MINISTERUL EDUCATIEI, CERCETARII, TINERETULUI SI SPORTULUI

UNIVERSITATEA TEHNICĂ
DIN CLUJ-NAPOCA

FACULTATEA DE MECANICĂ

Ing. Sergiu BERIAN

TEZA DE DOCTORAT

CERCETĂRI PRIVIND POTENȚIALUL TRANSDISCIPLINAR AL MECATRONICII

COMPONENȚA
Comisiei de doctorat
Numită prin Ordinul rectorului Universității Tehnice din Cluj-Napoca,
Nr. 326/09.03.2010

PREŞEDINTE:	Prof.dr.ing. **Nicolae BURNETE** Decan, Facultatea de Mecanică Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca;
CONDUCĂTOR ŞTIINȚIFIC:	Prof.dr.ing. **Vistrian MĂTIEŞ** Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca;
REFERENȚI :	Acad.Prof.univ.dr.fiz.Dr.H.C.mult. **Basarab NICOLESCU** Universitatea Babeş-Bolyai, Cluj-Napoca;
	Prof.dr.ing.Dr.H.C. **Ion VIŞA** Universitatea „Transilvania” din Braşov;
	Prof.dr.ing.Dr.H.C.mult. **Radu MUNTEANU** Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca.

2010

CUPRINS

INTRODUCERE 7

1 GÂNDIREA SISTEMICĂ ŞI IDEALUL UNITĂŢII CUNOAŞTERII ÎN FIZICA CLASICĂ ŞI ÎN MECANICA CUANTICĂ 19
1.1 Introducere 19
1.2 Paradigma mecanicistă 19
1.3 Cauzalitate locală şi predictibilitate 21
1.4 Legături, determinism şi integrabilitate în mecanica clasică 22
1.5 Separarea subiect-obiect şi caracterul antimetafizic al scientismului 24
1.6 Apariția mecanicii cuantice: salt de la continuu la discontinuu 27
1.7 Particula cuantică şi unitatea prin complementaritate 29
1.8 Experiența celor două fante şi limitele fizicii clasice 33
1.9 Principiul lui Heisenberg şi sfârşitul cauzalității locale 35
1.10 Non-separabilitatea cuantică subiect-obiect 37
1.11 Paradoxul Einstein-Podolski-Rosen, non-separabilitatea cuantică şi cauzalitatea globală 38
1.12 O viziune unitară asupra lumii şi cunoaşterii: bootstrap, complexitate şi gândire sistemică 40
1.13 Concluzii 42
1.14 Contribuții personale 43

2 VALENȚELE INTEGRATOARE ALE ABORDĂRII TRANSDISCIPLINARE 45
2.1 Introducere 45
2.2 Controversa privind natura judecăților matematice 45
2.3 Tipuri şi niveluri în sistemul logic formal al lui Frege 46
2.4 Primele fisuri în sistemul logic formal. Paradoxul lui Russell 47
2.5 Ordonarea obiectelor logice pe niveluri în teoria tipurilor a lui Russell 50
2.6 Paradoxuri semantice şi niveluri de limbaj în modelul lui Tarski 51
2.7 Teorema de incompletitudine a lui Gödel şi potențialul creativ al paradoxului 53
2.8 Apropierea logicii de Realitate prin restrângerea intuiționistă a valabilității principiului terțului exclus 54
2.9 Logicile polivalente şi principiul terțului inclus. 56
2.10 Epistemologia şi logica lui Ştefan Lupaşcu 58
2.11 Viziunea transdisciplinară a lui Basarab Nicolescu 64
2.12 Concluzii 68
2.13 Contribuții personale 69

3 INFORMAȚIE, ENTROPIE, ORGANIZARE ŞI COMPLEXITATE ÎN MECATRONICĂ ŞI ÎN LUMEA VIE 71
3.1 Introducere 71
3.2 Entropia statistică şi dezordinea 71
3.2.1 Entropia statistică 71
3.2.2 Expresia entropiei statistice în cazul distribuției elementelor unui sistem pe clase 73
3.2.3 Entropia ca măsură a dezordinii unui sistem izolat 74
3.3 Entropia informațională şi incertitudinea 75
3.3.1 Informație şi semnal. Relația substanță-energie-informație 75
3.3.2 Rolul informației în mecatronică 77
3.3.3 Entropia informațională 78
3.3.4 Proprietățile şi semnificația entropiei informaționale 79
3.4 Entropia socială şi diversitatea sistemelor mecatronice multiagent 82
3.4.1 Diversitatea sistemelor sociale 82
3.4.2 Entropia socială ca măsură a diversității unui sistem mecatronic multiagent 83
3.4.3 Diversitate şi performanță în cazul sistemelor mecatronice multiagent 85
3.5 Informație, organizare, simetrie şi complexitate 86
3.5.1 Legătura dintre informație şi simetrie 86
3.5.2 Ordine, organizare şi complexitate în lumea vie 87
3.5.3 Rolul pompei ionice Na-K în organizarea organismului uman 90
3.6 Concluzii 93
3.7 Contribuții personale 93

4 AUTOORGANIZAREA SISTEMELOR MECATRONICE COMPLEXE PRIN HOMEOKINESIS ŞI STIGMERGIE 95
4.1 Introducere 95
4.2 Entropia termodinamică şi ireversibilitatea 95
4.3 Teorema H şi entropia statistică. Starea de echilibru ca atractor 97
4.4 Ireversibilitatea ca măsură a limitării informației accesibile observației 98
4.5 Termodinamica de echilibru şi comportamentul sistemelor complexe 100
4.6 Producția de entropie în sistemele termodinamice deschise 101
4.7 Comportamentul sistemelor termodinamice deschise aflate aproape-de-echilibru 102
4.8 Echilibrul homeostatic în lumea vie şi în mecatronică 104
4.8.1 Staționaritate şi homeostază 104
4.8.2 Asigurarea echilibrului homeostatic al organismului uman prin mecanisme de feed-back negativ 106
4.8.3 Rolul feed-back-ului negativ în asigurarea echilibrului homeostatic al sistemelor mecatronice 107
4.8.4 Limitele echilibrului homeostatic în mecatronică 109
4.9 Autoorganizarea sistemelor deschise aflate departe-de-echilibru 110
4.9.1 Instabilitatea sistemelor termodinamice deschise din regiunea neliniară 110
4.9.2 Rolul feed-back-ului pozitiv în reacțiile chimice autocatalitice 111
4.9.3 Structurile disipative ca efect al autoorganizării sistemelor chimice aflate departe-de-echilibru 112
4.9.4 Reacții oscilante în lanțul glicolitic 113
4.9.5 Puncte de bifurcație, ruperi de simetrie şi multistabilitate 114

4.9.6 Agregarea amibelor acrasiale ca formă de manifestare a autoorganizării unui sistem biologic ... 115
4.9.7 Celulele Bénard şi interdependența dintre nivelul microscopic şi cel macroscopic în urma autoorganizării ... 117
4.9.8 Noțiunea de „sistem deschis" în viziunea lui Bertalanffy. Informație şi negentropie ... 118
4.9.9 Complexitate, emergență şi autoorganizare ... 119
4.9.10 Ştiința complexității şi non-separabilitatea subiect-obiect ... 121
4.9.11 Dubla legătură cauzală dintre nivelul microscopic şi cel macroscopic ale unui sistem complex capabil de autoorganizare ... 122
4.9.12 Emergență, sinergie şi sinergetică ... 123
4.9.13 Autoorganizarea sistemelor complexe şi riscul apariției haosului ... 125
4.9.14 Adaptabilitatea sistemelor cibernetice prin autoorganizare ... 126
4.10 Rolul principiului homeokinetic în autoorganizarea sistemelor mecatronice complexe ... 128
4.10.1 Echilibrul homeostatic şi stabilitatea homeokinetică ... 128
4.10.2 Relația dintre autonomie şi adaptabilitate în cazul agenților inteligenți ... 129
4.10.3 Autoorganizarea comportamentului unui robot pe baza principiului homeokinetic ... 130
4.10.4 Caracterul transdisciplinar al conceptului de homeokinesis ... 133
4.11 Autoorganizarea prin stigmergie a sistemelor mecatronice multiagent ... 134
4.11.1 Inteligența colectivă ... 134
4.11.2 Inteligența swarm şi organizarea stigmergică a sistemelor colective ale lumii vii ... 135
4.11.3 Autoorganizarea stigmergică a sistemelor multiagent ... 138
4.11.4 Autoorganizarea prin stigmergie a sistemelor mecatronice multiagent ... 139
4.12 Concluzii ... 144
4.13 Contribuții personale ... 146

5 IDENTITATEA TRANS-TEMATICĂ A MECATRONICII. MODELUL HEXAGONAL PENTRU EDUCAȚIE MECATRONICĂ INTEGRALĂ ... 147
5.1 Introducere ... 147
5.2 Poziția lui Grimheden privind natura şi evoluția mecatronicii ... 148
5.2.1 Cele patru aspecte ale mecatronicii ... 148
5.2.2 Evoluția mecatronicii ... 149
5.3 Identitatea mecatronicii în lumina metodologiei transdisciplinare ... 150
5.3.1 Noțiunea de „concept thematic" ... 150
5.3.2 Identitatea trans-tematică a mecatronicii ... 151
5.4 Mecatronica – suport pentru educația integrală ... 153
5.4.1 Raportul Delors, transdisciplinaritatea şi educația integrală ... 153
5.4.2 Dublul aspect al legitimității mecatronicii ... 153
5.4.3 Cele două dimensiuni ale selecției şi ale comunicării mecatronicii ... 155
5.4.4 Modelul hexagonal pentru educație mecatronică integrală ... 156
5.4.5 Concursul de fizică şi inventică Irenaeus – mijloc de stimulare a creativității şi flexibilității elevilor prin munca în echipă ... 157
5.5 Concluzii ... 159
5.6 Contribuții personale ... 160

6 NOI DESCHIDERI ÎN STUDIUL FIZICII DATORATE MECATRONICII 161
6.1 Introducere 161
6.2 Analiza structurii şi funcționării sistemelor mecatronice – suport tehnologic aplicativ pentru studiul fizicii 161
6.3 Purtători de informație 163
6.4 Aplicații în tehnologie ale legilor şi fenomenelor specifice fizicii 165
6.4.1 Potențiometrul ca traductor de poziție 165
6.4.2 Legea lui Faraday şi senzorul inductiv de proximitate..... 166
6.4.3 Condensatorul plan ca traductor de poziție. Senzori capacitivi de proximitate..... 167
6.4.4 Legea lui Hooke şi traductorii rezistivi de forță..... 171
6.4.5 Fenomenul de reflexie totală şi senzorii tactili optici cu devierea luminii..... 173
6.4.6 Presiunea şi traductorii piezoelectrici. Senzori piezoelectrici..... 174
6.4.7 Relația dintre câmpul electric şi deformarea mecanică în cazul actuatorilor piezoelectrici 177
6.4.8 Oscilațiile mecanice şi motorul ultrasonic cu undă progresivă.. 179
6.4.9 Dinamica fluidelor şi actuatorii electro şi magnetoreologici. 180
6.4.10 Modificarea structurii cristaline a aliajelor cu memoria formei prin schimbarea temperaturii. Actuatori pe bază de aliaje cu memoria formei. 183
6.4.11 Efectul fotoelectric şi actuatorii optici 186
6.4.12 Conceptul clasic de legătură şi legătura informațională..... 187
6.4.13 Actuatorul Lorentz – cuplă cinematică informațională..... 189
6.5 Concluzii 191
6.6 Contribuții personale 192

7 CERCETĂRI EXPERIMENTALE..... 193
7.1 Considerații generale..... 193
7.2 Structura platformei mecatronice portabile..... 193
7.3 Modelarea sistemului 195
7.3.1 Analiza cinematică a robotului..... 195
7.3.2 Analiza spațiului de lucru..... 200
7.3.3 Analiza dinamică a robotului 201
7.3.4 Modelul virtual al robotului 207
7.3.5 Simularea robotului..... 207
7.4 Testarea sistemului pe baza tehnologiei de prototipare rapidă a controlului 212
7.5 Implementarea sistemului 214
7.6 Concluzii 218
7.7 Contribuții personale..... 219

8 CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII..... 221
8.1 Concluzii generale..... 221
8.2 Contribuții personale. Valorificarea rezultatelor cercetării..... 221
8.3 Noi direcții de cercetare în domeniu 224

BIBLIOGRAFIE 225

INTRODUCERE

Motto: „*Pătrunderea gândirii complexe şi transdisciplinare în structurile, programele şi zonele de influenţă ale Universităţii îi vor permite evoluţia către misiunea sa uitată astăzi – studierea Universalului*”.
(Basarab Nicolescu)

Dacă Stephen Hawking are dreptate, secolul care tocmai a început va aparține Complexității [259]. Complexitatea este însă strâns legată de ideea non-separabilității, care „pare să fie un principiu esențial a tot ceea ce este profund în lume” [183]. În consecință, cercetarea şi educația viitorului trebuie să fie modelate de liniile de forță ale complexității şi non-separabilității. Apariția mecatronicii, la începutul deceniului al optulea al secolului trecut, reprezintă o dovadă în acest sens, întrucât discipline care, nu demult, păreau separate, au fost integrate într-un ansamblu complex şi coerent. Acest potențial integrator al mecatronicii este evidențiat cât se poate de limpede în definiția formulată, în 1986, de către Comitetul Consultativ pentru Cercetare şi Dezvoltare Industrială al Comunității Europene (Doc IRDAC PM 17-10-86/3) [162], comitet care recunoaşte că mecatronica este una din nevoile majore pentru cercetarea europeană şi pentru programele educaționale: „Mecatronica este o îmbinare sinergetică între: ingineria mecanică de precizie, controlul electronic şi gândirea sistemică în proiectarea produselor şi proceselor. Este o tehnologie interdisciplinară care uneşte disciplinele de bază amintite şi include deopotrivă domenii, care, altfel, normal, nu ar putea fi asociate”. În anii care au urmat, în aproape toate țările din CE au fost lansate programe care aveau drept scop promovarea filosofiei mecatronice în educație, cercetare şi tehnologie. Un exemplu reprezentativ este proiectul privind educația mecatronică din cadrul programului ADAPT, proiect inițiat în 1995 de un grup de universități din mai multe țări comunitare [162]. Proiectul a vizat formarea inițială, formarea continuă şi reconversia profesională, urmărind în principal promovarea interdisciplinarității în educație şi formare.

În urma evoluției tehnologice, conținutul termenului de mecatronică s-a îmbogățit permanent cu noi sensuri: filosofie, ştiința maşinilor inteligente, mediu educațional pentru integrare în societatea bazată pe cunoaştere [161]. Astfel, în prezent, mecatronica, prin caracterul său integrator, sinergic, transcende limitele unei singure discipline, reprezentând o „viziune globală în domeniul tehnologic” [162]. Apariția mecatronicii impune însă necesitatea articulării, deopotrivă la nivel universitar şi preuniversitar, a unei noi paradigme educaționale, centrată pe calitate mai degrabă decât pe cantitate, care să creeze cadrul necesar formării unor elevi şi studenți cu spirit inovator, dotați cu creativitate şi flexibilitate în gândire şi practică.

Lucrarea se înscrie pe linia acestui demers, prin faptul că propune o abordare transdisciplinară a mecatronicii, din perspectiva metodologiei dezvoltate de Basarab Nicolescu, a cărei finalitate este înțelegerea lumii prin unitatea cunoaşterii.

Demersul ştiințific a vizat atingerea următorului *obiectiv general*:

- Dezvoltarea şi explicitarea fundamentelor ştiinţifice şi a metodologiei privind potențialul transdisciplinar al mecatronicii şi valorificarea acestuia în demersurile pentru vectorizarea inovării în domeniul educațional, precum şi în activitățile de cercetare.

Acestui obiectiv general îi sunt subordonate următoarele patru *obiective specifice*:

- Explicitarea conceptului de „complexitate", fundamentarea şi explicitarea valențelor integratoare ale abordării transdisciplinare.
- Analiza şi caracterizarea procesului de autoorganizare a sistemelor mecatronice complexe prin stigmergie şi homeokinesis.
- Explicitarea identității trans-tematice a mecatronicii şi elaborarea modelului hexagonal pentru educație mecatronică integrală.
- Definirea unor noi deschideri în studiul fizicii datorate evoluției tehnologiei şi evidențierea potențialului creativ al utilizării platformelor mecatronice în cercetare şi educație.

În continuare, se prezintă enunțuri, definiții şi scurte explicații ale unor termeni şi concepte fundamentale, care se regăsesc în conținutul tezei:

- *Paradoxul lui Russell* – „mulțimea formată din toate mulțimile care nu se conțin ca element se conține pe ea însăşi atunci când nu se conține şi invers". Un exemplu de mulțime care nu se conține pe ea însăşi este clasa tuturor mamiferelor, care nu e un mamifer, în timp ce, de pildă, mulțimea formată din toate noțiunile abstracte e, la rândul ei, o noțiune abstractă, deci se conține ca element. Încercând să găsească o rezolvare a paradoxului, Russell a propus teoria tipurilor, în care obiectele logice sunt ierarhizate pe niveluri.
- *Paradox semantic* – un tip aparte de paradox, care decurge din faptul că nu se distinge între situația în care o expresie e utilizată pentru a vorbi despre un obiect independent de aceasta şi situația în care obiectul formulării este expresia însăşi. De exemplu, dacă se afirmă că „mecanismul este defect", desemnăm mecanismul ca obiect, în timp ce, în propoziția „cuvântul «mecanism» are trei silabe", obiectul desemnat este expresia însăşi. Pentru a rezolva acest tip de paradox, Tarski a introdus nivelurile de limbaj.
- *Teorema de incompletitudine a lui Gödel* – un sistem formal necontradictoriu (suficient de complex încât aritmetica să poată fi formalizabilă în el), este incomplet, în sensul că se pot construi riguros propoziții nedecidabile. Lucrarea de față susține ideea că acestă teoremă, prin faptul că demonstrează incompletitudinea oricărui sistem logic formal, reprezintă o deschidere către o nouă abordare a realității.
- *Principiul antagonismului* – postulat fundamental al logicii lui Ştefan Lupaşcu, potrivit căruia orice sistem energetic este supus unei perechi de dinamisme antagoniste în aşa fel încât actualizarea unuia să implice potențializarea celuilalt. Antagonismul datorat alternanței actualizare-potențializare conduce la un echilibru dinamic al sistemelor, stabilitatea, rezistența unui sistem, fiind cu atât mai mare cu cât le este mai greu forțelor antagoniste de a scăpa din acest echilibru.
- *Dualismul antagonist omogenizare-eterogenizare* – dualism introdus de Ştefan Lupaşcu, care afirmă că tendința de eterogenizare, de diversificare, instaurată prin intermediul principiului lui Pauli, acționează împotriva tendinței omogenizatoare a

energiei care decurge din existența principiului al doilea al termodinamicii. Viața nu există decât ca urmare a acestui dualism contradictoriu, permanent, omogenizare-eterogenizare. Potrivit lui Basarab Nicolescu, atât diferențierea extremă cât şi realizarea unei absolute uniformizări conduc la o eternă nemişcare, la moarte cosmică. Dualismului omogenizare-eterogenizare îi corespunde, în logica lupasciană, dualismul logic identitate-diversitate.

- *Starea T* – concept esențial al logicii şi epistemologiei lui Ştefan Lupaşcu, desemnând starea de egală potențializare şi actualizare reciprocă, către care tind cele două dinamisme antagoniste în timpul trecerii de la actual la potențial şi invers. Starea T corespunde unui antagonism maxim, unei densități maxime de energie, sau, informațional vorbind, unei organizări maxime. Starea T este totodată şi terțul inclus, cea de-a treia valoare a logicii trivalente lupasciene, valoarea de „nici adevărat nici fals". În metodologia transdisciplinară fundamentată de Basarab Nicolescu, unificarea contradictoriilor A şi non-A, situate la un anumit nivel de Realitate, poate fi realizată doar prin intermediul stării T, situată la nivelul proxim superior de Realitate.
- *Transdisciplinaritatea* – conform definiției lui Basarab Nicolescu, desemnează „ceea ce este în acelaşi timp între discipline, înăuntrul diferitelor discipline şi dincolo de orice disciplină". Transdisciplinaritatea diferă de pluridisciplinaritate (care se referă la studiul, de către mai multe discipline simultan, al unui obiect care aparține unei discipline) şi de interdisciplinaritate (care vizează aplicarea metodelor specifice unei discipline pe teritoriul altor discipline). O caracteristică esențială a transdisciplinarității este faptul că răspunde nevoii de cunoaştere unitară a omului, finalitatea ei fiind înțelegerea lumii prezente prin unitatea cunoaşterii.
- *Nivel de Realitate* – potrivit definiției lui Basarab Nicolescu, reprezintă „un ansamblu de sisteme invariant la acțiunea unui număr de legi generale". Trecând de la un nivel de Realitate la altul (de pildă, de la cel macrofizic la cel microfizic), legile şi conceptele fundamentale se schimbă radical, existând deci o ruptură, o discontinuitate între două niveluri proxime.
- *Postulatele metodologiei transdisciplinare* – cele trei postulate, înrădăcinate în descoperirile ştiinței moderne, pe care este construită metodologia transdisciplinară a lui Basarab Nicolescu. Primul postulat (ontologic) afirmă faptul că în Natură şi în cunoaşterea Naturii există diferite niveluri de Realitate şi de percepție. Conform celui de-al doilea postulat (logic), trecerea de la un nivel de Realitate la altul se face cu ajutorul logicii terțului inclus. Potrivit celui de-al treilea postulat (epistemologic), inspirat de ipoteza bootstrap-ului din mecanica cuantică, fiecare nivel de Realitate este ceea ce este pentru că toate celelalte niveluri de Realitate există simultan.
- *Entropia statistică* – Mărime fizică a cărei formulă este $S = k \ln W$, unde W reprezintă ponderea macrostării în care se află sistemul, adică numărul de microstări ale sistemului compatibile cu această macrostare. Potrivit celui de-al doilea principiu al termodinamicii, orice sistem izolat tinde să ajungă în starea macroscopică (de echilibru) cu cea mai mare probabilitate de realizare, macrostare căreia i se asociază numărul maxim de microstări compatibile şi, deci, entropia statistică maximă.
- *Entropia informațională* – o funcție matematică (introdusă de Shannon) care, dat fiind un set de evenimente disjuncte $X = \{X_1, X_2, ..., X_n\}$, cu probabilitățile de realizare $p = \{p_1, p_2, ..., p_n\}$, descrie informația medie pe eveniment, întrucât e o

măsură a reducerii (în medie) a incertitudinii unui receptor de informație. Formula entropiei informaționale este $H = -\sum_{i=1}^{n} p_i \log_2 p_i$. Se demonstrează că incertitudinea receptorului este cu atât mai mare cu cât distribuția probabilităților de realizare a evenimentelor e mai aproape de uniformitate (distribuție echiprobabilă), caz în care incertitudinea devine maximă.

- *Entropia socială* – funcție matematică care măsoară diversitatea sistemelor sociale în general. Formula de calcul a entropiei sociale este aceeaşi cu cea a entropiei informaționale, doar că p_i reprezintă probabilitatea de a găsi un individ al sistemului în clasa *i* a acestuia. Entropia socială este nulă pentru sisteme sociale omogene (diversitate minimă), iar valoarea maximă o atinge în cazul grupurilor sociale eterogene care au în toate clasele acelaşi număr de indivizi (diversitate maximă). Entropia socială poate fi utilizată ca o măsură a diversității sistemelor mecatronice multiagent, iar diversitatea poate fi corelată (pozitiv sau negativ) cu eficiența acestora.
- *Funcția informație* – funcție (introdusă de Shu-Kun Lin) egală cu diferența dintre valoarea maximă posibilă a entropiei unui sistem şi valoarea entropiei sistemului la momentul respectiv: $I = S_{\max} - S$. Întrucât informația *I* a unui sistem izolat scade, iar simetria lui (de translație şi de rotație) creşte pe măsură ce acesta se apropie de echilibru, sistemele caracterizate de o valoare ridicată a informației *I* au un grad scăzut de simetrie (adică sunt pronunțat asimetrice). Prin urmare, cu cât un sistem e mai organizat, mai structurat, el poate „înmagazina" o cantitate mai mare de informație, ca o consecință a asimetriilor de care sistemul dispune (deşi asimetria nu garantează, doar prin ea însăşi, existența informației).
- *Structuri complexe* – structuri caracterizate prin aperiodicitate (elementele constitutive nu se repetă cu regularitate, ordonat, simplu şi monoton), specificitate (succesiunea constituenților e bine definită) şi asimetrie. Semnul distinctiv al viului este existența structurilor complexe şi nu a ordinii (care e doar un concept statistic). Datorită aportului informațional al structurilor complexe, acestea sunt specifice sistemelor înalt organizate (de tipul macromoleculei ADN).
- *Sisteme termodinamice aflate aproape-de-echilibru* – sisteme care se supun legilor termodinamicii liniare de non-echilibru, întrucât se află suficient de aproape de echilibru pentru ca relațiile dintre fluxurile generalizate (conducția, reacția chimică, difuzia etc.) şi forțele generalizate (gradientul de temperatură, gradientul de concentrație, afinitatea etc.) să fie liniare. Potrivit teoremei producției minime de entropie (formulată de Prigogine), orice sistem aflat în regiunea liniară evoluează către o stare staționară (stare de non-echilibru în care sistemul transferă entropie mediului exterior), stare în care producția de entropie este minimă. Starea staționară este stabilă în raport cu perturbațiile locale, adică, odată atinsă valoarea minimă a producției de entropie, sistemul nu mai poate părăsi această stare.
- *Sisteme termodinamice aflate departe-de-echilibru* – sisteme care se supun legilor termodinamicii neliniare, aflându-se atât de departe de echilibru încât relațiile dintre fluxurile generalizate şi forțele generalizate sunt neliniare.
- *Homeostaza* (*homeostasis*) – termen (introdus de Cannon, care s-a referit inițial doar la sistemele din lumea vie) care reprezintă proprietatea unui sistem de a reacționa la perturbațiile apărute în mediul exterior, cu scopul de a-şi menține structura şi funcțiile. Echilibrul homeostatic al unui sistem deschis (în particular al unui sistem mecatronic) este consecința mecanismului de feed-back negativ, prin

care sistemul tinde să neutralizeze efectul perturbațiilor cu efect destabilizator. Starea către care tinde sistemul fiind caracterizată pe ansamblu de staționaritate, echilibrul homeostatic are un caracter în esență pasiv, întrucât este incapabil de a folosi perturbațiile externe pentru a genera noi structuri.

- *Autoorganizarea sistemelor deschise* – fenomenul prin care anumite sisteme aflate departe-de-echilibru realizează, prin autocataliză (feed-back pozitiv), o amplificare a unor mici fluctuații externe care conduce, prin bifurcații (care au loc în puncte critice dincolo de care sistemul poate accede la mai multe stări staționare stabile) şi ruperi de simetrie, la apariția unor pattern-uri spațio-temporale stabile (numite structuri disipative). Fluctuația (amplificată progresiv prin feed-back-ul pozitiv) se stabileşte inițial într-o zonă limitată (fenomenul de nucleație) după care, dacă dimensiunea acestei zone depăşeşte valoarea critică, fluctuația se răspândeşte în tot sistemul. Una dintre caracteristicile esențiale specifice sistemelor capabile de autoorganizare este multistabilitatea (coexistența stărilor staționare stabile). Exemple de sisteme capabile de autoorganizare sunt: reacțiile chimice de tip Brusselator, colectivele de amibe acrasiale, celulele Bénard, unele sisteme colective de insecte, unele sisteme mecatronice multiagent etc.
- *Sistem complex* – ansamblu numeros de entități simple aflate în interacțiune, care permite apariția proprietăților emergente.
- *Emergența* – caracteristică fundamentală a sistemelor capabile de autoorganizare, care constă în apariția, la nivel global (al întregului sistem), a unor structuri (pattern-uri) noi, coerente, ale căror proprietăți, numite emergente, nu pot fi reduse la proprietățile subsistemelor cu grad inferior de organizare. Proprietățile emergente sunt rezultatul integrării activității subsistemelor, manifestată sub forma unei organizări globale, ceea ce ne indică faptul că, într-un sistem, cele două nivele de organizare, microscopic şi macroscopic, nu pot fi gândite separat. Datorită faptului că proprietățile emergente se manifestă prin efecte sinergice (relațiile dintre entități pot genera efecte care n-ar putea apărea în cazul în care aceste entități ar acționa individual) sistemele complexe devin, în urma autoorganizării, altceva decât simpla sumă a părților sale.
- *Limita haosului (edge of chaos)* – zonă îngustă, în care funcționează sistemele cibernetice complexe adaptabile capabile de autoorganizare, situată între echilibrul static, neproductiv (stare care permite definirea unor valori medii stabile în timpul fluctuațiilor) şi haosul turbulent de non-echilibru (stare în care comportamentul sistemului îşi pierde reguralitatea, devenind impredictibil).
- *Stabilitatea homeokinetică* – reprezintă comportarea unui sistem care, deşi funcționează în contact cu un mediu exterior aflat în continuă schimbare, reuşeşte, fluctuând între limite acceptabile, prin disipare de energie, să atingă o stare aflată departe-de-echilibru, caracterizată de o organizare internă cu înalt grad de complexitate.
- *Comportamentul (behaviour) unui robot* – pattern spațio-temporal care emerge în urma interacțiunii dintre robot şi mediul său exterior.
- *Principiul homeokinetic* – principiu care asigură un mecanism de autoorganizare (numită autoorganizare homeokinetică) a comportamentului unui robot, în cursul căruia scopul acestuia nu este doar atingerea unei stări staționare (similare echilibrului homeostatic), ci acela de a realiza un regim dinamic intern al agentului, care se manifestă prin emergența unor comportamente specifice, corelate cu schimbările apărute în mediul exterior. Autoorganizarea homeokinetică asigură un comportament în care agentul evită extremele: el nu va opta nici spre siguranța

oferită de un comportament perfect modelat (ceea ce ar echivala cu dispariția tendinței de explorare a mediului exterior), dar nici nu va explora excesiv mediul exterior fără a utiliza suficient cunoştințele dobândite (ceea ce ar conduce către un comportament turbulent haotic, complet imprevizibil).

- *Insecte sociale* – colective de insecte având trei caracteristici: există în colectiv o diviziune a muncii, indivizii sunt capabili să coopereze în vederea realizării anumitor sarcini şi în interiorul colectivității se întâlnesc cel puțin două generații succesive active.
- *Inteligența colectivă* – expresie (introdusă de Wheeler) care desemnează o formă de inteligență proprie colectivelor de insecte sociale care sunt capabile, fără a urma un plan prestabilit şi utilizând doar informația locală, să construiască structuri complexe şi coerente la nivel global, structuri care reprezintă pattern-ul emergent rezultat în urma unor interacțiuni elementare insectă-insectă, precum şi insectă-mediu înconjurător. Exemple de astfel de colective sunt termitele *Macrotermes subhyalinus*, furnicile *Leptothorax albipennis* etc.
- *Inteligența swarm* – sintagmă (propusă de Beni şi Wang) care desemnează o formă de inteligență specifică unui sistem colectiv format din agenți relativ simpli, autonomi (fiecare agent în parte reprezentând un subsistem care interacționează cu mediul înconjurător fără a urma un plan prestabilit), care e capabil să se autoorganizeze, în urma interacțiunilor cu caracter local de tip agent-agent, precum şi de tip agent-mediu înconjurător. Organizarea sistemelor swarm se produce descentralizat, adică în lipsa oricărei influențe externe cu caracter coercitiv.
- *Stigmergie* – concept (introdus de Grassé) care desemnează o formă indirectă de comunicare între indivizii unui colectiv dotat cu inteligență swarm, prin care, deşi agenții acționează independent, comportamentul colectiv este stimulat de urmele lăsate de către agenți în mediul exterior. Datorită comunicării stigmergice, agenții nu îşi coordonează în mod direct munca, ci, într-un fel, ei sunt ghidați de aceasta (*stigma* – stimul; *ergon* – lucru, muncă). Procesul stigmergic reprezintă o succesiune de secvențe comportamentale de tip stimul-răspuns care contribuie la coordonarea dintre insecte, mediul exterior având rol de canal de comunicare. În lucrarea de față se prezintă modul în care unele sisteme mecatronice multiagent formate din roboți identici, simpli, se pot autoorganiza prin stigmergie, grupând obiecte sub forma unor pattern-uri spațiale similare celor create de sistemele colective ale lumii vii.
- *Plan contingent* – expresie (introdusă de Holton) care desemnează un plan cu două dimensiuni (necesar oricărui discurs ştiințific) în care orice concept sau afirmație ştiințifică are, deopotrivă, o relevanță empirică (privind fenomenele) şi una analitică (privind judecățile matematice şi ale logicii pure).
- *Themata* – presupoziții ontologice fundamentale, inconştiente în general, care, deşi nu pot fi reduse la observații empirice sau judecăți analitice, influențează, totuşi, în mod determinant gândirea cercetătorilor. După cum afirmă Basarab Nicolescu, *themata* sunt ascunse chiar şi de cel ce le foloseşte şi „se referă la cea mai intimă şi profundă parte implicată în geneza unei idei ştiințifice". Dimensiunea acestor *themata* reprezintă, în viziunea lui Holton, o a treia axă care, adăugată planului contingent, formează un spațiu tridimensional. În timp ce planul contingent e suficient atunci când avem de-a face cu un discurs pur ştiințific, trebuie să utilizăm acest spațiu tridimensional de câte ori dorim să facem o analiză completă, inclusiv de natură istorică, sociologică sau epistemologică, a unor concepte, procese ori abordări ştiințifice.

- *Concept thematic* – e analog, în spațiul tridimensional format de planul contingent completat cu dimensiunea pentru *themata*, unei linii a cărei proiecție pe axa thematică are o valoare semnificativă.
- *Cuplă cinematică informațională* – totalitatea modalităților de interacțiune dintre două elemente cinematice rigide. În teoria clasică a mecanismelor de control, cupla cinematică este definită ca legătura mobilă, directă, dintre două elemente cinematice, care are ca scop limitarea libertăților de mişcare relative dintre acestea şi transmiterea mişcării de la un element la altul. Din perspectiva mecatronicii însă, interacțiunea dintre elementele cinematice se poate realiza şi altfel decât prin contact mecanic nemijlocit şi anume prin purtătorii de informație (sarcini electrice, fotoni etc.). Astfel, se poate vorbi de existența unor legături informaționale între unele elemente cinematice. Dacă rolul purtătorilor de informație este jucat de câmpuri (electrice, magnetice etc.), acestea pot fi numite câmpuri informaționale. În cazul în care mai multe elemente cinematice mobile sunt legate între ele prin intermediul unor cuple cinematice informaționale se formează un lanț cinematic informațional.

În cele ce urmează se prezintă, sintetic, conținuturile capitolelor tezei.

Capitolul 1 – „**GÂNDIREA SISTEMICĂ ŞI IDEALUL UNITĂȚII CUNOAŞTERII ÎN FIZICA CLASICĂ ŞI ÎN MECANICA CUANTICĂ**" – reprezintă o abordare prin care s-a argumentat ideea potrivit căreia convergența mecanicii cuantice cu teoria sistemelor se asigură prin intermediul teoriei bootstrap-ului şi al complexității. Astfel, din perspectiva metodologiei propuse de Basarab Nicolescu, s-a evidențiat caracterul transdisciplinar al abordării sistemice. În plus, în contextul promovării cunoaşterii, văzute ca proces unic, nefragmentat, s-a introdus noțiunea de complexitate, cu profunde implicații asupra organizării şi autoorganizării sistemelor mecatronice.

Pentru început, s-a prezentat modul în care s-a conturat paradigma scientistă, dominată de imaginea unei lumi obiective, independente de subiectul cunoscător, în care totul se dorea a fi explicat prin intermediul determinismului laplacean, întemeiat pe conceptul de cauzalitate locală. S-au evidențiat apoi legăturile dintre această paradigmă şi atitudinea antimetafizică a finalului de secol XX. În continuare, s-a prezentat noul nivel al Realității, întemeiat pe noțiunea de discontinuitate: mecanica cuantică, al cărei caracter statistic, nedeterminist, este consecința dualității paradoxale a particulei cuantice şi a principiul lui Heisenberg. Existența corelațiilor nelocale, idee susținută de experimentul Einstein-Podolski-Rosen şi teorema lui Bell, a impus înlocuirea conceptului de cauzalitate locală cu cel de cauzalitate globală. În consecință, lumea mecanicii cuantice se dovedeşte a fi una complexă, autoconsistentă.

Capitolul 2 – „**VALENȚELE INTEGRATOARE ALE ABORDĂRII TRANSDISCIPLINARE**" – evidențiază acordul care există între viziunea transdisciplinară a lui Basarab Nicolescu şi modelele russelliene, respectiv tarskiene, ale nivelurilor, unele concepte specifice mecanicii cuantice şi logica trivalentă a lui Ştefan Lupaşcu. În prima parte a capitolului s-a prezentat modul în care existența antinomiilor logice şi semantice a generat apariția teoriei russelliene a tipurilor şi nivelurilor de limbaj ale lui Tarski. În continuare, pornind de la teorema lui Gödel, s-a argumentat ideea potrivit căreia apropierea logicii de Realitate a avut loc prin restrângerea intuiționistă a valabilității principiului terțului exclus, precum şi faptul că deschiderea gödeliană a condus, prin exploatarea potențialul creativ al paradoxului, la conturarea unei noi abordări a Realității, în rezonanță cu metodologia transdisciplinară. În partea a doua a capitolului, după ce s-a prezentat influența paradigmei mecanicii cuantice asupra apariției unor sisteme logice polivalente, s-a analizat logica şi epistemologia lui Ştefan Lupaşcu. La baza sistemului logic trivalent al lui Lupaşcu, în care

operează principiul terțului inclus, se află ideea existenței unor energii antagoniste contradictorii, al căror antagonism maxim se realizează în starea T, care corespunde celei de-a treia valori logice de adevăr.

În final, s-a subliniat, pe măsura descrierii metodologiei transdisciplinare în viziunea lui Basarab Nicolescu, corespondența care există între această metodologie şi conceptele, modelele, teoriile specifice diverselor discipline, aşa cum au fost prezentate în acest capitolul şi în cel precedent al lucrării. Astfel, una dintre ideile evidențiate în capitolul de față este aceea că, tot aşa cum paradoxurile logice şi semantice pot fi evitate folosind teoria nivelurilor russelliene, respectiv tarskiene, contradicțiile mecanicii cuantice pot fi conciliate folosind un model structurat pe niveluri de Realitate.

Capitolul 3 – „**INFORMAȚIE, ENTROPIE, ORGANIZARE ŞI COMPLEXITATE ÎN MECATRONICĂ ŞI ÎN LUMEA VIE”** – este consacrat detalierii semnificațiilor matematice, fizice şi tehnice ale conceptului de informație, precum şi a legăturilor dintre informație, entropie, ordine, organizare şi complexitate. Pentru început, s-a argumentat, teoretic şi prin exemple concrete, ideea că entropia statistică e o măsură a dezordinii unui sistem, urmând ca entropia informațională să fie prezentată ca măsură a incertitudinii receptorului privind realizarea unui eveniment, iar entropia socială ca măsură a diversității sistemelor sociale şi mecatronice multiagent. În acest context, s-au evidențiat legăturile existente în mecatronică între informație şi semnal, precum şi între informație, substanță (materie) şi energie. S-au prezentat apoi câteva aplicații ale entropiei sociale în evaluarea diversității unor sisteme mecatronice complexe multiagent, precum şi corelațiile existente între diversitatea şi performanța unui astfel de sistem. În continuare, s-au detaliat implicațiile informației şi ale conținutului informațional asupra simetriei, ordinii, organizării şi complexității sistemelor în general şi a celor din lumea vie în particular. În final, s-a prezentat modul de funcționare a pompelor ionice, sisteme vii care utilizează informația pentru menținerea organizării la nivelul celulei.

Capitolul 4 – „**AUTOORGANIZAREA SISTEMELOR MECATRONICE COMPLEXE PRIN HOMEOKINESIS ŞI STIGMERGIE**” – reprezintă un studiu detaliat al autoorganizării sistemelor mecatronice deschise de complexitate ridicată. Autoorganizarea sistemelor deschise reprezintă, actualmente, unul dintre cele mai fertile domenii de investigație, fiind strâns legată de posibilitatea emergenței pattern-urilor coerente la nivel global în sistemele complexe. Sistemele mecatronice se disting printr-o remarcabilă complexitate, similară adesea cu cea a sistemelor din lumea vie. În consecință, cercetarea posibilităților prin care aceste sisteme se pot autoorganiza devine un imperativ, demers ce presupune implicit studiul termodinamicii neliniare, al teoriei complexității şi al ciberneticii.

În prima parte a capitolului s-a justificat faptul că sistemele termodinamice închise, precum şi cele deschise aflate aproape-de-echilibru ajung, în final, într-o stare de echilibru, respectiv într-o stare staționară caracterizată de o producție nenulă de entropie. Aceste stări nu favorizează manifestări spontane, care să conducă la apariția unor forme de autoorganizare, de complexitate sporită. În continuare, s-a definit echilibrul homeostatic al unui sistem şi s-a demonstrat că rolul acestuia este doar unul de menținere a funcționalității prin autoreglare, feed-back-ul negativ atenuând perturbațiile provenite din mediul exterior. Astfel, s-a justificat faptul că autoorganizarea este proprie sistemelor termodinamice aflate suficient de departe de echilibru încât comportarea lor neliniară să favorizeze amplificarea perturbațiilor externe prin feed-back pozitiv, amplificare care poate conduce, prin bifurcații şi ruperi de simetrie, la apariția unor pattern-uri spațio-temporale stabile. Descrierea teoretică a autoorganizării a fost completată prin exemple concrete de sisteme capabile de autoorganizare: modelul Brusselator (studiat de grupul Prigogine), agregarea amibelor acrasiale, celulele Bénard etc**.**

În cea de-a doua parte a capitolului s-au definit şi analizat unele noțiuni de bază ale teoriei sistemelor şi ciberneticii: negentropie, emergență, complexitate, sinergie, sinergetică. În continuare s-au evidențiat legăturile dintre aceste noțiuni, precum şi relațiile dintre acestea, pe de-o parte, şi informație, respectiv autoorganizare, pe de alta, şi s-a argumentat faptul că sistemele cibernetice adaptabile prin autorganizare funcționează la limita haosului (*edge of chaos*), zonă aflată între echilibrul homeostatic şi haosul turbulent de non-echilibru.

În ultima parte a capitolului s-au analizat două forme de autoorganizare a sistemelor mecatronice complexe: autoorganizarea homeokinetică a unui robot, respectiv autoorganizarea stigmergică a sistemelor mecatronice multiagent. În ceea ce priveşte prima formă de autoorganizare, s-a prezentat, teoretic şi aplicativ, procedeul prin care principiul homeokinetic asigură evoluția sistemului mecatronic spre un regim dinamic în care se realizează compromisul optim între creativitate şi stabilitate. Explicitările evidențiază similitudinile existente între autoorganizarea homeokinetică a sistemelor mecatronice şi comportamentul sistemelor din lumea vie. În continuare, s-a argumentat faptul că regimul dinamic atins de sistemul mecatronic prin autoorganizarea homeokinetică corespunde stării T a epistemologiei lupasciene, respectiv a metodologiei transdisciplinare.

Analiza autoorganizării stigmergice a sistemelor mecatronice multiagent a debutat cu definirea termenilor specifici acestei abordări: inteligență colectivă, inteligență swarm, stigmergie, după care s-au prezentat exemple concrete de autoorganizare a unor sisteme formate din insecte sociale. În continuare, s-au prezentat caracteristicile autoorganizării sistemelor multiagent şi s-a analizat modul în care un astfel de sistem mecatronic, format din roboți identici, simpli, se poate autoorganiza stigmergic, grupând obiecte sub forma unor pattern-uri spațiale similare sistemelor vii. În final, s-a demonstrat faptul că, datorită fluxului informațional, apar structuri spațio-temporale stabile, atât în interiorul sistemului mecatronic cât şi în mediul înconjurător, ceea ce arată că relația dintre sistemul mecatronic multiagent şi mediu este una sinergică, care favorizează emergența unui tip superior de integrare: integrarea informațională.

Capitolul 5 – „**IDENTITATEA TRANS-TEMATICĂ A MECATRONICII. MODELUL HEXAGONAL PENTRU EDUCAȚIE MECATRONICĂ INTEGRALĂ**” – este consacrat prezentării unei abordări proprii a mecatronicii, privită din perspectiva metodologiei transdisciplinare a lui Basarab Nicolescu. Mecatronica, prin caracterul său integrator, sinergic, transcende granițele unei singure discipline, ceea ce impune necesitatea articulării unei noi paradigme educaționale, care să creeze cadrul necesar formării unor ingineri şi profesori capabili să transmită elevilor şi studenților o viziune globală asupra domeniului tehnologic. Potrivit modelului lui Grimheden, începând cu momentul în care, istoric, nu exista nicio inteferență între disciplinele originare, mecatronica a parcurs şase stadii, la capătul cărora a dobândit o identitate tematică, o legitimitate funcțională, o selecție a aspectelor sale mai importante care se face vertical, prin exemplificare, ceea ce presupune o comunicare interactivă profesor-student.

În continuare, a fost propusă o perspectivă transdisciplinară asupra mecatronicii, potrivit căreia identitatea acesteia e fundamentată pe conceptul thematic (în sensul definit de Holton) de complexitate, concept care reprezintă una dintre fațetele unei idei-simbol (în sensul introdus de Basarab Nicolescu): principiul bootstrap-ului, care concepe natura ca pe o entitate globală, non-separabilă la nivel fundamental. Din această perspectivă, mecatronica este un domeniu deschis, întrucât identitatea ei e bazată pe o idee-simbol. În consecință, privită transdisciplinar, mecatronica transcende limitele unei simple identități tematice: identitatea mecatronicii, întemeiată pe conceptul thematic de complexitate, este una trans-tematică.

Raportul Delors, abordat transdisciplinar, subliniază nevoia unei educații integrale a fiecărei ființe umane, care presupune să învățăm să cunoaştem, să facem, să trăim împreună şi

să învățăm să fim, fără a neglija dimensiunea trans-personală. În acest context, s-a evidențiat faptul că importanța mecatronicii ca suport pentru educația integrală poate fi hotărâtoare dacă se articulează un model educațional dinamic, flexibil, care să evite extremele. Astfel, s-a propus modelul hexagonal pentru educație mecatronică integrală, conform căruia mecatronica se situează, simbolic, în zona de maximă rezistență, care corespunde unei triple stări T, stare în care contradictoriile nu sunt contrarii, datorită rolului conciliator al principiului terțului inclus. Acest model evidențiază non-separabilitatea, unitatea existentă între fațete ale mecatronicii care par ireconciliabile: legitimitate formală/legitimitate funcțională, selecție orizontală/selecție verticală, comunicare activă/comunicare interactivă.

În final, s-au prezentat motivele pentru care Concursul de fizică şi inventică Irenaeus reprezintă o modalitate concretă de dezvoltare a inventivității, creativității şi flexibilității elevilor de la nivel gimnazial şi liceal, atât prin activități individuale, cât şi prin lucrul în echipă. Doctorandul a participat la acest concurs în calitate de organizator, autor de probleme, profesor pregătitor pentru elevi şi membru al Comisiei de Evaluare.

Capitolul 6 – „**NOI DESCHIDERI ÎN STUDIUL FIZICII DATORATE MECATRONICII**” – cuprinde unele exemple concrete din care reiese faptul că, la baza aplicațiilor din domeniul mecatronicii, stau concepte, principii, legi şi fenomene ale fizicii. Pentru a evidenția deschideri aplicative către domenii diferite ale fizicii cuprinse în programele şcolare de fizică, s-a analizat funcționarea unor senzori şi actuatori de mai multe tipuri: funcționarea potențiometrului şi a condensatorului plan ca traductoare de poziție e bazată pe legile fundamentale ale electrocineticii şi electrostaticii; senzorii inductivi de proximitate constituie aplicații ale fenomenului de inducție electromagnetică, în speță ale legii lui Faraday şi Lenz; traductorii rezistivi de forță ilustrează interdependența dintre legea lui Hooke din mecanică şi variația rezistenței electrice; traductorii şi senzorii piezoelectrici evidențiază legăturile cauzale dintre presiune şi forță şi tensiunea, capacitatea, respectiv rezistența electrică; funcționarea unor senzori tactili optici e bazată pe legile specifice refracției şi reflexiei totale a luminii; modul în care câmpul electric influențează deformarea mecanică a unor materiale poate fi urmărit studiind structura şi principiile fizice ale actuatorilor piezoelectrici; studiul motorului ultrasonic cu undă progresivă presupune cunoaşterea ecuațiilor şi legilor oscilațiilor şi undelor mecanice; actuatorii electro şi magnetoreologici reprezintă aplicații ale dinamicii fluidelor în mecatronică; fenomene studiate la fizica solidului se regăsesc în analiza modificării structurii cristaline a aliajelor cu memoria formei datorită schimbării temperaturii, aliaje care intră în componența unor actuatori; efectul fotoelectric are, în cazul anumitor tipuri de actuatori optici, rolul determinant în procesul de conversie a energiei luminoase în energie electrică. În cazul fiecărui senzor şi actuator, a fost prezentată, alături de analiza clasică privind structura şi funcționarea acestora, şi o analiză a lor din perspectivă informațională. Astfel, s-au evidențiat semnificațiile conceptului de purtător de informație. De asemenea, pornind de la înțelesul clasic, restrâns, al noțiunii de legătură, s-au analizat unele concepte specifice mecanismelor mecatronice de control: cupla cinematică informațională, lanț cinematic informațional, câmp informațional. În final, s-au prezentat explicitări privind funcționarea actuatorului Lorentz, bazată pe acțiunea forței electromagnetice, argumentându-se faptul că acest actuator reprezintă în mecatronică o cuplă cinematică informațională, întrucât permite transmiterea interacțiunii doar prin intermediul purtătorilor de informație, fără a exista contact fizic nemijlocit între cele două elemente cinematice.

Capitolul 7 – „**CERCETĂRI EXPERIMENTALE**” – este consacrat demersurilor privind explicitarea potențialului educațional al platformei mecatronice portabile pentru educație tehnologică. Platforma este o componentă a laboratorului portabil pentru educație mecatronică, brevetat de colectivul Catedrei de Mecanisme, Mecanică Fină şi Mecatronică din

Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca [164]. Făcând posibil experimentul oriunde şi oricând, platforma reprezintă un instrument util, pe toate treptele procesului educațional, pentru stimularea inițiativei şi creativității.

În altă ordine de idei, aplicațiile concepute, vizând materializarea unor principii şi fenomene din fizică, matematică, informatică şi alte discipline tehnologice, permit concretizarea principiilor educației mecatronice integrale. Utilizatorul nu este implicat doar mental şi fizic, ci deopotrivă afectiv în realizarea aplicațiilor. Astfel, sentimentele şi corpul participă alături de inteligența analitică la asimilarea cunoştințelor [172].

Platforma are o structură modulară, flexibilă, ce cuprinde: blocul de interfațare, placa electronică de dezvoltare şi robotul paralel plan, realizat pe structura unui mecanism pentalater. Astfel, utilizatorul, în funcție de nivelul de pregătire, poate interveni în structura hardware şi software pentru dezvoltarea propriilor aplicații.

În cuprinsul capitolului sunt evidențiate şi detaliate etapele care se parcurg pentru realizarea platformei: proiectarea conceptuală, modelarea cinematică şi dinamică, proiectarea controlului, prototiparea virtuală, testarea şi implementarea produsului. Detalierile prezentate evidențiază importanța demersurilor pentru dezvoltarea gândirii sistemice, integratoare, ca bază pentru creație şi inovare în toate domeniile de activitate.

În rezolvarea problemelor specifice s-au ulilizat produse software performante precum: Matlab-Simulink, SimMechanics, CAD-SolidWorks etc. Problemele privind prototiparea rapidă a controlului au fost rezolvate utilizând tehnologia dSpace.

Cercetările teoretice şi aplicațiile dezvoltate permit explicitarea şi exemplificarea unor noțiuni, metode, principii şi fenomene studiate la fizică, matematică, informatică precum şi la alte discipline. Câteva exemple relevante sunt, alături de metodele şi sistemele de integrare hard şi soft în mecatronică, conceptele de: *legătură* (abordare clasică), *legătură informațională*, *lanț cinematic informațional*, *lege de mişcare*, *flexibilitate*, *reconfigurabilitate*, *proiectare integrată*, *proiectare pentru control* etc. Rezultatele cercetărilor experimentale constituie baza elaborării unui kit pentru aplicații, util pentru elevi, studenți, cercetători, profesori şi alte categorii de utilizatori.

Platforma mecatronică portabilă şi laboratorul mobil de mecatronică [164], [233] vor reprezenta mijloace eficiente pentru dezvoltarea culturii tehnologice şi în demersurile pentru promovarea dialogului ştiință-societate.

Capitolul 8 – „**CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII**” – conține concluziile finale, alături de principalele contribuții ale doctorandului.

Alese mulțumiri conducătorului ştiințific, Prof.Dr.Ing. Vistrian Mătieş, pentru competența şi rigoarea sugestiilor oferite pe durata cercetărilor, precum şi pentru sprijinul acordat pentru elaborarea tezei. Adresez mulțumiri colectivului catedrei de Mecanisme, Mecanică Fină şi Mecatronică pentru consiliere, precum şi pentru susținerea şi colegialitatea arătate pe parcursul demersului ştiințific desfăşurat în vederea finalizării tezei. Mulțumesc familiei pentru sprijinul şi înțelegerea acordate în perioada elaborării tezei de doctorat.

CAPITOLUL 1

GÂNDIREA SISTEMICĂ ŞI IDEALUL UNITĂȚII CUNOAŞTERII ÎN FIZICA CLASICĂ ŞI ÎN MECANICA CUANTICĂ

1.1. Introducere

Intuiția carteziană („*intuitius*") l-a scos, în prima jumătate a secolului al XVII-lea, pe Descartes din spațiul „îndoielii metodice", conducându-l la celebra formulare care exprimă certitudinea absolută a existenței subiectului gânditor: „*Dubito ergo cogito, cogito ergo sum*". Limpezimea oglindirii în propria-i conştiință a acestei certitudini l-a făcut pe Descartes să considere ideile *clare* şi *distincte* ca fiind temelia, criteriul suprem al adevărului [62], [110]. Pornind de la studiile lui François Viète, Descartes pune bazele geometriei analitice prin tratarea algebrică a problemelor de geometrie, ceea ce marchează „o cotitură hotărâtoare față de tradiția antică", tradiție ce „încerca să rezolve orice problemă aritmetică sau algebrică în termeni geometrici" [196]. Convingerea lui Descartes era aceea că există o algebră mai generală, *mathesis universalis*, independentă de obiectul particular de studiu al matematicii, în care „toate relațiile care sunt considerate că există între entități de acelaşi gen, trebuie raportate la două principii: *ordinea* şi *măsura*" [61] (s.n.). Se va contura, astfel, pe terenul unei analize capabile de abstracții [110], o nouă viziune ordonată asupra lumii, guvernată de rațiune, precizie, claritate, singurele componente fiind *materia* şi *mişcarea*, care sunt suficiente pentru a explica tot ceea ce ține de corpuri neînsuflețite. Introducerea coordonatelor carteziene va permite reprezentarea grafică a ecuațiilor, ceea ce va conduce, îndeosebi prin contribuțiile lui Newton şi Leibnitz, la *matematizarea fizicii*.

1.2. Paradigma mecanicistă

Pentru Descartes, materia coincide cu întinderea (*res extensa*), de unde decurge imediat faptul că, în natură (adică ceea ce este întins), totul se poate explica doar prin intermediul relațiilor exterioare, adică prin legile proprii întinderii şi mişcării, fiind astfel eliminate orice cauze „oculte", misterioase, care au dominat gândirea medievală. Implicațiile istorice ale acestui *mecanicism cartezian* sunt semnificative, având o covârşitoare contribuție la formarea ştiinței moderne, astfel că, spre sfârşitul secolului al XVII-lea, odată cu apariția monumentalei lucrări a lui Newton, *Principiile matematice ale filosofiei naturale*, putem vorbi de existența

unei paradigme destul de bine închegate, dominate de ceea ce e numit în mod curent „mecanicism” [120].

Curentul empirist, apărut în aceeaşi perioadă cu metoda deductiv-raţionalistă carteziană, propune o altă cale pentru a atinge certitudinea: *experienţa*. Singurul lucru sigur, după empirişti, sunt percepţiile pe care le primim, în mod nemijlocit, prin organele de simţ.

Deşi Francis Bacon nu poate fi caracterizat nici drept empirist, nici drept raţionalist [87], a avut o influenţă semnificativă asupra empiriştilor, fiind întemeietorul *metodei inductive*, prin care concluziile rezultate din datele obţinute pe baza observaţiilor, comparaţiilor, experimentelor, pot fi generalizate spre a obţine enunţuri şi legi generale. Figura lui Bacon este strâns legată de fondarea, în 1662, a Societăţii Regale de Ştiinţe din Londra (*Royal Society*), printre membrii acesteia numărându-se, între alţii, Isaac Newton şi John Locke. Acesta din urmă consideră că „simţirea precede gândirea” [110], toate ideile noastre fiind dobândite, nu înnăscute, noi însuşindu-ni-le prin intermediul senzaţiilor, fără de care mintea este neputincioasă. Această convingere va fi împărtăşită, în secolul următor, de către David Hume, care respinge orice abstracţiune: „Toate deducţiile pe baza experienţei sunt deci efecte ale obişnuinţei, nu ale activităţii intelectului. Obişnuinţa este marea călăuză a vieţii.” [129]. Tot Hume este cel care proclamă un determinism absolut, în natură, etică şi istorie [110], [130].

Basarab Nicolescu afirmă că, exceptând unele scrieri tradiţionale care subliniază importanţa discontinuităţii în gândirea filosofică – cum ar fi lucrarea lui Lilian Silburn [207] –, gândirea ştiinţifică a fost dominată, cel puţin până la naşterea mecanicii cuantice, de *ideea continuităţii*, discontinuitatea fiind asociată mai degrabă cu mutaţiile, accidentele, moartea [172]. Obişnuinţa, după cum bine a observat Hume, modelează teoriile ştiinţifice, reacţionând adesea atunci când acestea sfidează bunul-simţ. Ne este greu, afirmă Nicolescu, să ne închipuim că o pasăre poate sări din ramură în ramură fără să treacă prin toate punctele intermediare, „ca şi cum pasărea s-ar materializa instantaneu pe o ramură sau alta” [173]. Şi totuşi, după cum se va evidenţia în continuare, cam aşa se întâmplă în lumea fizicii cuantice.

La conturarea filosofiei mecaniciste a secolului al XVII-lea a contribuit substanţial, pe lângă *concepţia atomistă* clasică a grecilor antici Democrit şi Leucip, *formalizarea matematicii*, realizată de Leibnitz[1], acesta propunând o versiune paralelă cu cea a lui Newton pentru calculul diferenţial şi integral. În esenţă, mecanicismul clasic îşi propune să explice, folosind un limbaj matematic suficient de sofisticat, realitatea, pornind doar de la relaţiile dintre particulele aflate într-o mişcare care se supune legilor mecanicii newtoniene.

Separarea făcută de către Descartes între materie (*res extensa*) şi spirit (*res cogitans*) a condus la concepţia mecanicistă despre trup. Trupul fiind doar o maşină, anatomia va ajunge, credea Descartes, să-l cunoască complet. Ţevi, resorturi, pârghii, modele ale mecanicii hidraulice sunt tot mai des asociate, în literatura vremii [196], corpului omenesc. Concepţia mecanicistă a fost extinsă la întregul Univers, ce va fi descris ca un „ceasornic imens”[2] (figura 1.1) care, fie necesită o întoarcere periodică (cum considera Newton), fie funcţionează perpetuu şi precis (cum credea Leibnitz) [86], [235], [245].

Din perspectiva filosofiei mecaniciste [196], natura era văzută ca un sistem plămădit doar din materie (eliminând orice manifestare a unui principiu viu), aflat în mişcare şi supus unui număr minim de legi care pot fi determinate cu precizie matematică. O contribuţie esenţială la

[1] În opinia lui Amos Funkestein, nimeni nu a înţeles mai bine decât Leibnitz, în secolul al XVII-lea, virtuţile formal-simbolice ale raţionamentului matematic, încercând să elaboreze o ştiinţă a relaţiilor, care erau considerate abstracte, ca neavând statut ontologic. Pentru detalii legate de *scientia generalis de relationibus*, se poate consulta lucrarea [37].

[2] Despre legătura dintre separarea carteziană trup-spirit şi modelul celor două ceasornice sincronizate, introdus în secolul al XVII-lea de către Guelicx, se poate consulta [86].

formarea acestei perspective asupra lumii a avut-o modificarea înțelesului clasic, aristotelian, al conceptului de „cauzalitate”.

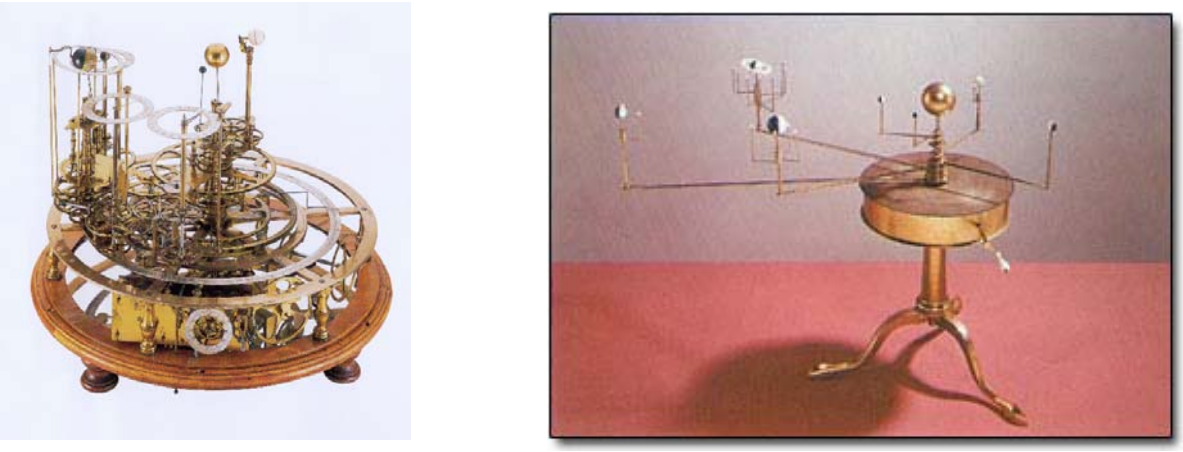


Figura 1.1. Două machete sugestive ale universului mecanicist, descris ca un orologiu

1.3. Cauzalitate locală şi predictibilitate

Pentru Aristotel, esența unui lucru este considerată a fi unitatea dintre „materie” (*hyle*) şi „formă” (*eidos*) [3]. În cazul unei statui, de exemplu, materia este materialul din care e făcută, forma fiind conceptul, ideea. Totul se naşte din materie (care nici nu poate exista în lipsa unei forme), primind o formă. Perechea act (*dynamis)*-potențialitate (*energeia)* este un alt concept esențial al filosofiei aristoteliene, orice transformare, „devenire”, fiind văzută ca o trecere de la potențialitate la act, de la posibil la real. Devenirea este, evident, legată de cauzalitate, proces complex în viziunea lui Aristotel, care distinge patru cauze diferite [3]: cauza materială (*causa materialis*), materia din care se naşte produsul finit; cauza formală (*causa formalis*), forma după care se modelează; cauza eficientă (*causa efficiens*), originea mişcării, transformării, schița; şi cauza finală (*causa finalis*), scopul, finalitatea transformării. Reluând exemplul statuii, cauza materială este, evident, materialul în care s-a sculptat, cea formală este imaginea din mintea creatorului, artistului, cauza eficientă fiind procesul propriu-zis, iar cea finală este scopul (*telos*-ul) căruia îi este destinată opera.

Odată cu apariția ştiinței moderne, dominată de filosofia mecanicistă, conceptul de cauzalitate a fost progresiv simplificat. Din perspectiva lui Bacon, nu are sens să luăm în considerare decât cauza materială şi cea eficientă, celelalte două cauze aparținând metafizicii. Simplificarea a fost continuată de Hume [256], pentru care conceptul de cauză avea doar un singur sens, foarte apropiat de ceea ce filosofia aristoteliană numea „cauză eficientă” (figura 1.2). După cum spune Funkestein „în sens minimal, cauzele mecanice simbolizau dorința de a elimina din interpretarea naturii toate cauzele, cu excepția celor eficiente” [86].

După Basarab Nicolescu, această simplificare a cauzalității până la ceea ce el numeşte *cauzalitate locală* este strâns legată de ideea continuității, amintită mai sus. Suportul acestei perspective asupra cauzalității este, în opinia autorului, atât unul teoretic – calculul infinitezimal al lui Leibnitz şi Newton –, cât şi unul practic, furnizat de organele noastre de simț. Nicolescu evidențiază legătura strânsă dintre cele trei concepte menționate: continuitate, cauzalitate locală, determinism. O cauză într-un punct dat poate genera un efect într-un punct infinit apropiat şi, invers, fiecare efect într-un punct dat are o cauză într-un punct infinit apropiat [173]. Astfel, două puncte, oricât ar fi de depărtate, pot fi legate prin aceste „lanțuri cauzale”. Ecuațiile fizicii clasice sunt construite în aşa fel încât, dacă se cunosc condițiile

inițiale (pozițiile şi vitezele), starea fizică a unui sistem poate fi prezisă complet în oricare moment ulterior.

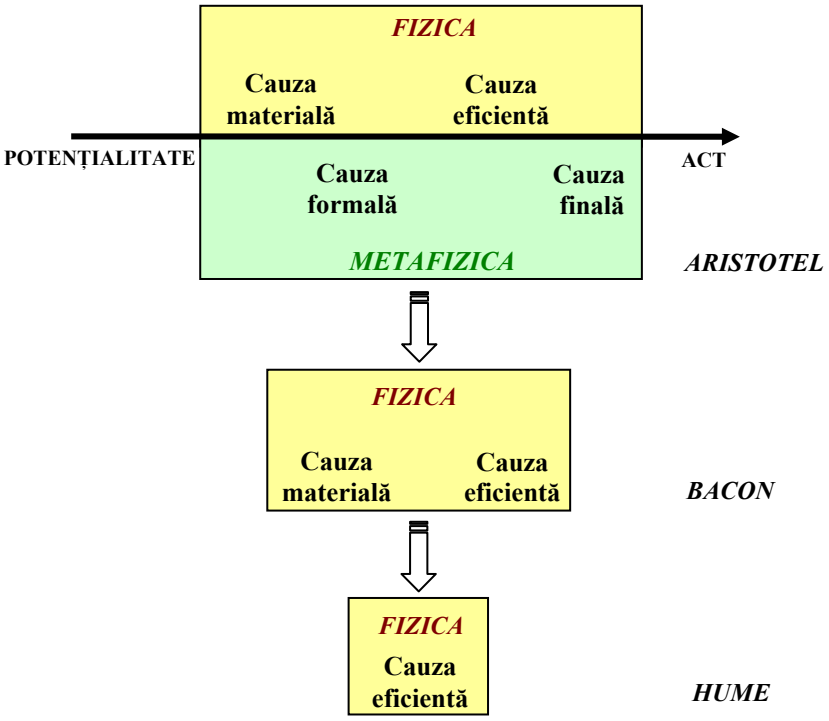


Figura1.2. Simplificarea progresivă a conceptului de cauză din Antichitate până în epoca modernă

În concluzie, în mecanica newtoniană toate procesele sunt complet reversibile, *predictibile* [89], orice descriere având un pronunțat caracter determinist.

1.4. Legături, determinism şi integrabilitate în mecanica clasică

Potrivit mecanicii clasice, unui sistem format din N particule libere i se asociază, în formalismul hamiltonian, un ansamblu de $6N$ parametri independenți (numiți „variabile canonice"), prin fixarea cărora starea sistemului este complet determinată: coordonatele generalizate $q_\alpha\ (\alpha = 1,2...,3N)$, respectiv impulsurile generalizate $p_\alpha\ (\alpha = 1,2...,3N)$. Pentru a descrie evoluția în timp a sistemului, se introduce spațiul fazelor, un spațiu cu $6N$ dimensiuni; fiecărei stări de mişcare a sistemului la un moment dat (pentru care toate cele $6N$ varilabile canonice au valori bine precizate) îi va corespunde un punct din spațiul fazelor, numit „punct reprezentativ", iar evoluției în timp a sistemului îi va fi asociată o hipercurbă, numită „traiectorie generalizată".

Pentru cazul general, în care între particulele sistemului există s legături (exprimate matematic sub forma unor funcții care stabilesc corelații între coordonatele generalizate, derivatele lor în raport cu timpul şi, eventual, timpul t), legături care reflectă constrângerile impuse sistemului, numărul parametrilor independenți se reduce la 2ℓ, unde $\ell = 3N - s$. În acest caz, spațiul fazelor are doar 2ℓ dimensiuni şi există un set de 2ℓ ecuații diferențiale de ordinul întâi care, dacă se cunosc condițiile inițiale (valorile setului de variabile canonice la un moment dat), descriu complet evoluția ulterioară a sistemului:

$$q_\alpha = \frac{\partial H}{\partial p_\alpha}, \tag{1.1}$$

$$p_\alpha = -\frac{\partial H}{\partial q_\alpha}, \tag{1.2}$$

unde $\alpha = 1,2,...,\ell$ [165].

Ecuațiile de mai sus sunt *ecuațiile canonice* ale sistemului, iar *H* este *hamiltonianul* sistemului:

$$H(q,p,t) = \dot{q}_\alpha p_\alpha - T(q,p,t) + U(q,t), \tag{1.3}$$

în care s-a folosit notația:

$$q = (q_1, q_2, ..., q_\ell), \tag{1.4}$$

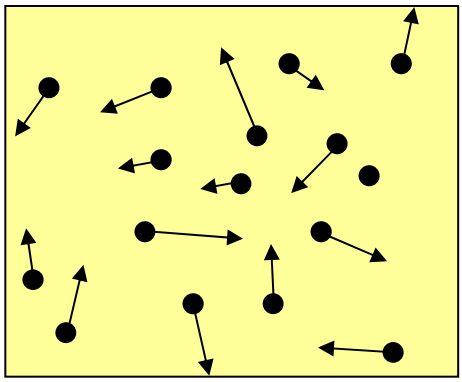
$$p = (p_1, p_2, ..., p_\ell). \tag{1.5}$$

În expresia hamiltonianului s-a notat cu *T* energia cinetică, iar cu *U* energia potențială a sistemului dacă forțele sunt potențiale, adică:

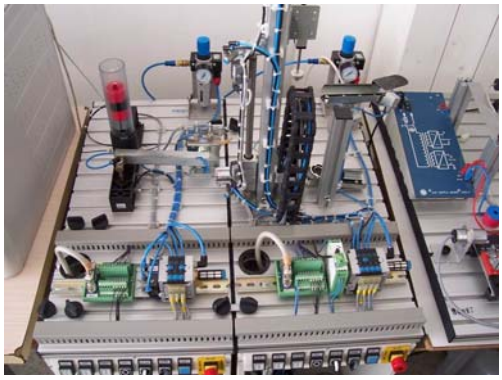
$$\vec{F}_n = -grad_n U. \tag{1.6}$$

Rezolvarea unei probleme de dinamică în formalismul hamiltonian înseamnă alegerea unui set de variabile canonice pentru care *H* are structura cea mai potrivită (forma canonică a hamiltonianului), urmată de scrierea ecuațiilor canonice. Ecuațiile canonice, odată stabilite, conțin proprietățile apriorice ale întregii evoluții dinamice a sistemului adică, dacă se cunosc condițiile inițiale, evoluția ulterioară a sistemului e complet determinată. În concluzie, hamiltonianul sub forma sa canonică, conține întreg adevărul dinamic al sistemului [190].

Pentru cazul particular în care legăturile sunt independente de timp, iar sistemul este supus acțiunii unor forțe conservative, hamiltonianul coincide cu energia mecanică a sistemului. Se poate găsi, în această situație, un set de variabile canonice care să permită anularea energiei potențiale, care depinde doar de coordonatele de poziție, ceea ce conduce, aplicând ecuațiile canonice, la o mișcare în care evoluția fiecărui punct al sistemului este independentă de evoluția oricărui alt punct al acestuia. În viziunea lui Prigogine, deşi este doar consecința unui formalism, concluzia la care am ajuns este o reflectare a filosofiei mecanicii clasice: „această reprezentare singulară care formal suprimă orice interacțiune între unitățile sistemului, defineşte pentru noi conceptul de *integrabilitate*. Orice sistem descris în termeni de ecuații diferențiale integrabile poate fi reprezentat ca un ansamblu de unități, fiecare dintre ele evoluând în mod *izolat*, independent de toate celelalte, în această mişcare veşnică şi permanent egală cu ea însăşi..."(s.n) [190]. Prin urmare, pentru a înțelege sistemul în întregime trebuie să recurgem doar la *descompunerea* lui în elementele sale constitutive şi să studiem proprietățile lor fundamentale [116]. Această abordare semi-integratoare este una *limitat-sistemică*, în sensul că nu permite manifestarea niciunei proprietăți emergente, comportarea sistemului fiind exclusiv rezultatul activității fiecărei părți a acestuia, *părți care nu interacționează între ele*. În figura 1.3 este ilustrată, în comparație cu un sistem mecatronic modern, perspectiva mecanicii clasice asupra noțiunii de „sistem", bazată pe conceptul de integrabilitate descris mai sus. Se va vedea că *cele două viziuni sistemice diferă în principal datorită trecerii de la integrabilitate la integrare*.



a.



b.

Figura 1.3. Reprezentarea simbolică a unui sistem mecanic în viziunea clasică (a) şi imaginea unui sistem mecatronic complex actual (b)

1.5. Separarea subiect-obiect şi caracterul antimetafizic al scientismului

Heisenberg subliniază hotărâtoarea influență pe care a avut-o separarea carteziană între Eu, Lume şi Dumnezeu [108] la formarea ştiinţei moderne. Poziția fizicii clasice este una caracterizată de „realism dogmatic", proclamând faptul că nu există niciun postulat privind lumea materială care să nu fie obiectiv. Cu alte cuvinte, „mecanica lui Newton, ca şi toate celelalte părți ale fizicii clasice bazate pe acest model, pornesc de la ideea că Lumea poate fi descrisă fără a ne referi la Dumnezeu sau la noi înşine" [108]. Avem de-a face cu o *separare între subiectul cunoscător şi obiectul cunoaşterii*, separare care se va dovedi, în prima jumătate a secolului XX, artificială, forțată, incapabilă să explice natura complexă a realității.

Faptul că ştiința modernă clasică e întemeiată pe ideea existenței unei realități independente de subiectul care o investighează este evidențiat şi de către Basarab Nicolescu [172]. Urmarea firească a acestei paradigme ştiințifice este *diminuarea progresivă a dimensiunii transcendente a cunoaşterii*, subțierea rădăcinilor metafizice ale teoriilor ştiințifice, ajungându-se, după cum arată Basarab Nicolescu, la o *desacralizare a naturii*, „Dumnezeu devenind o simplă ipoteză", transcendența Universului fiind „izgonită în tenebrele iraționalului şi superstiției" [172].

De la Platon până la Descartes, cunoaşterea filosofică şi ştiințifică a fost strâns legată de metafizică. Pentru acesta din urmă, ştiința universală pe care dorea s-o elaboreze, era fundamentată pe principii metafizice (figura 1.4): „Întrega filosofie e ca un arbore ale cărui rădăcini sunt metafizica, al cărui trunchi e fizica, iar ramurile care ies din acest trunchi sunt toate celelalte ştiințe, care se reduc la trei principale, anume medicina, mecanica şi morala." [64] (s.n.).

Locke însă va considera că *toate* ideile pe care le avem sau le putem avea provin *doar* din experiență, pe două căi distincte: fie pe calea exterioară, a senzațiilor, fie pe cea interioară, a reflecției [153]. Prin urmare, filosofia trebuie să se limiteze la experiență, lăsând la o parte problemele transcendente, pe care nu le poate soluționa.

Hume lărgeşte fisura creată între ştiință şi metafizică. Pentru el, orice enunțuri *a priori* privind realitatea, izvorâte din gândirea pură, sunt iluzorii, intelectul nefiind „câtuşi de puțin în stare să dezlege chestiuni atât de îndepărtate şi de greu de înțeles" [129]. Scepticismul lui Hume a avut o considerabilă influență asupra filosofiei iluministe franceze a secolului al

XVIII-lea şi, nu în ultimul rând, asupra pozitivismului secolului al XIX-lea, Auguste Comte văzând în Hume principalul său precursor.

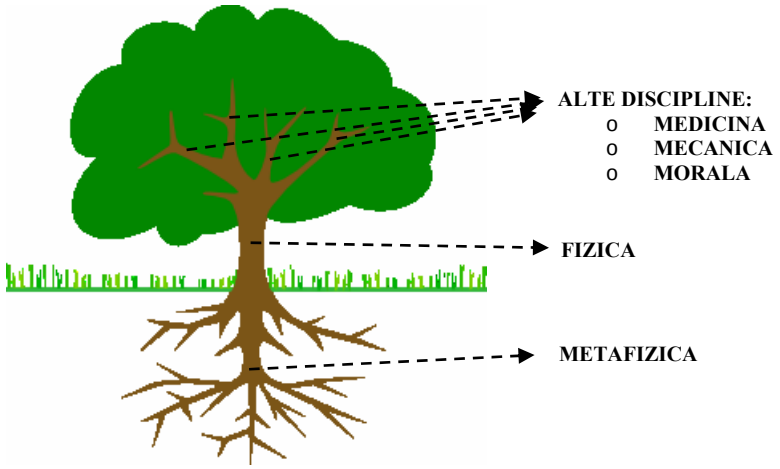


Figura 1.4. Viziunea carteziană clasică asupra cunoaşterii

Odată cu Comte, fondatorul sociologiei şi părintele curentului pozitivist, lupta împotriva metafizicii atinge climaxul. El contestă vehement orice forme ale gândirii apriorice, nicio filosofie independentă de ştiinţele exacte neavând vreo raţiune de a exista. După Comte, au fost depăşite cele două stadii ale evoluţiei omenirii: cel „teologic", în care fenomenele naturale primeau explicaţii supranaturale, de sorginte divină, şi cel „metafizic", intermediar, unde locul lui Dumnezeu este luat de principii abstracte, acele „calităţi oculte", caracteristice gândirii medievale [110]. S-a ajuns deci în al treilea stadiu, cel „pozitiv", care elimină tot ce ţine de metafizică, unde se constată, prin observaţie, relaţiile dintre fenomene, care respectă legi precise, specifice (figura 1.5).

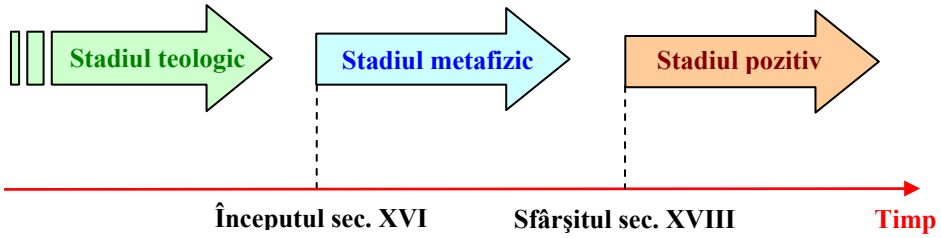


Figura 1.5. Cele trei stadii ale istoriei omenirii în viziunea lui Comte

Se poate vorbi, deci, în cazul lui Comte, de o perspectivă *antimetafizică* [87]**.** Gândirea pozitivistă a lui Comte va da naştere *scientismului*, care a marcat a doua jumătate a secolului al XIX-lea. Conform acestei doctrine, „ştiinţa şi raţiunea ştiinţifică sunt singurele norme ale valorilor şi vor explica într-o zi lumea, în totalitatea ei" [197]. Principiul determinismului universal şi absolut, enunţat de Laplace, în 1814 [148], este ilustrativ: o inteligenţă care ar putea cunoaşte toate forţele care acţionează în natură, la un moment dat, ar fi capabilă să cuprindă, într-o singură formulă, mişcările tuturor corpurilor din Univers, de la cele mai mari, la cele mai mici. Pentru această inteligenţă, „nimic nu ar fi nesigur, iar viitorul, ca şi trecutul, i-ar fi prezente înaintea ochilor" [148].

Catalizatorul acestui optimism raționalist, care a dobândit dimensiuni considerabile în secolul al XIX-lea, a fost *revoluția industrială* [220]. În viziunea lui Toffler, civilizația industrială a celui de-Al Doilea Val a început să câştige teren spre sfârşitul secolului al XVII-lea, odată cu regresul civilizației Primului Val (întemeiată pe agricultură), dominația ei întinzându-se până în urmă cu trei-patru decenii, de când a început să bată în retragere din fața evoluției rapide a tehnologiei informatice, care va naşte un *nou tip de societate, bazată pe informație* (*Al Treilea Val*) (figura 1.6) [276]. Opinia lui Toffler este că revoluția industrială a creat, pentru oamenii de știință, pentru filosofi şi pentru conducătorii de firme, un nou mod de a gândi despre realitate: *realismul industrial*, bazat pe trei principii [220].

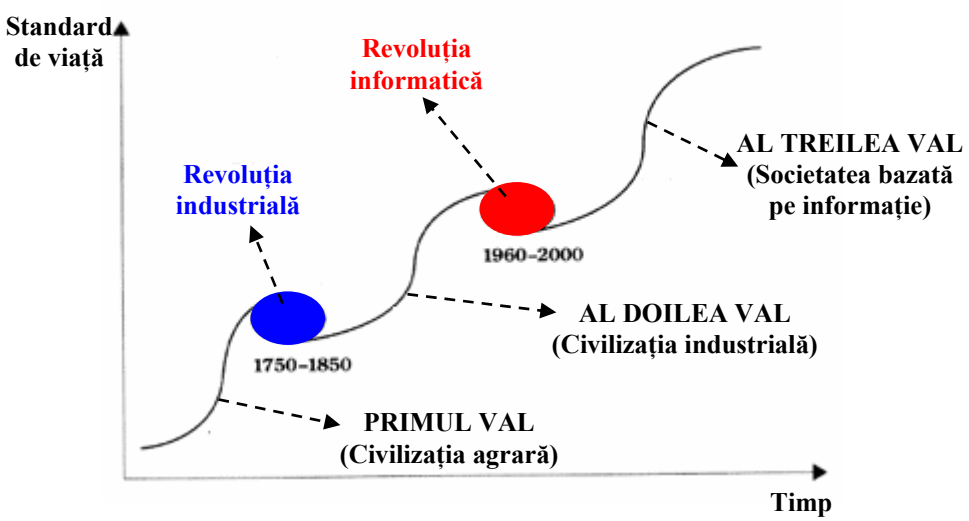


Figura 1.6. Cele trei valuri ale schimbării social-economice în viziunea lui Toffler

Primul este *principiul luptei cu natura*: „natura este un obiect bun de exploatat". E foarte probabil ca această convingere să-şi aibă izvorul atât în războiul declarat de Francis Bacon naturii[3], care devine „dușmanul omului", cât şi în ideea carteziană că omul ar putea deveni „stăpânul naturii"[4]. Acest principiu a condus la criza energetică de azi şi la afectarea biosferei, prin poluarea fără restricții. Pentru a găsi o justificare morală a procedeelor prin care statele puternic industrializate obțineau materie primă ieftină în urma exploatării coloniale a popoarelor subdezvoltate, a fost „fabricat" *principiul evoluției*: „indivizii cei mai bogați şi mai puternici sunt cei mai apți şi mai merituoşi". Cu alte cuvinte, printr-o imediată extrapolare a teoriei darwiniste[5] în sociologie, popoarele neindustrializate, „primitive", erau, natural, firesc, sortite dispariției. Al treilea principiu fundamental al realismului industrial este *principiul progresului*: „istoria înaintează ireversibil către o viață mai bună pentru omenire". Justificând degradarea naturii şi exploatarea societăților „mai puțin evoluate", ideea de progres a întreținut în epocă o atmosferă de optimism exacerbat, disproporționat, cu implicații în toate domeniile, de la știință până la politică.

