei excitații de tip semnal treaptă pentru cursa maximă de 23 mm la pârghia  $GF$  pentru (succesiv) cazul sistemului cu parametrii de impedanță constanți, apoi cu submodulul de masă activat și respectiv submodulul de elasticitate activat pentru câte o încărcare  $F_p$  determinată. În figura 4.81 este prezentat cazul cu forța  $F_p$  maxim, care duce – în unele situații de semnal-treaptă mare – la blocarea submodulului.

În figurile 4.79/80 este relevată reacția sistemului la o amplitudine mai mică de semnal.

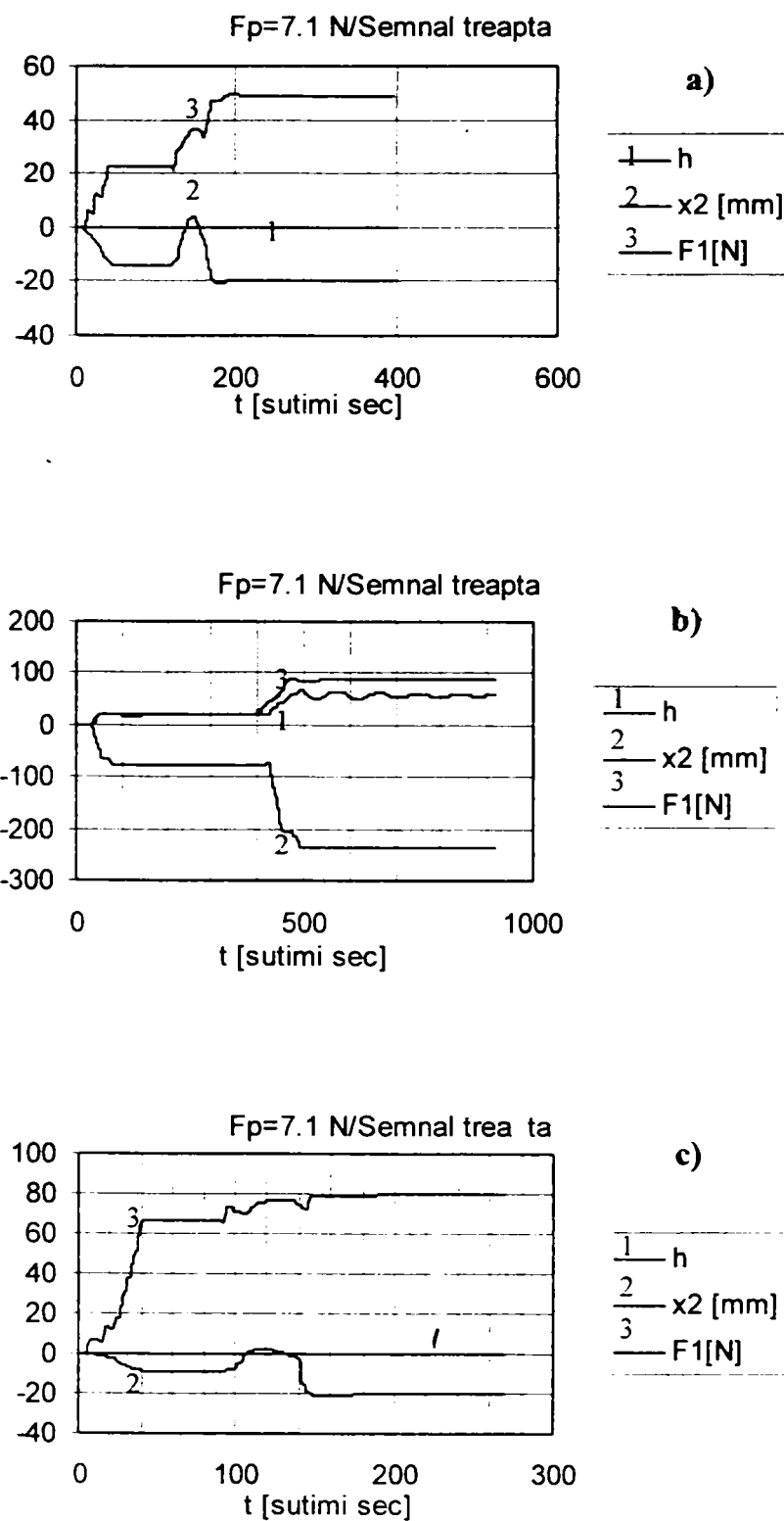
Figurile 4.82 și 4.83 relevă comportamentul sistemului la un semnal sinusoidal.



**Fig. 4.77** Prima valoare a forței de încărcare, cursa la  $GF=23 \text{ mm}$   
**a) parametrii constanți; b) submodulul de masă activ c) submodulul de amortizare activ**



**Fig. 4.78** A doua valoare a forței de încărcare, cursa la  $GF=23 \text{ mm}$  ( $h$ [mm]); a) parametrii constanți; b) submodulul de masă activ c) submodulul de amortizare activ



**Fig. 4.79** Prima valoare a forței de încărcare, cursa la  $GF=10$  mm,  $h$ [mm]; a) parametrii constanți; b) submodulul de masă activ c) submodulul de amortizare activ

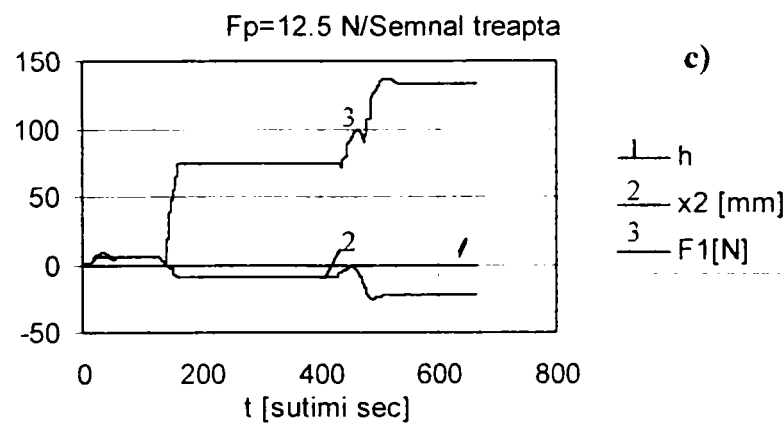
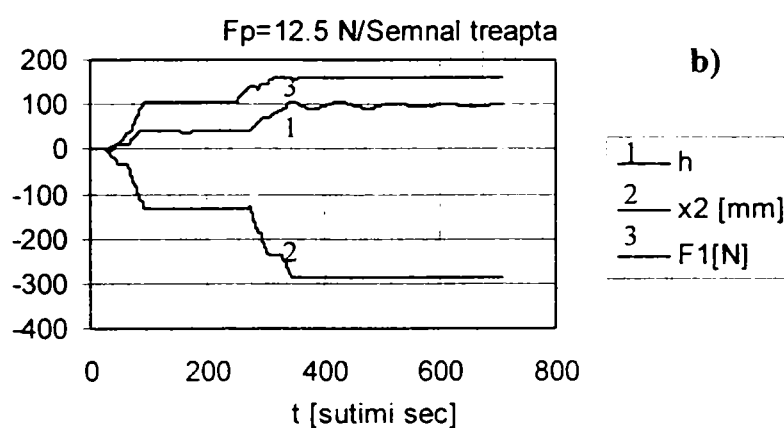
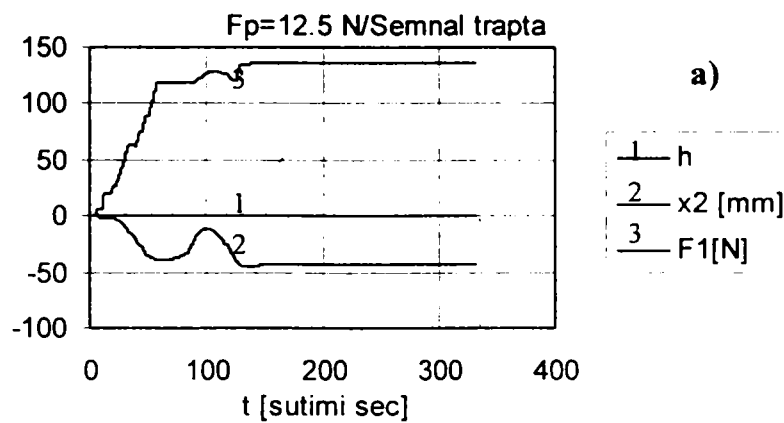
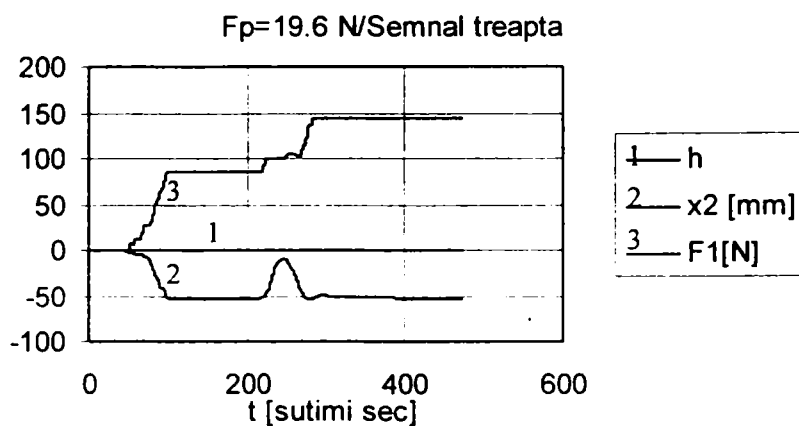
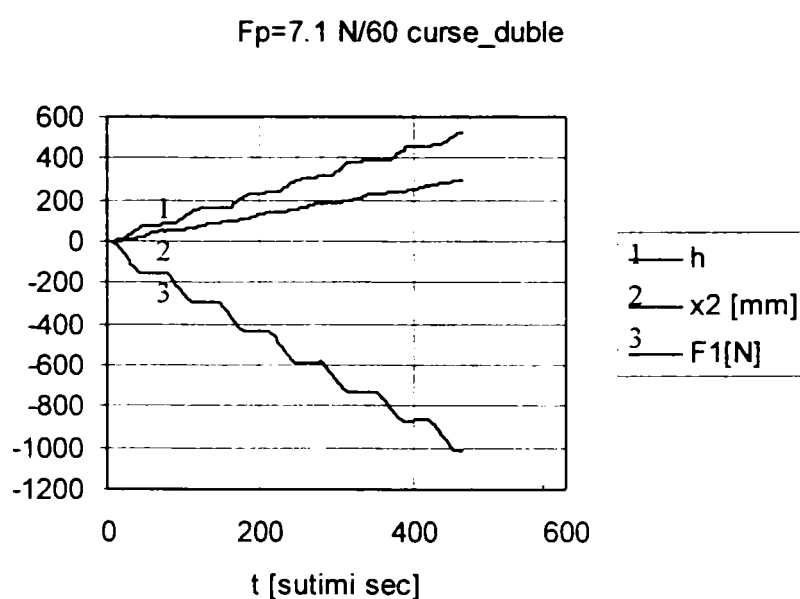


Fig. 4.80 A doua valoare a forței de încărcare, cursa la GF=10 mm, h[mm]; a) parametrii constanți; b) submodulul de masă activ c) submodulul de amortizare activ

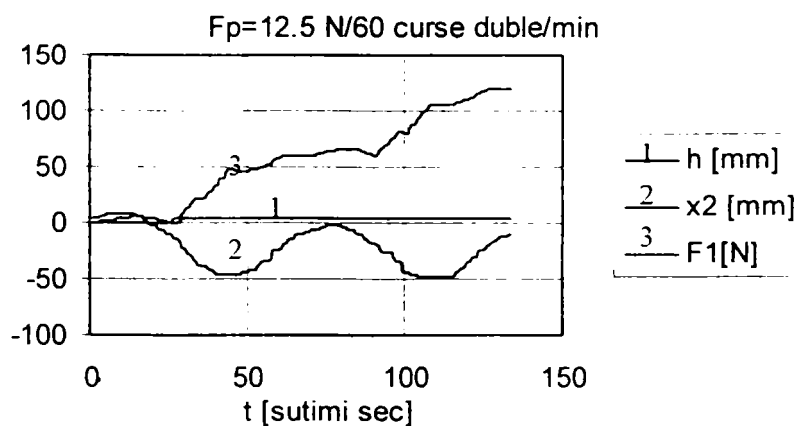




**Fig. 4.81** Cea mai mare valoare a forței de încărcare, cursa la  $GF=23$ ,  $h$ [mm], parametrii constanți; valoarea mare a forței se află la limitele de funcționare a submodulelor



**Fig. 4.82** Pentru cursa la  $GF=23$  mm, parametrii constanți, semnal armonic ; se confirmă previziunea depășirii limitelor stabile de funcționare pentru submodule ( $h$ [mm])



**Fig. 4.83** Pentru cursa la  $GF=23$  mm, parametrii constanți, semnal armonic ; odată cu creșterea forței  $F_p$ , mișcarea începe să se stabilizeze

### 4.10.8 Concluzii

- A. *Cu ajutorul standului cu modulul **mi\_IU** încorporat pot fi efectuate mai multe tipuri de investigații experimentale, la fiecare dintre acestea fiind realizate mai multe seturi de măsurători.*
- B. *Studiul și investigațiile au cuprins conducerea inteligentă a doi dintre parametrii: cel de amortizare și cel de elasticitate și monitorizarea celui inerțial care funcționează pe principii adaptive.*
- C. *Simulările prezentate au oferit posibilitatea relevării comportamentului sistemului în prezența și absența conducerii inteligente. S-a constatat posibilitatea îmbunătățirii acestui comportament relativ la forța de contact.*
- D. *Pentru confirmarea acestei situații s-a recurs la un model de aplicație tip “suspensie inteligentă”, controlul efectuându-se în poziție, parametrul țintă fiind deplasarea  $\times 2$  a corpului **mi\_IU**.*
- E. *Din simulări au fost determinate limitele între care – pentru standul concret – pot fi setați parametrii de intrare pe stand în vederea realizării de experimente în condiții de stabilitate.*
- F. *Tot din simulări au provenit indiciile privind posibilitatea ca submodulul de amortizare să nu facă față sarcinilor de conducere datorită componentelor sale fizice. Această situație a fost confirmată pracic. Au rămas active pentru experimente celelalte două submodule.*
- G. *După cum se observă din setul de grafice prezentat (rezultate în urma experimentelor), în prezența submodulelor inteligente active, comportamentul sistemului s-a îmbunătățit în mod sistematic față de situația martor, cu parametrii constanți, la care aceste submodule nu au fost activate.*
- H. *Seturile de măsurători efectuate pentru studiul aplicațiilor de tip “contact-task” au confirmat posibilitatea de control inteligent al forței de contact prin intermediul impedanței mecanice cu mijloace ale roboticii, controlul fiind efectuat în poziție.*
- I. *Parametrul de elasticitate este cel care – în condițiile date de capacitatea de reacție reală a componentelor utilizate – are cea mai mare eficacitate. Datorită faptului că în literatură nu există referințe asupra unui astfel de control al forței, se poate afirma că este o noutate în domeniu.*
- J. *Eficacitatea acestui parametru relativ la cel de amortizare a fost relevată din simulări în toate situațiile și din posibilitățile de reacție a submodulului aferent.*
- K. *S-a demonstrat că limitele de funcționare depind hotărâtor de armonizarea valorilor parametrilor sistemului cu domeniul de manifestare al forțelor provenite din mediu.*
- L. *În cazul submodulului de amortizare, acesta este funcțional hard și soft, doar acționarea urmând a fi înlocuită cu componente de capacitate portantă mai mare.*
- M. *Nu există referințe bibliografice referitor la utilizarea auto-compensării cu fluid în domeniul roboticii; și din acest punct de vedere se poate afirma că teza de doctorat aduce elemente de noutate în domeniu.*
- N. *Monitorizarea auto-compensării prin simulare și prin experimente a relevat ceea ce era de așteptat: o promptitudine maximă relativ la ceilalți doi*

*parametrii; capacitatea de compensare este însă mică (datorită ponderii scăzute în raport cu masa vehiculată: sub 10%), deci și aportul la controlul general al forței de contact este mic.*

- O.** *La acest submodul (de masă) este necesară modificarea secțiunii “compartimentelor de lucru” pentru a se modifica frecvența de oscilație proprie, aflată în apropierea celei a corpului modulului **mi\_IU**.*

## **5. Modul-interfață inteligent sistem activ - mediu cu 6 grade de libertate ( $L = 6$ ). Studiu, modelare matematică și concepție constructivă ([Kov69], [Kov77a], [Kov92], [Kov97], [Kov98], [Kov99], [Pre01], [Stö01])**

### **5.1 Introducere**

Din punctul de vedere al Teoriei Sistemelor, structurarea unui modul inteligent cu 6 grade de libertate este prezentată în figura 4.1, acronimul utilizat fiind **M\_IIAC\_T**.

Pentru modelare matematică se utilizează metodele cunoscute din Teoria Mecanismelor și respectiv Robotică. Există mai multe modalități de abordare a unui astfel de caz. În lucrare se face apel la modalitatea de lucru cu ajutorul conceptului de “conexiune cinematică” (în continuare – pentru simplificare – “conexiune”). concept introdus începând din anul 1969 de domnul prof. Dr. ing. d. h. c .Francisc V. Kovacs. Metoda este prezentată pe larg în referințele citate în dreptul titlului acestui capitol. O remarcabilă sinteză a metodologiei aplicată la problematica Roboticii este oferită în [Kov99]. În acest context, prezentul capitol nu poate fi tratat fără a apela la considerațiile și modelele matematice ale acesteia. Din această cauză, prezentarea lor este reprodusă (cu permisiunea autorului) în subcapitolele 5.2 și 5.3 (ne mai fiind inclusă la capitolul 3).

### **5.2 Conceptul de conexiune în Teoria Mecanismelor**

#### **5.2.1 Definirea conceptului**

Noțiunea de conexiune permite înțelegerea legăturii - intrinseci - care există între structura mecanismelor, numărul gradelor de libertate ale întregului și ale părților sale componente, fenomenele de mișcare în mecanisme, transformarea / transmiterea mișcării în / prin intermediul mecanismelor, forțele generalizate de intrare / ieșire în / din mecanisme, transmiterea energiei mecanice, efectuarea mai sistematică a calculului de analiză / sinteză a mecanismelor modelând aceste fenomene.

Se înțelege prin **conexiune** un mijloc de modificare a numărului gradelor de

libertate în mișcare relativă a două elemente din componența unui mecanism.

**Conexiunile cinematice** sunt constituite din elemente și cuple cinematice, de regulă asamblate în lanțuri cinematice deschise.

Numărul gradelor de libertate ale unei conexiuni cinematice introduse între două elemente este

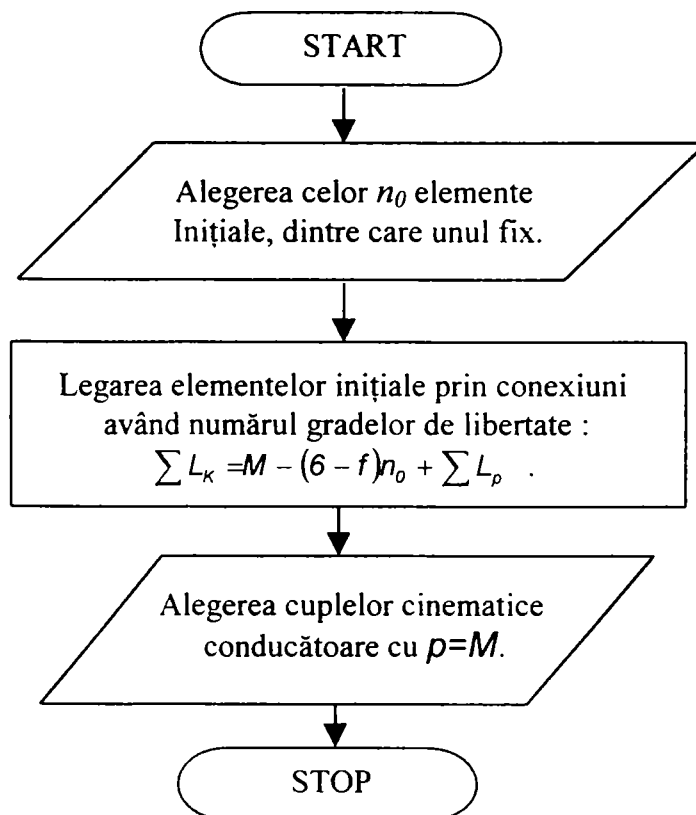
$$L_K = (6 - f)n_K - \sum_{i=f+1}^5 (i - f)c_{i,K} - \sum L_{id} \quad (5.1)$$

unde  $n_K$  este numărul elementelor,  $c_{i,K}$ , numărul cuplurilor cinematice de clasa  $i$ ,  $f$ , familia mecanismului în care se încadrează (practic,  $f = 0$  pentru mecanisme spațiale și  $f = 3$  pentru mecanisme sferice și plane) iar  $L_{id}$  este numărul gradelor de libertate de prisos, introduse în conexiune.

Un mecanism poate fi sintetizat din punct de vedere structural prin legarea între ele a unui număr de  $n_0$  elemente "inițiale", dintre care unul fix, prin intermediul unor conexiuni. Numărul gradelor de mobilitate  $M$  ale unui mecanism a cărei structură a fost simbolizată în acest mod este

$$M = (6 - f)(n_0 - 1) + \sum L_K - \sum L_p \quad (5.2)$$

unde  $\sum L_K$  este suma gradelor de libertate ale conexiunilor introduse iar  $\sum L_p$ , suma gradelor de libertate ale legăturilor pasive rezultate prin introducerea conexiunilor.



**Fig. 5.1** Schema logică a sintezei structurale a unui mecanism, folosind conexiuni

Desmodromia mecanismului sintetizat din punct de vedere structural este asigurată dacă surse de energie mecanică exterioare independente impun în orice moment mișcări relative ale elementelor unor cuple cinematice conținute în mecanism prin  $p$  parametri cinematici (deplasări, viteze sau accelerații generalizate):

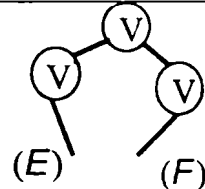
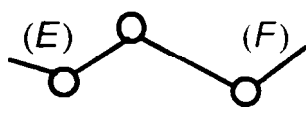
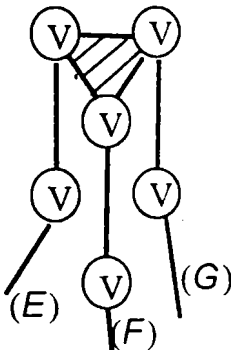
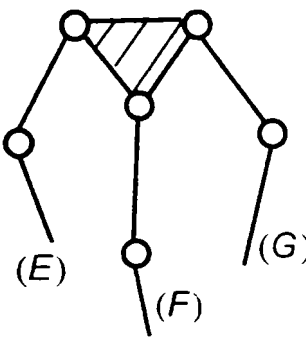
$$M = p \quad (5.2')$$

Sinteza structurală a unui mecanism desmodrom utilizând noțiunea de conexiune se realizează în conformitate cu schema logică din fig. 5.1.