[3] În [9], Bacon afirmă că oamenii ar trebui să „facă pace şi să se înarmeze apoi cu puteri unite împotriva naturii lucrurilor, să-i cucerească înălțimile şi fortărețele şi să împingă înainte, cu voia lui Dumnezeu, limitele domniei omului".
[4] Descartes, în [63], susține că ar fi de dorit ca, prin cunoştințele dobândite, să devenim „stăpânitorii şi posesorii naturii".
[5] Toffler aduce un citat din Darwin în sprijinul acestei idei: „Într-o epocă viitoare... rasele umane civilizate vor extermina şi înlocui, aproape sigur, rasele sălbatice din toată lumea" [220].

În anii ’50-’60 ai secolului trecut însă, va începe decăderea ireversibilă a imperiului realismului industrial. Tehnologia nu mai e considerată o „locomotivă a progresului”, ci mai degrabă „o forță apocaliptică ce distruge deopotrivă libertatea umană şi mediul natural” [220]. Sistemul devenise împovărător. Măreția scientismului s-a dovedit a fi o iluzie. În loc să elibereze, scientismul a devenit o închisoare, după cum constată Toffler: „realismul industrial a creat şi propria lui închisoare, o mentalitate industrială care disprețuieşte sau ignoră ceea ce nu poate cuantifica, care laudă fervent rigoarea critică şi pedepseşte imaginația” [220]. Fisurile apăruseră, de fapt, mai devreme, generând o criză a științei (în special a fizicii) şi filosofiei (în particular a logicii), încă din primii ani ai secolului XX. Criza era, în fond, una a sensului şi a rațiunii.

1.6. Apariția mecanicii cuantice: salt de la continuu la discontinuu

În anul 1900, Max Planck, pornind de la studiile legate de radiația corpului negru[6], a lansat revoluționara idee că valoarea energiei unui atom nu poate fi decât un multiplu al unei cuante finite, discrete, de energie. Contextul a fost următorul. În ultimii ani ai secolului XIX, distribuția intensității radiației termice emise de un corp incandescent în funcție de lungimea de undă a acesteia, după datele stabilite experimental de Lummer şi Pringsheim [33], nu putea fi justificată teoretic. Existau totuşi două legi matematice în concordanță cu aceste date, însă doar pe domenii limitate. Una dintre ele, legea Rayleigh-Jeans, reproducea foarte bine curba experimentală de distribuție a intensității, dar numai pentru frecvențe mici (lungimi de undă mari) ale radiației:

$$u_\nu = \frac{8\pi\nu^3}{c^3}\cdot kT, \tag{1.7}$$

în care u_ν reprezintă energia radiației emise în intervalul de frecvențe $d\nu$, c e viteza luminii în vid, iar k este constanta lui Boltzmann. Legea Rayleigh-Jeans, care exprima distribuția spectrală a densității de energie radiantă a corpului negru, conducea la concluzia absurdă că, pentru frecvențe foarte mici, intensitatea radiației trebuia să devină infinită (catastrofa ultravioletă). A doua, legea lui Wien, era validă doar pentru frecvențe mari (lungimi de undă mici ale radiației):

$$u_\nu \approx \nu^3 \cdot \exp\left(\frac{-C\nu}{kT}\right), \tag{1.8}$$

unde C e o constantă ce urma să fie determinată pe baza detelor experimentale.

Din acest impas s-a ieşit datorită lui Max Planck, care a postulat existența unor cuante finite, discrete, de energie $\varepsilon_0 = h\nu$ (în care $h = 6{,}626\cdot10^{-34}\,J\cdot s$ este *constanta lui Planck* – cuanta elementară de acțiune –, iar ν e frecvența radiației), energia oscilatorilor microscopici neputând să ia decât valorile ε_0, $2\varepsilon_0$, $3\varepsilon_0$ etc. Legea radiației, în deplină concordanță cu datele experimentale este:

[6] Prin „corp negru” se înțelege un corp care absoarbe întreaga radiație electromagnetică incidentă, indiferent de frecvența acesteia (coeficientul său de absorbție este egal cu unitatea). Acesta poate fi realizat practic dacă în pereții unei cavități aflate la temperatură constantă, se practică un orificiu foarte mic; orice radiație care pătrunde prin acesta este, practic, absorbită, în urma reflexiilor multiple pe pereții interiori ai incintei.

$$u_\nu = \frac{8\pi\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}. \tag{1.9}$$

Prin neobişnuita sa ipoteză, Planck a ajuns la o *formulă care integrează cele două legi ale radiației existente până atunci* (figura 1.7). Într-adevăr, se observă că, pentru $h\nu / kT << 1$, se obține (prin dezvoltarea în serie a numitorului) legea Rayleigh-Jeans, iar pentru $h\nu / kT >> 1$ formula (1.9) se reduce la forma dată de legea lui Wien.

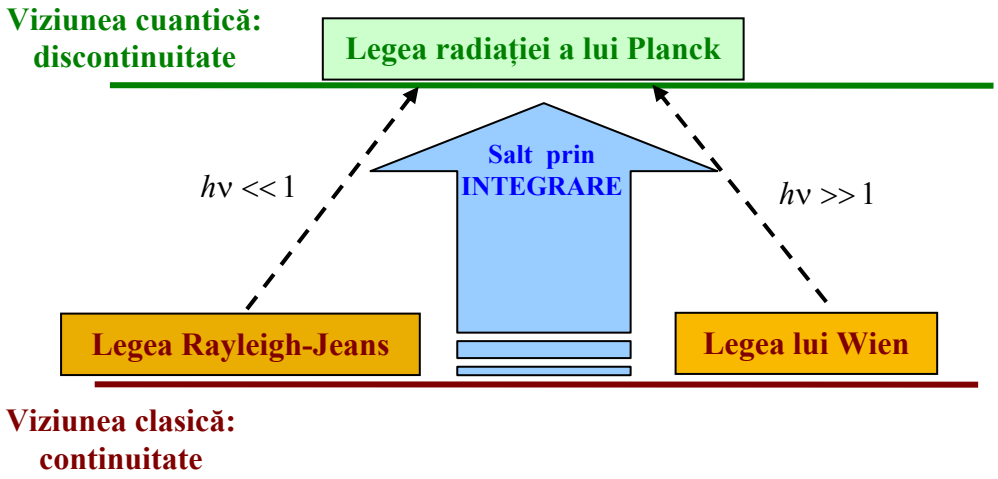


Figura 1.7. Integrarea celor două legi cu valabilitate limitată ale radiației prin apariția mecanicii cuantice

Cuantificarea energiei introdusă de Planck loveşte la rădăcina conceptului de continuitate, care a dominat gândirea fizicii clasice, marcând totodată momentul naşterii mecanicii cuantice. Fizicienii vremii s-au opus vehement noii paradigme, privind ideea lui Planck doar ca un artificiu matematic care ar putea fi intepretat şi din perspectiva fizicii clasice. Altă soluție nu a putut fi găsită însă. Mai mult, ipoteza emisiei discontinue a luminii, sub forma unor „porții de energie" (fotoni), formulată de către Einstein în 1905, a fost singura care furniza o explicație efectului fotoelectric extern[7], evidențiat experimental încă din 1888. Lungimile de undă ale seriilor spectrale specifice atomului de hidrogen, determinate experimental la sfârşitul secolului XIX, au fost interpretate teoretic de către Bohr, în 1913, pornind tot de la conceptul de *discontinuitate*. Bohr afirmă că, în interiorul atomului, sunt permise doar acele stări electronice (staționare) pentru care valoarea momentului cinetic orbital al electronului este un multiplu al constantei $h / 2\pi$:

$$L = n \cdot \frac{h}{2\pi}, \quad n = 1, 2, 3, ... \tag{1.10}$$

Conceptul de discontinuitate apare şi în cel de-al doilea postulat, prin faptul că atomii emit sau absorb energie (figura 1.8) doar în urma *saltului* atomului de pe o stare staționară (de energie E_n) pe alta (de energie E_k), radiația emisă având energia:

[7] Emisia de electroni de către un corp aflat sub incidența unei radiații electromagnetice.

$$h\nu_{nk} = E_n - E_k\,, \tag{1.11}$$

h fiind constanta lui Planck: $h \cong 6{,}626 \cdot 10^{-34}\, J \cdot s$.

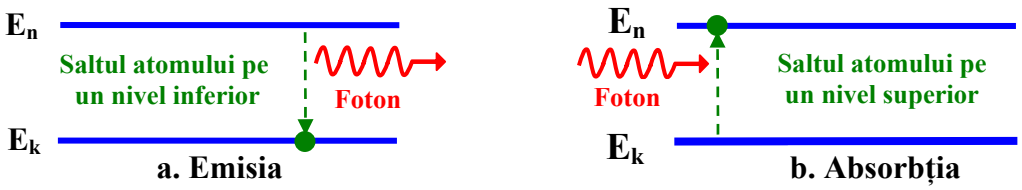


Figura 1.8. Discontinuitatea nivelelor de energie în modelul atomic al lui Bohr şi saltul atomului la emisia (a) respectiv absorbția (b) unui foton

Deşi ipoteza existenței atomilor indivizibili şi neschimbători ai lui Democrit presupunea existența unei discontinuități[8], descoperirea lui Planck evidențiază că această caracteristică a discontinuității proceselor naturale (manifestată în radiația termică) trebuie înțeleasă ca o consecință a unei legi mai generale a naturii, care, spre deosebire de legile clasice, introduce constanta de acțiune a lui Planck, care are caracterul unei măsuri universale. Fenomenele caracterizate de acțiuni comparabile, ca ordin de mărime, cu constanta lui Planck se desfăşoară în mod fundamental altfel decât în fizica clasică.

Indivizibilitatea cuantei de acțiune implică, după Bohm, *discontinuitatea tranzițiilor între stările staționare***,** opinia – specifică fizicii clasice – conform căreia un sistem ar trebui să treacă prin serii continue de stări intermediare în timpul unei astfel de tranziții fiind lipsită de sens în mecanica cuantică [27]. De acum încolo, vom avea de-a face cu fenomene cuantice, care pot fi observate experimental şi analizate matematic, dar *nu ne mai putem face o imagine a lor*, ceea ce constituie, după Heisenberg, o *diminuare a dimensiunii intuitive a fizicii moderne* [109]. Pentru Heisenberg „caracterul neintuitiv al fizicii atomice moderne se întemeiază, în ultimă instanță, pe existența cuantei de acțiune a lui Planck, adică pe existența unei măsuri de ordin atomic în legile naturii" [27].

Faptul că *discontinuitatea este definitorie pentru realitatea descrisă de mecanica cuantică* nu e trecut cu vederea nici chiar de către Schrödinger, deşi acestuia îi repugnă ideea de a adera la „diabolicul salt cuantic" [173]: „Marea revelație a teoriei cuantice a fost descoperirea caracteristicilor discontinuității în Cartea Naturii într-un context în care, după toate concepțiile susținute până atunci, tot ce nu era continuitate părea absurd" [204].

1.7. Particula cuantică şi unitatea prin complementaritate

Confirmării naturii duale a radiației electromagnetice, prin intermediul efectului Compton[9], îi urmează, în deceniul al treilea al secolului trecut, extrapolarea acestei idei, pe care o face Louis de Broglie *atribuind oricărei microparticule o natură dublă, corpusculară şi ondulatorie*. Potrivit ipotezei lui de Broglie, unei microparticule în mişcare liberă i se poate

[8] Democrit construieşte teoria pe ideea polarității atomi-vid.

[9] Cercetările lui Compton din 1922, legate de împrăştierea radiațiilor X pe atomi uşori, au condus la rezultate care nu pot fi explicate decât dacă radiația are natură corpusculară, fotonii interacționând cu electronii prin ciocniri. Cum natura ondulatorie a radiației electromagnetice era certă, singura explicație posibilă este că aceasta are o natură duală, undă-corpuscul.

asocia o undă (de fapt, după cum se va vedea, un „pachet de unde") reprezentată prin *funcția de undă*:

$$\Psi(\vec{x},\vec{p},t)=A\exp(\vec{p}\vec{x}-Et)=A\exp(\vec{k}\vec{x}-\omega t), \tag{1.12}$$

A fiind amplitudinea undei, $\vec{k}$ - numărul de undă, ω - pulsația, E - energia particulei, p - impulsul particulei. Cum viteza de fază a acestei unde nu poate fi determinată experimental, singurul mod în care putem „urmări" particula este să privim funcția de undă ca o suprapunere de unde plane monocromatice, numită „pachet de unde" [33]:

$$\Psi(\vec{x},t)=\int a(\vec{k})\exp(\vec{k}\vec{x}-\omega t)d^3\vec{k}\,. \tag{1.13}$$

Funcția de mai sus satisface (în aproximația nerelativistă) ecuația Schrödinger:

$$i\frac{h}{2\pi}\frac{\partial}{\partial t}\Psi(\vec{x},t)=-\frac{h^2}{8\pi^2 m}\nabla^2\Psi(\vec{x},t)\,. \tag{1.14}$$

Dacă se consideră un pachet de unde foarte „îngust", prin interferență se formează o „proeminență" (amplitudinea „pachetului de unde") a cărei deplasare poate fi determinată, viteza ei reprezentând *viteza de grup* a pachetului de unde. Partea reală a funcției de undă a unui pachet e reprezentată în figura 1.9.

Figura 1.9. Propagarea cu viteza de grup a unui pachet de unde format prin suprapunerea mai multor unde plane monocromatice de lungimi de undă diferite

Considerând că, intuitiv, viteza de grup a pachetului reprezintă viteza particulei, se ajunge la relația propusă de de Broglie:

$$\lambda=\frac{h}{p}, \tag{1.15}$$

în care λ reprezintă lungimea de undă asociată microparticulei de impuls p, iar h e constanta lui Planck. Funcției de undă i s-a atribuit de către Born [33] o interpretare statistică: pătratul

amplitudinii funcției de undă[10] reprezintă *densitatea de probabilitate* de a găsi microparticula la momentul *t* în punctul de coordonate *x, y, z*:

$$\rho = |\Psi|^2 = \Psi^* \Psi , \tag{1.16}$$

unde Ψ^* este complex conjugata funcției Ψ.

Cu alte cuvinte, probabilitatea ca, în urma unei măsurători, să găsim o particulă într-un volum *dV* din spațiu, este:

$$dP = |\Psi|^2 dV . \tag{1.17}$$

Faptul că particula se găseşte cu siguranță într-un punct oarecare din spațiu se exprimă prin formula:

$$\iiint_{\infty} |\Psi|^2 dV = 1 . \tag{1.18}$$

Experiențele efectuate de Davisson şi Germer vor confirma în scurt timp, ipoteza lui de Broglie, dovedind că electronii suferă fenomenul de difracție, ceea ce evidențiază natura ondulatorie a acestora.

Noțiunea clasică de particulă trebuie, prin urmare, revizuită, fiind în anumite privințe nepotrivită. De pildă, dacă amplitudinea undei asociate particulei are pătratul modulului constant, înseamnă că probabilitatea de a găsi particula e aceeaşi în fiecare punct din spațiu, deci incertitudinea privind localizarea sa e nelimitată (ar putea să se găsească oriunde). Dacă poziția particulei este cunoscută între anumite limite, probabilitatea localizării sale spațiale trebuie să fie şi ea limitată la o anumită regiune, de întindere Δx, în afara căreia probabilitatea e, evident, nulă (figura 1.10).

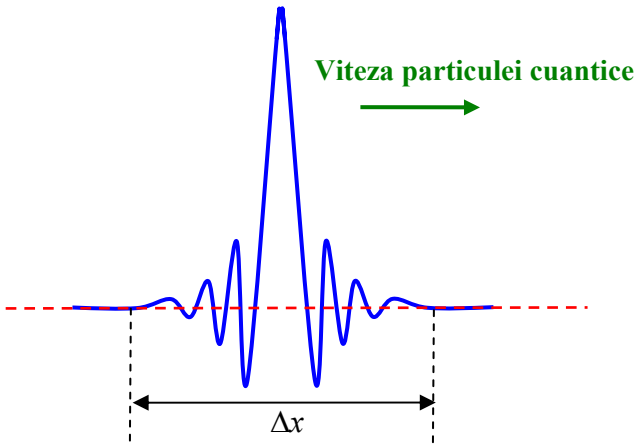


Figura 1.10. Particula cuantică e situată undeva în regiunea Δx. Probabilitatea de a găsi particula într-o anumită poziție e cu atât mai mare cu cât amplitudinea funcției de undă corespunzătoare poziției respective e mai mare

[10] Amplitudinile funcției de undă au un caracter aditiv (respectă principiul superpoziției cuantice), în timp ce pătratele sale, adică probabilitățile, nu.

Asistăm la apariția unei entități absolut noi: *particula cuantică*, care nu poate fi descrisă sau reprezentată în termenii fizicii clasice, modelați de „ideile clare şi distincte" ale filosofiei carteziene. Louis de Broglie sesizează acest punct de inflexiune în istoria ştiinței, afirmând că „s-ar putea spune, împotriva lui Descartes, că nimic nu este mai înşelător decât o idee clară şi distinctă"; mai mult, de Broglie e conştient de faptul că dificultățile ridicate de mecanica cuantică „implică abandonarea completă a reprezentărilor concrete ale realității fizice la scară foarte mică" [38].

Saltul cuantic a stimulat apariția unei mutații a omului de ştiință de la paradigma carteziană la una non-carteziană (figura 1.11). Acest salt este o „tranziție incomensurabilă" în urma căreia oamenii de ştiință vor vedea „lucruri diferite când vor privi din acelaşi punct în aceeaşi direcție" [146]. De acum încolo, aşa cum observă Gaston Bachelard, se va impune o „epistemologie necarteziană", defectul metodei lui Descartes fiind acela că, în ciuda faptului că explică lumea, nu reuşeşte să sesizeze complexitatea experienței [8].

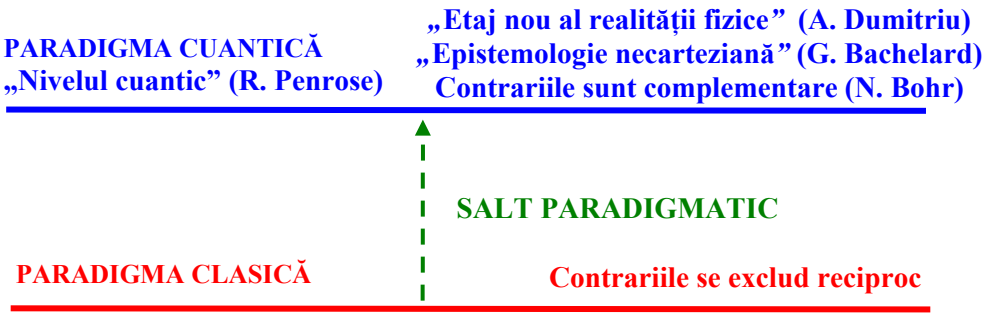


Figura 1.11. Saltul cuantic şi schimbarea de paradigmă

Anton Dumitriu afirmă că „indiferent de poziția filosofică de pe care se judecă fizica actuală, toată lumea recunoaşte că ştiința a ajuns la un etaj nou al realității fizice" [70], unde metodologia carteziană se dovedeşte neputincioasă în anumite situații.

Una dintre explicațiile dualismului undă-corpuscul a fost cea conținută în *principiul complementarității*, formulat de către Bohr: cele două imagini ale particulei cuantice se exclud reciproc, dar sunt complementare. Natura corpusculară şi cea ondulatorie nu se manifestă niciodată simultan; putem observa sau una sau alta dintre cele două naturi antinomice, în funcție de măsurătoare, dar, pentru a avea o reprezentare a particulei, trebuie să se țină cont că ele se întregesc reciproc. Ideea potrivit căreia contradictoriile pot fi complementare stă la temelia noii epistemologii elaborate de Bohr, care i-a premis acestuia să construiască corelații între diverse discipline. Pentru Bohr, relația dintre cauzalitatea locală şi cea teleologică este una de complementaritate, prin urmare *finalitatea demersului ştiințific trebuie să fie unitatea cunoaşterii, a lumii***.** Acest *proiect transdisciplinar*, pe care Basarab Nicolescu îl numeşte *programul lui Bohr* este primul care îşi pune problema *unității cunoaşterii umane* [173].

Intuiția lui Anton Dumitriu, subliniată mai sus, este remarcabilă, anticipând faptul că *mecanica cuantică reprezintă un nou nivel al realității***,** idee fundamentală a modelului transdisciplinar propus de Basarab Nicolescu. Distincția între cele două niveluri ale realității este o consecință firească a regulilor diferite care guvernează lumea fizicii cuantice şi a fizicii clasice; separarea este evidențiată şi de către Penrose atunci când porneşte de la premisa că „există două niveluri posibile diferite de descriere a realității fizice, pe care le vom numi *nivelul clasic* şi *nivelul cuantic*" [185]. Se va vedea mai departe că, aşa cum paradoxurile

logice şi semantice pot fi soluționate prin intermediul teoriei nivelurilor russelliene, respectiv tarskiene, contradicțiile mecanicii cuantice pot fi conciliate folosind un model structurat pe niveluri de Realitate**.**

1.8. Experiența celor două fante şi limitele fizicii clasice

Pentru a justifica necesitatea adoptării modelului transdisciplinar, se vor scoate în evidență câteva implicații epistemologice ale mecanicii cuantice, pornind de la un experiment descris de Richard Feynman, experiment care, în opinia autorului, exprimă esența mecanicii cuantice, întrucât conține „singurul mister" al acesteia, imposibil de explicat la nivelul fizicii clasice [78].

Un tun electronic (construit dintr-un filament încălzit prin trecerea unui curent electric, înconjurat de o cutie metalică având în capăt un orificiu) emite electroni de aceeaşi energie, care sunt accelerați către ecran, unde sunt înregistrați de către detector, care, fiind legat la un difuzor, emite un semnal sonor (figura 1.12).

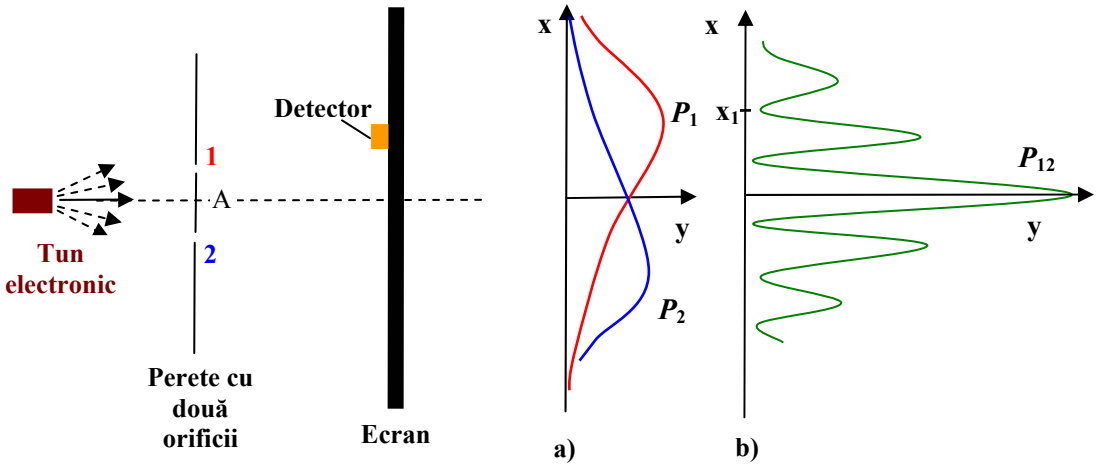


Figura 1.12. Experiența celor două fante

Pe tot parcursul experienței, detectorul, care va fi deplasat de-a lungul ecranului, emite un semnal sonor de aceeaşi intensitate de fiecare dată când captează un electron. Dacă se folosesc doi detectori, aceştia nu emit niciodată simultan sunetul. În concluzie, *electronii sosesc la ecran succesiv (unul câte unul), sub forma unor „bucăți" identice.*

Dacă se închide orificiul 2 păstrând deschis orificiul 1 şi, deplasând detectorul, se reprezintă grafic probabilitatea ca un electron să sosească într-un punct de coordonată x[11] în funcție de valoarea lui x, se obține curba P_1. Dacă, în schimb, se închide orificiul 1 şi al doilea se lasă deschis, măsurătorile vor conduce la curba P_2 (varianta a. din figura 1.12).

În cazul în care experiența se desfăşoară cu ambele orificii deschise, graficul probabilității va fi cel reprezentat în figura 1.12. b., adică P_{12}. Exact graficul P_{12} s-ar fi obținut dacă, în loc de tunul electronic, s-ar fi utilizat o sursă de unde, curba P_{12} fiind rezultatul interferenței undelor emise de cele două surse coerente reprezentate de orificiul 1 şi 2. Rezultatul obținut

[11] Probabilitatea ca electronii să ajungă în punctul de coordonată x este proporțională cu numărul mediu de semnale sonore emise în unitatea de timp, când detectorul e plasat în punctul respectiv.

este surprinzător şi *imposibil de explicat din perspectiva fizicii clasice* prin faptul că există relația:

$$P_{12} \neq P_1 + P_2, \tag{1.19}$$

adică *electronii sosesc sub forma unor „bucăţi", ca şi particulele materiale clasice, dar probabilitatea de sosire are o distribuție specifică undelor*.

Matematic, dacă se notează cu Φ amplitudinea de probabilitate (care este un număr complex) pentru ca electronul să ajungă în punctul de coordonată *x*, se poate scrie pentru situația reprezentată în figura 1.12. a.: $P_1 = |\Phi_1|^2$, respectiv $P_2 = |\Phi_2|^2$. În cazul în care sunt deschise ambele orificii e valabilă relația

$$P_{12} = |\Phi_1 + \Phi_2|^2, \tag{1.20}$$

adică formalismul matematic este exact cel specific fenomenelor ondulatorii. În interpretarea lui Feynman acesta este sensul expresiei conform căreia electronul are o natură dual㠖 undă-corpuscul. Aşa cum s-a menționat, această natură este specifică fiecărei particule cuantice, nu doar electronului.

Dacă se analizează diferențele între graficele corespunzătoare celor două situații, se observă că, în centrul imaginii, P_{12} este mai mare decât dublul sumei $P_1 + P_2$, adică închiderea unui orificiu produce *scăderea* numărului electronilor care trec prin celălalt. Pe de altă parte, dacă se urmăreşte modificarea graficului în alt punct, de exemplu cel de coordonată x_1, se constată că închiderea unui orificiu duce la *creşterea* numărului de electroni care trec prin celălalt. Paradoxul e evident, totul având loc ca şi cum nu ar fi adevărat faptul că un electron trece *sau* prin orificiul 1 *sau* prin orificiul 2.

Pentru a găsi o explicație, Feynman propune să urmărim electronii plasând o sursă de lumină în spatele ecranului, între cele două orificii, punct notat cu A. Când un electron trece printr-unul dintre orificii are loc o împrăştiere a luminii, adică vedem o scânteie de lumină, fapt care ne permite să constatăm prin care orificiu a trecut. Repetând experiența, se observă că, atunci când ambele orificii sunt deschise, curba P'_{12}, care descrie distribuția probabilității, respectă relația:

$$P'_{12} = P'_1 + P'_2, \tag{1.21}$$

adică electronii au o comportare exclusiv corpusculară. În cazul în care se elimină sursa de lumină, pe ecran reapare vechea curbă P_{12}. Am ajuns din nou la o concluzie care sfidează preceptele fizicii clasice: dacă electronii sunt urmăriți, distribuția de pe ecran se modifică**.** Cum modificarea e datorată sursei de lumină care emite fotoni, perturbația trebuie să fie o consecință a ciocnirii dintre fotoni şi electroni.

Pentru a diminua la minimum efectul ciocnirilor, se micşorează frecvența radiației (mărindu-i, deci, lungimea de undă), ceea ce conduce la scăderea energiei fotonilor. Mărirea lungimii de undă are ca efect, însă, limitarea distanței dintre două puncte care mai pot fi distinse ca fiind separate (distanță care e de ordinul de mărime a lungimii de undă). Dacă lungimea de undă devine mai mare decât distanța dintre orificii, vedem doar o scânteie difuză; nu mai suntem în măsură să precizăm prin care orificiu a trecut electronul. În concluzie, dacă dorim să distingem orificiile avem nevoie de o radiație cu lungime de undă

suficient de mică, deci impulsul fotonilor e suficient de mare pentru a distruge figura de interferență[12]; invers, dacă apare figura de interferență, nu putem preciza prin care orificiu trece electronul.

În concluzie: „Este imposibil să se imagineze un aparat pentru a determina prin care orificiu trece electronul şi care, în acelaşi timp, să nu perturbe electronii suficient de mult pentru a distruge figura de interferență**"** [78]. Enunțul anterior constituie formularea dată de Feynman principiului lui Heisenberg[13], pentru cazul particular studiat.

1.9. Principiul lui Heisenberg şi sfârşitul cauzalității locale

Formularea generală a principiului amintit mai sus a fost dată de Heisenberg în 1927. Pentru o înțelegere mai profundă a principiului lui Heisenberg, se impun câteva precizări. În mecanica cuantică *stările fizice* ale unui sistem sunt caracterizate de *funcțiile de undă* Ψ, proprietățile sistemului fiind date prin intermediul *observabilelor fizice*[14]. Observabilelor li se atribuie *operatorii*, cărora li se asociază *ecuații cu vectori şi valori proprii*, care au forma:

$$\hat{A}\Psi = a\Psi \,, \tag{1.22}$$

unde $\hat{A}$ este operatorul asociat observabilei *A*, iar *a* este valoarea proprie a observabilei *A*. Există mai multe valori proprii $a_1, a_2, ..., a_k, ..., a_m$ şi funcții proprii, notate cu $\Psi_1, \Psi_2, ..., \Psi_k, ..., \Psi_m$ care corespund acestor valori şi care satisfac ecuația cu vectori şi valori proprii, fiecare având o anumită probabilitate de manifestare[15]. Starea fizică va fi rezultatul unei superpoziții, corespunzând unui pachet de unde. Funcțiile proprii formează un sistem complet, în sensul că orice funcție de undă poate fi dezvoltată după acest sistem:

$$\Psi = \sum_k C_k \Psi_k \,. \tag{1.23}$$

Prin efectuarea unei măsurători se poate obține doar una dintre posibilele valori ale observabilei, toate celelalte fiind anulate, probabilitatea de a obține pentru *A* valoarea a_k fiind egală cu $\left|C_k\right|^2$. Trecerea, prin actul observației, al măsurării, de la sistemul descris printr-un tren de unde la o stare caracterizată de o valoare unică a observabilei (proces numit „reducerea pachetului de unde") este o *manifestare a discontinuității* în evoluția stării sistemului [173]. Pentru Heisenberg, „trecerea de la «posibil» la «real» are loc în timpul actului observației", alegând între multiplele posibilități; observația modifică în mod discontinuu „funcția de probabilitate" [108]. Basarab Nicolescu adoptă o poziție critică în raport cu posibila concluzie că nu există o realitate independentă de procesul de măsurare, ea născându-se doar odată cu actul observației [173]. Se va vedea că, în modelul transdisciplinar,

[12] Cum $\lambda = h / p$, scăderea lungimii de undă duce la creşterea impulsului fotonului şi invers.

[13] Basarab Nicolescu nu e de acord cu termenul „incertitudine" care e asociat principiului lui Heisenberg, pentru că acesta sugerează cum că ar exista o imprecizie a aparatelor de măsură sau a cunoaşterii evenimentelor cuantice, ceea ce nu poate fi adevărat decât dacă privim prin „lentila" fizicii clasice [173].

[14] În fizica clasică, observabilele sunt funcții de poziții şi viteze, care, dacă au valori bine precizate, conduc la determinarea completă a observabilei.

[15] Pentru simplificare, s-a considerat cazul în care operatorul are un spectru discret.

termenul de „Realitate” este unul fundamental, care nu e doar rezultatul unei construcții sociale înfăptuite prin asentimentul colectiv, ci are şi o dimensiune ontologică, *transsubiectivă* [172].

Dacă rezultatul înmulțirii a doi operatori depinde de ordinea în care se efectuează operația, se spune că operatorii *nu comută*, situație în care observabilele cărora le sunt asociate operatorii *nu pot fi măsurate simultan oricât de precis*, măsurarea uneia perturbând starea sistemului, astfel încât valoarea celeilalte mărimi devine nedeterminată. Acesta este cazul unei coordonate, x şi al componentei pe acea axă a impulsului, p_x. În consecință, Heisenberg stabileşte o relație între incertitudinea în impuls, Δp şi incertitudinea în poziție, Δx:

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \geq h\,, \tag{1.24}$$

unde h este constanta lui Planck [33].

Prin urmare, cu cât mai exact se cunoaşte impulsul unei microparticule, cu atât mai puțin exact se poate preciza unde se află, şi invers sau, în formularea lui Basarab Nicolescu: „produsul dintre extensia în cantitatea de mişcare a unui eveniment cuantic şi extensia sa spațială trebuie să fie superioare cuantei elementare de acțiune” [173].

O relație similară există între extensia în energie, ΔE şi extensia temporală, Δt, a unui eveniment cuantic:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq h\,. \tag{1.25}$$

Din relațiile lui Heisenberg rezultă imediat imposibilitatea unei localizări spațio-temporale precise a unui eveniment cuantic. Mai mult, „dualismul undă-particulă şi nedeterminarea implicată de acesta ne constrânge să renunțăm la orice încercare de a stabili o teorie deterministă în sens clasic” [33]. *Principiul cauzalității locale*, care conduce la ideea conform căreia cursul evenimentelor într-un sistem izolat este complet determinat de starea sistemului la timpul $t = 0$, îşi pierde valabilitatea.

După cum constată Max Born, *forma inițială a amplitudinii funcției de undă este incomplet determinabilă*, deci, deşi evenimentele se petrec cauzal (pot fi descrise de ecuații diferențiale), principiul cauzalității este „lipsit de conținut” pentru că nu se poate cunoaşte exact starea inițială. În consecință „în mod inevitabil fizica este nedeterminată şi, prin urmare, o chestiune de statistică” [33].

Intuitiv, cu cât lungimea de undă poate fi determinată mai precis, cu atât şi impulsul e mai bine definit. Pentru aceasta e nevoie de o „întindere” mai mare a undei, ceea ce măreşte imprecizia în determinarea poziției. Invers, cu cât particula e mai precis localizată cu atât are o întindere mai redusă, deci o imprecizie mai mare în determinarea lungimii de undă, deci a impulsului (figura 1.13).

În consecință, termenul de *cauzalitate* trebuie redefinit întrucât, la nivelul mecanicii cuantice, dimensiunea *locală* a cauzalității îşi pierde sensul. Observația lui Pauli[16] este elocventă: „Pentru o stare dată a unui sistem putem, în general, să facem numai *predicții statistice*. Cât priveşte rezultatul unei singure măsurători, dimpotrivă, el nu este determinat de nicio lege şi, în consecință, *este lipsit de cauză*.”

Se va vedea în continuare cum această „abolire bruscă a pluralității valorilor posibile ale unei observabile fizice” presupune „existența unui alt tip de cauzalitate” [172]. Înainte de a

[16] Acest punct de vedere, care susține caracterul intrinsec statistic, probabilist, al mecanicii cuantice, este cunoscut sub numele de „interpretarea Copenhaga”, interpretare datorată în special lui Bohr, Heisenberg şi Pauli.

aborda problema noii cauzalități, sunt necesare câteva considerații privind implicațiile mecanicii cuantice asupra relației dintre subiectul cunoscător şi obiectul observat.

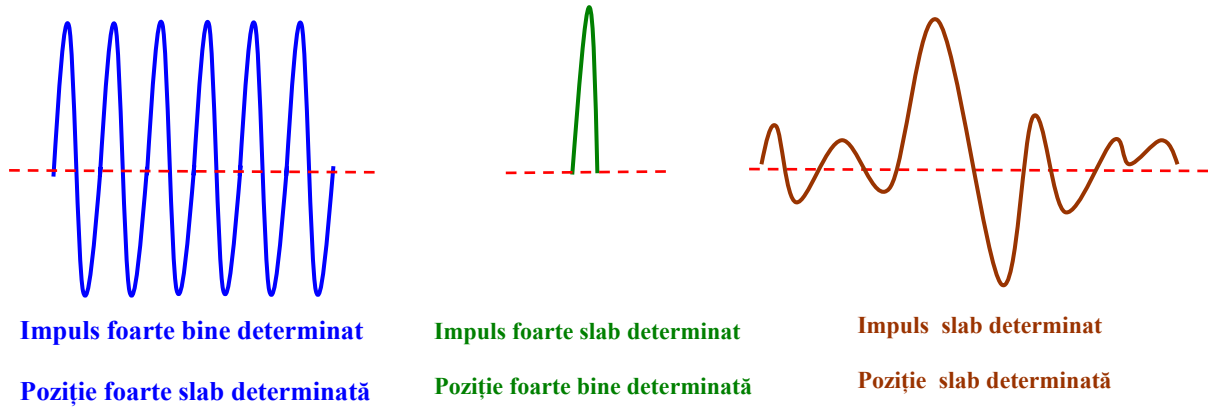


Figura 1.13. Reprezentare intuitivă a semnificației principiului lui Heisenberg. Cu cât dorim să determinăm mai precis lungimea de undă asociată particulei (deci impulsul acesteia), cu atât unda asociată trebuie să fie mai „întinsă", deci localizarea particulei e mai imprecisă şi invers

1.10. Non-separabilitatea cuantică subiect-obiect

S-a demonstrat că, din punctul de vedere al filosofiei scientiste, clădite pe fundamente newtoniene, realitatea este considerată obiectivă, complet separată de subiectul care cunoaşte. Din experimentul cu două fante se observă imediat, însă, că *efectuarea unei observații perturbă fenomenul***.** Dintotdeauna s-a ştiut că actul observării modifică mai mult sau mai puțin fenomenul, datorită imperfecțiunii aparatelor de măsură. Experimentul prezentat scoate însă în evidență faptul că „perturbarea este necesară pentru ca punctul de vedere adoptat să fie consistent" [78].

Altfel spus, actul observației este indispensabil în descrierea cuantică a stării unui sistem; după cum am arătat mai sus, *observatorul, prin actul măsurătorii, este inseparabil legat de reducerea pachetului de unde*, salt prin care observabila ia o valoare unică. Perturbarea în mecanica cuantică nu este datorată imperfecțiunii aparatelor, ci este intim legată de principiul lui Heisenberg, adică „măsurarea intervine în producerea fenomenelor şi nu mai poate fi separată de aceste fenomene" [108].

Non-separabilitatea subiect-obiect din mecanica cuantică, a fost susținută, printre alții, de către Bohr şi Pauli, ideea având, sub diverse forme, rezonanțe semnificative şi în filosofie. De exemplu, referindu-se la conceptul de structură, Anton Dumitriu aminteşte observațiile lui Aldo Testa. Pornind de la faptul că „observatorul se găseşte total implicat în sistemul observat, a cărui structură îl cuprinde", Testa afirmă că există un *principiu universal al interacțiunii***:** nu există nimic care să nu fie în relații de interacțiune cu altul [70].

Schrödinger, deşi nu agreează expresia „influența directă a subiectului asupra obiectului" (din pricină că senzațiile şi gândurile subiectului aparțin unei alte lumi), susține că în lumea filosofică trebuie să abandonăm separarea artificială dintre subiect şi obiect, pentru simplul motiv că ea n-a existat niciodată: „Subiectul şi obiectul sunt una. Nu putem spune că bariera dintre ele a fost sfărâmată de rezultatele recente ale fizicii, deoarece această barieră nu există." [204].

1.11. Paradoxul Einstein-Podolski-Rosen, non-separabilitatea cuantică şi cauzalitatea globală

Revenind la problema cauzalității, e cunoscut faptul că aspectul probabilist al mecanicii cuantice n-a putut fi acceptat niciodată de către Einstein, poziție exprimată tranşant de către acesta într-o scrisoare către Max Born din 1926, în care apare celebra afirmație: „Eu sunt întru totul de acord că El (Creatorul), nu se joacă cu zarurile" [181]. Supoziția sa potrivit căreia în spatele comportării probabiliste se află o structură mai profundă, o lume fizică obiectivă (care să se apropie de cea specifică fizicii clasice), a condus la aşa numita interpretare a „variabilelor ascunse". Conform acestei interpretări, aparenta „a-cauzalitate" se datorează faptului că mecanica cuantică este incompletă, în sensul că există *parametri ascunşi* care, dacă ar fi descoperiți, ar elimina „inacceptabila"[17] nedeterminare, intrinsecă mecanicii cuantice. Pentru Einstein, mecanica cuantică trebuia să se conformeze următoarelor principii: (1) realitatea fizică este independentă de observator; (2) există cauzalitate în sens clasic; (3) oricare două obiecte care nu interacționează[18]sunt absolut separate, adică dacă se acționează asupra unuia dintre ele, celălalt nu e influențat. Acest ultim principiu se numeşte *principiul separabilității*.

Pentru a-şi argumenta ipoteza, Einstein publică, în 1935, împreună cu Rosen şi Podolski, articolul *Poate fi considerată completă descrierea realității fizice cu ajutorul mecanicii cuantice?*, în care apare celebrul experiment mintal cunoscut sub numele de *paradoxul Einstein-Podolski-Rosen* sau, pe scurt, experimentul EPR. Experimentul este descris, pe scurt, în continuare (figura 1.14).

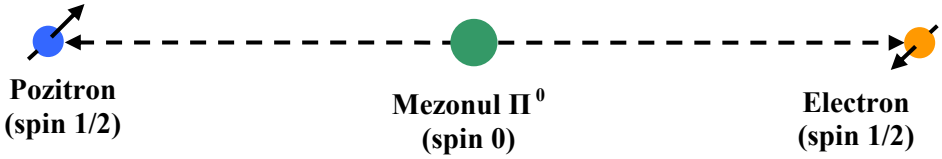


Figura 1.14. Experimentul EPR: Dezintegrarea unei particula de spin nul (mezonul Π ^{0}) în două particule de spin ½ (electronul şi pozitronul). Proprietățile electronului şi pozitronului sunt corelate: indiferent de distanța dintre acestea, orice măsurătoare a spinului uneia dintre cele două particule fixează instantaneu spinul celeilalte

Dacă o particulă de spin nul se dezintegrează în două particule de spin ½ care se îndepărtează una de alta (mai exact, un electron şi un pozitron), suma spinilor celor două particule trebuie să fie mereu nulă, pentru a satisface legea conservării momentului cinetic. Prin urmare, dacă se măsoară spinul electronului într-o direcție, oricare ar fi sensul determinat, spinul pozitronului va fi obligatoriu orientat invers. Prin urmare, când se alege să se facă o măsurătoare asupra unei particule, această alegere influențează instantaneu sensul spinului celeilalte[19]. Uimitor este aici că, deşi fiecare particulă se află în afara conului luminos al celeilalte (adică nu se poate transmite niciun semnal de la unul la altul, semnalul având o viteză mai mică decât a luminii), totuşi *cele două particule sunt corelate.*

[17] Într-o scrisoare către Max Born, din 1935, Einstein scria că i se pare inacceptabilă ideea conform căreia un electron expus unei raze de lumină îşi alege singur traiectoria (a se vedea prefața lui H-R Patapievici la [27]).
[18] Prin faptul că cele două obiecte nu interacționează se înțelege faptul că nu se poate transmite informație de la unul la altul prin semnale compatibile cu teoria relativității (adică viteza semnalului să fie mai mică decât cea a luminii).
[19] Pentru o descriere mai riguroasă şi totodată accesibilă a experimentului EPR se pot consulta [27] şi [185].

Violarea principiului separabilității, enunțat mai sus, îl conduce pe Einstein la concluzia că paradoxul nu poate fi înlăturat decât dacă acceptăm că mecanica cuantică este incompletă, adică există parametri ascunşi. În 1952, Bohm reuşeşte să construiască o teorie a parametrilor ascunşi care să fie compatibilă cu predicțiile mecanicii cuantice şi, în plus, să se supună legii clasice a cauzalității, dar cu o singură condiție: violarea principiului separabilității, adică trebuie să se admită că, în experimentul EPR, cele două particule sunt *interconectate, deşi sunt separate spațial şi nu interacționează*. O confirmare a existenței corelațiilor a furnizat-o, în 1964*, teorema lui Bell* [267], în care se demonstrează că o *teorie cu parametri ascunşi nu poate reproduce predicțiile mecanicii cuantice decât dacă se admite non-separabilitatea*.

Pentru a înțelege mai bine semnificația experimentului EPR e necesară o mică paranteză. În limbaj relativist, fiecărui eveniment A (un punct în spațiul cvadridimensional al lui Minkovski, de coordonate *x, y, z, ct*) i se poate asocia un „con luminos" care delimitează *viitorul cauzal* al lui A (format din toate evenimentele la care informația trimisă din A poate ajunge) de *trecutul cauzal* al lui A (format din toate evenimentele care l-au influențat pe A) şi totodată de mulțimea evenimentelor care nu pot fi legate cauzal de A (evenimente la care informația trimisă din A nu poate ajunge, întrucât ar trebui folosite semnale supraluminoase). Conul luminos este reprezentat grafic în figura 1.15, utilizând doar două coordonate spațiale (*x*, *y*) şi una temporală (*ct*).

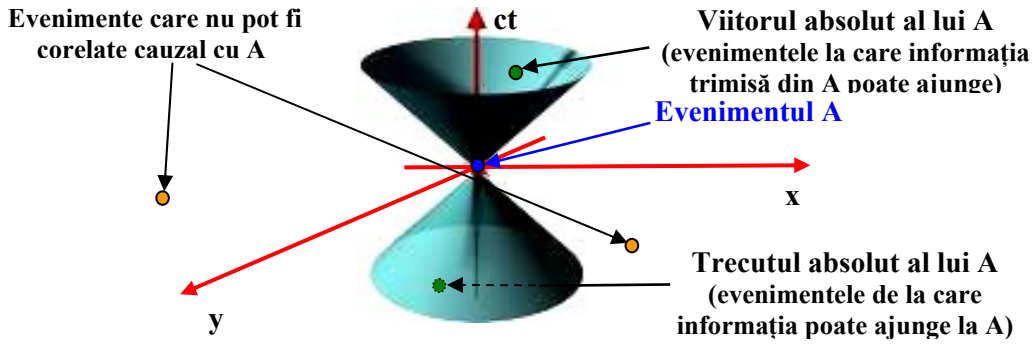


Figura 1.15. Reprezentarea conul luminos folosind doar două coordonate spațiale şi una temporală

Deşi experimentul EPR este unul teoretic, s-au efectuat experimente similare în care s-au măsurat polarizările fiecărui foton dintr-o pereche de fotoni, pentru diferite variante ale direcțiilor, care au confirmat faptul că *principiul separabilității nu este valabil în mecanica cuantică*. Cele mai convingătoare rezultate au fost obținute de către Alain Aspect şi colectivul său, în 1986: influența dintre doi fotoni care se îndepărtează se confirmă experimental şi nu poate fi explicată *clasic* decât dacă se acceptă că informația se transmite de la unul la altul cu viteză supraluminoasă, ceea ce violează teoria relativității (figura 1.16) [185]. Referindu-se la experimentul cu cei doi fotoni, Smolin afirmă că proprietățile fotonilor „sunt corelate, astfel încât o descriere completă a unuia dintre ei îl implică şi pe celălalt", deci „există corelații nelocale între sistemele cuantice" [209].

În concluzie, „fie teoria cuantică nu descrie corect realitatea şi atunci realitatea e separabilă; fie mecanica cuantică o descrie corect, dar atunci realitatea e non-separabilă" [27]. Concluzia lui Penrose este că rezultatele de până acum „sunt incompatibile cu orice model local realist" [185], adică nu există cauzalitate locală şi nici un model teoretic de tip clasic, sau cu variabile ascunse („realist" în exprimarea lui Penrose), care să explice aceste rezultate. Non-separabilitatea cuantică este pentru Basarab Nicolescu semnul existenței unui nou tip de

cauzalitate, *cauzalitatea globală*, „care se referă la sistemul tuturor entităților fizice, în ansamblul lor.” Acest tip de cauzalitate „lărgeşte câmpul adevărului, al Realității”, vorbindu-ne despre faptul că există în Univers „cel puțin la o anumită scară, o coerență, o unitate a legilor, care asigură evoluția ansamblului sistemelor naturale” [173].

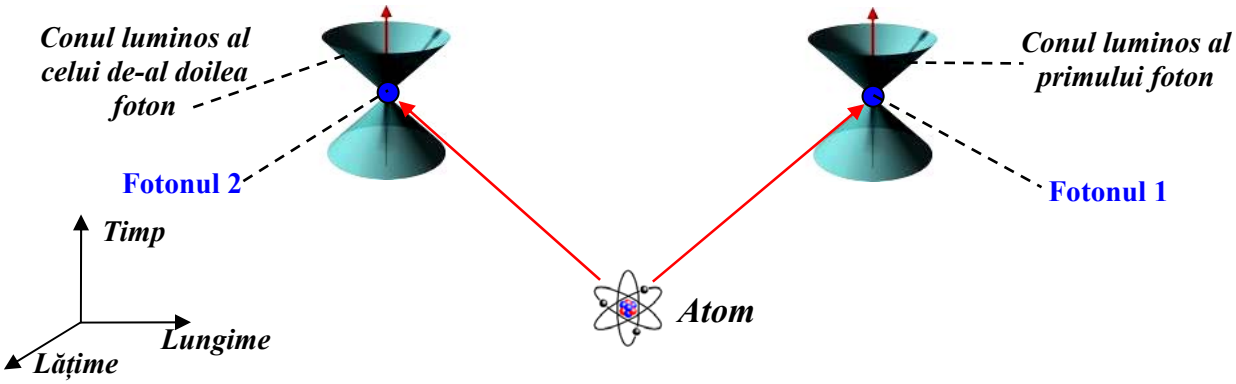


Figura 1.16. Experimentul lui Aspect. Cei doi fotoni creați prin dezintegrarea atomului se propagă în direcții opuse. Fotonii reprezintă, în limbaj relativist, două evenimente care se află fiecare în afara conului celuilalt de lumină, ceea ce înseamnă că la oricare dintre cei doi observatori nu pot ajunge informații privind măsurătorile efectuate de celălalt. Totuşi, există corelații între ceea ce vede unul dintre observatori şi ceea ce a ales celălalt să măsoare

Corelațiile nelocale pot fi văzute ca fiind strâns legate de *caracterul intrinsec probabilist al mecanicii cuantice*; în experimentul EPR există, de fapt, o singură stare cuantică, stare care poate fi descrisă ca o superpoziție liniară a stărilor posibile, dintre care doar una se actualizează în momentul măsurătorii. Basarab Nicolescu vede în acest caracter probabilist manifestarea unei *spontaneități cuantice*, care este strâns legată de existența unei *libertăți cuantice*, „ireductibilă la canoanele determinismului clasic”, ceea ce îl determină să afirme: „Odată cu instaurarea relațiilor lui Heisenberg, se năruie visul lui Laplace despre un determinism absolut: spontaneitatea, libertatea, fac parte integrantă din realitatea fizică.” [172].

1.12. O viziune unitară asupra lumii şi cunoaşterii: bootstrap, complexitate şi gândire sistemică

Implicațiile filosofice ale non-separabilității cuantice[20] conduc, după Bohm, la necesitatea conturării unei *viziuni noi, nefragmentare, asupra lumii*, în care *nu se pot analiza părțile unui sistem fără a înțelege că proprietățile sale depind de starea întregului sistem*. Partea nu poate fi niciodată separată de întreg fără a sacrifica plenitudinea, întregul. De aici deducem că elementul fundamental al lumii nu poate fi partea cea mai mică a lui, adică o posibilă particulă fundamentală, ci întregul însuşi [27]. Teoria este, pentru Bohm, în primul rând o formă de înțelegere (*insight)*, o viziune (cuvântul grecesc *theoria* având acceaşi rădăcină cu *theatre*, „a vedea”), adică un mod de a privi lumea şi abia apoi o formă de cunoaştere *(knowledge)*. Renunțând la ideea existenței unor constituenți de bază, sau „cărămizi” ale lumii, Bohm

[20] După cum s-a precizat, Bohm respinge caracterul probabilist al mecanicii cuantice; dispare astfel posibila asociere a probabilismului cu inseparabilitatea .

propune un model cu adânci implicații ontologice, conform căruia *lumea trebuie văzută în termenii unui flux universal de evenimente şi procese* [27].

Există asemănări evidente între perspectiva propusă de Bohm şi *ipoteza bootstrap-ului*, formulată mai întâi de către Geoffrey Chew, în 1959 [173]. Teoria bootstrap-ului este o alternativă la încercările unor fizicieni[21] de a modela în mod determinist sistemele atomice prin intermediul unor ecuații care descriu mişcarea unor entități fundamentale, ce ar putea fi definite în fiecare punct al continuumului spațio-temporal. Cum determinismul clasic nu funcționează la nivelul mecanicii cuantice, ipoteza boostrap-ului propune renunțarea la ecuațiile de mişcare şi, implicit, respingerea ideii existenței unei cărămizi fundamentale a lumii. „Se poate să nu existe nicio entitate fundamentală, câmp, sau orice altceva", afirmă Chew, singurul sistem cuantic sau relativist necontradictoriu fiind reprezentat de particulele observate. Particula nucleară are trei roluri: de *constituent* al ansamblurilor compuse, de *mediator* al forței care asigură coerența ansamblului şi de *sistem compus*. Conceptul de particulă dobândeşte noi înțelesuri, sporind în complexitate; *particula este, simultan, parte şi întreg, sistem şi subsistem*. Consecința este disoluția identității bine precizate a particulei atâta timp cât este gândită ca entitate separată. Particula este înțeleasă în teoria bootstrap-ului ca *relație între evenimente*, „evenimentul" fiind ceea ce are loc atunci când o particulă este creată sau anihilată. „Bootstrap-ul este deci o viziune a unității lumii, un principiu al autoconsistenței naturii: lumea clădită pe propriile legi prin autoconsistență" [173]. Lumea în care trăim nu poate fi înțeleasă ca o aglomerare de entități independente, ci mai degrabă ca „o rețea de relații, proprietățile fiecărei părți fiind determinate de relațiile cu celelalte părți [...]. Aceasta înseamnă că lumea nu este alcătuită din obiecte, ci din procese prin care lucrurile se întâmplă" [209]. Vechii imagini a unui Univers structurat, alcătuit particule materiale, i se substituie o alta, mai complexă, în care există o dinamică energetică a evenimentelor, modelată de „un principiu al organizării informaționale care are însuşirea de a fi totodată un principiu structurant al diferitelor scări ale Realității" [173].

În cadrul teoriei bootstrap-ului, identitatea unei particule este definită de relația cu celelalte, adică „o particulă este ceea ce este doar pentru că toate celelalte particule există în acelaşi timp" [172], ceea ce înseamnă că *toate particulele sunt fundamentale*. Concluzia pare să simplifice modelul anterior, extrem de complex datorită sutelor de particule elementare care fuseseră descoperite. Ecuațiile specifice modelului autoconsistent sunt, însă, de o uluitoare complexitate, practic fiind imposibil de rezolvat. *Complexitatea este, deci, o trăsătură fundamentală a lumii*. Se întâlneşte atât în intimitatea naturii, de unde transpare prin acumularea datelor experimentale, cât şi în produsele propriilor noastre minți, exprimate prin sofisticatele ecuații matematice [172].

Principiul bootstrap-ului poate fi regăsit în teoria sistemelor: *sistemul este mai mult decât suma părților sale***,** extrăgându-şi energia vitală tocmai din această non-separabilitate, din interacțiunea sa cu alte sisteme; se formează astfel sisteme de sisteme, totul fiind dominat de o perpetuă *dinamică energetică***,** într-o organizare comună. Astfel, convergența mecanicii cuantice cu teoria sistemelor se asigură prin intermediul teoriei bootstrap-ului şi al complexității (figura 1.17).

Complexitatea este specifică tuturor disciplinelor, însă sensurile termenului sunt adesea diferite, din pricina abordării sistemice specifice fiecărei discipline. La fel se poate spune şi despre alte noțiuni fundamentale: sistem, organizare, ordine. Din acest motiv, considerăm că este necesar, după cum susține Basarab Nicolescu, să se elaboreze o *metodologie sistemică unitară*, printr-un efort transdisciplinar, care să favorizeze deschiderea fiecărei discipline atât

[21] Schrödinger şi Dirac sunt reprezentanții cei mai cunoscuți ai acestei mişcări.

spre ceea ce are în comun cu altele, cât şi spre ceea ce e dincolo de ea, ivindu-se, astfel, posibilitatea construirii de noi punți între discipline [172].

Pentru a putea descrie modelul transdisciplinar propus de Basarab Nicolescu e necesară întoarcerea la logica formală, spre a vedea modul în care descoperirile şi modelele mecanicii cuantice au condus la apariția logicilor polivalente, care contestă caracterul absolut al principiului terțului exclus, oprindu-ne în special asupra logicii dinamice a contradictoriului propusă de către Ştefan Lupaşcu.

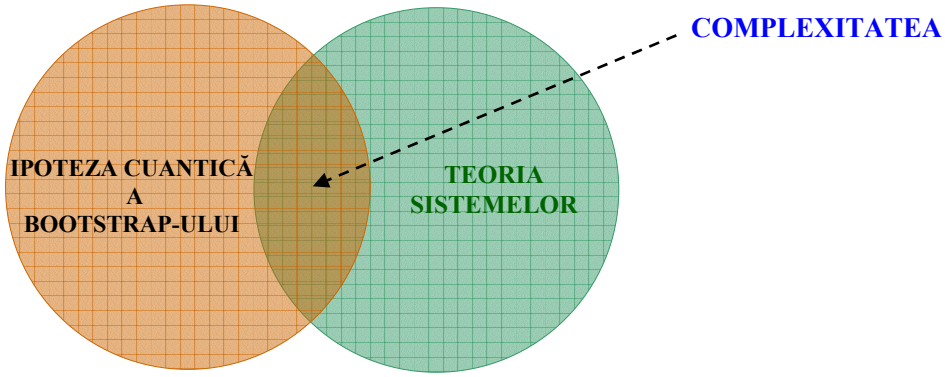


Figura 1.17. Convergența mecanicii cuantice cu teoria sistemelor se asigură prin intermediul ipotezei bootstrap-ului şi al complexității

1.13. Concluzii

În prima parte a capitolului s-a prezentat mai întâi cum, pornind de la idealul cartezian al ideilor clare şi distincte, s-a conturat, sub influența empirismul englez, imaginea unei lumi obiective, independente de subiectul cunoscător, în care totul se dorea a fi explicat prin intermediul determinismului laplacean, întemeiat pe conceptul de cauzalitate locală. S-au evidențiat apoi contribuțiile acestui model ştiințific la apariția pozitivismului care, prin caracterul său antimetafizic, a contribuit hotărâtor la fundamentarea realismului industrial, însoțit de efecte nocive asupra naturii şi omului.

Cea de-a doua parte este consacrată prezentării unui nou nivel al Realității, întemeiat pe noțiunea de discontinuitate: mecanica cuantică. Conturarea conceptului de particulă cuantică, având o natură dual (simultan ondulatorie şi corpusculară), paradoxală, precum şi formularea principiului lui Heisenberg, a permis construirea unui model matematic complex, care să descrie caracterul probabilistic, statistic, nedeterminist (în sens clasic) al mecanicii cuantice, pus în evidență prin experiența celor două fante, experiență care oferă şi o interpretare a principiului lui Heisenberg şi, implicit, a non-separabilității subiect-obiect. Experimentul Einstein-Podolski-Rosen dovedeşte existența corelațiilor nelocale, idee exploatată teoretic de către Bell. Astfel, non-separabilitatea va impune înlocuirea conceptului de cauzalitate locală cu cel de cauzalitate globală, lumea cuantică fiind una autoconsistentă, în care domneşte complexitatea, identitatea fiecărei particule căpătând sens doar datorită existenței tuturor celorlalte particule.

1.14. Contribuții personale

Principalele contribuții personale care se disting în prezentul capitol sunt:

- precizarea semnificațiilor unor noțiuni (care vor juca un rol important în capitolele următoare ale tezei) ca: „non-separabilitate”, „abordare sistemică”, „unitatea cunoaşterii”, „complementaritate”;
- evidențierea corelațiilor existente între noțiunile menționate;
- utilizarea unor reprezentări grafice sugestive originale, pentru a ilustra principalele idei ale capitolului;
- prezentarea unei abordări integratoare proprii, prin care s-a demonstrat ideea potrivit căreia convergența mecanicii cuantice cu teoria sistemelor se asigură prin intermediul teoriei bootstrap-ului şi al complexității.

Prin elaborarea capitolului de față s-au atins două obiective. Pe de-o parte, s-a evidențiat, utilizând termeni specifici metodologiei propuse de Basarab Nicolescu, caracterul transdisciplinar al abordării sistemice – perspectivă extrem de utilă în spațiul mecatronicii, după cum se va vedea în continuare. Pe de altă parte, subliniind importanța înțelegerii cunoaşterii ca proces unic, nefragmentat, s-a introdus noțiunea de *complexitate*, concept cheie al lucrării de față, datorită implicațiilor sale asupra organizării şi autoorganizării sistemelor mecatronice.

CAPITOLUL 2

VALENȚELE INTEGRATOARE ALE ABORDĂRII TRANSDISCIPLINARE

2.1. Introducere

Scientismul finalului de secol XIX s-a insinuat şi pe tărâmul cercetării filosofice. Rigoarea ştiinţifică a soluţiilor ridicate de problemele fundamentale ale filosofiei a devenit un imperativ. Deşi tezele nu trebuiau să fie descoperite exclusiv pe calea raţionamentului, fiind acceptate şi mijloace intuitive (tot aşa cum omul de ştiinţă apelează la surse empirice), justificarea acestor teze trebuia făcută în faţa tribunalului raţiunii, claritatea conceptelor fiind un criteriu esenţial. Cum afirmaţiile metafizice nu pot fi susţinute raţional, *metafizica a fost eliminată din filosofie*. „Acuzaţia că te ocupi cu metafizica a devenit în filosofie o acuzaţie similară cu cea adusă unui funcţionar care pune în pericol securitatea statului" [87], afirma Bertrand Russell. Necesitatea de a construi un limbaj compatibil cu noile cerinţe scientiste a fertilizat cercetarea în spaţiul logicii, favorizând construirea unei logici formale, strâns legate de analiza limbajului, limbaj care se doreşte cât mai exact, fundamentat pe reguli clare, precise. Prin pătrunderea ideilor pozitiviste în logică ia naştere *empirismul logic*, pentru care orice cunoaştere *sintetică* este bazată pe *experienţă* şi *analiza limbajului*.

2.2. Controversa privind natura judecăţilor matematice

Diviziunea judecăţilor în *sintetice* şi *analitice* a fost făcută de Kant [137], primele fiind definite ca extensive (predicatul adaugă o notă nouă subiectului), iar ultimele ca intensive, explicative (nu adaugă nimic subiectului). Kant distinge, de asemenea, între judecăţile *a priori* (care sunt fundamentate în gândirea pură) şi cele *a posteriori* (care provin din experienţă). Pentru Kant, judecăţile matematice sunt toate sintetice (sporind deci cunoaşterea) şi a priori (necesare şi universale). Este imposibil să avem o intuiţie sensibilă (*sensibilitatea* fiind una dintre cele două facultăţi ale cunoaşterii, alături de *intelect*) fără „formele" *spaţiului* şi *timpului*. Reprezentarea acestor forme este anterioară senzaţiilor, deci ele sunt forme a priori. Cum intuiţia face posibilă sinteza şi judecăţile matematice sunt strâns legate de spaţiu şi timp, aceste judecăţi sunt *sintetice a priori* (figura 2.1) [138]. În concluzie, „pentru el, matematica pură nu este analitică; ea este sintetică a priori, pentru că se referă la (descrie) spaţiul şi timpul" [142].

Revenind la empirismul logic, acesta va respinge opinia lui Kant legată de judecățile matematice. Pentru empiriști nu pot fi acceptate decât afirmații care pot fi deduse pe cale pur logică, deci *analitice*, sau sunt confirmate de experiență, deci *sintetice a posteriori*.

În consecință, începând cu mijlocul secolului al XIX-lea, logica și matematica devin tot mai apropiate. Spre sfârșitul secolului al XIX-lea, Gottlog Frege[22], pornind de la ideea că enunțurile matematicii sunt *a priori analitice*[23], încearcă să demonstreze că matematica e o ramură a logicii (deci matematica este cuprinsă de logică). Trebuie reținut aici că „spunând că propozițiile asertate ale aritmeticii au un caracter analitic, Frege are în vedere faptul că ele sunt adevăruri logice" [85], dând cuvântului „analitic" o semnificație proprie.

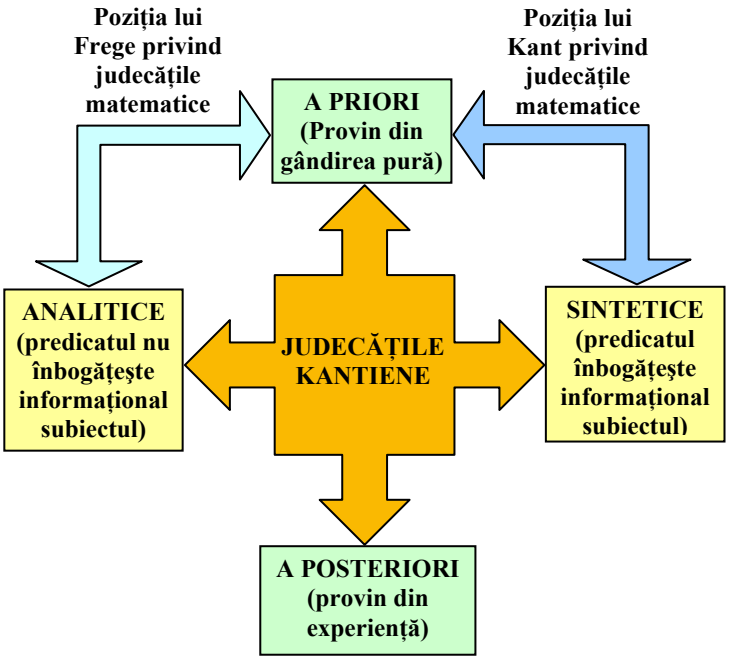


Figura 2.1. Comparație între opinia lui Frege și cea a lui Kant privind natura judecăților matematice

2.3. Tipuri și niveluri în sistemul logic formal al lui Frege

Frege își propune să construiască un limbaj simbolic foarte exact, numită de el „limba formală a gândirii pure". Noul limbaj „total construit din semne, din care orice echivoc să fie eliminat", este ca un microscop în comparație cu ochiul omenesc (reprezentat de limba vorbită) [70]. Înlocuind noțiunile de „subiect" și „predicat" cu cele de „argument" și „funcție", autorul menționat pune bazele calculului propozițional[24], complet axiomatizat.

[22] Deși influența lui Frege asupra empirismului logic este evidentă, Frege însuși se delimitează de empiriști, după cum susține Sorin Vieru în studiul introductiv al lucrării [85].

[23] Merită menționat aici că, în urmă cu mai bine de un secol, Leibnitz a afirmat că propozițiile logicii și matematicii sunt analitice, după cum confirmă și Russel în [201]: „Referitor la propozițiile analitice, Leibnitz susține că toate propozițiile logicii, aritmeticii și geometriei sunt de acest fel".

[24] Frege vede propoziția ca un întreg (despărțirea în subiect și predicat fiind lipsită de relevanță), caracterizată prin valoarea de adevăr („adevărat" sau „fals"). Se poate face abstracție de conținutul propozițiilor, acestea primind notații formale, abstacte („p", „q",...), legătura dintre propoziții făcându-se prin *cuantificatori* („și", „sau" etc.).

Frege observă că datele numerice, referindu-se la *caracteristici* şi nu la *semnalmente*, au legătură cu noțiunea[25], nu cu obiectul [87].

Să considerăm, de exemplu, patru obiecte de culoare roşie: un măr, o floare, o cămaşă şi o carte. Frege distinge între semnalmente şi caracteristici. Pentru cazul ilustrat în figura 2.2, „roşu" este *caracteristica* tuturor celor patru obiecte roşii, subsumate noțiunii de „obiect roşu", „roşu" fiind doar *semnalment* pentru *noțiunea* de „obiect roşu", nu însă caracteristica acesteia (noțiunea neputând fi roşie) [15]. Pot fi atribuite caracteristici şi noțiunilor, însă acestea se numesc *caracteristici de ordinul 2,* spre deosebire de *caracteristicile de ordinul 1,* care pot fi atribuite doar obiectelor şi care sunt semnalmente pentru noțiunile cărora li se subsumează aceste obiecte. În exemplul de mai sus, noțiunea de „obiect roşu" are caracteristica (de ordinul 2) că i se poate atribui un număr. După Frege, *numărul* („4" în cazul nostru particular) aparține unei a treia categorii, fiind definit ca „sfera noțiunii".

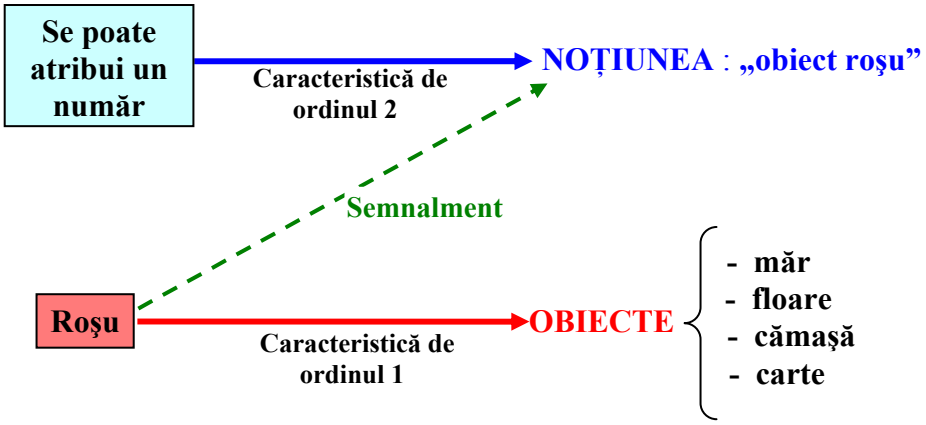


Figura 2.2. Ierarhia caracteristicilor în sistemul lui Frege

Se observă că nu se poate atribui o caracteristică de ordinul 1 unei noțiuni şi nici o caracteristică de ordinul 2 unui obiect. Frege a arătat că, dacă nu distingem între însuşirile obiectelor şi noțiunilor, ordonându-le pe *niveluri diferite*, apar confuzii în limbaj. Se conturează, deci, o *ierarhie a caracteristicilor*, nerespectarea ei conducând la apariția antinomiilor semantice. Legând cele de mai sus de conceptul de funcție, Frege generalizează, admițând că argumentul unei funcții poate fi la rândul lui o funcție, nu un obiect, distingând între funcții de ordinul unu (care au ca argumente obiecte) şi funcții de ordinul al doilea (care au ca argumente funcții de ordinul unu). Prin aceasta, Frege a pregătit, involuntar, teoria tipurilor fundamentată mai târziu de Russell [48], [85].

2.4. Primele fisuri în sistemul logic formal. Paradoxul lui Russell

Procesul de formalizare a matematicii prin explorarea fundamentelor logice ale acesteia părea să nu întâmpine vreo piedică de natură teoretică. Brusc, în 1902, Bertrand Russell îi comunică lui Frege că a descoperit, la baza sistemului acestuia, o contradicție: mulțimea mulțimilor care nu se cuprind pe ele însele, se cuprinde pe ea însăşi atunci când nu se cuprinde, şi invers [35]. Această contradicție a intrat în istoria logicii sub numele de

[25] Distincția între noțiune şi obiect este unul dintre principiile călăuzitoare ale logicii dezvoltate de Frege [85].

„paradoxul lui Russell”[26], sau „paradoxul claselor”. Cu acest paradox, pătrundem într-o nouă perioadă, de criză prelungită a fundamentelor științelor care erau considerate, până atunci, de o incontestabilă claritate: matematica şi logica. Astfel, „în loc de a aduce o nouă certitudine, logica nouă va instaura permanența provizoratului” [85]. Frege însuşi va renunța la dezvoltarea formalismului său, considerând situația fără ieşire, programul logicist fiind preluat de Russell şi Whitehead.

Paradoxurile erau cunoscute de pe vremea grecilor antici, prin faptul că încălcau două principii ale logicii aristoteliene: *principiul non-contradicției*[27] (nu pot fi adevărate, simultan, atât un enunț cât şi negația sa) şi *principiul terțului exclus*[28] (în cadrul unui sistem logic, o propoziție poate fi adevărată sau falsă; nu există o a treia posibilitate). Cel mai cunoscut este paradoxul mincinosului[29] (figura 2.3)

Figura 2.3. Una dintre cele două variante mai cunoscute ale paradoxului mincinosului

Problema care apare aici (în toate versiunile), este aceea a *autoreferinței* [210]: enunțul se referă la el însuşi. Se va reveni asupra acestei chestiuni, extrem de importante în teoria tipurilor a lui Russell şi în teoria nivelurilor de limbaj, introdusă de Tarski.

În continuare se va analiza paradoxul lui Russell şi consecințele acestuia, care au condus la apariția teoriei tipurilor. Russell împarte clasele (sau mulțimile) în două: clase care *se conțin ca element* (de exemplu clasa tuturor noțiunilor abstracte este o noțiune abstractă, deci se conține pe ea însăşi) şi clase *care nu se conțin ca element* (cum ar fi clasa tuturor mamiferelor, care, nefiind un mamifer, nu se conține pe ea însăşi) [70]. Notăm clasa tuturor claselor care nu se conțin ca element cu **Γ**:

$$\Gamma = \left\{ K \,\middle|\, K \notin K \right\}. \tag{2.1}$$

Cum fiecare clasă se conține sau nu pe ea însăşi, o treia situație fiind exclusă, există doar două posibilități: fie **Γ** se conține pe ea însăşi, fie nu. Dacă **Γ** se conține pe ea însăşi, ținând cont de faptul că ea conține *doar* clasele care *nu* se conțin, înseamnă că nu se conține. Invers, dacă **Γ** nu se conține, cum ea conține *toate* clasele care nu se conțin, trebuie să se conțină. În

[26] Termenul „paradox” este considerat, de către majoritatea cărților de specialitate, sinonim cu cel de „antinomie” (concept introdus de Kant). Totuşi, pentru unii autori, ca Solomon Marcus de exemplu, termenii sunt diferiți: când două enunțuri au, simultan, valori de adevăr diferite vorbim de *paradox*, iar când, în plus, fiecare enunț decurge în mod logic din celălalt, avem o *antinomie* [159]. În continuare, se va considera că termenii sunt sinonimi.

[27] Una dintre formulările lui Aristotel ale principiului non-contradicției este cea din [3]: „Este imposibil ca două judecăți contradictorii să fie adevărate în acelaşi timp”.

[28] Principiul este enunțat de Aristotel, în [2]: „Din două judecăți contradictorii una este necesarmente adevărată, cealaltă falsă şi nu este intermediară posibilă”.

[29] Paradox formulat de Eubulide din Milet. Dacă spun „Eu mint” există două posibilități: spun adevărul, deci mint, sau mint, deci spun adevărul. Există două variante mai cunoscute ale acestuia. Una este cea „a cretanului mincinos Epimenide”, care declară că „Toți cretanii sunt mincinoşi”, iar cealaltă, mai actuală, este cea care poneşte de la a scrie pe o tablă fraza „Această afirmație este falsă”, ceea ce generează un paradox evident.

concluzie, se ajunge la o contradicție: *clasa* **Γ**, *a tuturor claselor care nu se conțin ca element se conține pe ea însăşi doar atunci când nu se conține pe ea însăşi*[30] (figura 2.4) [268].

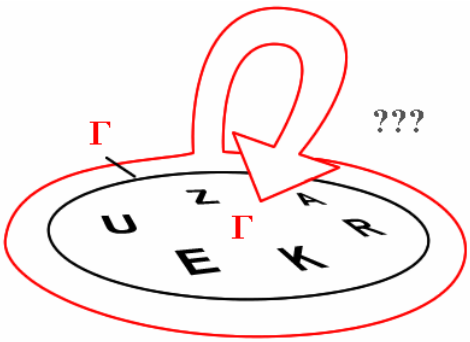


Figura 2.4. Reprezentare sugestivă a paradoxului lui Russell

Se va scrie paradoxul în limbajul logicii formale. Definim clasa **Γ,** care cuprinde toate clasele *x* care nu se conțin ca element:

$$x \in \Gamma = \overline{x \in x}\,. \tag{2.2}$$

Înlocuind pe *x* cu **Γ**, se poate scrie:

$$\Gamma \in \Gamma = \overline{\Gamma \in \Gamma}\,. \tag{2.3}$$

Contradicția e evidentă.

După doi ani, Russell a formulat un paradox similar, fără a folosi noțiunea de clasă [72]. Un predicat poate să aibă sau nu proprietatea la care se referă. În primul caz se numeşte predicabil, iar în al doilea nepredicabil. Altă variantă nu e posibilă. De exemplu, predicatul *abstract* este abstract, deci este predicabil, pe când predicatul *mamifer* nu este mamifer, deci este impredicabil [70]. Se alege predicatul *impredicabil*, definit astfel:

$$imp(x) = \overline{x(x)}, \tag{2.4}$$

în care *x* înseamnă proprietăți. Înlocuind *x* cu *imp*, se ajunge la contradicția:

$$imp(imp) = \overline{imp(imp)}. \tag{2.5}$$

Aceste paradoxuri, „constituie unul dintre obstacolele cele mai mari în constituirea logicii ca ştiință matematică şi în fundamentarea logică a matematicii" [70]. Iluzia ideilor clare şi distincte pare compromisă în bună măsură, aceasta întâmplându-se tocmai pe terenul ştiințelor care păreau cel mai puțin predispuse la o asemenea criză: logica şi matematica. „Rând pe rând, paradoxurile lui Burali-Forti, Cantor, Russell, Richard ş.a. au spulberat ideea despre caracterul «ideal» al construcțiilor matematice, impunând şi aici, ca pretutindeni, *principiul relativității cunoaşterii*" [75].(s.n.)

[30] În 1919, Russell a formulat un echivalent popular al acestui paradox. Bărbierul unui sat bărbiereşte exact pe acei oameni care nu se bărbieresc singuri. Dacă bărbierul se bărbiereşte singur, atunci nu se bărbiereşte singur, şi invers.

2.5. Ordonarea obiectelor logice pe niveluri în teoria tipurilor a lui Russell

Au fost propuse mai multe soluții ale paradoxului lui Russell [73]. Cea mai importantă [70] şi cea mai larg acceptată până acum a fost propusă de Russell însuşi, soluție pe care acesta a denumit-o *teoria tipurilor*. Russell introduce *principiul cercului vicios*. Cercul vicios apare datorită supoziției că o colecție de obiecte ar putea să conțină un obiect care poate fi definit *doar* cu ajutorul colecției însăşi. În consecință, Russell va enunța un principiu care să permită evitarea acestui cerc vicios: „Ceea ce presupune o colecție luată în totalitatea ei, nu poate fi un membru al colecției" [199]. Altfel spus, niciun membru al colecției nu poate fi definit prin colecția la formarea căreia a contribuit ca membru[31]. Exprimarea acestei idei Russell o face folosind *funcții propoziționale* [199].

O funcție propozițonală $\Phi(x)$ conține o parte variabilă, x, şi una determinată, Φ, fără nici o valoare de adevăr până la substituirea sau cuantificarea părții variabile. De exemplu, expresia „x este verde", adică x are proprietatea Φ, „verde", este o funcție propozițională, fără valoare de adevăr (doar un „înveliş" după expresia lui Russell), atâta timp cât x e doar o variabilă nedeterminată. Dacă se înlocuieşte x cu expresia „bradul", se obține, prin *substituire*, propoziția adevărată: „bradul este verde". Prin *cuantificare*, se obține, de asemenea, o propoziție falsă („$\forall x\ \Phi(x)$" se traduce „x este verde întotdeauna") sau adevărată („$\exists x\ \Phi(x)$" înseamnă „x este verde uneori"). Russell defineşte o mulțime formată din toate obiectele care verifică $\Phi(x)$ şi o notează cu:

$$\hat{x}[\Phi(x)] \tag{2.6}$$

În acest caz, expresia:

$$\Phi[\hat{x}(\Phi(x))] \tag{2.7}$$

violează principiul cercului vicios, deci este lipsită de sens. Altfel spus, *argumentul unei funcții propoziționale nu poate fi chiar funcția sau clasa determinată de funcție* [70].

Prin urmare, contradicția poate fi evitată dacă se consideră că, în scrierea formalizată a paradoxului, expresiile:

$$„x(x)" \text{ şi } „imp(imp)" \tag{2.8}$$

sunt lipsite de sens. Se impune, deci, *o limitare* a valorilor posibile ale argumentului unei funcții propoziționale, valorile permise formând un „tip".

Russell propune un *sistem de ierarhizare a obiectelor logice după tipuri*. Acestea sunt:

- *indivizii*, nivelul cel mai de jos, care nu sunt proprietăți, concepte de ordinul 0;
- *proprietățile indivizilor* (mulțimi de indivizi, predicate de indivizi), tipul 1;
- *proprietățile proprietăților indivizilor* (mulțimi de mulțimi de indivizi, predicate de predicate de indivizi), tipul 2, etc.

Ierarhia poate fi infinită. De pildă, se consideră: indivizii „măr" şi „minge" care aparțin tipului 0; proprietățile indivizilor „roşu" şi „sferic"; proprietățile proprietăților indivizilor „culoare" şi „forma geometrică". Simbolurile şi funcțiile propoziționale asociate fiecărui concept sunt indicate în figura 2.5 [15].

[31] De exemplu, *mulțimea tuturor mulțimilor care nu se conțin* nu se poate defini, întrucât defineşte un nou membru (mulțimea) cu ajutorul mulțimii din care face parte (mulțimile care nu se conțin).

Expresiile „mărul este roşu”, sau „mingea este sferică” au sens. La fel şi expresiile: „roşu este o culoare” sau „sferic este o proprietate spațială”. În toate aceste expresii se observă că argumentul funcției aparține unui tip *inferior* celui caracteristic funcției. Dacă se încearcă atribuirea unei funcții a unui argument care să aparțină unui tip superior celui caracteristic funcției obținem expresii fără sens, ca de pildă: „proprietatea spațială este sferică” sau „roşu este măr”. Le fel şi dacă argumentul şi funcția aparțin aceluiaşi tip: „roşul este sferic”, sau „culoarea este o proprietate spațială”. Prin urmare, au sens expresii de tipul $\Phi_2(\Phi_1)$ sau $\Phi_1(a)$, iar cele de tipul $\Phi_1(\Phi_2)$ sau $\Phi_2(\Phi_2)$ sunt lipsite de sens.

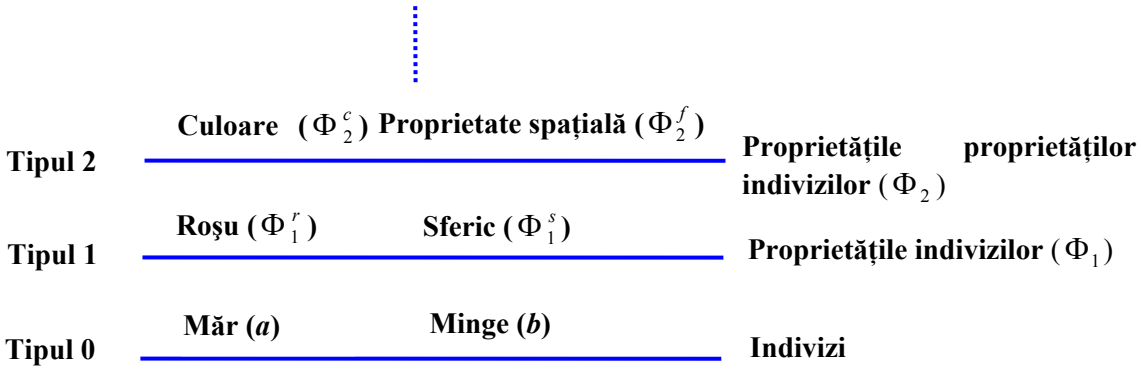


Figura 2.5. Ierarhizarea obiectelor logice după tipuri în sistemul lui Russell

Regula pe care o impune Russell este ca o funcție de tipul *n* să conțină cel puțin un argument de ordinul *n*-1 şi să nu conțină niciun argument de ordin *n* sau mai mare decât *n* [199]. Conform acestei reguli, evident că expresiile $\Phi[\hat{x}(\Phi(x))]$, sau $x(x)$ sunt lipsite de sens, deci paradoxul cu pricina nu mai există. În esență deci, soluția pe care Russell o dă antinomiei care-i poartă numele constă în respingerea propoziției de forma $\alpha \in \alpha$ [45].

2.6. Paradoxuri semantice şi niveluri de limbaj în modelul lui Tarski

Încercând să depăşească unele dificultăți ale teorie tipurilor, Russell a dezvoltat ulterior o teorie ramificată a tipurilor. Sistemul a devenit greoi, astfel că au apărut, în deceniul al treilea al secolului XX, primele încercări de a-l simplifica. O importantă contribuție în acest sens a fost adusă de Frank P. Ramsey, care a împărțit paradoxurile în două grupe diferite, care se vor numi mai târziu *paradoxuri logice* (Grupa A) şi *paradoxuri semantice* (Grupa B). Din grupa A face parte, printre altele, paradoxul lui Russell, iar din grupa B, alături de altele, paradoxul mincinosului. Paradoxurile semantice nu fac parte, prin urmare, din categoria celor cărora li se poate aplica teoria clasică a tipurilor, iar paradoxurile logice se pot rezolva, după cum am văzut, cu ajutorul teoriei *simple* a tipurilor. În consecință, se poate renunța la teoria ramificată a tipurilor, ceea ce Ramsey a şi făcut [71]. Mai rămânea de găsit o soluție pentru rezolvarea paradoxurilor semantice.

Pornind de la sugestia făcută chiar de către Russell de a se ierarhiza, după tipuri, noțiunile de „adevărat” şi „fals”, soluția a fost găsită datorită contribuției lui Rudolf Carnap şi, mai ales, a lui Alfred Tarski. Acesta distinge între propoziția ca atare şi numele acesteia. De exemplu, „calul are patru picioare” este *numele* propoziției *calul are patru picioare*. Paradoxurile semantice apar, afirmă Tarski, pentru că nu se face distincția între situația în care o expresie e utilizată pentru a vorbi despre un *obiect independent de ea* şi situația în care *expresia însăşi*

este obiectul formulării. De pildă, dacă se afirmă „calul este un animal”, se desemnează calul ca obiect, în timp ce în propoziția „cuvântul «cal» are trei litere” obiectul este expresia însăşi. În primul caz, expresia este luată *in suppositione formali*, iar în al doilea, *in suppositione materiali* [73]. Revenind la exemplul inițial, afirmația „*calul are patru picioare* cu care merge”, propoziția subliniată apare *in suppositione formali* pe când în „propoziția «calul are patru picioare» conține patru cuvinte”, aceasta este luată *in suppositione materiali*. Caracterul închis al limbii generează confuzie. Pentru a-l „deschide”, Tarski introduce *nivelurile de limbaj*. Se disting, astfel, *limbajul-obiect*, *meta-limbajul* (limbajul în care vorbim despre limbajul-obiect), *meta-meta-limbajul* (în care vorbim despre meta-limbaj) etc.

Dacă se consideră un sistem logic *S*, care operează cu noțiunile de „adevărat” şi „fals”, acestea nu pot fi definite riguros în cadrul aceluiaşi limbaj *S*, ci doar într-un meta-limbaj, S_1, întrucât conceptele de „adevărat” şi „fals” aparțin sistemului meta-logic S_1 care vorbeşte despre limbajul sistemului *S*. La fel, va exista un sistem meta-meta-logic, S_2, în care se vorbeşte despre S_1 etc. Numărul sistemelor este, practic, nelimitat. Evident, „meta-limbajul posedă un ordin mai înalt decât limbajul care este obiect de investigație” [215]. Modelul lui Tarski e ilustrat în figura 2.6 [15].

Figura 2.6. Niveluri de limbaj în modelul lui Tarski

Deşi inițial (1932) Tarski considera imposibilă construcția unui meta-limbaj pentru un limbaj formalizat de ordin infinit, el va evita mai târziu (1956) să se pronunțe direct în această privință [73]. Folosind modelul descris, contradicția din paradoxul mincinosului este evitată. Mincinosul nu poate afirma nimic legat de valoarea de adevăr a propoziției „Eu mint” în acelaşi sistem în care a fost construită această propoziție.

În concluzie, *tot aşa cum confundarea tipurilor din teoria lui Russell produce paradoxuri logice, confundarea nivelurilor de limbaj din modelul lui Tarski conduce la paradoxuri semantice* [15]. Există, deci, o idee comună a celor două sisteme: o contradicție care nu se poate rezolva la un anumit nivel, poate fi soluționată la un nivel superior. Acest salt de la un nivel la altul în vederea soluționării unei antinomii (figura 2.7) este specific, după cum se va evidenția, abordării transdisciplinare propuse de Basarab Nicolescu [15], [172], [173].

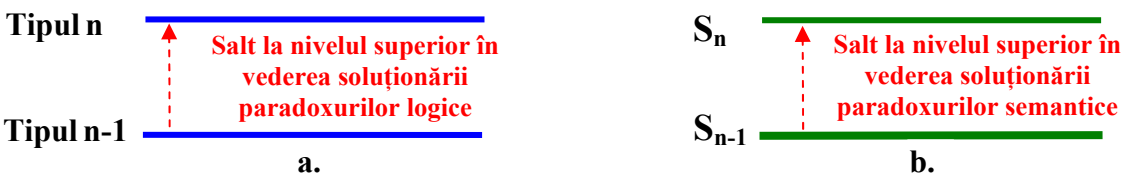


Figura 2.7. Saltul logic în teoria lui Russell (a); saltul semantic în sistemul lui Tarski (b)

2.7. Teorema de incompletitudine a lui Gödel şi potențialul creativ al paradoxului

Anton Dumitriu susține că, prin despărțirea sistemului de meta-sistem, meta-teoria (sistemul S_n în modelul nivelurilor lui Tarski) are un obiect particular, determinat, şi anume sistemul formal S_{n-1}. Din acest motiv, *meta-teoriile îşi pierd caracterul pur formal*. Logica formală ar trebui, însă, să fie independentă de conținutul la care se aplică. Concluzia lui Anton Dumitriu este că apariția meta-teoriilor este un eşec al formalismului din punct de vedere logic [70].

Limitele formalizării unui sistem logico-matematic au fost evidențiate cât se poate de clar de către Kurt Gödel, care porneşte de la întrebarea dacă nu ne putem opri la un anumit nivel, unul dintre limbaje reuşind să fie propriul său meta-limbaj. Cum este indiferent ce simboluri se folosesc pentru codificarea unui sistem logico-formal, Gödel asociază noțiunilor clasice ale logicii numere naturale[32]. Astfel, o formulă poate fi reprezentată sub forma unei serii finite de numere naturale. Seriei i se atribuie, după un anumit algoritm, un număr, numit *număr Gödel*[33] al formulei. Un şir de formule va primi, prin acelaşi procedeu, un număr Gödel. O demonstrație fiind un şir de formule, va avea un număr Gödel asociat. Astfel, enunțurile privind formalizarea matematicii (care fac parte din meta-matematică), devin enunțuri cu privire la numerele naturale, deci aparțin *şi* matematicii. Prin acest procedeu ingenios, *meta-matematica se suprapune cu matematica*. Matematica devine, astfel, propriul ei limbaj.

Pornind de la această premisă, Gödel demonstrează[34] că una dintre propozițiile sale nedecidabile, adică despre care nu se poate afirma dacă e adevărată sau falsă, este tocmai aceea care afirmă că sistemul este necontradictoriu. Gödel a demonstrat deci *incompletitudinea oricărui sistem logic formal* enunțând faimoasa teoremă care-i poartă numele (cunoscută şi sub numele de „teorema de incompletitudine"): „În orice clasă de sisteme necontradictorii există propoziții nedecidabile." [70]. În esență, ideea lui Gödel e reprezentată în figura 2.8.

Figura 2.8. Reprezentare simplificată a ideii care stă la baza teoremei de incompletitudine a lui Gödel

Fie se presupune că afirmația din figură e adevărată, fie că e falsă, se ajunge la un paradox circular, autoreferențial, de tipul celui analizat de Russell. În consecință, *un sistem formal – suficient de complex încât aritmetica să poată fi formalizabilă în el – necontradictoriu, este incomplet, în sensul că se pot construi riguros propoziții nedecidabile*. Demonstrația faptului că un astfel de sistem este lipsit de contradicții nu se poate face, prin urmare, decât dinafara sistemului. Pe scurt, „prețul necontradicției unui sistem este necompletitudinea sa"[159].

[32] Codificarea se numeşte *numerația Gödel*.
[33] Pentru detalii, se poate consulta [159].
[34] Demonstrația poate fi urmărită în [70] sau [159].

Se impune, aici, o observație. Paradoxurile au fost percepute mult timp drept o anomalie, un fenomen negativ, care se dorea a fi suprimat. După formularea teoremei lui Gödel însă, *paradoxul nu mai poate fi privit ca o limitare a gândirii, ci, dimpotrivă, ca o posibilă deschidere spre investigarea unei noi realități*, ca „inima oricărei gândiri creatoare" [159].

În concluzie, „ca rezultat al apariției paradoxelor în matematică şi logică, a suferit o puternică lovitură modul abstract (absolutizant) de apreciere a valorii acestor ştiințe şi, în primul rând, iluzia perfecțiunii totale a matematicii şi a caracterului absolut al legilor logicii formale" [74]. Încercările de a rezolva paradoxurile au stimulat, însă, evoluția acesteia; odată cu ivirea paradoxurilor suntem invitați să intrăm într-o nouă lume a realului [74] (figura 2.9).

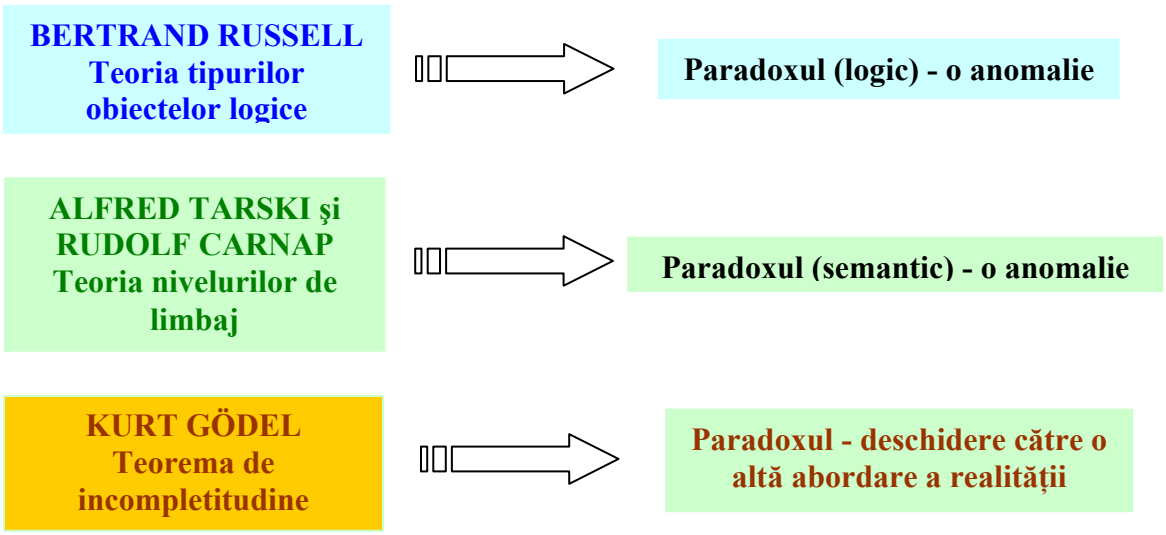


Figura 2.9. Pentru sistemele formale ale lui Russell şi Tarski paradoxul reprezenta o problemă care trebuia soluționată. Teorema de incompletitudine a lui Gödel în schimb, ne deschide, prin intermediul paradoxului, perspectiva unei noi abordări a realității

Se va vedea în continuare cum metodologia transdisciplinară a lui Basarab Nicolescu va exploata tocmai aceste noi valențe ale paradoxului apărute prin deschiderile aduse de teorema de incompletitudine a lui Gödel.

Odată cu dezvoltarea mecanicii cuantice, paradoxul, care a risipit iluzia perfecțiunii matematice a oricărui sistem formal abstract, pătrunde în lumea reală, şi nu oriunde, ci chiar la temelie. Pentru Basarab Nicolescu particula cuantică însăşi este „o unitate a contradictoriilor", care „nu este nici corpuscul nici undă", fiind „*mai mult* decât simpla sumă a componentelor sale clasice, contradictorii (pentru reprezentarea clasică) şi aproximative (în raport cu reprezentarea cuantică)." [173]

2.8. Apropierea logicii de Realitate prin restrângerea intuiționistă a valabilității principiului terțului exclus

Deşi teoria tipurilor este considerată ca fiind cea mai importantă soluție dată paradoxurilor logice, există voci care susțin că aceasta mai degrabă evită cercul vicios creat [71], având doar un caracter de „remediu ad-hoc", prin care nu s-a stabilit „cauza bolii", ci pur şi simplu se speră că, în felul acesta, contradicțiile vor fi evitate [143]. Această slăbiciune a teoriei sale a fost recunoscută, de altfel, chiar de către Russell: „Teoria tipurilor nu aparține

în mod absolut unei părți finite a sistemului nostru. Necesitatea unei doctrine a tipurilor este neîndoielnică, dar această doctrină are încă nevoie de o formă precisă" [70].

Sistemul logico-matematic al lui Russell este primul sistem logic complet şi explicit axiomatizat şi primul sistem logic complet formalizat (operând doar cu semne şi reguli). Însă, din dorința de a elimina tot ceea ce este lipsit de rigoare, Russel a încercat fără succes să îndepărteze complet intuiția din sistemul său, nereuşită pe care o vede drept „un anumit eşec al formalismului în general, în simbolul însuşi rămânând întotdeauna un reziduu oarecare de intuiție.

Pentru Carnap şi Tarski, la fel ca pentru Russell, dimensiunea ontologică a logicii este neglijată, în favoarea unui formalism abstract. De aici decurge şi disprețul manifestat de Carnap față de logica tradițională (înrădăcinată în sistemul aristotelian), numind-o „anemică". Russell, la rândul lui, numeşte silogismul o „şarlatanie solemnă" [70]. Anton Dumitriu este convins că această neînțelegere arătată de logiciştii citați mai sus față de logica aristoteliană „își are originea în pierderea contactului logicii cu realitatea şi deci cu ontologia" [68], [70] (s.n.).

E interesant de observat aici că tocmai *intuiția*, care considera Russell că trebuie îndepărtată dintr-un sistem formal, a constituit pentru L.E.J. Brower[35], în primul deceniu al secolului trecut, punctul de pornire pentru soluția propusă de el la problema paradoxurilor. Brower susține că matematica e independentă de logică şi limbaj, având ca singur izvor *intuiția*, însă *limbajul* în care este exprimată construcția matematică este uneori contradictoriu. Matematica nu trebuie confundată cu limbajul matematic: „experiența intuițiilor şi construcțiilor matematice nu trebuie confundată cu descrierea şi comunicarea sa lingvistică" [142].

Pornind de la principiul potrivit căruia „orice propoziție care are un conținut trebuie să indice una sau mai multe stări de lucruri, bine determinate şi accesibile experiențe noastre" [70], Brower afirmă că, în domeniul mulțimilor infinite, este lipsit de sens să spunem că un element aparține acestei mulțimi sau nu, pentru că nu putem indica acest lucru. Se poate vorbi de conținutul unei propoziții doar atunci când poate fi legată, *intuitiv*, de o stare de lucruri, sau de construcția corespunzătoare [69]. Brower restrânge valabilitatea principiului terțului exclus[36] doar la domeniilor mulțimilor finite (care e şi cel al ştiințelor naturii de altfel). Să considerăm propoziția „*x* are proprietatea *y*". Afirmând că e absurd faptul că este falsă nu putem deduce că propoziția e obligatoriu adevărată[37]. Astfel, Brower consideră că elimină paradoxurile legate de mulțimi infinite[38].

E remarcabil faptul că *intuiționismul a izvorât din dorința de a apropia logicul de ontologic* [159] sau altfel spus, gândirea pură de realitatea imediată. Russell a afirmat, referindu-se la natura logicii moderne: „Se vădeşte astfel că cunoaşterea formelor logice şi cunoaşterea lucrurilor reale sunt ceva total diferit" [69]. În concluzie, *prin restrângerea valabilității principiului terțului exclus, intuiționismul a apropiat logica de Realitate* (figura 2.10)**.**

[35] Doctrina logico-filosofică a lui Brower este cunoscută sub numele de *intuiționism*.

[36] Brower nu e singurul, după cum se va vedea, care „atacă" valabilitatea universală a principului terțului exclus.

[37] Axioma lui Brower: absurditatea absurdității nu implică adevărul; adevărul însă implică absurditatea absurdității [70].

[38] În paradoxurile lui Cantor, respectiv Russell, apar noțiuni ca: „mulțimi nenumărabile infinite" (de pildă mulțimea numerelor reale), care are un „număr cardinal transfinit" (cardinalul mulțimii numerelor reale, care e mai mare decât cel mai mare număr real). Neavând suport intuitiv, Brower consideră fără sens aceste noțiuni. Cu atât mai lipsită de sens este *mulțimea tuturor mulțimilor infinite nenumărabile*. Matematica fiind independentă de logică, nu poate fi clădită pe elemente care țin de teoria mulțimilor. Astfel, dispărând obiectul discuției paradoxurilor, paradoxul însuşi nu mai există.

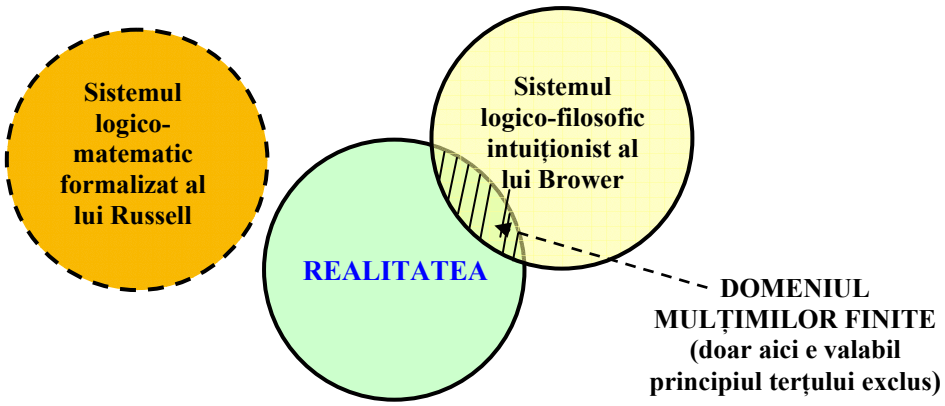


Figura 2.10. Prin restrângerea valabilității principiului terțului exclus logica s-a apropiat de realitate

2.9. Logicile polivalente şi principiul terțului inclus

După cum s-a evidențiat, în deceniul al patrulea al secolului trecut, existau, atât în logică cât şi în matematică, paradoxuri: propoziții care nu puteau fi declarate adevărate sau false pentru că, în oricare din aceste situații, se ajungea la o contradicție. Mai mult, contradicția părea imposibil de evitat şi în mecanica cuantică; dualismul undă-corpuscul, principiul lui Heisenberg, caracterul fundamental probabilistic al mecanicii cuantice, erau paradoxale din perspectiva fizicii clasice. În acest context, a început să câştige teren ideea că o propoziție ar putea să aibă şi altă valoare de adevăr decât „adevărat" sau „fals", idee care a condus la reconstruirea concepției logice privind structura unei teorii a fizicii. În figura 2.11 sunt reprezentate principalele trei idei aparținând mecanicii cuantice care au generat extensiunea logicii prin crearea sistemelor logice trivalente [70].

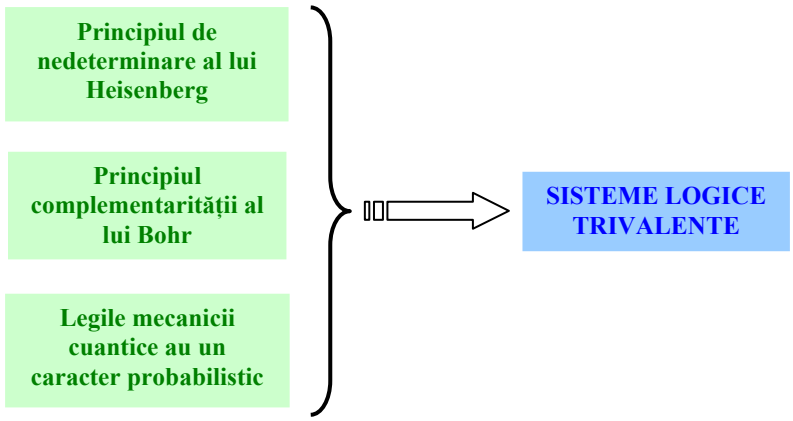


Figura 2.11. Trei idei (aparținând mecanicii cuantice) care au generat apariția sistemelor logice trivalente

Primul care a dezvoltat un sistem logic polivalent necontradictoriu, consistent, a fost logicianul polonez J. Lukasiewicz [70], pornind de la ideea că, la fel cum contestarea postulatului lui Euclid a favorizat apariția geometriilor neeuclidiene, se pot construi logici

polivalente în cazul în care *abolim valabilitatea generală*[39] *a principiului terțului exclus*[40]. Logica lui Lukasiewicz este trivalentă, admițând trei valori pentru propoziții: adevărat (notat cu „1”), fals (notat cu „0”) şi *posibil* (notat cu „1/2”).

În acest sistem, negația (notată cu „N” de către Lukasiewicz) falsului e adevărul, negația posibilului e tot posibilul şi negația adevărului e falsul (tabelul 2.1).

p	0	1/2	1
$\bar{p}$	1	1/2	0

Tabelul 2.1. Tabelul de valori din logica lui Lukasiewicz

Pornind de la logica lui Lukasiewicz, Zygmund Zawirski face prima extrapolare a logicilor polivalente în fizică [231]. În logica bivalentă a lui Russell exista o teoremă potrivit căreia o propoziție din care se pot deduce două enunțuri contradictorii este falsă:

$$[p \supset (q \equiv \sim q)] \supset \sim p, \tag{2.9}$$

unde prin $\sim p$ s-a notat contradictoria lui p.

În consecință, fizica actuală nu poate fi interpretată în lumina logicii bivalente, întrucât particula cuantică ar trebui să aibă şi, în acelaşi timp, să nu aibă o natură corpusculară (sau ondulatorie). În logica trivalentă, însă, teorema de mai sus nu e valabilă, deci cele două naturi ale microparticulei pot exista simultan, fără a conduce la paradox. Mai mult, admițând şi „posibilul” ca valoare de adevăr, logica polivalentă este în acord cu caracterul probabilistic al legilor mecanicii cuantice [70].

După încercările de a fundamenta o logică care să fie adaptată noilor teorii cuantice făcute, în 1936, de către Birkhoff şi von Neumann [24], în următorul an, Paulette Février propune unele scheme logice trivalente pentru a elimina contradicția conținută în principiul lui Heisenberg [77].

Raționamentul dezvoltat de Février a fost următorul. Dacă se măsoară, simultan, coordonata x şi impulsul p al unei microparticule, se obțin valorile aproximative (datorită principiului lui Heisenberg) x_0, respectiv p_0. Considerăm propozițiile:

$a = x$ are valoarea x_0,
$b = p$ are valoarea p_0.

[39] După cum observă şi Lukasiewicz [70], se pare că şi Aristotel [4] a admis existența unei situații în care principiul terțului exclus nu e valabil: actele realizabile în viitor, care sunt supuse liberului arbitru al omului, numite *viitori contingenți*. Afirmația lui Aristotel care conduce la această concluzie e următoarea: „este necesar să aibă loc o bătălie pe mare mâine sau să nu aibă loc; dar nu este necesar ca ea să aibă loc mâine şi de asemenea nu este necesar ca ea să nu aibă loc”.

[40] În opinia lui Basarab Nicolescu, cea mai mare parte a logicilor cuantice au modificat axioma non-contradicției şi nu principiul terțului exclus; cele două postulate erau, pentru logicienii timpului, inseparabile, echivalente, întrucât exista, pentru ei, un singur nivel de Realitate. Doar un model bazat pe existența mai multor niveluri de Realitate va putea separa axioma non-contradicției de cea a terțului inclus. În continuare se va folosi, deocamdată, terminologia specifică autorilor.

Conjuncția a&b nu poate fi adevărată, pentru că ar presupune că atât *a* cât şi *b* să fie simultan adevărate oricât de mici ar fi x_0 şi p_0, încălcând, astfel, principiul lui Heisenberg. Pentru a soluționa problema, Février definește un produs logic special, numit „incompozabil", şi o valoare logică în plus, în afară de „adevărat" (posibilul realizat) şi „fals" (posibilul nerealizat): *posibilul nerealizabil*, căruia Février îi dă numele de *absurd* (figura 2.12). Conform relației lui Heisenberg, produsul incompozabil dintre *a* şi *b* nu poate lua valori mai mici decât constanta lui Planck, dar i se poate asocia în acest caz valoarea de adevăr „absurd", întrucât valorile sub *h* ale acestui produs sunt nerealizabile. Contradicția este, în sistemul lui Février, eliminată în acest mod [70].

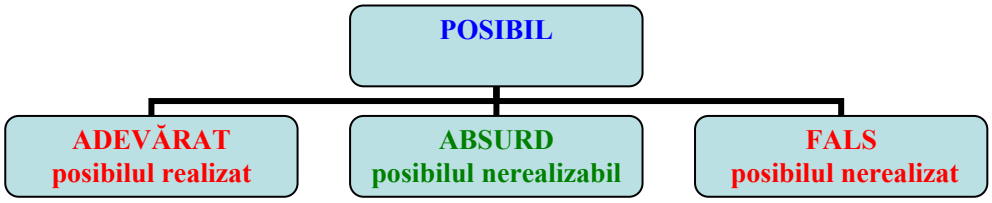


Figura 2.12. Valorile de adevăr în logica trivalentă a lui Février, inspirată din relațiile de incertitudine ale lui Heisenberg

2.10. Epistemologia şi logica lui Ştefan Lupaşcu

Căutând să articuleze o epistemologie non-carteziană, Ştefan Lupaşcu a sesizat imensul potențial creator al paradoxului. Primul postulat al epistemologiei sale este surprinzător din perspectiva logicii formale, logică în care *p* şi non-*p* se anihilează reciproc şi pentru care contradicția este o amenințare: „Principiul complementarității contradictorii trebuie să înlocuiască principiul de non-contradicție, ca fundament logic" [154]. Din perspectiva lui Lupaşcu, „în spatele unui fenomen oarecare, nu va mai fi vorba să căutăm, ca şi condiție logică a posibilității sale de existență, ca nimic să nu-l contrazică, ci tocmai ceea ce îl contrazice, care este fața sa *complementar contradictorie*; condiția logică a existenței sale este contradicția sa" [154]. Noica subliniază faptul că un sistem logic formal care conduce la marginalizarea contradicției „nu are sens de gândire sau de realitate, ba apare – dacă este trecut asupra situațiilor contradictorii din real – drept aberant" [156]. Prin contribuția lui Lupaşcu, logica îşi va redobândi dimensiunea ontologică, tocmai prin faptul că *paradoxul este semnul existenței*: „Gândirea urmăreşte de-a dreptul ființa; trebuie să surprindă peste tot devenirea. Gândirea caută legea ca pace, fie şi una a contradictoriilor; Lupaşcu spune că trebuie să caute legea ca antagonism al contradictoriilor" [156].

Inspirat de dualismul introdus de către de Broglie în mecanica cuantică, Lupaşcu postulează că fiecărui fenomen, element, sau eveniment logic *e* trebuie să i se asocieze un antifenomen, antielement sau antieveniment logic $\bar{e}$ [15]. Actualizarea lui *e* determină, întotdeauna şi obligatoriu, potențializarea lui $\bar{e}$, şi invers, fără ca vreunul dintre ele să poată fi absolut potențializat, dispărând astfel prin absoluta actualizare a celuilalt. Când *e* şi $\bar{e}$ se află (trecând de la actualizare la potențializare sau invers) la acelaşi nivel de actualizare sau potențializare, nu se vor reduce reciproc la 0 (ca în logica clasică), ci vor fi reduse la *starea T*, în care se consideră că, *atât e cât şi* $\bar{e}$ *sunt, fiecare față de celălalt, semi-actuale şi semi-potențiale în acelaşi timp*. Postulatul clasic al noncontradicției şi identității, exprimat formal prin $p \supset p$ (adică propoziția *p* implică *p*), este înlocuit prin *postulatul fundamental al logicii dinamice a contradictoriului* [156]:

$$\begin{aligned} &e_A \supset \bar{e}_P,\ \ \bar{e}_A \supset e_P,\ \ e_T \supset \bar{e}_T, \\ &e_P \supset \bar{e}_A,\ \ \bar{e}_P \supset e_A,\ \ \bar{e}_T \supset e_T. \end{aligned} \tag{2.10}$$

Indicii A, P, T, indică cele trei stări: actualizare, potențializare, respectiv starea T. Rândul de sus exprimă cele enunțate anterior, adică: dacă *e* se actualizează se potențializează $\bar{e}$; dacă $\bar{e}$ se actualizează, se va potențializa *e*; în fine, dacă *e* nu e nici potențial, nici actual, atunci $\bar{e}$ nu e nici actual, nici potențial. Citirea celorlalte trei formule este similară. Tabelul de valori al logicii lupasciene este reprezentat (tabelul 2.2) în comparație cu tabelul de valori al logicii clasice bivalente (s-au folosit următoarele simboluri: „A" – actualizare, „P" – potențializare, „T" – starea T).

e	A	T	P
$\bar{e}$	P	T	A

a.

e	A	F
$\bar{e}$	F	A

b.

Tabelul 2.2. Comparație între tabelul de valori al logicii lui Lupaşcu (a) şi tabelul de valori din logica clasică (b)

Prin aceasta, orice fenomen logic este, prin natura sa dual şi contradictorie, un dinamism structural şi funcțional contradictoriu. Se ajunge, astfel, la „postulatul logicii energiei", adică *principiul antagonismului* [156]: un dinamism oarecare, o energie, implică obligatoriu existența unei a doua energii, unui al doilea dinamism antagonist, căruia îi permite actualizarea prin potențializarea sa şi care, invers, este potențializat prin actualizarea primului. Prin urmare, nu este posibilă existența unui dinamism solitar sau, altfel spus, „dacă există o energie, există *cu necesitate* şi o energie negativă".

Revenind la cele două evenimente contradictorii notate cu *e* şi $\bar{e}$, se constată că, pe măsură ce se actualizează unul dintre ele şi se potențializează celălalt, se actualizează tot mai mult noncontradicția, diminuându-se contradicția. Totuşi, niciodată noncontradicția nu se poate actualiza desăvârşit, absolut, datorită contradicției reziduale, care nu poate fi nulă. Altfel spus, niciun eveniment logic nu poate fi *absolut* necontradictoriu. Dacă, în schimb, *e* şi $\bar{e}$ sunt, simultan, semiactuali şi semipotențiali (starea T), actualizarea contradicției e maximă. Prin urmare, *starea T corespunde unui antagonism maxim*, unei densități maxime de energie, sau, *informațional vorbind, unei organizări maxime* [159]. Contradicția, respectiv noncontradicția nu pot fi absolute; contradicția se actualizează relativ când este generată de starea T şi se potențializează relativ când este respinsă de relativa noncontradicție a stărilor A şi P. Se observă că generarea contradicției apare prin inhibarea reciprocă a două fenomene, fiind împiedicată actualizarea unuia pe seama potențializării celuilalt.

În concluzie, principiul antagonismului introduce contradicția în structura funcțională a logicului. În viziunea lui Lupaşcu, materia este organizată sub forma unei sistematizări energetice a evenimentelor, fiecare sistem energetic supunându-se principiului antagonismului: „energia nu poate fi posibilă sau, cel puțin, sesizabilă pentru noi în afara antagonismului său inerent" [156]. Orice sistem energetic este supus unor dinamisme antagoniste în aşa fel încât *actualizarea* unuia să implice *potențializarea* celuilalt; cele două dinamisme trebuie, în timpul trecerii de la actual la potențial sau invers, să tindă către o stare de egală potențializare şi actualizare reciprocă (figura 2.13). Prin *alternanța actualizare-*

potențializare se întreține deci un perpeutuu antagonism care conduce la un echilibru dinamic al sistemelor; stabilitatea, rezistența unui sistem este cu atât mai mare cu cât le este mai greu forțelor antagoniste de a scăpa din acest echilibru care determină intensitatea lor egală [156]. În nucleul atomic, antagonismul este mai puternic decât la nivelul atomului, deci nucleul este mai rezistent decât atomul. Raționamentul se poate aplica similar la sisteme din ce în ce mai mari; astfel „pornind de la nucleul atomic, sistemele energetice cresc, pe de-o parte, în timp ce manifestă, pe de altă parte, o rezistență descrescătoare la dezintegrare şi transformare" [155].

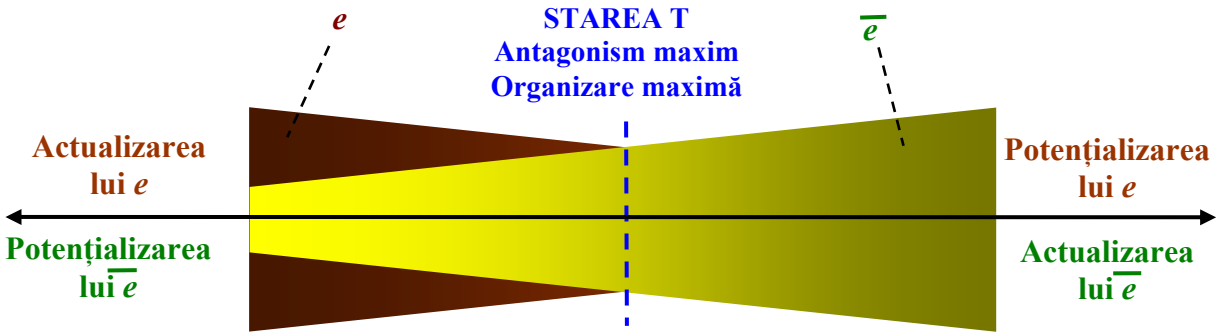


Figura 2.13. Cele două dinamisme antagoniste: actualizare-potențializare

După cum observă Basarab Nicolescu, alternanța actualizare-potențializare se află la originea oricărei mişcări: circulația apei (actualizarea norului implică potențializarea apei şi invers), căderea unui corp etc. [234]. Este interesant să observăm că actualizarea unui eveniment, potențializând evenimentul antagonist, acționează ca o *cauză eficientă*, potențializarea unui eveniment, devenind „un posibil care comportă dinamismul" [156], constituie *cauza finală* (are o determinație teleologică).

În sistemul de gândire al lui Lupaşcu *orice sistem este un sistem de sisteme*, în sensul că nu există niciun sistem care să poată fi considerat simplu, adică alcătuit dintr-un ultim, unic cuplu de forțe antagoniste. Orice obiect e constituit din molecule, formate din atomi care, la rândul lor, au constituenți, neexistând o particulă elementară fără structură. La nivelul infinitului mare totul se petrece ca şi la cel al infinitului mic, orice sistem fiind, la rândul lui, parte a unui alt sistem antagonist. După cum afirmă Lupaşcu, „ceea ce determină formarea şi devenirea sistemelor de sisteme este reprezentat întotdeauna de relațiile de antagonism ale unor relații de antagonism, de o complexitate care creşte în pas cu complicarea sistemelor" [156].

Nu este greu de observat, având în vedere cele menționate mai sus, *similitudinile dintre epistemologia lui Lupaşcu, principiul bootstrap-ului şi gândirea sistemică* [15].

Orice eveniment cuantic se prezintă, concomitent, ca undă şi corpuscul, care trimite la *dualismul continuu-discontinuu*, noțiunea de „corpuscul" fiind asociată cu discontinuitatea, iar cea de „undă" cu continuitatea[41]. Se vor regăsi mereu *energii continue* de *omogenizare*, reprezentate de particulele de tip fotonic, care nu respectă principiul de excluziune al lui Pauli[42], şi *energii antagoniste*, *discontinue*, de *eterogenizare*, regăsite în particulele de tip electronic, care se supun acestui principiu.

[41] Deşi asocierea undei cu ideea de continuitate şi a corpusculului cu cea de discontinuitate poate fi făcută la un anumit nivel, Lupaşcu scoate în evidență faptul că, atât corpusculul cât şi unda conțin, *fiecare*, dualitatea continuu-discontinuu [154].

[42] Principiul lui Pauli postulează faptul că nu există mai mult de un singur fermion (particulă cu spin semiîntreg, cum e, de pildă, electronul sau protonul) într-o stare cuantică caracterizată de aceleaşi numere cuantice, obligând,

Lupaşcu sesizează faptul că tendința de eterogenizare, de diversificare, instaurată prin intermediul principiului lui Pauli acționează împotriva tendinței omogenizatoare a energiei care decurge din existența principiului al doilea al termodinamicii[43] (figura 2.14). Pornind, deci, de la legile fizicii, Lupaşcu descoperă un alt dualism antagonist: *omogenizare-eterogenizare*; aranjamentul părților unui sistem, *structura* sa „este efectul microenergiei antagoniste (atracție-repulsie, asociație-disociație, legătură-ruptură) şi al proprietăților energetice care tind, în mod antagonist, fie la omogenizare, fie la heterogenizare" [70]. Viața nu există decât ca urmare a acestui dualism contradictoriu, permanent, omogenizare-eterogenizare; atât diferențierea extremă cât şi realizarea unei absolute uniformizări ar conduce la o eternă nemişcare, la moartea cosmică [173].

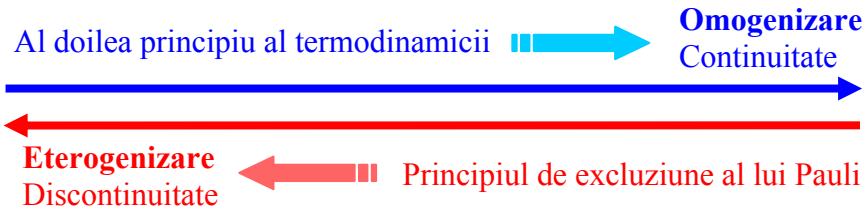


Figura 2.14. Dualismul antagonist omogenizare-eterogenizare

Dualismul dinamic omogenizare-eterogenizare are drept corespondent logic *dualismul identitate-diversitate***.** Lupaşcu înlocuieşte pe *e* prin *i*, desemnând *identitatea* şi pe $\bar{e}$ prin *d*, însemnând nonidentitatea, *diversitatea*. Fiecărei identități i se asociază o diversitate contradictorie, actualizarea uneia generând potențializarea celeilalte. Dacă se va considera identitatea şi nonidentitatea (diversitatea) ca fiind două adevăruri, unul afirmativ, iar celălalt negativ, cele două adevăruri generează o *noncontradicție relativă* pe măsura actualizării unuia pe seama potențializării celuilalt:

$$i_A \supset d_P, \;\; d_A \supset i_P . \tag{2.11}$$

Aceleaşi două adevăruri generează o *contradicție relativă* când se inhibă reciproc, împiedicându-se actualizarea unuia pe seama potențializării celuilalt, situație corespunzând stării T:

$$i_T \supset d_T . \tag{2.12}$$

Astfel, nu se poate vorbi de un adevăr absolut sau un fals absolut, niciunul neputându-se actualiza riguros, desăvârşit. Din cele de mai sus rezultă următoarele conjuncții:

$$i_A \cdot d_P ; \; d_A \cdot i_P ; \; i_T \cdot d_T , \tag{2.13}$$

şi disjuncțiile:

$$i_A \cdot d_P \vee d_A \cdot i_P \vee i_T \cdot d_T , \tag{2.14}$$

astfel, fermionii să se diferențieze, ceea ce constituie, evident, o tendință de *eterogenizare*. Pentru bosoni, (particule cu spin întreg, cum e, de exemplu, fotonul) principiul nu e valabil.

[43] Principiul al doilea al termodinamicii afirmă că sistemele fizice evoluează ireversibil în sensul transformării unor forme superioare de energie (mecanică, chimică, electrică), în forma inferioară de căldură, care este o expresie a uniformizării, omogenizării. În timpul acestui proces entropia creşte, ceea ce se traduce prin existența unei tot mai mari doze de dezordine în sistem.

adică fie se actualizează identitatea (ceea ce implică potențializarea diversității), fie se potențializează identitatea (ceea ce implică actualizarea diversității), fie cele două se resping reciproc cu egală tensiune (adică se realizează starea T).

Putem acum concluziona că *starea T este terțul inclus*, *cea de-a treia valoare a logicii trivalente lupasciene, valoarea de nici adevărat, nici fals*: „acelaşi grad de actualizare şi potențializare ale celor două evenimente contradictorii care se resping reciproc cu aceeaşi tensiune şi îşi interzic astfel de a fi actual sau potențial unul față de altul, [...] îngăduie, generează şi explică această stare T sau *a treia stare posibilă*" [156] (s.n.).

În logica lupasciană fenomenele mecanicii cuantice apar ca o expresie firească a logicii energiei. De pildă, *dematerializarea energiei*, prin transformarea perechii electron-pozitron [252] în doi (sau mai mulți) fotoni (figura 2.15), după reacția:

$$e^{+} + e^{-} \rightarrow \gamma + \gamma\,, \tag{2.15}$$

nu reprezintă nimic altceva decât actualizarea identității *i* (prin potențializarea diversității *d*).

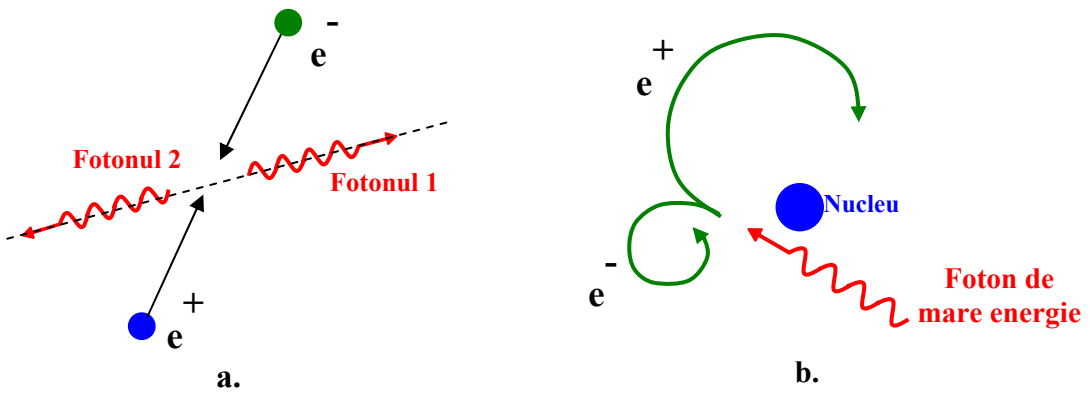


Figura 2.15. Anihilarea perechii electron-pozitron (a) şi generarea perechii electron-pozitron(b)

Relația de mai sus corespunde, în logica lui Lupaşcu, trecerii:

$$d_A \cdot i_P \rightarrow i_A \cdot d_P\,. \tag{2.16}$$

Invers, *materializarea energiei*, ca urmare a transformării (în vecinătatea unui nucleu atomic, pentru a fi respectate legile de conservare) unui foton de mare energie (cel puțin 1022 keV) într-o pereche electron-pozitron (figura 2.15), conform relației:

$$\gamma \rightarrow e^{+} + e^{-}\,, \tag{2.17}$$

reprezintă actualizarea diversității *d* (prin potențializarea identității *i*). Procesul descris corespunde relației lupasciene:

$$i_A \cdot d_P \rightarrow d_A \cdot i_P\,. \tag{2.18}$$

O idee esențială a filosofiei lupasciene este aceea a *existenței celor trei materii* (figura 2.16): (1) „materia macrofizică", în care predomină tendința de actualizare a omogenului, guvernată de al doilea principiu al termodinamicii; (2) „materia biologică", a lumii vii,

dominată de actualizarea eterogenului, caracterizată prin creşteri locale de entropie; (3) „materia microfizică”[44], numită de filosof *starea T*, în care se întâlneşte o semi-actualizare şi semi-potenţializare a omogenului şi etrogenului [156].

Actualizarea dominantă a omogenității din lumea macrofizică, care presupune, evident, potențializarea dominantă a eterogenului, nu exclude *total* actualizarea tendinței eterogenizatoare (şi potențializarea corespunzătoare a omogenului). Acelaşi lucru este valabil în ce priveşte dominația eterogenului din lumea vie. Există întotdeauna ceva fizic în sistemul biologic şi ceva biologic în sistemul fizic. La nivelul sistemului microfizic însă, coexistența celor două polarizări antagoniste este deosebit de intensă, ceea ce conferă o mai mare rezistență acestei lumi. Astfel se explică dificultatea de a dezintegra nucleul atomic [159]. Echilibrul energiilor antagoniste din nucleu este realizat între forțe opuse care ating maximul de intensitate; în consecință, concentrarea energiei atinge cote considerabile, ceea ce se poate constata în momentul eliberării energiei nucleare.

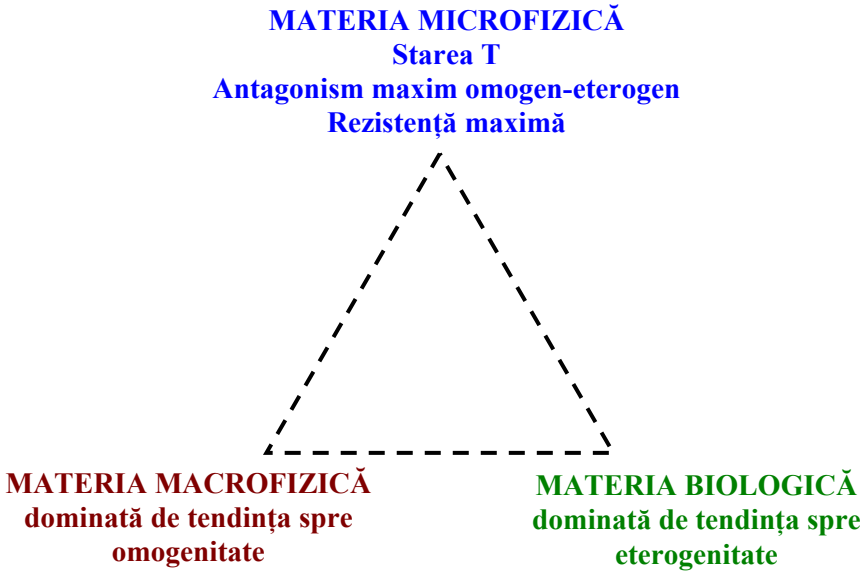


Figura 2.16. Cele trei materii lupasciene

În logica terțului inclus a lui Lupaşcu, paradoxurile mecanicii cuantice au o explicație. De pildă, în principiul lui Heisenberg, dacă se înlocuiesc e şi $\bar{e}$ cu poziția (notată cu x), respectiv impulsul (notat cu p) unei microparticule, pe măsură ce se actualizează x, se potențializează p şi invers, adică:

$$x_A \supset p_P;\ p_A \supset x_P. \tag{2.19}$$

Astfel, mărimile x şi p, care sunt în microfizică simultan incompatibile, devin, în exprimarea lui Lupaşcu, *contradictoriu conjugate* [156]. La fel, dacă se înlocuiesc e şi $\bar{e}$ prin *corpuscul* şi *undă*, se ajunge la o concluzie similară: actualizarea caracterului ondulatoriu al microparticulei potențializează (virtualizează) sistemul antagonist reprezentat de corpuscul, iar actualizarea caracterului corpuscular îl potențializează pe cel ondulatoriu.

Logica lui Lupaşcu este în acord inclusiv cu faptul că *subiectul cunoscător nu poate fi separat de obiectul observat*. Actualizarea unui fenomen logic e îi conferă acestuia rolul unui

[44] Lupaşcu arată că există analogii între lumea microfizică şi cea psihică, unite prin intensul dinamism antagonist omogenizare-eterogenizare.

agent activ, *e* fiind considerat în acest caz *subiect*; potențializarea lui $\bar{e}$ îi atribuie fenomenului un caracter pasiv, de pacient, de *obiect*. Prin urmare, subiectul logic şi obiectul logic sunt mereu în relație de antagonism; cum subiectul reprezintă actualizarea unui oarecare dinamism şi obiectul reprezintă potențializarea dinamismului antagonist, subiectul şi obiectul nu se pot separa net, subiectul alterând obiectul şi invers. Cum nici actualizarea nici potențializarea nu pot fi absolute, nu există subiect absolut sau obiect absolut. Această *inseparabilitate subiect-obiect* nu era prezentă în fizica clasică, tocmai pentru că se pornea de la premisa unei absolute, riguroase actualizări.

În fine, logica lupasciană conduce la concluzia conform căreia caracterul probabilistic, statistic, al legilor mecanicii cuantice este o consecință firească a actualizării *relative*, incomplete a lui *e*, însoțită de potențializarea *relativă*, incompletă, a lui $\bar{e}$. O lege ar putea fi nestatistică doar dacă ar permite actualizarea *absolută*, perfectă, totală, a lui e sau $\bar{e}$, ceea ce, după cum s-a evidențiat, e imposibil [156].

În concluzie, *logica lui Ştefan Lupaşcu porneşte de la realitate şi se întoarce la ea*. Sesizând că logica cea mai profundă este una întemeiată pe contradicția izvorâtă din dinamismul energetic specific dualismului antagonist care se manifestă la nivel macrofizic, biologic şi mai ales cuantic (sau psihic), *Lupaşcu construieşte un sistem logic trivalent, bazat pe aşa-numitul principiu al terțului inclus*, care permite concilierea contrariilor, datorită existenței stării T. Noua abordare epistemologică porneşte de la a căuta, în prezența unui fenomen oarecare, care este fenomenul antagonist şi în ce măsură acesta este potențializat sau îl potențializează pe primul. În cursul acestui proces, dualismul antagonist omogenizare (identitate)-eterogenizare (non-identitate, diversitate) joacă un rol esențial. Prin acest raport constitutiv al complementarității contradictorii „trebuie să legăm raționalul şi iraționalul, identitatea şi non-identitatea, invariantul şi variantul...” [154], stabilindu-se o relație *sinergică* între contrarii care, până nu demult, erau considerate contradictorii, co-existența lor fiind de neconceput. Prin implicațiile sale, filosofia lui Ştefan Lupaşcu se dovedeşte a fi una *integratoare*, conciliantă, motiv pentru care rolul său la fundamentarea viziunii transdisciplinare propusă de Basarab Nicolescu este determinant [15], [172], [173].

2.11. Viziunea transdisciplinară a lui Basarab Nicolescu

Modelele epistemologice clasice, izvorâte din iluzia unei cunoaşteri în care subiectul investighează o realitate independentă de el, realitate guvernată de un străin determinism laplacean care ar constitui expresia unei cauzalități locale, s-a dovedit a fi un eşec pe plan ştiințific odată cu apariția mecanicii cuantice. Pozitivismul, prin disprețul manifestat față de metafizică, a încercat să taie rădăcinile transcendente ale ființei umane, ceea ce a condus la crize sociale profunde, ale căror consecințe se simt şi azi. Una dintre ele a fost criza generată de realismul industrial, care a alimentat revoluția industrială, conducând, după cum s-a evidențiat, la apariția unei mentalități dominate de intenția de a obține profit cu orice preț, dublată de o nestăvilită dorință de putere şi posesiune. Natura era privită ca un dușman care trebuie stăpânit, exploatat fără restricții, la fel cum pot fi exploatate țările mai puțin dezvoltate. E o lume a lui „sau-sau”, gândirea fiind fragmentată de o logică binară, în care contrariile se exclud; subiectul este separat de alt subiect, fiecare fiind separat de Natură. Ideile, pentru a fi clare, trebuiau să fie distincte, separate de bisturiul unei incontestabile dihotomii. Logica formală era lipsită de substrat ontologic, abstractă, separată de Realitate.

Basarab Nicolescu constată că, într-o lume a specializării excesive, a „big-bang-ului disciplinar” [172], orice unitate a cunoaşterii pare intangibilă, iluzorie. Există un tot mai mare decalaj între acumularea de informații şi impactul acestora asupra vieții interioare a ființei

umane. În debutul *Cartei Transdisciplinarității*, se menționează că „proliferarea actuală a disciplinelor academice şi neacademice conduce la o creştere exponențială a cunoaşterii, care face imposibilă orice privire globală asupra ființei umane”. O „logică a eficacității în slujba eficacității nu poate genera decât o ruptură dintre o cunoaştere din ce în ce mai bogată şi o viață interioară din ce în ce mai săracă” [172]. Există, însă un *drept al omului la o cunoaştere unitară*, care a fost anticipat, printre alții, aşa cum s-a putut constata, de către Bohr şi Bohm şi care nu se poate realiza în lipsa unor *legături între discipline*. Această nevoie a condus, spre mijlocul secolului XX, la apariția *pluridisciplinarității* şi a *interdisciplinarității* [173].

Păstrând definițiile lui Basarab Nicolescu, „pluridisciplinaritatea” se referă la studiul unui obiect care aparține unei discipline, de către mai multe discipline, simultan, iar „interdisciplinaritatea” vizează aplicarea metodelor specifice unei discipline pe teritoriul altor discipline (aşa au apărut biofizica, fizica matematică sau cosmologia cuantică) [173]. Finalitățile pluridisciplinarității şi interdisciplinarității rămân însă înscrise în cadrul cercetării disciplinare, neputând, deci, răspunde nevoii de cunoaştere unitară a omului. Preluând termenul introdus în 1970 de Jean Piaget, Basarab Nicolescu defineşte *transdisciplinaritatea* ca fiind „ceea ce este în acelaşi timp *între* discipline, *înăuntrul* diferitelor discipline şi *dincolo* de orice disciplină”, finalitatea ei fiind *înțelegerea lumii prezente prin unitatea cunoaşterii* [172]. Trebuie reținut faptul că cercetarea transdisciplinară, deşi diferă prin finalitatea ei de cercetarea disciplinară, îi este complementară, nicidecum contrară acesteia. În exprimarea lui Basarab Nicolescu, arcul cunoaşterii are patru săgeți: disciplinaritatea, pluridisciplinaritatea, interdisciplinaritatea şi transdisciplinaritatea [173]. Pentru a înțelege punctele de tangență dintre abordarea transdisciplinară şi ştiința modernă, se va face apel, pe scurt, la câteva concluzii din subcapitolele anterioare.

Începând cu primii ani ai secolului trecut, strădania logicienilor de a construi un formalism complet şi necontradictoriu s-a lovit de existența paradoxurilor logice şi semantice. Paradoxul s-a dovedit a fi însă, nu după mult timp, un stimulent esențial al gândirii creatoare, conducând, după cum s-a argumentat, la apariția nivelurilor (tipurilor) logice russelliene şi a nivelurilor de limbaj din teoria lui Tarski, precum şi la formularea teoremei de incompletitudine a lui Gödel, conform căreia nu se poate construi un sistem logic formal, suficient de complex, care să fie complet şi necontradictoriu.

Odată cu evidențierea de către Planck a caracterului discontinuu al energiei unui atom, se conturează existența unui alt nivel al Realității fizice: mecanica cuantică. La acest nivel operează alte legi şi se utilizează alte concepte decât cele proprii lumii macrofizice: particula cuantică are o natură duală, comportarea ei fiind de natură probabilistică, nedeterministă în sens clasic, supunându-se principiului lui Heisenberg. Ipoteza bootstrap-ului din mecanica cuantică, principiu al autoconsistenței, ne relevă că *o particulă este ceea ce este pentru că toate celelalte particule există simultan*, complexitatea fiind o trăsătură esențială a lumii. Natura pare a se manifesta paradoxal chiar la nivel fundamental, în lumea cuantică, ceea ce a impulsionat cercetarea logicienilor, care au construit sisteme logice polivalente. S-a evidențiat în precedentul paragraf cum logica energiei a lui Ştefan Lupaşcu, întemeiată pe dualitățile antagoniste actualizare-potențializare, respectiv omogenizare-eterogenizare, defineşte existența unei a treia valori de adevăr, starea T, devenind, astfel o logică bazată pe *principiul terțului inclus***.**

Metodologia transdisciplinară este construită pornind de la *trei postulate*, înrădăcinate în descoperirile ştiinței moderne. Primul postulat (de natură ontologică [175]) afirmă faptul că *în Natură şi în cunoaşterea Naturii de către noi există diferite niveluri de Realitate şi de percepție*. Conform celui de-al doilea postulat (de natură logică), *trecerea de la un nivel de Realitate la altul se face cu ajutorul logicii terțului inclus* [173].

Basarab Nicolescu distinge între *Real* şi *Realitate*: „Realul" este ceea ce este, fiindu-ne ascuns pentru totdeauna, pe când la „Realitate" putem accede prin cunoaştere, ea fiind „ceea ce rezistă experienţelor, reprezentărilor, descrierilor, imaginilor ori formalizărilor noastre matematice" [173]. Alături de dimensiunea pragmatică introdusă prin definiția anterioară, Realitatea are şi o dimensiune ontologică: ea nu este doar produsul unei construcţii realizate prin acord intersubiectiv, ci posedă şi un caracter *trans-subiectiv*, prin faptul că depinde de rezultatele experimentale [172]. Prin *nivel de Realitate*, Nicolescu înțelege „un ansamblu de sisteme invariant la acțiunea unui număr de legi generale", cum sunt, de pildă, entitățile cuantice, care se supun unor legi radical diferite de cele ale lumii macrofizice. Potrivit lui Basarab Nicolescu, în cadrul sistemelor naturale există cel puțin trei niveluri de Realitate: nivelul macrofizic, nivelul microfizic si cyber-spațiul-timpul. Acestora li se poate adăuga un al patrulea nivel (deocamdată pur teoretic), cel al supercorzilor. Trecând de la un nivel de Realitate la altul, legile şi conceptele se schimbă, deci, radical, existând o „ruptură", o *discontinuitate* între două niveluri proxime. Termenul de *discontinuitate* era unul esențial şi în mecanica cuantică, fapt evidențiat în lucrarea de față.

Modul în care *principiul terțului inclus* permite trecerea de la un nivel de Realitate la altul este reprezentat în figura 2.17. Unificarea contradictoriilor A şi non-A, situate la acelaşi nivel de Realitate, poate fi realizată doar la nivelul proxim superior de Realitate [172], prin intermediul stării T, a terțului inclus.

Gheorghe Enescu afirmă că, la nivel pur formal, logica lupasciană respectă principiul noncontradicției, întrucât contradicția şi noncontradicția nu pot fi *simultan* actuale sau simultan potențiale[45]. Şi din punctul de vedere al lui Basarab Nicolescu, modul în care se aplică logica terțului inclus în procesul reprezentat respectă axioma non-contradicției dacă noțiunile de „adevărat" şi „fals" sunt lărgite pentru ca regulile de implicare logică să se refere la trei termeni (A, non-A şi starea T) în loc de doi. Cu alte cuvinte, acceptând existența mai multor niveluri de Realitate, principiul terțului exclus nu mai este o consecință a axiomei non-contradicției, ci principiul şi axioma devin entități independente; prin urmare, poate fi valabilă axioma non-contradicției fără a anula principiul terțului inclus [172] (a se vedea şi nota 40 din prezentul capitol). Lumea cuantică reprezentând un alt nivel de Realitate decât lumea macrofizică, particula cuantică va corespunde stării T, care operează unificarea contradictoriilor undă (A) şi corpuscul (non-A).

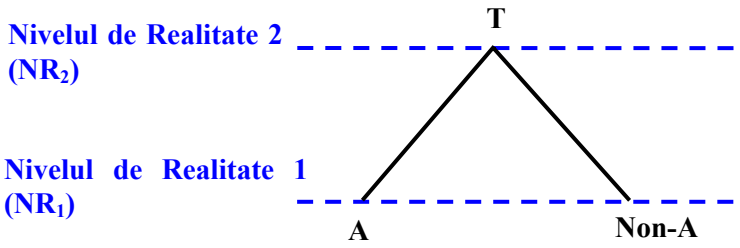


Figura 2.17. Trecerea de la un nivel de Realitate la altul prin acțiunea logicii terțului inclus (preluat din [174])

Istoric vorbind, primele două postulate sunt justificate atât de către mecanica cuantică, după cum afirmă Basarab Nicolescu, cât şi, în opinia noastră, de către *logica formală*, întrucât *aşa cum paradoxurile logice şi semantice pot fi evitate folosind teoria nivelurilor russelliene, respectiv tarskiene, contradicțiile mecanicii cuantice pot fi conciliate folosind un model structurat pe niveluri de Realitate***.**

[45] Această observație a lui Gh. Enescu apare sub forma unei note de subsol, în [156].

Se poate deduce uşor din cele menţionate că un nivel de Realitate este autodistructiv dacă este complet separat de toate celelalte niveluri de Realitate, generând cupluri antagoniste [172]. Solomon Marcus subliniază acest adevăr: „Paradoxurile apar ca rezultat al faptului că două nivele distincte ale cunoaşterii, ale limbajului, ale realității, ale comportamentului uman etc. sunt văzute ca unul singur, se suprapun, sau pur şi simplu se confundă" [159]. „Logica terțului inclus este una a complexității" [172], care nu suprimă, ci doar restrânge logica terțului exclus (care rămâne aplicabilă în situații mai simple).

Se poate enunța acum şi cel de-al treilea postulat – cel epistemologic – al metodologiei transdisciplinare: *fiecare nivel de Realitate este ceea ce este pentru că toate celelalte niveluri de Realitate există simultan; structura ansamblurilor nivelurilor de Realitate este, astfel, una complexă* [173]. Niciun nivel de Realitate nu este privilegiat. Nu este greu de remarcat paralela dintre acest postulat şi *principiul bootstrap-ului*. Există *grade de complexitate*, complexitatea unui nivel de Realitate putând fi percepută ca simplitate în raport cu alt nivel, care poate fi complex în raport cu legile proprii. În abordarea transdisciplinară, se consideră că pot exista *n* astfel de niveluri (*n* poate fi finit sau infinit), ansamblu care se prelungeşte cu o *zonă de non-rezistență* [172] la experiențele, descrierile, reprezentările, imaginile sau formalizările noastre matematice, zonă în care nu există niciun nivel de Realitate; această zonă corespunde *sacrului*, care se traduce prin „sentimentul religios", cel care leagă oameni şi lucruri, „un spațiu al liniştii" de dincolo de cuvinte [174]. Astfel sacrul îşi redobândeşte locul cuvenit în procesul cunoaşterii: „suntem întotdeauna obligați să ne referim la sacru pentru a elabora un discurs coerent asupra Realității" [173]. Structura nivelurilor de Realitate, în care acționează logica terțului inclus, este *deschisă*, imposibilitatea construirii unei teorii *complete* care să descrie ansamblul acestor niveluri fiind evidentă. După Basarab Nicolescu, acest fapt este în acord cu teorema de incompletitudine a lui Gödel, ale cărei implicații au fost discutate în prezenta lucrare. Structura *gödeliană* a nivelurilor de Realitate, împreună cu zona sa complementară de non-rezistență formează *Obiectul Transdisciplinar* (figura 2.18).

În corespondență biunivocă cu nivelurile de Realitate ale obiectului transdisciplinar se află *nivelurile de percepție* ale subiectului observator (notate cu NP în figura 2.18), prin intermediul cărora nivelurile de Realitate sunt accesibile cunoaşterii umane.

La fel ca în cazul Obiectului, coerența nivelurilor de percepție presupune obligatoriu existența unei *zone de non-rezistență* la percepție; nivelurile de percepție, împreună cu zona de non-rezistență complementară, constituie *Subiectul Transdisciplinar*. Pentru a exista comunicare între Subiectul Transdisciplinar şi Obiectul Transdisciplinar, este necesar ca cele două zone de non-rezistență, ale Obiectului şi Subiectului, să fie identice. Regăsim, deci ideea *inseparabilității subiect-obiect*, susținută de fondatorii mecanicii cuantice, ilustrată în această lucrare pornind de la experimentul celor două fante.

Cele trei bucle orientate din stânga (figura 2.18) reprezintă *fluxul de informație* care traversează în mod coerent nivelurile de Realitate, în timp ce cele din dreapta reprezintă *fluxul de conştiință* care traversează în mod coerent nivelurile de percepție; izomorfismul celor două fluxuri este asigurat de faptul că cele două zone de non-rezistență sunt identice. Buclele informației şi conştiinței se întâlnesc în punctul *X*, al treilea termen de cunoaştere transdisciplinară: *Termenul de Interacțiune între Subiect şi Obiect, care nu poate fi redus nici la Subiect nici la Obiect*. Prin această împărțire ternară, [Subiect, Obiect, Interacțiune], transdisciplinaritatea se delimitează de metafizica modernă, descrisă de structura binară [Subiect-Obiect] [173].

În viziunea transdisciplinară, cunoaşterea este, concomitent, interioară şi exterioară, studiul Universului şi al ființei umane susținându-se reciproc.

Mecatronica, suport pentru educația integrală, depăşeşte cadrul unei singure discipline, reprezentând o „viziune globală în domeniul tehnologic" [162]. Astfel, odată ce s-a

demonstrat rezonanța care există între viziunea transdisciplinară a lui Basarab Nicolescu şi unele dintre cele mai consistente şi originale rezultate ale încercării ființei umane de a cunoaşte în mod unitar Natura, următorul pas este valorificarea potențialului creator al unei noi abordări a mecatronicii, din perspectivă transdisciplinară [15].

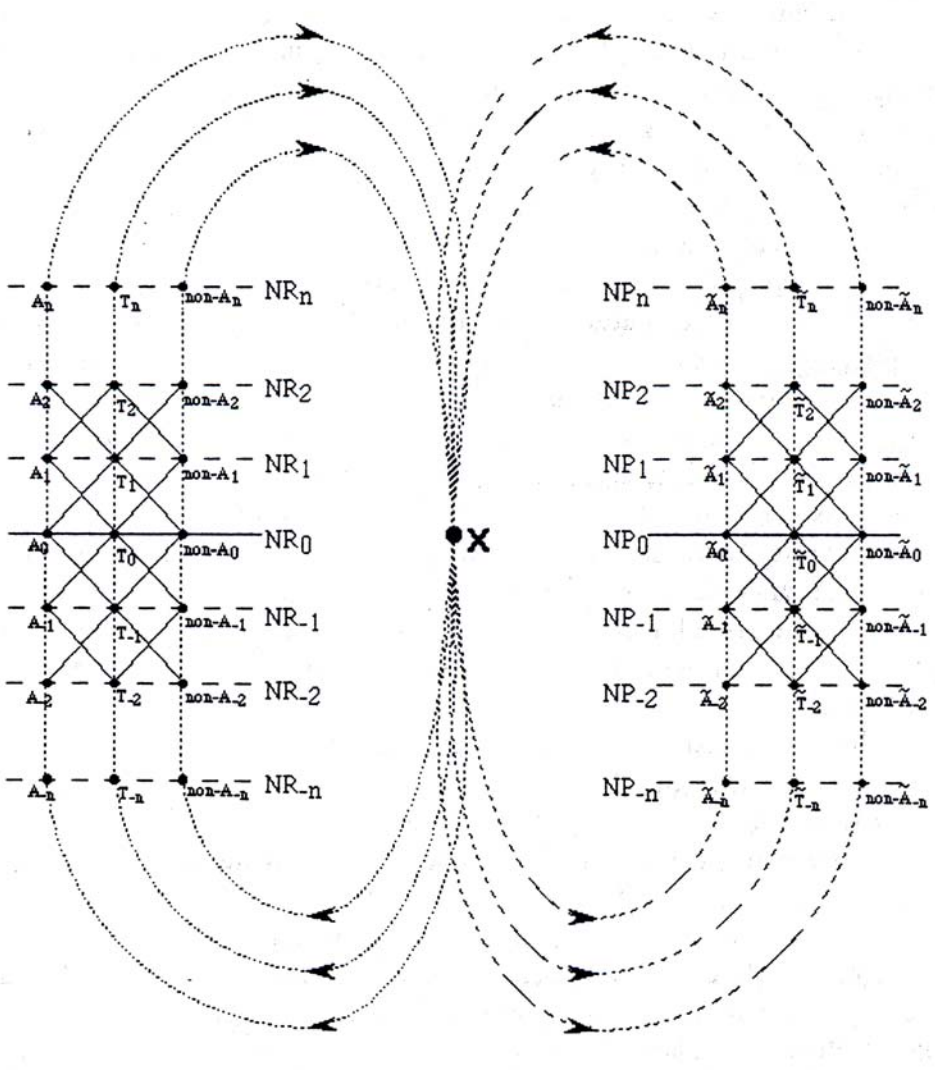


Figura 2.18. Obiectul Transdisciplinar, Subiectul Transdisciplinar şi Termenul de Interacțiune (preluat din [174])

2.12. Concluzii

În capitolul de față se evidențiază acordul care există între viziunea transdisciplinară a lui Basarab Nicolescu şi unele idei şi modele ale logicii, filosofiei şi ştiinței ultimului secol, fapt care relevă consistența şi, totodată, valențele creatoare de care dispune abordarea transdisciplinară.

În prima parte s-a prezentat, pentru început, cum atitudinea antimetafizică specifică pozitivismului a fost adoptată şi de către logicieni, pentru care paradoxul era obstacolul în calea construirii unui sistem logico-matematic complet şi necontradictoriu. Încercările de a găsi diverse soluții ale antinomiilor logice şi semantice au condus la apariția teoriei

russelliene a tipurilor (care porneşte de la ideea că obiectele logice pot fi ierarhizate după tipuri), respectiv la structurarea de către Tarski a limbajului pe niveluri. După câteva observații legate de teorema lui Gödel, potrivit căreia nu poate fi construit un sistem formal – suficient de complex – care să fie complet şi necontradictoriu, s-a evidențiat faptul că apropierea logicii de Realitate a avut loc prin restrângerea intuiționistă a valabilității principiului terțului exclus. Mai mult, deschiderea gödeliană favorizează, prin exploatarea potențialului creativ al paradoxului, conturarea unei noi abordări a Realității, în rezonanță cu metodologia transdisciplinară.

În continuare, a fost prezentat impactul descoperirilor şi modelelor din mecanica cuantică asupra apariției sistemelor logice polivalente. După o scurtă descriere a câtorva astfel de sisteme, s-a analizat pe larg logica lui Ştefan Lupaşcu, logică fundamentată pe ideea existenței unor energii antagoniste contradictorii, care favorizează apariția stării T, stare de maxim antagonism, care corespunde unei a treia valori de adevăr (nici adevărat, nici fals). Logica lupasciană se dovedeşte a fi una trivalentă, în care operează principiul terțului inclus.

În final, după ce s-au introdus termenii specifici abordării transdisciplinare, s-a subliniat, pe măsura descrierii metodologiei transdisciplinare în viziunea lui Basarab Nicolescu, corespondența care există între această metodologie şi conceptele, modelele, teoriile specifice diverselor discipline, aşa cum au fost prezentate în capitolul de față şi în cel precedent al lucrării.

2.13. Contribuții personale

- Evitând un transfer simplist din spațiul ştiințific, respectiv logic, în cel transdisciplinar, s-a prezentat, într-o manieră integratoare, armonia existentă între metodologia transdisciplinară şi modelele russelliene, respectiv tarskiene, ale nivelurilor, unele concepte specifice mecanicii cuantice şi logica trivalentă a lui Ştefan Lupaşcu, întemeiată pe principiul terțului inclus.
- S-au ilustrat, prin reprezentări grafice originale, mai multe idei şi concepte de referință ale teoriilor şi modelelor amintite.
- S-a evidențiat faptul că, tot aşa cum paradoxurile logice şi semantice pot fi evitate folosind teoria nivelurilor russelliene, respectiv tarskiene, contradicțiile mecanicii cuantice pot fi conciliate folosind un model structurat pe niveluri de Realitate.
- S-a argumentat că, abordată din perspectiva transdisciplinarității, mecatronica poate să favorizeze conturarea unei noi viziuni educaționale, întrucât caracterul integrator, sinergic al mecatronicii, care s-a manifestat prin apariția de noi punți între discipline aparent separate, este în acord cu finalitatea viziunii transdisciplinare: înțelegerea lumii prin unitatea cunoaşterii.

CAPITOLUL 3

INFORMAȚIE, ENTROPIE, ORGANIZARE ŞI COMPLEXITATE ÎN MECATRONICĂ ŞI ÎN LUMEA VIE

3.1. Introducere

Organizarea sistemelor mecatronice complexe necesită, evident, un consum de energie. Cu toate acestea, structurarea şi organizarea sistemelor în general şi a sistemelor mecatronice în special, se datorează în primul rând informației [162]. De asemenea, informația este cea care asigură, înainte de toate, flexibilitatea şi reconfigurabilitatea sistemelor mecatronice [161]. Prin urmare, înainte de a analiza procesele de autoorganizare a sistemelor mecatronice complexe, e necesară evidențierea semnificațiilor şi implicațiilor informației. Conceptul de „informație" este, din punct de vedere istoric şi matematic, strâns legat de noțiunea de „entropie". Aşadar, o analiză a implicațiilor teoretice şi practice ale informației reclamă o abordare interdisciplinară, care să integreze entropia, aşa cum e definită în termodinamică şi fizica statistică.

Astfel, pentru a putea distinge între ordine şi organizare, precum şi pentru a putea stabili legătura dintre informație şi autoorganizare, sunt necesare câteva considerații privind conceptul de „entropie statistică".

3.2. Entropia statistică şi dezordinea

3.2.1. Entropia statistică

Spre a oferi un suport intuitiv care să ilustreze legătura dintre temperatură, distribuția energiei între atomii unui solid şi entropia acestuia, se va folosi modelul lui Einstein [72], în care atomii vibrează independent cu energii ale căror valori se pot situa doar printre multiplii unei valori minime, numită *cuantă de energie*.

Când un atom situat pe un nivel energetic oarecare primeşte o cuantă de energie, acesta „sare" pe nivelul energetic imediat superior, iar când atomul pierde o cuantă, el „coboară" pe nivelul energetic imediat inferior. În cazul unui corp solid cu N atomi, între care se distribuie q cuante de energie, în W moduri diferite, se poate demonstra că [72], dacă se adaugă o cuantă suplimentară, numărul de moduri diferite în care se pot distribui cuantele între atomi creşte, devenind:

$$W_1 = \left(1 + \frac{N}{q}\right) \cdot W . \tag{3.1}$$

Considerăm două corpuri solide: A, în care $q = N$, respectiv B, pentru care $q = N/4$. Corpul A are o temperatură mai ridicată (este mai cald) decât B, întrucât energia medie care îi revine fiecărui atom este mai mare în cazul solidului A. Se observă că, în cazul corpului A, pierderea (primirea) unei cuante de energie va înjumătăți (dubla) numărul modurilor de distribuire a cuantelor între atomi. Similar, în cazul corpului B, pierderea (primirea) unei cuante de energie va micşora (mări) de cinci ori numărul modurilor de distribuire a cuantelor între atomi.

Dacă cele două corpuri sunt aduse în contact termic, transferul energetic se face dinspre A spre B, adică procesul decurge spontan în sensul creşterii pe ansamblu a ratei lui W. Atomii corpului mai cald (A) sunt mai dezordonați decât cei ai corpului mai rece (B) [7], pentru că sunt distribuiți pe mai multe niveluri energetice diferite. Prin urmare (figura 3.1), transferul unei cuante energetice va avea un efect mai mare asupra gradului de ordonare al corpului mai rece decât asupra gradului de ordonare al corpului mai cald (tot aşa cum sunetul produs de căderea unei monezi e mai greu de sesizat pe o stradă aglomerată decât într-o cameră liniştită).

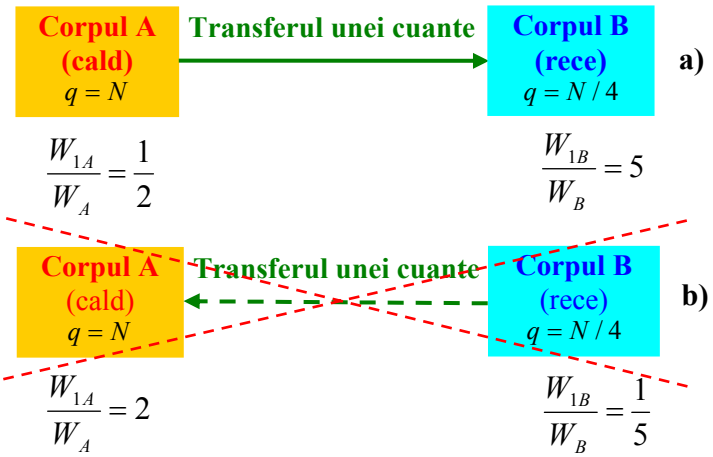


Figura 3.1. Transferul spontan al unei cuante de energie între corpurile A (cald) şi B (rece) are loc astfel încât gradul de ordonare al atomilor să scadă pe ansamblu. Din acest motiv situația a) este cea reală întrucât, în urma transferului unei cuante, W creşte (procentual) mai mult în cazul corpului care primeşte cuanta decât scade W în cazul corpului care a cedat cuanta

Logaritmând raportul dintre valoarea lui W în cazul unui solid care primeşte n cuante energetice şi valoarea lui W înainte de a primi aceste cuante, se obține:

$$\ln W_n - \ln W = n \ln\left(1 + \frac{N}{q}\right). \tag{3.2}$$

Termenul din dreapta al ecuației (3.2) este proporțional cu energia primită de corp sub formă de căldură [72]. Pe de altă parte, după cum s-a evidențiat, cu cât temperatura unui corp este mai mare, cu atât W se modifică mai puțin la primirea sau cedarea unei cuante, deci W *e*

invers proporțională cu temperatura absolută a corpului, T. În consecință, putem scrie, introducând constanta de proporționalitate *k*:

$$k\delta \ln W = \frac{\delta Q}{T}. \tag{3.3}$$

Termenul din stânga al ecuației (3.3), în care *k* este constanta lui Boltzmann ($k = 1{,}38 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$), reprezintă variația infinitezimală a funcției *S*, numită *entropie Boltzmann* sau *entropie statistică*:

$$S = k \ln W. \tag{3.4}$$

În fizica statistică, *W* reprezintă numărul de microstări diferite ale sistemului compatibile cu o macrostare dată a acestuia. Revenind la situația reprezentată în figura 3.1, variația entropiei sistemului A+B este, în cazul a.:

$$\Delta S_a = \Delta S_A + \Delta S_B = -k \ln 2 + k \ln 5 > 0, \tag{3.5}$$

iar în situația b

$$\Delta S_b = k \ln 2 - k \ln 5 < 0. \tag{3.6}$$

Cele de mai sus sunt în concordanță cu cel de-al doilea principiu al termodinamicii: *procesele naturale decurg astfel încât entropia totală a unui sistem izolat creşte, adică înspre creşterea dezordinii din sistem*.

3.2.2. Expresia entropiei statistice în cazul distribuției elementelor unui sistem pe clase

Fie un sistem oarecare format din *N* elemente (molecule, organisme etc.), care pot fi împărțite în *n* clase (nivele energetice, specii etc.), fiecare clasă conținând N_i elemente. Configurația $\left(N_1, N_{2,}..., N_n\right)$ reprezintă o macrostare a sistemului care poate fi realizată în *W* moduri diferite (deci există *W* microstări diferite compatibile cu acesată macrostare). *W* reprezintă *ponderea macrostării*. Se poate demonstra [7] că, pentru configurația de mai sus:

$$W = \frac{N!}{\prod_{i=1}^{n} N_i!}. \tag{3.7}$$

Se înlocuieşte (3.7) în (3.4) şi, utilizând aproximația Stirling ($\ln x! \cong x \ln x - x$), se obține:

$$S \cong kN \ln N - kN - k\sum_{i=1}^{n} N_i \ln N_i + k\sum_{i=1}^{n} N_i. \tag{3.8}$$

Cum $N = \sum_{i=1}^{n} N_i$, se poate scrie:

$$S \cong k\sum_{i=1}^{n} N_i\left(\ln N - \ln N_i\right) = -k\sum_{i=1}^{n} N_i \ln\frac{N}{N_i}. \tag{3.9}$$

În final, (3.9) poate fi scrisă sub forma:

$$S = -kN\sum_{i=1}^{n} p_i \ln p_i \ . \tag{3.10}$$

în care $p_i = \dfrac{N_i}{N}$ este probabilitatea ca un element (de exemplu o moleculă) să se găsească în clasa *i* (de pildă nivelul energetic *i*).

3.2.3. Entropia ca măsură a dezordinii unui sistem izolat

Se vor evidenția în continuare două proprietăți ale funcției S, exprimată sub forma (3.10), precum şi interpretarea acestora în cazul distribuției moleculelor unui gaz ideal într-o incintă.

În primul rând, $S = 0$ *dacă şi numai dacă toate elementele se găsesc în aceeaşi clasă*. Se consideră că într-o incintă se găsesc N molecule dintr-un gaz ideal oarecare. Se împarte incinta în patru compartimente egale, fiecare compartiment constituind o clasă în care se pot găsi N_i molecule ($i = 1,2,3,4$). Se vor analiza patru distribuții diferite ale moleculelor în incintă, fiecare distribuție în parte reprezentând o macrostare particulară a sistemului (figura 3.2). Utilizând (3.7), se determină ponderea fiecărei macrostări în parte, pentru cazul în care $N = 60$ (evident, în realitate numărul moleculelor este mult mai mare). În urma efectuării calculelor se obțin următoarele rezultate:

$$W_a = 1\,,\ W_b \cong 5{,}3\cdot 10^{13}\,,\ W_c \cong 1{,}9\cdot 10^{25}\,,\ W_d \cong 2{,}8\cdot 10^{33}\,. \tag{3.11}$$

Se observă că ponderea primei macrostări este egală cu unitatea (adică $S = 0$) doar pentru situația reprezentată în figura 3.2.a., caz în care toate moleculele sunt situate în acelaşi compartiment (toate elementele sunt în aceeaşi clasă). Această situație corespunde gradului cel mai ridicat de ordonare posibil, caz în care entropia este minimă (nulă).