Conexiunile se împart în 3 tipuri. Ele se simbolizează prin litera  $K$ , având ca indice litera care reprezintă tipul conexiunii ( $A$ ,  $B$  sau  $C$ ) și o cifră în paranteză, indicând gradul ei de libertate. Conexiunile de tip  $A$  sunt constituite dintr-o singură cuplă cinematică, cele de tip  $B$ , conțin un element și 2 cuple cinematice, iar cele de tip  $C$  conțin 2 sau mai multe elemente și respectiv 3 sau mai multe cuple cinematice.

Dintre exemplele de conexiuni prezentate în lucrarea menționată, au fost selectate în tabelul următor conexiunile care ajută la modelarea modului specializat cu 6 grade de libertate  $M_{IIAC\_T}$  analizat: două conexiuni  $K_{C(0)}$ . Se poate observa identitatea dintre aceste conexiuni și grupele structurale. De fapt, toate grupele structurale sunt conexiuni  $K_{C(0)}$ .

Tabelul 5.1

Nr. crt.	Tip	$f$	$n_k$	$C_{3k}$	$C_{4k}$	$C_{5k}$	Schema	formula	Schema cinematică	$L$	Simbol
							structurală				
1.	C	3	2	-	-	2		$RRR$		0	$K_{C(0)}$
2.	C	3	4	-	-	6		$RRR$ $RRR$		0	$K_{C(0)}$

Conexiunile posedă și proprietăți remarcabile asupra cărora nu se va insista.

Conceperea mecanismelor ca fiind formate din elemente inițiale legate între ele prin conexiuni permite înțelegerea mai profundă a fenomenului desmodromiei.

Un mecanism este desmodrom dacă fiecare element al său are mișcare determinată, deci, la un moment dat, fiecare element trebuie să aibă o singură situație posibilă. Ca urmare, la un anumit moment dat, legăturile prin conexiuni ale unui anumit element cu alte elemente ale căror situații sunt în acel moment bine determinate trebuie să elimine toate gradele de libertate ale elementului considerat.

### 5.2.2 Constrângeri introduse de conexiuni în mișcarea relativă a elementelor rigide ale mecanismelor cinematice; consecințe

În continuare se descrie **principal** efectul conexiunilor asupra mecanismelor din care fac parte acestea. Modelarea matematică propriu-zisă este prezentată în subcapitolul 5.3 care tratează problema studiului de caz care interesează: modulul  $M_{IIAC\_T}$  cu 6 grade de libertate.

## 5.2.2.1 Constrângeri geometrice

Conexiunile cu numărul de grade de libertate negativ introduc constrângeri privind mișcarea relativă a elementelor între care se interpun.

În cazul unui număr de grade de libertate zero sau pozitiv conexiunile introduc limitări în mișcarea relativă a elementelor între care se interpun.

O conexiune  $K_{C(0)}$ , spre exemplu,  $RRR$  interpusă între elementele ( $E$ ) și ( $F$ ) cu mișcare plană limitează distanța dintre punctele centrale ale cuplelor de rotație de legătură a conexiunii cu cele două elemente.

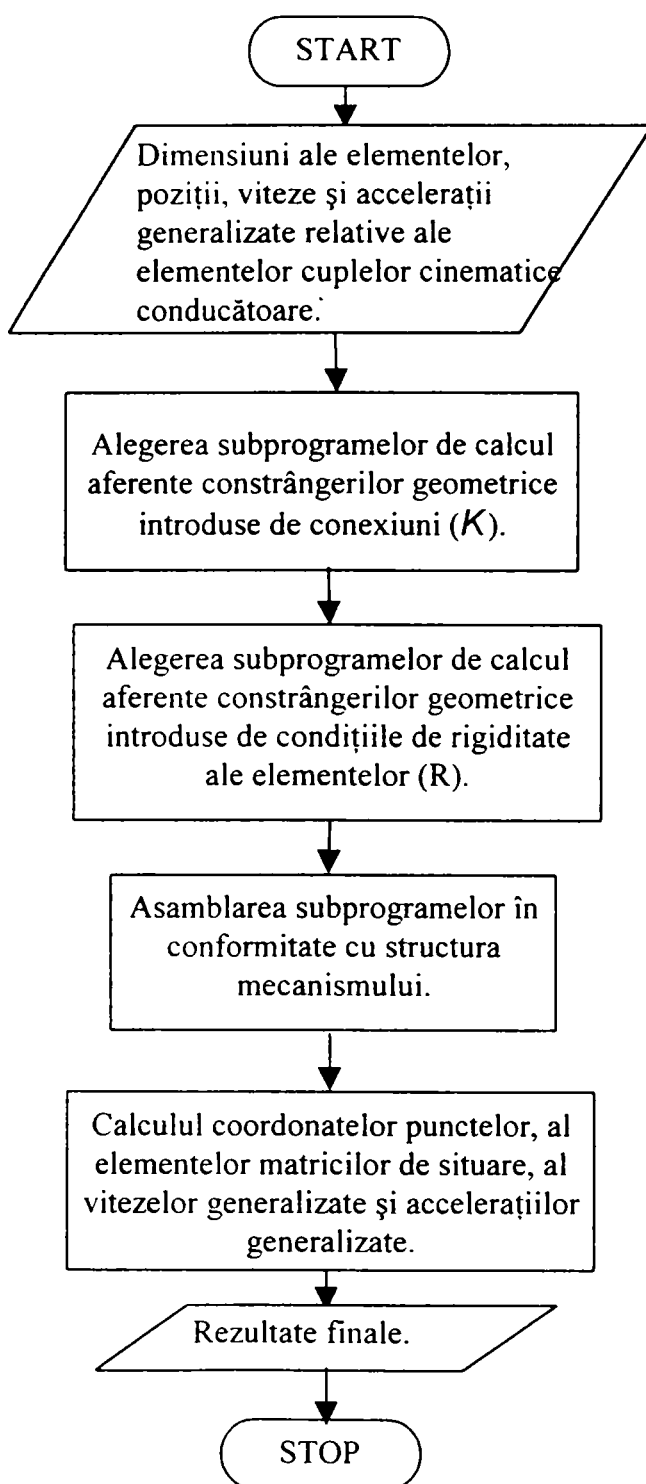


Fig. 5.2 Schema logică de analiză cinematică a unui mecanism

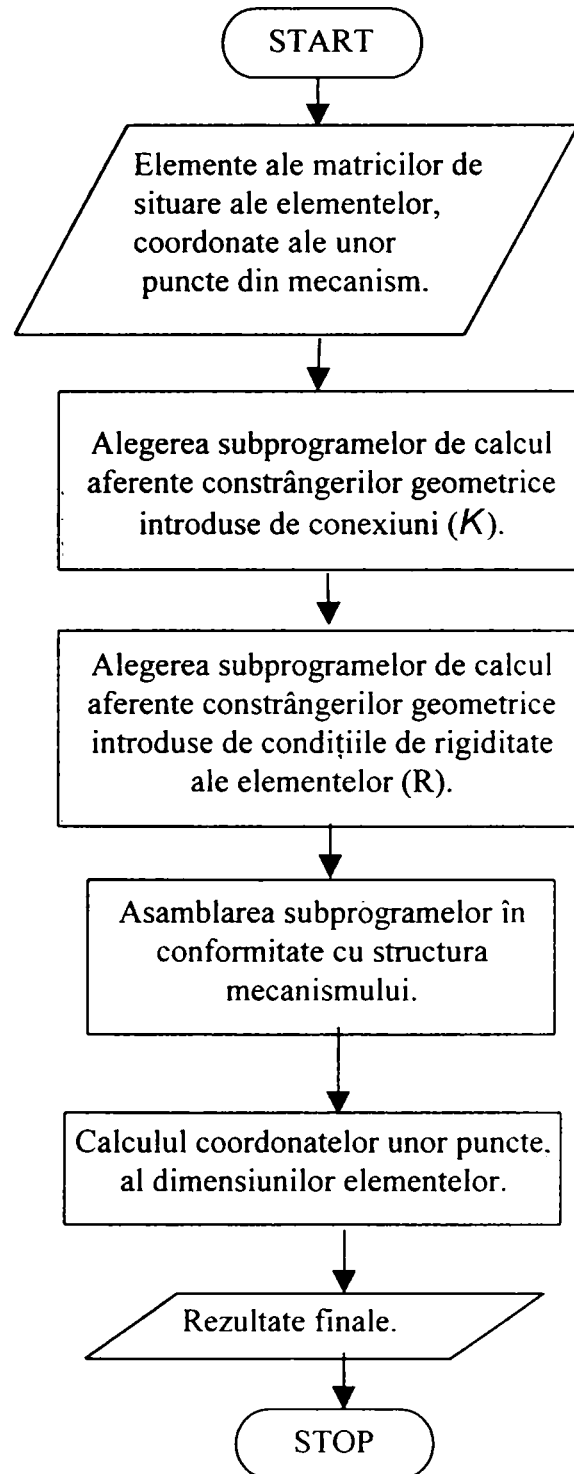


Fig. 5.3 Schema logică de sinteză dimensională a unui mecanism

Constrângerea introdusă de o conexiune având numărul gradelor de libertate  $L_K$  se poate exprima matematic prin  $L_K$  relații scalare. Se menționează că în afara

conexiunilor, constrângerile geometrice sunt introduse și de rigiditatea elementelor.

O conexiune având numărul gradelor de libertate  $L_K < 0$  impune unui punct din elementul ( $E$ ) să se găsească pe un loc geometric în raport cu sistemul de referință solidar cu elementul ( $F$ ) care se poate descrie printr-un număr de ecuații scalare egal cu  $L_K$ .

În cazul analizei cinematice, prin rezolvarea unor sisteme de ecuații scalare de (numărul acestora fiind corespunzător cu numărul gradelor de libertate ale unui element "inițial" diminuate de conexiuni) se poate determina situarea instantanee (poziția și orientarea) elementului inițial mobil în cauză, relativă în raport cu elementul inițial considerat fix (de care este legat sistemul de referință), cunoscând valorile instantanee ale parametrilor poziționali relativi ale cuplelor cinematice conducătoare.

Utilizând derivatele întâi și doi ale unor astfel de relații se pot calcula în mod similar stările de viteză respectiv de accelerație ale elementului inițial mobil considerat.

În cazul sintezei dimensionale a mecanismelor, folosind conexiunile, se cunosc situațiile relative ale elementelor inițiale mobile în raport cu elementul fix. Ecuațiile care se deduc permit determinarea dimensiunilor elementelor conexiunilor, câte una pentru fiecare grad de libertate.

Considerentele de mai sus permit conceperea unor programe de calcul pentru analiza cinematică a mecanismelor prin asamblarea unor subprograme de calcul a efectelor constrângerilor geometrice introduse de conexiuni.

Se întocmesc subprograme pentru calculul pozițiilor, vitezelor generalizate și accelerațiilor generalizate ale punctelor elementelor mecanismelor pe baza constrângerilor introduse de conexiuni, respectiv de condițiile de rigiditate ale elementelor. Subgramele se assemblează în programe în conformitate cu modul de constituire a mecanismului din elemente legate între ele prin conexiuni.

În figura 5.2 se prezintă schema logică generală a unui program de analiză cinematică a unui mecanism sintetizat utilizând conexiuni.

Subprogramele privitoare la calculul efectelor constrângerilor geometrice introduse de conexiuni pot fi utilizate și pentru conceperea unui program de sinteză dimensională a mecanismelor dacă sunt asamblate adecvat structurii mecanismului. În acest caz se cunosc situațiile elementelor inițiale și se urmărește determinarea dimensiunilor elementelor conexiunilor și a pozițiilor relative ale elementelor cuplelor cinematice conducătoare.