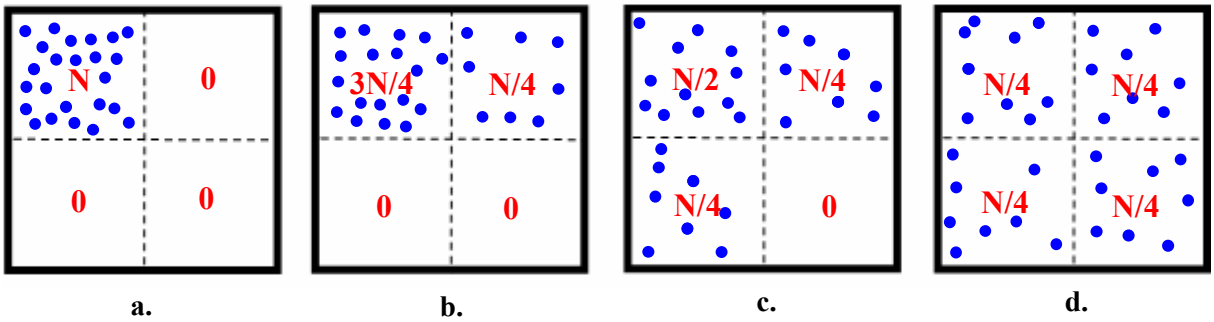


Figura 3.2. Patru distribuţii diferite ale moleculelor unui gaz ideal într-o incintă

În al doilea rând, *cu cât probabilitățile asociate fiecărei clase în parte vor avea valori mai apropiate între ele, cu atât S va avea o valoare mai mare. La limită, S atinge valoarea maximă pentru o distribuție echiprobabilă a elementelor pe clase.*

Folosind (3.9), se va calcula entropia sistemului pentru cele patru distribuții particulare ale moleculelor din figura 3.2. Se obțin, succesiv, următoarele rezultate:

$$S_a = -kN \ln 1 = 0\,, \tag{3.12}$$

$$S_b = -kN \cdot \left[0{,}75 \ln 0{,}75 + 0{,}25 \ln 0{,}25\right] \cong 0{,}56 \cdot kN\,, \tag{3.13}$$

$$S_c = -kN \cdot \left[0{,}5 \ln 0{,}5 + 2 \cdot 0{,}25 \ln 0{,}25\right] \cong 1{,}04 \cdot kN\,, \tag{3.14}$$

$$S_d = -kN \cdot 4 \cdot 0{,}25 \cdot \ln 0{,}25 \cong 1{,}38 \cdot kN\,. \tag{3.15}$$

Se observă că entropia crește pe măsură ce probabilitățile se apropie ca valoare una de alta, cea mai mare entropie fiind cea din situația din figura 3.2.d, în care fiecare compartiment conține același număr de molecule (adică distribuția moleculelor e echiprobabilă). Prin urmare, ponderea unei macrostări e cu atât mai mare cu cât valorile probabilităților corespunzătoare claselor macrostării sunt mai apropiate. Pe de altă parte, cu cât ponderea unei macrostări e mai mare, cu atât macrostarea respectivă are un grad de ordonare mai scăzut.

În concluzie, *cu cât entropia unei macrostări are o valoare mai mare, cu atât gradul de ordonare al macrostării este mai scăzut, cel mai scăzut grad de ordonare (sau dezordinea maximă) atingându-se în cazul în care distribuția elementelor între clasele macrostării este echiprobabilă (uniformă)*.

Evoluția naturală a sistemelor termodinamice izolate este înspre atingerea macrostării cu dezordine maximă, adică cea pentru care *S* este maximă (figura 3.3).

Figura 3.3. Legătura dintre entropie, dezordine şi distribuția elementelor unui sistem pe clase

3. 3. Entropia informațională şi incertitudinea

3.3.1. Informație şi semnal. Relația substanță-energie-informație

După cum afirmă Shannon, „problema fundamentală a comunicării este aceea a reproducerii, exactă sau aproximativă, într-un punct, a unui mesaj emis în alt punct” [205]. Astfel, în orice proces de comunicare sunt implicate patru elemente fundamentale [52], [205]: *emițător*, *canal* de transmitere a informației, *informație*, şi *receptor*. Pe lângă acestea, mai există codorul, respectiv decodorul, cu rolul de a transforma mesajul în semnal şi invers (figura 3.4).

Informația emisă de către emițător este codată (de pildă gândul trebuie exprimat prin cuvinte pentru a fi recepționat) şi apoi transportată prin intermediul semnalului, prin canalul de comunicație, către decodor, care trebuie să decodifice, să interpreteze mesajul primit pentru ca acesta să aibă sens pentru receptor. Scopul întregului proces este ca emițătorul să producă un efect la nivelul receptorului. Comunicarea poate fi perturbată datorită zgomotului de fond, venit din exterior.

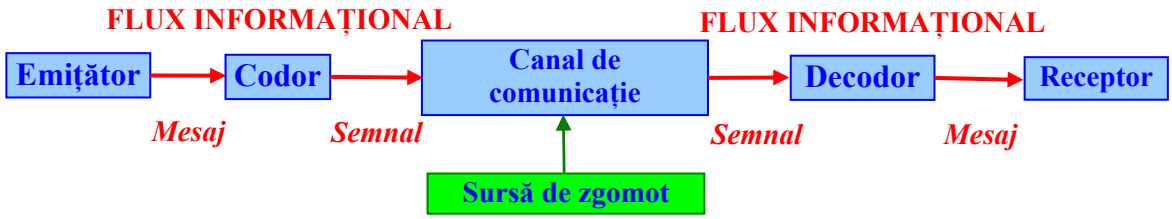


Figura 3.4. Modelul fundamental al comunicării în viziunea lui Shannon

Informația este o noțiune abstractă, înțeleasă ca „o combinație de semne şi simboluri" [52] „care aduce o precizare într-o problemă ce comportă un anumit grad de incertitudine" [162]. Prin urmare, *informația adusă de un eveniment dintr-un set de evenimente este o măsură a noutății pe care o aduce sau, altfel spus, a incertitudinii înlăturate prin realizarea evenimentului în cauză* [193]**.**

Există trei aspecte ale informației [52]. Primul este aspectul *sintactic*, care priveşte natura şi succesiunea semnelor grafice folosite de către emițător la transmiterea mesajului. Al doilea aspect este cel *semantic*, legat de semnificația pe care semnalul o are; acest aspect vizează, în principal, diferența dintre ceea ce emițătorul a intenționat să transmită şi ceea ce a înțeles receptorul. Ultimul aspect al informației este cel *pragmatic*, care priveşte efectul, implicațiile informației asupra receptorului.

Semnalul este suportul fizic al informației şi reprezintă o mărime fizică măsurabilă, de natură electrică (în mod obişnuit) sau de altă natură (unda electromagnetică, deplasarea unui corp, presiunea aerului etc.) [52], [161]. Din punctul de vedere al continuității, semnalele sunt *analogice* (continue) şi *digitale* (discrete). Semnalele asociate fenomenelor naturale sunt descrise de funcții continue, deci sunt analogice (figura 3.5.a), iar cele folosite în tehnologia informației sunt de regulă discrete, datorită faptului că, sub formă digitală, informația e transmisă mult mai fidel.

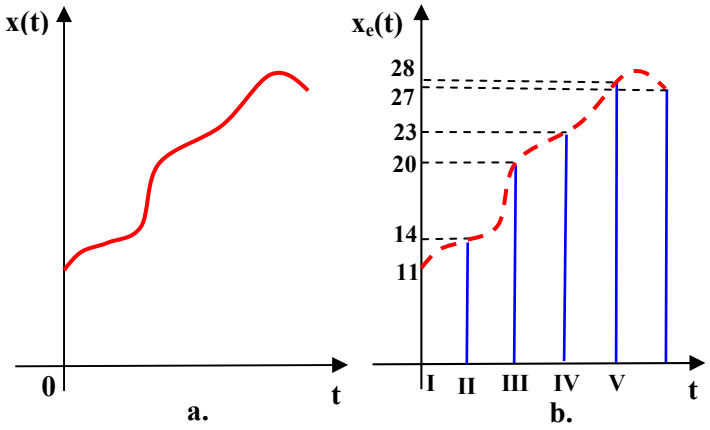


Figura 3.5. Convertirea semnalului analogic x(t) (a) în semnalul eşantionat $x_e(t)$ (b)

Convertirea unui semnal din forma analogică în cea digitală se face, de obicei, prin analiza Fourier. Mai întâi semnalul se eşantionează, adică timpul se discretizează cu un pas constant (perioadă de eşantionare) astfel că semnalul capătă aspectul unui spectru de „eşantioane" (figura 3.5.b), care se succed la intervale egale de timp. Urmează operația de cuantizare, adică discretizarea amplitudinii fiecărui eşantion în parte prin alegerea unui pas de cuantizare. Rezultatul operației de cuantizare este, în cazul fiecărui eşantion, un număr întreg (figura 3.5.b). Produsul dintre acest număr şi valoarea pasului de cuantizare ales se doreşte a fi cât mai apropiat de valoarea reală a amplitudinii eşantionului [264]. Numărul asociat fiecărui eşantion va fi exprimat în baza sistemului de numerație ales. De pildă, pentru situația particulară reprezentată în figura 3.5.b, valorile numerice zecimale asociate amplitudinilor eşantioanelor pot fi scrise în baza 2 astfel (tabelul 3.1):

Eşantionul	Valoare zecimală	Valoare binară
I	11	01011
II	14	01110
III	20	10100
IV	23	10111
V	27	11011
VI	28	11000

Tabelul 3.1. Valorile unor eşantioane scrise în baza zece, respectiv în baza doi

De obicei digitalizarea semnalelor se realizează de către un convertor analogic-numeric, la ieşirea căruia se obține un şir de valori numerice $\{x_i\}$, corespunzătoare momentelor de timp discrete t_i.

Deşi lipsite de semnificație în sens semantic, semnalele sunt, după cum s-a precizat, purtătoarele informației. Prin urmare, orice transmisie (sau stocare) de informație presupune manifestarea concretă, sub formă fizică, a acesteia, adică informația este o expresie a „neuniformității distribuției substanței şi energiei în spațiu şi timp" [193]. De pildă, unda electromagnetică reprezintă adesea semnalul, baza material-energetică folosită la transportul informației.

În consecință, *informația nu poate fi gândită decât ca una dintre componentele triadei: substanță-energie-informație, componente între care există o relație sinergică*. După cum subliniază Basarab Nicolescu, „asistăm, în lumea cuantică, la o perpetuă transformare energie-substanță-informație, conceptul de *energie* apărând ca principiu unificator: *informația* este o energie codificată, pe când *substanța* este o energie concretizată" [172].

3.3.2. Rolul informației în mecatronică

În dinamica oricărui proces tehnologic fluxurile informaționale sunt prezente alături de fluxurile energetice şi materiale, iar „în tehnologia mecatronică informația este componenta dătătoare de ton, în raport cu materialul şi energia"[162], un produs fiind cu atât mai performant cu cât înglobează mai multă informație (deci implicit inteligență) în raport cu cantitatea de material şi energie utilizate. În plus, cu cât se utilizează mai puțin material şi energie şi mai multă informație, cu atât se conservă mai eficient resursele naturale (epuizabile) folosind rezervele (inepuizabile) pe care le oferă informația.

Fluxul informațional străbate toate modulele de bază ale unui sistem mecatronic (figura 3.6): *elementul de comparare* compară semnalul de referință cu semnalul de ieşire (parametrul controlat), calculând diferența celor două valori (eroarea); *controlerul* (microprocesorul) decide ce acțiune trebuie să aibă loc în momentul în care apare un semnal de eroare, pentru a realiza corecturile necesare; *amplificatorul* amplifică semnalul pentru a putea fi preluat de către *actuator*, care transformă semnalul corectat în semnal de intrare adaptat procesului; *senzorii* preiau apoi informația, care va fi prelucrată de către *dispozitivul de condiționare a semnalelor* în acord cu cerințele controlerului.

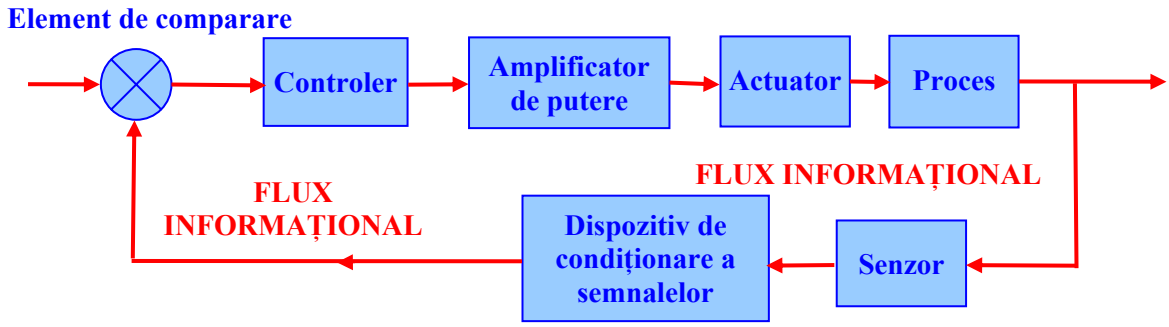


Figura 3.6. Fluxul informațional străbate toate modulele sistemului mecatronic

3.3.3. Entropia informațională

Intuitiv, se poate afirma că noutatea pe care o aduce actualizarea unui anumit eveniment depinde de probabilitatea sa de realizare; mai exact, cu cât un eveniment este mai probabil, cu atât mai mult e de aşteptat să se producă, deci noutatea pe care o aduce este mai redusă şi invers [162], [193].

Considerând un set de evenimente disjuncte $X=\{X_1, X_2, ..., X_n\}$, cu probabilitățile de realizare $p=\{p_1, p_2, ..., p_n\}$ (evident, $\sum_{i=1}^{n} p_i = 1$), cantitatea de informație asociată realizării evenimentului x_i este [107]:

$$I(X_i) = -\log_2 p_i . \tag{3.16}$$

Ideea de la care s-a pornit a fost aceea că, în cazul în care toate probabilitățile sunt egale între ele (deci fiecare e egală cu $1/n$), orice funcție monotonă de n este o măsură a informației obținute prin realizarea unui eveniment. Din considerente practice, matematice şi intuitive s-a ales funcția logaritmică[46] pentru a cuantifica informația [107], [205]. Unitatea de măsură a informației este *bit*-ul[47], care reprezintă informația pe care o aduce realizarea unui eveniment dintr-un set de două evenimente echiprobabile:

$$-\log_2 \frac{1}{2} = 1\,bit . \tag{3.17}$$

[46] Inițial au fost folosiți în teoria informației logaritmii naturali şi zecimali. În prezent se utilizează baza 2 pentru funcția logaritmică.
[47] *bit* reprezintă abrevierea de la *binary digit* („cifră binară").

Particularizând, 1 bit reprezintă cantitatea de informație obținută în urma extragerii unei bile dintr-o urnă care conține un număr egal de bile albe şi negre. Pentru a compara, cantitatea de informație obținută în urma aruncării unui zar este:

$$-\log_2 \frac{1}{6} \cong 2{,}58\, bit\,. \tag{3.18}$$

Din cele de mai sus rezultă că *informația obținută în urma realizării unui eveniment e cu atât mai mare cu cât probabilitatea de realizare a acestuia e mai mică, deci incertitudinea realizării evenimentului e mai mare***.**

Pornind de la această concluzie [52] şi considerând că sursele de informație pot fi reprezentate ca fiind procese Markov[48] ergodice, Shannon şi Weaver [205] au căutat o funcție, notată cu $H\left(p_{1,}\, p_2, ..., p_n\right)$, care să îndeplinească următoarele trei proprietăți: (i) să fie continuă în p_i; (ii) să fie monoton crescătoare de *n* în cazul particular în care toate probabilitățile sunt egale cu $1/n$ (adică, dacă evenimentele sunt echiprobabile, incertitudinea creşte pe măsură ce numărul de evenimente din set creşte, întrucât numărul de posibilități de selecție creşte); (iii) dacă o selecție are loc în doi paşi, valoarea lui *H* trebuie să fie suma ponderată a valorilor care corespund celor doi paşi. Orice funcție de forma:

$$H = -K\sum_{i=1}^{n} p_i \log_2 p_i\ , \tag{3.19}$$

în care *K* e o constantă pozitivă, îndeplineşte toate cele trei condiții. Shannon a ales $K = 1$, obținând astfel funcția numită *entropie informațională a setului de probabilități*[49] $p = \left\{p_{1,}\, p_{2,}, ..., p_n\right\}$:

$$H = -\sum_{i=1}^{n} p_i \log_2 p_i\ . \tag{3.20}$$

Se observă uşor similitudinea dintre expresia matematică a entropiei informaționale şi forma (3.10) a entropiei statistice.

3.3.4. Proprietățile şi semnificația entropiei informaționale

Faptul că funcția *H* satisface condiția (iii) amintită mai sus, este ilustrat în figura 3.7 [17]. În cazul a. există trei posibilități, cu probabilitățile de realizare $p_1 = 1/2$, $p_2 = 1/5$, respectiv $p_3 = 3/10$. În cazul b., procesul e constituit din doi paşi: mai întâi alegem una dintre cele două posibilități, cu probabilitățile $1/2$ fiecare, după care urmează a doua alegere între alte două posibilități cu probabilitățile $2/10$, respectiv $3/10$. Proprietatea (iii) cere ca:

[48] Proces aleator care furnizează la ieşire o secvență de evenimente dintr-un set finit, probabilitatea de apariție a unui eveniment depinzând doar de evenimentul precedent.
[49] Funcția *H* reprezintă informația medie pe eveniment, adică reducerea medie a incertitudinii unui receptor.

$$H\left(\frac{1}{2},\frac{1}{5},\frac{3}{10}\right)=H\left(\frac{1}{2},\frac{1}{2}\right)+\frac{1}{2}H\left(\frac{2}{5},\frac{3}{5}\right). \tag{3.21}$$

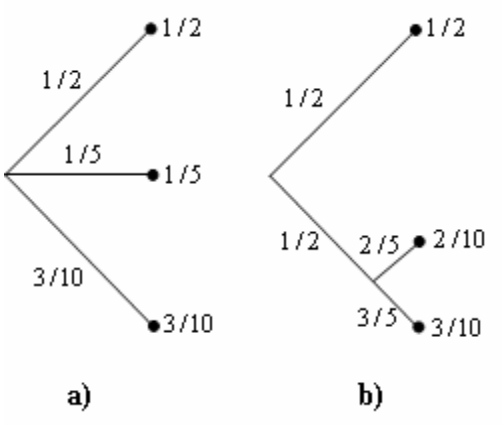


Figura 3.7. Ilustrare a celei de-a treia proprietăți a funcției *H*. Probabilitățile de realizare ale evenimentelor originare sunt, în situația a): $1/2,1/5,3/10$**. Ultimele două evenimente pot fi realizate, ca în cazul b), prin doi paşi succesivi, primul cu probabilitatea de realizare** $1/2$**, la pasul următor probabilitățile fiind** $2/5$**, respectiv** $3/5$**. Proprietatea (iii) impune ca:**

$$H\left(\frac{1}{2},\frac{1}{5},\frac{3}{10}\right)=H\left(\frac{1}{2},\frac{1}{2}\right)+\frac{1}{2}H\left(\frac{2}{5},\frac{3}{5}\right).$$

Folosind (3.20), se poate scrie, succesiv:

$$H\left(\frac{1}{2},\frac{1}{5},\frac{3}{10}\right)=\frac{1}{2}\log_2 2+\frac{1}{5}\log_2 5+\frac{3}{10}\log_2\frac{10}{3}=\frac{4}{5}\log_2 5+\frac{1}{2}\log_2 2-\frac{3}{10}\log_2 3, \tag{3.22}$$

respectiv

$$H\left(\frac{1}{2},\frac{1}{2}\right)+\frac{1}{2}H\left(\frac{2}{5},\frac{3}{5}\right)=1+\frac{1}{2}\left[\frac{2}{5}\log_2\frac{5}{2}+\frac{3}{5}\log_2\frac{5}{3}\right]=\frac{4}{5}\log_2 5+\frac{1}{2}\log_2 2-\frac{3}{10}\log_2 3. \tag{3.23}$$

Relațiile (3.22) şi (3.23) arată limpede că funcția *H*, exprimată prin relația (3.20), respectă proprietatea (iii). Pentru a evidenția *semnificația entropiei informaționale* se impun câteva observații [17].

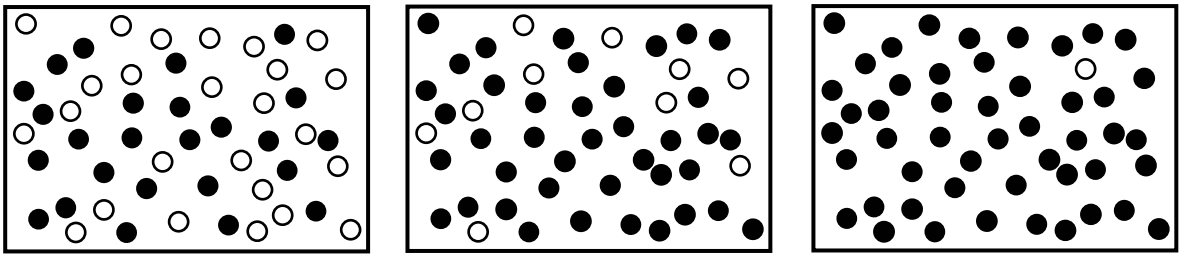
În primul rând, se observă că $H=0$ *dacă şi numai dacă toate probabilitățile* p_i *sunt nule*, în afară de una care, evident, va avea valoarea 1. De exemplu, dacă într-o urnă avem numai bile albe, probabilitatea de a extrage o bilă albă e 1, orice altă posibilitate fiind exclusă. Entropia informațională în acest caz este:

$$H=-1\cdot\log_2 1=0, \tag{3.24}$$

pentru că extragerea nu aduce nimic nou. Cu alte cuvinte, *dacă nu se poate realiza decât un singur eveniment din set, incertitudinea receptorului este nulă, acesta neprimind nicio informație nouă în urma realizării evenimentului***.**

În al doilea rând, *cu cât probabilitățile de realizare a evenimentelor au valori mai apropiate între ele cu atât H va avea o valoare mai mare. La limită, H atinge valoarea maximă pentru o distribuție echiprobabilă a evenimentelor.*

Pentru a ilustra afirmația precedentă, se va considera cazul a trei urne care conțin 50 de bile albe şi negre, în proporții diferite (figura 3.8).



a. **b.** **c.**

Figura 3.8. Trei urne care conțin, fiecare, 50 de bile (albe şi negre). Prima urnă conține 25 de bile albe şi 25 de bile negre, a doua conține 10 bile albe şi 40 de bile negre, iar ultima conține o bilă albă şi 49 de bile negre

Prima urnă conține 25 de bile albe şi 25 de bile negre, deci probabilitatea de extragere a unei bile albe este egală cu cea a extragerii unei bile negre $p_A = p_N = 1/2$. Entropia informațională în acest caz este:

$$H_1 = 2 \cdot 0{,}5 \log_2 2 = 1\,bit\,. \tag{3.25}$$

A doua urnă conține 40 de bile negre şi 10 bile albe, deci probabilitățile vor fi: $p_A = 0{,}8$, respectiv $p_B = 0{,}2$. În această situație,

$$H_2 = -0{,}8 \log_2 0{,}8 - 0{,}2 \log_2 0{,}2 \cong 0{,}72\,bit\,. \tag{3.26}$$

A treia urnă conține 49 de bile negre şi 1 bilă albă. În acest ultim caz probabilitățile sunt $p_1 = 0{,}98$, respectiv $p_2 = 0{,}02$, iar

$$H = -0{,}98 \log_2 0{,}98 - 0{,}02 \log_2 0{,}02 \cong 0{,}14\,bit\,. \tag{3.27}$$

Se observă că:

$$H_1 > H_2 > H_3\,, \tag{3.28}$$

în acord cu proprietatea enunțată mai sus.

Interpretarea acestei proprietăți este aceea că *incertitudinea receptorului este cu atât mai mare cu cât distribuția probabilităților de realizare a evenimentelor e mai aproape de uniformitate (distribuție echiprobabilă), caz în care incertitudinea devine maximă* (figura 3.9) [17]**.**

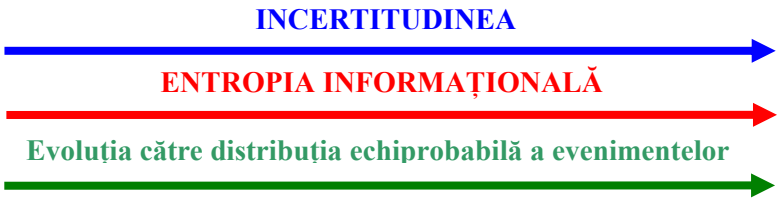


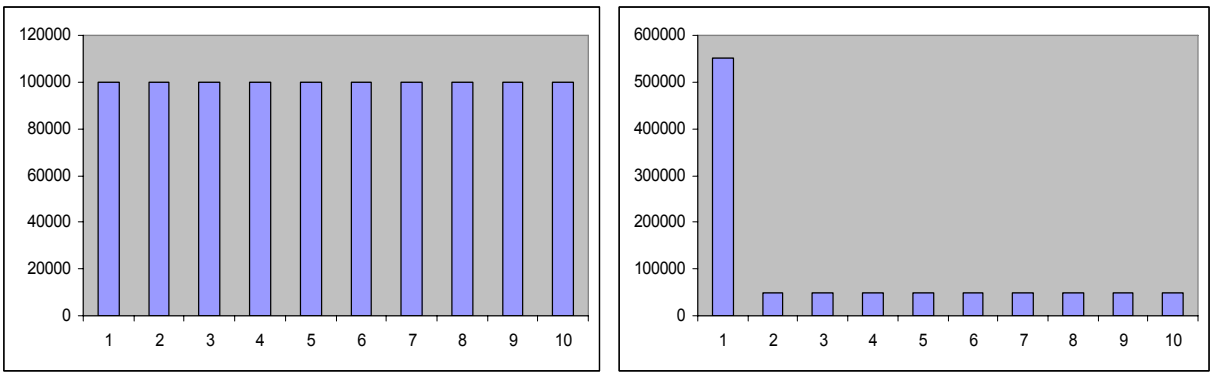
Figura 3.9. Legătura dintre entropia informațională, incertitudine şi distribuția evenimentelor

3.4. Entropia socială şi diversitatea sistemelor mecatronice multiagent

3.4.1. Diversitatea sistemelor sociale

Entropia informațională s-a dovedit a fi extrem de utilă în clarificarea şi cuantificarea noțiunii de diversitate atunci când se analizează comportamentul unor sisteme sociale, indiferent de natura acestora. Legătura dintre semnificația entropiei statistice, a entropiei informaționale şi a diversității sistemelor vii este relevantă dacă se compară, de pildă, o faună formată din 10 specii diferite de albine, una dintre specii având 550 000 de indivizi iar fiecare dintre celelalte 9 fiind compusă din 50 000 de indivizi, cu o altă faună compusă tot din 10 de specii, fiecare specie numărând 100 000 de indivizi [11], [229]. Fiecare faună poate fi considerată o macrostare a unui sistem format din 1 milion de indivizi (elemente), repartizați pe 20 de specii (clase). Ponderea W a faunei cu distribuție uniformă a indivizilor este maximă comparativ cu oricare altă distribuție posibilă, deci, în sens statistic, e cea mai *dezordonată* macrostare posibilă.

Pe de altă parte, în ceea ce priveşte puterea de a anticipa ce albină va fi întâlnită în timpul unei plimbări sau, altfel spus, câtă *informație* nouă aduce întâlnirea unei albine în raport cu ce era de aşteptat să se intâmple, e evident faptul că, intuitiv, o faună e cu atât mai diversă cu cât distribuția albinelor între specii e mai aproape de uniformitate: tipul de albină întâlnită în timpul unei plimbări e cu atât mai puțin predictibil (deci întâlnirea acestuia aduce cu atât mai multă informație) cu cât fauna este mai aproape de o distribuție uniformă (în proporții egale) a albinelor între specii (figura 3.10) [229].



a. **b.**

Figura 3.10. Reprezentare grafică a distribuției pe specii a două faune de albine. Intuitiv, se poate afirma că prima faună (a) e mai diversă decât a doua (b), întrucât tipul de albină întâlnită în timpul unei plimbări e mai puțin predictibil în primul caz decât în cazul al doilea

Diversitatea unui sistem social depinde, prin urmare, de *numărul de clase* şi de *proporţia indivizilor* în fiecare clasă, sistemul social cel mai divers posibil fiind cel care are indivizii egal distribuiți între clase. Pornind de la similitudinile existente între entropie, informație şi diversitate, nu e greu de înțeles de ce entropia informațională este un concept utilizat şi în alte domenii decât cel originar. Astfel, entropia informațională ca măsură a diversității este prezentă nu doar în ecologie şi sociologie, dar şi în domeniul mecatronicii, în speță al roboticii [10], [11].

3.4.2. Entropia socială ca măsură a diversității unui sistem mecatronic multiagent

Cercetarea comportamentului sistemelor formate din agenți inteligenți[50] (roboți) a condus la necesitatea evaluării diversității acestor sisteme [11]. De pildă, în cazul sistemelor formate din agenți capabili de învățare[51] bazată pe recompensă[52] (*reinforcement learning*), agenții pot fi comparați prin intermediul strategiei[53] (*policy*) adoptate de aceştia după ce comportamentul lor devine stabil. Astfel, se poate evalua „diferența comportamentală" (*behavioral difference*) a agenților, care exprimă gradul de diversitate al sistemului.

Pentru situația în care strategiile posibile ale unui agent din sistem sunt puține se utilizează „entropia socială simplă" (*simple social entropy*) ca măsură a diversității sistemului. Fie un sistem $R = \{r_1, r_2, ..., r_N\}$, format din N agenți inteligenți (roboți), care pot fi împărțiți în n clase, agenții fiecărei clase având aceeaşi strategie. Notând cu p_i procentul de agenți din clasa i, *entropia socială a sistemului* este o funcție similară entropiei informaționale [11], şi anume:

$$H(R) = -\sum_{i=1}^{n} p_i \log_2 p_i \ . \tag{3.29}$$

Se va analiza în continuare un exemplu concret [17]. Fie patru sisteme diferite de agenți: primul sistem are şapte agenți, dintre care şase au strategii identice, iar cel rămas o strategie diferită; al doilea sistem e compus tot din şapte agenți, împărțiți (după strategii) în două clase care conțin trei, respectiv patru agenți; cel de-al treilea sistem conține nouă agenți, împărțiți în trei clase compuse din trei, patru, respectv doi agenți; ultimul sistem are tot nouă agenți şi trei clase, dar fiecare clasă conține trei agenți.

Dacă se asociază celor trei strategii diferite ale agenților trei figuri geometrice diferite (cerc, pătrat, triunghi) cele patru sisteme pot fi reprezentate ca în figura 3.11. Folosind (3.29) se calculează entropia socială a fiecărui sistem. Se obțin rezultatele:

$$H(R_a) = \frac{6}{7}\log_2 \frac{7}{6} + \frac{1}{7}\log_2 7 \cong 0{,}59\,, \tag{3.30}$$

[50] Prin *agent inteligent* se înțelege orice entitate autonomă care interacționează cu mediul exterior în vederea realizării unor scopuri.

[51] Procesul de învățare (*learning*) este un proces în urma căruia acțiunile agentului devin, progresiv, tot mai eficiente în urma interacțiunilor dintre agent şi mediul exterior.

[52] Agentul care se bazează pe *reinforcement learning* învață (descoperind singur) ce acțiuni să efectueze în anumite situații, astfel încât să maximizeze un semnal numeric numit „recompensă" (*reward*).

[53] S-a optat pentru traducerea termenului *policy* prin „strategie" (în loc de „politică"). Termenul indică acțiunile pe care le efectuează agentul la un moment dat (comportamentul agentului la acel moment).

$$H(R_b) = \frac{4}{7}\log_2\frac{7}{4} + \frac{3}{7}\log_2\frac{7}{3} \cong 0{,}98\,, \tag{3.31}$$

$$H(R_c) = \frac{1}{3}\log_2 3 + \frac{4}{9}\log_2\frac{9}{4} + \frac{2}{9}\log_2\frac{9}{2} \cong 1{,}53\,, \tag{3.32}$$

$$H(R_d) = 3\cdot\frac{1}{3}\log_2 3 \cong 1{,}58\,. \tag{3.33}$$

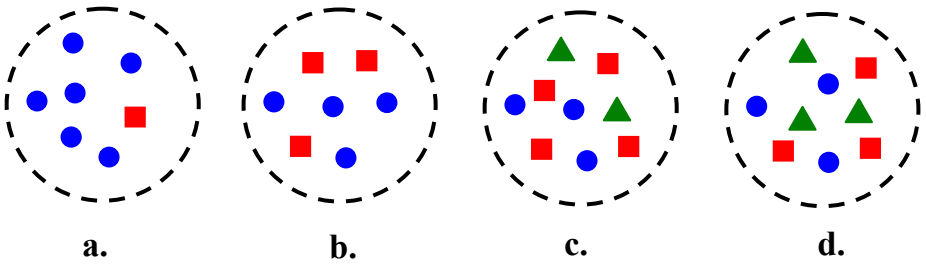


Figura 3.11. Reprezentarea simbolică a patru sisteme de agenţi (roboţi) capabili de învăţare bazată pe recompensă (*reinforcement learning*). Primul sistem (a) conţine 7 agenţi împărţiţi (după strategii) în 2 clase diferite: una cu 6 agenţi iar cealaltă cu 1 agent. Al doilea sistem (b) e format din 7 agenţi, împărţiţi în două clase: una cu 3, iar cealaltă cu 4 agenţi. Al treilea sistem (c), care are 9 agenţi, conţine trei clase diferite, fiecare având 3, 4, respectiv 3 agenţi. Ultimul sistem (d) e format din 9 agenţi care se împart în 3 clase, fiecare clasă având câte 3 agenţi

În concluzie, se constată că:

$$H(R_a) < H(R_b) < H(R_c) < H(R_d)\,. \tag{3.34}$$

Din rezultatele de mai sus, reiese semnificația faptului că entropia socială $H(R)$ este o măsură a diversității sistemelor mecatronice multiagent: diversitatea creşte progresiv (odată cu funcția H) de la primul înspre ultimul sistem (în acord cu proprietatea amintită a funcției H, potrivit căreia orice modificare înspre egalizarea proporțiilor p_i conduce la creşterea valorii lui H) (figura 3.12).

Cele două proprietăți ale entropiei informaționale pot fi reformulate în noul context: $H(R) = 0$ pentru sisteme sociale omogene, caz în care diversitatea este minimă (toate probabilitățile p_i sunt nule, în afară de una care, evident, va avea valoarea 1); pentru grupuri sociale eterogene, $H(R)$ e maxim când toate clasele au acelaşi număr de agenți (toate probabilitățile p_i sunt egale cu $1/n$).

Figura 3.12. Legătura dintre entropia socială, diversitate şi distribuția agenților pe clase

3.4.3. Diversitate şi performanță în cazul sistemelor mecatronice multiagent

Entropia socială ca măsură a diversității e utilă când se dorește evidențierea legăturii dintre diversitatea unui sistem de agenți şi performanțele sale aşa cum e necesar, de pildă, în cazul fotbalului cu roboți (*robot soccer*), un domeniu tot mai popular printre cercetătorii sistemelor inteligente multiagent (figura 3.13).

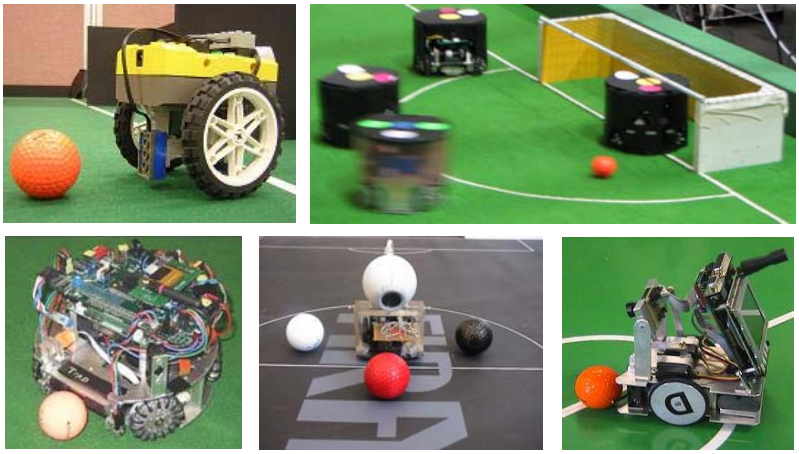


Figura 3.13. Tipuri de roboți utilizați în jocurile de fotbal (robot soccer). Imaginile au fost preluate de la [249], [250], [262], [280]

În simulările pe computer efectuate de Balch, echipele sunt formate din patru agenți fiecare. Una dintre echipe (*control team*) este controlată complet, urmând cu strictețe o strategie fixă împotriva celeilalte echipe (*learning team*), cea care este supusă procedeelor de învățare bazate pe recompensă [11].

După cum s-a subliniat, „diferența comportamentală" (*behavioral difference*) a agenților exprimă gradul de diversitate al sistemului. Performanțele acestei ultime echipe sunt cu atât mai ridicate cu cât diferența dintre scorul acesteia şi echipa adversă e mai mare (evident, în favoarea ei). S-au comparat două metode diferite de recompensă (*reward*):

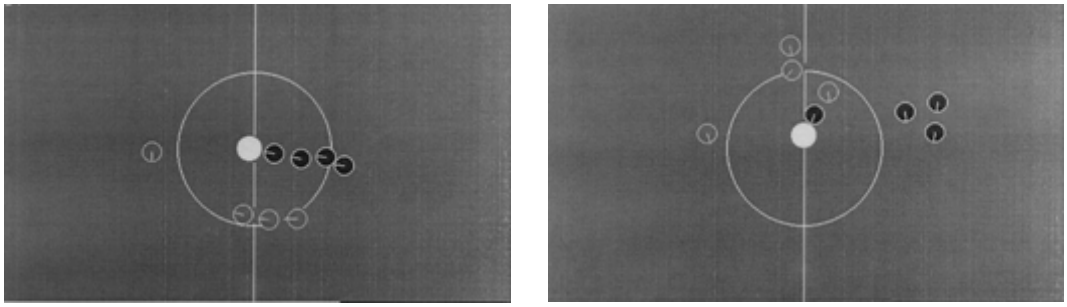
- *recompensă locală*, în care fiecare jucător e recompensat individual când înscrie un gol, sau e „pedepsit" când se află în apropierea mingii în momentul în care cealaltă echipă înscrie;
- *recompensă globală*, în care toți agenții sunt recompensați în momentul în care echipa înscrie sau sunt pedepsiți când echipa primeşte gol.

Simularea arată că, în cazul recompensei *locale*, cei patru jucători vor converge (pentru fiecare din cele 10 simulări) spre aceeaşi strategie, cea de „atacant", adică echipa va ajunge *perfect omogenă*, ceea ce corespunde valorii nule pentru H :

$$H_{local}(R) = 0. \tag{3.35}$$

În situația în care recompensa este *globală*, echipa supusă experimentului va converge către următoarea configurație strategică *eterogenă*: un „atacant", unul sau doi „mijlocaşi" şi unul sau doi „fundaşi" (figura 3.14). Indiferent care dintre configurațiile posibile se realizează, există trei strategii diferite, una dintre ele fiind adoptată de doi agenți, iar celelalte de câte unul fiecare. În acest caz,

$$H_{global}(R) = 2 \cdot 0{,}25 \log_2 4 + 0{,}5 \log_2 2 = 1{,}5 . \tag{3.36}$$



a. **b.**

Figura 3.14. Rezultatele simulărilor efectuate de Balch. Echipa (de culoare neagră) supusă învățării bazate pe recompensă devine omogenă (toți agenții adoptă strategia de atacant) în cazul în care recompensa este individuală (a), iar dacă recompensa e globală (b), echipa devine eterogenă (formată din atacant, unul sau doi mijlocaşi, respectiv unul sau doi fundaşi). (preluat din [11])

Prin urmare, *diversitatea echipei este mai mare în cazul în care recompensa este globală*. După mai multe meciuri, rezultatele statistice arată că, în cazul recompensei locale, echipa pierde cu o diferență medie de două goluri iar, dacă echipa e recompensată global, aceasta câştigă cu o diferență medie de două goluri. În concluzie, recompensa globală conduce la o mai mare diversitate şi, în acelaşi timp, la o mai mare performanță a echipei, deci, în acest caz, performanța şi diversitatea sunt pozitiv corelate. Această concluzie nu e general valabilă, existând şi cazuri de sisteme multiagent în care corelația dintre performanță şi diversitate e negativă [11], adică sistemele mecatronice multiagent omogene sunt mai performante decât cele eterogene (de pildă sistemele colective de *foraging robots*).

În concluzie, *entropia socială constituie o măsură a diversității sistemelor mecatronice multiagent, iar diversitatea poate fi corelată (pozitiv sau negativ) cu eficiența acestora* [17].

3.5. Informație, organizare, simetrie şi complexitate

3.5.1. Legătura dintre informație şi simetrie

Din formula (3.20) decurge imediat faptul că valoarea maximă a entropiei (care se realizează, atunci când toate probabilitățile sunt egale cu 1/*n*) este:

$$S_{\max} = -\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{n} \ln \frac{1}{n}, \tag{3.37}$$

adică:

$$S_{\max} = \ln n . \tag{3.38}$$

Shu-Kun Lin a introdus funcția *I*, numită *informație*, ca fiind diferența dintre valoarea maximă posibilă a entropiei unui sistem şi valoarea entropiei sistemului la momentul respectiv [272], [273]:

$$I = S_{\max} - S\,. \tag{3.39}$$

Cum entropia unui sistem izolat creşte pe măsură ce acesta se apropie de echilibru, (devenind maximă la echilibru), rezultă din formula (3.39) că *informația I a unui sistem izolat scade pe măsură ce acesta se apropie de echilibru, pentru ca, în momentul atingerii echilibrului, informația să se anuleze*[54]**.**

Pe de altă parte, cu cât un sistem e mai aproape de echilibru, adică mai dezordonat, cu atât *simetria* lui [273] (de translație şi de rotație) e mai mare. Simetria perfectă ar corespunde, astfel, unei *dezordini* maxime (şi implicit unei entropii maxime), stare în care nu există direcție privilegiată.

Un exemplu simplu al unei scăderi bruşte a simetriei este înghețarea apei, proces în care entropia scade, iar informația *I* creşte, odată cu organizarea moleculelor sistemului sub forma unei structuri hexagonale. (figura 3.15). Aşadar, sistemele care au o valoare ridicată a informației *I* au un grad scăzut de simetrie (adică sunt pronunțat asimetrice).

În concluzie, cu cât un sistem e mai organizat, mai structurat, el poate „înmagazina" o cantitate mai mare de informație, ca o consecință a asimetriilor de care sistemul dispune (deşi asimetria nu garantează, doar prin ea însăşi, existența informației).

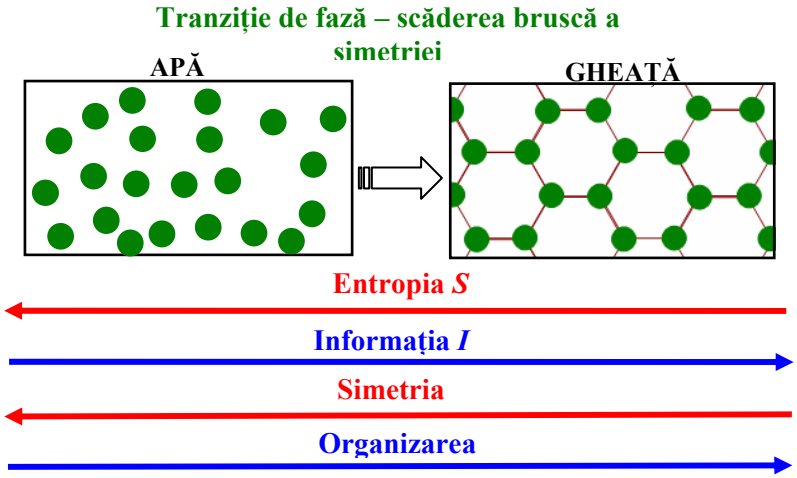


Figura 3.15. Înghețarea apei ca exemplu de scădere bruscă a simetriei. În urma acestui proces, entropia scade, informația *I* creşte, odată cu organizarea moleculelor sistemului sub forma unei structuri hexagonale

3.5.2. Ordine, organizare şi complexitate în lumea vie

După cum reiese şi din cel de-al treilea postulat al metodologiei transdisciplinare, *complexitatea este o trăsătură fundamentală a lumii* [173]. Din punctul de vedere al cantității de informație ce poate fi stocată, există o diferență esențială între ordine şi complexitate.

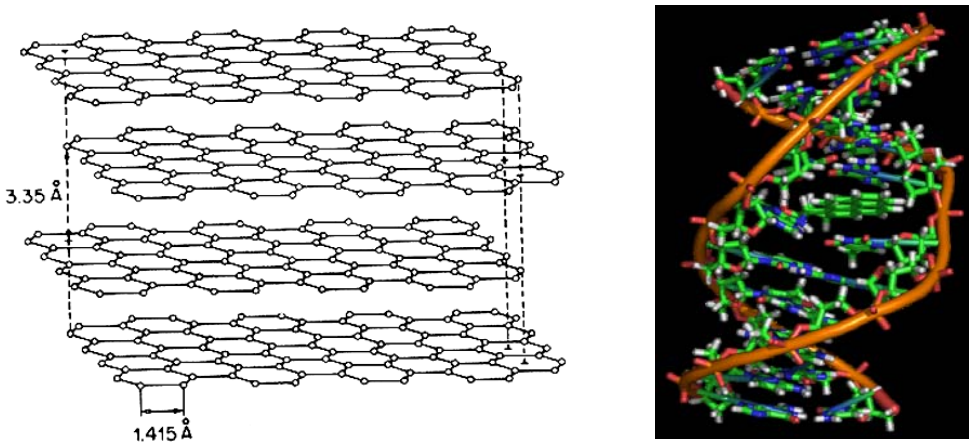
În general, conținutul de informație dintr-o succesiune de unități (literele dintr-o carte, atomii unui cristal, nucleotidele din ADN etc.) este dat de numărul minim de instrucțiuni necesare pentru a descrie specific structura succesiunii respective [217]. O *structură ordonată*, periodică, cum ar fi cea a unui solid cristalin [244], în care atomii sau moleculele

[54] A se reține că informația *I* diferă de entropia informațională *H*.

sunt aranjate într-o structură care se repetă cu regularitate, (figura 3.16.a), necesită doar câteva instrucțiuni care trebuie doar repetate apoi de un număr foarte mare de ori, *operație cu aport informațional minim*, întrucât nu e necesar să fie respectată o anumită succesiune a atomilor [179], [217]. Un astfel de aranjament e echivalent, din punct de vedere informațional, cu un document în care apare doar un singur cuvânt scurt, repetat de nenumărate ori „.....OM OM OM OM.....".

În schimb, în cazul unei *structuri complexe*, ca cea a ADN-ului, numărul de instrucțiuni este cu mult mai mare (în jur de 4 milioane pentru sintetizarea ADN-ului din bacteria E coli) pentru a respecta *succesiunea bine definită*, a nucleotidelor, *specifică* ADN-ului. Aranjamentul nucleotidelor în molecula ADN [239] este unul cu *mare aport informațional* (figura 3.16.b), similar unei succesiuni de litere care formează o frază cu sens ca, de pildă: „EU CITESC O CARTE".

O *structură periodică* (de tip solid cristalin) e caracterizată, deci, doar prin *ordine* în timp ce structurile complexe purtătoare de informație (macromolecula ADN) presupun existența *aperiodicității*, adică aranjamentul constituenților nu e unul ordonat, simplu şi monoton. Nu orice structură aperiodică e, însă, purtătoare de informație [217]. Structurile aperiodice pot fi purtătoare de informație doar dacă aranjamentul constituenților este unul *specific* (succesiunea constituenților este bine definită), aşa cum am văzut că se petrece în cazul moleculei ADN. Din acest motiv o polipeptidă oarecare, formată din amestecuri întâmplătoare de polimeri, este aperiodică, dar nu e purtătoare de informație pentru că îi lipseşte specificitatea, aranjamentul constituenților (polimerilor) fiind similar unei succesiuni aleatorii de litere: „BADJHZT...."



a. **b.**

Figura 3.16. Aranjamentul atomilor într-un solid cristalin (aici e reprezentat grafitul) este foarte ordonat, dar aportul informațional al aranjamentului este extrem de redus (a). Comparativ, aranjamentul nucleotidelor în molecula ADN este organizat, ceea ce determină conținutul informațional ridicat al moleculei (b)

Entropia unui polimer în care aminoacizii sunt distribuiți întâmplător (adică distribuția respectivă nu corespunde vreunei funcții biologice vitale) respectă formula [204], [217]:

$$S = k \ln W_t + k \ln W_c = S_t + S_c , \tag{3.40}$$

unde

$$S_t = k \ln W_t . \tag{3.41}$$

este entropia termică, asociată cu *distribuirea energiei* în sistem, iar

$$S_c = k \ln W_c \tag{3.42}$$

reprezintă entropia de configurație, care se referă la *distribuirea masei* în sistem. În formulele de mai sus, W_t şi W_c reprezintă numărul de moduri diferite în care poate fi distribuită energia (de translație, rotație, vibrație), respectiv masa (în speță aminoacizii) în interiorul polimerului.

Entropia unei macromolecule complexe care are o succesiune *specifică* a componenților (cum e cazul moleculei de ADN în care nucleotidele sunt *organizate*) este:

$$S_{cm} = k \ln W_{cm}, \tag{3.43}$$

adică entropia configurațională *de codificare* a macromoleculei, întrucât aceasta „poartă un mesaj”. Evident,

$$S_{cm} < S_c, \tag{3.44}$$

datorită organizării superioare care există la nivelul macromoleculei ADN.

Conținutul informațional al unui sistem (în particular al moleculei de ADN) poate fi exprimat ca fiind diferența dintre cele două entropii configurationale [204], [217]:

$$\mathrm{Y} = S_c - S_{cm} = k \ln \frac{W_c}{W_{cm}}. \tag{3.45}$$

Conținutul informațional al unui sistem este considerabil atunci când există foarte multe moduri de distribuire a componenților moleculei (adică W_c e foarte mare) dintre care foarte puține moduri (ideal doar unul, caz în care $S_{cm} = 0$) sunt purtătoare de mesaj. Acesta e cazul macromoleculelor cu un aranjament organizat (aperiodic specific) al constituenților, caracteristice sistemelor vii (cum e molecula ADN).

S-a argumentat în subcapitolul anterior că sistemele caracterizate de o valoare ridicată a informației I sunt pronunțat asimetrice sau, altfel spus, au un grad scăzut de simetrie. În continuare, se va considera că doar structurile aperiodice specifice cu grad de simetrie scăzut (de tip ADN) pot fi numite *structuri complexe*, datorită aportului informațional ridicat al acestora.

În concluzie, structurile complexe sunt cele care corespund unor funcții biologice utile. Prin urmare, *semnul distinctiv al viului este existența structurilor complexe, adică a aranjamentelor caracterizate de specificitate, aperiodicitate şi asimetrie***.**

Sistemele lumi vii se disting prin complexitate şi nu prin ordine [217], ordinea fiind doar un concept statistic, pe când *complexitatea e strâns legată de organizare*. Astfel, pornind de la lumea vie, se poate afirma că, în general, *informația este factorul determinant în obținerea organizării*. Aşadar, orice sistem se constituie pe suport material şi energetic, dar *structurarea şi organizarea se datorează informației* [162]**.**

În continuare, se va prezenta un exemplu concludent privind ingeniozitatea mecanismelor antientropice prin care organismul uman reuşeşte să-şi mențină funcțiile vitale, deci implicit complexitatea şi organizarea. Se va evidenția mai ales faptul că aceste mecanisme nu se disting în primul rând prin capacitatea de a furniza energie organismului (deşi acest aspect e

sigur, necesar), ci prin „inteligența” cu care ele reușesc să acționeze selectiv, ca și cum ar deține informații cu privire la natura proceselor pe care le controlează. Se va descrie modul de funcționarea al pompelor ionice Na-K, la descoperirea căruia a contribuit chimistul Jens Christian Skou, fapt pentru care i s-a decernat premiul Nobel în 1997.

3.5.3. Rolul pompei ionice Na-K în organizarea celulelor organismului uman

În interiorul celulelor organismului, concentrația ionilor de potasiu (K^+) trebuie să fie mare, iar concentrația ionilor de sodiu (Na^+) trebuie să fie mică (în comparație cu concentrația ionilor respectivi din exteriorul celulei) [242]. Diferența de concentrație menționată contribuie (alături de alte procese) la apariția unei mici diferențe de potențial de valoare constantă (cam de -70 mV în cazul neuronului) între partea interioară și cea exterioară a membranei celulare, partea interioară fiind polarizată negativ. Această diferență de potențial, numită potențial de repaus, joacă un rol determinant în activitatea celulelor excitabile (mușchi, celule nervoase). De pildă, în cazul transmiterii informației prin intermediul neuronilor, în urma excitării membranei axonului apare un potențial de acțiune (cam de +15 mV) care se suprapune peste potențialul de repaus. Propagarea potențialului de acțiune de-a lungul axonului permite, astfel, transmiterea informației la celule.

Menținerea diferenței de concentrație este, însă, un proces antientropic, întrucât se opune tendinței naturale care, datorită diferenței de concentrație, ar determina intrarea ionilor de Na^+ în celulă, respectiv ieșirea ionilor de K^+ din celulă. Pentru a menține diferența de concentrație organismul se folosește de un mecanism foarte ingenios: pompele ionice, care pot „distinge” între ionii de Na^+ și cei de K^+, reușind totodată să-i direcționeze în sens invers tendinței naturale de migrație a acestora, astfel încât potențialul de repaus să fie menținut (figura 3.17).

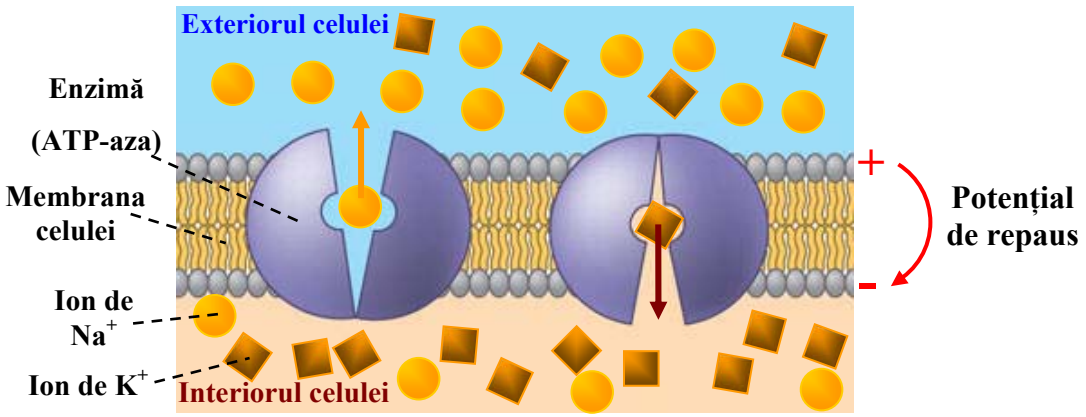


Figura 3.17. Principiul de funcționare al pompei ionice Na-K

Pompele ionice sunt, de fapt, niște enzime, numite ATP-aze, localizate în membrana celulară. Aceste enzime reușesc să-și schimbe periodic conformația (proces numit „eversiune”), ceea ce le permite să transporte ionii de Na^+ din interior spre exterior și ionii de K^+ din exterior către interior. Un rol esențial în acest proces îl au două tipuri de molecule: adenozina trifosfat (ATP) și adenozina difosfat (ADP). (figura 3.18)

Funcționarea pompei ionice Na-K este următoarea [242]. Trei ioni de Na^+, fiind atrași mai tare de grupările carbonil ale enzimei decât de apa care-i înconjoară, pătrund în cavitatea ATP-azei (figura 3.19.a). După ce toți cei trei ioni de sodiu au fost captați de către enzimă,

aceasta este fosforilată, adică primeşte o grupare fosfat, grupare pe care o pierde molecula ATP prin hidroliză (figura 3.19.b):

$$ATP + H_2O \rightarrow ADP + P_i + energie\,. \tag{3.46}$$

Reacția de mai sus (în care P_i e un fosfat anorganic) este extrem de importantă din două motive: pe de-o parte o grupare fosfat trece de la molecula ATP la enzimă (fosforilarea enzimei), iar pe de altă parte furnizează energia necesară funcționării pompei.

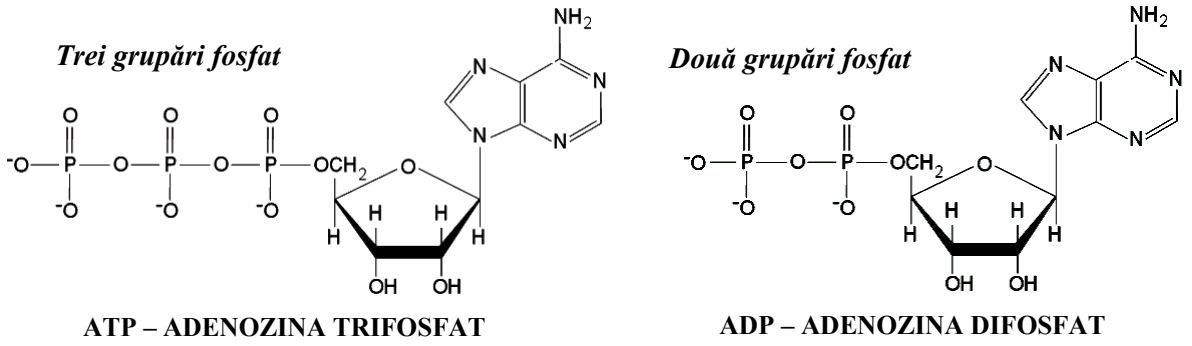


Figura 3.18. Formulele chimice ale moleculelor ATP, respectiv ADP

Atât atașarea grupării fosfat la enzimă cât şi energia rezultată în urma reacției (3.46) determină schimbarea conformațională a enzimei, care are un efect similar unei „răsuciri” a ATP-azei şi o „deschidere” a acesteia către parte exterioară a celulei.

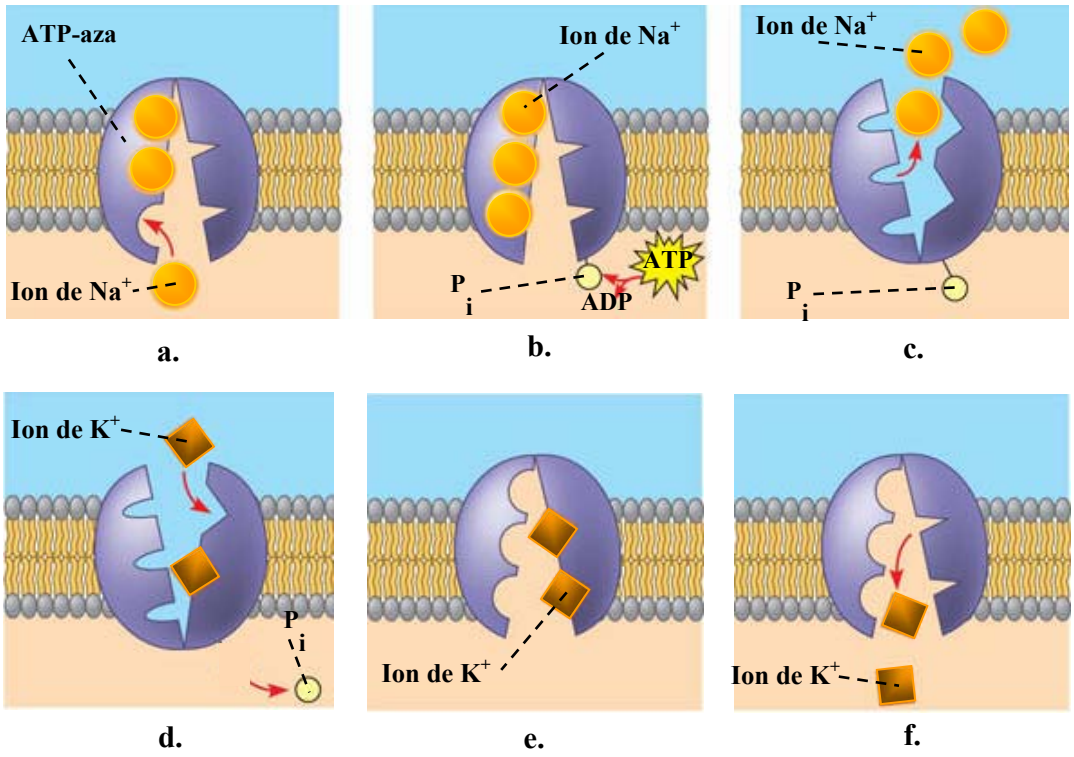


Figura 3.19. Etapele funcționării pompei ionice Na-K

Această modificare e datorată faptului că, în urma schimbării conformaționale a enzimei, atracția dintre ionii de Na^+ şi cavitatea acesteia devine mai slabă decât cea exercitată de apa din exteriorul celulei. În consecință, ionii de Na^+ se detaşează de cavitatea enzimei, fiind astfel eliberați în exteriorul celulei (figura 3.19.c). În schimb, ionii de K^+ vor fi atraşi de carbonul din cavitatea enzimei, ceea ce cauzează eliberarea grupării fosfat de către enzimă (figura 3.19.d), fapt care determină revenirea enzimei la forma inițială, deci „deschiderea" ei pentru zona din interiorul celulei (figura 3.19. e).

În fine, enzima eliberează ionii de potasiu în interiorul celulei. Aceştia, în urma revenirii enzimei la forma inițială, fiind atraşi mai puternic de apa din această zonă decât de gruparea carbonil a enzimei (figura 3.19.f), pătrund în interiorul celulei, după care ciclul se reia.

În afară de faptul că activitatea pompelor ionice are un rol extrem de important în funcționarea nervilor şi muşchilor, acestea nu sunt singurele „servicii" pe care pompele le aduc organismului [240], [242]. De pildă, transportul sodiului în afara celulelor este un proces care stimulează mecanisme specifice prin intermediul cărora în celule sunt aduse substanțe nutritive, glucoză şi aminoacizi. Pompele ionice contribuie şi la controlul volumului celulelor: proteinele din celulă şi alți compuşi organici încărcați cu sarcină electrică negativă păstrează în interiorul celulei un mare număr de ioni pozitivi, ceea ce determină pătrunderea apei în celulă datorită osmozei; în lipsa activității pompelor Na-K care (scoțând trei ioni de Na^+ în timp ce introduc doar doi ioni de K^+) facilitează continua eliminare de sarcină pozitivă din celulă, celulele s-ar umfla cu apă până ar plesni.

Organismul dispune şi de mijloace prin care reface rezerva de molecule ATP, necesară pentru a furniza energie pompelor ionice: creşterea cantității de ADP, datorată reacțiilor de oxidare a moleculelor ATP, stimulează, prin intermediul unui mecanism de feed-back pozitiv, fosforilarea oxidativă a celulei în urma căreia se sintetizează moleculele ATP (proces care necesită energie din exterior). Astfel, transformarea ATP în ADP şi invers are loc ciclic (figura 3.20) [255], [258].

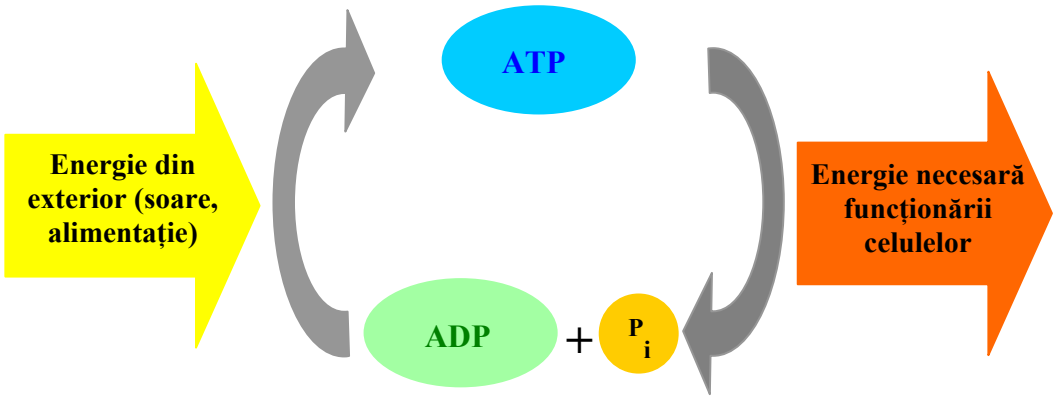


Figura 3.20. Ciclul prin care are loc transformarea ATP în ADP şi invers

În concluzie, viața celulelor se datorează într-o bună măsură pompelor ionice Na-K, a căror activitate este similară imaginarului demon al lui Maxwell [162], prin faptul că reuşesc să recunoască şi să separe ionii de sodiu de cei de potasiu, obligându-i totodată să se deplaseze în sens contrar tendinței naturale de omogenizare.

Mecanismul prin intermediul căruia se menține potențialul de repaus al celulei este unul complex şi ingenios; *pompele ionice funcționează ca nişte sisteme mecatronice inteligente care preiau informația din exterior cu privire la natura ionilor cu care interacționează şi apoi*

utilizează informația primită în vederea menținerii organizării la nivelul celulei, opunându-se creşterii entropiei acesteia.

3.6. Concluzii

Pornind de la importanța informației în tehnologia şi educația mecatronică, precum şi de la interesul crescând manifestat de elevi şi studenți în ceea ce priveşte legătura acesteia cu entropia şi organizarea, în capitolul de față se prezintă semnificația informației, precum şi rolul acesteia în organizarea sistemelor mecatronice şi ale sistemelor lumii vii.

Având în vedere apropierea care există la nivel conceptual între informație şi entropie, s-a evidențiat şi exemplificat, pentru început, faptul că entropia statistică e măsura dezordinii unui sistem izolat. În continuare, după ce s-au discutat legăturile existente în mecatronică între informație şi semnal, precum şi între informație, substanță şi energie, s-a prezentat noțiunea de „entropie informațională" ca măsură a incertitudinii receptorului privind realizarea unui eveniment.

Următorul pas a fost extrapolarea semnificațiilor expresiei matematice a entropiei informaționale, introducând conceptul de „entropie socială", înțeles ca măsură a diversității sistemelor sociale şi mecatronice multiagent. În acest context, s-au prezentat câteva aplicații ale entropiei sociale în evaluarea diversității unor sisteme mecatronice complexe multiagent, precum şi corelațiile existente între diversitatea şi performanța unui astfel de sistem.

În continuare, s-au evidențiat similitudinile şi diferențele care există între informație, simetrie, ordine, organizare şi complexitate la nivelul sistemelor în general şi al sistemelor vii în special. În vederea atingerii acestui scop s-au utilizat semnificațiile expresiilor matematice ale informației *I*, respectiv ale conținutului informațional, definite la nivelul unui sistem.

În final, s-a prezentat modul de funcționare a unui sistem al lumii vii în care transmiterea informației joacă un rol determinant: pompele ionice, care, prin faptul că disting ionii de potasiu de cei sodiu şi îi determină să migreze în sens invers tendinței naturale, utilizează informația în vederea menținerii organizării la nivelul celulei, opunându-se creşterii entropiei acesteia.

3.7. Contribuții personale

- Prezentul capitol reprezintă o abordare interdisciplinară proprie a conceptului de „informație".
- S-a argumentat, folosind metode, ilustrații grafice şi exemple originale, că entropia statistică e o măsură a dezordinii, entropia informațională e o măsură a incertitudinii, iar entropia socială este o măsură a diversității.
- S-a evidențiat faptul că utilizarea entropiei sociale în vederea evaluării diversității sistemelor mecatronice multiagent poate genera, datorită corelației diversitate-performanță, noi deschideri în spațiul tehnologiei şi educației mecatronice.
- Subliniind diferențele existente la nivelul semnificațiilor între informație (aşa cum e ea înțeleasă în teoria comunicării), entropia informațională, funcția informație *I* şi conținutul informațional al unui sistem, s-a argumentat faptul că principala caracteristică a sistemelelor vii nu este ordinea, ci existența structurilor complexe, adică a aranjamentelor caracterizate de specificitate, aperiodicitate şi asimetrie.
- Pornind de la faptul că un sistem organizat dispune de un conținut informațional incomparabil mai mare față de un sistem care e doar ordonat, s-a ajuns la

concluzia potrivit căreia complexitatea e o consecinţă a organizării şi structurării mai degrabă decât a ordinii.

- Prin intermediul explicațiilor şi precizărilor legate de structura şi funcționarea pompelor ionice, s-au evidențiat similitudinile existente între sistemele mecatronice şi cele ale lumii vii în ceea ce priveşte utilizarea inteligentă a informației în vederea organizării la nivelul sistemului.

CAPITOLUL 4

AUTOORGANIZAREA SISTEMELOR MECATRONICE COMPLEXE PRIN HOMEOKINESIS ŞI STIGMERGIE

4.1. Introducere

În mecanica clasică, odată ce a fost stabilit hamiltonianul unui sistem şi condițiile inițiale, evoluția ulterioară a sistemului nu numai că e complet determinată, ci este şi reversibilă, adică simetrică față de inversiunea sensului curgerii timpului: „Dinamica consideră reversibilitatea ca o proprietate a oricărei evoluții", deci „structura acestor ecuații implică ideea că, dacă vitezele tuturor punctelor unui sistem s-au inversat instantaneu, totul se petrece ca şi cum sistemul s-ar reîntoarce în timp" [190]. În acest context, spontaneitatea schimbărilor neaşteptate în evoluția sistemului e privită mai degrabă ca un factor perturbator decât ca o şansă a sistemului de a ajunge în stări cu grad mai ridicat de organizare.

Există însă procese, cum ar fi, de exemplu, frecarea, în cursul cărora energia se poate conserva fără ca transformarea respectivă să fie reversibilă. Începând cu a doua jumătate a secolului al XIX-lea, pornind de la preocuparea oamenilor de ştiință ai vremii pentru optimizarea funcționării motoarelor termice, au fost formulate câteva concluzii care au condus la înțelegerea faptului că funcționarea motoarelor este posibilă doar cu prețul unei pierderi, unei disipări nefolositoare a căldurii în timpul conversiei acesteia în lucru mecanic. Evident, pierderea nu poate fi recuperată, transformarea fiind, prin urmare, ireversibilă.

4.2. Entropia termodinamică şi ireversibilitatea

Pentru a putea distinge între fluxurile de căldură care, în timpul funcționării unui motor termic, compensează conversia căldurii în lucru mecanic şi fluxurile ireversibil pierdute, Clausius introduce, în 1865, conceptul de *entropie* [186], o funcție de stare a unui sistem termodinamic care îşi modifică valoarea în timp ce sistemul schimbă căldură cu mediul exterior. Considerând că sistemul este în contact cu un termostat aflat la temperatura T, variația entropiei termostatului în cazul în care a primit din partea sistemului cantitatea infinitezimală de căldură δQ_m (prin indicele „m" se indică faptul că este vorba de mediul exterior şi nu de sistem) este:

$$dS_m = \frac{\delta Q_m}{T}. \tag{4.1}$$

Studiind proprietățile entropiei, Clausius ajunge la concluzia că, *în timpul proceselor reale, entropia unui sistem izolat (care nu schimbă nici masă nici energie cu mediul exterior) creşte întotdeauna (sau rămâne constantă), pentru a atinge valoarea maximă în starea de echilibru.*

Revenind la formula (4.1), logica ei devine evidentă. În primul rând, transferarea unei cantități mai mari de căldură termostatului trebuie să conducă la o mai mare dispersie a energiei, deci variația entropiei trebuie să fie proporțională cu cantitatea de căldură cedată. În al doilea rând, cum trecerea căldurii are loc *spontan* de la un corp cu o temperatură dată la unul cu temperatură mai coborâtă, proces care trebuie să fie însoțit de o creştere a entropiei *totale*, înseamnă că modificarea entropiei unui corp cu temperatură mai *ridicată* este mai *mică* decât cea a unui corp cu temperatură mai *scăzută* care primeşte *aceeaşi cantitate de căldură*.

Considerând că transferul căldurii de la sistemul termodinamic către termostat este natural, deci entropia totală (sistem + mediu) nu poate să scadă, se poate scrie:

$$dS_{tot} = dS + dS_m \geq 0 . \tag{4.2}$$

În relația de mai sus, prin dS s-a notat variația entropiei sistemului. Folosind (4.1), rezultă că modificarea entropiei unui sistem termodinamic în urma schimbului de căldură cu exteriorul respectă formula:

$$dS \geq \frac{\delta Q}{T}, \tag{4.3}$$

în care $\delta Q = -\delta Q_m$, este cantitatea de căldură cedată de către sistem mediului exterior.

Forma integrală a ecuației de mai sus este:

$$\Delta S = S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}. \tag{4.4}$$

În relațiile (4.3) şi (4.4) semnul este de *egalitate* dacă şi numai dacă transformarea e *reversibilă*. Ecuațiile de mai sus reprezintă formulările matematice ale principiului al doilea al termodinamicii, principiu care „rupe simetria dintre înainte şi după" [191], postulând că *orice proces natural se desfăşoară, ireversibil, doar în sensul creşterii entropiei***.** Prin urmare, evoluția unui sistem termodinamic, cel puțin la nivelul macroscopic (entropia introdusă de Clausius este o funcție care operează doar la nivel macroscopic), nu mai e descrisă de legi simetrice la inversiunea $t \to -t$, cum erau legile dinamicii clasice. Sensul unidirecțional (de la cald la rece) al transferului de căldură poate fi explicat pornind de la concluzia de mai sus, potrivit căreia entropia totală a sistemului format din cele două corpuri care schimbă căldură nu poate decât să crească în urma transferului. Considerând că un corp A cedează o cantitate de căldură $|\delta Q|$ unui alt corp B şi folosind convenția obişnuită privind semnul căldurii (căldura cedată de un sistem e negativă iar cea primită e pozitivă), se poate scrie:

$$\frac{-|\delta Q|}{T_A} + \frac{|\delta Q|}{T_B} > 0 . \tag{4.5}$$

Din relația (4.5) rezultă imediat faptul că $T_A > T_B$.

4.3. Teorema H şi entropia statistică. Starea de echilibru ca atractor

Pornind de la studiul la nivel microscopic al ciocnirilor dintre moleculele unui gaz, Maxwell a ajuns la concluzia că, la echilibru termodinamic, distribuția vitezelor moleculelor gazului este gaussiană. Doar în acest caz efectul ciocnirilor la nivel microscopic se compensează la scară macroscopică, astfel că, gazul în ansamblu este stabil când atinge echilibrul. Boltzmann a făcut, în 1872 [216], un pas uriaş prin enunțarea *teoremei H*, care permite descrierea evoluției unui sistem termodinamic către echilibrul descris de distribuția maxwelliană a vitezelor. Conform teoremei amintite, integrala efectuată în spațiul vitezelor pe funcția $f(\vec{v})$, de distribuție a vitezelor moleculelor unui gaz, nu poate decât să scadă în cursul timpului, până când, în starea de echilibru termodinamic, atinge valoarea minimă. Matematic, cantitatea H_B [55], dată de:

$$H_B = \iiint f(\vec{v}) \ln(\vec{v})\, d\vec{v}\,, \tag{4.6}$$

poate doar să scadă în cursul evoluției unui gaz spre starea de echilibru. Câțiva ani mai târziu, Boltzmann a descoperit legătura dintre entropie şi funcția H_B:

$$S = -kH_B\,, \tag{4.7}$$

în care k reprezintă constanta lui Boltzmann. Ulterior, Boltzmann a generalizat expresia matematică a entropiei pentru orice sistem care poate fi descris de variabilele canonice, din spațiul fazelor:

$$S = -k\iint f(q,p)\ln f(q,p)\, dq\, dp\,. \tag{4.8}$$

Prin contribuția lui Planck [145], s-a ajuns la expresia statistică a entropiei:

$$S = k\ln W\,, \tag{4.9}$$

unde W reprezintă numărul de stări *microscopice* distincte ale unui sistem, care corespund unei stări *macroscopice* descrise de valori bine precizate ale parametrilor termodinamici sau, pe scurt, prin W s-a desemnat numărul de microstări compatibile cu o macrostare dată.

Boltzmann este cel care a evidențiat faptul că se poate interpreta starea de echilibru spre care tinde un sistem ca fiind *starea de dezordine maximă* a sistemului, entropia fiind funcția de stare care indică gradul de dezordine a sistemului: cu cât valoarea entropiei este mai mare, cu atât sistemul este mai dezordonat, adică mai aproape de echilibru. Prin urmare, *orice sistem izolat tinde să ajungă în starea macroscopică (de echilibru) cu cea mai mare probabilitate de realizare, macrostare căreia i se asociază numărul maxim de microstări compatibile şi entropia maximă*. Pentru sistemele termodinamice compuse dintr-un număr foarte mare de particule (de ordinul a 10^{23} în cazul gazelor, de pildă), saltul de la starea de echipartiție la oricare alta este, numeric vorbind, enorm, deci oricare stare e extrem de improbabil a fi realizată în comparație cu aceasta.

Evoluția către echilibru este una *ireversibilă*, în cursul căreia sistemul termodinamic trece prin stări cu probabilitate de realizare tot mai mare, pentru a se stabiliza, din punct de vedere

[55] Pentru a nu o confunda cu entropia informațională, se va nota cu H_B funcția pe care Boltzmann a notat-o cu H.

macroscopic, în final, în starea de echilibru, care, în limbajul prigoginian reprezintă un *atractor*: odată ajuns la echilibru, sistemul va fluctua în jurul acestei stări, fluctuațiile fiind relativ mici şi „condamnate" la regresiuni rapide în jurul stării de probabilitate maximă. [190].

4.4. Ireversibilitatea ca măsură a limitării informației accesibile observației

O remarcabilă contribuție la nuanțarea conceptului de entropie, îndeosebi din punctul de vedere al legăturii acesteia cu *teoria informației*, îi revine lui Gibbs, care, în 1902, propune [90] o nouă abordare a studiului evoluției unui sistem termodinamic: teoria ansamblurilor. Cum, în descrierea dinamică a unui sistem macroscopic format dintr-un număr de molecule de ordinul a 10^{23}, cunoaşterea pozițiilor şi vitezele tuturor particulelor este imposibilă, Gibbs a introdus o descriere a evoluției sistemului care să nu depindă de precizarea condițiilor inițiale. Fiecărei stări a unui sistem dinamic cu ℓ grade de libertate i se poate asocia, în mecanica clasică, în spațiul fazelor (spațiu cu 2ℓ dimensiuni), un punct reprezentativ, a cărui traiectorie în acest spațiu descrie evoluția în timp a sistemului. Cum însă, în termodinamică, nu pot fi cunoscute *exact* condițiile inițiale, se poate asocia unui sistem macroscopic doar un *ansamblu de puncte reprezentative*, compatibil cu informațiile pe care le avem cu privire la sistem. Se introduce o densitate *continuă* (în loc de a opera cu puncte discrete) a punctelor reprezentative din spațiul fazelor (spațiu notat cu Γ), *densitatea de probabilitate* $\rho_\Gamma(p,q)$, care e o măsură a probabilității ca starea sistemului să se afle în jurul unui punct de coordonate (p,q) din spațiul fazelor [232]. Dacă sistemul e format din *N* particule independente, atunci se poate scrie:

$$\int \rho_\Gamma(p,q)\,dp\,dq = 1, \tag{4.10}$$

unde s-a notat: $p=(p_1,p_2,...,p_{3N})$, $q=(q_1,q_2,...,q_{3N})$, iar $dp\,dq = d^{3N}p\,d^{3N}q$ reprezintă volumul elementar din spațiul fazelor. Datorită incompletei cunoaşteri a condițiilor inițiale, nu se poate vorbi de o traiectorie unică, bine determinată, ci de existența unui *ansamblu de traiectorii*, pornind de la *ansamblul* punctelor care descriu starea inițială.

Precizia cunoaşterii stării unui sistem este exprimată prin volumul din spațiul fazelor în care $\rho_\Gamma(p,q)$ este nenulă. Cea mai mare imprecizie în cunoaşterea sistemului e atunci când $\rho_\Gamma(p,q)$ nu se anulează în nicio regiune a spațiului, deci starea sistemului ar putea fi oriunde în spațiul fazelor.

Funcția *H* a lui Boltzmann a fost înlocuită de către Gibbs cu funcționala

$$\eta[\rho_\Gamma] = \int \rho_\Gamma(p,q)\ln\rho_\Gamma(p,q)\,dp\,dq = 1, \tag{4.11}$$

entropia ansamblului fiind:

$$S = -k\eta[\rho_\Gamma]. \tag{4.12}$$

Pentru cazul particular în care $\rho_\Gamma(p,q)$ este constantă într-un element de volum ΔV_Γ, fiind nulă oriunde altundeva, există relația $\eta[\rho_\Gamma] = -\ln\Delta V_\Gamma$, iar entropia devine:

$$S = k \ln \Delta V_{\Gamma}, \tag{4.13}$$

deci valoarea entropiei este cu atât mai mare cu cât volumul ocupat de toate microstările posibile ale sistemului în spațiul fazelor este mai mare.

Cu cât traiectoria unui sistem în spațiul fazelor este mai bine precizată, cu atât cunoaşterea sistemului este mai bună. Cunoaşterea traiectoriei e cu atât mai bună cu cât precizia cunoaşterii condițiilor inițiale e mai ridicată; pe măsură ce creşte precizia măsurătorilor, se trece dintr-o regiune a spațiului fazelor într-una tot mai mică, din interiorul celei anterioare, până când, la limită, regiunea care descrie starea sistemului tinde către 0 [190]. Gibbs apelează la o analogie: o picătură de cerneală amestecată într-un pahar cu apă limpede îşi conservă volumul (din punct de vedere microscopic), însă un observator real nu va vedea, în final, decât colorarea omogenă a apei în albastru. Omogenizarea culorii apei este doar o impresie subiectivă, datorată imposibilității de a percepe răspândirea microscopică, în firişoare tot mai subțiri, a picăturii. Gibbs defineşte entropia în acest context ca fiind dependentă de o caroiere, divizare (*coarse-graining*) a întregului spațiu al fazelor în volume mici, $\Delta V_m (m = 1, 2, ...)$, dar de dimensiuni fixate [232]. Densitatea de probabilitate este rezultatul unei medieri de forma:

$$\rho^{cg}(p,q) = \int_{\Delta V_m} \rho(p',q')\, dp'\, dq' = \frac{\Delta p_m}{\Delta V_m}, \text{ pentru } p', q' \in \Delta V_m. \tag{4.14}$$

Entropia Gibbs devine, în consecință,:

$$S_{Gibbs} = -k \sum_m \Delta p_m \ln \frac{\Delta p_m}{\Delta V_m}. \tag{4.15}$$

Se poate observa uşor similitudinea dintre entropia Gibbs, expresia (3.10) a entropiei statistice şi formula (3.20) a entropiei informaționale.

Deşi, conform teoremei lui Liouville, volumul din spațiul fazelor rămâne constant în timpul evoluției sistemului, *forma* lui se împrăştie în spațiul fazelor precum picătura de cerneală în apă. În final, pornind de la ipoteza ergodică, se consideră cazul unui sistem izolat, situație în care sistemul se poate găsi, la echilibru, în oricare dintre punctele suprafeței microcanonice (suprafața de energie constantă din spațiul fazelor). Pentru un observator ideal, care ar avea finețea de a observa evoluția *microscopică* a moleculelor sistemului, volumul din spațiul fazelor rămâne constant, deci, teoretic, observatorul nu pierde informație în ceea ce priveşte evoluția sistemului.