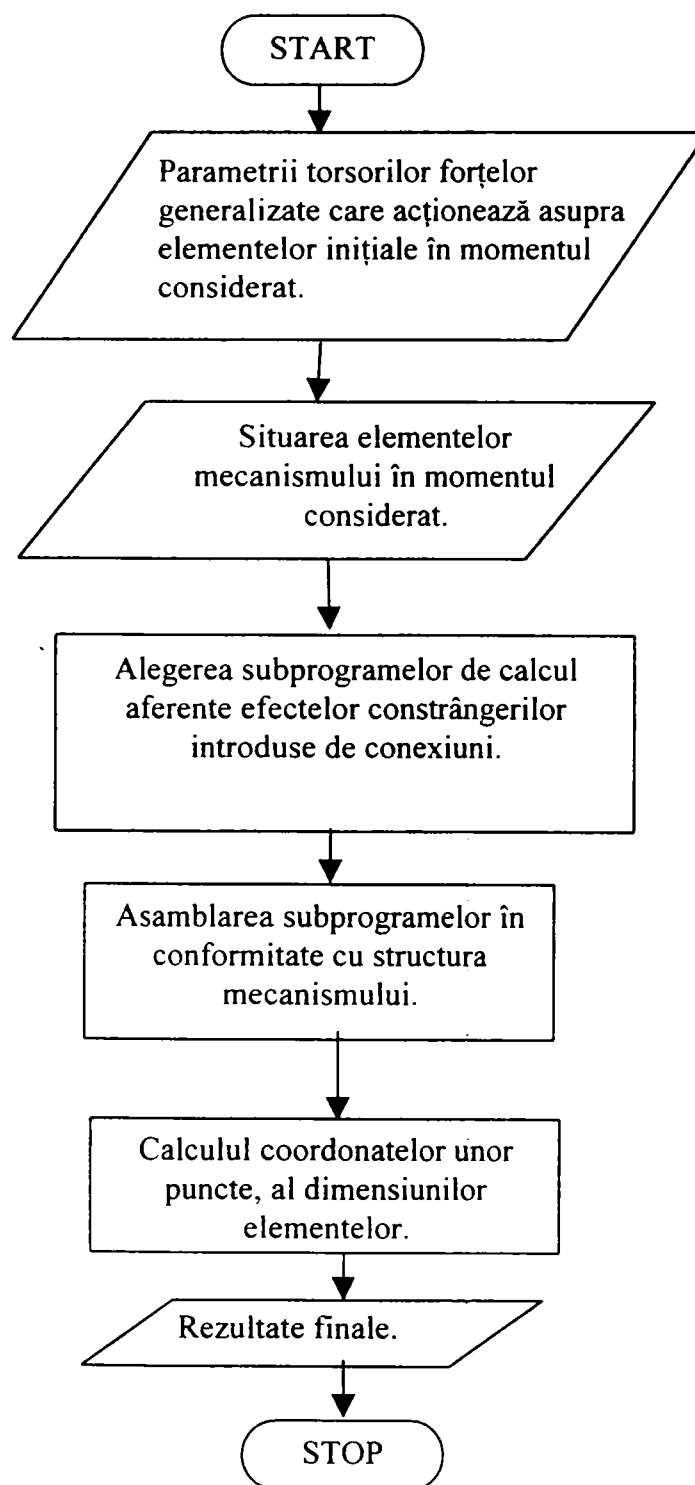
În fig.5.3 se prezintă schema logică a unui program pentru sinteza dimensională a mecanismelor.

### 5.2.2.2 *Constrângeri cinetostatice*

Pentru conexiunile numărul de grade de libertate negativ apare și problema constrângerilor cinetostatice pe care le introduc în mișcarea relativă ale elementelor între care se interpun. Acestea se prezintă sub forma unor forțe generalizate, luând aspectul unor torsi de tip reacțiune.

Se concluzionează, după parcurgerea unor exemple, că o conexiune având numărul gradelor de libertate  $L_K < 0$  introduce drept constrângeri cinetostatice reacțiuni în cuplele cinematice de legătură a conexiunii cu elementele între care se interpune aceasta, reacțiuni care pot fi definite prin  $L_K$  mărimi scalare. Aceste mărimi se determină prin rezolvarea unui număr de  $L_K$  ecuații scalare care exprimă condițiile de echilibru ale unuia din elementele inițiale.





**Fig. 5.4 Schema logică de sinteză dimensională a unui mecanism**

În figura 5.4 se prezintă algoritmul unui program pentru analiza cinetostatică a mecanismelor, asamblat din subprograme dedicate calculului constrângerilor cinetostatice introduse de conexiuni.

## 5.3 Utilizarea conceptului de conexiune în Robotică

### 5.3.1 Generalități

Sistemul mecanic al robotului, deasemenea și transmisiile mecanice conținute în sistemul de acționare al acestuia sunt constituite din mecanisme. Utilizarea conceptului de conexiune în cercetarea acestor sisteme permite:

- ◇ înțelegerea unitară a funcționării lor
- ◇ elaborarea unor metode de analiză cinematică/cinetostatică și sinteză dimensională mai eficiente decât cele uzuale.

Problematika tratată la acest subcapitol se constituie în metodologie de abordare a modelării complete a unui modul  $M_{IIAC\_T}$  cu 6 grade de libertate.

### 5.3.2 Modelarea mecanismelor dispozitivelor de ghidare de robot cu topologie paralelă

#### 5.3.2.1 Analiza și sinteza structurală

Mecanismul dispozitivului de ghidare cu topologie paralelă conține două elemente "inițiale": platformele fixă și mobilă legate între ele prin conexiuni. Drept urmare, numărul gradelor de libertate numărul gradelor de mobilitate se exprimă cu ajutorul relației 5.2, unde  $n_0 = 2$ . În robotică, prezintă interes mecanismele dispozitivelor de ghidare cu topologii spațiale, pentru care  $f = 0$ . Plecând de la aceste valori, ecuația 5.2 devine:

$$M = 6 + \sum L_k - \sum L_p \quad (5.2'')$$

Mecanismele dispozitivelor de ghidare cu topologie paralelă sunt desmodroame, dacă este îndeplinită condiția 5.2' privind egalitatea dintre numărul gradelor de mobilitate ale mecanismului și numărul parametrilor cinematici independenți, impuși de motoarele de acționare. Cum cuplele cinematice conducătoare utilizate sunt cuple de clasa a V-a, pentru mișcarea relativă a elementelor acestora se poate impune din exterior câte un singur parametru; numărul cuplelor cinematice de clasa a V-a conducătoare, necesare pentru realizarea desmodromiei este

$$c_{5c} = p = M \quad (5.2''')$$

Dintre dispozitivele de ghidare cu topologie paralelă interesează (pentru cazul tratat) cele cu  $M=6$ ; acestea se mai numesc și "mâini stângi" ("left hands"). Este relevantă în acest sens schema cinematică de la figura 5.6, la care apar cuple cinematice de translație. Dispozitivul de ghidare este alcătuit din 2 platforme ( $PF$  și  $PM$ ) și 6 conexiuni  $K_{C(0)}$ ; este des utilizat acronimul  $SSM$  (din literatura franceză) pentru denumirea acestui sistem. Ades – prin convenție - se adaugă un al treilea caracter la simbolurile celor două platforme, caracter ce desemnează numărul gradelor de mobilitate (deci.  $PF_6$  și  $PM_6$ ).

Conform schemei logice de sinteză structurală din figura 5.1 rezultă următoarele:

- numărul gradelor de libertate necesare ale conexiunilor care leagă platforma mobilă de cea fixă este:  $\sum L_k = M - 6 = 6 - 6 = 0$ ;

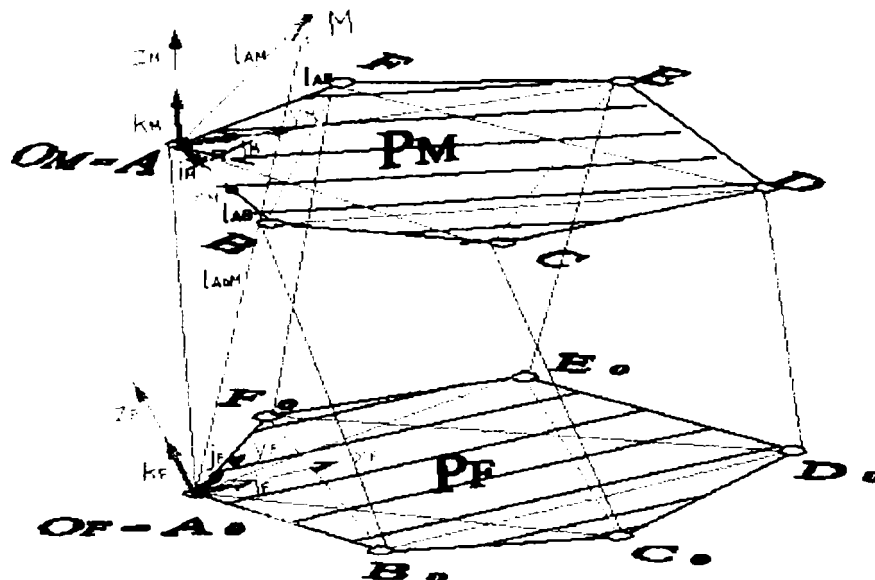
- numărul cuplelor cinematice conducătoare de clasa a V-a necesare este:  $c_{5c} = p - M = 6$ .

Dispozitivele de ghidare cu topologie mixtă constau din mai multe "etaje" formate din mecanisme desmodrome cu topologie paralelă, cu elemente rigide și / sau flexibile, legate în serie, constituind lanțuri de mecanisme legate în serii simple sau ramificate. Legătura dintre etajele  $i$  și  $i+1$  se realizează prin intermediul unei platforme comune, care este "platformă mobilă" pentru etajul  $i$  și "platformă fixă" (în sens relativ) pentru etajul  $i+1$ .

Analiza și sinteza structurală a mecanismelor dispozitivelor de ghidare cu topologie mixtă se realizează prin repetarea operațiilor descrise mai sus pentru fiecare "etaj" în parte.

### 5.3.2.2 Analiza cinematică și sinteza dimensională

Analiza cinematică și sinteza dimensională a mecanismelor dispozitivelor de ghidare cu topologie paralelă se face pornind de la constrângerile geometrice introduse de conexiuni în mișcarea relativă a platformelor fixă și mobilă, respectiv de la condițiile



**Fig. 5.5 Constrângeri geometrice și sisteme de referință la mecanismul dispozitivului de ghidare cu topologie paralelă**

de rigiditate ale acestor platforme.

Pentru exemplificarea modului de realizare a analizei cinematice ea se va efectua pentru același mecanism al dispozitivului de ghidare cu topologie paralelă din figura 5.6.

În cazul analizei pozițiilor (situărilor) și deplasărilor punctelor și elementelor din mecanism, se cunoaște la timpul considerat situarea relativă a elementelor cuplelor cinematice conducătoare care constituie cele 6 conexiuni  $K_{C(0)}$  ce leagă platformele mobile  $PF_6$  și  $PM_6$ . Ca urmare, lungimea segmentelor  $l_{A_0A}$ ,  $l_{B_0B}$ ,  $l_{C_0C}$ ,  $l_{D_0D}$ ,  $l_{E_0E}$ ,  $l_{F_0F}$ , sunt cunoscute.

Alegându-se sistemele de referință atașate celor două platforme ca în figura 5.5, constrângerile geometrice introduse de conexiunile  $K_{C(0)}$  conținând fiecare o cuplă cinematică conducătoare de translație (conform figurii 5.6) constau în impunerea la timpul dat a unor distanțe cunoscute între centrele cuplelor sferice omoloage care intră

în componența platformelor fixă și mobilă. Aceste constrângeri se exprimă prin sistemul de relații (14)

$$\left. \begin{aligned} (x_A - x_{B_0})^2 + (y_A - y_{A_0})^2 + (z_A - z_{A_0})^2 &= l_{AA_0}^2 \\ (x_B - x_{B_0})^2 + (y_B - y_{B_0})^2 + (z_B - z_{B_0})^2 &= l_{BB_0}^2 \\ (x_C - x_{C_0})^2 + (y_C - y_{C_0})^2 + (z_C - z_{C_0})^2 &= l_{CC_0}^2 \\ (x_D - x_{D_0})^2 + (y_D - y_{D_0})^2 + (z_D - z_{D_0})^2 &= l_{DD_0}^2 \\ (x_E - x_{E_0})^2 + (y_E - y_{E_0})^2 + (z_E - z_{E_0})^2 &= l_{EE_0}^2 \\ (x_F - x_{F_0})^2 + (y_F - y_{F_0})^2 + (z_F - z_{F_0})^2 &= l_{FF_0}^2 \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

unde distanțele dintre punctele omoloage ale platformei mobile și fixe sunt dependente de timp prin intermediul deplasărilor relative ale elementelor cuplelor cinematice conducătoare în raport cu sistemul de referință  $O_{MXMYMZ_M}$ :

$$\left. \begin{aligned} l_{A_0A} &= f[S_G(t)] \\ l_{B_0B} &= f[S_H(t)] \\ l_{C_0C} &= f[S_I(t)] \\ l_{D_0D} &= f[S_J(t)] \\ l_{E_0E} &= f[S_K(t)] \\ l_{F_0F} &= f[S_L(t)] \end{aligned} \right\} \quad (5.3')$$

iar  $S_G, S_H, S_I, S_J, S_K, S_L$  reprezintă deplasările relative ale elementelor cuplelor cinematice conducătoare (reprezentate deasemenea).

Constrângerile geometrice impuse de rigiditatea platformei mobile se pot exprima matematic prin intermediul sistemului de relații (5.4) derivate din condiția păstrării constante a unor distanțe cunoscute dintre puncte aparținând platformei mobile.

Sistemele (5.3) și (5.4), conținând 18 ecuații scalare, permit calcularea celor 18 coordonate ale punctelor A -F, în raport cu sistemul de referință  $O_{FXFYFZF}$ .

Versorii axelor sistemului de referință  $O_{MXMYMZ_M}$  vor fi :

$$\left. \begin{aligned} (x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2 + (z_A - z_B)^2 &= l_{AB}^2 \\ (x_B - x_C)^2 + (y_B - y_C)^2 + (z_B - z_C)^2 &= l_{BC}^2 \\ (x_C - x_D)^2 + (y_C - y_D)^2 + (z_C - z_D)^2 &= l_{CD}^2 \\ (x_D - x_E)^2 + (y_D - y_E)^2 + (z_D - z_E)^2 &= l_{DE}^2 \\ (x_E - x_F)^2 + (y_E - y_F)^2 + (z_E - z_F)^2 &= l_{EF}^2 \\ (x_F - x_A)^2 + (y_F - y_A)^2 + (z_F - z_A)^2 &= l_{FA}^2 \\ (x_A - x_C)^2 + (y_A - y_C)^2 + (z_A - z_C)^2 &= l_{AC}^2 \\ (x_B - x_D)^2 + (y_B - y_D)^2 + (z_B - z_D)^2 &= l_{BD}^2 \\ (x_C - x_E)^2 + (y_C - y_E)^2 + (z_C - z_E)^2 &= l_{CE}^2 \\ (x_D - x_F)^2 + (y_D - y_F)^2 + (z_D - z_F)^2 &= l_{DF}^2 \\ (x_E - x_A)^2 + (y_E - y_A)^2 + (z_E - z_A)^2 &= l_{EA}^2 \\ (x_F - x_B)^2 + (y_F - y_B)^2 + (z_F - z_B)^2 &= l_{FB}^2 \end{aligned} \right\} \quad (5.4)$$

$$\bar{i} = \frac{\bar{l}_{AB}}{|\bar{l}_{AB}|}; \bar{j} = \bar{i} \times \bar{k}; \bar{k} = \bar{i} \times \frac{\bar{l}_{AF}}{|\bar{l}_{AF}|} \quad (5.5)$$

Cu acestea, ecuațiile versorilor axelor sistemului  $O_{MXMYMZ_M}$  (axa  $O_{MYM}$  se găsește în planul definit de punctele ABF), pe axele sistemului de referință  $O_{FXFYFZF}$  vor fi:

$$\begin{cases} i_x = \frac{x_B - x_A}{l_{AB}} \\ i_y = \frac{y_B - y_A}{l_{AB}} \\ i_z = \frac{z_B - z_A}{l_{AB}} \end{cases} \quad (5.6)$$

$$\begin{cases} k_x = \frac{(y_B - y_A)(z_F - z_A) - (y_F - y_A)(z_B - z_A)}{l_{AB}l_{AF}} \\ k_y = \frac{(x_B - x_A)(z_F - z_A) + (x_F - x_A)(z_B - z_A)}{l_{AB}l_{AF}} \\ k_z = \frac{(x_B - x_A)(y_F - y_A) - (x_F - x_A)(z_B - z_A)}{l_{AB}l_{AF}} \end{cases} \quad (5.7)$$

$$\begin{cases} j_x = \frac{(y_B - y_A)[(x_B - x_A)(y_F - y_A) - (x_F - x_A)(z_B - z_A)] - (z_B - z_A)[(x_F - x_A)(z_B - z_A) - (x_B - x_A)(z_B - z_A)]}{|l_{AB}|^2 |l_{AF}|^2} \\ j_y = \frac{(z_B - z_A)[(y_B - y_A)(z_F - z_A) - (y_F - y_A)(z_B - z_A)] - (x_B - x_A)[(x_B - x_A)(y_F - y_A) - (z_B - z_A)(x_F - x_A)]}{|l_{AB}|^2 |l_{AF}|^2} \\ j_z = \frac{(z_B - z_A)[(z_B - z_A)(z_F - z_A) - (x_F - x_A)(z_B - z_A)] - (z_B - z_A)[(y_B - y_A)(z_F - z_A) - (y_F - y_A)(z_B - z_A)]}{|l_{AB}|^2 |l_{AF}|^2} \end{cases} \quad (5.8)$$

Cunoscând proiecțiile versorilor sistemului de referință  $O_M X_M Y_M Z_M$  pe axele sistemului de referință  $O_F X_F Y_F Z_F$ , se deduce matricea de situare a platformei mobile  $PM$  în raport cu platforma fixă  $PF$ .

$${}^F T_M = \begin{bmatrix} i_x & j_x & k_x & x_A \\ i_y & j_y & k_y & y_A \\ i_z & j_z & k_z & z_A \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Cu acestea, vectorul de poziție a unui punct oarecare  $M$  aparținând platformei mobile  $PM$  în raport cu sistemul de referință  $O_F X_F Y_F Z_F$  are expresia

$$l_{A_0M} = {}^F T_M l_{AM} \quad (5.10)$$

unde  $l_{AM}$  este vectorul de poziție al punctului  $M$ .

Coordonatele punctelor din platforma mobilă  $PM$  și matricea  ${}^F T_M$  sunt funcții de timp prin intermediul deplasărilor relative ale elementelor cuplurilor cinematice conducătoare  $S_G \dots S_L$ .

Deplasarea  $\Delta l_{A_0M_0}$  unui punct oarecare  $M$  aparținând platformei mobile  $PM$  în intervalul de timp  $t_0 - t_1$  rezultă din relația

$$\Delta \bar{l}_{A_0M_0} = \bar{l}_{A_0M_1} - \bar{l}_{A_0M_0} = ({}^F T_M)_1 \bar{l}_{AM} - ({}^F T_M)_0 \bar{l}_{AM} \quad (5.11)$$

unde  $({}^F T_M)_1$  și  $({}^F T_M)_0$  sunt matricile de situare ale platformei  $PM$  în raport cu platforma  $PF$  la timpul  $t_1$  și  $t_0$ .

Pentru sinteza dimensională a mecanismului cu topologie paralelă se cunosc seturi ale elementelor matricii de situare  ${}^F T_M$  pentru diferiți timpi  $t_i$  și se calculează cu aceleași relații coordonatele punctelor  $A_0 - F_0, A \dots F$  și lungimile  $l$  folosind aceleași

relații ca și la analiza deplasărilor .

Pentru calculul stării de viteză a platformei mobile  $PM$  se calculează

$$\underline{\dot{X}}_A = \begin{bmatrix} \dot{x}_A \\ \dot{y}_A \\ \dot{z}_A \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \underline{J} \begin{bmatrix} \dot{s}_G \\ \dot{s}_H \\ \dot{s}_I \\ \dot{s}_J \\ \dot{s}_K \\ \dot{s}_L \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

unde elementele matricii  $\underline{\dot{X}}_A$  sunt proiecțiile vectorilor viteză a punctului A (identic cu originea  $O_M$  a sistemului de referință solidar cu platforma mobilă  $PM$ ) pe axele sistemului de referință  $O_F X_F Y_F Z_F$  și proiecțiile vectorului vitezei unghiulare a platformei mobile  $PM$  pe aceleași axe,  $s_G \dots s_L$  sunt vitezele deplasărilor relative ale elementelor cuplelor cinematice conducătoare, iar  $\underline{J}$  este matricea jacobiană a mecanismului cu topologie paralelă analizat.

Pentru calculul stării de accelerație a platformei mobile, se calculează

$$\underline{\ddot{X}}_A = \begin{bmatrix} \ddot{x}_A \\ \ddot{y}_A \\ \ddot{z}_A \\ \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{bmatrix} = \underline{J} \begin{bmatrix} \ddot{s}_G \\ \ddot{s}_H \\ \ddot{s}_I \\ \ddot{s}_J \\ \ddot{s}_K \\ \ddot{s}_L \end{bmatrix} + \underline{\dot{J}} \begin{bmatrix} \dot{s}_G \\ \dot{s}_H \\ \dot{s}_I \\ \dot{s}_J \\ \dot{s}_K \\ \dot{s}_L \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

unde elementele matricii  $\underline{\ddot{X}}_A$  sunt proiecțiile vectorului accelerației ale punctului A pe axele sistemului de referință  $O_F X_F Y_F Z_F$ , proiecțiile vectorului accelerației unghiulare a platformei  $PF$  pe aceleași axe.  $\ddot{s}_G \dots \ddot{s}_L$  sunt accelerațiile deplasărilor relative ale elementelor cuplelor cinematice conducătoare, iar  $\underline{\dot{J}}$  este derivata în funcție de timp a jacobianului mecanismului cu topologie paralelă. Celelalte notații sunt preluate de la relația 5.12.

### 5.3.2.3 Analiza cinetostatică

Analiza cinetostatică a mecanismelor dispozitivelor de ghidare cu topologie paralelă se face pe baza constrângerilor cinetostatice introduse de conexiuni în mișcarea relativă a platformelor mobilă și fixă.

Pentru exemplificarea modului de lucru se va efectua această analiză pentru același mecanism al dispozitivului de ghidare cu topologie paralelă pentru care s-a efectuat și analiza cinematică. Se neglijează frecările dintre zonele de contact ale cuplelor cinematice.

Situarea, starea de viteză și cea de accelerație ale platformei mobile  $PM$  în raport cu platforma fixă  $PF$  sunt cunoscute, ca și tursorul forțelor generalizate  $\tau(\bar{F}_M, \bar{M}_M)$  care acționează asupra platformei mobile  $PM$ .

Scopul analizei cinetostatice este acela de a determina reacțiunile care acționează în cuplele cinematice ale mecanismului și care "materializează" constrângerile cinetostatice introduse de conexiuni.