În realitate însă, observatorul nu are acces la traiectorii, deci eterogenitatea inițială, exprimată prin localizarea relativ precisă a volumului care descrie starea sistemului în spațiul fazelor, tinde în mod *ireversibil*, prin continua ramificare în spațiul fazelor regiunii inițiale, spre *omogenitatea* care caracterizează starea de echilibru. Revenind la exemplul cu picătura, ceea ce poate percepe, în final, observatorul real, este doar culoarea omogenă a apei. În cursul acestui proces, entropia creşte:

$$\frac{dS_{Gibbs}}{dt} \geq 0. \tag{4.16}$$

Creşterea entropiei descrie, în interpretarea dată de Gibbs, degradarea informației la care un observator real are acces: cu cât sistemul este mai aproape de starea de echilibru, cu atât mai „grosieră" este cunoaşterea disponibilă, starea sistemului fiind tot mai greu de localizat în spațiul fazelor [135]. Ireversibilitatea, este deci, potrivit interpretării Gibbs, o măsură a limitelor actului observației: „prin termenul de *ireversibil* înțelegem faptul că nu este posibil să se urmărească sau să se țină sub control traiectoria particulelor individuale ale sistemului şi cu atât mai puțin să se controleze toate detaliile relevante pentru mişcarea lor" [190].

4.5. Termodinamica de echilibru şi comportamentul sistemelor complexe

În funcție de constrângerile (condițiile la limită) la care este supus un sistem termodinamic, echilibrul acestuia este definit cu ajutorul unui *potențial termodinamic*, specific fiecărui tip de constrângere în parte [7].

Pentru un sistem izolat (care nu schimbă nici materie, nici energie cu exteriorul), în care energia internă U este constantă şi volumul V e, de asemenea, constant (neexistând lucru mecanic de expansiune), potențialul termodinamic este entropia:

$$dS_{sist.\ izolat} \geq 0\,, \tag{4.17}$$

maximul entropiei definind „starea de atracție", de echilibru, spre care tinde în mod spontan sistemul.

Dacă, de pildă, sistemul este închis (nu schimbă materie cu exteriorul), dar schimbă energie cu mediul exterior astfel încât temperatura T şi presiunea p sunt menținute constante, există relația :

$$dG_{T,p} \leq 0\,, \tag{4.18}$$

G fiind *potențialul Gibbs*, $G = U + pV - TS$. În acest caz, sistemul ajunge la echilibru când G atinge valoarea minimă.

În cazul în care schimbul de energie între sistemul închis şi mediu se desfăşoară astfel încât temperatura şi volumul acestuia nu se modifică în timp, se poate scrie:

$$dA_{T,V} \leq 0\,, \tag{4.19}$$

în care $A = U - TS$ se numeşte *energia liberă Helmholtz*, al cărei minim indică faptul că sistemul se află în starea de echilibru.

Se observă că, pentru fiecare dintre cele trei cazuri de mai sus, în care sistemele sunt închise, există o funcție al cărei extrem indică atingerea stării de echilibru. Evoluția sistemelor este, în aceste cazuri, complet previzibilă, punctul final fiind starea de echilibru, stare în care condițiile inițiale sunt „uitate", iar rezistența sistemului în fața perturbațiilor externe e maximă.

În viziunea lui Prigogine, deşi termodinamica de echilibru e utilă în analiza unor fenomene particulare din fizică şi chimie, tipul de ordine specifică acestei discipline nu caracterizează comportamentul *sistemelor vii, deschise*, a căror viață este datorată tocmai faptului că sunt *integrate în lume, prin schimbul continuu de materie, energie şi informație cu*

*mediul înconjurător***.** Structurile la echilibru pot dăinui oricât de mult, chiar izolate de orice contact cu exteriorul, fiind inerte, „lipsite de activitate microscopică la nivel global" [190].

Pentru a construi un model care să poată fi corelat cu complexitatea şi activitatea spontană, creativă, specifică lumii vii şi cu cea a *sistemelor mecatronice***,** va trebui să fie analizat tipul de organizare specifică *sistemelor termodinamice deschise, aflate la o oarecare distanță de echilibrul termodinamic*.

4.6. Producția de entropie în sistemele termodinamice deschise

Pentru un *sistem termodinamic deschis* (care schimbă atât materie cât şi energie cu mediul exterior), variația infinitezimală a entropiei totale a sistemului, dS, poate fi exprimată ca suma dintre variația entropiei, d_eS, datorată „fluxului" de entropie care există între sistem şi mediu (ca urmare a „deschiderii" sale), şi entropia, d_iS, produsă datorită modificărilor *ireversibile* provocate în interiorul sistemului ca urmare a schimburilor de materie şi energie dintre acesta şi mediu (figura 4.1) [176]:

$$dS = d_eS + d_iS\,. \tag{4.20}$$

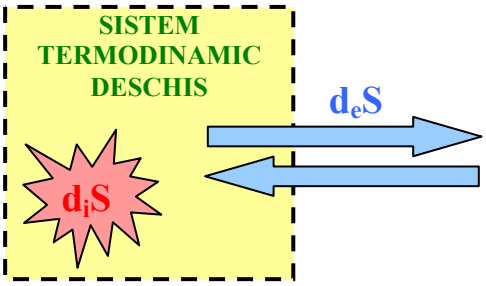


Figura 4.1. Schimbul de entropie dintre un sistem termodinamic deschis şi mediul exterior

Conform celui de-al doilea principiu al termodinamicii

$$d_iS \geq 0\,, \tag{4.21}$$

producția internă de entropie anulându-se doar în cazul proceselor cvasistatice (procese care se desfăşoară foarte lent, astfel încât sistemul poate fi considerat oricând în echilibru). Cum doar termenul d_iS poartă amprenta ireversibilității, numai acesta ilustrează existența „săgeții timpului". Pentru a evidenția potențialul creativ al ireversibilității, vor fi analizate stările stabile pe care le pot atinge sistemele termodinamice care *nu* se găsesc în starea de echilibru.

Prigogine a demonstrat, pornind de la ipoteza „echilibrului local" [188], faptul că, şi în afara echilibrului, entropia depinde doar de câteva variabile. În acest caz, funcția $P = dS_i / dt$, numită *producția de entropie,* poate fi scrisă sub forma:

$$P = \frac{dS_i}{dt} = \int_V \sigma\, dV\,, \tag{4.22}$$

în care σ este producția locală de entropie pe unitatea de volum în unitatea de timp, iar *V*, volumul spațial, real, al sistemului. Expresia entropiei totale a sistemului, în care apare entropia unității de masă s (entropia specifică), este

$$S = \int_V \rho s \, dV \,, \tag{4.23}$$

iar variația entropiei în unitatea de timp datorită schimbului cu exteriorul poate fi exprimată în funcție de fluxurile de entropie din fiecare punct al sistemului astfel:

$$\frac{dS_e}{dt} = -\oint_A \vec{J}_s \, d\vec{A} \,, \tag{4.24}$$

unde *A* este suprafața exterioară închisă care delimitează fizic volumul *V* al sistemului de mediul exterior.

Folosind ecuația (4.23) şi aplicând teorema lui Gauss, se obține [221], în final, ecuația locală care exprimă bilanțul de entropie, ecuație care, în termodinamica proceselor ireversibile, joacă rolul principiului II din termodinamica clasică**:**

$$\frac{\partial(\rho s)}{\partial t} = -\nabla \vec{J}_s + \sigma \,. \tag{4.25}$$

La originea producerii proceselor ireversibile se află *forțele generalizate*, notate cu X_i, cum ar fi, de pildă, gradientul de temperatură (în cazul conducției căldurii), afinitatea (în cazul reacțiilor chimice), gradientul de concentrație (în cazul difuziei materiei) etc. Forțele generalizate dau naştere *fluxurilor generalizate*, J_i (conducția, reacția chimică, difuzia etc). Producția locală de entropie datorată proceselor ireversibile este rezultatul contribuțiilor tuturor produselor dintre fluxuri şi forțe, specifice acestor procese:

$$\sigma = \sum_i J_i X_i \,. \tag{4.26}$$

4.7. Comportamentul sistemelor termodinamice deschise aflate aproape-de-echilibru

În starea de echilibru termodinamic, fluxurile şi forțele sunt, simultan, nule. [176]. Dacă, însă, sistemul se află aproape de echilibru, unde forțele termodinamice sunt relativ slabe, între fluxuri şi forțe există o dependență liniară:

$$J_i = \sum_k L_{ik} X_k \,. \tag{4.27}$$

În acest caz, producția locală de entropie respectă relația:

$$\sigma = \sum_{i,k} L_{ik} X_k X_i \,. \tag{4.28}$$

Coeficienții L_{ik} se numesc *coeficienți fenomenologici*, nu depind de fluxuri şi forțe şi pot constitui elementele unei matrici. Expresia de mai sus reflectă *caracterul ireversibil al producției interne de entropie*, această producție fiind nulă doar la echilibru.

Primele relații importante în termodinamica *liniară* de non-echilibru au fost descoperite, în 1931, de către Onsager [178]. Potrivit acestor relații, cunoscute sub numele de *relații de reciprocitate*, matricea coeficienților fenomenologici este simetrică, adică:

$$L_{ik} = L_{ki}\,. \tag{4.29}$$

Prigogine subliniază importanța covârşitoare a relațiilor lui Onsager care, prin generalitatea lor, au generat „un punct de cotitură în istoria termodinamicii" [191]. De atunci înainte, termodinamica de non-echilibru a fost privită ca un domeniu „a cărui fertilitate se poate compara cu cea a termodinamicii de echilibru" [190].

Rămânând în zona sistemelor aproape-de-echilibru sau, altfel spus, a termodinamicii *liniare de non-echilibru*, după formularea relațiilor lui Onsager exista întrebarea dacă poate fi găsită vreo funcție a cărei valoare extremă să indice atingerea de către sistem a unei *stări staționare*. Funcția ar trebui să fie una similară potențialelor termodinamice pentru sistemele închise din termodinamica clasică (entropia, energia liberă Helmholtz, potențialul Gibbs) ale căror valori extreme indică, aşa cum arată relațiile (4.17)-(4.19), în funcție de condițiile la limită ale sistemului, atingerea stării de echilibru.

Prigogine a demonstrat că, *în domeniul termodinamicii liniare de non-echilibru, orice sistem evoluează către o stare staționară, caracterizată de minimul producției de entropie*:

$$\frac{\partial P}{\partial t} \le 0\,. \tag{4.30}$$

Afirmația de mai sus este cunoscută sub numele de *teorema producției minime de entropie* [188]. *Starea staționară* către care evoluează sistemul este, în general, o stare de *non-echilibru* pentru că pot exista procese disipative cu viteze nenule [190]. În schimb, în starea staționară, toate derivatele locale ale mărimilor de stare sunt nule sau, altfel spus, *parametrii de stare ai sistemului devin independenți de timp*. În particular, entropia unui sistem aflat în stare staționară nu depinde de timp, iar producția internă de entropie este minimă (derivata ei în raport cu timpul se anulează), adică:

$$dS_{stare\ \ stationara} = 0\,, \tag{4.31}$$

$$\frac{\partial P_{stare\ \ stationara}}{\partial t} = 0\,. \tag{4.32}$$

Din (4.20), (4.21) şi (4.30) rezultă că în starea staționară e obligatoriu ca termenul $d_e S$ să fie negativ, întrucât $d_i S$ trebuie să fie strict pozitiv, pentru că există o producție *nenulă*, ireversibilă, de entropie în interiorul sistemului. Deci:

$$d_e S_{stare\ \ stationara} < 0\,. \tag{4.33}$$

Relația de mai sus arată că un sistem aflat într-o stare staționară transferă entropie mediului exterior, deci contribuie la continua creştere a entropiei mediului. Relația (4.30) indică faptul că *starea staționară este stabilă în raport cu perturbațiile locale* [221], adică, odată atinsă valoarea minimă a producției de entropie în starea staționară, sistemul nu mai poate părăsi acestă stare[56].

Stabilitatea echilibrului termodinamic, respectiv a stării staționare aflate în *apropierea echilibrului*, în raport cu perturbațiile locale este asigurată de existența, în aceste două cazuri, a unei funcții care îndeplineşte condițiile cerute de teorema lui Liapunov [151]. Glansdorff şi Prigogine [91] au demonstrat că, pentru sistemele aflate în apropierea stării de echilibru (regiunea liniară), oricare ar fi condițiile la limită, $\delta^2 S$ este o funcție Liapunov, adică îndeplineşte cele două condiții matematice care asigură stabilitatea sistemului prin *amortizarea perturbațiilor* datorate uşoarei îndepărtări a sistemului din starea de echilibru sau din starea staționară:

$$\delta^2 S < 0 \text{ (condiția } \textit{necesară} \text{ a stabilității);} \tag{4.34}$$

$$\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial t}\delta^2 S > 0 \text{ (condiția } \textit{suficientă} \text{ a stabilității).} \tag{4.35}$$

Concluzionând, în viziunea lui Prigogine, atât în termodinamica de echilibru cât şi în termodinamica liniară (în care sistemele sunt aproape-de-echilibru), sistemul va ajunge, *oricare ar fi fost condițiile inițiale*, după un timp suficient de lung, într-o stare care este determinată doar de condițiile la limită, iar modul cum reacționează sistemul la modificarea condițiilor la limită este în întregime *previzibil* [190].

Aşadar, alături de evoluția sistemelor închise care tind spre echilibru (stare în care producția de entropie e nulă), nici evoluția sistemelor deschise aflate în apropierea echilibrului (descrisă de relațiile termodinamicii liniare) – deşi acestea din urmă ajung, în final, într-o stare staționară caracterizată de o producție nenulă de entropie – nu se dovedeşte a fi similară cu comportamentul complex al sistemelor vii, capabile de autoorganizare**.**

4.8. Echilibrul homeostatic în lumea vie şi în mecatronică

4.8.1. Staționaritate şi homeostază

Potrivit definiției lui Heylighen, pentru ca un sistem să fie *organizat*, acesta trebuie să posede o *structură* care, la rândul ei, trebuie să aibă o *funcție* [118]. Structura există atât ca urmare a distincțiilor, diferențierilor prin care se delimitează şi, totodată, se definesc identitățile entităților elementare care intră în componența sistemului, cât şi ca urmare a conexiunilor, corelațiilor care se stabilesc între aceste entități, corelații care dau măsura puterii de integrare a sistemului. Faptul că sistemul are o funcție, înseamnă că structura acestuia are o rațiune de a exista, un scop [118]. În sistemele care se autoorganizează, aflate în afara echilibrului, procesele care au loc la nivel microscopic dau naştere, spontan, unor structuri care se manifestă la nivel global în sistem [266].

[56] După Prigogine [190], avem de-a face cu un soi de „inerție", care se manifestă prin faptul că, sistemul fiind împiedicat, prin condițiile la limită, să atingă starea de echilibru, acesta se îndreaptă spre un *next best*: starea în care producția de entropie e cea mai mică posibilă, compatibilă cu fluxurile schimbate cu exteriorul.

Previzibilitatea, „uitarea condițiilor inițiale", specifice sistemelor termodinamicii de echilibru şi celor ale termodinamicii liniare, nu permit manifestări spontane, schimbări bruşte de direcție care să poată favoriza apariția unor forme de autoorganizare, de complexitate sporită. Sistemele deschise (şi cele închise, dar nu izolate) a căror evoluție se desfăşoară în regiunea liniară, deci aproape de echilibrul termodinamic, tind, după cum s-a evidențiat, spre atingerea unei stări staționare *rezistente la perturbații*, rezistență garantată de existența unui potențial[57], producția de entropie P, care ajunge la valoarea minimă în starea staționară, şi care respectă relațiile de stabilitate (4.34) şi (4.35). Deşi starea staționară nu coincide cu starea de echilibru termodinamic, ea apare ca fiind statică pentru un observator, în ciuda faptului că există intrări şi ieşiri datorate schimbului de materie dintre sistem şi mediu [144]. Starea staționară a sistemelor deschise aflate în regiunea liniară este datorată echilibrului dinamic existent între fluxurile de intrare şi cele de ieşire, adică un „pseudo-echilibru dinamic" [167]. Menținerea echilibrului dinamic, al stării staționare, proprie sistemelor deschise, este esențială pentru supraviețuirea sistemelor din lumea vie; un organism matur poate fi privit ca un sistem deschis care îşi poate păstra, o perioadă relativ lungă de timp, neschimbate valorile unor parametri fiziologici (temperatura corpului, presiunea sanguină etc.) prin schimbul continuu de materie, energie şi informație între sistem şi mediul exterior. Cu alte cuvinte, schimbările din mediul exterior pot declanşa, în interiorul organismului, procese de autoreglare, cu scopul de a conserva starea staționară, de *echilibru homeostatic* [222], [253].

Homeostaza (*homeostasis*), termen introdus de către fiziologul W.B. Cannon în 1932 [43] este proprietatea unui oganism viu de reacționa la perturbațiile apărute în mediul exterior, cu scopul de a-şi menține structura şi funcțiile. După Cannon, funcționalitatea corpului uman este o consecință a „dorinței" fiecărui circuit de control de a rămâne într-o stare staționară, stare în care parametrii esențiali ai organismului îşi păstrează valoarea constantă în timp [60]. Echilibrul homeostatic e consecința acțiunii sinergice a trei componente: receptorul, integratorul şi efectorul (figura 4.2).

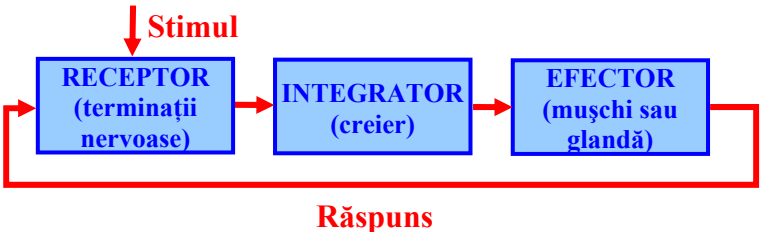


Figura 4.2. Echilibrul homeostatic al unui organism este asigurat prin mecanismul de feed-back negativ

De pildă, informația adusă de un stimul (mecanic) oarecare este recepționată de terminațiile nervoase ale pielii, după care este transmisă mai departe, la creier; decizia creierului ajunge în final la efector, care execută mişcarea comandată de creier. Această mişcare, care reprezintă răspunsul sistemului la stimul, e trimsă înapoi la receptor, prin mecanismul de *feed-back negativ*, pentru a contracara efectul stimulului. Generalizând, echilibrul homeostatic al unui sistem deschis (în particular al unui sistem mecatronic), este consecința mecanismului de *feed-back negativ* [18], prin care sistemul tinde să neutralizeze efectul perturbațiilor cu efect destabilizator, astfel că starea către care tinde sistemul este una caracterizată în ansamblu de *staționaritate*. Similitudinile dintre reglarea prin feed-back

[57] După cum afirmă Prigogine, „ori de câte ori se poate defini un potențial, descriem o *lume stabilă* în care sistemele urmează o evoluție ce le conduce spre o situație statică definitivă" [190].

negativ a unui sistem mecatronic şi a unui organism viu, poate fi observată comparând figura 4.2 cu figura 4.3.

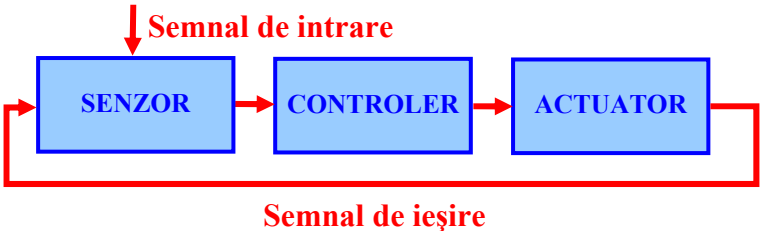


Figura 4.3. Echilibrul homeostatic al unui sistem mecatronic, consecință a mecanismului de feed-back negativ

În esență, reglarea unui sistem deschis prin mecanismul de feed-back negativ constă în faptul că, atunci când se doreşte ca o mişcare să urmeze un anumit pattern, diferența dintre acest pattern şi mişcarea executată e folosită ca un nou semnal de intrare care contribuie la diminuarea ulterioară a diferenței dintre mişcare şi pattern [228].

4.8.2. Asigurarea echilibrului homeostatic al organismului uman prin mecanisme de feed-back negativ

Organismul uman dispune de mecanisme de feed-back extrem de complexe. De pildă, controlul tensiunii arteriale este unul în care, între centrul de comandă din bulb (sistemul reglator) şi tensiunea arterială (elementul care trebuie reglat) intervin o serie de elemente de execuție şi de traductori (figura 4.4) [193].

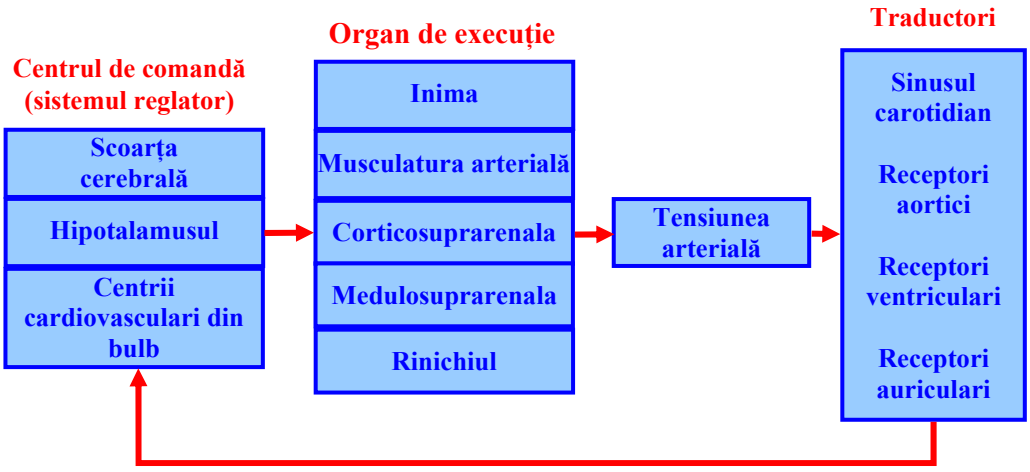


Figura 4.4. Mecanismul de reglare a tensiunii arteriale prin feed-back negativ

Elementele componente ale organului de execuție influențează direct sau indirect tensiunea arterială astfel: inima, prin variații de debit sanguin; corticosuprarenala, prin secreția mineralcorticoizilor, care influențează volumul sanguin şi rinichii (retenția sodiului); medulosuprarenala, care secretă adrenalină, conducând astfel la creşterea frecvenței cardiace, a presiunii sanguine şi la contracția musculaturii arteriale; rinichiul, atât prin secreția de renină (care facilitează apariția angiotensinei, cu rol vasoconstrictor) cât şi prin variațiile cantității de lichide eliminate, care au efect asupra volumului sanguin.

Receptorii din aortă, din ventricule, din atriu şi din sinusul carotidian îndeplinesc funcţii specifice traductorilor, prin faptul că sesizează variaţiile de tensiune pe care le trimit centrului de comandă din bulb.

Reglarea glicemiei este un alt proces care are loc cu ajutorul unei serii de mecanisme de feed-back negativ [162], [193] (figura 4.5).

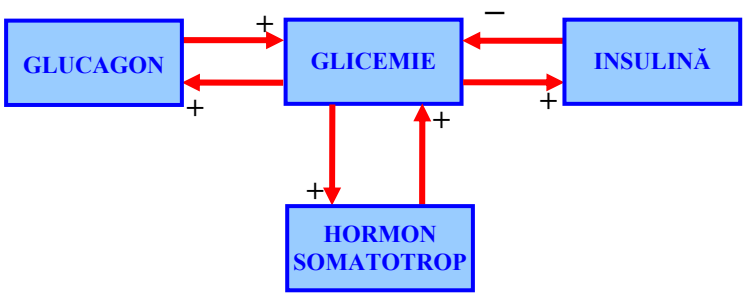


Figura 4.5. Mecanismul de control al glicemiei

Creşterea glicemiei în sânge (în urma ingerării unor alimente cu conţinut ridicat de glucoză) stimulează pancreasul să secrete insulină. Insulina determină celulele din ficat, muşchii şi ţesuturile adipoase să extragă glucoză din sânge (pentru a o depozita în ficat şi în muşchi), ceea ce înseamnă că secreţia de insulină conduce la scăderea glicemiei. Scăderea glicemiei are un dublu efect. Pe de-o parte stimulează secreţia de glucagon (GH), un hormon care determină ficatul să transforme glicogenul în glucoză şi s-o elibereze în sânge, deci glicemia creşte din nou. Pe de altă parte, hipoglicemia are efect şi asupra lobului anterior al hipofizei, care eliberează hormonul somatotrop (STH), acest hormon stimulând, la rândul său, creşterea glicemiei.

Echilibrul homeostatic nu caracterizează doar autoreglarea sistemelor din lumea vie, ci, după cum se va evidenţia în continuare, e strâns legat şi de stabilitatea sistemelor mecatronice.

4.8.3. Rolul feed-back-ului negativ în asigurarea echilibrului homeostatic al sistemelor mecatronice

Mecanismul de feed-back negativ apare în teoria sistemelor mecatronice sub forma controlului în buclă închisă (*close-loop*), ilustrat în figura 4.6, prin intermediul căruia perturbaţiile pot fi corectate datorită influenţei pe care o are semnalul de ieşire asupra celui de intrare [28] [162] [228].

Semnalul care se întoarce la intrare (feed-back), a cărui transformată Laplace e notată cu $B(s)$, este negativ, iar semnalul de intrare, cu transformata Laplace $Y(s)$, este pozitiv. Funcţia de transfer a sistemului este:

$$G(s)=\frac{X(s)}{Y(s)}. \tag{4.36}$$

Considerând că $G_S(s)$ e funcţia de transfer a senzorului, iar $E(s)$ e transformata Fourier a semnalului de eroare, se poate scrie, succesiv [47]:

$$E(s)=Y(s)-B(s)=Y(s)-G_S(s)X(s); \tag{4.37}$$

$$C(s) = G_C(s)E(s). \tag{4.38}$$

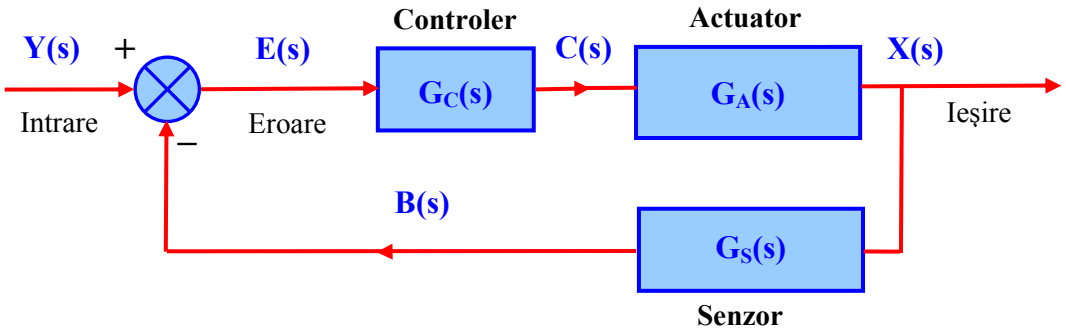


Figura 4.6. Controlul în buclă închisă a unui sistem mecatronic

Controlerul are la intrare semnalul $E(s)$, iar la ieşire $C(s)$, prin urmare:

$$\mathrm{G_A}(s) = \frac{\mathrm{X}(s)}{G_C(s)\cdot[Y(s) - G_S(s)X(s)]}. \tag{4.39}$$

Rearanjând relația de mai sus, se obține funcția de transfer echivalentă a sistemului:

$$\frac{X(s)}{Y(s)} = \frac{G_C(s)G_A(s)}{1 + G_C(s)G_A(s)G_S(s)} = G_F(s). \tag{4.40}$$

Pentru a compara sensibilitatea sistemului de mai sus la variația *parametrilor interni* cu sensibilitatea unui sistem în buclă deschisă care, în lipsa senzorului, ar avea o funcție de transfer echivalentă $G(s) = G_C(s)G_A(s)$, se va considera o variație a acestei din urmă funcții, $\Delta G(s)$. Efectuând calculele, se obține:

$$X(s) = [G(s) + \Delta G(s)]\cdot Y(s), \tag{4.41}$$

pentru sistemul în buclă deschisă, respectiv

$$X(s) = \frac{G(s) + \Delta G(s)}{1 + G(s)G_S(s) + G_S(s)\Delta G(s)}\cdot Y(s), \tag{4.42}$$

în cazul sistemului în buclă închisă.

Se observă că, în timp ce variația răspunsului $X(s)$ este, pentru sistemul în buclă deschisă

$$\Delta X_{bd} = \Delta G(s)Y(s), \tag{4.43}$$

pentru cel controlat prin feed-back negativ va fi :

$$\Delta X_F = \frac{\Delta G(s)}{[1 + G_S(s)G(s)]\cdot[1 + G_S(s)G(s) + G_S\Delta G(s)]}Y(s). \tag{4.44}$$

Comparând ultimele două relații, se observă faptul că $\Delta X_F << \Delta X_{bd}$, adică *sistemul controlat prin feed-back negativ este mult mai puțin sensibil decât cel în buclă deschisă la variația parametrilor interni***.**

În continuare, se consideră un sistem în buclă deschisă (fig.4.7.a) şi unul în buclă închisă (fig.4.7.b), având aceeaşi funcție de transfer $G(s)$, supuse unei *perturbații externe*, semnalul perturbator având transformata Laplace $D(s)$ [47].

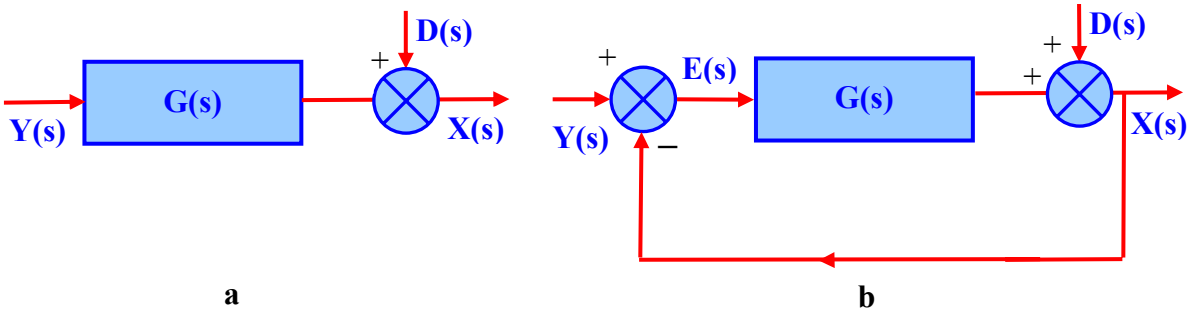


Figura 4.7. Un sistem mecatronic în buclă deschisă (a) şi unul în buclă închisă (b) care sunt supuse unei perturbații externe

Relația dintre funcția de intrare şi cea de ieşire în cazul sistemului care funcționează în buclă deschisă este:

$$X_{bd}(s) = G(s)Y(s) + D(s). \tag{4.45}$$

Pentru cazul ilustrat în Fig. b), al sistemului care funcționează în buclă închisă, se obține:

$$X_f(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)}Y(s) + \frac{1}{1+G(s)}D(s). \tag{4.46}$$

Comparând funcțiile de ieşire ale celor două sisteme, se observă că *sistemul controlat prin feed-back negativ este mult mai puțin sensibil decât cel în buclă deschisă la variația parametrilor externi*, deci mai stabil decât acesta din urmă.

Prin urmare, şi în cazul sistemele mecatronice, se confirmă faptul că *feed-back-ul negativ joacă rolul principal în menținerea echilibrului homeostatic al unui sistem*, prin atenuarea perturbațiilor care tind să scoată sistemul din starea staționară. *Comportamentul homeostatic este, deci, un mecanism de autoreglare care permite sistemului să-şi mențină funcționalitatea în ciuda perturbațiilor*. Conceptul cibernetic de sistem capabil de autoreglare are însă limitele lui.

4.8.4. Limitele echilibrului homeostatic în mecatronică

O primă problemă ar fi dacă sistemul poate atenua prin feed-back negativ perturbațiile semnificative, radicale. Un sistem care ar fi capabil să se adapteze, reconfigurându-se chiar

când este supus la schimbări radicale, a fost numit de către Ashby *sistem ultrastabil* [58][6]. În urma simulării propuse de către Di Paolo a unui homeostat de tip Ashby [65], acesta subliniază limitările impuse unui astfel de sistem de schimbările stochastice care influențează funcția de transfer şi care pot împiedica sistemul să adopte corecțiile în timp util. Mai mult, extinzând conceptul de echilibru homeostatic la sistemele deschise mai complexe, cum ar fi organismul uman, sau chiar organizațiile formate din mai mulți indivizi, acestea pot rămâne în starea staționară, conservându-şi existența prin menținerea echilibrului dinamic [81] doar un interval limitat de timp, după care decad şi se sting.

O a doua problemă a adaptabilității prin feed-back negativ este faptul că *finalitatea este autoconservarea comportamentului inițial al sistemului*. Cu alte cuvinte, echilibrul homeostatic are un caracter în esență pasiv, fiind *incapabil de a folosi perturbațiile pentru a genera noi structuri*. Altfel spus, proprietățile emergente, specifice sistemelor capabile de autoorganizare nu pot fi generate de mecanismul feed-back-ului negativ. E semnificativ faptul că, în aceeaşi perioadă cu cercetările lui Ashby, studiile lui Föster asupra autoorganizării ca fenomen antientropic conduceau la ideea potrivit căreia ordinea putea să fie generată de perturbații aleatorii [82].

În ciuda încercărilor de a introduce *principiul homeostatic în robotică* [65], nu există multe aplicații practice ale acestuia [60]. Motivul e acela că, deşi principiul homeostatic e extrem de util în obținerea stabilității sistemelor (în particular a comportamentului roboților) prin atenuarea perturbațiilor, el este insuficient pentru asigurarea apariției autoorganizării la nivelul sistemului [114], [160].

Concluzia este aceea că *echilibrul homeostatic este similar, din punctul de vedere al relației acestuia cu autoorganizarea, cu starea staționară a sistemelor termodinamice deschise situate în regiunea liniară*, adică aproape-de-echilibru în descrierea lui Prigogine. Pentru a descrie comportamentul sistemelor de complexitate sporită, comportament care poate conduce la apariția unor noi pattern-uri organizaționale, e necesar să se analizeze perspectiva lui Prigogine asupra evoluției sistemelor termodinamice aflate *departe-de-echilibru*.

4.9. Autoorganizarea sistemelor deschise aflate departe-de-echilibru

4.9.1. Instabilitatea sistemelor termodinamice deschise din regiunea neliniară

Întrebarea fundamentală de la care a pornit Prigogine este dacă relațiile de stabilitate (4.34) şi (4.35) pot fi extrapolate şi pentru sistemele aflate *departe-de-echilibru* [191] sau, altfel spus, dacă $\delta^2 S$ (abatere măsurată acum față de o stare de *non-echilibru*) poate juca, din punct de vedere macroscopic, rol de funcție Liapunov şi pentru deviații mai mari de la echilibrul termodinamic, *unde relațiile dintre fluxuri şi forțe sunt neliniare***,** regiune unde relația (4.27) nu mai e valabilă.

În urma calculelor se dovedeşte că, dacă inecuația (4.34) e valabilă şi în regiunea neliniară, nu acelaşi lucru putem spune şi despre (4.35). Derivata în raport cu timpul a funcției $\delta^2 S$ respectă relația:

[58] Sistemul ar trebui să dispună de două mecanisme de feed-back negativ: unul primar, între sistemul senzorimotor şi mediul înconjurător şi unul secundar, intermitent, între variabilele esențiale ale sistemului (ale căror valori trebuie menținute între limite care să nu permită abateri ale sistemului de la comportamentul dorit) şi sistemul senzorimotor.

$$\frac{1}{2}\frac{\partial}{\partial t}\delta^2 S = \sum \delta J_i \delta X_i . \tag{4.47}$$

Cantitatea din partea dreaptă a ecuației de mai sus, reprezintă *producția excesului de entropie*, datorată deviațiilor δJ_i şi δX_i ale fluxurilor J_i, respectiv forțelor X_i, din starea staționară, stare a cărei stabilitate o testăm prin generarea perturbației $\delta^2 S$.

Semnul producției excesului de entropie este pozitiv întotdeauna în cazul regimului liniar, adică în cazul sistemelor aproape de echilibru; se ajunge, deci, din nou la concluzia teoremei producției minime de entropie, care garantează stabilitatea stărilor sistemelor aflate în apropierea echilibrului. Pentru regiunea neliniară însă semnul părții din dreapta a ecuației (4.47) nu poate fi precizat, deci sistemul poate deveni instabil.

Apare, astfel, o diferență esențială între legile din preajma echilibrului şi legile caracteristice sistemelor aflate departe-de-echilibru: în timp ce legile echilibrului sunt universale, cele ale sistemelor din regiunea neliniară sunt specifice fiecărui sistem în parte [176].

4.9.2. Rolul feed-back-ului pozitiv în reacțiile chimice autocatalitice

Pentru Prigogine, comportamentul sistemelor chimice constituie prototipul evoluției ireversibile a sistemelor deschise. În particular, sunt studiate reacțiile chimice în care apar *bucle catalitice*, adică un produs de reacție este implicat în propria sa sinteză: prezența produsului stimulează generarea suplimentară a acestuia, ceea ce sporeşte cantitatea produsului, fapt care conduce la creşterea ratei de generare a lui etc.

Ecuația tipică a reacției unui proces chimic autocatalitic în care molecula X catalizează transformarea moleculei A în molecula X este [190]:

$$A + 2X \rightarrow 3X . \tag{4.48}$$

Procesul descris poate fi ilustrat simbolic ca în figura 4.8, autocataliza jucând rolul de *feed-back pozitiv* (conexiune inversă pozitivă):

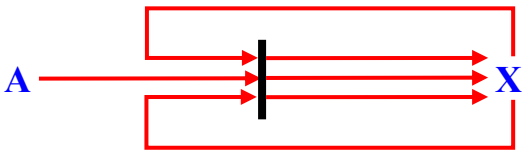


Figura 4.8. Reprezentarea simbolică a unei reacții chimice în care apar bucle catalitice

Ecuațiile diferențiale care descriu cinetica reacțiilor chimice în care apar bucle catalitice sunt neliniare, acest fapt având un rol important în descrierea sistemului chimic în regiunea „departe de echilibru”.

Un caz particular mai simplu de reacție chimică autocatalitică este reacția descrisă de mecanismul Lotka-Voltera [7], care se desfăşoară în trei etape: $A + X \rightarrow 2X$, $X + Y \rightarrow 2Y$, respectiv $Y \rightarrow B$. Se observă ce primele două etape sunt autocatalitice.

4.9.3. Structurile disipative ca efect al autoorganizării sistemelor chimice aflate departe-de-echilibru

Sistemul chimic numit *Brusselator*, studiat de către grupul lui Prigogine, [190], este unul în care apare mecanismul de *cataliză încrucişată*: prezența unui produs X stimulează creşterea cantității unui alt produs Y, produsul Y fiind, la rândul său, un stimulent pentru sinteza primului produs X. În modelul Brusselator mai apar reactanții A, B şi produşii de reacție C, D. Setul de reacții este următorul: $A \to X$; $2X + Y \to 3X$; $B + X \to Y + C$; $X \to D$. Ecuația cinetică a celei de-a doua reacții a modelului este *neliniară*, viteza de variație a concentrației lui X depinzând de pătratul concentrației sale:

$$\frac{d[X]}{dt} = k[X]^2[Y]. \tag{4.49}$$

Sistemul e situat, deci, în *regiunea neliniară*, zonă în care acesta se află suficient de departe de echilibru pentru a putea deveni instabil. Modelul poate fi reprezentat sugestiv ca în figura 4.9.

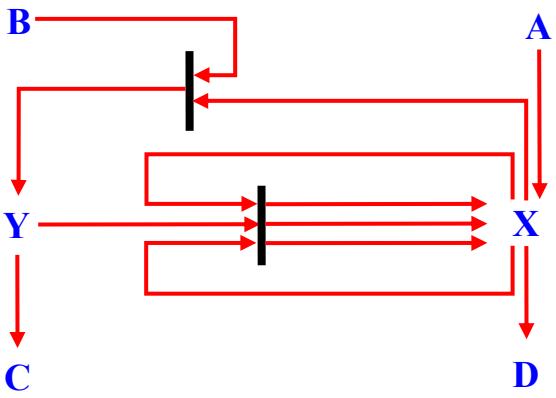


Figura 4.9. Reprezentarea modelului Brusselator studiat de grupul lui Prigogine

Concentrațiile substanțelor A, B, C, D sunt parametri dați, adică reprezintă substanțe de control. Modificând progresiv unul dintre parametrii de control ai reacției, în speță, concentrația uneia dintre substanțele care nu sunt implicate *direct* în cataliza încrucişată (de pildă B), sistemul trece, pe măsură ce se îndepărtează de echilibru, printr-o succesiune de stări staționare *stabile*. Când însă parametrul de control depăşeşte o valoare critică, sistemul e suficient de departe de echilibru pentru a permite apariția unor fenomene noi: starea staționară nu mai e stabilă, iar concentrațiile celor doi produşi (X şi Y), implicați direct în cataliza încrucişată încep să oscileze cu o *perioadă bine determinată*, a cărei valoare depinde de specificul reacțiilor (mai exact, constantele cinetice ale vitezelor de reacție) şi de condițiile la limită impuse sistemului.

Se constată deci că, deşi sistemul nu se găseşte într-o stare staționară stabilă, *comportamentul periodic al sistemului este stabil*, funcționând ca un *ceas chimic* cu un ritm specific fiecărui tip de reacție în parte. Se poate vorbi deci de *apariția unei ordini globale, la nivel macroscopic, numită structură disipativă*. Indiferent de concentrațiile inițiale ale lui X şi Y, sistemul trece prin aceleaşi variații periodice ale concentrației, traiectoria comună închisă (reprezentată în sistemul de coordonate X, Y) către care migrează sistemul fiind numită *ciclu*

limită [7], [190]. Datorită faptului că ciclul limită pare să „atragă" traiectoriile sistemului, acesta a fost denumit de către matematicieni *atractor* (figura 4.10).

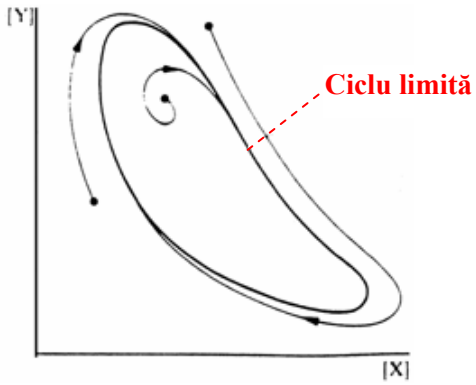


Figura 4.10. Ciclul limită (atractorul) reprezintă traiectoria închisă către care tind unele reacții autocatalitice (preluat din [7])

Structurile disipative sunt un efect al *autoorganizării* sistemului chimic deschis aflat departe de echilibru; *sistemul se comportă ca un întreg, ca şi cum toate moleculele reuşesc să comunice între ele*.

4.9.4. Reacții oscilante în lanțul glicolitic

Oscilațiile chimice sunt, după cum am văzut, strâns legate de existența autocatalizei, care are rol de feed-back pozitiv. Reacțiile oscilante de acest fel sunt responsabile de multe funcții vitale ale organismelor, existând o serie de cazuri în care, la nivelul sistemelor biochimice, celula are rol de reactor chimic. De pildă, reacțiile oscilante sunt responsabile de menținerea ritmului cardiac [7]. Alt exemplu concludent este cel al glicolizei, un lanț de reacții metabolice prin care glucoza ($C_6H_{12}O_6$) se degradează, sintetizându-se molecula de ATP, care reprezintă o sursă esențială de energie a oricărei celule vii [240]:

$$C_6H_{12}O_6 + 2NAD^+ + 2ADP + 2P_i \rightarrow 2C_3H_3O_3^- + 2NADH + 2H^+ + 2ATP + 2H_2O\,.$$

Se observă că fiecare moleculă de glucoză conduce, în urma degradării acesteia, la formarea a două molecule de ATP. Pe de altă parte, molecula de ATP este implicată activ în catalizarea enzimatică a reacțiilor lanțului glicolitic, deci participă la propria sa sinteză. Această catalizare enzimatică e prezentă, de plidă, în cea de-a treia etapă din faza preparatorie a lanțului glicolitic [240] (figura 4.11) .

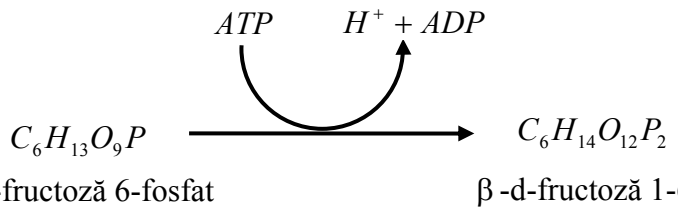


Figura 4.11. Reacția celei de-a treia etape din faza preparatorie a lanțului glicolitic

Reacția e catalizată de enzima PFK-1 (fosfofructokinaza) şi utilizează energia furnizată de molecula ATP. Tot în reacția prezentată, se pare că *feed-back-ul pozitiv* al moleculei de ADP exercitat asupra enzimei PFK-1 este responsabil de apariția oscilațiilor glicilotice [141]. Existența *oscilațiilor temporale* a concentrațiilor substanțelor implicate în lanțul glicolitic [111], [112], [113] este similară comportamentului de ceas chimic al sistemelor termodinamice aflate în regiunea neliniară [190].

În concluzie, glicoliza reprezintă unul dintre cazurile care demonstrează fertilitatea abordării sistemelor biologice din punctul de vedere al termodinamicii sistemelor situate departe-de-echilibru [94].

4.9.5. Puncte de bifurcație, ruperi de simetrie şi multistabilitate

Dacă se include şi difuzia la reacțiile chimice ale Brusselator-ului se pot evidenția noi tipuri de instabilitate, datorită *micilor fluctuații* care produc diferențe de concentrație ale substanțelor prezente. Amplificarea fluctuațiilor în regiunea neliniară a sistemului conduce la apariția unor oscilații *dependente de timp şi spațiu* (nu doar de timp ca în cazul ceasurilor chimice descrise mai sus) ale concentrațiilor produşilor care participă direct la cataliza încrucişată. Aceste oscilații reprezintă *structuri spațio-temporale stabile*. În cazul în care aceste concentrații sunt semnificativ diferite una de alta, problema e studiată bi- sau tridimensional, iar substanțele de control sunt neuniform distribuite în spațiu, complexitatea sistemului e sporită, situație care favorizează creşterea numărului de structuri disipative compatibile cu specificul şi condițiile la limită ale sistemului.

Când sistemul se află la echilibru sau aproape-de-echilibru, există o unică stare finală pe care acesta o poate atinge, stare stabilă, dependentă de valorile parametrilor de control. Variind unul dintre parametrii de control (ceilalți fiind menținuți constanți), sistemul este împins tot mai departe de echilibru, până când, în momentul în care valoarea parametrului atinge *pragul critic*, sistemul ajunge într-un *punct de bifurcație*, dincolo de care sistemul poate accede la *mai multe stări staționare stabile* pentru aceeaşi valoare a parametrului de control.

În cazul modelului Brusselator, de exemplu (figura 4.12), pe măsură ce creşte concentrația reactantului B (notat cu λ în continuare), sistemul este împins tot mai departe de echilibru, până când ajunge la limita stabilității ramurii termodinamice a [190], moment în care parametrul de control $\lambda = [B]$ atinge valoarea critică λ_c.

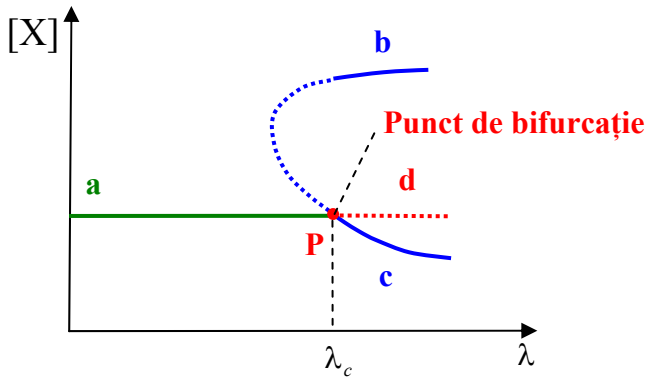


Figura 4.12. Diagrama de bifurcație pentru modelul Brusselator

Această limită reprezintă tocmai punctul de bifurcație P, dincolo de care sistemul, sensibil la fluctuații externe, poate „opta", prin ruperi de simetrie, pentru stări staționare diferite. Atfel, dacă $\lambda > \lambda_c$, sistemul se poate găsi în oricare dintre cele trei stări staționare, reprezentate de ramurile notate cu b, c, d. Stările staționare b şi c sunt stabile, în timp ce starea staționară d este instabilă.

Se evidențiază, astfel, una dintre caracteristicile esențiale specifice sistemelor (aflate departe-de-echilibru) capabile de autoorganizare: *multistabilitatea* (coexistența stărilor staționare stabile). Punctele de bifurcație sunt situate în vecinătatea unor regiuni instabile în care sistemul deschis aflat departe-de-echilibru alege, printr-o *rupere de simetrie* (*simetry-breaking*) *spațio-temporală*, [177] între multiplele sale evoluții viitoare posibile.

Generalizând, în preajma punctului de bifurcație sistemele situate departe-de-echilibru sunt extrem de sensibile la mici fluctuații externe. Această sensibilitate permite sistemelor să perceapă diferențe imposibil de sesizat în cazul sistemelor aflate la echilibru sau în apropierea acestuia. Fluctuația nu poate invada sistemul brusc, ci apare mai întâi fenomenul de *nucleație* [190]: fluctuația (amplificată progresiv prin feed-back-ul pozitiv) se stabileşte inițial într-o zonă limitată (nucleul) după care, dacă dimensiunea acestei zone depăşeşte valoarea critică, fluctuația se răspândeşte în tot sistemul. Astfel, procesul de autoorganizare a sistemelor are loc prin favorizarea întâmplătoare a unor efecte care, prin autocataliză, sunt amplificate, conducând spre atingerea unei structuri spațio-temporale stabile**.** În general, pot să existe mai multe bifurcații succesive, pe măsură ce valoarea parametrului de control creşte [189].

Ordinea, coerența, organizarea globală specifică sistemelor disipative, *sisteme care se comportă ca şi cum fiecare parte a sistemului ar fi informată despre starea de ansamblu a acestuia*, e o ordine datorată fluctuațiilor din mediul exterior: „departe-de-echilibru materia începe să-şi «perceapă» mediul, să distingă între micile diferențe care, în cazul echilibrului, ar fi nesemnificative. (...) Departe-de-echilibru sistemele «folosesc» diferențele mici din mediu pentru a produce structuri diferite. «Comunicarea» şi «perceperea» sunt cuvinte cheie pentru noul comportament al materiei departe-de-echilibru" [190].

Regiunea în care se situează sistemele care se comportă în modul descris mai sus este una neliniară: efectele nu sunt proporționale cu cauzele lor, ci *cauze minore pot genera efecte majore sau invers, cauze majore pot genera efecte minore* [118].

4.9.6. Agregarea amibelor acrasiale ca formă de manifestare a autoorganizării unui sistem biologic

Un exemplu foarte spectaculos de autoorganizare a unui sistem biologic este agregarea amibelor acrasiale celulare *Dictyostelium discoideum* [92], [277], [281] (figura 4.13). După ce ies din spori, amibele de dezvoltă şi se reproduc ca organisme unicelulare (figura 4.13.a) atâta timp cât hrana (formată din bacterii) există în cantități suficiente. În momentul în care bacteriile se răresc, amibele încetează să se înmulțească şi intră într-o etapă (care durează aproximativ 8 ore) la sfârşitul căreia acestea încep să se aglomereze, aparent spontan, în jurul unor celule cu rol de centre de agregare (figura 4.13.b).

Această agregare are un caracter periodic, existând valuri de amibe care se deplasează către centrul de agregare cu o perioadă de ordinul câtorva minute [190]. Mecanismul care stă în spatele acestei agregări se bazează pe faptul că una dintre celule începe să emită (ca răspuns la stres), periodic, semnale de cAMP (adenozină monofosfată ciclică). Alte amibe recepționează semnalul şi se deplasează către centrul de agregare, iar apoi emit alte semnale cAMP către marginea regiunii de agregare. Astfel, prin feed-back pozitiv (aglomerarea progresivă în jurul unui centru determină intensificarea semnalelor, ceea ce conduce la o mai

mare aglomerare etc.) fiecare centru poate controla aglomerarea a aproximativ 100 000 de amibe. După ce amibele recepționează semnalele cAMP, acestea devin capabile să sintetizeze semnale periodice similare, pe care le transmit altor celule [279].

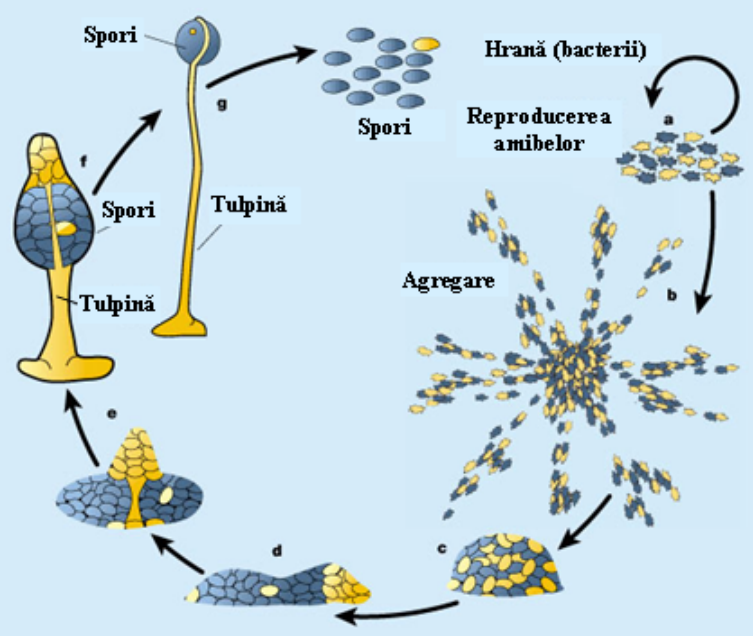


Figura 4.13. Agregarea periodică a amibelor *Dictyostelium discoideum*

Se cunoaşte faptul că moleculele cAMP din interiorul celulei inactivează receptorul care captează cAMP-ul din exterior, ceea ce conduce la un comportament oscilant al celulei, care va emite semnale cAMP în mod periodic. Gradientul de concentrație al cAMP-ului din mediu, apărut în urma acestui comportament este responsabil de mişcarea pulsatorie (de tip ceas chimic) de convergență a amibelor către centrul de atracție [190]. În simularea din figura 4.14 [275] pot fi observate „undele" în formă de spirală care apar ca urmare a gradientului de concentrație cAMP.

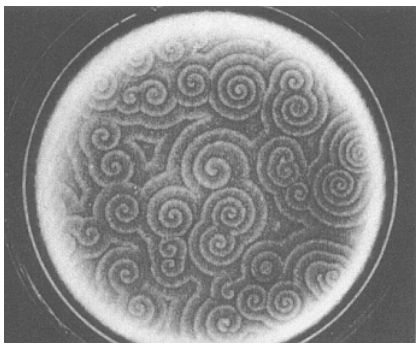


Figura 4.14. Pattern-ul specific agregării amibelor *Dictyostelium discoideum*. Regiunile întunecate corespund mişcării amibelor şi indică zonele cu valori ridicate ale concentrației semnalelor cAMP (preluat de la [275])

Sintetizarea cAMP în interiorul celulei se face în urma activării de către cAMP-ul din exteriorul acesteia a unui proces care conduce la transformarea ATP-ului intracelular în cAMP, care difuzează apoi în mediul extracelular. Prin urmare, reacția este una *autocatalitică*, cAMP-ul fiind implicat în propria sa sinteză. În continuare, în urma

aglomerării amibelor, se formează o masă compactă (pseudoplasmodium) (figura 4.13.c), care, ulterior, suferă diverse schimbări de formă (figura 4.13.d, e), până când apare o tulpină (figura 4.13.f, g) care susține, în vârf, o mulțime de spori. Aceşti spori pot forma, în condiții externe favorabile, o nouă colonie de amibe şi ciclul se reia.

Agregarea amibelor este un caz tipic de *autoorganizare datorată micilor fluctuații* (micile aglomerări incipiente) care sunt amplificate prin *feed-back pozitiv*, conducând la o *dublă rupere de simetrie*: una spațială (aglomerarea însăşi) şi una *temporală* (apariția oscilațiilor periodice de concentrație cAMP şi implicit a mişcării periodice de agregare a amibelor).

4.9.7. Celulele Bénard şi interdependența dintre nivelul microscopic şi cel macroscopic în urma autoorganizării

Unul dintre exemplele clasice din hidrodinamică în care se manifestă autoorganizarea spontană generată de instabilitatea unei stări staționare, este comportarea moleculelor dintr-un strat subțire, orizontal, de lichid (situat în câmp gravitațional constant), între fețele căruia există un gradient vertical de temperatură, fața inferioară a stratului fiind menținută la o temperatură superioară celei impuse statului superior. Datorită gradientului de temperatură, apare un flux de căldură de jos în sus, ca urmare a tendinței ascendente a lichidului mai cald din zona inferioară. Dacă gradientul de temperatură atinge o anumită valoare critică, starea staționară a lichidului, stare în care căldura se transmitea doar prin difuzie, devine brusc instabilă, producția de entropie fiind accelerată prin apariția convecției [214], care dinamizează transferul de căldură. Mişcarea de convecție care apare când gradientul de temperatură depăşeşte valoarea critică este rezultatul amplificării micilor fluctuații (reprezentate în acest caz de slabi curenți de convecție) care, sub valoarea critică a gradientului de temperatură, când sistemul se afla în starea staționară stabilă, erau amortizate până la extincție. Această mişcare de convecție care se manifestă la nivel *macroscopic*, conduce la apariția unei structuri spațiale complexe, lichidul autoorganizându-se, printr-o rupere spontană de simetrie, sub forma unor celule de formă hexagonală numite *celulele Bénard* [118]. [190], [191], o serie de vârtejuri paralele formate din fluxuri ascendente şi descendente de molecule (figura 4.15).

O consecință a existenței ordinii datorate fluctuațiilor mediului exterior unui sistem deschis, aflat departe-de-echilibru, este faptul că *separarea dintre nivelul microscopic şi cel macroscopic se dovedeşte a fi artficială, nefondată*, datorită influențelor reciproce dintre cele două niveluri: fluctuațiile la nivel *microscopic* pot genera structuri spațio-temporale stabile la nivel *macroscopic* (de pildă celulele de formă hexagonală Bénard), structuri macroscopice ce vor modifica, la rândul lor, mecanismele de la nivel microscopic (vârtejurile care formează celulele Bénard modifică mişcarea, inițial dezordonată, a moleculelor) etc.

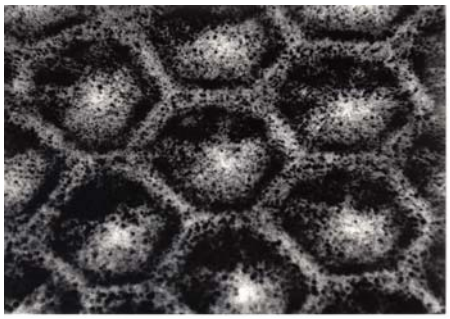


Figura 4.15. Celulele Bénard (preluat de la [270])

În continuare, caracteristicile autoorganizării care au fost evidențiate până acum vor fi corelate cu câteva noțiuni fundamentale din teoria sistemelor.

4.9.8. Noțiunea de „sistem deschis" în viziunea lui Bertalanffy. Informație şi negentropie

Necesitatea trecerii de la paradigma ştiințifică modelată de proprietățile specifice sistemelor închise la cea bazată pe *teoria sistemelor deschise* a fost sesizată de către Ludwig von Bertalanffy [23] ca fiind o consecință firească a complexității crescânde care caracterizează sistemele în general, dar mai ales pe cele ale lumii vii. Bertalanffy a evidențiat izomorfismul existent între structura sistemelor care aparțin unor domenii diferite: medicină, psihologie, fizică etc., fundamentând astfel *Teoria Generală a Sistemelor* (*GST-General System Theory*), o „disciplină a întregului", al cărei scop este formularea legilor specifice sistemelor în general. Pornind de la contradicția dintre tendința spre creşterea continuă a entropiei şi apariția sistemelor cu organizare complexă, Bertalanffy subliniază faptul că sistemele vii pot supraviețui doar datorită schimbului continuu de materie şi energie prin neîntrerupta interacțiune a lor cu mediul exterior. Fiecare sistem are limite, granițe, care-l delimitează de mediul exterior şi care, în acelaşi timp, îi definesc identitatea. *Sistemele complexe sunt deschise*, în sensul că există obligatoriu schimb de *materie* între acestea şi mediul exterior, existând totodată posibilitatea schimbului de *energie* şi *informație* cu exteriorul, în ambele sensuri (figura 4.16) [119], [265].

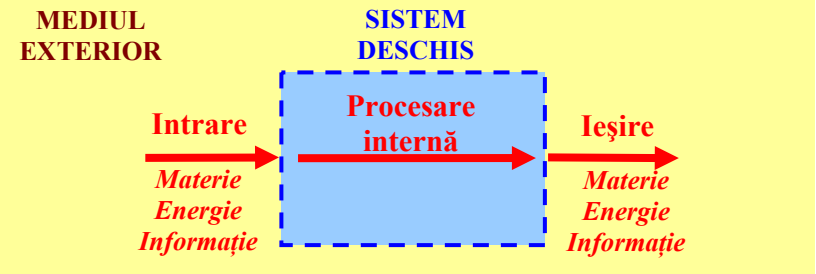


Figura 4.16. Reprezentarea simbolică a unui sistem deschis care, în cazul general, schimbă materie, energie şi informație cu mediul exterior

Informația este un concept complementar energiei în GST; prin importul de materie din exterior, entropia sistemului poate să scadă, ceea ce conduce la *creşterea complexității* acestuia, deci a cantității de informație „conținută" în sistem (în sensul că descrierea completă a sistemului devine mai elaborată, necesitând mai multă informație). Într-adevăr, dacă sistemul „importă" din mediul exterior o cantitate de entropie, $d_e S$, a cărei valoare, în modul, e mai mare decât modulul entropiei produse în interiorul sistemului, $d_i S$, se poate scrie:

$$d_e S < 0 \; ; \; |d_e S| > |d_i S| , \tag{4.50}$$

Utilizând relația 4.20, se observă că :

$$dS < 0 , \tag{4.51}$$

adică entropia totală a sistemului scade, deci gradul de organizare al acestuia creşte. Din perspectiva lui Schrödinger *negentropia (entropia negativă) este identificată cu informația*, crescând odată cu scăderea entropiei (sau, altfel spus, odată cu creşterea organizării).

4.9.9. Complexitate, emergență şi autoorganizare

Granițele unui sistem deschis sunt, în general, permeabile pentru fluxuri de materie, energie şi informație (figura 4.16), ceea ce favorizează cuplarea sistemului cu alte sisteme aflate în exteriorul acestuia. Un grup de sisteme cuplate prin intermediul intrărilor şi ieşirilor fluxurilor mai sus amintite, formează o *rețea* care, dacă funcționează coerent, devine un sistem de sine stătător, un *suprasistem* [119], sistemele fiind legate între ele prin intermediul *relațiilor*. În general, sistemelele pot avea propriile lor subsisteme etc. (figura 4.17) .

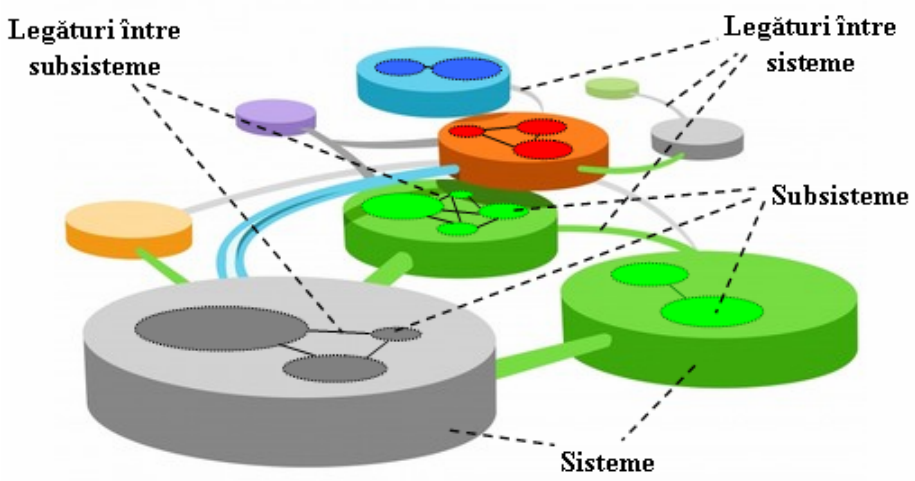


Figura 4.17. Reprezentare simbolică a unui suprasistem

Bertalanffy distinge între caracteristicile *sumative* (care privesc proprietățile independente de relațiile dintre entitățile componente) şi cele *constitutive* (care se referă la proprietățile dependente de specificul relațiilor dintre entități) ale elementelor unui sistem [149]. De pildă, din punctul de vedere al greutății (proprietate sumativă), un sistem mecanic reprezintă *doar* suma părților sale. În general însă, datorită existenței caracteristicilor constitutive, *un sistem reprezintă mai mult decât suma părților sale*, diferența fiind consecința *relațiilor* dintre aceste părți, care favorizează apariția în sistem a proprietăților numite *emergente*.

Deşi conceptul de *emergență* e clasic în teoria sistemelor, nu există o definiție unanim acceptată a acestuia şi, ceea ce e mai important, nici o explicație completă a modului în care proprietățile emergente apar [40], [49]. Rădăcinile conceptului de *emergență* se află în filosofia aristoteliană: „întregul e ceva deasupra şi dincolo de părțile sale şi nu doar suma acestora" [3]. Esența termenului e aceea că proprietățile care se manifestă la nivel *global* într-un sistem, caracterizând deci sistemul ca *întreg,* nu pot fi, în general, reduse la proprietățile subsistemelor cu grad inferior de organizare [115].

Sistemele complexe sunt definite adesea ca fiind un ansamblu numeros de entități simple aflate în interacțiune, care permite apariția proprietăților emergente [34]. Emergența este, prin urmare, asociată cu sistemele dinamice al căror comportament, deşi e rezultatul interacțiunilor dintre părțile sale, *nu poate fi dedus studiind aceste părți izolate unele de altele* [46] şi reprezintă apariția, la nivel global, a unor *noi structuri coerente* (*pattern*-uri) în timpul

procesului de *autoorganizare* care are loc într-un sistem[59] [95]. Proprietățile emergente sunt, evident, *rezultatul integrării activității subsistemelor*, manifestată sub forma unei organizări globale, la nivelul întregului sistem.

Se impune o observație: prin apariția proprietăților emergente sistemul nu se transformă *doar* într-o entitate *mai mare* [152] decât suma părților sale, ci *sistemul devine altceva*, se îmbogățește cu *noi* valențe, înainte inexistente. Interdependența dintre subsisteme ne aduce în prim plan ideea că mai degrabă *relațiile* dintre subsisteme, şi nu atât proprietățile lor individuale, sunt factorii prin care sistemul devine altceva decât suma părților sale [139]. Pe scurt, „prin organizare, sistemul devine o unitate cu proprietăți noi" [162], care nu sunt specifice subsistemelor din care e format, ci sunt consecința interacțiunilor dintre ele[60]; cu cât aceste proprietăți noi sunt mai numeroase, cu atât sistemul diferă mai mult de suma părților sale, deci gradul de organizare e mai înalt [170]. Prin urmare, e de înțeles de ce definiția lui Goldstein *asociază emergența cu autoorganizarea*. Sistemele care se autoorganizează, în modelul lui Prigogine, conduc, după cum s-a evidențiat, prin amplificarea fluctuațiilor, la emergența unor structuri spațio-temporale stabile, caracterizate de *coerență la nivel global*: „departe de echilibru, procesele ireversibile sunt deci o sursă de coerență", ceea ce la conferă o autonomie care „ne îngăduie să vorbim despre structurile apărute departe-de-echilibru ca despre nişte fenomene de autoorganizare" [191]. Acelaşi lucru se petrece în cazul instabilității Bénard şi în multe alte cazuri. Deosebit de interesantă este similitudinea care există între structurile emergente care aparțin unor sisteme complexe diferite. De pildă, în figura 4.18 se poate observa asemănarea dintre pattern-ul hexagonal al celulelor Bénard (figura 4.15) şi structurile caracteristice suprafeței unui coral, a unui spor de ciupercă şi a formațiunilor de sare din deşertul Atacama [282].

a. **b.** **c.**

Figura 4.18. Structuri hexagonale similare celulelor Bénard: suprafața unui coral (a), formațiuni de sare în deşertul Atacama (b) şi sporul unei ciuperci (c) (preluat de la [282])

[59] Se evidențiază aici ideea de coerență la nivel global a sistemelor complexe capabile de autoorganizare, care se manifestă sub forma corelațiilor între subsisteme (structurile emergente ce caracterizează sistemul ca întreg fiind stabile în timp), fapt care subliniază caracterul intrinsec integrator al sistemului. Tocmai existența acestei coerențe la nivelul întregului sistem e evidențiată şi de Prigogine prin ceasul chimic, care reflectă faptul că sistemul alcătuieşte un „tot" în care fiecare parte e „sensibilă" la toate celelalte [191].

[60] Caracterul ştiințific al ideii potrivit căreia într-un sistem poate apărea ceva nou, calitativ diferit față de caracteristicile constituenților, noile proprietăți nefiind doar „rezultante" cu caracter pur aditiv ale părților sistemului, a fost contestat de către unii reprezentanți ai curentului reducționist din prima jumătate a secolului XX, pentru care calitățile emergente erau doar epifenomene. De exemplu, Russell susținea că *doar prin analiză* e posibil ca proprietățile unui sistem complex să fie deduse din cele ale părților sale constituente [200]. Astăzi însă, datorită studiilor dedicate sistemelor complexe existente în diverse domenii (pshihologie, biologie, fizică, medicină, economie etc.), emergența pare să fie singura explicație a evoluției acestor sisteme. Sistemele chimice deschise aflate departe-de-echilibru şi celulele Bénard sunt doar două dintre nenumăratele exemple care dovedesc acest lucru.

În concluzie, *emergența este o caracteristică fundamentală a sistemelor capabile de autoorganizare* [118][61].

4.9.10. Ştiința complexității şi non-separabilitatea subiect-obiect

Izomorfismul existent între comportamentul sistemelor deschise care aparțin diverselor domenii (dinamica neliniară, fizica statistică, informatică, chimie, biologie etc.), a generat apariția *ştiinței complexității* [225], care se concentrează asupra evoluției sistemelor complexe, sisteme a căror adaptabilitate le permite atingerea unor stări care nu sunt nici ordonate datorită unor constrângeri stricte (ca, de pildă, solidele cristaline, în care relațiile dintre componente se supun unor reguli fixe), nici dezordonate ca urmare a absenței oricărei constrângeri (cum se întâmplă, de exemplu, în cazul unui gaz format din molecule independente), ci sunt situate într-o zonă intermediară. Cu alte cuvinte, evoluția sistemelor complexe nu este una care poate fi descrisă de mecanica newtoniană (deci nu putem deduce comportamentul lor doar cunoscând condițiile inițiale şi constrângerile); în plus, nu poate fi prevăzută nici măcar evoluția medie a ansamblului, cum s-ar fi întâmplat dacă subsistemele erau independente [119].

Aşadar, se pare că e mult mai natural să considerăm că, datorită caracterului său discontinuu, nedeterminist în sens clasic, paradigma specifică mecanicii cuantice constituie, din punct de vedere cauzal, o abordare mai apropiată de comportamentul sistemelor complexe [89]. Pornind de aici, pentru a evita confuzia clasică dintre ceea ce *este* sistemul (independent de observator) şi *reprezentarea* sistemului, Gershenson [88] introduce distincția ontologică dintre „existența absolută", *abs-being* (*absolute being*) şi „existența relativă", *rel-being* (*relative being*): *existența absolută* desemnează lucrul în sine (în sens kantian), în timp ce *existența relativă* se referă la proprietățile acestui lucru aşa cum le distinge un observator situat (inevitabil) într-un anumit context.

Gershenson şi Heylighen recurg la un exemplu simplu [89]: o sferă care e (abs-being) jumătate albă jumătate neagră va fi văzută (rel-being) ca albă de anumiți observatori, sau neagră de către alții, în funcție de poziția acestora față de sferă (figura 4.19).

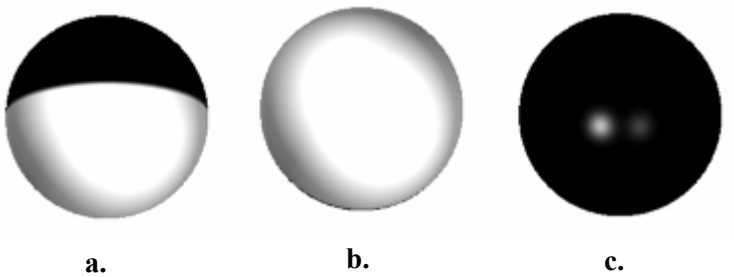


Figura 4.19. O sferă care este jumătate albă şi jumătate neagră (a) pare albă unui observator (b) sau neagră altuia (c), în funcție de poziția acestora față de sferă (preluat din [89])

[61] Se ridică aici întrebarea dacă emergența apare *numai* în prezența autoorganizării. Corning, de pildă, distinge între fenomenele emergente ale sistemelor capabile de autoorganizare şi cele specifice sistemelor organizate prin procese cu caracter *teleonomic* (care sunt subordonate unor scopuri) supuse controlului informațional [49]. Pe de altă parte, Holland vede emergența ca fiind produsul autoorganizării sistemelor care nu sunt controlate centralizat [123]. Prin intermediul lucrării de față nu se urmăreşte analizarea acestei controverse, întrucât în continuare se va face referire doar la proprietăților emergente ale sistemelor capabile să se autoorganizeze.

Spre deosebire de acest caz simplu, dacă e studiat un sistem complex, real, datorită multitudinii de proprietăți şi conexiuni, existența absolută a acestuia ne este inaccesibilă, deci tot ce se poate face este a preciza exact care e perspectiva fiecărui observator în parte.

În consecință, datorită finitudinii observatorului care studiază un anumit sistem complex, acesta nu poate extrage niciodată *toată informația* care priveşte sistemul în cauză, deci există o infinitate de existențe relative potențiale pentru orice existență absolută a unui sistem [89]. Se poate evidenția aici puntea realizată între comportamentul sistemelor complexe şi ideea non-separabilității subiect-obiect, idee proprie metodologiei transdisciplinare propuse de Basarab Nicolescu.

În cazul sistemelor complexe, unele reprezentări (*rel-being*) ale acestor sisteme pot fi atât de diferite unele de altele, încât pare imposibil ca ele să constituie aspecte ale aceluiaşi sistem. Astfel, în locul încercării de a decide ce *este* sistemul în sine (obiectiv propriu gândirii clasice), abordarea propusă ne permite contemplarea simultană a mai multor reprezentări diferite, tinzând către o descriere cât mai rafinată a sistemului. Se poate propune chiar o *metareprezentare* [55], [116], [117] a sistemului**,** adică o reprezentare a reprezentării acestuia. În situația în care se studiază o problemă concretă, paradigma descrisă mai sus ne conduce către alegerea unei reprezentări potrivite contextului particular, specific problemei în cauză.

4.9.11. Dubla legătură cauzală dintre nivelul microscopic şi cel macroscopic ale unui sistem complex capabil de autoorganizare

Revenind la viziunea lui Bertalanffy, aceasta este una a „unității în diversitate” [98], potrivit căreia orice sistem conține subsisteme, sistemul fiind, concomitent, parte a unuia sau mai multor suprasisteme. Astfel, fiecare sistem îşi are locul său într-o *ierarhie*, care urcă până la cele mai largi suprasisteme şi coboară până la cele mai mici subsisteme. Natura sistemelor nu poate fi înțeleasă decât dacă se ține cont de ambele direcții. Cu alte cuvinte, prin „cauzalitatea descendentă” (*downward causation*) [42], proces cu caracter reducționist, analitic, comportarea părților este constrânsă de proprietățile întregului dar, în acelaşi timp, prin complementara „cauzalitate ascendentă” (*upward causation*), comportamentul întregului este, la rândul lui, influențat de proprietățile părților. Mişcarea ascendentă este una cu *caracter integrator*, abordare epistemologică specifică modelului *sintetic*, în care părțile sunt gândite ca întreg *după* ce sunt gândite fiecare în parte [121].

Semnificația conceptului de „proprietate emergentă” e consolidată prin legătura dintre ideea de „cauzalitate descendentă” şi termenul de „constrângere”. Odată ce mai multe sisteme, inițial independente, se cuplează pentru a forma un suprasistem, ele se vor supune, de aici înainte, unei constrângeri: suprasistemul impune componentelor sale o *coerență***,** o coordonare inexistentă înainte. Prin urmare „o anumită structură e emergentă dacă are un fel de influență cauzală asupra entităților situate la nivel inferior” [34]. De pildă, construirea unui drum într-o zonă, va influența comportamentul populației dar, totodată, va deschide noi perspective privind dezvoltarea infrastructurii zonei [190].

În concluzie, alături de influența „ascendentă” pe care subsistemele de la nivelul inferior o au asupra structurii emergente (apariția structurii emergente fiind tocmai consecința acestei mişcări ascendente), trebuie să existe şi un feed-back descendent, *downward causation*, „o interacțiune între nivele, în care nivelele superioare le influențează pe cele inferioare în timp ce ele sunt, simultan, determinate de cele inferioare” [122]. Coexistența celor două tipuri de influențe „pe verticală” care conduc la autoorganizarea sistemelor deschise, deci la apariția proprietăților emergente prin ruperi de simetrie, indică faptul că *cele două nivele de*

organizare, microscopic şi macroscopic, nu pot fi gândite separat[62] (figura 4.20). Această non-separabilitate a nivelurilor e o expresie a *puterii de integrare* specifice sistemelor complexe capabile de autoorganizare.

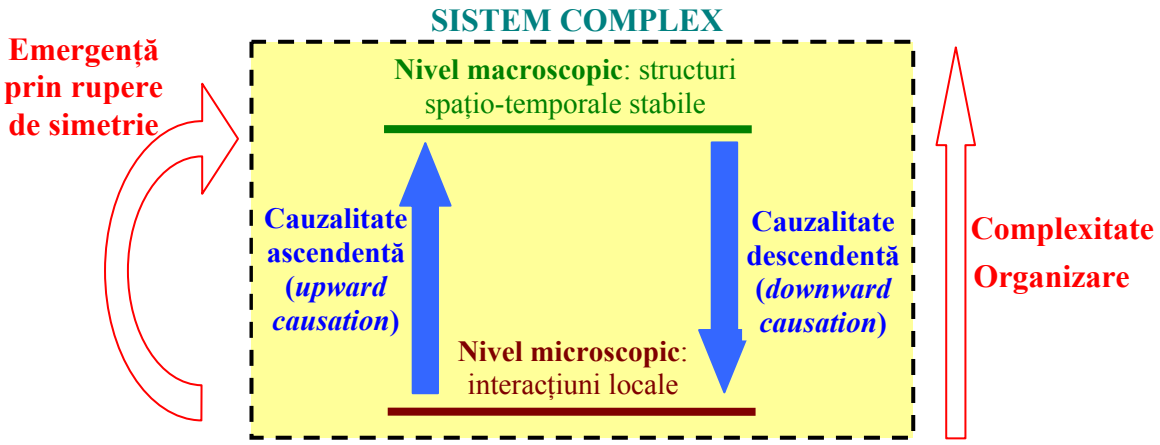


Figura 4.20. Cele două relații cauzale dintre nivelul microscopic şi cel macroscopic ale unui sistem complex capabil de autoorganizare arată non-separabilitatea celor două niveluri

4.9.12. Emergență, sinergie şi sinergetică

În continuare, se va evidenția legătura strânsă dintre conceptul de *emergență* şi cel de *sinergie* [49], [50]. Sinergia se referă, după Corning, la „efectele combinate produse prin colaborarea a două sau mai multe particule, elemente, părți sau organisme, efecte care nu pot fi obținute în alt mod" [49]. Cu alte cuvinte, relațiile dintre mai multe entități pot genera efecte care n-ar putea apărea în cazul în care aceste entități ar acționa individual. Prin urmare, se poate afirma că fenomenul emergent reprezintă un ansamblu de interacțiuni care, prin cooperare, produc *efecte sinergice* de diverse feluri, în natură şi societate. Tocmai datorită faptului că *proprietățile emergente se manifestă prin efecte sinergice*, sistemele complexe devin, în urma autoorganizării, *altceva* decât suma părților.

Pornind de la studiul structurilor spațio-temporale care caracterizează efectul laser, Hermann Haken a fost impresionat de sincronizarea atomilor din timpul emisiei stimulate a luminii laser, care are aspectul unei cooperări cu un pronunțat caracter sinergic [96]. Procesul este, pe scurt, următorul[63] (figura 4.21): în urma pompajului atomii trec de pe nivelul energetic 1 pe nivelul 3, după care are loc dezexcitarea rapidă a acestora de pe nivelul 3 pe nivelul 2. Timpul de viață al nivelului metastabil 2 e mult mai mare decât al nivelului 3 şi 1, fapt care conduce la inversia de populație între nivelurile 2 şi 1. În acest moment, fotonii incidenți stimulează atomii de pe nivelul 2 (interacționând rezonant cu aceştia), care se vor dezexcita practic simultan, trecând pe nivelul inferior 1, proces în urma căruia se emit fotoni identici cu cei care au stimulat emisia. Datorită inversiei de populație, radiația LASER emisă va fi mai intensă decât cea incidentă.

Haken a propus înființarea unei noi discipline, *sinergetica* [101], al cărei scop este studiul apariției structurilor emergente în sistemele deschise aflate în regiunea departe-de-echilibru.

[62] Se regăseşte astfel, îmbogățită cu noi sensuri, concluzia subliniată de Prigogine: „structurile macroscopice care apar din evenimentele microscopice duc, la rândul lor, la o modificare a mecanismelor microscopice" [190].
[63] A fost ales exemplul unui laser cu trei niveluri.

Sinergetica se concentrează, în esență, asupra sistemelor complexe având un mare număr de constituenți, propunându-şi să descrie comportamentul spațio-temporal al acestora la nivel global. Din acest motiv, unul dintre conceptele de bază ale sinergeticii este cel de *parametru de ordine* (*ordered parameter*), introdus în teoria Ghinzburg-Landau a tranzițiilor de fază din termodinamică şi dezvoltat ulterior de către Haken [271].