Pentru o conexiune  $K_{C(0)}$  - simbol STS - reacțiunile din cuplele cinematice sferice care leagă conexiunea la cele două platforme sunt egale, având direcția dreptei de suport linia care unește centrele articulației sferice. Reacțiunea menționată este egală și cu forța motoare necesară din cupla cinematică conducătoare de translație din componența conexiunii.

$$\left. \begin{aligned} \overline{R}_{A_0} &= \overline{R}_A = \overline{F}_G \\ \overline{R}_{B_0} &= \overline{R}_B = \overline{F}_H \\ \overline{R}_{C_0} &= \overline{R}_C = \overline{F}_I \\ \overline{R}_{D_0} &= \overline{R}_D = \overline{F}_J \\ \overline{R}_{E_0} &= \overline{R}_E = \overline{F}_K \\ \overline{R}_{F_0} &= \overline{R}_F = \overline{F}_L \end{aligned} \right\} \quad (5.14)$$

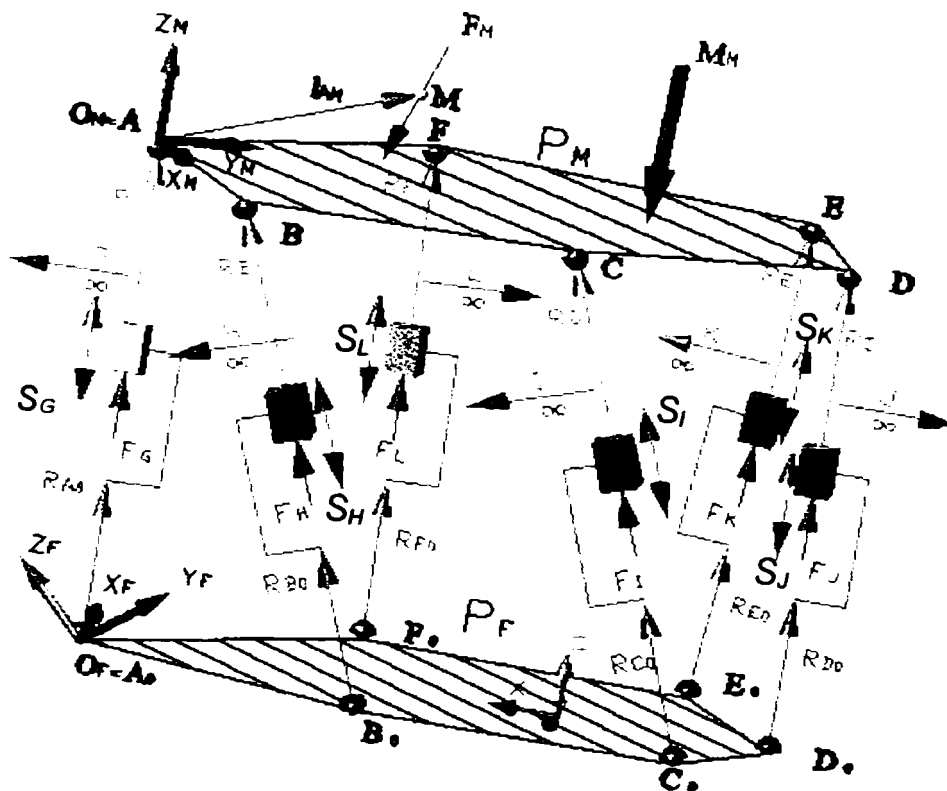


Fig. 5.6 Constrângeri cinetostatice introduse de conexiuni la mecanismul dispozitivului de ghidare cu topologie paralelă

Condițiile de echilibru ale platformei mobile  $PM$  impun ca

$$\left\{ \begin{aligned} \underline{F}_M &= {}^F T_M^{-1} (\underline{R}_A + \underline{R}_B + \underline{R}_C + \underline{R}_D + \underline{R}_E + \underline{R}_F) \\ \underline{M}_M + \underline{l}_{AM} \times \underline{F}_M &= \underline{l}_{AB} \times {}^F T_M^{-1} \underline{R}_B + \underline{l}_{AC} \times {}^F T_M^{-1} \underline{R}_C + \underline{l}_{AD} \times {}^F T_M^{-1} \underline{R}_D + \underline{l}_{AE} \times {}^F T_M^{-1} \underline{R}_E + \underline{l}_{AF} \times {}^F T_M^{-1} \underline{R}_F \end{aligned} \right. \quad (5.15)$$

unde  $\underline{l}_{AM}, \underline{l}_{AB}, \underline{l}_{AC}, \underline{l}_{AD}, \underline{l}_{AE}, \underline{l}_{AF}$  sunt vectori de poziție cunoscuți ai unui punct aflat pe suportul forței  $\underline{F}_M$ , respectiv ale centrelor articulațiilor sferice componente.

Sistemul (5.15) este echivalent cu un sistem de 6 ecuații scalare, rezolvarea cărora permite determinarea modulelor forțelor  $\overline{R}_A, \dots, \overline{R}_F$  ale căror direcții, coincizând cu direcțiile  $\overline{A_0A}, \dots, \overline{F_0F}$ , sunt cunoscute.

## 5.4 Concepția unui modul-interfață inteligent sistem activ – mediu (sistem pasiv) cu 6 grade de libertate utilizând conexiuni cinematice

### 5.4.1 Elemente definitorii ale temei de proiectare

Un astfel de modul – de tip  $M_{IIAC\_T}$  - trebuie să încorporeze sistemic câte un modul individual (pentru un singur grad de libertate, de tip  $mI_{IU}$ , conform capitolului 4) pentru fiecare din cele 6 grade de libertate ale propriului sistem mecanic mobil.

*Este esențial ca – prin structură - acesta să păstreze nemodificat numărul gradelor de libertate în mișcarea relativă a zonelor de contact ale celor două sisteme aflate în interacțiune, fiind obligatoriu sensibil la toate cele șase componente ale torsorului forțelor de interacțiune. Se cunoaște faptul că efectul acestui torsor poate fi redus la efectul acțiunii a șase forțe având drepte suport date. Acestea se materializează prin cuple cinematice de translație.*

În cadrul prezentei lucrări s-a conceput sistemul mecanic al interfeței inteligente sub forma unui dispozitiv de ghidare cu topologie paralelă, platforma fixă  $PF$  fiind solidară cu un element al mediului ("sistemul pasiv") în timp ce platforma mobilă  $PM$  este solidarizată cu un element al "sistemului activ". Legătura dintre cele două platforme este realizată prin intermediul a șase conexiuni  $K_{C(0)}$  simbol  $STS$ . Drept urmare, sistemul mecanic al interfeței inteligente are structura mecanismului dispozitivului de ghidare  $SSM$  (simbol  $PF_6 + 6STS + PM_6$ ).

Fiecare conexiune  $K_{C(0)}$  din componența structurii sistemului mecanic al interfeței se constituie într-un modul inteligent de tip  $mI_{IU}$ , aferent controlului uneia din forțele componente ale torsorului forțelor generalizate. În figura 5.7 se prezintă schema unui astfel de modul inteligent.

#### Concluzii

*Metoda conexiunilor oferă toate datele și informațiile necesare pentru concepția unui modul de tip  $M_{IIAC\_T}$  cu 6 grade de libertate:*

- *pentru desfășurarea calculelor se utilizează modelele matematice prezentate la capitolul 5.3.2; acest lucru se poate realiza fără nici o dificultate apelând la suportul de calcul matricial ale mediul **MATLAB**;*
- *modulele individuale de tip  $mI_{IU}$  (posedând câte o cuplă de translație activă) pot îndeplini rolul de compensare naturală a uneia din componentele forței generalizate dacă respectă condiția păstrării nemodificate a numărului de grade de libertate în mișcarea relativă a zonelor de contact; pentru acest lucru, trebuie plasată câte o articulație sferică în punctele de aplicație ale forțelor de acțiune/reacțiune, deci în punctele care definesc conexiunea  $K_{C(0)}$ ;*
- *pentru fiecare din modulele individuale trebuie efectuată doar o verificare a capacității portante de compensare (pentru o poziție instantanee din timpul funcționării) în limita căreia acestea își pot exercita funcția pentru care au fost concepute;*
- *având în vedere faptul că întreaga structură este spațială, este evident că a fost nevoie de un mediu de proiectare cu capabilități 3D; s-a lucrat cu mediul integrat **Autocad&Mechanical Desktop**.*



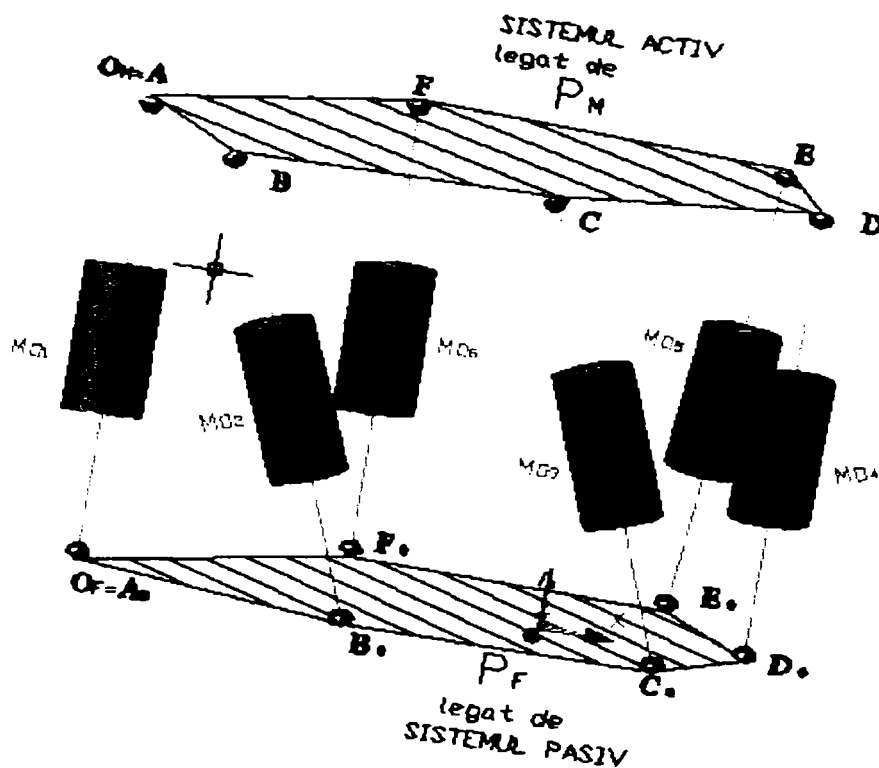


Fig. 5.7 Sistemul mecanic mobil al interfeței inteligente  $M_{IIAC\_T}$  cu cele șase module structurale  $M_{01-6}$ , materializate prin modulele individuale de tip  $mI\_IU$

#### 5.4.2 Adaptarea/reproiectarea modulelor individuale de tip $mI\_IU$

Față de varianta utilizată la încercările experimentale, au fost necesare modificări pentru satisfacerea dezideratelor prezentate la concluziile de la capitolul 5.4.1. În figura 5.8 se prezintă varianta reproiectată a  $mI\_IU$  în vederea încorporării acestuia în sistemul

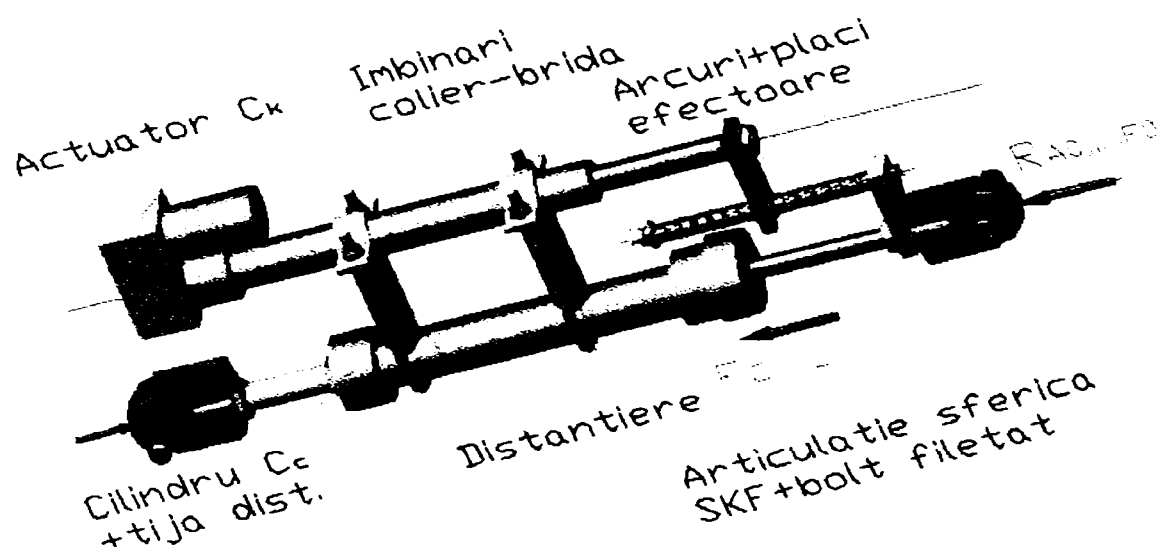


Fig. 5.8 Modulul  $mI\_IU$  reproiectat/adaptat în vederea încorporării în structura spațială a  $M_{IIAC\_T}$

mecanic mobil cu topologie spațială. Esențială este plasarea articulațiilor sferice prin intermediul cărora se realizează legătura cu platformele  $PM$  și  $PF$ , respectiv prin

intermediul cărora se transmit forțele între cele două platforme. În acest scop s-a apelat la articulații de tip SKF, având identificatorul SIQ 16 ES, cu diametrul alezajului de 16 mm. Toate elementele de identificare ale componentelor modulului – corelate cu cele de la capitolul 4 sunt vizibile în figură. A fost necesară dispunerea în plus a unei tije filetate (în spatele cilindrului  $C_c$ ) pentru reglajul poziției medii a plajei de acționare, respectiv pentru un montaj mai facil. Gabaritul de referință (620 mm lungime între articulații) a rezultat în urma procesului de proiectare a ansamblului 3D. Sunt vizualizate deasemenea forțele/reacțiunile (provenind de la cele două platforme, diferențiate prin culoare) care acționează asupra celor două extremități ale modulului, prin articulații. Acestea corespund cu forțele notate  $F_1(=F_m)$  și respectiv  $F_2(=F_p)$  de la capitolul 4. Forța internă de reacție este reprezentată cu culoare roșie, iar toate reprezentările sunt efectuate în corelație cu figurile 5.5-5.7.

### 5.4.3 Proiectarea sistemului mecanic mobil al M\_IAC\_T

a fost realizată conform figurii 5.10 pornind de la forma structurii robotice de topologie paralelă, cu ajutorul a două platforme de formă triunghiulară. Construcția – în structură sudată - a acestora este prezentată în figura 5.9.

Platformele au fost dispuse “în oglindă” față de planul median orizontal al ansamblului și decalat pe verticală una față de cealaltă (gabaritul “axial” al construcției fiind de 475 mm la montaj). Triunghiurile platformelor sunt rotite la rândul lor (e vorba de planuri plan paralele) cu 60 de grade unul față de celălalt. După cum se poate observa în figură, laturile triunghiurilor sunt materializate prin profile dreptunghiulare, iar în “vârfurile” lor sunt sudate - centrat - cele trei bucșe inelare (realizate din profil de tip țevă) vizualizate cu culoare roșie. Centrul bucșelor este plasat pe un perimetru circular având un diametru de 750 mm. Pe fiecare din bucșe sunt sudate câte două plăcuțe (de

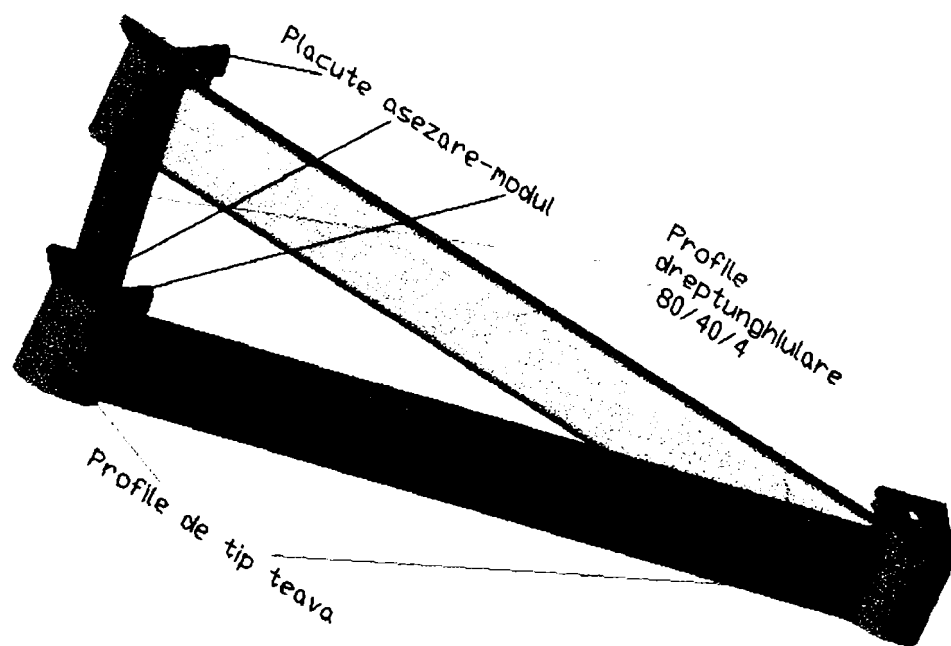


Fig. 5.9 Subansamblul sudat al platformelor  $PM$  și  $PF$

culoare verde în figuri). Inițial acestea au fost la rândul lor solidarizate – ca în figura 5.9, în final însă au rămas decalate spațial. Fiecare plăcuță este prevăzută cu orificiul destinat conexiunii – prin intermediul bolțurilor – cu o articulație sferică a unuia din modulele

individuale  $mI_{IU}$ . În acest mod structura fiecăreia din platforme permite plasarea a câte două module învecinate în “colțurile” triunghiurilor.

Fiecare modul este conectat cu un “capăt” la una din plăcuțele dintr-un “vârf” al triunghiului platformei  $PM$  iar cu celălalt, la plăcuța cea mai apropiată a “vârfului” (decalat cu 60 de grade) platformei  $PF$ . Modulele învecinate sunt legate la cele două platforme în alternanță (sus-jos/jos-sus) unul față de celălalt. Pentru simetrizarea

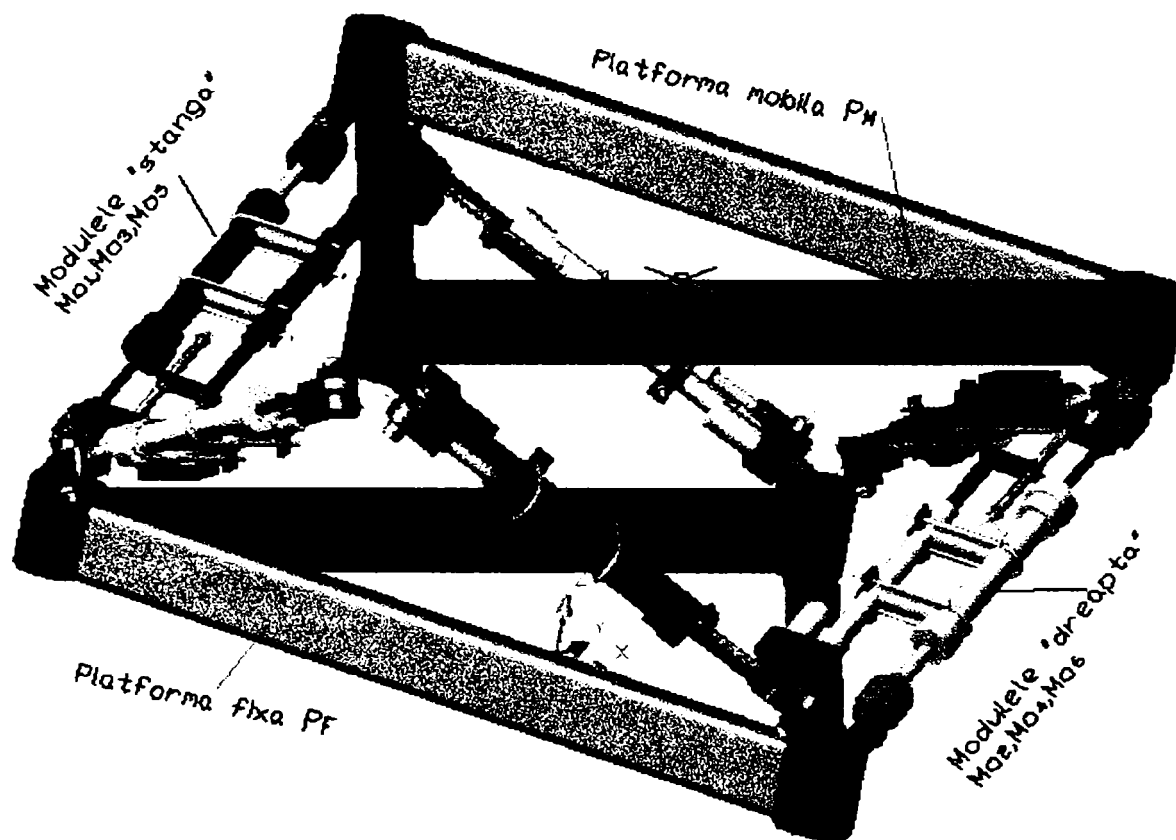


Fig. 5.10 Modulul-interfață inteligent  $M_{IAC\_T}$  cu 6 grade de libertate

construcției s- a recurs la plasarea “capetelor” de module în oglindă pentru plasament inferior/superior al capătului activ al cilindrii  $C_c$ , rezultând montaje “pe stânga” și respectiv pe “dreapta” al acestora. Sunt (evident) două grupuri diferite a câte trei module montate în același fel, apartenența la un grup fiind evidențiată în figură prin identitatea de culoare a modulelor similar montate.

Legătura dintre platforme și sistemele adiacente lor, aflate în interacțiune prin intermediul modulului ( $PM$ -sistem activ și respectiv  $PF$ -cel pasiv) se poate realiza fără probleme prin îmbinări filetate. Amplasarea judicioasă a orificiilor acestora pe fiecare din platforme determină în final o interconexiune corectă.

#### Observație

*În cazul acestei soluții constructive, nu a fost prevăzută amplasarea incintelor de autocompensare cu fluid la modulele individuale. Există mai multe soluții pentru rezolvarea acestei probleme. Pot fi atașate acestor module (spre exemplu) incinte închise de configurație spațială adecvată. O soluție mai interesantă pare a fi însă utilizarea volumului interior al profilelor constitutive ale celor două platforme în acest scop (închizând pentru aceasta – eventual – și bușele inelare ale structurii). Aceasta ar putea activa o compensare de nivel “global” asupra  $M_{IAC\_T}$ . Soluțiile ar necesita experimentări axate pe această problemă.*

În tabelul următor sunt prezentate dimensiunile caracteristice ale celor două platforme în conformitate cu notațiile din figurile 5.5-5.7.