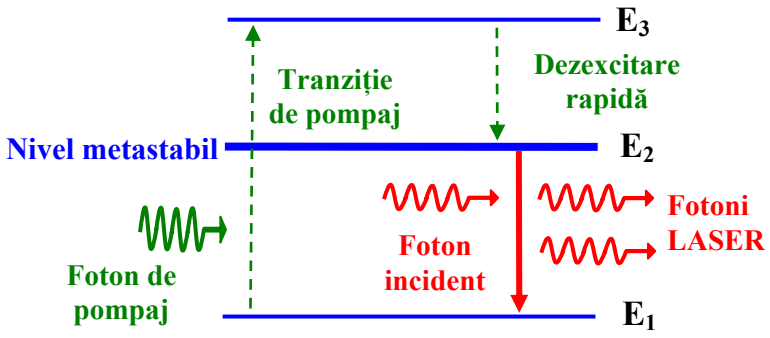


Figura 4.21. Efectul LASER. În urma stimulării prin intermediul radiației incidente, atomii de pe nivelul 2 emit, sincron, în urma tranziției 2-1, fotoni LASER

Sistemele complexe fiind, în general, constituite dintr-un număr mare de subsisteme, au multe grade de libertate, deci descrierea comportamentului acestora ar trebui să fie dificilă. Demonstrația lui Haken privind tranzițiile de fază [101] arată că, în loc de a studia comportamentul individual al atomilor unui sistem complex, se poate ca, în vecinătatea punctului de bifurcație, să se opereze doar cu un număr restrâns de *parametri de ordine*, fiecare parametru „ghidând" unul sau mai multe subsisteme; „comportarea sistemelor complexe poate fi descrisă, în vecinătatea punctelor de instabilitate, prin intermediul unui număr extrem de mic de variabile, numite *parametri de ordine*" [103] (s.n). Principiul potrivit căruia parametrii de ordine „controlează", „subjugă" comportamentul subsistemelor componente e numit de Haken *enslaving principle*. În cursul procesului de autoorganizare a sistemelor complexe, în general doar câteva *moduri colective* devin instabile, acestea având legătură cu parametrii de ordine, *variabile macroscopice* care „controlează" (*enslaving*) comportamentul constituenților microscopici [102]. Existența parametrilor de ordine (adesea doar unul sau doi), care descriu sistemul la nivel macroscopic, ordonându-i părțile componente, permit, independent de intracțiunile subsistemelor la nivel microscopic, o *abordare statistică a sistemului ca întreg*, sistem a cărui evoluție va depinde doar de un număr de grade de libertate egal cu numărul parametrilor de ordine[64]. Astfel, datorită „abilității" parametrilor de ordine de a „controla" evoluția subsistemelor, sistemul complex se poate autoorganiza [102], [104].

Pentru a ilustra principiul descris mai sus, Haken se foloseşte de o analogie [103]: un vapor aflat pe un lac a cărui suprafață oscilează sub influența unei unde staționare de ecuație

$$y(x,t) = A(t)\sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right), \tag{4.52}$$

în care amplitudinea variază sinusoidal în timp:

[64] De pildă, în cazul ruperii de simetrie a unui material feromagnetic răcit la o temperatură mai mică decât cea critică, vectorul magnetizare joacă rolul parametrului de ordine, permițând descrierea statistică a repartizării microscopice a spinilor.

$$A(t) = A_0 \sin(\omega t)\,. \tag{4.53}$$

Considerând că pe lac se află mai multe vapoare, amplitudinea joacă rol de *parametru de ordine*, care controlează mişcarea vaporului *j* la un moment dat, legătura dintre parametrul de ordine şi variabila x_j (coordonata vaporului *j*), fiind realizată prin intermediul factorului $\sin(2\pi x/\lambda)$. Există o diferență fundamentală între parametrii de ordine şi variabilele controlate de aceştia: „relaxarea" parametrilor de ordine are loc foarte lent în urma dispariției unei perturbații a acestora (precum o arată comportarea amplitudinii din analogia de mai sus), în timp ce parametrii individuali (variabilele controlate) se relaxează foarte repede când sunt afectați de perturbații.

Trecând de la analogie la cazul general, în viziunea lui Haken dinamica modurilor stabile cu relaxare rapidă este în întregime controlată de dinamica unui număr mic de moduri instabile cu relaxare lentă, amplitudinea acestor puține moduri instabile reprezentând parametrii de ordine care descriu comportarea macroscopică a sistemului. Descrierea sistemului devine, deci, independentă de interacțiunile care au loc la nivel microscopic în sistem, ceea ce explică autoorganizarea acestuia.

Sinergetica scoate şi ea în evidență cauzalitatea dublă dintre nivelul microscopic şi cel macroscopic prin intermediul *principiului cauzalității circulare* [45]: parametrii de ordine controlează variabilele care operează la nivel microscopic, dar şi variabilele influențează, la rândul lor, parametrii de ordine[65]. Astfel, sinergetica consolidează ideea non-separabilității nivelului microscopic de cel macroscopic în cazul unui sistem complex.

În concluzie, sistemele deschise aflate departe-de-echilibru pot, prin ruperea simetriei spațio-temporale la trecerea prin punctul de bifurcație, să atingă stări staționare stabile, stări în care se manifestă corelații la nivel macroscopic, favorizând apariția proprietăților emergente, care se disting prin faptul că au un caracter sinergic. Dinamica specifică sistemelor aflate departe-de-echilibru caracterizează inclusiv comportamentul unor sisteme din sfera lumii vii.

4.9.13. Autoorganizarea sistemelor complexe şi riscul apariției haosului

Sistemele deschise aflate în regiunea neliniară depind de o sursă externă de energie, care influențează hotărâtor evoluția lor, sub forma constrângerilor impuse de condițiile la limită. Această dependență face ca sistemul aflat departe-de-echilibru să fie extrem de sensibil la schimbările din mediul înconjurător, sensibilitate care, pe de o parte, creşte fragilitatea sistemului, dar care, pe de altă parte, face ca sistemul să devină mai dinamic şi mai capabil să reacționeze la modificările care i se impun. În consecință, în loc să reacționeze la perturbații doar prin mecanisme de feed-back negativ, sistemele aflate departe-de-echilibru pot să se dezvolte, să-şi crească gradul de complexitate prin emergența unor noi structuri stabile în urma *adaptării lor* la modificarea configurației mediului exterior. Adaptabilitatea ridicată a sistemelor de acest fel îşi are însă riscurile ei. În cazul în care condițiile la limită impuse „împing" sistemul prea departe de echilibru (de pildă, prin creşterea parametrului de control în sistemele analizate de Prigogine), acesta ajunge în regiuni care permit apariția unei „cascade" formate din puncte de bifurcație: bifurcațiile apar tot mai repede pe măsură ce sistemul se îndepărtează de echilibru, până când numărul de ramificații poate deveni infinit

[65] De pildă, un câmp electric exterior (parametru de ordine) controlează mişcarea unui electron situat în zona de influență a câmpului; pe de altă parte, electronul, aflat în mişcare neuniformă, generează un câmp electric suplimentar, care se suprapune peste câmpul inițial.

[118], ceea ce marchează apariția regimului *haotic turbulent* (figura 4.22), stare în care activitatea sistemului e opusă haosului indiferent, caracteristic stării de echilibru (stare care permitea definirea unor valori medii stabile în timpul fluctuațiilor).

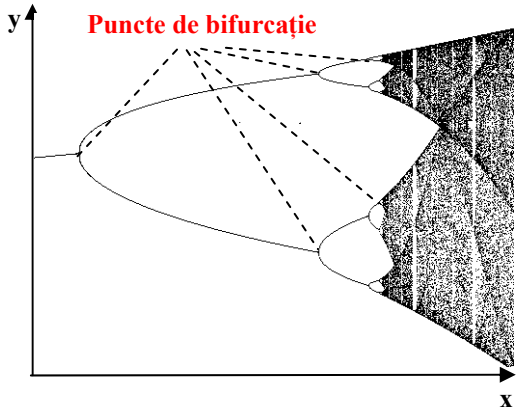


Figura 4.22. Evoluția către haosul turbulent a unui sistem deschis aflat departe-de-echilibru. (preluat de la [251])

Regimul haotic al sistemelor din regiunea neliniară e un *haos turbulent de non-echilibru*, în care comportamentul sistemelor își pierde regularitatea (de tip „ceas chimic", de pildă) întrucât „toți posibilii se actualizează, coexistă și interferă, sistemul fiind, în același timp, tot ceea ce poate fi" [191]; traiectoriile care descriu în spațiul fazelor evoluția unui sistem din regiunea neliniară cu comportare haotică se îndepărtează unele de altele în timp după o lege exponențială, *oricât de apropiate au fost inițial*, astfel că, după un timp suficient de lung, traiectoria sistemului nu mai poate fi determinată, pierzându-se, astfel, cunoașterea legată de starea inițială. Dincolo de un orizont temporal, comportamentul sistemelor descrise devine impredictibil [191].

Comportamentul sistemelor aflate prea aproape de echilibru nu permite autoorganizarea acestora prin generarea proprietăților emergente, în timp ce activitatea sistemelor aflate prea departe de echilibru devine turbulent-haotică**.** În consecință, avem de-a face cu un sistem care se autoorganizează atunci când acesta, *în lipsa oricărei constrângeri exterioare*, ajunge, în urma *amplificării fluctuațiilor* externe, în *regiunea neliniară departe-de-echilibru* unde, prin *bifurcații* și *ruperi de simetrie*, permite *emergența* unor *structuri spațio-temporale stabile*, caracterizate de *coerență la nivel global*, coerență care are loc la limita haosului (*edge of chaos*), adică într-o stare aflată undeva între echilibrul termic și haosul turbulent de non-echilibru.

4.9.14. Adaptabilitatea sistemelor cibernetice prin autoorganizare

Cibernetica e înțeleasă, în general, ca știința care are ca obiect studiul principiilor abstracte ale organizării sistemelor complexe [136]. Deși obiectul de studiu al ciberneticii coincide, în esență, cu cel al teoriei sistemelor, cele două discipline diferă prin faptul că, în timp ce teoria sistemelor se concentrează mai mult asupra *structurii* sistemelor și a modelării acestora, cibernetica se focalizează asupra modului în care *funcționează* sistemele [246]. Prin urmare, preocuparea fundamentală a ciberneticii o reprezintă problema controlului sistemelor complexe de toate tipurile (deci implicit a relațiilor dintre componentele sistemului, precum și dintre sistem și alte sisteme), recurgând pentru asta la concepte specifice teoriei informației și a mecanismelor de feed-back [236], [247], [254].

Comportamentul sistemelor complexe capabile de autoorganizare este determinat într-o mare măsură de circularitatea cauză-efect (efectul unei cauze influențează cauza însăşi) reprezentată de cele două mecanisme de feed-back. Prin feed-back negativ se poate ajunge cel mult la autoconservarea comportamentului sistemului, acesta tinzând mereu spre echilibrul homeostatic. În schimb, prin feed-back pozitiv, micile fluctuații externe pot fi amplificate, ceea ce poate conduce, prin mecanismul descris, la ruperi de simetrie şi emergență, deci la autoorganizarea sistemului, dar şi la evoluția acestuia către haosul turbulent de non-echilibru. *Sistemele complexe adaptabile*, fiind capabile să se autoorganizeze modificându-şi configurația în funcție de schimbările exterioare fără a se dezintegra, se găsesc, după cum s-a evidențiat, *la limita haosului* (*edge of chaos*), adică într-o zonă foarte îngustă situată între echilibrul static, înghețat, neproductiv şi activitatea haotică turbulentă[66] [139], [140], [147].

Pentru a se adapta schimbărilor din mediul său exterior, un sistem complex trebuie, pe de-o parte, să producă o *varietate* suficient de mare de acțiuni pentru a face față perturbațiilor posibile[67] (ceea ce se realizează ținând sistemul suficient de departe de echilibru pentru a exista destule stări staționare tangibile), iar, pe de altă parte, să *selecteze* cea mai potrivită stare pentru a contracara efectul distructiv al perturbațiilor (ceea ce înseamnă că stările staționare accesibile sistemului nu trebuie să fie prea multe sau prea instabile, deci sistemul nu trebuie „împins" prea departe de echilibru) care pot pune în pericol existența întregului sistem (figura 4.23) [118].

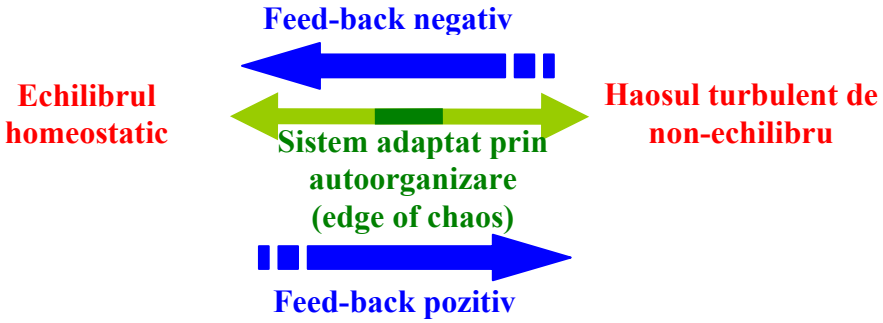


Figura 4.23. Sistemele cibernetice adaptabile prin autorganizare funcționează la limita haosului (*edge of chaos*), zonă aflată între echilibrul homeostatic (spre care e „împins" de feed-back-ul negativ) şi haosul turbulent de non-echilibru (la care poate ajunge prin feed-back pozitiv)

Prin urmare, *auotoorganizarea* [230], este consecința *flexibilității sistemelor complexe* atunci când acestea sunt supuse influenței fluctuațiilor mediului exterior [168], iar *reprezentarea fizică a organizării emergente sunt pattern-urile*, ansambluri de elemente organizate sub forma unor structuri spațio-temporale stabile [139].

[66] Ideea enunțată de Prigogine cu privire la comportamentul sistemelor vii rămâne deci valabilă şi pentru sistemele cibernetice: „viața, cu coerența ei caracteristică, pare a aparține unui fel de regim intermediar. Distanța față de echilibru trebuie să fie destul de mare, dar nu poate fi nici prea mare ca să se evite distrugerea modelului delicat, necesar pentru a menține funcționarea normală a vieții" [190].

[67] Conform *legii varietății necesare* (*Law of Requisie Variety*), formulată de Ashby, cu cât mai ridicată e varietatea acțiunilor accesibile unui sistem (sau, altfel spus, numărul stărilor distincte la care un sistem are acces) cu atât mai mare e varietatea perturbațiilor pe care sistemul e capabil să le controleze [247], [283]. Prin urmare, cantitatea de informație conținută într-un sistem dotat cu mecanism de control limitează gradul de varietate al mediului cu care sistemul e capabil să interacționeze [136].

4.10. Rolul principiului homeokinetic în autoorganizarea sistemelor mecatronice complexe

4.10.1. Echilibrul homeostatic şi stabilitatea homeokinetică

Dacă feed-back-ul negativ este principalul factor care contribuie la atingerea echilibrului homeostatic al unui sistem, *feed-back-ul pozitiv are un rol esențial în explicarea schimbărilor* care apar în evoluția sistemelor deschise capabile de autoorganizare (chimice, fizice, biologice etc.). De pildă, în cazul sistemelor vii, există o *limită a echilibrului homeostatic*, pentru simplul motiv că aceste sisteme se deteriorează în timp. De aceea s-ar părea că, deşi ambele mecanisme de feed-back contribuie la dezvoltarea sistemelor vii, *pe ansamblu* feed-back-ul trebuie să fie pozitiv [208]. Potrivit principiului homeostatic, finalitatea sistemului este stabilitatea, obiectivul principal fiind menținerea funcționalității acestuia *în ciuda* perturbațiilor exterioare. După cum s-a precizat însă, *adaptarea sistemului înseamnă mai mult decât asigurarea stabilității acestuia*; funcționalitatea sistemelor vii, de exemplu, trebuie să se modifice în urma interacțiunii dintre sistem şi mediu, „ajustându-se" în funcție de schimbările care au loc în mediul exterior.

Procesul prin care sistemele vii cresc, se maturizează, intră în declin şi, în final, se sting, nu poate fi explicat doar prin homeostază, fiind necesar să recurgem la termenul complementar de *homeokinesis* [132], [222], care desemnează starea ce permite apariția *schimbărilor dinamice*, specifice lumii vii. Potrivit perspectivei lui Van Gigch, homeostaza poate fi descrisă ca un „platou homeokinetic" [241], stare pasivă, dominată de feed-back-ul negativ, în cursul căreia constrângerile impuse sistemului asigură stabilitatea homeostatică a acestuia (figura 4.24) [223].

Abordarea prezentată e remarcabilă prin faptul că propune asocierea conceptului de „homeokinesis" cu schimbările care apar, în principal datorită feed-back-ului pozitiv, în cursul evoluției sistemelor biologice, dar se dovedeşte limitată în ceea ce priveşte deschiderile pe care acest concept le presupune. Limitarea e o consecință a faptului că, după cum se observă pe grafic, conceptul de homeokinesis e corelat, prin intermediul feed-back-ului pozitiv, cu instabilitatea care conduce, în final, la deteriorarea sistemului.

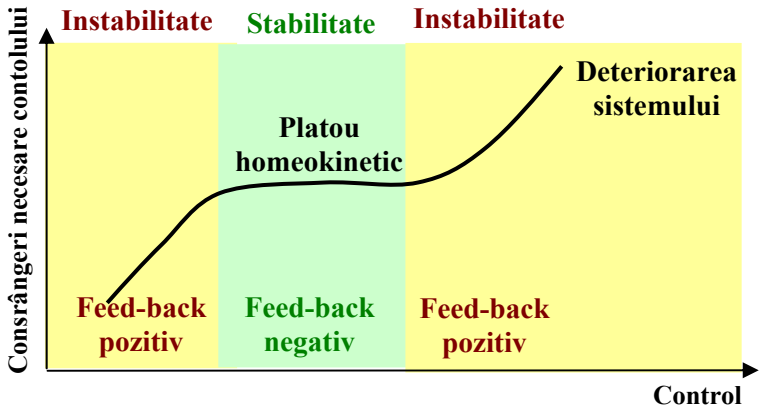


Figura 4.24. În viziunea lui Van Gigch, a controla un sistem înseamnă a asigura stabilitatea acestuia prin menținerea funcționării lui între limitele platoului homeokinetic (preluat din [241])

Cibernetica a considerat inițial că adaptabilitatea unui sistem poate fi explicată exclusiv cu ajutorul mecanismelor de control prin feed-back negativ [18], [195]. Aşa cum s-a demonstrat însă în prezentul capitol, prin feed-back negativ poate fi asigurată cel mult

stabilitatea de tip homeostatic a unui sistem cibernetic, stare care asigură doar conservarea parametrilor esențiali ai acestuia. Adaptabilitatea presupune *flexibilitate* în fața schimbărilor care apar în mediul exterior sistemului, iar flexibilitatea s-a văzut că este strâns legată de autoorganizare şi emergență.

Autoorganizarea este (figura 4.23) rezultatul unui „compromis" realizat între amplificarea unor perturbații prin feed-back pozitiv şi atenuarea altora prin feed-back negativ [18], [160]. Prin urmare, adaptabilitatea unui sistem se impune a fi corelată cu termenul de „homeokinesis", întrucât acest concept este legat de schimbările care apar în evoluția unui sistem datorită mecanismului de feed-back pozitiv. Evident, adaptabilitatea nu se poate atinge în afara stabilității, iar această stabilitate trebuie să fie una dinamică, calitativ superioară celei statice (specifice echilibrului homeostatic). În consecință, pentru a putea descrie comportamentul sistemelor mecatronice complexe se va introduce un nou tip de stabilitate: *stabilitatea homeokinetică*.

Stabilitatea homeokinetică e calitativ diferită de cea caracteristică echilibrului homeostatic, prin faptul că descrie comportarea unui sistem care, deşi funcționează în contact cu un mediu exterior aflat în continuă schimbare, reuşeşte, fluctuând între limite acceptabile, prin *disipare de energie*, să atingă o stare aflată departe-de-echilibru, caracterizată de o organizare internă cu înalt grad de complexitate [192].

Emergența structurilor spațio-temporale prin ruperea simetriei, fenomen specific sistemelor complexe, se regăseşte şi în spațiul mecatronicii, sub forma apariției spontane a unor comportamente noi ca urmare a interacțiunii complexe dintre sistemul mecatronic şi mediul înconjurător.

În continuare, se va considera cazul în care sistemul mecatronic e reprezentat de către un singur agent inteligent (în particular un robot).

4.10.2. Relația dintre autonomie şi adaptabilitate în cazul agenților inteligenți

Prin *agent* se înțelege orice entitate capabilă să schimbe informație cu mediul exterior sub două forme: *percepe* mediul exterior prin intermediul senzorilor şi, totodată, *acționează* asupra acestuia prin intermediul efectorilor (figura 4.25) [1].

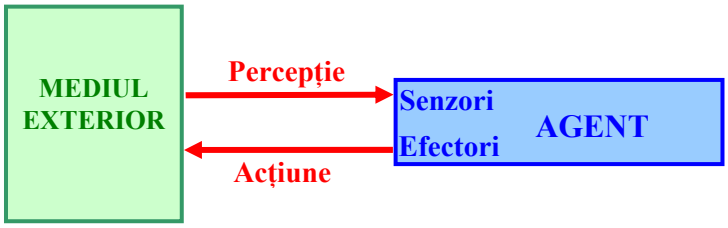


Figura 4.25. Schimbul de informație dintre un agent şi mediul său exterior

Agentul inteligent este cel care are capacitatea ca, pentru fiecare secvență de percepții posibilă, să selecteze, pe baza informației provenite din cunoştințele încorporate şi a celei achiziționate prin secvența de percepții, o acțiune care conduce către maximizarea performanțelor sale [1], [202]. Acest lucru înseamnă că agentul inteligent trebuie să fie *capabil să învețe* prin interacțiunea cu mediul exterior, utilizând la maximum informația furnizată de fiecare secvență de percepții. Un agent inteligent trebuie să fie *autonom*, în sensul că el nu trebuie să se bazeze doar pe cunoştințele cu care a fost înzestrat de către creatorul său, ci trebuie să acționeze asupra mediului exterior în conformitate cu o „agendă internă",

urmărind îndeplinirea unor obiective proprii. Totodată, pentru ca agentul să fie autonom e necesar să fie *adaptabil*, pentru a putea să facă față eventualelor schimbări care apar în mediul exterior [202], [243].

Comportamentul (behaviour) unui robot poate fi considerat un pattern spațio-temporal care emerge în urma interacțiunii dintre robot şi mediul său exterior [18]. Autonomia robotului presupune adaptabilitate, iar adevărata adaptabilitate implică autoorganizare, adică emergența, prin ruperi de simetrie, a unor comportamente noi, care să asigure o interacțiune armonioasă între agent şi mediu [18], [58]. Autoorganizarea robotului presupune faptul că evoluția lui nu trebuie să fie direcționată prin intermediul unei semantici provenite din afara acestuia, ci agentul trebuie să se adapteze schimbărilor din mediu dezvoltând comportamente funcționale proprii, independente de un scop impus sau de un semnal de recompensă[68]. Una dintre cele mai avansate metode de autoorganizare a unui robot este cea bazată pe principul homeokinetic [59], [60].

4.10.3. Autoorganizarea comportamentului unui robot pe baza principiului homeokinetic

Principiul homeokinetic asigură un mecanism de autoorganizare a comportamentului unui robot, în care scopul acestuia nu este doar atingerea unei stări staționare (similare echilibrului homeostatic), ci acela de a realiza un *regim dinamic intern* al agentului [18], care se manifestă prin emergența unor comportamente specifice, corelate cu schimbările apărute în mediul exterior [56]. Procedeul se datorează în principal colectivului condus de Ralph Der [56]-[60].

Robotul, dotat cu o reprezentare internă, un model adaptabil (*self-model*) al comportamentului său, e capabil să dezvolte propria sa semantică, prin minimizarea în timp a diferenței existente inițial între gradul de complexitate (mai scăzut) al modelului şi cel (mai ridicat) al mediului exterior [58]. Această continuă adaptare a modelului intern la realitatea exterioară se realizează prin intermediul unui semnal de învățare (*learning signal*) provenit atât de la controler cât şi de la model, semnal derivat din nepotrivirea (*misfit*) care există între comportamentul teoretic anticipat de către model şi comportamentul real executat de robot. Semnalul va fi trimis deopotrivă către model şi către controler, pentru a asigura continua lor adaptare la noile condiții [60]. Semnalele de ieşire ale controlerului (în cazul de față, o rețea neuronală) sunt de forma:

$$y_t = K(x_t; c), \tag{4.54}$$

în care $x_t \in R^n$ este vectorul care corespunde stimulilor (informației preluate de senzori din mediul exterior) la momentul *t*, iar *c* este vectorul parametric [56], [58]. Aceste semnale se transformă în final în acțiuni executate de robot în lumea reală. Acțiunile robotului conduc la schimbarea stimulilor captați de senzorii acestuia la momentul ulterior, $t+1$. Se va nota vectorul care corespunde noilor stimuli cu x_{t+1}. Pe de altă parte, modelul intern adaptabil al robotului anticipează, cu ajutorul unei funcții de predicție (*prediction function*), ψ, un vector care ar trebui, potrivit previziunilor robotului, să corespundă informației captate de către senzori la momentul $t+1: \psi(x_t)$. Evident, va exista o inevitabilă mică diferență între valorile reale ale stimulilor şi cele anticipate de către model [56]:

[68] De pildă, robotul este controlat prin intermediul unei semantici externe când se foloseşte metoda învățării supervizate (*supervized learning*) sau a învățării bazate pe recompensă (*reinforcement learning*).

$$\psi(x_t) \approx x_{t+1}. \tag{4.55}$$

Dacă se notează cu $\hat{x}_t$ vectorul stimulilor la momentul *t*, aşa cum sunt ei reconstituiți de către modelul intern pe baza stimulilor preluați de senzori la momentul $t+1$, această reconstrucție reprezintă un pas înapoi în timp [114]:

$$\hat{x}_t = \psi^{-1}(x_{t+1}). \tag{4.56}$$

Secvența:

$$x_t \rightarrow x_{t+1} \rightarrow \hat{x}_t \tag{4.57}$$

este numită de către Ralph Der ş.a. „bucla temporală" (*time loop*) [58], iar funcția energie:

$$E = \| u \|^2, \tag{4.58}$$

în care $u_t = x_t - \hat{x}_t$, reprezintă eroarea buclei temporale (*time loop error*). Această eroare este folosită ca semnal de învățare în vederea adaptării deopotrivă a modelului şi controlerului la schimbările care au survenit în urma interacțiunii dintre robot şi mediul său exterior (figura 4.26). Minimizarea funcției *E* determină minimizarea senzitivității lui ψ^{-1} şi maximizarea senzitivității lui ψ. Astfel, prin intermediul buclei temporale se realizează conversia comportamentelor stabile în comportamente instabile şi invers. Pe măsură ce descreşte *E*, eroarea

$$x_{t+1} - \psi(t) \tag{4.59}$$

devine tot mai mică, iar senzitivitatea robotului creşte.

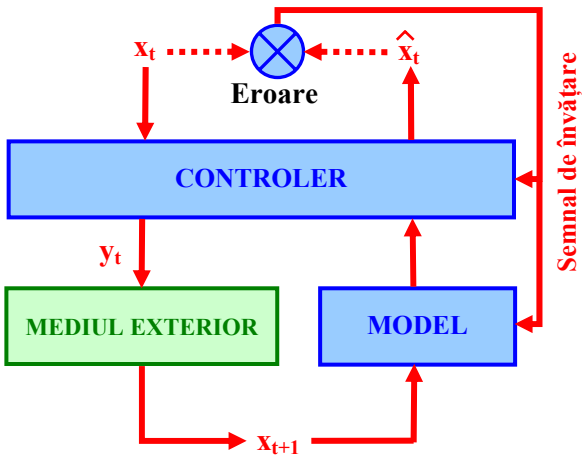


Figura 4.26. Schema de funcționare a unui robot capabil de autoorganizare pe baza principiului homeokinetic (preluat din [114])

Întrucât o creştere a senzitivității robotului determină o scădere a predictibilității şi invers, robotul va oscila între perioade stabile, în care explorarea mediului este redusă la minim, şi perioade mai puțin stabile, explorative, în care acesta investighează mediul exterior. Atâta timp cât eroarea e mică, cunoaşterea robotului este bună, deci puterea de predicție a modelului intern va fi mare, favorizând comportamentul explorativ. Acest comportament determină, însă, creşterea erorii, deci scăderea puterii de predicție a modelului, conducând astfel la apariția unui comportament mai prudent. În continuare, prudența robotului va micşora din nou eroarea şi ciclul se reia.

Paradigma teoretică descrisă este susținută de multiplele aplicații realizate atât în lumea virtuală cât şi în cea reală. Astfel, diverse sisteme mecatronice pot să se adapteze, prin autoorganizare, condițiilor de mediu: vehiculul Braitenberg reuşeşte să urmeze un drum indicat de un fascicul luminos [56], robotul Kephera învață să urmărească profilul unui obstacol, să balanseze o minge suspendată [57], să navigheze prin coridoare înguste, ori să deplaseze o cutie mică (în interiorul căreia se află) pentru a explora o arenă mai largă [58] etc. Unele dintre cele mai recente şi, în acelaşi timp, spectaculoase rezultate experimentale evidențiază similitudinile existente între autoorganizarea sistemelor mecatronice bazată pe principiul homeokinetic şi comportamentul specific sistemelor din lumea vie (figurile 4.27-4.29) [248].

În concluzie, principiul homeokinetic favorizează obținerea autonomiei sistemului mecatronic prin funcționarea acestuia într-un regim dinamic, în care sensibilitatea ridicată în raport cu modificările exterioare îi permit acestuia să se adapteze „comutând", prin ruperi de simetrie, între comportamente emergente diferite, care depind de specificul modificărilor; în acelaşi timp, însă, neliniaritățile controlerului nu permit amplificarea excesivă a perturbațiilor, ceea ce păstrează predictibilitatea comportamentului sistemului între anumite limite, acesta fiind împiedicat să evolueze către haos. [57], [60], [160].

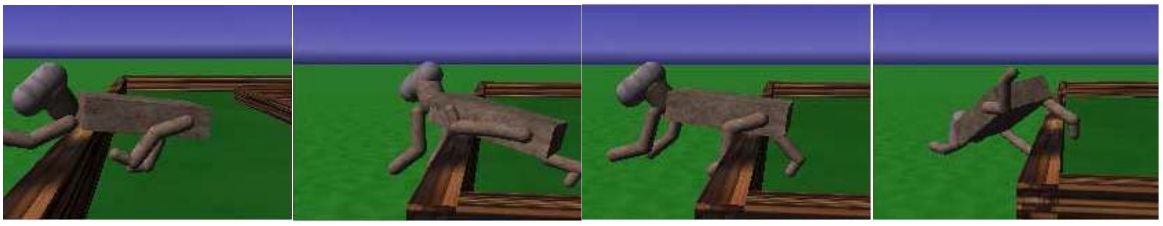


Figura 4.27. Un câine virtual care întâlneşte un obstacol adoptă inițial un comportament prudent (care-i permite să investigheze posibitățile de acțiune), pentru ca, după câteva minute, să reuşească să-l depăşească (preluat de la [248])

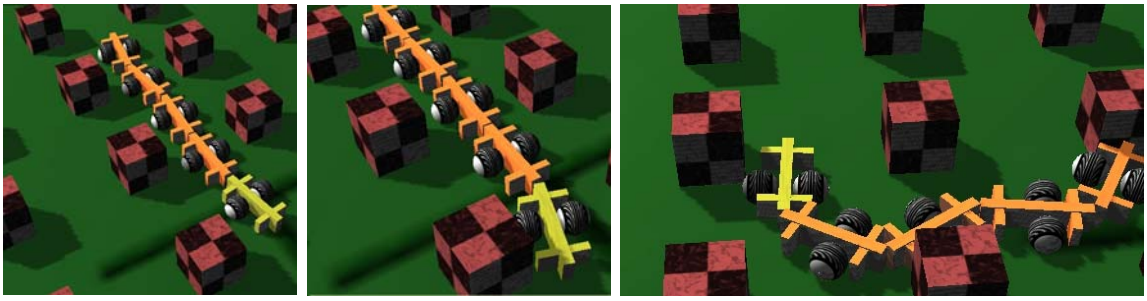


Figura 4.28. Autoorganizarea comportamentului unui agent în vederea navigării printr-un labirint (preluat de la [248])

Procedeul amintit favorizează, deci, apariția *multistabilității comportamentale* (*behavioural multistability*), adică emergența şi coexistența mai multor pattern-uri comportamentale stabile, specificul acestor comportamente depinzând de complexitatea controlerului. Acest tip nou de autoorganizare va fi numit *autoorganizare homeokinetică***.**

a. **b.**

Figura 4.29. Autoorganizarea comportamentului unui robot real, care reuşeşte să se adapteze oscilațiilor unei bile suspendate (a) sau să navigheze prin spații înguste (b) (preluat de la [248])

4.10.4. Caracterul transdisciplinar al conceptului de homeokinesis

Autoorganizarea homeokinetică rezultă în urma „compromisului" realizat între mecanismul care amplifică fluctuațiile (reprezentat prin creşterea sensibilității răspunsului senzorului datorită acțiunilor agentului) şi mecanismul care urmăreşte menținerea stabilității sistemului (rezultat al imperativului predictibilității consecințelor acțiunilor executate) [160]. Existența acestui compromis garantează faptul că agentul nu va opta nici spre „siguranța" oferită de un comportament perfect modelat, ceea ce ar echivala cu extincția tendinței de explorare a mediului exterior, dar nici nu va alege să exploreze excesiv lumea exterioară fără a utiliza suficient cunoştințele dobândite, ceea ce ar conduce către un comportament turbulent haotic, complet imprevizibil. Astfel, *agentul evită extremele, optimizând raportul dintre explorarea mediului exterior şi utilizarea informației înmagazinate în reprezentarea internă a comportamentului*.

Principiul homeokinetic asigură evoluția sistemului mecatronic spre un regim dinamic în care se realizează compromisul optim între *creativitate* şi *stabilitate* [59]: sistemul mecatronic este creativ (întrucât explorează regiuni cu factor de risc ridicat), dar totodată stabil (adică predictibilitatea sa e suficient de ridicată pentru a evita haosul turbulent).

Utilizând limbajul lupascian (paragraful 2.10), *actualizarea* comportamentului explorativ presupune *potențializarea* comportamentului prudent şi invers. În acelaşi timp, evoluția sistemului către un comportament explorativ reprezintă o tendință *eterogenizatoare***,** căreia i se opune una *omogenizatoare*, reprezentată de evoluția acestuia spre un comportament prudent (figura 4.30.). Actualizarea completă a comportamentului explorativ ar însemna astfel atingerea ireversibilă a unei stări haotice de maximă eterogenizare, iar absoluta actualizare a comportamentului prudent ar reprezenta atingerea stării de maximă omogenizare, în care robotul rămâne permanent blocat într-o stare sterilă, de echilibru, în care nu mai explorează deloc mediul. Acesta poate constitui un exemplu concret în care, după cum afirmă Basarab Nicolescu, ambele extreme, absoluta eterogenizare precum şi absoluta omogenizare conduc la o ireversibilă imobilitate [18], [173].

Funcționarea optimă a sistemului mecatronic se realizează atunci când antagonismul actualizare-potențializare, respectiv omogenizare-eterogenizare e maxim. Această situație corespunde, pe de-o parte, regimului dinamic atins de sistemul mecatronic prin autoorganizarea homeokinetică, iar pe de altă parte, corespunde *stării T* a epistemologiei lupasciene, concept de referință al metodologiei transdisciplinare a lui Basarab Nicolescu.

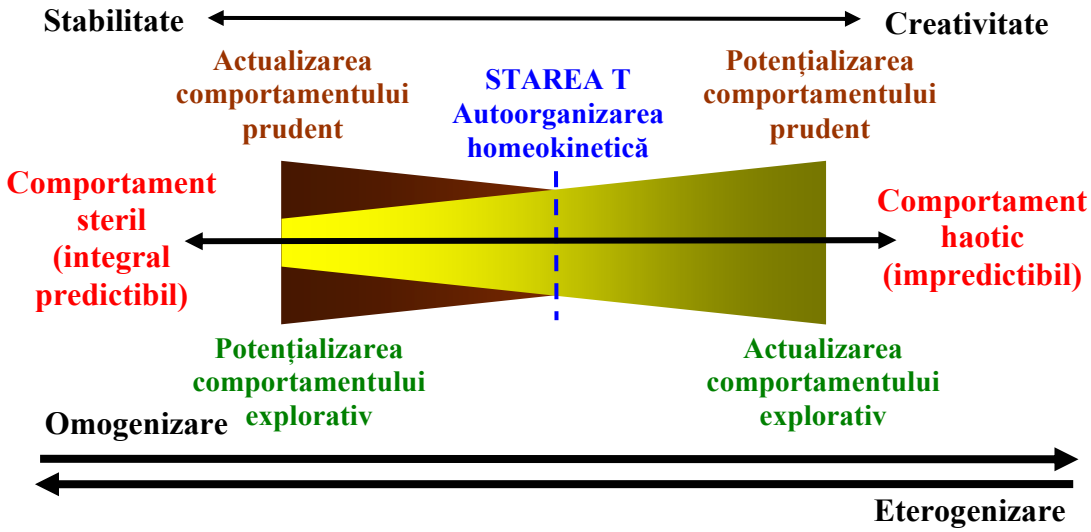


Figura 4.30. Corelațiile existente între dublul antagonism actualizare-potențializare, respectiv eterogenizare-omogenizare şi autoorganizarea homeokinetică a sistemelor mecatronice

Autoorganizarea homeokinetică se realizează, deci, prin *adaptarea modelului intern al robotului la realitatea exterioară*. Astfel, *principiul homeokinetic asigură armonia dinamică dintre lumea interioară şi cea exterioară a sistemului mecatronic* [56]. *Mutatis mutandis*, în viziunea transdisciplinară, cunoaşterea este, concomitent, interioară şi exterioară, studiul ființei umane şi al lumii în care aceasta trăieşte susținându-se reciproc.

4.11. Autoorganizarea prin stigmergie a sistemelor mecatronice multiagent

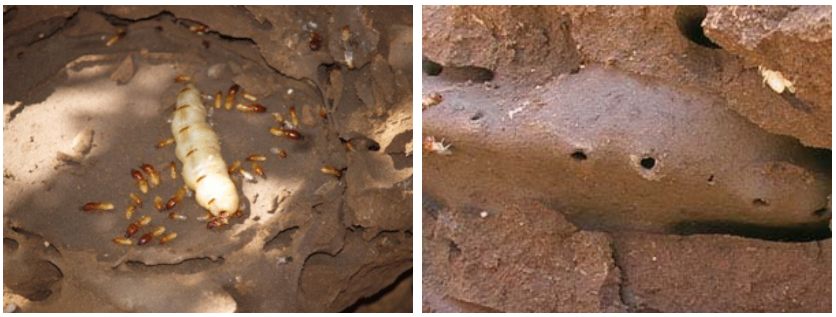
4.11.1. Inteligența colectivă

Pentru a înțelege mecanismul care permite *autoorganizarea sistemelor mecatronice multiagent*, trebuie sa se coreleze teoria autoorganizării sistemelor complexe cu doi termeni: *inteligența colectivă* (*collective intelligence*) şi *inteligența swarm* (*swarm intelligence*). Conceptul de *inteligență colectivă*, propus în 1911 de către Wheeler [226], a fost mai întâi utilizat pe larg în literatura de specialitate privind comportamentul *insectelor sociale* [266], o categorie aparte de insecte care au în comun trei caracteristici [180]:

- există în colectiv o *diviziune a muncii* (în sensul că o parte dintre indivizi muncesc, o alta e responsabilă de reproducere etc.);
- sunt capabile să *coopereze* în vederea realizării anumitor sarcini;
- în interiorul colectivității se întâlnesc *cel puțin două generații succesive active*.

Din categoria insectelor sociale fac parte peste 10.000 de specii de furnici, cam 2200 de specii de termite, sute de specii de viespi, precum şi câteva sute de specii de albine. Multe

dintre aceste colective formate din insecte sociale sunt capabile, fără a urma un plan prestabilit şi *utilizând doar informația locală*, să construiască *structuri extrem de complexe şi coerente la nivel global,* aceste structuri reprezentând pattern-ul emergent rezultat în urma unor interacțiuni elementare insectă-insectă, precum şi insectă-mediu înconjurător. De pildă, termitele *Macrotermes subhyalinus* sunt capabile, prin procedeul amintit, să construiască un adăpost în jurul reginei comunității, dimensiunile acestuia fiind adaptate celor ale corpului reginei (figura 4.31) [39], [284].



a. **b.**

Figura 4.31. Termitele *Macrotermes subhyalinus* construiesc un adăpost în jurul reginei comunității (a). Adăpostul (b) e prevăzut cu mici orificii prin care termitele lucrătoare hrănesc regina şi îi mută ouăle (preluat de la [284])

De asemenea, furnicile *Leptothorax albipennis* îşi protejează puii construind un zid în jurul acestora, folosind ca „material de construcție" mici particule de pământ, grăunțe fine de nisip şi pietricele [29], [83].

În general, inteligența colectivă caracterizează comportamentul stochastic, *adaptabil* [213], al unui colectiv format din agenți capabili ca, fără a urma un plan prestabilit şi utilizând doar informația *locală*, să construiască structuri complexe şi coerente la nivel *global*.

4.11.2. Inteligența swarm şi organizarea stigmergică a sistemelor colective ale lumii vii

Pornind de la studiul unor sisteme multi-robot, Beni şi Wang [13], [14] au propus conceptul de inteligență swarm (*swarm intelligence*) pentru a descrie comportamentul unui sistem care, deşi e compus din unități non-inteligente, e capabil să realizeze sarcini colective. Întrucât nu există încă o definiție general acceptată a inteligenței swarm [80] şi având în vedere strânsa legătură dintre aceasta, inteligența colectivă, emergență şi autoorganizare, se va considera *inteligența swarm* ca fiind specifică unui sistem colectiv care, deşi este format din *agenți relativ simpli*, e capabil să se autoorganizeze, în urma *interacțiunilor cu caracter local* de tip *agent-agent*, precum şi de tip *agent-mediu înconjurător*. Agenții sunt *autonomi,* fiecare în parte reprezentând un subsistem care interacționează cu mediul înconjurător fără a urma un plan prestabilit [79]. *Organizarea sistemelor swarm se produce descentralizat*, adică în lipsa oricărei influențe externe cu caracter coercitiv,[182], [227], [260]. Structurile emergente proprii inteligenței swarm sunt rezultatul acțiunii colective a agenților între care, de cele mai multe ori, comunicarea este de tip *stigmergic*.

Studiind sistemele colective ale insectelor sociale, entomologul francez Pierre-Paul Grassé a introdus, în anul 1959, conceptul de *stigmergie*, pentru a explica faptul că termitele, deşi nu comunică *direct* între ele, reuşesc să ridice, pornind de la un grăunte de pământ, adevărate edificii complexe (figura 4.32), care pot fi asemuite cu nişte „catedrale" [97], având dimensiuni de zeci de mii de ori mai mari decât mărimea unei termite [29].

a. **b.**

Figura 4.32. Prin aglomerări de bulgări de pământ, termitele construiesc (a), fără a comunica direct una cu alta, edificii de zeci de mii de ori mai mari decât mărimea unei termite (b) (preluat de la [285])

Construcția unui cuib de termite traversează două faze [97]. Prima fază este una *dezordonată*, în cursul căreia termitele lucrătoare depozitează mici bulgări de pământ la întâmplare; în acest timp, fiecare bulgăre este impregnat cu *feromon*, un hormon care atrage alte termite. Existența depozitului, inițial dezordonat, de bulgări de pământ impregnați cu feromon atrage alte termite, stimulându-le astfel să acumuleze mai mult material în zonă.

Finalul primei faze reprezintă de fapt un *punct de bifurcație*, care apare la o anumită *valoare critică* a densității termitelor; în cazul în care densitatea termitelor este sub valoarea critică, atracția hormonului va scădea între două treceri succesive ale termitelor, ceea ce conduce, în final, la *stingerea fluctuațiilor* locale din zonă, prin efectul de *feed-back negativ*, care are ca efect permanentizarea comportamentului dezordonat al insectelor. Dacă însă densitatea termitelor depăşeşte valoarea critică, *fluctuațiile sunt amplificate* şi apare a doua fază, cea *ordonată*, care va conduce, în final, la transformarea aglomerării de bulgări din pământ într-un „stâlp" al cuibului. Densitatea ridicată a termitelor conduce la creşterea probabilității ca acestea să depoziteze bulgării în zonă, ceea ce, prin atracția crescândă a feromonului, va creşte densitatea termitelor, fenomen care va stimula mai mult creşterea concentrației feromonului etc. [39]. Apariția fazei ordonate este datorată *efectului autocatalitic* [67], care are loc prin mecanismul de *feed-back pozitiv* (figura 4.33).

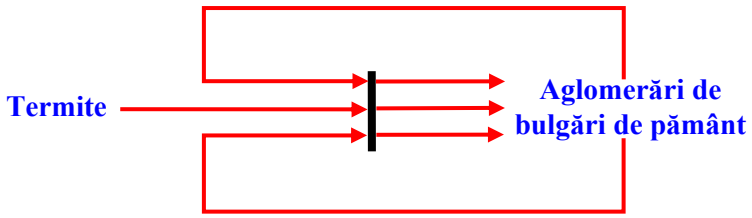


Figura 4.33. Rolul mecanismul de feed-back pozitiv în organizarea stigmergică a comportamentului termitelor

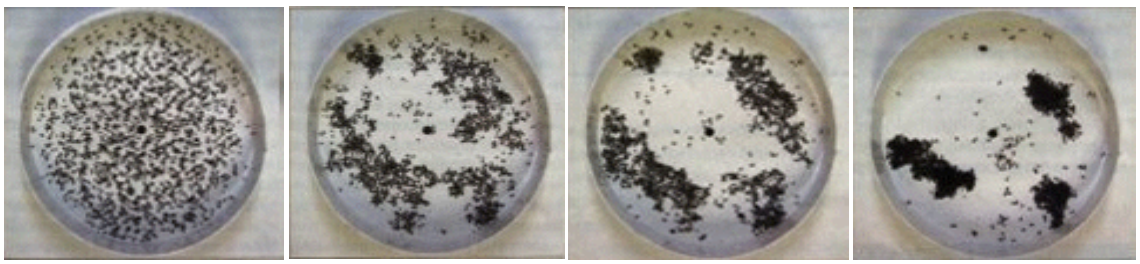
După cum observă Grassé, „coordonarea sarcinilor şi regularitatea construcțiilor nu depinde direct de «lucrători» (una dintre categoriile colectivului de termite), ci de construcțiile înseşi". *Lucrătorii nu îşi coordonează munca, ci, într-un fel, ei sunt ghidați de aceasta.* E vorba aici de o formă aparte de stimulare, numită *stigmergie* (*stigma* – stimul; *ergon* – lucru, muncă). Cu alte cuvinte, insectele acționează independent, dar, prin *urmele lăsate în mediul*

înconjurător (feromon, materie mai mult sau mai puțin structurată etc.), stimulează comportamentul colectiv [266]. În sens larg, termenul de „stigmergie" e folosit pentru a desemna orice *comunicare indirectă*, mediată de modificările apărute în mediul înconjurător, *între mai mulți indivizi*, care a fost observată în cazul altor grupuri de insecte: albine, viespi etc. [218]. De pildă, întărirea urmelor lăsate în mediul înconjurător de anumite specii de furnici, printr-un mecanism de feed-back pozitiv, permite acestor insecte să „detecteze" şi să exploateze cea mai bogată sursă de hrană dintr-o anumită regiune şi să găsească cea mai scurtă cale dintre muşuroi şi sursă [30]. Prin urmare, procesul stigmergic reprezintă o succesiune de secvențe comportamentale de tip stimul-răspuns care contribuie la coordonarea dintre insecte, *mediul exterior având rol de canal de comunicare* [158].

Un remarcabil proces stigmergic, la care se va reveni în cele ce urmează, este acela prin care unele furnici sunt capabile să-şi sorteze larvele în două feluri: gruparea larvelor dintr-un anumit tip într-o unică grămadă, precum şi sortarea a două tipuri diferite de larve, formând două grupuri diferite [54].

Interesant se dovedeşte a fi şi modul în care insectele numite *Leptothorax unifasciatus* sunt capabile, tot prin stigmergie, să-şi „aranjeze" tipurile diferite de larve sub forma unor cercuri concentrice (între care distanța creşte progresiv în diverse stadii ale dezvoltării), sortare numită *inelară* [84].

O altă formă de manifestare a stigmergiei este ilustrată în figura 4.34, unde se poate observa modul în care o colonie de furnici lucrătoare, *Messor Sancta*, reuşeşte să grupeze, sub forma unor clustere, 1500 de furnici moarte, inițial distribuite uniform (figura 4.34.a) într-o arenă circulară cu diametrul de 25 cm [29], [237]. În figură, colonia e fotografiată în starea inițială (figura 4.34.a), la 3 ore (figura 4.34.b), la 6 ore (figura 4.34.c), respectiv la 36 de ore (figura 4.34.d) de la debutul experimentului.



a. **b.** **c.** **d.**

Figura 4.34. Proces stigmergic în urma căruia colonia de furnici *Messor Sancta* separă 1500 de furnici moarte (inițial distribite uniform) sub forma unor clustere. Colonia e fotografiată în starea inițială (a), la 3 ore (b), la 6 ore (c), respectiv la 36 de ore (d) de la debutul experimentului. (preluat de la [237])

Putem sintetiza cele de mai sus astfel: pornind de la *interacțiile multiple de tip stigmergic* dintre un colectiv de insecte şi mediu, poate apărea, prin combinarea mecanismelor de feed-back pozitiv (stimularea reciprocă a densității termitelor şi feromonului într-o anumită zonă) şi feed-back negativ (scăderea densității feromonului în alte zone), o amplificare a fluctuațiilor (aglomerările locale de bulgări de pământ), care conduce prin bifurcații (tranziția de la prima la a doua fază a construcției cuibului) la emergența unei structuri spațio-temporale („stâlpii cuibului") într-un mediu inițial omogen şi multistabilitate („stâlpii" pot apărea în diverse locuri). Prin urmare, stigmergia permite anumitor colective de „insecte sociale" să se autoorganizeze prin intermediul interacțiunii indivizilor cu mediul înconjurător [30], [31], [219].

4.11.3. Autoorganizarea stigmergică a sistemelor multiagent

Stigmergia poate fi extinsă şi la alte domenii în care sisteme multi-agent[69] formate din entități relativ simple, primitive, exploatând relația sistem - mediu înconjurător, pot să se autoorganizeze. În acest sens, orice schimbare produsă de un agent în mediul înconjurător joacă rol de *semn* pentru alți agenți [119], mediul exterior reprezentând canalul de transmitere a informației (figura 4.35).

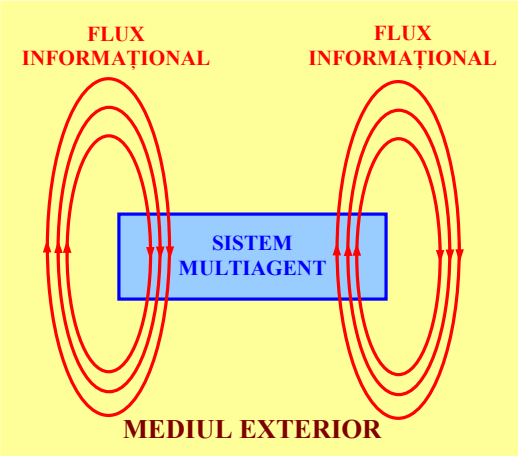


Figura 4.35. În autoorganizarea de tip stigmergic a unui sistem multiagent mediul exterior se comportă ca un canal de transmitere a informației

Pentru stabilirea modurilor în care stigmergia favorizează emergența pattern-urilor specifice sistemelor complexe, sunt necesare câteva precizări legate de semnificația conceptului de *autoorganizare* în contextul *comunicării stigmergice*. Bonabeau împreună cu colegii săi înțeleg autoorganizarea ca „un set de mecanisme dinamice care permit apariția unor *stucturi la nivel global*, ca urmare a interacțiunilor care au loc între componente situate la nivel inferior[70] în sistem", în sensul că regulile cărora sunt supuse aceste interacțiuni sunt „executate doar pe baza *informației locale*, fără ca acestea să aibă vreo legătură cu pattern-ul de la nivel global", acest pattern fiind „o proprietate emergentă a sistemului, mai degrabă decât o proprietate impusă sistemului de către influențe exterioare acestuia" [32] (s.n.).

Bonabeau şi colectivul identifică *patru trăsături fundamentale* ale sistemelor capabile de autoorganizare:

- feed-back-ul pozitiv,
- feed-back-ul negativ,
- amplificarea fluctuațiilor,
- prezența interacțiunilor multiple.

Pe lângă acestea, sunt evidențiate *trei caracteristici* ale acestor sisteme:

- apariția structurilor spațio-temporale stabile într-un mediu inițial omogen;
- multistabilitatea (posibilitatea ca sistemul să atingă diferite stări stabile);

[69] În lucrarea de față, prin sistem multiagent se înțelege un sistem format din cel puțin doi agenți care pot interacționa, direct sau indirect, între ei, în vederea realizării unor scopuri comune.
[70] În original, *lower-level components*.

- existența bifurcațiilor [41].

Holland şi Melhuish [125] au nuanțat termenul de „sigmergie" introdus de Grassé, observând faptul că schimbările anterioare ale mediului pot influența în trei feluri comportamentul agentului:

- pot determina *tipul acțiunii* pe care acesta urmează s-o execute (efect calitativ);
- pot lăsa neschimbat tipul acțiunii, dar să afecteze unul sau mai mulți *parametri* ai acesteia, cum ar fi durata, forța, frecvența etc. (efect cantitativ);
- nici acțiunea, nici vreun parametru nu sunt modificate, ci doar *rezultatul* acesteia este afectat (efect care poate fi calitativ, cantitativ sau ambele).

Primele două modalități afectează agentul însuşi sau, mai precis, *percepția* sa, de aceea sunt *procese stigmergice active*, pe când ultima, prin care alterarea mediului de către un agent determină modificarea schimbărilor produse în mediu de alt agent, este un *proces stigmergic pasiv* [71] [124].

Folosind aceste delimitări, Holland şi Melhuish definesc stigmergia ca „un mecanism care permite unui mediu să se auto-structureze prin intermediul agenților din interiorul acestui mediu", scopul stigmergiei fiind ca, prin trei posibile tipuri de schimbări ale mediului (poate fi luat material din mediu, poate fi adăugat material mediului sau pot fi alterate anumite proprietăți ale acestuia), schimbări care pot declanşa una dintre cele trei tipuri de stigmergie menționate mai sus, să fie afectate cele două abilități ale agentului: *mişcarea* sa prin mediu, respectiv *acțiunea* agentului asupra mediului.

În urma comunicării stigmergice dintre un sistem oarecare format din agenți mobili şi mediul înconjurător se evidențiază o dublă emergență:

- *emergența unor pattern-uri organizaționale de tip social*, sub forma structurării la nivel ridicat a colectivului de agenți prin intermediul corelațiilor care se manifestă la nivelul întregului sistem;
- *emergența structurilor stabile în mediul înconjurător*, sub forma aglomerărilor de grăunțe, stâlpii cuiburilor termitelor etc.

Coordonarea globală a agenților (pattern-urile organizaționale la nivel social) generează structurile stabile în mediu care, la rândul lor, influențează distribuția agenților, deci organizarea acestora. Pe scurt, există o cauzalitate circulară, prin intemediul căreia se produc structuri spațio-temporale stabile atât în interiorul sistemului colectiv de agenți cât şi în mediul înconjurător.

4.11.4. Autoorganizarea prin stigmergie a sistemelor mecatronice multiagent

Aplicarea inteligenței swarm şi, în particular, a stigmergiei în domeniul mecatronicii, în speță la colectivele de roboți autonomi, s-a dovedit a fi extrem de incitantă [5], întrucât o comunicare indirectă, de tip stigmergic, nu este nici pe departe atât de sofisticată precum

[71] De exemplu, dacă un agent lasă în urmă obiecte pentru a fi ridicate de către un altul, avem de-a face cu o stigmergie activă, iar în cazul în care un agent ridică un obiect dintr-un grup ordonat format de alți agenți, stigmergia este pasivă.

comunicarea directă[72]. În contrast cu procesul *centralizat* de coordonare prin comunicare directă, comunicarea stigmergică este *descentralizată*, realizându-se între agenți care nu trebuie înzestrați cu memorie sau cu abilitatea de a-şi putea localiza spațial poziția, deci între agenți care nu trebuie să codifice şi decodifice mesaje. Comportamentul acestor agenți poate fi foarte simplu, fiind necesar doar ca aceştia să poată fi influențați de schimbările produse de alți agenți în mediul înconjurător [266].

În acest context, Beni a introdus conceptul de *cellular robotic systems*, pentru a desemna un colectiv format din roboți autonomi, non-inteligenți, fară capacitatea de a se sincroniza, între care există o comunicare limitată (pot comunica doar agenții adiacenți), roboții cooperând pentru îndeplinirea unor sarcini concrete într-un mediu finit, format din celule *n*-dimensionale [14]. În 1987, Reynolds a propus un model[73] care simula pe un computer comportamentul colectiv al unui stol de păsări [194], după care au urmat multe alte programe care simulau autoorganizarea colectivelor de furnici, peşti sau chiar a unor sisteme multi-agent compuse din creaturi virtuale [16].

În 1991, Deneubourg ş.a. [54], pornind de la modul în care furnicile îşi sortează larvele, au simulat comportamentul unui colectiv de roboți cu memorie de scurtă durată, care se mişcă aleator, nu sunt organizați ierarhic şi *nu pot comunica direct* între ei. Un robot trebuia doar să poată interacționa senzorial cu obiectele din față, să distingă între diverse tipuri de obiecte şi să sesizeze diferențele locale ale densității diferitelor tipuri de obiecte. Algoritmul folosit, bazat pe comunicarea stigmergică a furnicilor, conducea la apariția unui feed-back pozitiv, generat de faptul că probabilitatea ca roboții să ridice sau să elibereze un obiect depindea de câte obiecte de acelaşi tip au întâlnit în trecut [266]. Colectivul simulat de roboți s-a dovedit a fi capabil ca, în final, să realizeze cele două sarcini pe care le pot îndeplini furnicile: organizarea obiectelor de un singur tip sub forma unei grămezi (*cluster*), precum şi sortarea şi gruparea obiectelor de două tipuri diferite.

Confirmarea faptului că un colectiv de *agenți fizici* poate fi capabil de autoorganizare prin comunicare stigmergică a fost dovedit în 1994 de Beckers ş.a. [12], care au demonstrat că ceea ce a fost simulat de către Deneubourg ş.a. poate fi realizat prin exploatarea interacțiunii unor roboți *reali* (fără memorie, incapabili să detecteze dacă mişcă sau nu un obiect, dotați doar cu abilitatea de a detecta dacă densitatatea locală a obiectelor depăşeşte sau nu o anumită valoare) cu mediul *real* .

Pentru a exista cât mai multe similitudini cu mecanismul simplu al comportării insectelor, Holland şi Melhuish [125] au folosit un colectiv format din roboți[74] identici (figura 4.36), neînzestrați cu abilități de orientare spațială, fără memorie, dar care pot distinge între diferite tipurile de obiecte (în particular frisbee-uri cu diametrul de 23 cm), în funcție de culoarea sau forma lor. Roboții se pot mişca în interiorul unei arene de dimensiuni mari în raport cu cele ale roboților (arena e de formă hexagonală, fiecare latură a sa având 4 metri), la fel ca şi

[72] În colectivele de roboți care sunt coordonați prin comunicare directă, un robot-coordonator trebuie să codifice şi apoi să transmită instrucțiuni altora; mesajele care conțin instrucțiunile pot fi recepționate doar de căte roboții care nu sunt angajați în executarea altor sarcini şi care, în plus, sunt suficient de aproape de robotul-coordonator. Mesajul primit de către agenți trebuie să fie decodificat şi memorat de către aceştia un timp suficient de lung pentru a executa sarcina.

[73] În original, *boid model*.

[74] Designul robotului folosit a fost inspirat în principal de studiile lui Franks ş.a. [84] privind comportamentul a două specii de furnici *Leptothorax tubero-interruptus* şi *Leptothorax unifasciatus*. Acestea trăiesc în crăpăturile stâncilor sub forma unor mici colonii (având de la 50 la câteva sute de indivizi); datorită constrângerilor impuse de specificul mediului, furnicile sunt extrem de bine adaptate vieții bidimensionale, fapt care justifică similitudinile existente între comportamentului acestora şi cel al roboților folosiți în experimentele care urmează a fi descrise.

insectele, al căror comportament este adaptat vieții în spații bidimensionale largi. Distribuția inițială a obiectelor în arenă a fost omogenă (figura 4.37.a).

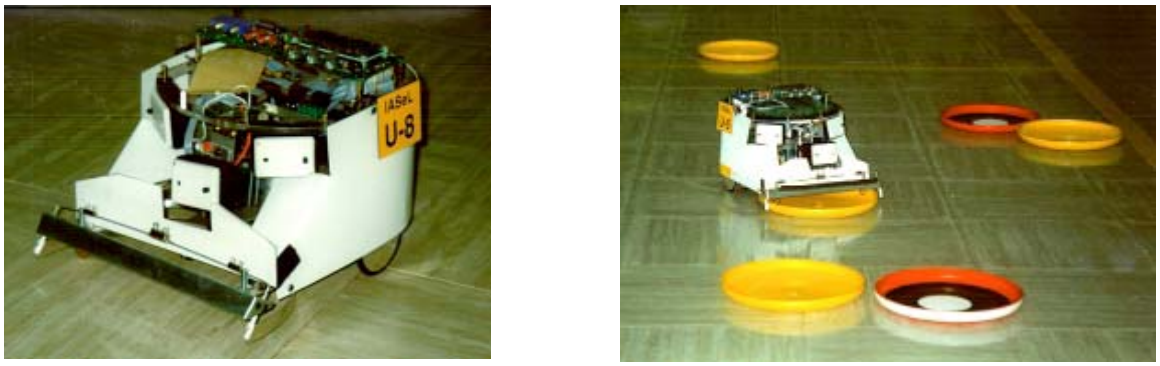
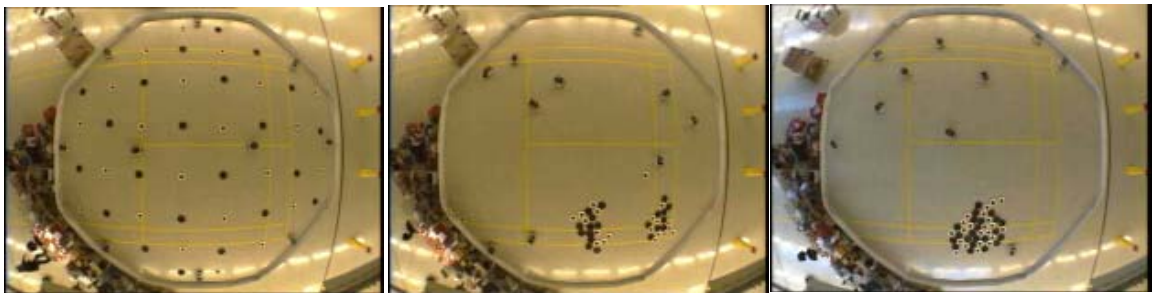


Figura 4.36. Robotul U, folosit de Holland şi Melhuish (preluat din [125])

Dezvoltând un algoritm similar celui folosit de Beckers ş.a. [12], algoritm care, printr-un mecanism ingenios, permite robotului să ridice (prin intermediul gripper-ului) un singur obiect *doar* dacă acesta nu e în contact cu alt obiect, inclusiv în cazul în care obiectul izolat este lângă pereții arenei, Holland şi Melhuish confirmă concluziile lui Beckers ș.a.: un colectiv de roboți (10 la număr) înzestrați cu abilități minime, fără organizare ierarhică, e capabil, prin comunicare indirectă, stigmergică, să grupeze progresiv obiecte (în număr de 44) de un singur tip sub forma unor clustere tot mai puține şi mai mari (figura 4.37.b) pentru ca, după un timp suficient de lung (puțin peste 8 ore în cazul experimentului descris), toate obiectele să fie grupate într-un singur cluster bine conturat (figura 4.37.c).

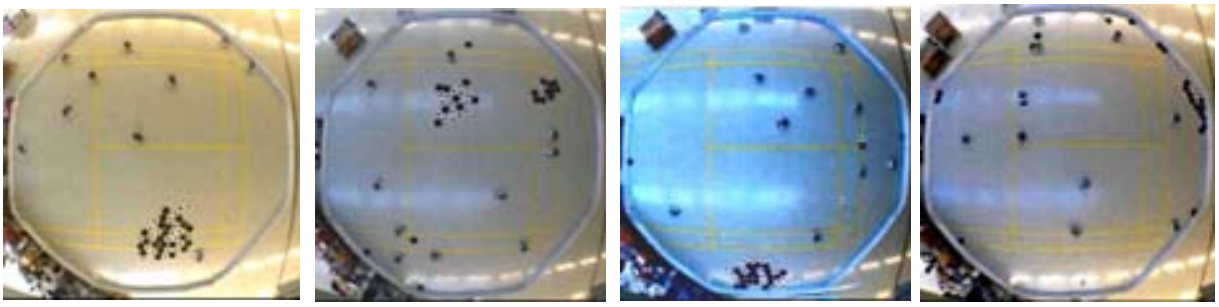


a. **b.** **c.**

Figura 4.37. Un colectiv de 10 roboți înzestrați cu abilități minime, fără organizare ierarhică, e capabil, prin comunicare stigmergică, să grupeze progresiv 44 de obiecte distribuite inițial uniform (a) sub forma unor clustere tot mai puține şi mai mari (b) pentru ca, în final, toate obiectele să fie grupate într-un singur cluster bine conturat (c) (preluat din [125])

Mai departe, algoritmul este modificat astfel încât probabilitatea p ca un robot să ridice un obiect din apropierea pereților arenei să poată lua diverse valori. Rezultatele experimentale arată că, pentru $p > 0{,}88$, tendința este de a se forma, în final, un singur cluster, aproape de centrul arenei (figura 4.38.a). În plus, se observă că, pe măsură ce p scade către valoarea de 0,88, trecerea de la doi clusteri la clusterul final se face tot mai greu. Astfel, dacă, de pildă, pentru $p = 0{,}9$, experimentul este oprit după aproximativ 5 ore, se observă doi clusteri centrali, bine conturați (figura 4.38.b). Pentru $p = 0{,}88$ se formează un singur cluster, bine conturat, aproape de pereții arenei (figura 4.38.c), urmând ca, pentru valori mai mici ale

probabilității, clusterul de la margine să conțină din ce în ce mai puține obiecte, care au tendința, pe măsură ce *p* scade, să se risipească în preajma periferiei (figura 4.38.d).



a. $p = 1{,}00$ **b.** $p = 0{,}9$ **c.** $p = 0{,}88$ **d.** $p = 0{,}80$

Figura 4.38. Clusterele formate de colectivul de roboți pentru diverse valori ale probabilității ca un robot să ridice un obiect situat în apropierea pereților arenei (preluat din [125])

Interpretările aduse de către Holland şi Melhuish acestor rezultate conduc la concluzii remarcabile. Mai întâi, aceştia subliniază asemănarea dintre comportamentul roboților şi cel al furnicilor. Furnicile au tendința de a forma clustere situate la marginea „arenei", dacă limitele acesteia sunt foarte aproape de muşuroiul lor [30]. Similar, în cazul colectivului de roboți, cu cât scade probabilitatea de a ridica obiectele periferice – deci *condițiile la limită ale sistemului se modifică* – cu atât mai pronunțată este tendința agenților de a „împinge" clusterul spre marginea arenei.

În continuare, se dovedeşte că sistemul de roboți are toate cele trei caracteristici ale sistemelor capabile de autoorganizare:

- conturarea clusterelor formate din obiectele care au fost distribuite inițial uniform indică *apariția structurilor spațio-temporale într-un mediu inițial omogen*;
- sistemul poate accede la *stări stabile diferite (multistabilitate)*, fapt dovedit prin apariția unei stări noi la $p = 0{,}88$;
- *existența bifurcațiilor care pot fi descrise parametric*, ilustrată prin tranziția de la clusterul central la cel periferic în jurul probabilității de 0,88.

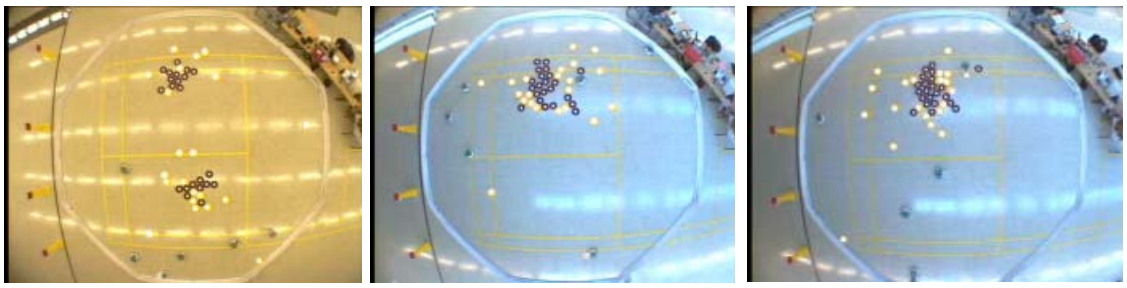
Astfel, corelațiile stabilite experimental conduc înspre concluzia potrivit căreia „furnicile şi sistemul de roboți au la bază acelaşi principiu al autoorganizării mediate stigmergic" [124].

Autorii experimentului dovedesc faptul că tranziția spre clusterul periferic se poate face nu doar modificând algoritmul, ci şi setând corespunzător parametrii senzorilor roboților, schimbare care influențează modul în care aceştia interacționează cu marginea arenei. Holland şi Melhuish au construit un algoritm[75] prin care colectivul de roboți a reuşit *segregarea*[76] *inelară* a două tipuri diferite de obiecte. Autorii evidențiază în acest mod similitudinile dintre comportamentul colectivului de roboți şi cel al insectelelor *Leptothorax unifasciatus* [84]. Se utilizează două tipuri de obiecte, să spunem de tip A, respectiv B[77]. Algoritmul e construit în aşa fel încât, dacă un robot întâlneşte un obiect de tip A care este în contact cu alt obiect, lasă obiectul pe loc, fără a modifica ceva, iar dacă robotul atinge un obiect de tip B care e în

[75] În original, *pullback algorithm*.
[76] Prin „segregare" se înțelege aici gruparea a două sau mai multe clase de obiecte astfel încât aria pe care o ocupă fiecare clasă nu conține obiecte care aparțin celeilalte clase.
[77] *Ring frisbee*, respectiv *plain frisbee* în experimentul original.

contact cu un altul, obiectul de tip B este mutat (în spate) la o distanță oarecare (reglabilă) de punctul de contact. În cazul în care robotul întâlneşte obiecte izolate, indiferent de tip, acestea sunt ridicate şi depozitate lângă un alt obiect, ciocnit de către robotul în mişcare. În anumite zone apar aleator, după un timp, mici aglomerări, în urma *interacțiunilor multiple*. Probabilitatea ca un obiect transportat de către robot să fie lăsat lângă un alt obiect e cu atât mai mare cu cât densitatea acestora într-o anumită zonă e mai ridicată, întrucât şansele ca robotul să traverseze un grup de obiecte sunt cu atât mai mici cu cât grupul este mai dens. Din motive similare, probabilitatea ca un grup să piardă un obiect, prin ridicarea acestuia de către robot, scade pe măsură ce creşte densitatea grupului (odată cu creşterea densității scad şansele ca un robot să întâlnească în interiorul grupului un obiect izolat).

În concluzie, cu cât un grup este mai dens, cu atât creşte probabilitatea de a i se ataşa noi obiecte, prin *feed-back pozitiv* şi, în acelaşi timp, scade probabilitatea ca grupul să piardă obiecte prin *feed-back negativ*. Se manifestă, deci, un efect de *amplificare a fluctuațiilor* (a micilor aglomerări): cu cât clusterul e mai mare, cu atât mai repede va creşte acesta. Astfel, după o oră şi 45 de minute se observă apariția a două clustere şi o segregare parțială a celor două tipuri de obiecte (figura 4.39.a), pentru ca, după 7 ore şi 35 minute, să se contureze forma unui singur cluster (figura 4.39.b).



a. **b.** **c.**

Figura 4.39. Segregarea inelară a două tipuri de obiecte realizată de sistemul mecatronic multiagent capabil de autoorganizare stigmergică (preluat din [125])

În altă ordine de idei, datorită algoritmului folosit, orice obiect izolat va fi împins de către roboți înspre interiorul clusterului, orice obiect de tip A în contact cu un alt obiect va rămâne unde este, iar orice obiect de tip B care atinge un alt obiect, va fi împins de către robot în sens invers mişcării acestuia, deci înspre periferia clusterului. Pattern-ul format în final, după 8 ore şi 5 minute, este unul de formă inelară: un singur cluster, format aproape exclusiv din obiecte de tip A, înconjurat de un „inel" destul de bine conturat, compus din obiecte de tip B (figura 4.39.c). Aşadar, sistemul mecatronic multiagent studiat posedă, alături de cele trei caracteristici, şi cele patru trăsături ale sistemelor capabile de autoorganizare evidențiate de Bonabeau: cele două mecanisme de feed-back, amplificarea fluctuațiilor şi prezența interacțiunilor multiple; deci sistemul este cababil, prin comunicare stigmergică, să se *autoorganizeze*.

În final, se vor evidenția calitățile sistemelor mecatronice multiagent bazate pe comunicare stigmergică:

- *flexibilitatea* sistemului**:** datorită sensibilității sistemului la modificările apărute în mediu în urma unor perturbații externe, acesta se poate acomoda (fără a neglija, însă, riscul apariției comportamentului haotic), prompt şi repede, acestor schimbări [158];
- *robustețea* sistemului, acesta refăcându-se rapid în urma pierderii câtorva agenți;

- structurarea sistemului are loc *descentralizat*, emergența pattern-urilor fiind doar consecința autoorganizării acestuia [227];
- *simplitatea* agenților, aceştia fiind dotați la nivel minim cu memorie şi cu un comportament stochastic, simplu;
- *autonomia* agenților;
- *scalabilitatea* sistemului, colectivul putând conține de la mai puțin de zece, până la milioane de agenți.

Concluzionând, în urma comunicării stigmergice dintre un sistem mecatronic format din agenți simpli, mobili şi mediul înconjurător se produc, structuri spațio-temporale stabile, atât în interiorul sistemului mecatronic cât şi în mediul înconjurător. În consecință, prin intermediul *fluxului informațional* care traversează, succesiv, sistemul mecatronic şi mediul său exterior, acestea se autoorganizează [16]. Prin comunicarea de tip stigmergic, sistemul mecatronic deschis *transgresează*, din punct de vedere informațional, propriile sale limite, dinamica mediului exterior fiind *integrată* în activitatea sistemului însuşi. Astfel, relația dintre sistemul mecatronic multiagent şi mediu se dovedeşte a fi una *sinergică*, care favorizează emergența unui tip superior de integrare: *integrarea informațională* (figura 4.40) [16].

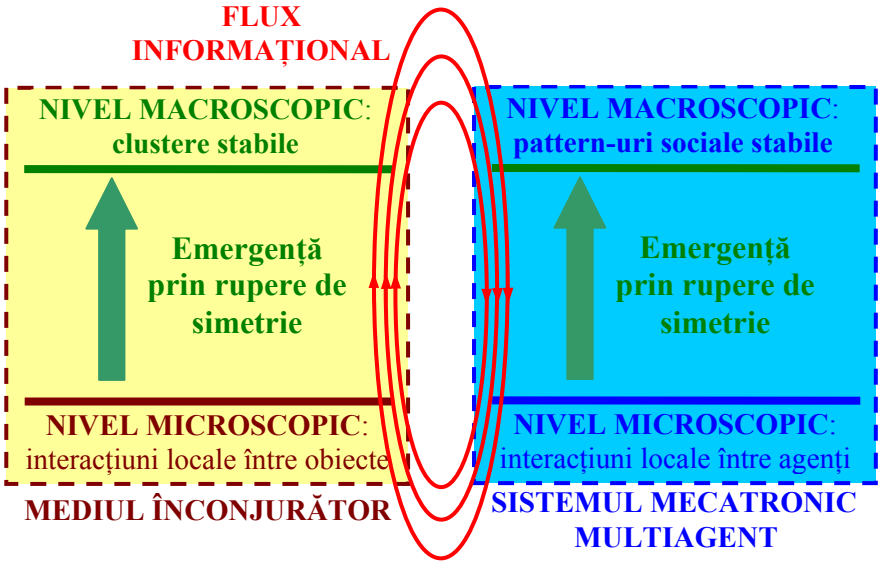


Figura 4.40. Prin autoorganizare stigmergică, sistemul mecatronic multiagent deschis transgresează, din punct de vedere informațional, propriile sale limite, dinamica mediului exterior aflându-se într-o relație sinergică cu activitatea sistemului

4.12. Concluzii

Studiul autoorganizării sistemelor deschise constituie în prezent unul dintre cele mai fertile domenii de investigație, fiind strâns legate de posibilitatea emergenței pattern-urilor coerente la nivel global în sistemele complexe. Cum sistemele mecatronice se disting printr-o remarcabilă complexitate, comparabilă uneori chiar cu sistemele din lumea vie, cercetarea posibilităților prin care aceste sisteme se pot autoorganiza devine un imperativ. Acest demers nu este posibil fără studiul termodinamicii neliniare, teoriei complexității şi al ciberneticii.

Astfel, în prima parte a capitolului s-a analizat comportamentul sistemelor termodinamice închise, a căror evoluție ireversibilă, descrisă de cel de-al doilea principiu, este complet

previzibilă, punctul final fiind starea de echilibru, stare în care condițiile inițiale sunt „uitate", iar rezistența sistemului în fața perturbațiilor externe e maximă. În continuare s-a justificat faptul că, deşi sistemele deschise aflate aproape-de-echilibru (al căror comportament se supune legilor termodinamicii liniare), ajung, în final, într-o stare staționară caracterizată de o producție nenulă de entropie, starea este stabilă, lipsită de activitate la nivel global. Previzibilitatea, „uitarea condițiilor inițiale", specifice sistemelor termodinamicii de echilibru şi celor ale termodinamicii liniare, nu permit manifestări spontane, schimbări bruşte de direcție care să poată favoriza apariția unor forme de autoorganizare, de complexitate sporită.

În continuare, s-a definit echilibrul homeostatic al unui sistem şi s-a arătat (atât teroetic cât şi prin exemple din mecatronică şi lumea vie) că rolul acestuia este doar unul de autoreglare, care permite sistemului ca, prin feed-back negativ, să-şi mențină funcționalitatea, atenuând perturbațiile provenite din mediul exterior. Cum echilibrul homeostatic are un caracter în esență pasiv, fiind incapabil de a folosi perturbațiile pentru a genera noi structuri, s-a justificat faptul că studiul autoorganizării unui sistem trebuie să pornească de la investigarea comportamentului sistemelor termodinamice suficient de departe de echilibru încât comportarea lor neliniară să permită, prin feed-back pozitiv, amplificarea perturbațiilor externe. Această amplificare poate conduce, prin bifurcații şi ruperi de simetrie, la autoorganizarea sistemului prin apariția unor pattern-uri spațio-temporale stabile. Descrierea teoretică a autoorganizării a fost completată prin exemple concrete de sisteme capabile de autoorganizare: modelul Brusselator (studiat de grupul Prigogine), agregarea amibelor acrasiale, celulele Bénard etc.

S-au definit şi analizat apoi unele noțiuni fundamentale ale teoriei sistemelor deschise şi ale ciberneticii. Astfel, s-au prezentat semnificațiile unor noțiuni ca: „negentropie", „emergență", „complexitate", „sinergie", „sinergetică", evidențiindu-se totodată legăturile dintre acestea, precum şi relațiile dintre aceste concepte, pe de-o parte, şi informație, respectiv autoorganizare, pe de alta. În acest context, s-a demonstrat că între nivelul microscopic şi cel macroscopic ale unui sistem complex capabil de autoorganizare există o dublă legătură cauzală. În finalul acestei părți, s-a argumentat faptul că sistemele cibernetice adaptabile prin autoorganizare funcționează la limita haosului (*edge of chaos*), zonă aflată între echilibrul homeostatic (spre care e „împins" de feed-back-ul negativ) şi haosul turbulent de non-echilibru (la care poate ajunge prin feed-back pozitiv).

Ultima parte a capitolului este dedicată studiului a două forme de autoorganizare a sistemelor mecatronice complexe: autoorganizarea homeokinetică a unui robot, respectiv autoorganizarea stigmergică a sistemelor mecatronice multiagent.

În ceea ce priveşte prima formă de autoorganizare, după ce s-au evidențiat diferențele dintre stabilitatea homeostatică şi cea homeokinetică, s-a prezentat procedeul prin care principiul homeokinetic asigură evoluția sistemului mecatronic spre un regim dinamic în care se realizează compromisul optim între *creativitate* şi *stabilitate*: sistemul mecatronic este creativ (întrucât explorează regiuni cu factor de risc ridicat), dar totodată stabil (adică predictibilitatea sa e suficient de ridicată pentru a evita haosul turbulent). Modelul teoretic este însoțit de prezentarea câtorva aplicații, care evidențiază similitudinile existente între autoorganizarea sistemelor mecatronice bazată pe principiul homeokinetic şi comportamentul specific sistemelor din lumea vie. Funcționarea optimă a sistemului mecatronic se realizează în timpul regimului dinamic atins de sistemul mecatronic prin autoorganizarea homeokinetică, situație care corespunde stării T a epistemologiei lupasciene, respectiv a metodologiei transdisciplinare.

Studiul autoorganizării stigmergice a sistemelor mecatronice multiagent a debutat cu introducerea termenilor specifici acestei abordări: inteligență colectivă, inteligență swarm, stigmergie. După ce s-au prezentat exemple de autoorganizare a sistemelor de insecte sociale,

s-au evidențiat caracteristicile specifice autoorganizării sistemelor multiagent. În continuare, s-a exemplificat modul în care un sistem mecatronic multiagent format din roboți identici, simpli, se poate autoorganiza prin stigmergie, grupând obiecte sub forma unor pattern-uri spațiale similare celor create de sistemele colective ale lumii vii. În final, s-a subliniat faptul că, datorită *fluxului informațional* care traversează, succesiv, sistemul mecatronic şi mediul său exterior, apar structuri spațio-temporale stabile, atât în interiorul sistemului mecatronic cât şi în mediul înconjurător, ceea ce arată că relația dintre sistemul mecatronic multiagent şi mediu se dovedeşte a fi una *sinergică*, care favorizează emergența unui tip superior de integrare: *integrarea informațională*.

4.13. Contribuții personale

Contribuțiile personale care se regăsesc în capitolul de față sunt:

- evidențierea caracterului interdisciplinar al noțiunii de „autoorganizare”, prin prezentarea similitudinilor dintre autoorganizarea unor sisteme care constituie obiecte de studiu ale unor discipline diferite: reacții chimice (modelul Brusselator, reacții chimice descrise de mecanismul Lotka-Voltera), reacții metabolice (reacții oscilante în lanțul glicolitic), sisteme deschise din lumea vie (amibele acrasiale, termitele *Macrotermes subhyalinus*, furnicile *Leptothorax albipennis*, furnicile *Messor Sancta*), fizică (Celulele Bénard), sisteme mecatronice (autoorganizarea homeokinetică a comportamentului unui robot, autoorganizarea stigmergică a unui sistem mecatronic multiagent);
- stabilirea unor punți între următoarele domenii: mecatronică, termodinamica neliniară, teoria sistemelor, cibernetică;
- nuanțarea semnificațiilor unor concepte de bază din teoria sistemelor, cibernetică şi inteligența artificială: „emergență”, „complexitate”, „sinergie”, „sinergetică”, „inteligență swarm”, „stigmergie”;
- evidențierea caracterului transdisciplinar al conceptului de „homeokinesis”, prin formularea şi argumentarea ideii potrivit căreia funcționarea optimă a sistemului mecatronic se realizează atunci când antagonismul actualizare-potențializare, respectiv omogenizare-eterogenizare e maxim, situație care corespunde, pe de-o parte, regimului dinamic atins de sistemul mecatronic prin autoorganizarea homeokinetică, iar, pe de altă parte, stării T a epistemologiei lupasciene, concept de referință al metodologiei transdisciplinare a lui Basarab Nicolescu.