Tabelul 5.2

Mărimea			Dimensiunea [mm]
Platforma mobilă <i>PM</i>	$l_{AB} = l_{CD} = l_{EF}$	$l_{AoFo} = l_{BoCo} = l_{DoEo}$	833,5
	$l_{AF} = l_{BC} = l_{DE}$	$l_{AoBo} = l_{CoDo} = l_{EoFo}$	84
	$l_{AC} = l_{AE}$	$l_{AoDo} = l_{DoEo}$	878
	$l_{AD} = l_{DE}$	$l_{AoCo} = l_{AoEo}$	917,2
Diametrul de așezare al bușelor inelare			1000
Gabarit vertical (poziție de montaj la <b>mi IU</b> )			475
Gabarit în plan orizontal (diametrul cercului)			1080
Suprafață cilindrică liberă/disponibilă (în interiorul structurilor de rezistență triunghiulare) de diametru			600

## 6. Contribuții personale

În cadrul lucrării de doctorat, există contribuții personale teoretice și practice. Acestea sunt prezentate în continuare.

1. Relevarea evoluției deosebite – “în spirală” – a termenului și conceptului de robot: de la analogia cu aspectul “science fiction” de antropomorfism care era subînțeleș și determinant, trecând apoi prin faza de “robot industrial” în care accentuarea celui de-al doilea termen îl diferențiază net de contextul ficțiunii (cel al “oamenilor artificiali”), și mai apoi revenirea la contextul antropomorfic îndeosebi prin *modul în care este implicată inteligența artificială*, urmând probabil în domeniul serviciilor (îndeosebi) și reluarea pe alt plan a implicării aspectului fizic.
2. Prezentarea densă – de tip monografic – a problematicii și a stadiului cercetărilor referitoare la modelare și simulare pe parcursul întregului capitol 2; se referă la problematica de ordin general, dar relevă și foarte multe aspecte cu focalizare pe problemele din domeniul mecanic. În cadrul prezentării există deasemenea și contribuții particulare, relevate în continuare.
3. Relevarea legăturii logic-istorice dintre conceptele și activitățile de cunoaștere și mijloacele prin care s-au realizat aceste activități de-a lungul timpului.
4. Relevarea algoritmului de desfășurare a activităților premergătoare istoric modelării și simulării: cele de observare și măsurare, având însă aceeași finalitate: de cunoaștere a unui aspect al naturii.
5. Prezentarea concentrată a multitudinii termenilor care se utilizează în literatură în contextul modelării și analiza critică a utilizării acestor termeni.
6. Prezentarea și analiza critică a *definițiilor* (vehiculate în literatură) referitoare la termenul și respectiv conceptul de modelare.
7. Relevarea prin schemă logică a unui algoritm referitor la elaborarea modelelor.
8. Realizarea unei clasificări generale a modelelor și relevarea legăturii dintre *esența funcțional-comportamentală* și *configurația geometric-spațială*; utilizarea în premieră a acestor sintagme în contextul proceselor de modelare-simulare.
9. Introducerea – motivată de sensul circulației informației în procesul de modelare – a termenului de “*sistem-sursă*” referitor la sistemul (real sau virtual) care se modelează.
10. Conceperea – în premieră – a unui graf ierarhic referitor la taxonomia modelelor și conectarea acestuia la grafurile similare (cunoscut) referitor la sisteme, pentru relevarea celor două “extremități” ale procesului de modelare: a sistemului sursă și a “oglinzii” sale, modelul.

11. Relevarea grafică, prin ordinogramă, a algoritmului abordării moderne, structurate a teoriei modelării în care calculatorului devine element de bază al teoriei modelării, în procesele de simulare; alături de elementele modelării, apar și activitățile constitutive ale procesului propriu-zis de modelare, printre care și cea de observare (o altă relevare a evoluției istorice, în “spirală” a unor termeni moderni).
12. Prezentarea monografică a modalităților de abordare a proceselor de identificare.
13. Analiza critică a *definițiilor* conceptului de simulare.
14. Prezentarea monografică – în premieră în limba română – a problematicilor legate de simulare.
15. Prezentarea monografică – în premieră în limba română – pe parcursul subcapitolelor 3.1 și 3.2, a problematicii interacțiunii dintre sistemele dinamice (active) și sistemele pasive: problematica “contact-task”.
16. Relevarea grafică a diferenței dintre abordarea clasică și cea modernă a acestei problematice.
17. Prezentarea monografică - în premieră în limba română – a metodelor de conducere a roboților în general și în aplicațiile care implică contactul (în particular): taxonomie, particularități, scheme de conducere, analiză critică.
18. Relevarea multitudinii de forme utilizabile ale modelului matematic cu care pot fi descrise aplicațiile de tip “contact-task”, cu avantajele și dezavantajele lor.
19. Prezentarea metodei conducerii hibride poziție/forță în robotică - în premieră în limba română - punct de plecare pentru abordarea modernă a aplicațiilor de tip “contact-task”: începuturi, evoluție, critici și tendințe.
20. Prezentarea - în premieră în limba română – a unor aspecte particulare ale procesului de conducere a sistemelor de lucru aflate în interacțiune cu mediul, respectiv a efectului complianței asupra stabilității la impact.
21. Abordarea structurii modulelor-interfață inteligente (notate **mI\_IU**) dedicate aplicațiilor contact-task prin prisma analizei critice (din punctul de vedere al domeniului mecanic) și a constatărilor referitoare la Teoria Modelării.
22. Prezentarea unei analize critice a modalităților de variație a parametrilor impedanței mecanice și a posibilităților de realizare tehnică a acesteia.
23. Analiza structurală completă, multinivel, a unui modul-interfață inteligent.
24. Prezentarea grafică – în două maniere diferite – a structurii multinivel a modului.
25. Utilizarea în cadrul acestor reprezentări a unor convenții de notare și respectiv a “operatorilor” structurali (de “unificare” spre exemplu): o încercare de standardizare a reprezentărilor de structură pentru sisteme mecanice.
26. Conceperea și prezentarea sub formă de ordinogramă a unui algoritm pentru desfășurarea procesului de modelare în cazul sistemelor puternic structurate.
27. Modelarea/conceperea submodulelor-parametru a modului inteligent: de masă, de amortizare și de elasticitate.
28. Modelarea/conceperea modului-interfață inteligent **mI\_IU** în corelație cu elementele de noutate ale analizei structurale: în manieră unificată și respectiv în manieră sintetică.
29. Modelarea/conceperea submodulelor de conducere/comandă pentru submodulele de tip mecanic.
30. Modelarea/conceperea structurii sistemelor de acționare.
31. Modelarea/conceperea secțiunilor soft ale submodulelor de conducere/comandă în două modalități diferite: în manieră-programator simplificată și în concepție

complet structurată.

32. Elaborarea unei *imagini sintetice* a **mI\_IU** cu ajutorul elementelor de structură, a funcțiilor de exercitat și a tuturor entităților care-l alcătuiesc/cu care funcționează.
33. Elaborarea schemelor de soluții constructive utilizând submodulele/parametru (în cinci variante constructiv-structurale diferite). Analiza lor critică.
34. Elaborarea soluției constructive a modului **mI\_IU** în varianta hidraulică
35. Proiectarea/executarea (parțială) a unui stand de investigare a aplicațiilor “contact-task” (având drept structură definitorie modulul **mI\_IU**) în varianta hidraulică, sub mediul soft **3D STUDIO**.
36. Modelarea/elaborarea soluției constructive a modului **mI\_IU** în varianta mecano-electrică.
37. Proiectarea/realizarea standului de investigare a aplicațiilor “contact-task” (având drept structură definitorie modulul **mI\_IU**) în varianta mecano-electrică sub mediul **AUTOCAD**.
38. Conceperea metodologiei și elaborarea algoritmului pentru determinarea preliminară a caracteristicilor submodulului de amortizare (în interfața soft: “etalonarea/calibrarea acestuia”).
39. Modelarea/elaborarea soluției constructive a standului pentru determinarea caracteristicilor de variație a submodulului de amortizare.
40. Proiectarea/realizarea standului pentru determinarea caracteristicilor de variație a submodulului de amortizare.
41. Conceperea algoritmului de lucru pentru elaborarea unui program structurat în proceduri, dedicat conducerii unui **mI\_IU** încorporat într-un stand de investigare a aplicațiilor “contact-task”, respectiv etalonării submodulului de amortizare.
42. Elaborarea (sub **VISUAL BASIC 6.0**) a mediului soft **SOFMINT\_AC-T** cu interfață grafică prietenoasă (de tip “GUI”) pe baza algoritmului elaborat în acest scop.
43. Conceperea algoritmului pentru elaborarea unui program/simulator-virtual specializat, structurat în proceduri, dedicat aplicațiilor “contact-task” cu **mI\_IU** încorporat.
44. Elaborarea (sub **VISUAL BASIC 6.0**) a simulatorului-virtual cu interfață grafică prietenoasă (de tip “GUI”) **SMILEC\_T** pe baza algoritmului elaborat în acest scop și integrarea acestuia în mediul **SOFMINT\_AC-T**.
45. Testarea comportamentului **mI\_IU** virtual cu ajutorul simulatorului virtual; concluziile rezultate au direcționat investigațiile experimentale.
46. Elaborarea modelelor matematice particularizate ale aplicației “contact-task” pe baza analizei cinetostatice a schemei funcționale a standului realizat și a legilor de conducere particularizate.
47. Adoptarea soluției unui sistem inerțial auto-compensator cu fluid pentru submodulul de masă pe baza analizei prealabile a capacitaților (insuficiente) de acțiune inteligentă a **mI\_IU** proiectat/realizat prin prisma componentelor funcționale existente.
48. Conceperea de simulatoare virtuale – în maniera clasică de conducere a aplicației - sub extensia **SIMULINK** a mediului **MATLAB 6.0 R12** și testarea funcționării **mI\_IU** cu ajutorul acestora.
49. Conceperea și testarea unui simulator (sub același mediu soft) cu conducere în tehnica Fuzzy: calitățile demonstrate în timpul testărilor - comparativ cu

metodele clasice – au dus la implementarea acestei tehnici în conducerea investigației experimentale.

50. Realizarea (în colaborare) a traductoarelor incrementale utilizând componente ale perifericelor de tip mouse. Se utilizează atât la măsurarea mijlocită a mărimilor de tip forță (măsoară în fapt deplasarea-săgeată a unor arcuri elicoidale etalonate) cât și a celor de tip deplasare propriu-zisă (a părții supuse forței preconizate  $F_p$ , și respectiv a masei de fluid dislocat prin auto-compensare).
51. Realizarea de experimentări:
  - ◇ determinarea variației coeficientului de amortizare la submodulul aferent;
  - ◇ analiza dinamică experimentală a submodulelor, respectiv a modului  $mI_{IU}$ ;
  - ◇ determinări experimentale la aplicația cu conducere inteligentă.
52. Aprecierea gradului de eficacitate a fiecărui parametru în combaterea inteligență a efectelor negative ale forței de contact.
53. Constatarea faptului că este posibilă o compensare inteligentă a forței de contact prin mijlocirea parametrilor de impedanță mecanică și estimarea limitărilor.
54. Constatarea faptului că eficiența cea mai mare se manifestă la nivelul submodulelor parametru de elasticitate, iar cea mai mare promptitudine la nivelul sistemului auto-compensator cu fluid.
55. Proiectarea 3D, cu pachetul **AUTOCAD&MECHANICAL DESKTOP** a modului **M\_IAC\_T** cu 6 grade de libertate și reproiectarea  $mI_{IU}$  încorporat în acesta.

De menționat este faptul că rezultatele activității de elaborare a lucrării de doctorat au fost valorificate de către autor și prin publicarea a 22 lucrări științifice (singur), precum și 8 lucrări și o carte de tip monografic (în colaborare). Titlurile acestora se regăsesc în bibliografia prezentei lucrări.