CAPITOLUL 5

IDENTITATEA TRANS-TEMATICĂ A MECATRONICII. MODELUL HEXAGONAL PENTRU EDUCAȚIE MECATRONICĂ INTEGRALĂ

5.1. Introducere

Până în prezent au existat mai multe încercări de a defini mecatronica [99], dar niciuna dintre ele nu a reuşit să epuizeze înțelesurile acestui concept. Prima definiție a mecatronicii a apărut în documentele depuse, în 1969, de către compania japoneză Yasakawa Electric, în vederea brevetării termenului. Potrivit acesteia, cuvântul „mecatronică" sugerează legătura „intimă şi organică" existentă între componentele electronice şi cele mecanice, până acolo încât devine imposibil de precizat „unde se termină unele şi încep altele" [169]. Integrarea ulterioară a microprocesoarelor în structurile electromecanice a revoluționat proiectarea în inginerie, noile produse solicitând tot mai mult cunoştințe care aparțin unor domenii conexe ingineriei tradiționale, cum ar fi informatica sau fizica.

Astfel, un sistem mecatronic (de la aparatura electrocasnică sau camera video până la automobilele sau roboții moderni) nu trebuie privit doar ca un ansamblu de componente mecanice şi electrice dotat cu unul sau mai multe controlere [28], ci ca rezultatul *integrării sinergice* a tuturor acestor componente. Această idee este conținută într-una dintre cele mai citate definiții ale mecatronicii, cea propusă de către Harashima, Tomizuka şi Fukada în 1996. În opinia lor, mecatronica reprezintă „integrarea sinergică a ingineriei mecanice, electronicii şi controlului inteligent prin intermediul computerului în proiectarea şi fabricarea produselor industriale" [106].

Întrucât mecatronica, prin caracterul său integrator, depăşeşte cadrul unei singure discipline [15], a fi inginer mecatronist azi înseamnă a înțelege şi exploata legătura sinergică dintre ingineria de precizie, teoria controlului, informatică şi tehnologia senzorilor şi actuatorilor [76]. Atingerea acestui obiectiv presupune o mutație: trecerea de la ingineria secvențială la ingineria simultană [162], ceea ce necesită o abordare educațională integratoare [51], care să vizeze dezvoltarea gândirii sistemice a elevilor şi studenților. În opinia lui Craig, „toți inginerii mecanici trebuie să devină ingineri mecatronişti... Profesorii de inginerie mecanică trebuie să propună o abordare integrată a proiectării – mecanică, electronică, teoria controlului, informatică – deci trebuie să devină profesionişti în aceste domenii" [51]. Ca urmare a evoluției tehnologice, conținutul termenului de mecatronică s-a îmbogățit constant cu noi sensuri: filosofie, ştiința maşinilor inteligente, mediu educațional pentru integrare în societatea bazată pe cunoaştere [162]. Dezvoltarea societății bazate pe cunoaştere a condus la

mutații majore în educație şi tehnologie, demersurile pentru dezvoltarea gândirii integratoare fiind hotărâtoare; integrarea este motorul inovării, iar inovarea reprezintă o cale sigură către creşterea productivității muncii [162].

În concluzie, apariția mecatronicii impune necesitatea articulării unei noi paradigme educaționale, care să creeze cadrul necesar formării unor ingineri şi profesori capabili să transmită elevilor şi studenților o viziune globală asupra domeniului tehnologic.

5.2. Poziția lui Grimheden privind natura şi evoluția mecatronicii

5.2.1. Cele patru aspecte ale mecatronicii

Potrivit abordării lui Grimheden, orice analiză a unui subiect didactic X (cum e şi mecatronica) presupune patru aspecte. În primul rând, trebuie ridicată întrebarea ce este de fapt X, adică se pune problema *identității* subiectului. Identitatea poate fi, în opinia lui, *disciplinară* sau *tematică*. Dacă există un consens general în ceea ce priveşte definiția, conținutul şi structura subiectului, precum şi locul acestuia în procesul cunoaşterii, identitatea lui este una disciplinară. Acesta e cazul subiectelor tradiționale mature, ca matematica, fizica, biologia etc., ale căror programe şcolare sunt, în general, bine conturate. În lipsa acestui consens, se poate vorbi (de regulă, în cazul domeniilor apărute recent) doar de existența unei teme care stă la originea subiectului, identitatea acestuia fiind, deci, una tematică. De pildă, în această situație se află ingineria sistemelor, care e fundamentată pe ideea sau tema de sistem. Astfel, mecatronica are, afirmă Grimheden, o identitate tematică, idee susținută şi de faptul că nu există încă o definiție universal acceptată a mecatronicii sau o programă universitară comună (figura 5.1). Propunerea lui Grimheden este aceea de a urmări elementele comune ale diverselor definiții ale mecatronicii, aceste elemente constituind indicii importante în ceea ce priveşte tema care dă identitate mecatronicii. În consecință, Grimheden identifică două elemente comune: ideea de *sinergie* şi nevoia de *abilități complementare* [99].

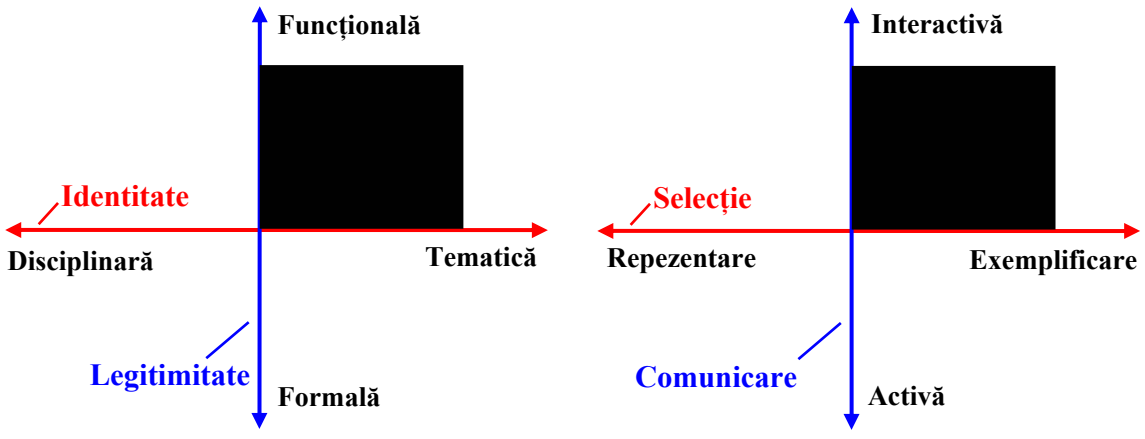


Figura 5.1. Cele patru aspecte ale mecatronicii evidențiate de Grimheden

Al doilea aspect este cel al *legitimității* subiectului, adică al rațiunii sale de a exista. Legitimitatea e consecința relației dintre rezultatul pregătirii oferite de universități şi cerințele pe care societatea le are în ceea ce priveşte abilitățile absolvenților. Legitimitatea poate fi *formală* sau *funcțională*, în funcție de tipul de cunoaştere promovat. Cunoaşterea formală reprezintă ceea ce poate fi citit, înțeles şi asimilat din cărți, cursuri etc. Aspectul funcțional al legitimității are de-a face cu abilitățile practice (*skills*), care nu pot fi învățate din cărți, ci se

însuşesc treptat, prin experimente de laborator, exerciţii de tip încercare-eroare etc. Din acest punct de vedere, Grimheden consideră că legitimitatea mecatronicii este una funcţională (figura 5.1).

În al treilea rând, trebuie analizată problema *selecţiei* celor mai importante aspecte ale subiectului X care trebuie studiate. Există două tipuri extreme de selecţie. Primul este cel „orizontal", prin *reprezentare*, care oferă o perspectivă largă, cuprinzătoare, asupra întregului subiect. Al doilea este „vertical", demers în cursul căruia, prin *exemplificare*, se studiază profund doar un număr limitat de aspecte ale subiectului. În opinia lui Grimheden, identitatea tematică a mecatronicii impune o selecţie verticală (figura 5.1), prin exemplificare, urmărind formarea unor deprinderi şi abilităţi practice centrate pe cuvinte-cheie (sinergia fiind unul dintre ele), care reprezintă temele fundamentale ale acesteia.

În fine, ultimul aspect este acela al *comunicării*, adică al celui mai eficient mod în care trebuie să fie transmis studenţilor subiectul X. Există două forme de comunicare. Prima este comunicarea *activă*, în care relaţia profesor-student este similară controlului feed-forward în buclă deschisă, actul educaţional fiind centrat pe modul în care profesorul trebuie să acţioneze pentru a-şi atinge obiectivele. A doua formă este comunicarea *interactivă*, similară controlului în buclă închisă, în care rolul esenţial îl are feed-back-ul pe care profesorul îl primeşte de la student. După Grimheden, există o strânsă legătură între legitimitatea funcţională a mecatronicii şi forma de comunicare adecvată acesteia: abilităţile practice cerute de piaţa industrială pot fi formate doar prin lucrul în echipă, învăţare bazată pe rezolvare de probleme sau proiecte, ceea ce presupune obligatoriu optarea pentru forma de comunicare interactivă a mecatronicii (figura 5.1).

5.2.2. Evoluţia mecatronicii

Evoluţia mecatronicii din punct de vedere academic străbate, în viziunea lui Grimheden, şase stadii (figura 5.2).

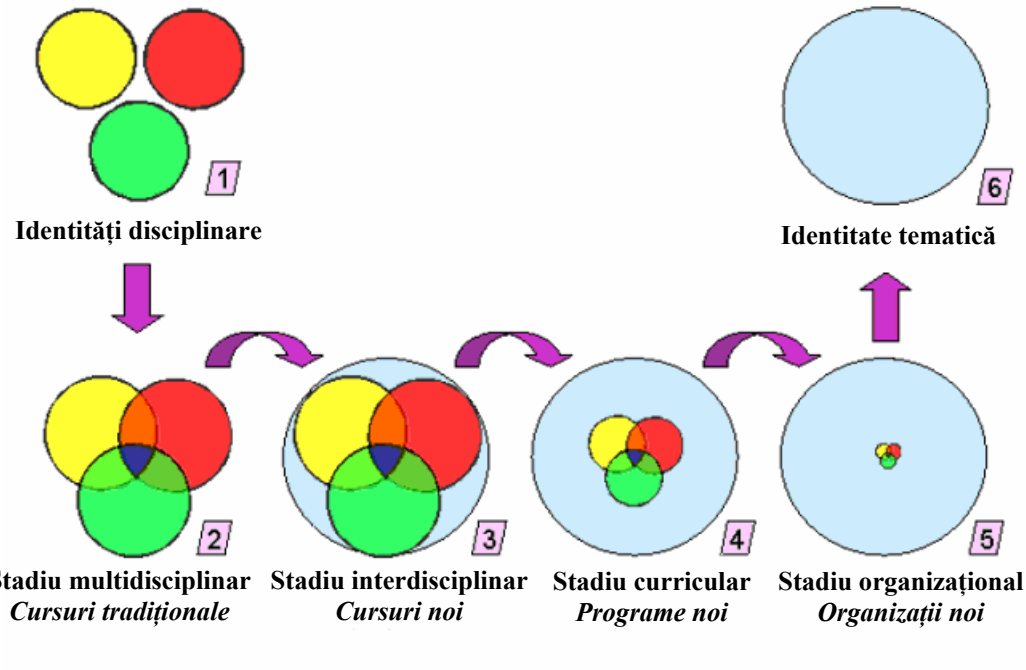


Figura 5.2. Cele şase stadii ale evoluţiei mecatronicii, în viziunea lui Grimheden

După primul stadiu, (1), în care lipseşte orice interferenţă între disciplinele originare, se ajunge la cel de-al doilea stadiu, (2), cel multidisciplinar, în care s-a înțeles necesitatea combinării cursurilor care corespund disciplinelor tradiționale. Combinarea cursurilor a condus la apariția stadiului (3), caracterizat prin tendința universităților de a propune cursuri interdisciplinare (de exemplu, studenților de la inginerie mecanică li se introduc cursuri de inginerie electrică, teoria controlului sau informatică); aceste cursuri au constituit germenii noilor programe şcolare universitare care s-au conturat în timpul stadiului curricular (4), ceea ce va conduce, treptat, la diminuarea identităților disciplinelor originare pe măsura conturării identității tematice. Stadiul (5) este marcat de schimbări mai profunde, care apar la nivelul organizării universităților; astfel, şcolile devin interesate mai degrabă să formeze competențe adaptate noilor tendințe din tehnologie, decât să se concentreze pe aprofundarea disciplinelor tradiționale. Ultimul stadiu, (6), este cel în care se poate în fine vorbi de o identitate a mecatronicii, una tematică în opinia lui Grimheden.

5.3. Identitatea mecatronicii în lumina metodologiei transdisciplinare

5.3.1. Noțiunea de „concept thematic”

În filosofia ştiinței sunt recunoscute două tipuri de afirmații fundamentale: cele care se referă la evenimente empirice, adică la fenomene şi cele care privesc judecățile matematice şi cele ale logicii pure, acestea din urmă fiind de natură analitică [257]. Acestor două tipuri de afirmații, Holton le asociază un sistem de două axe ortogonale *Ox*, respectiv *Oy*, care reprezintă dimensiunile planului oricărui discurs ştiințific. Acest plan, numit *plan contingent*, este definit ca fiind planul în care orice concept sau afirmație ştiințifică are, deopotrivă, o relevanță empirică şi una analitică[78].

Astfel, orice concept ştiințific este lipsit de sens dacă cel puțin una dintre componentele sale pe axele acestui plan e nulă, sau aproape nulă. În continuare, Holton adaugă încă o axă, *Oz*, perpendiculară pe planul contingent, care reprezintă dimensiunea aşa-numitelor *themata*: presupoziții ontologice fundamentale, inconştiente în general, care, deşi nu pot fi reduse la observații empirice sau judecăți analitice, domină totuşi gândirea cercetătorilor [126], [173]. După cum afirmă Basarab Nicolescu, *themata* se referă la cea mai intimă şi profundă parte implicată în geneza unei idei ştiințifice [173][79].

Un *concept thematic*[80] este analog, în spațiul tridimensional *Oxyz* introdus mai sus, unei linii a cărei proiecție pe axa *Oz* (cea tematică) are o valoare semnificativă (figura 5.3) [19]. Conceptele pur tematice sunt rare, astfel că ele au de obicei proiecții cu valori considerabile şi pe celelalte două axe (cum e, de exemplu, cazul conceptului „energie”).

În timp ce planul contingent *Oxy* e suficient atunci când abordarea este pur ştiințifică, trebuie utilizat spațiul tridimensional *Oxyz* de câte ori se doreşte o analiză completă, inclusiv de natură istorică, sociologică sau epistemologică, a unor concepte, procese ori abordări ştiințifice.

[78] În logică, propoziția contingentă reprezintă o afirmație care nu e necesarmente adevărată sau falsă (de pildă ecuația x + y =10), spre deosebire de afirmațiile care sunt, în mod necesar, adevărate (1+1=2) sau false (1+1=3). Pornind de la noțiunea de „contingență”, Holton foloseşte acest termen atribuindu-i un sens nou, diferit, dar apropiat înțelesului originar, după cum de poate observa în această definiție.

[79] Basarab Nicolescu afirmă textual: „aceste *themata* sunt ascunse chiar şi pentru cel ce le foloseşte: ele nu apar în corpul constituit al ştiinței, care nu lasă să transpară decât fenomenele şi propozițiile logice şi matematice” [173].

[80] Holton distinge între trei moduri diferite de a folosi noțiunea de „themata”: concept thematic, poziție thematică şi ipoteză thematică. În continuare se face trimitere doar la conceptul thematic.

Revenind la perspectiva lui Grimheden asupra identității mecatronicii, s-a punctat mai sus faptul că acesta consideră (urmărind ceea ce e comun mai multor definiții ale mecatronicii) că ideea de *sinergie* este esența conceptuală, tema pe care se fundamentează identitatea mecatronicii. După cum s-a demonstrat însă în lucrarea de față (paragraful 4.9), noțiunea de „sinergie" este integrată, alături de cea de „emergență", în teoria sistemelor complexe sau *știința complexității*.

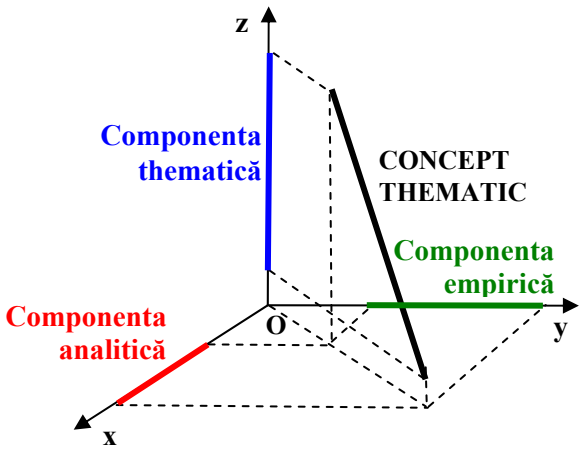


Figura 5.3. Proiecțiile unui concept thematic (de pildă „energie") pe cele trei axe ale spațiului tridimensional *Oxyz,* conceput de către Holton

5.3.2. Identitatea trans-tematică a mecatronicii

Pe baza observațiilor şi argumentelor conținute în prezenta lucrare se pot face câteva afirmații.

1. *Entropia* este o mărime fizică al cărei rol este esențial atât în termodinamica neliniară (paragraful 4.9), cât şi în teoria informației (îndeosebi datorită entropiei informaționale – paragaraful 3.3.3).
2. Noțiunea de *informație*, care aparține, evident, în primul rând teoriei informației, are un rol fundamental şi în mecatronică (paragraful 3.3.2).
3. Conceptul de *autoorganizare*, aparține deopotrivă termodinamicii neliniare (paragraful 4.9) şi mecatronicii (s-au prezentat două forme de autoorganizare a sistemelor mecatronice complexe – paragrafele 4.10 şi 4.11).
4. Integrarea tuturor noțiunilor şi domeniilor amintite se datorează (figura 5.4) noțiunii de *complexitate* (paragrafele. 1.12, 3.5, 4.9, 4.10, 4.11) [19].

După cum afirmă Stephen Hawking, secolul care tocmai a început va aparține Complexității [259]. Aşadar, oricine investighează un domeniu oarecare trebuie să nu neglijeze conceptul de complexitate, şi asta nu pentru că ar fi „la modă", ci pentru că este strâns legat de modul în care funcționează Universul [40].

Revenind la problema identității, se poate afirma că, în mecatronică, *complexitatea* este un concept thematic [19], în sensul definit de Holton, concept care dă măsura identității mecatronicii. Un prim argument în favoarea acestei afirmații este acela că termenul de *integrare* este unul central în mecatronică şi, după cum s-a justificat (paragrafele 4.9.9, 4.9.11, 4.11.4), sistemele mecatronice au o putere intrinsecă de integrare (datorită

proprietăților emergente cu caracter sinergic) cu atât mai mare cu cît gradul lor de complexitate este mai ridicat.

Themata apar, de regulă, sub forma unor alternative (duble sau triple) [257]: continuu/discontinuu, unitate/structură ierarhică, holism/reducționism etc., fiecare nouă *thema* presupunând separarea, opoziția alternativelor [173]. În particular, pentru cazul de față apare diada formată din contradictoriile simplitate/complexitate. Prin urmare, pe de-o parte, complexitatea are valențe integratoare iar, pe de altă parte, pare sursa unei separări. În opinia lui Basarab Nicolescu însă, aceste themata trebuie văzute ca fațete ale unor simboluri, iar simbolul presupune unitatea contradictoriilor așa cum, de pildă, complementaritatea lui Bohr reprezintă un simbol care „realizează în el însuşi unitatea contradictoriilor continuu-discontinuu, undă-corpuscul" [173].

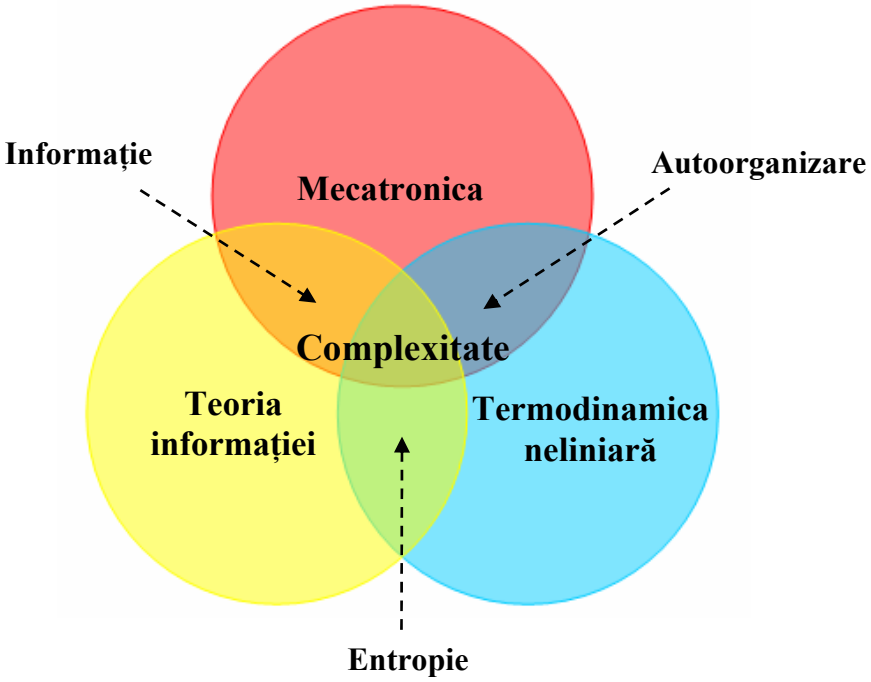


Figura 5.4. Potențialul integrator al conceptului de „complexitate"

Concret, complexitatea reprezintă o fațetă a principiului bootstrap-ului (paragraful 2.11), principiu-simbol care „concepe natura ca pe o entitate globală, non-separabilă la nivel fundamental" [173]. Astfel, complexitatea reprezintă conceptul care stă la baza identității mecatronicii, ideea de complexitate fiind mai cuprinzătoare decât cea de sinergie, întrucât sistemele mecatronice capabile de autoorganizare se disting în primul rând prin complexitatea lor, rezultat al existenței proprietăților emergente, cu pronunțat caracter sinergic [19].

Principiul bootstrap-ului reprezintă, deopotrivă, cel de-al treilea principiu (cel epistemologic) pe care se întemeiază metodologia transdiciplinară şi ideea-simbol având drept una dintre fațete complexitatea, concept thematic care fundamentează identitatea mecatronicii. Aşadar, privind mecatronica din perspectiva metodologiei transdisciplinare, identitatea ei e bazată pe o idee-simbol (care are, în plus, rol de principiu epistemologic), ceea ce face ca mecatronica să fie un domeniu deschis[81]. Prin urmare, în viziune transdisciplinară, mecatronica transcende limitele unei simple identități tematice [19].

[81] În opinia lui Basarab Nicolescu, o teorie fundamentată pe o idee-simbol este o teorie deschisă, caracterul de permanență al acesteia fiind asigurat tocmai de existența ideii-simbol. O astfel de teorie poate suferi modificări la nivelul formei (în particular al formalismului matematic), dar direcția sa rămâne neschimbată [173].

În concluzie, se poate afima că *identitatea mecatronicii, întemeiată pe ideea complexității, este una trans-tematică* [19]**.**

5.4. Mecatronica – suport pentru educația integrală

5.4.1. Raportul Delors, transdisciplinaritatea şi educația integrală

Raportul [53] elaborat de către Comisia internațională pentru educație în secolul XXI, comisie prezidată de Jaques Delors, propune o *educație integrală* a ființei umane, care să nu neglijeze niciuna dintre dimensiunile ei. Acest nou tip de educație este întemeiat pe patru piloni de bază, legați, potrivit abordării transdisciplinare a lui Basarab Nicolescu, printr-o trans-relație similară unui acoperiş sprijinit pe aceşti patru piloni [173].

1. *A învăța să cunoaştem* presupune, înainte de toate, însuşirea metodelor prin care să distingem „ceea ce e real de ceea ce e iluzoriu" [173], adică *dezvoltarea spiritului ştiințific*, fondat pe interogare, învățarea permanentă, pe refuzul oricărui răspuns gata fabricat şi al oricărei certitudini aflate în contradicție cu faptele" [172]. Acest tip de gândire nu poate fi format doar prin asimilarea unei cantități considerabile de informații, ci mai ales prin creşterea *calității* actului educațional, care să conducă la dezvoltarea capacității elevilor şi studenților de a stabili *punți între diverse discipline* [173], descoperind prin investigație şi extrapolând apoi semnificațiile cunoştințelor însuşite.
2. *A învăța să facem* înseamnă specializare, adică învățarea unei meserii, împreună cu cunoştințele şi deprinderile practice care o însoțesc. Dinamismul şi complexitatea lumii în care trăim sunt incompatibile însă cu specializarea excesivă, rigidă, îngustă; e nevoie de consolidarea unei noi perspective educaționale, care să valorifice legăturile existente între diverse meserii astfel încât, prin *creativitate* şi *flexibilitate*, să faciliteze, la nevoie, accesul la o altă meserie, compatibilă cu înclinațiile ființei umane şi cu cerințele societății.
3. *A învăța să trăim împreună*, semnifică respectarea normelor care reglează conviețuirea între membrii unei colectivități; esențial este ca normele să fie asumate în urma înțelegerii lor şi nu prin constrângere. În viziune transdisciplinară, acest obiectiv poate fi atins învățând, printr-o perpetuă ucenicizare, ca fiecare să se recunoască pe sine în persoana celuilalt [172].
4. *A învăța să fim*, porneşte de la ideea potrivit căreia construcția unei persoane se face prin descoperirea limitărilor interioare, a dizarmoniilor între viața individuală şi cea socială, dar presupune, totodată, existența unei *dimensiuni trans-personale*: celălalt nu este un simplu obiect pentru mine, ci împreună construim o entitate non-separabilă Subiect-Obiect.

5.4.2. Dublul aspect al legitimității mecatronicii

Mecatronica reprezintă un domeniu al ingineriei, deci e orientată, în mod firesc, către formarea de profesionişti care să stăpânească deprinderile practice necesare proiectării şi întreținerii sistemelor mecatronice. O posibilă clasificare a domeniilor majore care se impun a fi studiate este următoarea: (i) modelarea şi simularea sistemelor fizice, (ii) tehnologia senzorilor şi actuatorilor, (iii) semnale şi sisteme, (iv) informatică, calculatoare şi sisteme

logice [25], [28]. Pentru asta, se recurge la metode educaționale specifice, centrate pe student şi muncă în echipă: învățarea prin practică (*learning by doing*)[82], învățarea bazată pe probleme (*problem-based learning*)[83] sau învățarea bazată pe proiecte (*project-based learning*)[84], ceea ce conduce exact către tipul de specializare *flexibilă* şi *creativă* cerută de cel de-al doilea pilon al raportului Delors: *a învăța să facem*. În plus, promovând munca în echipă, ca o prelungire firească a dimensiunii sale funcționale, mecatronica este în deplin acord şi cu cel de-al treilea pilon al raportului Delors, *a învăța să trăim împreună*; lucrând împreună, studenții îşi vor însuşi în mod firesc, natural, o atitudine transculturală, transpolitică, transreligioasă şi chiar transnațională [173] (prin şcolile internaționale de vară, programele de schimb de experiență între universități din mai multe țări etc.).

Mecatronica este văzută ca un factor esențial al inovării în Europa cunoaşterii, constituind totodată, după cum s-a arătat mai sus, un spațiu favorabil deschiderilor multi- şi transculturale. În contextul demersurilor pentru atingerea obiectivelor Strategiei Lisabona, la nivelul UE există un interes major în vederea dezvoltării *spiritului european pentru mecatronică*. Pe această linie se înscrie şi proiectul cu tema „Laborator Regional Multifuncțional de Mecatronică"(figura 5.5), implementat de Facultatea de Mecanică a Universității Tehnice Cluj-Napoca [233], [274].

Figura 5.5. Laboratorul regional multifuncțional de mecatronică

[82] Metodă care urmăreşte creşterea eficienței activității studentului prin repetarea regulată a unui anumit set de activități practice [171].

[83] Strategie educațională prin intermediul căreia mici echipe formate din studenți trebuie să soluționeze probleme complexe şi reale, profesorul având rol de catalizator, mai degrabă facilitând învățarea decât transmițând informații sub forma unor prelegeri [100].

[84] Metodă prin care o grupă de studenți primeşte un proiect care îi determină pe aceştia să investigheze probleme relevante, specifice domeniului studiat [66].

Proiectul are drept scop dezvoltarea infrastructurii de cercetare existente şi definirea unor noi deschideri, prin integrarea modulelor laborator virtual şi laborator mobil de mecatronică. Demersurile amintite vin în întâmpinarea nevoilor naționale privind crearea Ariei Naționale a Cercetării şi Inovării şi a Platformei Naționale a Societății Civile pentru Educație şi Formare Continuă. Structurile concepute la nivelul UE, în acord cu obiectivele Strategiei Lisabona, vor rezulta prin integrarea structurilor similare care există la nivel regional şi național.

În concluzie, *dimensiunea funcțională* a mecatronicii este incontestabilă. Fomarea deprinderilor practice e imposibilă însă în afara unui cadru teoretic, conceptual bine articulat. Potrivit raportului Delors, înainte de a *învăța să facă*, studentul trebuie *să învețe să cunoască*, adică, începând de la mirare şi interogație, acesta să asimileze treptat conceptele şi metodele prin care să-şi dezvolte, progresiv, discernământul şi spiritul ştiințific [172].

Cunoaşterea teoretică este cea care fundamentează o *viziune*, un mod de a privi lumea, care facilitează integrarea unei materii particulare într-un ansamblu coerent. Mai mult, schimbările rapide ale societății pot genera răsturnări de situații pe piața muncii, astfel că un anume set de abilități, extrem de util la un moment dat, se poate dovedi nefolositor peste câțiva ani. În acest caz, *dimensiunea formală* a mecatronicii este chiar mai folositoare decât cea funcțională, întrucât o cunoaştere formală solidă permite dezvoltarea de noi abilități, funcțional adaptate noii situații. În concluzie, *o abordare educațională completă, integratoare, impune sesizarea şi exploatarea avantajelor oferite atât de aspectul funcțional, cât şi de cel formal al mecatronicii*.

5.4.3. Cele două dimensiuni ale selecției şi ale comunicării mecatronicii

O identitate tematică şi o legitimitate funcțională a mecatronicii ar impune, în viziunea lui Grimheden, o *selecție verticală*, formată din aspectele cele mai reprezentative ale acesteia, demers centrat pe cuvinte-cheie tematice (sinergie, abilități practice complementare etc.) şi care urmăreşte mai degrabă însuşirea, prin exemplificare, a deprinderilor practice specifice decât a cunoaşterii abstracte. Dacă se admite însă că, abordată transdisciplinar, identitatea mecatronicii este trans-tematică, precum şi faptul că legitimitatea ei nu este mai mult funcțională decât formală, nu trebuie să se opteze între o selecție verticală (prin exemplificare) şi una orizontală (prin reprezentare). În prezent, multe cursuri universitare din lume utilizează ambele tipuri de selecție; de regulă, în primii ani selecția este orizontală, pentru ca în ultimii ani să se recurgă la selecția verticală [99]. Prin urmare, trebuie găsit un model educațional dinamic, flexibil, care să armonizeze cele două tipuri de selecție, orizontală şi verticală, pentru a folosi la maxim potențialul fiecăruia.

La fel se pune problema şi în ceea ce priveşte ultimul aspect, cel al *comunicării* mecatronicii. Controlul funcționării unui sistem cibernetic în general (şi mecatronic în particular) se face prin mecanismul de feed-back dacă perturbațiile provenite din exterior au un grad scăzut de predictibilitate (caz în care semnalul de ieşire este folosit pentru a regla semnalul de intrare prin aşa-numita „buclă închisă"), respectiv prin mecanismul de feed-forward, dacă perturbațiile pot fi riguros anticipate (situație în care efectul perturbațiilor este compensat printr-un semnal exterior).

Controlul prin feed-forward este utilizat în special atunci când se doreşte evitarea controlului prin feed-back, care, fiind mai lent, poate să nu reacționeze în timp util pentru a păstra integritatea sistemului. Varianta optimă de control a unui sistem este utilizarea unei combinații a celor două mecanisme; astfel, se îmbină armonios beneficiile controlului prin feed-back (care poate proteja sistemul în fața unor perturbații imprevizibile) cu cele ale

controlului prin feed-forward (care permite sistemului să răspundă rapid la perturbații, înainte ca acestea să-l afecteze ireversibil).

Similar, în ce privește actul educațional, *este necesară folosirea ambelor mecanisme de control*, care corespund celor două tipuri de comunicare. Feed-back-ul (principiul conexiunii inverse) corespunde comunicării interactive, potrivit căreia e insuficientă doar transmiterea informațiilor necesare studenților (neglijând astfel efectul pe care acestea îl produc în plan formativ și cognitiv), ci trebuie utilizate și informațiile cu rol autoreglator [278], transmise de studenți înapoi profesorilor. În această privință, cel de-al treilea pilon al raportului Delors, *a învăța să fim*, ne arată că trebuie ca studentul să învețe de la profesor, cât și profesorul de la student, cei doi formând astfel o entitate non-separabilă Subiect-Obiect [172]. Pe de altă parte, dacă feed-back-ul reprezintă modalitatea prin care finalitatea redevine cauzalitate, feed-forward-ul reprezintă modalitatea prin care anticiparea finalității devine cauzalitate [131]. Prin intermediul acestui tip de control, care corespunde comunicării directe, profesorul poate adapta din mers actul de comunicare didactică, anticipând și evitând posibilele piedici care stau în calea atingerii finalităților propuse.

Astfel, ambele forme de comunicare, activă și interactivă, se dovedesc a fi, deopotrivă, extrem de utile: profesorul va interveni atunci când rezultatele studenților la examene sunt nesatisfăcătoare (feed-back), respectiv va acționa preventiv, anticipând o posibilă evoluție către astfel de rezultate (feed-forward).

5.4.4. Modelul hexagonal pentru educație mecatronică integrală

Potrivit epistemologiei lui Ștefan Lupaşcu (paragraful 2.10), un sistem este supus unor dinamisme antagoniste în așa fel încât actualizarea unuia să implice potențializarea celuilalt; prin alternanța actualizare-potențializare se întreține, astfel, un permanent antagonism care conduce la un echilibru dinamic al sistemului, rezistența acestuia fiind cu atât mai mare cu cât le este mai greu forțelor antagoniste de a scăpa din acest echilibru care determină intensitatea lor egală. Cele două dinamisme tind, în timpul trecerii de la actual la potențial sau invers, să ajungă în starea T, de egală potențializare și actualizare reciprocă. Antagonismul maxim, organizarea maximă, deci rezistența maximă se realizează în starea T, în care cele două dinamisme contradictorii sunt, simultan, semiactuale și semipotențiale.

Pin urmare, „rezistența maximă" (care corespunde maximei eficiențe) a unui model didactic care să ofere o educație integrală, se atinge atunci când antagonismul forțelor opuse este maxim. În cazul mecatronicii există trei perechi de dinamisme antagoniste: legitimitate formală/legitimitate funcțională, selecție orizontală/selecție verticală, respectiv comunicare activă/comunicare interactivă. Actualizarea legitimității formale presupune potențializarea legitimității funcționale și invers, același raționament fiind valabil și în cazul celorlalte două perechi de dinamisme (selecție și comunicare). Actualizarea absolută a oricărui dinamism echivalează cu adoptarea unei abordări educaționale incomplete, care neglijează avantajele care decurg din actualizarea dinamismului antagonist, întrucât acesta din urmă va fi complet potențializat, deci steril.

În consecință, din perspectiva modelului pentru educație mecatronică integrală, mecatronica se situează, simbolic, în zona de maximă rezistență, care corespunde unei triple stări T (fiecare pereche de dinamisme având propria stare T), stare în care contradictoriile nu sunt contrarii, datorită rolului conciliator al principiului terțului inclus (figura 5.6).

Cu alte cuvinte, modelul prezentat, întemeiat pe filosofia terțului inclus, relevă non-separabilitatea, unitatea existentă între aspecte ale mecatronicii care păreau alternative

ireconciliabile: legitimitate formală/legitimitate funcțională, selecție orizontală/selecție verticală, comunicare activă/comunicare interactivă.

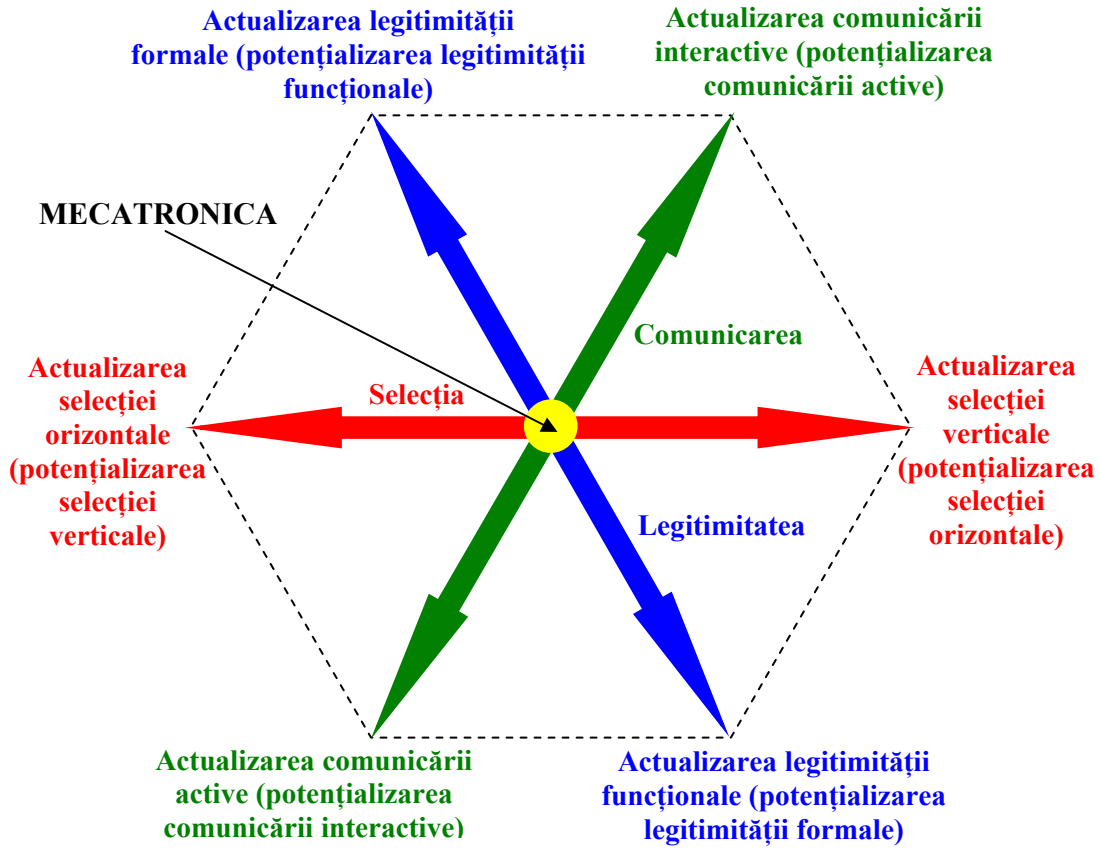


Figura 5.6. Modelul hexagonal pentru educație mecatronică integrală

5.4.5. Concursul de fizică şi inventică Irenaeus – mijloc de stimulare a creativității şi flexibilității elevilor prin munca în echipă

Stimularea creativității elevilor şi studenților în vederea dobândirii flexibilității, atât în gândire cât şi în practică, are două dimensiuni: un demers didactic *teoretic*, care să evidențieze corelațiile existente între conceptele specifice disciplinelor tradiționale (fizica în special) şi cele prezentate în cadrul orelor de educație tehnologică sau TIC, şi unul *centrat pe lucrări experimentale*, care să capaciteze manifestarea originalității elevilor şi formarea deprinderilor acestora de a lucra în echipă, „obiectiv major al educației mecatronice” [162].

La Oradea se desfăşoară, anual, Concursul de fizică şi inventică Károly József Irenaeus, ajuns în acest an la a VI-a ediție [26], [238]. Concursul, nominalizat din 2008 în Graficul Concursurilor M.E.C.T. [261], urmăreşte, printre altele, *dezvoltarea spiritului de echipă* şi al celui competițional al elevilor de gimnaziu şi liceu, precum şi *stimularea inventivității şi creativității* acestora prin introducerea, alături de patru probe individuale, a unei *probe de inventică* care se desfăşoară pe grupe [85].

Proba teoretică (figura 5.7.a) constă în rezolvarea unei probleme cu trei cerințe, de nivele

[85]Ideea înființării acestui concurs, precum şi organizarea lui bazată pe cele cinci probe, îi aparține profesorului de fizică Bogdan Károly, de la liceul Ady Endre din Oradea.

de dificultate diferite, iar la *proba experimentală* (figura 5.7.b), fiecare concurent primeşte, pregătite, aparatele şi materialele necesare pentru realizarea experimentului.

a. **b.** **c.**

Figura 5.7. Concursul de fizică şi inventică Irenaeus. Proba teoretică (a), proba experimentală (b), proba de căutare pe internet (c)

Proba de *cultură generală* constă într-un test grilă cu 5 variante de răspuns, conținând 15-25 de întrebări, în funcție de clasă. Alegerea răspunsului corect nu necesită calcule, ci doar perspicacitate şi cunoştințe generale în domeniul fizicii şi tehnologiei.

La proba de *căutare pe internet* (figura 5.7.c) fiecare concurent primeşte 5 întrebări dificile, al căror răspuns poate fi găsit pe internet. Răspunsurile pot fi date doar corelând mai multe surse şi necesită, în plus, calcule scurte în care se folosesc informațiile acumulate. În cadrul probei de *inventică* (figura 5.8.), fiecare echipă (formată din trei elevi) prezintă, în fața publicului şi a juriului, o lucrare la alegere. Lucrările sunt punctate ținând cont de trei aspecte: originalitatea, gradul de dificultate şi prezentarea [26].

Figura 5.8. Proba de inventică a concursului Irenaeus

Doctorandul a participat la acest concurs în calitate de organizator, autor de probleme, profesor pregătitor pentru elevi şi membru al Comisiei de Evaluare. Unul dintre elevii acestuia a obținut, la ediția din 2009, premiul I la clasa a IX-a, prezentând un levitron, care conține, printre alte componente, un amplificator operațional UA741 şi un senzor Hall TLE4905L (figura 5.9.).

În urma edițiilor desfăşurate până în prezent, se poate trage concluzia că acest concurs a trezit interesul elevilor, dovadă fiind numărul concurenților care se reîntorc la concursul din anul următor. Expoziția de inventică a devenit un eveniment în sine, aşteptat cu mult interes atât de participanți, cât şi de mass-media, elevii prezentându-se cu lucrări din ce în ce mai valoroase. Unul dintre câştigătorii concursului a participat şi la Salonul Național de Inventică, de unde a fost selectat pentru a participa la o expoziție similară din Franța.

Figura 5.9. Levitron cu senzor Hall – premiul I la concursul Irenaeus, ediția 2009, clasa a IX-a

5.5. Concluzii

Acest capitol este consacrat prezentării unei abordări proprii a mecatronicii, privită din perspectiva metodologiei transdisciplinare a lui Basarab Nicolescu.

Pentru început, pornind de la câteva definiții consacrate ale mecatronicii, s-a subliniat că aceasta, prin caracterul său integrator, sinergic, transcende granițele unei singure discipline, ceea ce impune necesitatea articulării unei noi paradigme educaționale, care să creeze cadrul necesar formării unor ingineri şi profesori capabili să transmită elevilor şi studenților o viziune globală asupra domeniului tehnologic.

În continuare, a fost prezentată poziția lui Grimheden privind natura şi evoluția mecatronicii. Potrivit acestui model, identitatea mecatronicii este tematică, legitimitatea e funcțională, selecția aspectelor sale mai importante se face vertical, prin exemplificare, iar comunicarea profesor-student trebuie să fie interactivă. Pornind de la situația în care nu exista nicio interferență între disciplinele originare, mecatronica a parcurs şase stadii, la capătul cărora dobândește o identitate tematică conform modelului lui Grimheden.

A fost, apoi, propusă o perspectivă transdisciplinară asupra mecatronicii. Potrivit acesteia, identitatea mecatronicii este fundamentată pe conceptul thematic (în sensul definit de Holton) de complexitate, concept care reprezintă una dintre fațetele unei idei-simbol (în sensul introdus de Basarab Nicolescu): principiul bootstrap-ului, care concepe natura ca pe o entitate globală, non-separabilă la nivel fundamental. Astfel, privind mecatronica din perspectiva metodologiei transdisciplinare, aceasta este un domeniu deschis, întrucât identitatea ei e bazată pe o idee-simbol. Prin urmare, în viziune transdisciplinară, mecatronica transcende limitele unei simple identități tematice, deci identitatea mecatronicii, întemeiată pe ideea complexității, este una trans-tematică.

Raportul Delors, abordat transdisciplinar, accentuează nevoia unei educații integrale a fiecărei ființe umane. Pentru aceasta, trebuie să învățăm să cunoaştem, să facem, să trăim împreună şi să învățăm să fim, fără a neglija dimensiunea trans-personală. S-a evidențiat faptul că importanța mecatronicii ca suport pentru educația integrală poate fi hotărâtoare dacă se articulează un model educațional dinamic, flexibil, care să armonizeze legitimitatea funcțională cu cea formală a acesteia, selecția verticală cu cea orizontală, precum şi comunicarea interactivă cu cea activă. Astfel, s-a propus modelul hexagonal pentru educație mecatronică integrală, conform căruia mecatronica se situează, simbolic, în zona de maximă rezistență, care corespunde unei triple stări T, stare în care contradictoriile nu sunt contrarii, datorită rolului conciliator al principiului terțului inclus. Acest model relevă non-separabilitatea, unitatea existentă între aspecte ale mecatronicii care păreau alternative ireconciliabile: legitimitate formală/legitimitate funcțională, selecție orizontală/selecție verticală, comunicare activă/comunicare interactivă.

În final, s-a prezentat o modalitate concretă prin care inventivitatea, creativitatea şi flexibilitatea elevilor de la nivel gimnazial şi liceal poate fi stimulată, inclusiv prin deprinderea acestora de a lucra în echipă: Concursul de fizică şi inventică Károly József Irenaeus, desfăşurat în Oradea, ajuns în acest an la a VI-a ediție. Concursul, nominalizat din 2008 în Graficul Concursurilor M.E.C.T, conține, alături de patru probe individuale, o probă de inventică care se desfăşoară pe grupe. Doctorandul a participat la acest concurs în calitate de organizator, autor de probleme, profesor pregătitor pentru elevi şi membru al Comisiei de Evaluare.

5.6. Contribuții personale

Prezentul capitol conține următoarele contribuții personale:

- argumentarea faptului că identitatea mecatronicii, fundamentată pe conceptul thematic de complexitate, este *trans-tematică*;
- justificarea statutului de *domeniu deschis* care poate fi atribuit mecatronicii, întrucât identitatea sa e legată de o idee-simbol: principiul bootstrap-ului, care concepe natura ca pe o entitate globală, non-separabilă la nivel fundamental;
- propunerea *modelului hexagonal pentru educație mecatronică integrală*, care armonizează aspecte ale mecatronicii ce păreau alternative ireconciliabile: legitimitate formală/legitimitate funcțională, selecție orizontală/selecție verticală, comunicare activă/comunicare interactivă;
- prezentarea unei modalități concrete de stimulare a inventivității, creativității şi flexibilității elevilor, precum şi a muncii în echipă: Concursul de fizică şi inventică Károly József Irenaeus, la care doctorandul a participat în calitate de organizator, autor de probleme, profesor pregătitor pentru elevi şi membru al Comisiei de Evaluare.

CAPITOLUL 6

NOI DESCHIDERI ÎN STUDIUL FIZICII DATORATE MECATRONICII

6.1. Introducere

Istoric vorbind, pornind de la cele mai simple maşini coordonate de către un operator uman sau care puteau fi programate să îndeplinească anumite operaţii repetitive, s-a ajuns ca, azi, să existe maşini care pot fi numite „inteligente", întrucât au capacitatea de a atinge un anumit scop sau de a accede la comportarea dorită în condiţii de incertitudine (apariţia unor modificări imprevizibile în mediul intern sau în cel exterior maşinii) [161]. Mai mult, după cum s-a prezentat în lucrarea de faţă (capitolul 5), există chiar sisteme mecatronice autonome adaptabile care, în urma schimbului de materie, energie şi informaţie cu mediul exterior, pot, autoorganizându-se, să se adapteze modificărilor exterioare. Aceste sisteme sunt dotate cu un nivel mai înalt de inteligenţă, întrucât pot să perceapă mediul cu care interacţionează şi să înveţe ca, în urma interacţiunii cu acesta, să ia decizii în vederea maximizării performanţelor proprii [202].

Prin urmare, inteligenţa artificială presupune organizare, iar organizarea presupune integrarea tuturor subsistemelor unui sistem mecatronic. Integrarea subsistemelor nu se poate face în lipsa legăturilor, care, printre altele, mijlocesc transmiterea informaţiei de la un subsistem la altul. Problema legăturilor este prezentă atât în lumea vie cât şi în mecatronică. Informaţia se transmite mai uşor decât energia, deci, la nivelul unui sistem se pot realiza mult mai multe legături informaţionale decât legături energetice. În plus, utilizând legăturile informaţionale, pot fi integrate în sistem elemente structural diferite şi aflate la mare distanţă unul de altul, iar randamentul sistemului poate fi îmbunătăţit [161]. Valorificarea potenţialului cercetării în domeniul inteligenţei artificiale se arată a fi imposibilă fără studiul structurii şi comportării sistemelor mecatronice complexe. Pe de altă parte, studiul construcţiei şi funcţionării sistemelor mecatronice presupune în primul rând aplicarea în situaţii concrete a principiilor şi legilor studiate la fizică.

6.2. Analiza structurii şi funcţionării sistemelor mecatronice – suport tehnologic aplicativ pentru studiul fizicii

Orice maşină inteligentă e formată din trei subsisteme de bază (figura 6.1) [161]. Graniţa dintre funcţiile acestor subsisteme fiind imposibil de trasat, aceste funcţii nu sunt neapărat îndeplinite de către componente fizice diferite.

În primul rând, o maşină inteligentă trebuie să aibă atât proprietăți senzoriale, precum şi capacitatea de a interpreta senzațiile. Prin urmare, primul subsistem al unei maşini dotate cu inteligență trebuie să fie cel de *percepție*, responsabil de colectarea, stocarea, procesarea şi distribuirea informației privind starea maşinii şi a mediului său exterior. Funcția de percepție este realizată prin intermediul senzorilor şi *traductorilor* (dispozitivele care transformă o mărime fizică de intrare într-o mărime fizică electrică – adesea – de ieşire, destinată procesării ulterioare), precum şi a *sistemelor de achiziții de date* (sisteme prin care informațiile, preluate de la traductoare, sunt prelucrate pentru a putea fi preluate de către controler). Principala diferență dintre un senzor şi un traductor este aceea că traductorul este un dispozitiv elementar care, neconținând elemente de prelucrare a semnalului, realizează doar conversia acestuia, în timp ce senzorul poate răspunde şi de alte funcții [47], [162].

Unii senzori conțin, ca parte integrantă a lor, sistemele de condiționare a semnalelor sau chiar microprocesoare pentru a realiza diferite *funcții inteligente chiar la nivel de senzor* (procesarea digitală a semnalului, corecția erorilor din procesul de detecție, autocalibrarea şi autotestarea în cazul în care echipamentul prezintă anomalii în funcționare etc.) [47], [161]. Dezvoltarea rapidă a microelectronicii, micromecanicii, a opticii integrate şi a altor tehnologii de nivel înalt a permis *miniaturizarea elementelor de senzori* (numiți „microsenzori”), precum şi *integrarea fizică* a mai multor funcții şi elemente de procesare de semnal pe acelaşi substrat. Acestea constituie componentele *microsistemelor*, adică acele sisteme care au cel puțin o componentă realizată prin una dintre microtehnologiile cunoscute, mai multe funcții fiind îndeplinite pe un spațiu fizic redus. Tendința recentă fiind aceea ca un număr cât mai mare de elemente să fie încorporate într-un singur corp, s-au construit senzori inteligenți care conțin alți senzori, cuplați împreună, pentru a se măsura cât mai multe mărimi fizice diferite [161].

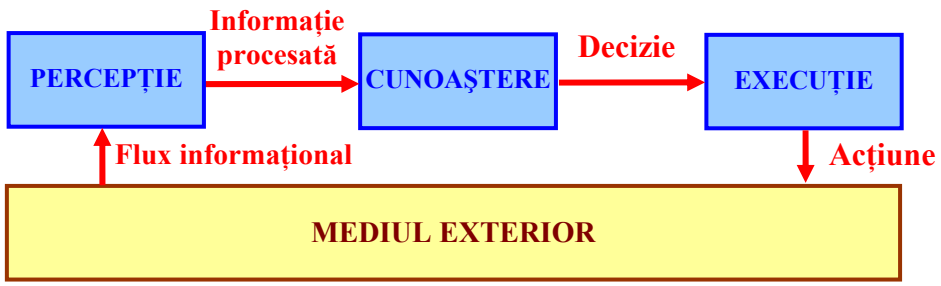


Figura 6.1. Subsistemele de bază ale unei maşini inteligente

Al doilea subsistem este cel care realizează funcția de *cunoaştere*, care constă în evaluarea informațiilor preluate prin percepție şi luarea unor decizii în vederea planificării acțiunilor maşinii. Componenta fizică cu rol esențial în acest proces este *controlerul (micropocesorul)*.

Subsistemul de execuție, cel de-al treilea subsistem al unei maşini inteligente, răspunde de inițierea, controlul şi încheierea acțiunilor maşinii, pe baza informației primite de la celelalte două subsisteme. Elementele fizice prin intermediul cărora se realizează funcția de execuție sunt *actuatorii*.

În general, un sistem mecatronic conține următoarele module [161], [162] (figura 6.2): (i) sistemul de programare a sarcinilor, compus din microprocesor şi microcontrolere, care generează mişcările şi secvențele care decurg din cerințele sau comenzile transmise; (ii) controlerul de secvențe şi mişcare, responsabil de compararea parametrilor impuşi cu cei ai mişcării şi de realizarea corecturilor necesare; (iii) amplificatorul de putere, care amplifică

semnalul, pentru a fi în acord cu cerințele actuatorului; (iv) actuatorul, care transformă semnalul corectat într-un semnal adecvat procesului tehnologic; (v) mecanismele şi transmisiile mecanice, care adaptează parametrii actuatorului la cerințele specifice procesului; (vi) senzorii, care prelucrează informații legate de parametrii procesului, transmițând apoi semnale controlerului; (vii) dispozitivul de condiționare a semnalelor (format din amplificatoare, filtre etc.), care prelucrează semnalele pentru ca acestea să poată fi preluate de către controler.

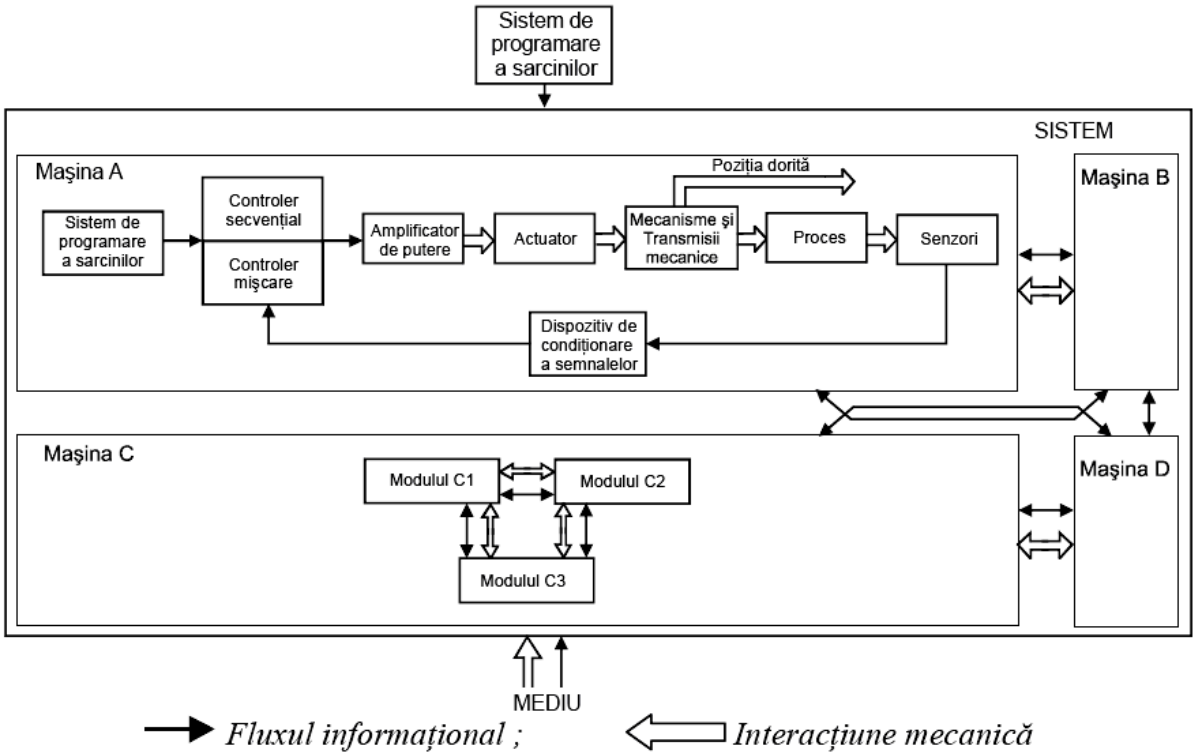


Figura 6.2. Structura hardware a unui sistem mecatronic

6.3. Purtători de informație

După cum s-a evidențiat în lucrarea de față (paragraful 3.3), una dintre caracteristicile esențiale ale informației este faptul că aceasta nu poate exista decât ca formă de manifestare a cuplului materie-energie. Aşadar, cum orice transmitere de informație presupune un transfer material şi energetic, transferul de informație are nevoie de suport, adică de *purtători de informație*. Câmpul electric, câmpul magnetic, radiația electromagnetică (în speță fotonii), sarcinile electrice, atomii rețelei cristaline a unui solid sau moleculele unui lichid sau ale unui gaz reprezintă câteva exemple de purtători de informație. Mărimile fizice utilizate pentru modelarea matematică a procesului de transmitere a informației sunt specifice naturii purtătorilor de informație implicați în acest proces.

În funcție de natura energiei care mijloceşte transmiterea informației, se evidențiază şase tipuri de purtători de informație [161], [202] cărora le corespund mărimile fizice adecvate (figura 6.3):

- De tip *radiant* - radiația electromagnetică (sunt utilizate mărimi fizice specifice oscilațiilor electromagnetice: intensitate a radiației, frecvență, fază, polarizare).

- *Mecanici* - transferul se face prin intermediul energiei mecanice, deci se lucrează cu mărimi fizice ca: poziție, viteză, forță, dimensiuni (lungime, grosime) etc.
- *Termici* - sunt implicați parametri specifici femonenelor termice: temperatură, căldură, entropie.
- *Electrici* - energia electrică mijloceşte transmiterea informației, deci se face apel la tensiunea electrică, intensitatea electrică, rezistența electrică, capacitate electrică etc.
- *Magnetici* - apar mărimi fizice care privesc procese în care rolul principal revine energiei magnetice: inducția şi intensitatea câmpului magnetic, fluxul magnetic, permeabilitatea magnetică etc.
- *Chimici*: apar îndeosebi în procesele care se desfăşoară la nivelul structurii interne a materiei, deci principalii parametri implicați sunt cei legați de structura cristalină, stări de agregare, mişcarea moleculelor din lichide sau gaze etc.

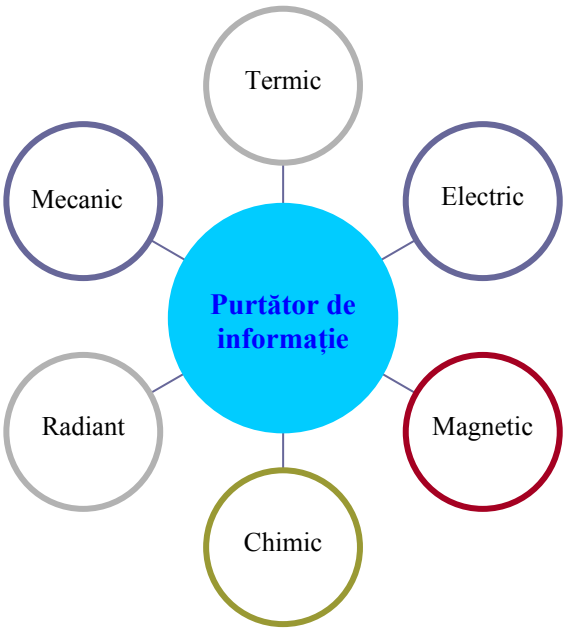


Figura 6.3. Cele şase tipuri de purtători de informație

În general, într-un proces complex de transmitere a informației, sunt implicați mai mulți purtători de informație, care îşi transferă informația de la unul la altul. Astfel, senzorii, de pildă, preiau informația din exterior prin intermediul unuia sau mai multor purtători de informație (figura 6.4).

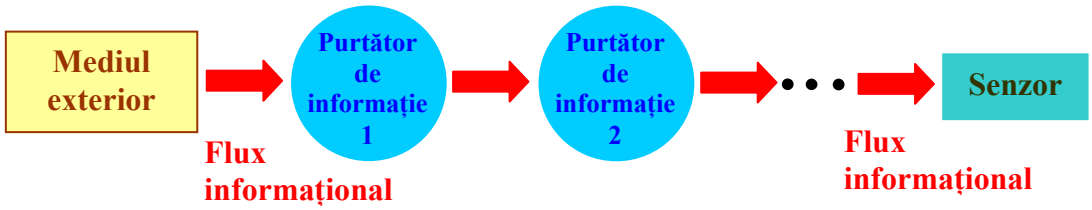


Figura 6.4 Transmiterea informației de la mediul exterior la senzor prin intermediul purtătorilor de informație

În concluzie, senzorii, actuatorii, precum şi dispozitivele de condiționare a semnalelor sunt componente cu rol determinant în realizarea legăturilor între modulele unui sistem mecatronic, mijlocind transmiterea informației între acestea. Pe de altă parte, aceste componente constituie elemente fizice reprezentative în ceea ce priveşte materializarea principiilor, legilor şi fenomenelor fizicii sub forma unor aplicații în tehnologie care răspund unor exigențe de înaltă ținută.

După cum se va argumenta în continuare, prin intermediul unor exemple concrete, mecatronica poate genera noi deschideri în studiul fizicii, prin integrarea aplicațiilor din domeniul tehnologic în conținuturile programei analitice, de la nivel gimnazial până la cel universitar.

6.4. Aplicații în tehnologie ale legilor şi fenomenelor specifice fizicii

6.4.1. Potențiometrul ca traductor de poziție

Unul dintre cele mai simple traductoare de poziție este potențiometrul, care converteşte o deplasare mecanică (liniară sau circulară) într-un semnal electric, prin divizarea tensiunii (figura 6.5.a). Se consideră că rezistența maximă a potențiometrului este R_p.

Pentru situația din figura 6.5.a, se poate scrie (cursorul aflându-se la distanța *x* de capătul din dreapta al potențiometrului):

$$V_{out} = R_x \cdot \frac{V_i}{R} = \frac{\rho x}{S} \cdot \frac{V_i \cdot S}{\rho \ell} = x \cdot \frac{V_i}{\ell}, \tag{6.1}$$

unde V_{out} este tensiunea de ieşire, V_i e tensiunea de intrare, ρ e rezistivitatea materialului, iar ℓ este lungimea corpului potențiometrului.

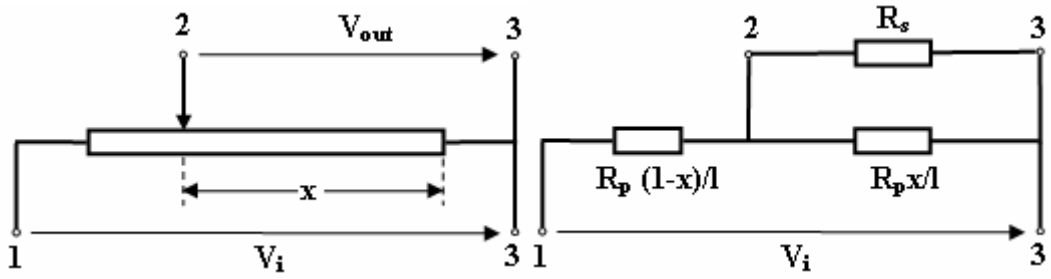


Figura 6.5. Traductorul potențiometric

Se observă că, în cazul ideal, în care rezistența de sarcină ar avea o valoare foarte mare (teoretic infinită) tensiunea de ieşire depinde liniar de poziția *x*.

În cazuri concrete însă, rezistența de sarcină are o valoare finită, R_s [28]. Potențiometrul din figura 6.5.a este, în această situație, echivalent cu dispozitivul din figura 6.5.b. Tensiunea de ieşire este:

$$V_{out}^{'} = V_{23} = \frac{R_s \cdot R_p \frac{x}{\ell}}{R_s + R_p \frac{x}{\ell}} \cdot \frac{V_i}{R_p \frac{1-x}{\ell} \cdot \frac{R_s \cdot R_p \frac{x}{\ell}}{R_s + R_p \frac{x}{\ell}}}. \tag{6.2}$$

După efectuarea calculelor se obține:

$$V_{out}^{'} = \frac{\frac{x}{\ell}}{\frac{R_p}{R_s} \cdot \frac{x}{\ell}\left(1 - \frac{x}{\ell}\right) + 1} \cdot V_i. \tag{6.3}$$

Prin urmare, într-un caz real, dependența tensiunii de ieşire de poziția x nu este liniară. Considerând că numitorul expresiei (6.3) are o valoare foarte apropiată de 1 [28] (în general R_p fiind considerabil mai mic decât R_s), eroarea de non-liniaritate datorată rezistenței de sarcină poate fi scrisă, aproximativ:

$$\varepsilon = V_{out} - V_{out}^{'} \cong \frac{R_p}{R_s}\left[\left(\frac{x}{\ell}\right)^2 - \left(\frac{x}{\ell}\right)^3\right] \cdot V_i. \tag{6.4}$$

În particular, dacă rezistența potențiometrului este $R_s = 400\,\Omega$, rezistența de sarcină are valoarea $R_s = 12\,K\Omega$, tensiunea de intrare e $V_i = 4V$, iar cursorul se află la mijlocul corpului potențiometrului (deci $x/\ell = 1/2$), valoarea erorii de non-liniaritate ε este de aproximativ $0{,}0037$ sau, procentual, $0{,}37\%$. Aceasta arată că eroarea de non-liniaritate, în cazul utilizării potențiometrului ca traductor de poziție, este una foarte bună.

În cazul potențiometrului, *purtătorii de informație sunt sarcinile electrice*, întrucât debitul acestora (în speță intensitatea curentului electric) se modifică în funcție de variația rezistenței electrice în urma deplasării mecanice a cursorului. Astfel, informația privind deplasarea mecanică este transmisă la tensiunea de ieşire prin intermediul sarcinilor electrice. Mărimile fizice implicate în acest proces sunt: deplasarea, rezistența electrică, intensitatea curentului electric, tensiunea electrică.

6.4.2. Legea lui Faraday şi senzorul inductiv de proximitate

Componentele de bază ale unui senzor inductiv de proximitate (senzor care detectează când un obiect metalic care se apropie de el la o anumită distanță critică) sunt: bobina cu miez de ferită, un circuit oscilant (oscilatorul), circuitul de detecție (detectorul), circuitul de ieşire, respectiv cablul de ieşire (figura 6.6) [286]. Oscilatorul generează un curent alternativ de frecvență fixă, curent care alimentează bobina. În consecință, în zona din proximitatea bobinei va apărea un câmp electromagnetic [22]. Dacă în această zonă pătrunde un obiect metalic, acesta taie liniile de câmp. Întrucât obiectul e parcurs de un flux magnetic (Φ) variabil în timp, conform legii lui Faraday

$$E = -\frac{d\Phi}{dt}, \tag{6.5}$$

în interiorul acestuia apar, prin inducție electromagnetică, curenți electrici circulari, numiți curenți Foucault [37]. Curenții Foucault dau naştere, la rândul lor, unui flux magnetic care, potrivit legii lui Lenz, se opune variației fluxului inductor al bobinei. Astfel, amplitudinea tensiunii alternative a oscilatorului va scădea proporțional cu mărimea obiectului şi cu distanța dintre acesta şi bobină. Reducerea tensiunii alternative e detectată de circuitul de detecție; în cazul senzorilor standard, când amplitudinea tensiunii alternative scade sub o valoare prestabilită, se generează un semnal de ieşire care indică prezența obiectului în proximitatea senzorului.

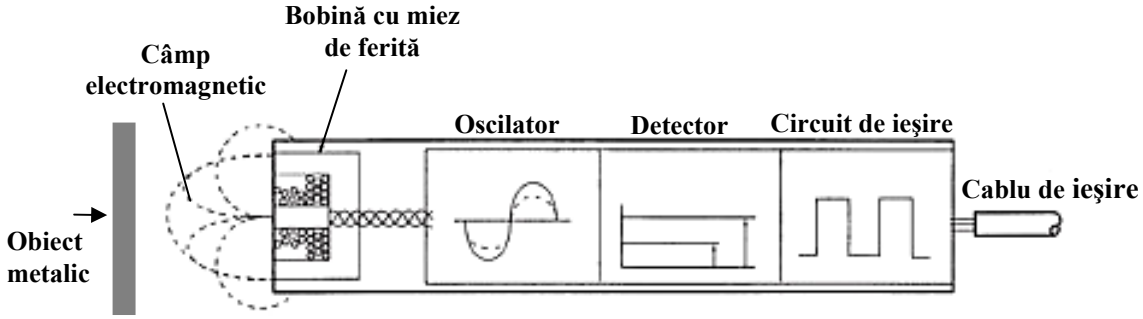


Figura 6.6. Funcționarea senzorului inductiv de proximitate

Informația privind prezența obiectului în apropierea senzorului se transmite deci, prin intermediul câmpului electromagnetic şi a sarcinilor electrice din interiorul corpului, care generează apariția curenților Foucault. În continuare, câmpul magnetic produs de aceşti curenți mijloceşte transferul informației la senzor, fiind detectată de acesta sub forma unui semnal electric. În acest caz, *purtătorii de informație* sunt, succesiv: câmpul electromagnetic, sarcinile electrice şi câmpul magnetic. Câteva dintre mărimile fizice implicate în proces sunt: intensitatea cuentului electric, intesitatea câmpului magnetic, fluxul magnetic, tensiunea electrică. În figura 6.7 pot fi observate câteva tipuri de senzori inductivi de proximitate [287], [288].

Figura 6.7. Senzori inductivi de proximitate.

6.4.3. Condensatorul plan ca traductor de poziție. Senzori capacitivi de proximitate

Un alt traductor de poziție se poate construi utilizând proprietățile condensatorului plan (figura 6.8). Capacitatea unui condensator plan, având aria suprafeței armăturilor *S*, distanța dintre armături *d* şi permitivitatea electrică relativă a dielectricului (care ocupă tot spațiul dintre armături) ε_r este:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d}, \tag{6.6}$$

unde prin ε_r am notat permitivitatea electrică a vidului.

Se poate obține o dependență între o deplasarea mecanică şi variația capacității condensatorului prin trei metode diferite: modificarea distanței *d* dintre plăci (figura 6.8.a); deplasarea unei armături pe o direcție paralelă cu cealaltă (figura 6.8.b); deplasarea dielectricului între armături (figura 6.8.c). Pentru situația reprezentată în figura 6.8.a, considerând că armăturile sunt de forma unui dreptunghi, de dimensiuni *a* şi *b*, modificarea capacității condensatorului, după deplasarea pe distanța *x* a uneia dintre armături, este:

$$\Delta C_a = C_a - C = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{d} \cdot x, \tag{6.7}$$

ceea e indică o dependență liniară între *x* şi ΔC_a.

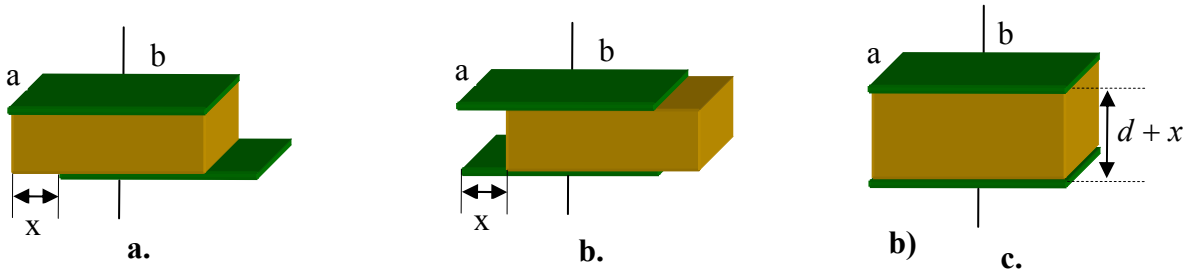


Figura 6.8. Corelația dintre deplasarea mecanică şi variația capacității condensatorului

În ceea ce priveşte cazul din figura 6.8.b, sistemul e echivalent cu doi condensatori grupați în paralel, unul cu vid, iar celălalt cu dielectric. Variația capacității în urma deplasării cu *x* a dielectricului este:

$$\Delta C_b = C_b - C = \frac{\varepsilon_0 a\, x}{d} + \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r a(b-x)}{d} - \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d} = -\frac{\varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) a}{d} \cdot x, \tag{6.8}$$

care arată că avem, din nou, o dependență liniară între *x* şi ΔC_b.

Mult mai des folosită este deplasarea reprezentată în figura 6.8.c. Modificarea capacității datorită deplasării armăturii este:

$$\Delta C_c = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d+x} - C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d} = \varepsilon_0 \varepsilon_r S \left(\frac{1}{d+x} - \frac{1}{d} \right) = -\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d} \cdot \frac{x}{d+x}. \tag{6.9}$$

Rezultatul de mai sus nu depinde de forma armăturii, ca în situațiile anterioare, ci doar de aria suprafeței acesteia, *S*. Se observă că, în acest caz, dependența dintre variația capacității şi deplasare nu este liniară. Acest tip de traductor are însă câteva avantaje semnificative: *acurateţe* ridicată, *rezoluție* mare şi, nu în ultimul rând, *stabilitate*, nefiind influențat de presiunea sau temperatura mediului. Non-liniaritatea senzorului poate fi evitată construind un traductor ca şi cel reprezentat în figura 6.9. Se folosesc trei armături, perechea de sus formând

un condensator, iar cea de jos, altul. Mişcând armătura centrală, de exemplu în jos, capacitatea condensatorului superior scade, iar a celui inferior creşte, adică:

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d_1 + x}, \; C_2 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d_2 - x}. \tag{6.10}$$

Dacă C_1 şi C_2 sunt plasaţi pe cele două laturi ale unei punţi de curent alternativ, atunci tensiunea de ieşire va depinde liniar de x. Acest tip de traductor este folosit pentru a monitoriza deplasări de la câţiva milimetri, până la câteva sute de milimetri, eroarea de non-liniaritate fiind de aproximativ $\pm 0{,}01\%$ [28].

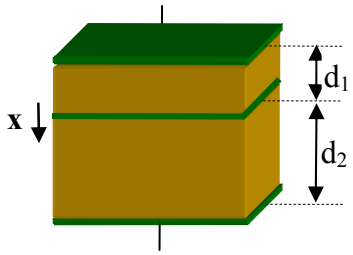


Figura 6.9. Construcţia unui traductor capacitiv liniar

Funcţionarea senzorilor capacitivi de proximitate e similară celor inductivi, singura diferenţă fiind aceea că senzorii capacitivi generează doar un câmp electric în loc de un câmp electromagnetic. Senzorii capacitivi de proximitate pot fi utilizaţi atât pentru sesizarea apropierii unor metale (conductoare), cât şi a unor dielectrici: hârtie, sticlă, plastic, diverse lichide etc. Când un obiect se apropie de suprafaţa senzorului, pătrunde în câmpul electric al condensatorului şi modifică valoarea capacităţii acestuia. Condensatorul face parte dintr-un circuit oscilant care va începe să oscileze odată cu modificarea capacităţii. Amplitudinea oscilaţiei este detectată de circuitul-trigger şi, atunci când acesta depăşeşte o valoare prestabilită, e trimis un semnal către ieşirea din senzor. Prezenţa acestui semnal indică deci existenţa unui obiect în proximitatea suprafeţei sensibile a senzorului [289].

În concluzie, funcţionarea senzorilor capacitivi de proximitate se bazează pe modificarea capacităţii unui condensator. Modul în care se modifică însă capacitatea este diferit în funcţie de natura obiectului (conductor sau dielectric). Dacă obiectul e conductor (metalic) una dintre armături este senzorul, iar cealaltă este obiectul, schimbarea capacităţii fiind rezultatul modificării distanţei dintre cele două armături datorită apropierii obiectului. Un exemplu de senzor capacitiv de proximitate este reprezentat în figura 6.10 [28].

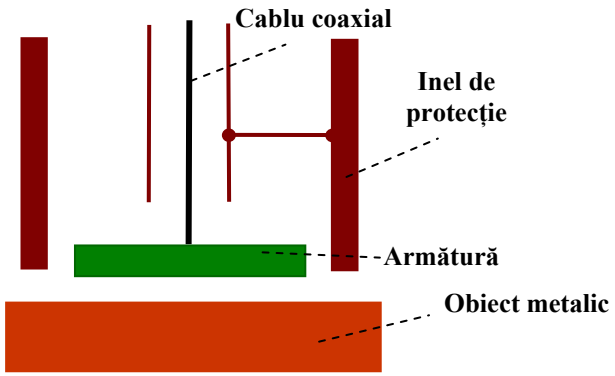


Figura 6.10. Senzor capacitiv de proximitate utilizat pentru detectarea obiectelor metalice

Condensatorul plan are o singură armătură confecționată, cealaltă fiind chiar suprafața obiectului, care trebuie să fie neapărat metalic şi legat la pământ. Când obiectul se apropie, distanța dintre armături se modifică şi apare, după cum s-a prezentat mai sus, o modificare a capacității condensatorului, modificare care ne oferă informații despre deplasarea obiectului.

Dacă obiectul e confecționat dintr-un material izolator, este preferabil să se folosească o armătură de referință [290], plasată la o distanță fixă față de senzor, care reprezintă cealaltă armătură (figura 6.11.a). Când în spațiul dintre cele două armături apare un obiect dielectric, capacitatea condensatorului între armăturile căruia se găsea inițial aer se modifică, datorită faptului că permitivitatea electrică a dielectricului e diferită de a aerului. Mai mult, variația capacității condensatorului depinde de permitivitatea şi grosimea obiectului.

Considerând că permitivitatea dielectricului materialului din care e confecționat dielectricul are valoarea ε_r, obiectul (considerat de formă paralelipipedică) are grosimea d_0, iar distanța dintre senzor şi armătura de referință este d, capacitatea C a condensatorului format după apariția obiectului se poate calcula ca fiind capacitatea echivalentă a trei condensatoare legate în serie (figura 6.11.b).

Astfel:

$$\frac{1}{C}=\frac{d_1}{\varepsilon_0 S}+\frac{d_0}{\varepsilon_0\varepsilon_r S}+\frac{d_2}{\varepsilon_0 S}=\frac{1}{\varepsilon_0 S}\left(\frac{d_0}{\varepsilon_r}+d-d_0\right). \tag{6.11}$$

Pornind de la relația de mai sus şi efectuând calculele, se obține diferența dintre capacitatea finală şi cea inițială (când singurul dielectric era aerul):

$$\Delta C=C-\frac{\varepsilon_0 S}{d}=\frac{d_0(\varepsilon_r-1)}{d\varepsilon_r-d_0(\varepsilon_r-1)}\cdot\frac{\varepsilon_0 S}{d}. \tag{6.12}$$

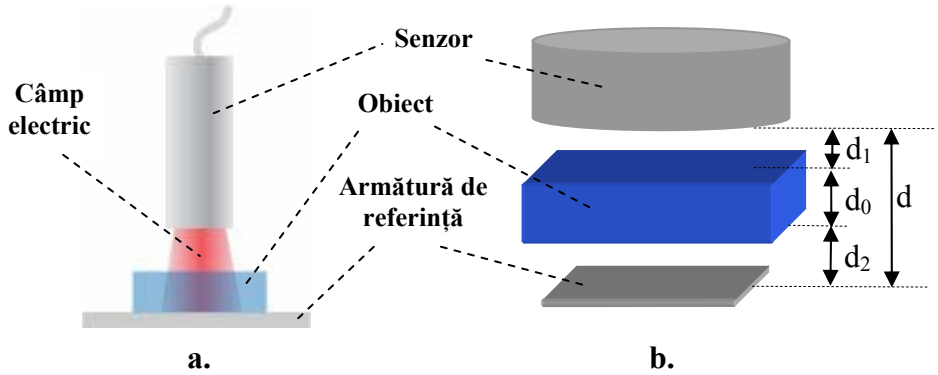


Figura 6.11. Modificarea capacității în urma introducerii unui obiect confecționat dintr-un material dielectric între senzor şi armătura de referință

În concluzie, se poate observa că modificarea capacității condensatorului datorită apariției obiectului în proximitatea senzorului depinde într-adevăr de grosimea obiectului şi de permitivitatea electrică a acestuia.

Nu întotdeauna e posibil să se plaseze o armătură de referință în fața senzorului. Totuşi, şi în această situație se poate detecta apariția unui dielectric în proximitatea senzorului. În lipsa armăturii de referință, câmpul electric al senzorului se „înfăşoară" în jurul acestuia într-un anumit mod [290]. Apariția unui obiect confecționat dintr-un material dielectric modifică

forma câmpului, ceea ce permite detectarea prezenței obiectului în proximitatea senzorului (figura 6.12).

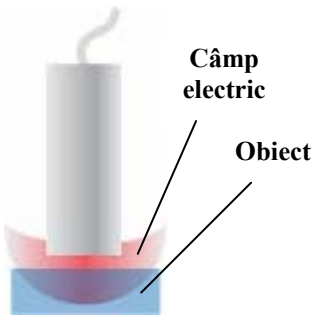


Figura 6.12. În lipsa armăturii de referință, modificarea formei câmpului electric „înfășurat" în jurul senzorului capacitiv permite detectarea obiectelor confecționate din materiale dielectrice

Dacă se analizează funcționarea senzorilor capacitivi din perspectiva transferului informațional, aceasta poate fi descrisă, pe scurt, astfel: informația privind prezența obiectului în apropierea senzorului este transmisă câmpului electric dintre armături sau, după caz, câmpului electric dintre armătură şi obiect, urmând ca această informație să ajungă, prin intermediul sarcinilor electrice de pe armături, să modifice corespunzător capacitatea senzorului, modificare care poate fi convertită în semnal electric. Prin urmare câmpul electric şi sarcinile electrice reprezintă *purtătorii de informație* în acest caz. În cursul acestui proces intervin parametri ca: deplasarea mecanică, intensitatea câmpului electric, capacitatea electrică, tensiunea electrică.

În figura 6.13 se pot observa câteva tipuri de senzori capacitivi de proximitate [291], [292].

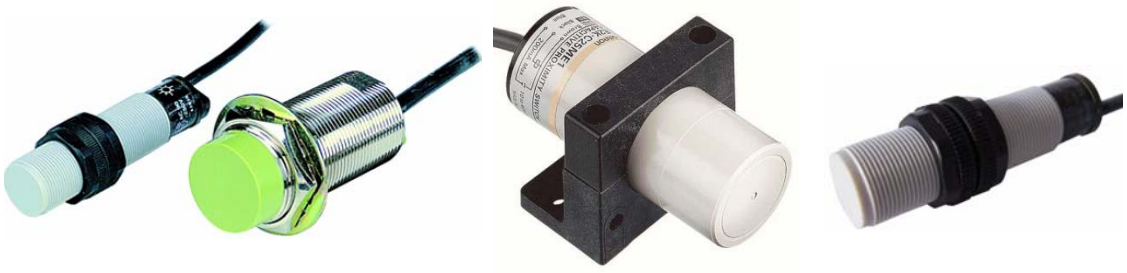


Figura 6.13. Senzori capacitivi de proximitate

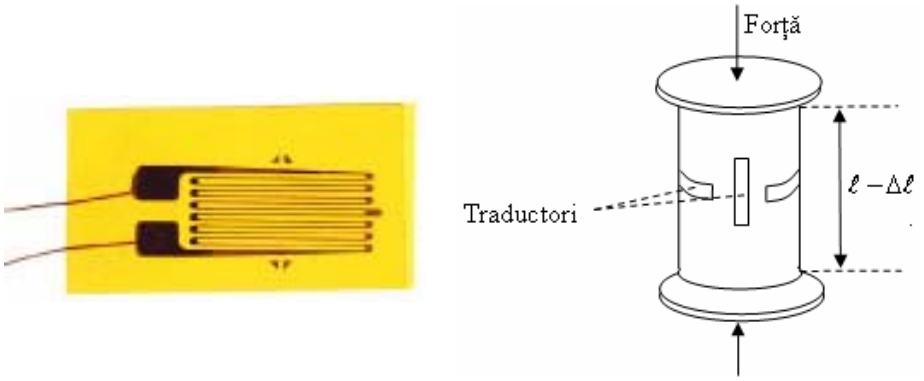
6.4.4. Legea lui Hooke şi traductorii rezistivi de forță

Traductorii de forță convertesc energia mecanică în energie electrică prin măsurarea deformării produse de o forță [28]. Traductorii de forță pot fi de trei feluri: rezistivi, semiconductori (sau piezorezistivi) şi non-rezistivi (capacitivi, cu fibre optice etc.) Traductorii rezistivi şi cei semiconductori se numesc traductori tensiometrici [162]. Cei mai simpli traductori rezistivi de forță sunt realizați prin fixarea unui fir metalic pe un suport izolator (de exemplu poliester). Firul metalic este adesea înlocuit de o foiță metalică subțire, (având grosimea de ordinul micronilor) gravată pe suport (figura 6.14.a). Variația relativă a rezistenței electrice a unui element pasiv (al firului, foiței metalice sau semiconductorului, în

cazul nostru), datorită modificării lungimii acestuia, este proporțională cu variația relativă a lungimii elementului, $\varepsilon = \Delta\ell / \ell$, adică:

$$\frac{\Delta R}{R} = G \cdot \varepsilon, \tag{6.13}$$

în care G este o constantă de proporționalitate („strain-gauge factor") care depinde de tipul de traductor folosit. De exemplu, pentru firul metalic sau foița metalică, G are, în general, valoarea 2. În cazul semiconductoarelor de silicon de tip *p*, G poate lua valori de +100 sau chiar mai mult, iar pentru cele de tip *n* are valori negative, care depășesc valoarea de -100 [28], [293].



a. **b.**

Figura 6.14. Traductorul rezistiv de forță (a) şi modul de plasare a patru astfel de traductori pe suprafața unui corp supus deformării (b)

Pe peretele lateral elastic al corpului supus deformării se plasează cel puțin patru traductoare de forță, două paralele cu direcția forței aplicate şi două perpendiculare pe aceasta (figura 6.14.b). Potrivit legii lui Hooke, deformarea $\Delta\ell$ a unui material elastic, supus acțiunii unei forțe de valoare F, respectă relația:

$$F = SE \cdot \frac{\Delta\ell}{\ell}, \tag{6.14}$$

unde E este modulul de elasticitate al materialului, S e secțiunea acestuia, iar ℓ e lungimea sa inițială. Când e aplicată forța, corpul se comprimă, ceea ce determină modificarea rezistenței traductorului, datorită scurtării acestuia. Cunoscând modul în care depinde ε de variația relativă a rezistenței electrice a traductorului, $\Delta R / R$, se poate determina, utilizând formulele de mai sus, relația dintre variația relativă a rezistenței şi valoarea forței aplicate:

$$\frac{\Delta R}{R} = f(F). \tag{6.15}$$

Traductorii tipici, de tipul celor descrişi, sunt folosiți pentru forțe de până la 10 *MN*, eroarea de non-liniaritate fiind de aproximativ $\pm 0{,}03\%$. Există şi traductori care măsoară, pe acelaşi principiu, forța, în cazul încovoierii sau răsucirii [162]. Aceştia pot fi folosiți doar pentru forțe de maxim 50 *kN*, erorarea de non-liniaritate fiind de $\pm 0{,}02\%$ [28].

În cazul traductorilor de forță descriși, *purtătorii de informație* sunt atomii rețelei acestora, întrucât, prin modificarea poziției lor unii față de alții, permit ca informația privind valoarea forței aplicate să poată fi extrasă din modificarea valorii rezistenței electrice. Mărimile fizice reprezentative evidențiate la nivelul acestui proces sunt, deci: forța, deformarea, rezistența electrică.

6.4.5. Fenomenul de reflexie totală şi senzorii tactili optici cu devierea luminii

Dacă o rază de lumină întâlneşte suprafața de separare dintre două medii diferite caracterizate de indicii de refracție n_1, respectiv n_2 (figura 6.15.a), cu $n_2 < n_1$, aceasta poate să se refracte, dacă unghiul de incidență este mai mic decât unghiul limită ($i < \ell$), sau poate suferi fenomenul de reflexie totală, dacă unghiul de incidență este mai mare decât unghiul limită ($i > \ell$). Valoarea unghiului limită, care marchează trecerea de la un caz la altul are valoarea:

$$\ell = \arcsin \frac{n_2}{h_1}. \tag{6.16}$$

Reflexia totală şi refracția luminii stau la baza funcționării senzorilor tactili optici cu devierea luminii [162] (figura 6.15.b). Razele provenite de la sursa de lumină *S* se propagă de-a lungul unui ghid optic confecționat din plexiglas. În lipsa obiectului, datorită materialului reflectant şi a reflexiei totale care apare la suprafața de separație plexiglas-aer, razele de lumină sunt „captive" în interiorul ghidului optic, propagându-se după o linie frântă. Dacă un obiect este aşezat pe materialul reflectant, suprafața acestuia se deformează. Ca urmare, unghiul de incidență al razelor incidente pe suprafața superioară a ghidului se modifică, deci unele dintre razele reflectate de către materialul reflector vor ajunge pe suprafața inferioară a ghidului sub un unghi de incidență inferior unghiului limită.

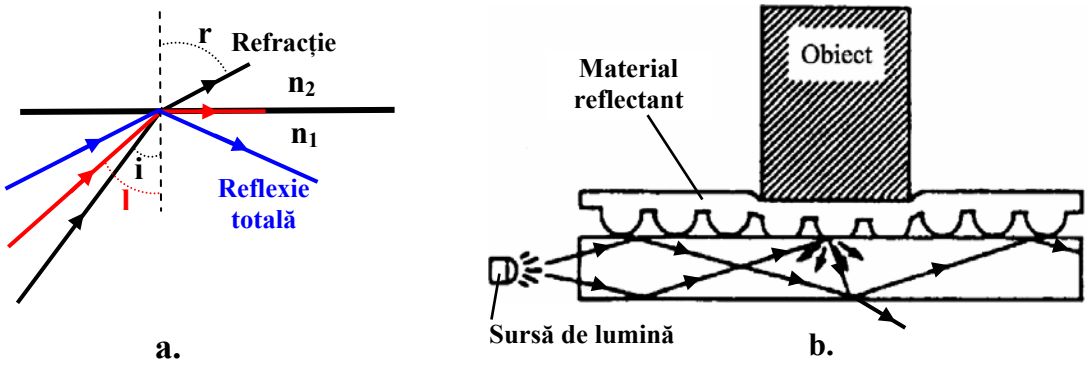


Figura 6.15. Fenomenul de reflexie totală (a) şi senzorul tactil optic cu devierea luminii (b)

Aceste raze vor reuşi să iasă în afara ghidului, urmând a fi receptate (de către senzori CCD, fibre optice sau fotodiode) şi prelucrate. În urma prelucrării informației aduse de semnalele luminoase (razele care ies din ghid), se poate deduce forma suprafeței obiectului care a intrat în contact cu materialul reflectător. Mai detaliat, informația privind deformarea ghidului optic în urma apăsării corpului este transmisă atomilor rețelei ghidului care, prin modificarea poziție lor relative, este ulterior transferată fotonilor din raza de lumină, fiind, în final,

colectată la ieşire. Aşadar, atomii rețelei şi fotonii joacă rolul *purtătorilor de informație* în cazul senzorilor tactili optici prezentați.

6.4.6. Presiunea şi traductorii piezoelectrici. Senzori piezoelectrici.

Traductorul piezoelectric este folosit pentru măsurarea forței, presiunii sau accelerației şi se bazează pe proprietatea unor materiale (numite materiale piezoelectrice) de a se încărca electric cu sarcini de semne contrare pe cele două fețe, atunci când sunt supuse unor presiuni mecanice. Fenomenul se numeşte efect piezoelectric (figura 6.16.a). Efectul piezoelectric poate fi descris şi ca modificarea polarizării unui dielectric în urma apariției unei tensiuni mecanice.

Dacă materialele dielectrice sunt supuse influenței unui câmp electric de intensitate $\vec{E}$, acestea se polarizează, adică în interiorul lor apar dipoli electrici. Polarizarea materialelor dielectrice este caracterizată de vectorul polarizare electrică $\vec{P}$, iar densitatea de sarcină electrică e reprezentată prin vectorul deplasare electrică $\vec{D}$. Între cei doi vectori există relația:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E}, \tag{6.17}$$

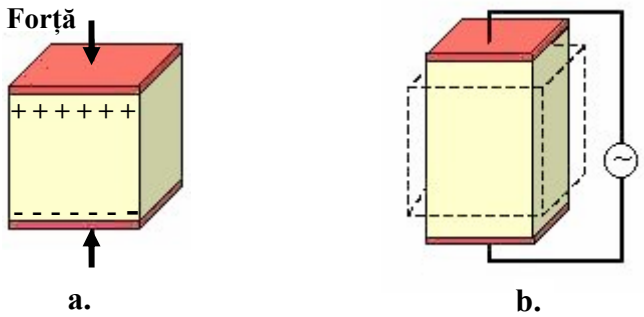
unde ε_0 e permitivitatea electrică a vidului, iar ε_r e cea a dielectricului.

Există şi efectul piezoelectric invers, adică apariția unei presiuni mecanice (care modifică volumul corpului) în momentul aplicării unei tensiuni electrice (figura 6.16.b) [294]. Câteva materiale cu proprietăți piezoelectrice sunt [47]: cristalele ionice simple (cuarț, sare de Rochelle); materialele ceramice (titanat de bariu, titanat de zirconiu (PZD), oxid de zinc, titanat de bariu), unii polimeri, ca de pildă fluoridul de polivinilidenă (PVDF).

Valoarea sarcinii electrice apărute pe fețele materialului este proporțională cu valoarea forței aplicate:

$$q = S \cdot F, \tag{6.18}$$

unde S se numeşte *sensibilitatea de sarcină*, depinzând de tipul materialului şi de orientarea cristalelor sale. De exemplu, cuarțul are o sensibilitate de $2{,}2\ pC/N$, când este tăiat după o direcție anume şi forța e aplicată după o direcție particulară. Titanatul de bariu are o sensibilitate mult mai mare, de $130\ pC/N$ [28], iar cea a titanatului de zirconiu este de $265\ pC/N$.



a. **b.**

Fig. 6.16. Efectul piezoelectric (a) şi efectul piezoelectric invers (b)

Dacă pe fețele opuse ale traductorului se aplică doi electrozi metalici, sistemul format astfel este un condensator plan de capacitate *C*, la capetele căruia tensiunea va fi:

$$V = \frac{q}{C} = \frac{Sd}{\varepsilon_0 \varepsilon_r A} \cdot F \,, \tag{6.19}$$

unde ε_r este permitivitatea electrică relativă a materialului piezoelectric, *S* reprezintă aria unui electrod, iar *d* distanța dintre electrozi. Se obține, deci, o dependență liniară între forța aplicată şi tensiunea dintre electrozi.

Dacă se doreşte măsurarea unei presiuni, cum $p = F / A$, relația de mai sus devine:

$$V = \frac{Sd}{\varepsilon_0 \varepsilon_r A} \cdot p \,. \tag{6.20}$$

Mărimea fizică

$$S_v = \frac{S}{\varepsilon_0 \varepsilon_r} \,, \tag{6.21}$$

numit „factor de sensibilitate a tensiunii”. Folosind această notație, se obține următoarea relație de dependență liniară între presiunea aplicată şi tensiunea dintre electrozi:

$$V = S_v d \cdot p \,. \tag{6.22}$$

Constanta S_v este, şi ea, una care depinde de natura materialului. De exemplu, pentru cuarț $S_v = 0{,}055 V / m \cdot Pa$, iar pentru titanatul de bariu $S_v = 0{,}011\, V / m \cdot Pa$ [28].

Schema electrică echivalentă a unui senzor piezoelectric este reprezentată în figura 6.17.a.

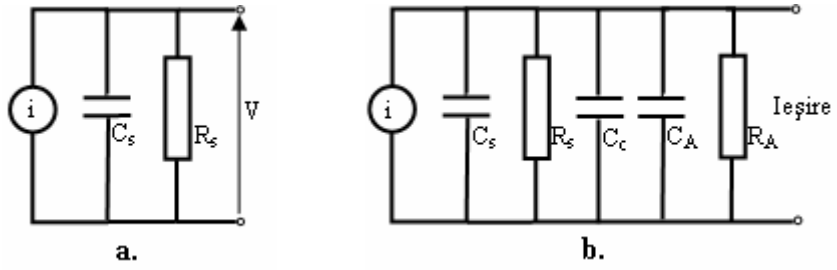


Figura 6.17. Schema electrică echivalentă a unui senzor piezoelectric simplu (a) şi conectat la un amplificator de sarcină (b)

În componența acestuia intră un generator de sarcină, grupat în paralel cu un rezistor R_s şi cu un condensator, C_s [28]. Tensiunea care apare între electrozi este, de obicei, foarte mică. În consecință, senzorul se conectează, prin intermediul unui cablu de capacitate C_c, la un amplificator de sarcină, format din rezistorul R_A şi condensatorul C_A (figura 6.17.b). Sistemul formează, astfel, un senzor mai complex, care îndeplineşte şi funcția de condiționare a semnalelor. Sistemul din figura 6.17.b poate fi echivalat cu unul similar celui din figura 6.17.a, în care capacitatea, respectiv rezistența, au valorile:

$$C = C_s + C_c + C_A,\ R = \frac{R_s R_A}{R_s + R_A}. \tag{6.23}$$

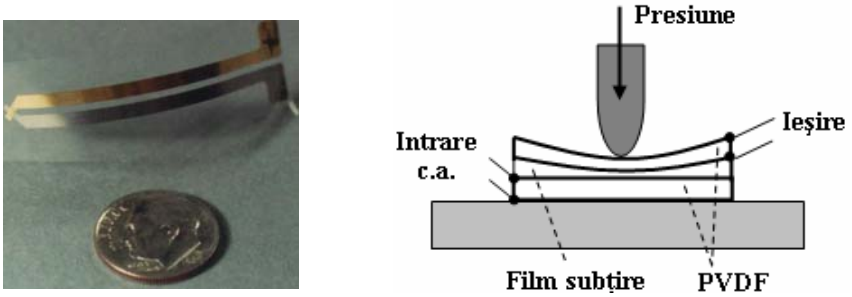
Când traductorul este supus unei presiuni, acesta se încarcă electric, descărcându-se apoi, în timp, prin rezistor. Timpul necesar descărcării depinde de constanta de timp a circuitului.

Câteva tipuri de senzori piezoelectrici pot fi observați în figura 6.18 [295].

Figura 6.18. Traductori piezoelectrici

Un tip particular de senzor care se bazează pe efectul piezoelectric direct şi invers este cel care foloseşte două filme confecționate din fluorid de polivinilidenă [28]. Senzorul este unul de tip tactil, foarte subțire, grosimea lui fiind de aproximativ $25\,\mu m$ (figura 6.19.a).

Cele două straturi de film PVDF sunt separate de către un alt film foarte subțire, care transmite vibrațiile mecanice (figura 6.19.b). Filmului de PVDF inferior i se aplică o tensiune alternativă, care are ca efect apariția unei oscilații mecanice (efectul piezoelectric invers), vibrație transmisă de filmul intermediar filmului PVDF superior. Prin efect piezoelectric, vibrația mecanică determină apariția unei tensiuni electromotoare alternative de-a lungul filmului superior, care se colectează la ieşire [28]. Dacă se aplică o presiune filmului superior, vibrațiile acestuia sunt afectate, ceea ce generează modificări ale tensiunii alternative de la ieşire. Analizând modificările tensiunii de la ieşire, se obțin informații despre modul în care acționează presiunea. Cu acest tip de senzori se pot măsura presiuni cu valori cuprinse în intervalul $1KPa$ – $40\ GPa$ [296].



a. **b.**

Figura 6.19. Senzor tactil piezoelectric cu film PVDF: aspect (a) şi funcționare (b)

Una dintre aplicațiile remarcabile ale traductorilor piezoelectrici este utilizarea lor în echipamentul total implantabil TICA (Totally Implantable Cohlear Amplifier), prin care se îmbunătățeşte considerabil simțul auditiv al omului. Spre a sublinia avantajele implantului TICA, se va compara pe scurt principiul de funcționare al acestuia cu cel al protezei auditive clasice. Proteza auditivă clasică transformă undele sonore în oscilații ale tensiunii unui semnal electric, prin folosirea unui microfon. Variațiile de tensiune sunt amplificate, apoi reconvertite în unde sonore. Amplificarea obținută este de 80-90 dB însă, datorită reflexiei parțiale a

sunetului pe pereții conductului auditiv, apare un zgomot de fond nedorit şi un efect de feed-back acustic [162]. Acest inconvenient poate fi îndepărtat prin implantul TICA, care emite semnale amplificate ca vibrații micromecanice (şi nu ca unde sonore, cum se întâmplă în cazul protezei obişnuite) care sunt transmise sistemului auditiv printr-un traductor piezoelectric implantat în cavitatea mastoidă, traductor cuplat direct la scăriță şi, deci, la cohlee (figura 6.20) [297].

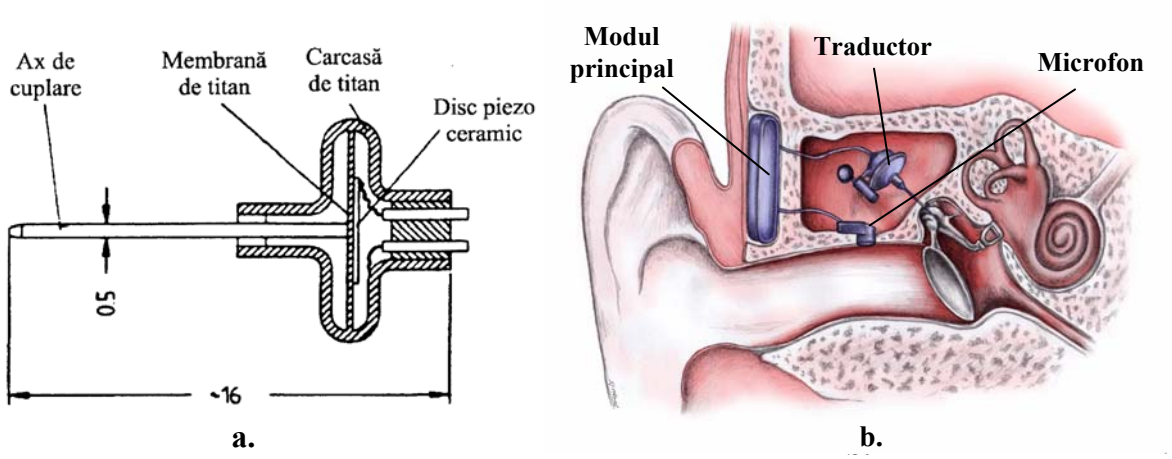


Figura 6.20. Implantul TICA: traductorul piezoelectric folosit (a) şi implantul propriu-zis, format din modulul principal, microfon şi traductor (b)

La o tensiune de 1V se produc vibrații cu o amplitudine de peste 60 nm, care corespunde unui nivel acustic de 100 dB. Sistemul este implantabil în întregime, materialele fiind biocompatibile şi biostabile. Microfonul are o membrană cu diametrul de 4,5 mm şi cântăreşte 0,4 g, fiind ermetic închis într-o carcasă de titan. Modulul principal, implantat în spatele pavilionului urechii, conține bateria, bobina pentru reîncărcare, circuitul de amplificare şi componentele pentru controlul prin telecomandă (figura 6.20.b). Sistemul consumă sub 2mW, bateriile funcționează 60 de ore şi pot fi reîncărcate în 90 de minute [162].

În cazul senzorilor piezoelectrici, atomii rețelei cristaline a materialului piezoelectric şi sarcinile electrice care apar pe fețele acestui material joacă rol de *purtători de informație*, întrucât prin intermediul acestora informația privind presiunea mecanică aplicată ajunge să fie colectată sub forma unui semnal electric. Mărimile fizice care intervin de regulă în acest proces sunt: forța, presiunea, capacitatea electrică, tensiunea electrică.

6.4.7. Relația dintre câmpul electric şi deformarea mecanică în cazul actuatorilor piezoelectrici

Acuatorii piezoelectrici funcționează pe baza efectului piezoelectric invers, convertind energia electrică în energie mecanică. În situația în care câmpul electric aplicat actuatorului este alternativ, materialul se deformează astfel încât actuatorul efectuează o mişcare oscilatorie, caracterizată de o anumită amplitudine şi frecvență. Relația dintre intensitatea câmpului electric aplicat şi deformarea unui material ceramic piezoelectric PZT (zircotitanat de plumb: $PbTiZrO_3$) este reprezentat în figura 6.21 [187]. Când e aplicat un câmp ciclic de mică amplitudine, deformarea materialului este cvasiliniară. Pe măsură ce creşte valoarea intensității câmpului electric, abaterea de la liniaritate e tot mai pronunțată, evidențiindu-se, treptat, histereza. Din momentul în care intensitatea câmpului atinge o valoare critică

E_c (*coercitive electric field*), relația dintre câmpul aplicat şi deformarea materialului e descrisă grafic de o curbă cu aspect de fluture (*butterfly-like relationship*).

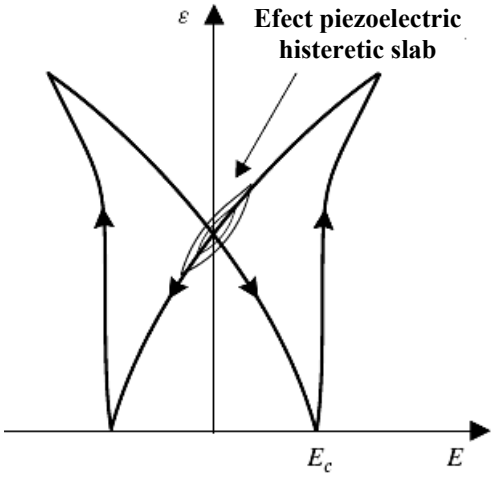


Figura 6.21. Relația câmp-deformare în cazul unui material ceramic piezoelectric PZT

Materialele piezoelectrice pot fi grupate în puternice (*hard* – intensitățile câmpului electric coercitiv au valori mai mari de 20 kV/cm) şi slabe (*soft* – intensitățile câmpului au valori cuprinse între 14 şi 16 kV/cm). La confecționarea actuatorilor, în particular a actuatorilor piezoelectrici rezonanți, se utilizează mai ales materiale piezoelectrice puternice, datorită valorilor ridicate ale factorului de calitate a acestora[86][187].

În componența actuatorilor piezoelectrici pot intra unul sau mai multe elemente active, sub formă de lamele, tuburi, bare sau plăci. Controlul deformării acestor elemente înseamnă implicit controlul mişcării elementului mobil al actuatorului. De pildă, în figura 6.22 este reprezentată o micropompă acționată prin intermediul unui actuator format din mai multe elemente piezoelectrice active dispuse în stivă [162].

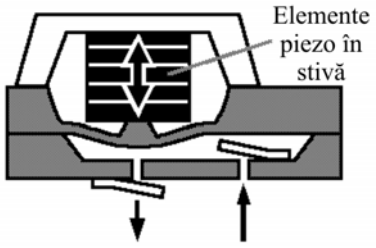


Figura 6.22. Micropompă cu actuator piezoelectric format din mai multe elemente piezo dispuse în stivă

Există mai multe avantaje ale actuatorilor piezoelectrici [162]: randament energetic ridicat (aproximativ 50%), precizie submicronică în ceea ce priveşte poziționarea, domeniu larg al semnalelor de intrare (de la 1mV la 1 kV), multiple posibilități de miniaturizare şi integrare informațional-energetică, dezvoltarea unor forțe cu valori considerabile etc. Utilizarea acestui tip de actuatori este însă limitată de câteva dezavantaje: fragilitate, rezistență redusă la uzură şi oboseală, necesitatea transformării vibrațiilor de frecvență înaltă în mişcare continuă sau intermitentă.

[86] Un factor de calitate ridicată indică o eficiență ridicată a conversiei energiei electrice în energie mecanică.

6.4.8. Oscilațiile mecanice şi motorul ultrasonic cu undă progresivă

Una dintre aplicațiile interesante şi relativ recente ale actuatorilor piezoelectrici este motorul ultrasonic cu undă progresivă (TWUM – *Travelling wave ultrasonic motors*) [187]. Acest tip de motor utilizează undele mecanice cu frecvențe mai mari de 20 kHz (deci din domeniul ultrasunetelor) pentru a determina mişcarea rotorului.

Vibrațiile componentei fixe (statorul), generate de materiale piezoelectrice, antrenează, prin intermediul frecării, componenta mobilă (rotorul). Statorul unui astfel de motor este în formă de disc, fiind compus dintr-un substrat metalic elastic şi un strat piezoelectric ceramic (figura 6.23.a). Diametrul discului este, ca ordin de mărime, mult mai mare decât grosimea acestuia[87].

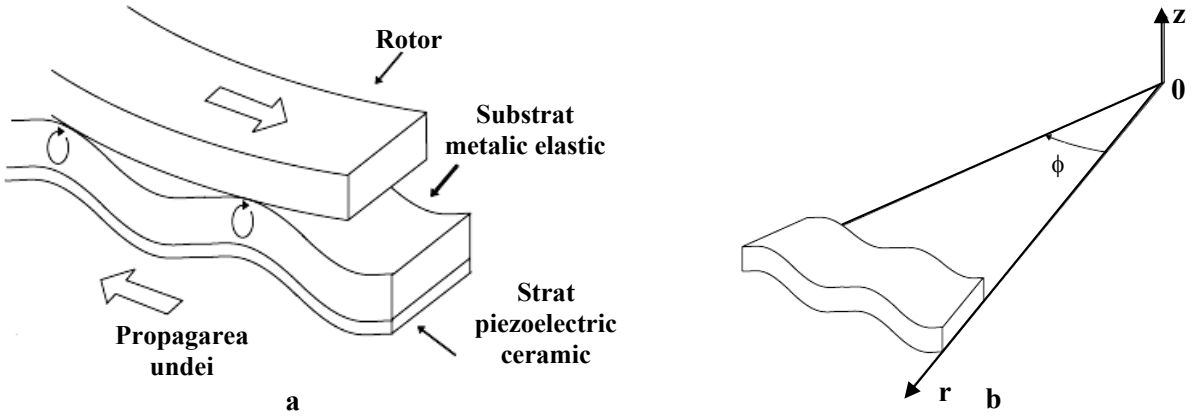


Figura 6.23. Funcționarea motorului ultrasonic cu undă progresivă

Deplasarea axială a rotorului depinde de variabila unghiulară ϕ şi de variabila radială r (figura 6.23.b):

$$u(\phi, r) = F(r) \cdot A\cos(k\phi), \tag{6.24}$$

în care k reprezintă numărul de undă. Forma particulară a funcției $F(r)$ depinde şi ea de valoarea lui k [187]. Ecuația undei progresive este, pentru cazul descris:

$$u(\phi, t) = Af(k\phi \pm wt), \tag{6.25}$$

în care w este frecvența semnalului electric de intrare, iar t e timpul. Semnul plus corespunde situației în care unda se propagă în sensul creşterii lui ϕ, iar semnul minus, cazului în care propagarea undei are loc în sens invers. Expresia (6.25) poate fi scrisă ca o sumă a două unde staționare:

$$u(\phi, r, t) = AR(r)\cos(k\phi)\cos(wt) \pm AR(r)\sin(k\phi)\sin(wt). \tag{6.26}$$

[87] Această condiție constructivă trebuie respectată pentru ca modelarea matematică să poată fi dezvoltată pornind de la ipoteza lui Kirchhoff. Pentru detalii, se poate consulta [187].

În expresia de mai sus $R(r)$ descrie deplasarea axială a statorului ca funcție de variabila radială *r*. Ecuația (6.26) evidențiază existența a două pattern-uri geometrice: unul de formă sinusoidală şi altul de formă cosinusoidală. Lungimea de undă a acestor pattern-uri este $\lambda = 2\pi / k$.

Din punct de vedere constructiv, una dintre variantele unui motor ultrasonic este cea în care statorul este format din două discuri suprapuse [133]. Fiecare disc e compus din opt sectoare polarizate alternativ diferit. Discurile sunt deplasate unul față de altul cu o jumătate de sector (adică $\lambda / 4$) şi sunt alimentate cu două tensiuni alternative defazate cu un sfert de perioadă una față de alta. În consecință, vor apărea patru unde ultrasonice care vor mişca rotorul potrivit procedeului descris.

Acest tip de motoare prezintă mai multe avantaje: timp scurt de răspuns, funcționare silențioasă, forțe de torsiune mari chiar la viteze mici, micropoziționare excelentă etc [134]. Una dintre cele mai spectaculoase aplicații ale motoarelor descrise este în domeniul opticii, în speță la camerele Canon, al căror dispozitiv de autofocalizare e bazat pe un motor ultrasonic piezoelectric (figura 6.24).

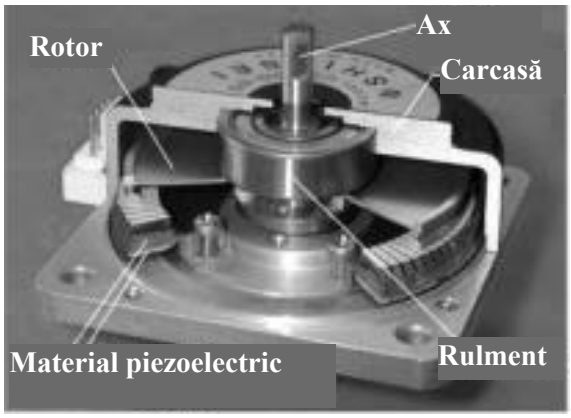


Figura 6.24. Motor ultrasonic piezoelectric

Evident, *purtătorii de informație* implicați în funcționarea actuatorilor piezoelectrici sunt câmpul electric şi atomii rețelei cristaline a materialului piezo, iar mărimile fizice care intervin întotdeauna sunt intensitatea câmpului electric şi deformarea mecanică.

6.4.9. Dinamica fluidelor şi actuatorii electro şi magnetoreologici

Reologia este ştiința deformării şi curgerii materiei în general [187]. Deşi obiectul de studiu al reologiei poate fi orice material care curge sau e supus deformării, de regulă e studiat comportamentul lichidelor elastice, al celor ne-newtoniene (care nu se supun ecuației lui Newton), precum şi cel al solidelor vâscoelastice. În particular, reologia studiază şi relația dintre efortul unitar şi rata de deformare în cazul lichidelor care curg. Din această categorie fac parte şi fluidele electro şi magnetoreologice.

Fluidele magnetoreologice sunt suspensii de particule mici[88], necoloidale, magnetizabile, în baze organice lichide. În lipsa câmpului magnetic, vâscozitatea acestor fluide variază între 0,1 şi 10 $Pa \cdot s$.

[88] Dimensiunile acestor particule sunt cuprinse între 0,1 μm şi 10 μm, iar concentrația lor este înte 20 şi 60 % [187].

Dacă se aplică un câmp magnetic exterior[89], vâscozitatea acestor fluide creşte, în câteve milisecunde, de 5-6 ori, iar stresul de forfecare poate ajunge până la 100 *kPa* [187]. Aceste modificări sunt datorate faptului că, sub acțiunea câmpului magnetic, particulele formează dipoli magnetici care, aliniindu-se după direcția liniilor de câmp, se aglomerează şi formează lanțuri în lungul acestor linii, ceea ce conduce la creşterea rezistenței de curgere a fluidului, deci a vâscozității acestuia [133]. Fluidele electroreologice au o comportare similară, dar sub influența unui câmp electric. Aceste fluide sunt suspensii de particule active din punct de vedere electric (cam de zece ori mai mari decât cele ale fluidelor magnetoreologice) în uleiuri dielectrice sau solvenți dielectrici. Sub influența unui câmp electric exterior, apar interacțiuni între particule care generează formarea de lanțuri, conducând la creşterea vâscozității fluidelor.

În absența câmpului electric, fluidele electro şi magnetoelectrice se comportă ca fluidele normale, ecuația reologică de stare acestora fiind ecuația lui Newton [184], [187]:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}, \tag{6.27}$$

în care τ reprezintă stresul de forfecare, $\dot{\gamma}$ este rata de forfecare, iar η e coeficientul de vâscozitate al fluidului (care e constant şi independent de stresul de forfecare). Se observă că, în această situație, dependența stresului de forfecare de rata de forfecare este liniară [133].

În prezența unui câmp electric exterior, continuu sau alternativ, fluidele electroreologice se comportă ca nişte solide şi reîncep să curgă doar dacă stresul de forfecare depăşeşte o anumită valoare de prag, τ_y. Similar se comportă şi fluidele magnetoreologice supuse acțiunii unui câmp magnetic. Comportarea acestor fluide poate fi considerată ca fiind independentă de timp şi similară unui fluid Bingham [133], [187]. Prin urmare, ecuația de stare a fluidelor electro şi magnetoreologice este:

$$\tau = \tau_y + \eta \cdot \dot{\gamma}. \tag{6.28}$$

Curgerea fluidelor electro şi magnetoreologice aflate sub acțiunea unui câmp electric, respectiv magnetic, descrisă de ecuația (6.28), depinde deci de valoarea de prag a stresului de forfecare, τ_y, care depinde, la rândul lui, de valoarea intensității câmpului electric $\vec{E}$, respectiv magnetic $\vec{H}$ [133], [187]:

$$\tau_y = \tau_y(E); \tau_y = \tau_y(H). \tag{6.29}$$

Creşterea valorii lui τ_y odată cu creşterea intensității câmpului electric, respectiv magnetic, conduce la creşterea vâscozității aparente a fluidelor electro şi magnetoreologice:

$$\eta_{ap} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}. \tag{6.30}$$

În concluzie, se poate ajusta, prin intermediul intensității câmpurilor aplicate, vâscozitatea fluidelor, care pot să se comporte ca nişte solide sau ca nişte geluri mai mult sau mai puțin vâscoase [133], [162].

[89] Valorile maxime ale acestor câmpuri magnetice sunt în jur de 250 *kA/m* [187].

În funcție de funcția pe care dorim s-o îndeplinească actuatorul, se disting trei moduri de operare ale fluidelor electro şi magnetoreologice: *shear mode*, *flow mode* şi *squeeze mode* [133], [184], [187]. În cazul primului mod de operare, *shear mode*, fluidul este presat între doi electrozi plați (figura 6.25.a). Distanța dintre electrozi rămânând constantă, unul dintre ei se deplasează, în timp ce celălalt rămâne fix. Deplasarea se produce ca urmare a unei forțe externe, care depinde de intensitatea câmpului electric aplicat. În consecință, apare o deformare de forfecare a fluidului care poate fi controlată cu ajutorul intensității câmpului extern. Acest mod de operare se utilizează la cuplaje sau frâne.

Pentru situația *flow mode*, fluidul curge între doi electrozi ficşi, plasați paralel unul față de altul (figura 6.25.b) [187]. Câmpul electric, respectiv magnetic, influențează rezistența la curgere a fluidului şi, în consecință, reducerea de presiune (*pressure drop*), ceea ce asigură, în final, controlul debitului fluidului. Acest mod este implementat, de pildă, la valvele controlate electric ale actuatorilor hidraulici [133].

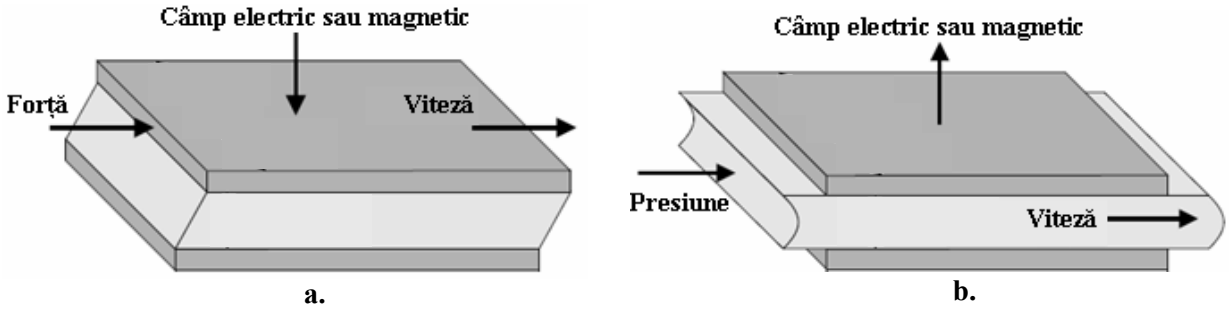


Figura 6.25. Reprezentare schematică a primelor două moduri de operare ale fluidelor electro şi magnetoreologice: *shear mode* (a) şi *flow mode* (b)

Al treilea mod de operare, *squeeze mode*, exploatează deplasarea perpendiculară a celor doi electrozi între care curge fluidul (figura 6.26) [187]. În urma aplicării unei forțe, orientată perpendicular pe suprafața electrozilor, electrodul superior coboară în timp ce electrodul inferior rămâne fix. Fluidul este presat şi, în consecință, va curge orizontal şi radial. Pe acest mod de operare se bazează funcționarea actuatorilor folosiți pentru amortizarea vibrațiilor în care apar forțe dinamice mari şi amplitudini mici [133].

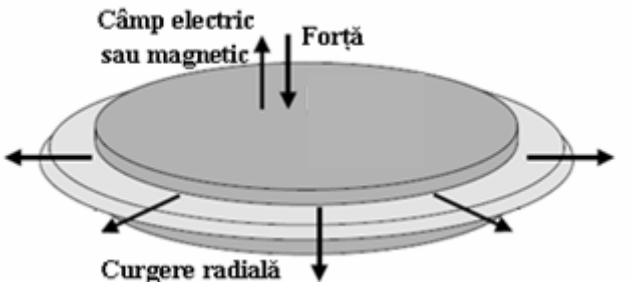


Figura 6.26. Reprezentare schematică a celui de-al treilea mod de operare al fluidelor electro şi magnetoreologice: *squeeze mode*

În final, e prezentat în figura 6.27 modul în care se realizează cuplajul dintre arborele motor şi cel condus folosind proprietățile fluidelor electroreologice [162].

Din perspectiva informațională, câmpul electric (în cazul actuatorilor electroreologici), respectiv câmpul magnetic (în cazul actuatorilor magnetoreologici) reprezintă, alături de moleculele fluidului electro sau magnetoreologic, *purtătorii de informație*. După cum s-a

evidențiat mai sus, mărimile fizice specifice acestui tip de actuatori sunt: intensitatea câmpului electric/magnetic, stresul de forfecare şi rata de forfecare.

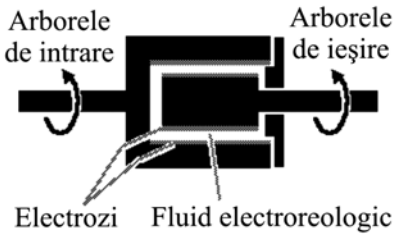


Figura 6.27. Cuplaj care utilizează fluide electroreologice

6.4.10. Modificarea stucturii cristaline a aliajelor cu memoria formei prin schimbarea temperaturii. Actuatori pe bază de aliaje cu memoria formei

Actuatorii care funcționează pe baza aliajelor cu memoria formei conțin elemente active cu deformație limitată, controlată prin intermediul proprietăților acestor aliaje de a reveni la o formă memorată, în urma unei transformări reversibile martensită-austenită [162].

Transformările specifice acestor materiale sunt determinate de variația temperaturii. Există patru temperaturi caracteristice: M_s şi M_f în cursul încălzirii, respectiv A_s şi A_f în cursul răcirii [133] (figura 6.28).

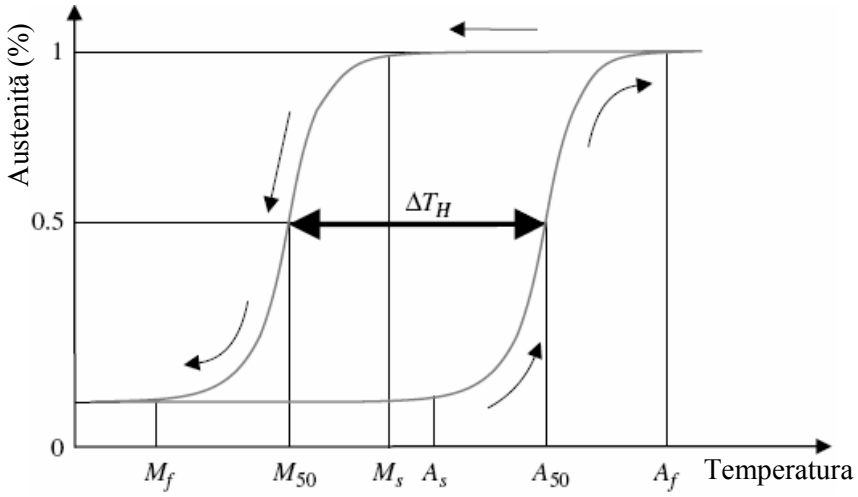


Figura 6.28. Transformările structurale ale materialelor cu memoria formei în funcție de temperatură

Primele două indică temperaturile la care începe, respectiv se termină, transformarea (prin răcire) din faza austenitică în cea martensitică; ultimele două reprezintă temperaturile la care debutează, respectiv se termină transformarea (prin încălzire) inversă, martensită-austenită.

Astfel, în faza martensitică (la temperaturi mai mici decât M_f), un material cu memoria formei poate fi deformat fără a exista pericolul unei deformări permanente întrucât, odată cu încălzirea la o temperatură mai mare decât M_f, materialul revine progresiv la forma inițială, din faza austenitică. Revenirea este completă când temperatura depăşeşte A_f. Această

revenire la forma memorată determină o mişcare în cursul căreia se efectuează un lucru mecanic util. Încălzirea actuatorilor poate fi cauzată, de pildă, de temperatura mediului înconjurător (actuatori termici) sau de trecerea unui curent prin elementele active (actuatori electrici), caz în care temperatura actuatorului creşte datorită efectului Joule. În cursul transformării martensitice difuzia nu are loc, deşi cele două faze sunt caracterizate de structuri cristaline diferite [187]. La baza fenomenului de memorare a formei stă tocmai diferența de simetrie cristalografică dintre faza martensitică (faza α) şi cea austenitică (faza β), datorată acestei diferențe de structură (concret, simetria fazei martensitice este mai mică decât cea a fazei austenitice).

Controlul actuatorilor pe bază de aliaje cu memoria formei e bazat pe controlul termic al aliajului, astfel încât transformarea martensită-austenită să dureze până în punctul în care energia mecanică eliberată să producă deplasarea dorită. Procesul de încălzire este, de obicei, realizat electric, prin efect Joule. Bilanțul energetic al procesului este descris de ecuația [187]:

$$mc_P \frac{dT(t)}{dt} + m\Delta H \frac{d\xi}{dt} = hS\left[T_c - T(t)\right] + Ri^2, \tag{6.31}$$

în care c_P este căldura specifică a aliajului, m şi S sunt masa, respectiv suprafața exterioară a actuatorului care contribuie la transmiterea căldurii în mediu, ΔH e căldura latentă a transformării, h reprezintă coeficientul de convecție, ξ este concentrația procentuală de martensită din aliaj, iar T_c este temperatura camerei. Ultimul membru al ecuației (6.31), $P = Ri^2$, reprezintă puterea disipată prin efect Joule la trecerea curentului electric de intensitate i prin actuatorul de rezistență R.

Un exemplu concret de actuator pe bază de aliaje cu memoria formei este microsupapa (al cărei corp este confecționat din siliciu) din figura 6.29 [162]. Elementul activ este o membrană din aliaj NiTi, cu grosimea de 10 micrometri care poate memora două poziții ce corespund deschiderii, respectiv închiderii orificiilor de circuit. Curentul de activare are valoarea de 0,5 A, frecvența de funcționare este de 50 Hz, la un debit de 1 l/min şi o presiune de 0,14 MPa.

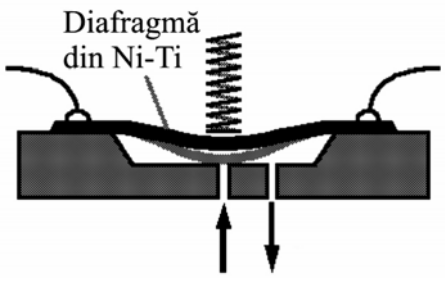


Figura 6.29. Microsupapă cu aliaj pe bază de aliaj cu memoria formei

O altă aplicație recentă a actuatorilor pe bază de aliaje cu memoria formei este dispozitivul spinal implantabil pentru dozarea medicamentelor lichide [133]. În mai multe domenii ale medicinei, există tratamente de lungă durată în care e esențială administarea unor doze medicamentoase foarte precise, de mai multe ori pe zi. Astfel, în neurologie, spasticitatea se poate trata utilizând un dispozitiv implantabil intraspinal; dispozitivul este

compus dintr-o mică pompă implantată chirurgical sub piele, un cateter[90], de asemenea implantat şi un programator extern. Rolul dispozitivului este acela de a elibera doza exactă de medicament (baclofen) în interiorul cordului spinal. Dispozitivul odată implantat, pacienții trebuie doar să treacă, la intervale cuprinse între una şi trei luni (în funcție de doza recomandată), pentru a umple corpul pompei cu medicament.

Prototipul dispozitivului, reprezentat în secțiune în figura 6.30, include un rezervor principal în care se depozitează medicamentul, un rezervor mic pentru o singură doză, valve pentru controlul dozei (a cărei funcționare e bazată pe aliaje cu memoria formei), tubulatură, un controler, precum şi o antenă pentru alimentarea electrică transcutanată.

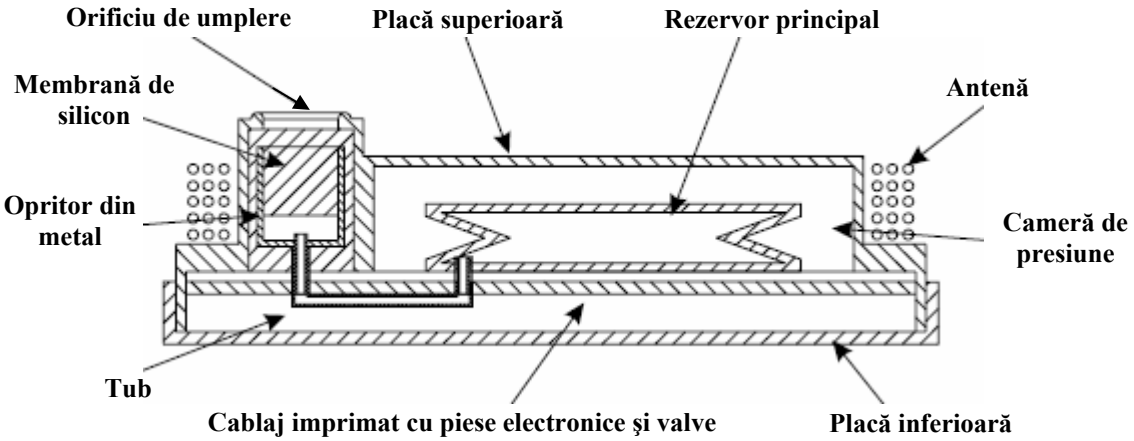


Figura 6.30. Secțiune longitudinală a dispozitivului pentru dozarea medicamentului

Dozarea precisă a medicamentului fiind extrem de dificilă, se utilizează două rezervoare (figura 6.31). Rezervorul principal, mai voluminos, este destinat pentru depozitarea pe termen lung a medicamentului (cam 40 de doze); acest rezervor este legat prin intermediul unui tub, de un al doilea rezervor, mult mai mic, în care încape o singură doză. Când valva din stânga rezervorului din figura 6.31 e deschisă, medicamentul începe să curgă în rezervorul mic până când acesta se umple, moment în care valva din stânga se închide, deschizându-se valva din dreapta pentru a administra medicamentul pacientului.

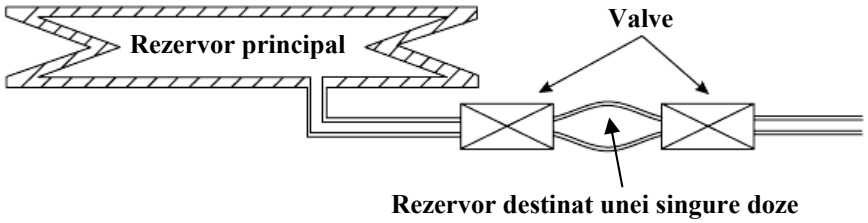


Figura 6.31. Funcționarea dispozitivului pentru dozarea medicamentului

Componenta cu rolul principal în funcționarea dispozitivului este tocmai această valvă din dreapta, comandată prin intermediul unui actuator pe bază de materiale cu memoria formei;

[90] Instrument tubular metalic, de cauciuc sau material plastic, folosit pentru golirea de conținut a organelor cavitare sau a cavităților organismului.

când valva nu primeşte nicio comandă, aceasta strânge tubul de silicon, oprind curgerea medicamentului, iar în momentul în care actuatorul acționează, lichidul e eliberat. Datorită valorilor mari ale forței, nu pot fi utilizați actuatori electromagnetici, electrostatici sau piezoelectrici astfel că, în acest caz, actuatorii bazați pe aliaje cu memoria formei par a fi cei mai potriviți. Actuatorul folosit poate fi un fir cu diametrul de 120 μm, a cărui temperatură A_s este de 65°.

Pe lângă faptul că actuatorii pe bază de aliaje cu memoria formei sunt silențioşi, simplu de construit, aceştia prezintă performanțe funcționale foarte bune în raport cu gabaritul (10^2 – 10^3 W/kg, 10 J/cm^3), nu este necesară lubrifierea lor, au rezoluție foarte bună la poziționare, un număr mare de cicluri de funcționare şi oferă posibilități de miniaturizare semnificative. Există însă şi unele dezavantaje: necesitatea utilizării unor materiale termorezistente sau termoizolatoare, randament energetic scăzut, frecvență redusă a ciclurilor de încălzire, influența temperaturii mediului.

6.4.11. Efectul fotoelectric şi actuatorii optici

Actuatorii optici transformă energia luminoasă în energie mecanică. Transformarea are loc direct dacă rolul radiației electromagnetice (luminii) este generarea de fotoelectroni care, prin ecranarea forțelor electrostatice, determină mişcarea elementului mobil al actuatorului. Dacă energia radiației luminoase este utilizată pentru a încălzi unele solide sau gaze a căror dilatare determină acționarea, transformarea este indirectă.

Un exemplu de actuator optic bazat pe transformare directă este reprezentat în figura 6.32 [162]. O microlamelă, confecționată din Si, e plasată deasupra armăturii din Cu sau din Au, fiind susținută prin intermediul unui suport din P^+Si, suport prins pe substratul izolator din sticlă.

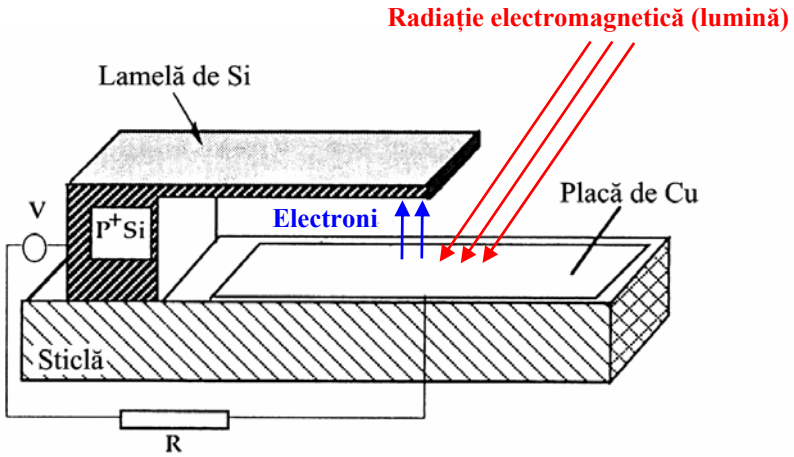


Figura 6.32. Actuator optic bazat pe transformarea directă a energiei luminoase în energie mecanică

Cele două armături formează un condensator plan, care, conectat la tensiunea V, se încarcă, prin rezistorul R, cu o anumită sarcină electrică. În consecință, apare o presiune electrostatică care deformează microlamela. Controlul acestei deformări se realizează prin iluminarea armăturii de Cu cu o radiație electromagnetică monocromatică care produce, prin efect fotoelectric, un flux de fotoelectroni, care modifică sarcina electrostatică a

condensatorului. *Purtătorii de informație* sunt, succesiv, fotonii radiației electromagnetice, fotoelectronii emişi şi sarcinile electrice ale lamelei de Si. Folosind o microlamelă de 600 x 50 x 1 μm^3, la o distanță dintre armături de 12 μm şi o tensiune de 6 V, s-a obținut o amplitudine de mişcare de *4* μm în 0,1 *ms*, utilizând un fascicul cu puterea optică mai mică de 0,1 mW/cm^2 [162].

Remarcabil în cazul actuatorului prezentat este faptul că deformarea lamelei poate fi controlată în lipsa contactului mecanic direct şi anume prin mijlocirea fotoelectronilor, care joacă rol de purtători de informație. Altfel spus, legătura mobilă dintre placa de Cu şi lamela de siliciu nu se comportă ca o cuplă cinematică obişnuită, întrucât informația se transmite indirect între cele două elemente cinematice. Prin urmare, se impune extinderea conceptului de legătură, aşa cum e definit acesta în mecanica clasică.

6.4.12. Conceptul clasic de legătură şi legătura informațională

Din perspectiva mecanicii clasice, mişcarea unui sistem format din N puncte materiale este definită dacă se cunosc, la oricare moment t, pozițiile şi vitezele acestora (a se vedea şi paragraful 1.4), adică ale vectorilor $\vec{r}_n$ şi $\dot{\vec{r}}_n$ ($n = 1,2,...,N$). Dacă sistemul mecanic este liber, $\vec{r}_n$ şi $\dot{\vec{r}}_n$ pot lua orice valoare. În cele mai multe cazuri însă, există constrângeri impuse sistemului, care limitează mişcarea acestuia. Aceste limitări impun restricții vectorilor $\vec{r}_n$ şi $\dot{\vec{r}}_n$, deci acestea nu mai sunt variabile independente. În aceste situații se spune că sistemul este supus la *legături* şi există un set de relații care exprimă matematic contrângerile impuse. Aceasta înseamnă că anumite puncte ale sistemului sunt obligate să fie fixe sau să rămână permanent în contact mecanic cu o suprafață sau o curbă.

Legăturile pot fi bilaterale, dacă aceste relații sunt egalități, sau unilaterale, dacă legăturile sunt exprimate prin inegalități. În general, ecuația unei legături bilaterale este de forma:

$$f\left(\vec{r}_1,\vec{r}_2,...,\vec{r}_N,\dot{\vec{r}}_1,\dot{\vec{r}}_2,...,\dot{\vec{r}}_N;\,t\right)=0\,. \tag{6.32}$$

Ecuația de mai sus descrie o legătură neolonomă, întrucât depinde de viteze. În cazul în care nu apar vitezele, legăturile se numesc olonome.

Dacă un sistem este supus la legături, ecuația sa de mişcare nu mai este de forma:

$$m_n\ddot{\vec{r}}_n=\vec{F}_n\left(\vec{r}_1,\vec{r}_2,...,\vec{r}_N,\dot{\vec{r}}_1,\dot{\vec{r}}_2,...,\dot{\vec{r}}_N;\,t\right),\ n=1,2,...,N\,, \tag{6.33}$$

unde $\vec{F}_n$ este forța care acționează asupra particulei n datorită celorlalte particule ale sistemului şi ale câmpului extern. Motivul principal pentru care mişcarea sistemului supus la legături nu respectă relația (6.33) este faptul că forțele $\vec{F}_n$ nu sunt determinate cauzal de legături. În consecință existența legăturilor impune extinderea ecuației (6.33) astfel încât noua relație să includă şi forțele suplimentare $\vec{R}_n$, datorate legăturilor. Astfel, ecuația (6.33) devine:

$$m_n\ddot{\vec{r}}_n=\vec{F}_n+\vec{R}_n,\ n=1,2,...,N\,. \tag{6.34}$$

Sintetic, asupra unui sistem mecanic, acționează două tipuri de forțe: forțele aplicate, cunoscute, $\vec{F}_n$ şi forțele de legătură $\vec{R}_n$, care nu pot fi, în general, determinate decât după ce se cunoaşte mişcarea [165]. O perspectivă utilă este următoarea: asupra sistemului acționează forțele aplicate, care se cunosc şi forțele de legătură, care nu se cunosc inițial, dar efectul lor este cunoscut. Potrivit axiomei legăturilor [206], legăturile la care este supus un sistem pot fi suprimate şi înlocuite cu forțe de legătură, cu efecte identice asupra sistemului ca şi legăturile suprimate. Astfel, sistemul supus la legături poate fi tratat ca un sistem mecanic liber, supus unui ansamblu de forțe care include atât forțele aplicate cât şi pe cele de legătură. Evident, echilibrul sistemului impune ca rezultanta tuturor acestor forțe să fie nulă:

$$\vec{F}_n + \vec{R}_n = 0\,. \tag{6.35}$$

Unul dintre cele mai utile rezultate ale mecanicii analitice în ceea ce priveşte proprietățile forțelor de legătură este principiul lui D'Alembert, potrivit căruia, în cazul legăturilor perfect olonome, lucrul mecanic al forțelor de legătură la o deplasare virtuală a sistemului este nul:

$$\sum_{i=1}^{N} \vec{R}_n \cdot \delta \vec{r}_n = 0\,. \tag{6.36}$$

Conform acestei perspective asupra conceptului de legătură, constrângerile impuse sistemului au nevoie doar de suport material şi energetic. De asemenea, în teoria clasică a mecanismelor de control, *cupla cinematică* reprezintă legătura mobilă, *directă* dintre două elemente cinematice, care are ca scop limitarea libertăților de mişcare relative dintre acestea şi transmiterea mişcării de la un element la altul. Prin urmare, în abordarea clasică, transmiterea mişcării de la un element cinematic la altul are loc doar direct, ceea ce presupune obligatoriu existența *contactului nemijlocit*, materie-materie şi *schimbul energetic* între cele două elemente cinematice.

Dezvoltarea recentă a mecatronicii a condus la schimbări profunde privind metodele de control ale mişcării mecanismelor. Diversificarea tipurilor de actuatori a fost unul dintre principalii factori care a stimulat apariția unor mecanisme de control moderne a căror funcționare, similară unor mecanisme ale lumii vii, se bazează pe informație. În prezenta lucrare se regăsesc mai multe astfel de exemple de sisteme mecatronice şi sisteme ale lumii vii în a căror funcționare rolul central revine informației: pompele ionice (paragraful 3.5.3), agregarea amibelor acrasiale (paragraful 4.9.6), autoorganizarea homeokinetică a comportamentului unui robot (paragraful 4.10.3), autoorganizarea prin stigmergie a colectivelor de insecte (paragraful 4.11.2) şi a sistemelor mecatronice multi-agent (paragraful 4.11.4).

S-a precizat chiar în paragraful precedent (în cazul actuatorului optic bazat pe efect fotoelectric) că funcționarea unor actuatori poate presupune controlul indirect al unor componente, prin transmiterea informației de la unul la altul fără contact mecanic direct, ci doar prin intermediul *purtătorilor de informație*.

Prin urmare, în cazul sistemelor mecatronice, legătura dintre două elemente cinematice poate fi mijlocită de informație. În aceste cazuri, putem vorbi de *cuple cinematice informaționale*, care asigură între elementele cinematice *legături informaționale*, mijlocite de *purtătorii de informație*. În cazul în care mai multe elemente mobile sunt legate între ele prin intermediul unor cuple cinematice informaționale, se formează un *lanț cinematic informațional*.

În concluzie, din pespectiva mecatronicii, *cupla cinematică poate fi definită ca totalitatea modalităților de interacțiune dintre două elemente cinematice rigide* [161]. Potrivit acestei definiții, interacțiunea elementelor cinematice se poate realiza şi altfel decât prin contact mecanic nemijlocit, şi anume prin purtătorii de informație. Dacă rolul purtătorilor de informație este jucat de câmpuri (electrice, magnetice etc.), se poate vorbi de *câmpuri informaționale*.

6.4.13. Actuatorul Lorentz – cuplă cinematică informațională

Actuatorul Lorentz [163], [263] reprezintă un excelent exemplu de cuplă cinematică a cărei acțiune nu are loc prin mijlocirea contactului mecanic direct, ci este datorată interacțiunii dintre câmpul magnetic şi curentul electric.

Actuatorii Lorentz pot fi priviți ca un sistem electro-mecanic format prin integrarea a trei subsisteme: circuitul electric, circuitul magnetic şi subansamblul mecanic. Din punct de vedere structural, actuatorul Lorentz e format din două module (figura 6.33): inductorul şi ansamblul mobil. Inductorul e compus dintr-un magnet permanent (de formă cilindrică) fixat pe placa de bază, piesele polare şi un miez. Ansamblul mobil e constituit dintr-o bobină fixată pe un cadru cu role.

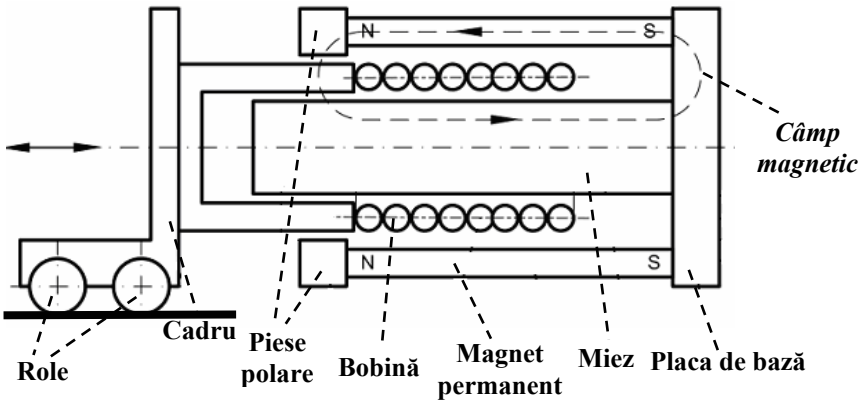


Figura 6.33. Actuator Lorentz

Mişcarea de translație a actuatorului este consecința forței cu care câmpul magnetic acționează asupra electronilor care se deplasează prin spirele conductoare ale bobinei. Această forță, numită forță Lorentz, este forța care acționează, în general, asupra oricărei particule de sarcină q, care se mişcă cu viteza $\vec{v}$ într-un câmp magnetic de inducție $\vec{B}$:

$$\vec{f}_L = q\left(\vec{v} \times \vec{B}\right). \tag{6.37}$$

Dacă vom delimita un element infinitezimal, de lungime dl, dintr-un conductor parcurs de un curent electric având intensitatea I, în elementul respectiv se află o sarcină electrică:

$$dq = I \cdot dt, \tag{6.38}$$

care se deplasează cu viteza

$$\vec{v} = \frac{d\vec{l}}{dt}. \tag{6.39}$$

În expresia de mai sus s-a considerat că vectorul $d\vec{l}$ e orientat în sensul intensității curentului electric şi are, evident, modulul egal cu dl.

În consecință, asupra elementului $d\vec{l}$ din conductor acționează forța electromagnetică (figura 6.34):

$$d\vec{F}_{em} = dq \cdot \vec{v} \times \vec{B} = I \cdot dt \cdot \vec{v} \times \vec{B}, \tag{6.40}$$

adică:

$$d\vec{F}_{em} = I \cdot d\vec{l} \times \vec{B}. \tag{6.41}$$

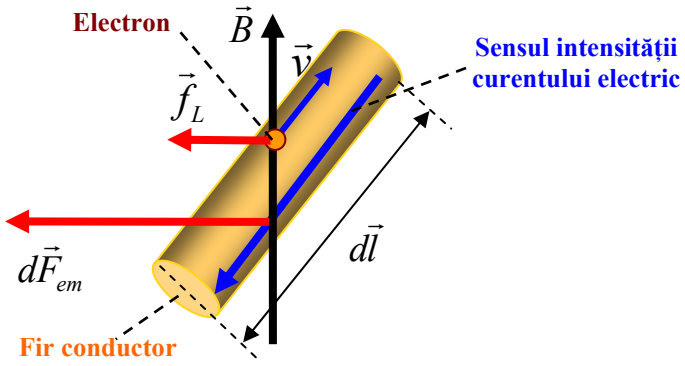


Figura 6.34. Forța Lorentz şi forța electromagnetică

Cum direcția câmpului magnetic e perpendiculară pe direcția intensității curentului electric, forța care acționează asupra fiecărui element $d\vec{l}$ al fiecărei spire a bobinei este orientată orizontal (figura 6.35) şi are valoarea:

$$dF = B \cdot I \cdot dl. \tag{6.42}$$

Asupra bobinei actuatorului va acționa o forță electromagnetică totală obținută prin integrarea tuturor acestor forțe elementare. Această forță e orientată orizontal, iar sensul ei poate fi spre stânga sau spre dreapta, în funcție de sensul curentului prin spirele bobinei.

Valoarea forței care determină deplasarea ansamblului mobil al actuatorului Lorentz este:

$$F = N \cdot I \cdot B \cdot L, \tag{6.43}$$

unde N reprezintă numărul de spire al părții de bobină expuse acțiunii câmpului magnetic, I e intensitatea curentului electric stabilit prin bobină, B este inducția câmpului magnetic (produs de magnetul permanent) iar L este lungimea circumferinței unei spire a bobinei.

Evident, bobina se deplasează în întrefierul dintre piesele polare şi miez doar dacă e alimentată de către o sursă electrică, sensul deplasării sale depinzând de sensul curentului electric din spire. Actuatorul Lorentz reprezintă unul dintre subsistemele integrate în structura

unități de translație inteligente, alături de senzori, microcontrolere şi alte componente electronice.

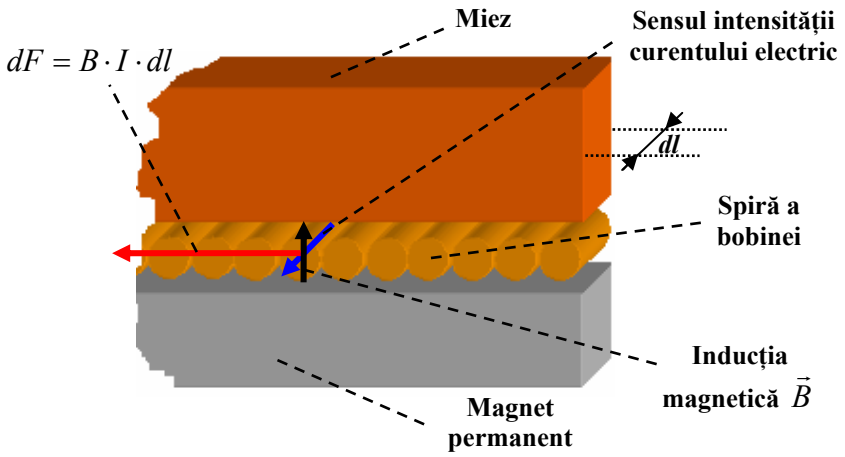


Figura 6.35. O secțiune transversală infinitezimală prin magnetul, bobina şi miezul actuatorului Lorentz

Din perspectiva abordării propuse, principala caracteristică a actuatorului Lorentz este faptul că deplasarea ansamblului mobil are loc în absența oricărui contact mecanic între elementele cinematice [161], aceasta fiind determinată exclusiv de interacțiunea dintre câmpul magnetic şi sarcinile electrice care se mişcă prin spirele bobinei. Prin urmare, actuatorul Lorentz este un tip aparte de cuplă cinematică, în care legătura dintre elementele cinematice se realizează prin purtători de informație care, în acest caz, sunt *sarcinile electrice* şi *câmpul magnetic*. Câmpul magnetic reprezintă suportul energetic pentru transmiterea informației la sarcinile electrice, asupra cărora acționează forța Lorentz. Prin urmare, actuatorul Lorentz reprezintă o *cuplă cinematică informațională*: între elementele cinematice ale actuatorului legătura este în primul rând de natură informațională, acesta mijlocind transmiterea interacțiunii la distanță prin câmpuri şi nu prin contact mecanic.

6.5. Concluzii

Capitolul este consacrat prezentării unor exemple concrete din care reiese faptul că, la baza aplicațiilor din domeniul tehnologic în general şi din spațiul mecatronicii în special, stau concepte, principii, legi şi fenomene ale fizicii. Din schema bloc a unui sistem mecatronic rezultă complexitatea acestuia, dualismul flux energetic-flux informațional, precum şi rolul senzorilor şi actuatorilor în transmiterea informației între componentele sistemului. Întrucât senzorii şi actuatorii reprezintă, prin excelență, aplicații în tehnologie ale legilor fizicii, s-au selectat în continuare câteva exemple reprezentative în acest sens. Astfel:

- funcționarea potențiometrului şi a condensatorului plan ca traductoare de poziție e bazată pe legile fundamentale ale electrocineticii şi electrostaticii;
- senzorii inductivi de proximitate constituie aplicații ale fenomenului de inducție electromagnetică, în speță ale legii lui Faraday şi Lenz;
- traductorii rezistivi de forță ilustrează interdependența dintre legea lui Hooke din mecanică şi variația rezistenței electrice;

- traductorii şi senzorii piezoelectrici evidențiază legăturile cauzale dintre presiune şi forță (mărimi fizice specifice mecanicii) şi tensiunea, capacitatea, respectiv rezistența electrică (concepte care aparțin electrostaticii şi electrocineticii);
- există senzori tactili optici a căror funcționare e bazată pe legile specifice refracției şi reflexiei totale a luminii;
- modul în care câmpul electric influențează deformarea mecanică a unor materiale poate fi urmărit studiind structura şi principiile fizice ale actuatorilor piezoelectrici;
- studiul motorului ultrasonic cu undă progresivă presupune cunoaşterea ecuațiilor şi legilor oscilațiilor şi undelor mecanice;
- actuatorii electro şi magnetoreologici reprezintă aplicații ale dinamicii fluidelor în mecatronică;
- fenomene studiate la fizica solidului se regăsesc în analiza modificării structurii cristaline a aliajelor cu memoria formei datorită schimbării temperaturii, fenomen caracteristic actuatorilor bazați pe astfel de aliaje;
- efectul fotoelectric are, în cazul anumitor tipuri de actuatori optici, rolul determinant în procesul de conversie a energiei luminoase în energie electrică.

S-a prezentat, în cazul fiecărui senzor şi actuator, alături de explicațiile clasice privind structura şi funcționarea acestora, şi o analiză a lor din perspectivă informațională. În acest context s-au evidențiat semnificațiile conceptului de *purtător de informație*. Pornind de la înțelesul clasic, restrâns, al noțiunii de *legătură*, s-au conturat înțelesurile unor concepte specifice mecanismelor mecatronice de control: *cupla cinematică informațională*, *lanț cinematic informațional*, *câmp informațional*.

O atenție deosebită a fost acordată explicitărilor privind funcționarea actuatorului Lorentz, bazată pe acțiunea forței electromagnetice. S-a argumentat în final faptul că actuatorul Lorentz reprezintă, în mecatronică, o cuplă cinematică informațională, datorită proprietății sale de a transmite interacțiunea între cele două elemente cinematice prin purtători de informație care sunt, în acest caz, sarcinile electrice şi câmpul magnetic.

Exemplele alese aparțin unor domenii diferite ale fizicii, pentru a evidenția multiplele deschideri la nivelul aplicațiilor cuprinse în programele şcolare de fizică, deschideri care decurg din studiului mecatronicii.

6.6. Contribuții personale

- Au fost propuse exemple concrete care pot reprezenta noi extinderi ale aplicațiilor conținuturilor cuprinse în programele de fizică de la nivel liceal şi gimnazial.
- S-a evidențiat caracterului interdisciplinar al aplicațiilor propuse, prin prezentarea modului în care conceptele, legile şi fenomenele fizicii stau la baza funcționării senzorilor şi actuatorilor, componente de bază ale sistemelor mecatronice complexe.
- Pornind de la noțiunea de *purtător de informație*, a fost prezentată o abordare informațională proprie a funcționării senzorilor şi actuatorilor.
- S-a detaliat semnificația conceptului clasic de legătură şi s-a prezentat modul în care rolul informației în funcționarea sistemelor mecatronice complexe impune extinderea acestuia prin introducerea noțiunilor de *cuplă cinematică informațională* şi *lanț cinematic informațional*.

CAPITOLUL 7

CERCETĂRI EXPERIMENTALE

7.1. Considerații generale

Educația mecatronică presupune abordări ce vizează rezolvarea de probleme şi realizarea unor proiecte concrete. Astfel, cursanții sunt implicați direct în dezvoltarea unor aplicații complete şi complexe, proces de-a lungul căruia sunt parcurse toate stadiile dezvoltării unui produs, de la proiectarea conceptuală până la realizarea acestuia. Pentru aceasta, studenții trebuie să aibă acces constant la echipamente adecvate, hardware portabil, software şi documentație în vederea realizării aplicațiilor concepute, atât în cadrul orelor de lucrări practice din instituțiile de învățământ cât şi acasă. Aceste demersuri au în vedere dezvoltarea gândirii sistemice, a flexibilității şi creativității elevilor şi studenților prin munca în echipă, permițându-le totodată să descopere caracterul sinergic şi integrator al mecatronicii.

În acest capitol se prezintă etapele care se parcurg pentru conceperea, modelarea, simularea, optimizarea şi implementarea rezultatelor, în vederea realizării unei platforme mecatronice pentru educație tehnologică. Sunt evidențiate, de asemenea, deschiderile la nivel teoretic şi aplicativ ale acestui produs în ceea ce priveşte studiul fizicii, matematicii şi informaticii.

Dezvoltarea aplicațiilor s-a făcut pe structura unui robot paralel plan cu două grade de libertate (*mecanism pentalater*). Cercetările experimentale au drept scop elaborarea unui chit de aplicații pentru studiul fizicii, matematicii şi informaticii ale platformei mecatronice pentru educație tehnologică, componentă a laboratorului portabil de mecatronică. Laboratorul este brevetat de către colectivul Catedrei de Mecanisme, Mecanică Fină şi Mecatronică a UTC-N [164].

7.2. Structura platformei mecatronice portabile

În conceperea şi realizarea platformei s-a avut în vedere dezvoltarea unui produs modular cu o arhitectură deschisă care să permită intervenția asupra soft-ului sau hardware-ului pe diferite nivele de complexitate, în funcție de cunoştințele cursanților. Aplicațiile posibile în studiul diferitelor discipline sunt relevante privind materializarea principiilor educației mecatronice integrale. Utilizatorul este solicitat şi stimulat să participe cu întreaga ființă (mentalul, sentimentele şi fizicul) la realizarea aplicațiilor. Principalele componente ale platformei, prezentate în figura 7.1 sunt: interfața cu utilizatorul (GUI – Graphic User Interface), placa electronică de dezvoltare şi robotul paralel plan.

Interfața cu utilizatorul facilitează introducerea unor comenzi pentru robot, vizualizează comportarea robotului şi permite determinarea unor parametri în funcționarea acestuia în

raport cu datele introduse. Aplicațiile care pot fi dezvoltate sunt: implementarea ecuațiilor cinematice într-un mediu de programare, simularea comportării sistemului, generarea de traiectorii pentru efectorul final, dezvoltarea de interfețe pentru introducerea datelor etc.

Placa electronică de dezvoltare este construită pe structura microcontrolerului Atmel AtMega8 şi are rolul de a asigura comunicarea cu calculatorul precum şi de a comanda cele două servomotoare în funcție de semnalele primite de la calculator. Aplicațiile vizate sunt: dezvoltarea unor scheme electronice cu microcontrolere, interfațarea microcontrolerului cu calculatorul, comanda servomotoarelor prin intermediul unui microcontroler, implementarea de soft în microcontroler pentru controlul unui sistem etc. Corelarea mişcării celor două motoare pentru a obține legile de mişcare dorite se realizează prin *lanțul cinematic informațional* (componentele hardware, software, din structura plăcii de dezvoltare şi senzorii montați pe axele motoarelor). Această configurație asigură flexibilitate şi reconfigurabilitate sistemului în ansamblu.

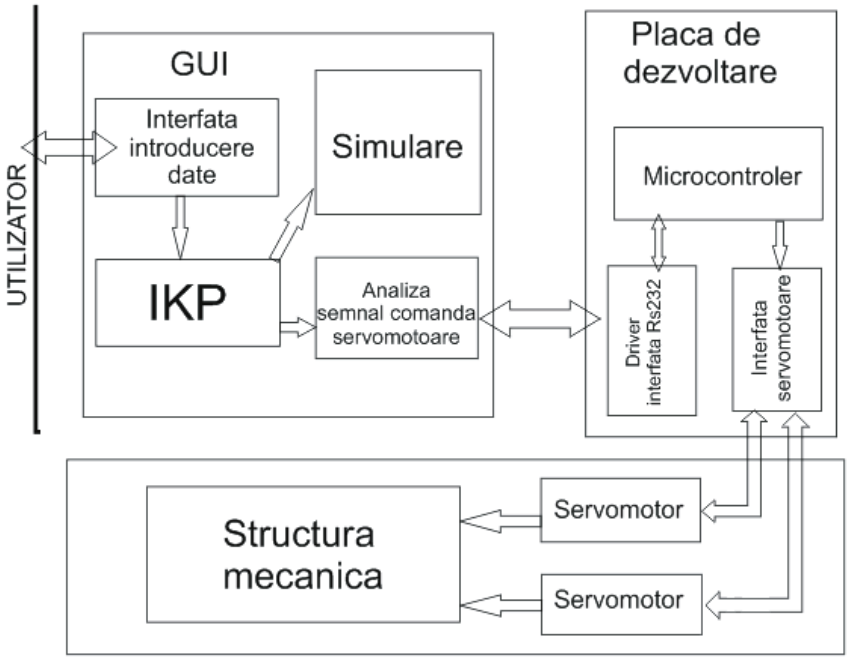


Figura 7.1. Schema bloc a platformei mecatronice

Robotul paralel plan este dezvoltat pe structura mecanismului pentalater, acționarea acestuia realizându-se prin intermediul a două servomotoare. Aplicațiile vizate sunt: studiul mecanismelor plane (cuple, elemente cinematice, grade de libertate, legi de mişcare etc.), analiza cinematică a sistemului, spațiul de lucru, analiza dinamică a sistemului, dimensionarea actuatorilor, interfațarea cu sistemul de control etc. Realizarea lucrărilor pentru aplicațiile propuse s-a făcut folosind mediile de dezvoltare Matlab modulul Simulink, Delphi şi Avr Studio. Configurația în ansamblu a robotului este un exemplu de produs mecatronic în care componentele se integrează prin constrângere. Cuplele cinematice materializează conceptul de legătură, aşa cum e definit în fizică, iar elementele cinematice pe cel de rigid. Prin comanda alternativă a celor două motoare mecanismul pentalater poate fi transformat în mecanism patrulater. În continuare, se detaliază etapele care trebuie parcurse pentru dezvoltarea unui astfel de sistem.

7.3. Modelarea sistemului

7.3.1. Analiza cinematică a robotului

Analiza cinematică a structurii vizează determinarea ecuațiilor ce descriu mişcarea elementelor cinematice fără a lua în calcul forțele şi momentele care o determină. Se consideră mecanismul pentalater cu cuple de rotație din figura 7.2, pentru care sunt cunoscute lungimile elementelor precum şi coordonatele cuplelor fixe. Mecanismul este simetric, în sensul că $\ell_1 = \ell_4 = \ell$, respectiv $\ell_2 = \ell_3 = L$. Elementele motoare ale mecanismului sunt *OA* şi *CB*. Analiza cinematică a structurii mecanice presupune rezolvarea *problemei cinematice directe* (determinarea poziției elementului condus sau a unui punct de pe acesta, respectiv a expresiilor vitezelor şi acceleraților acestuia, în funcție de legile de mişcare ale elementelor motoare) şi a *problemei cinematice inverse* (determinarea ecuațiilor care descriu poziția, respectiv vitezele, şi acceleraților fiecărui element motor în funcție de legea de mişcare impusă efectorului final).

Mecanismul pentalater poate fi utilizat pentru a exemplifica, în cadrul orelor de fizică, modul în care mişcarea unui solid rigid poate fi descompusă într-o mişcare de translație şi una de rotație. Astfel, dacă structura mecanică a întregului sistem este deplasată, fără ca servomotoarele să fie alimentate şi fără a modifica unghiurile $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, \varphi_5$, fiecare element cinematic al structurii descrie o *mişcare de translație*, întrucât se mişcă paralel cu el însuşi. Dacă însă, mecanismul nu se deplasează ca întreg, dar actuatorii funcționează, elementele motoare *OA* şi *BC* execută, fiecare în parte, o *mişcare de rotație*, deoarece mişcarea tuturor punctelor acestora are loc cu aceeaşi viteză unghiulară, traiectoriile acestor puncte sunt cercuri concentrice cu centrul în *O*, respectiv *C*. Elementele conduse, în schimb, execută o mişcare oarecare, care se compune, în fiecare moment [128], dintr-o rotație infinitezimală în jurul unui axe instantanee plus o translație infinitezimală de-a lungul acestei axe. În cazul particular al mişcării paralele (cum e în situația de față), axa de rotație se reduce la un pol, arbitrar ales.

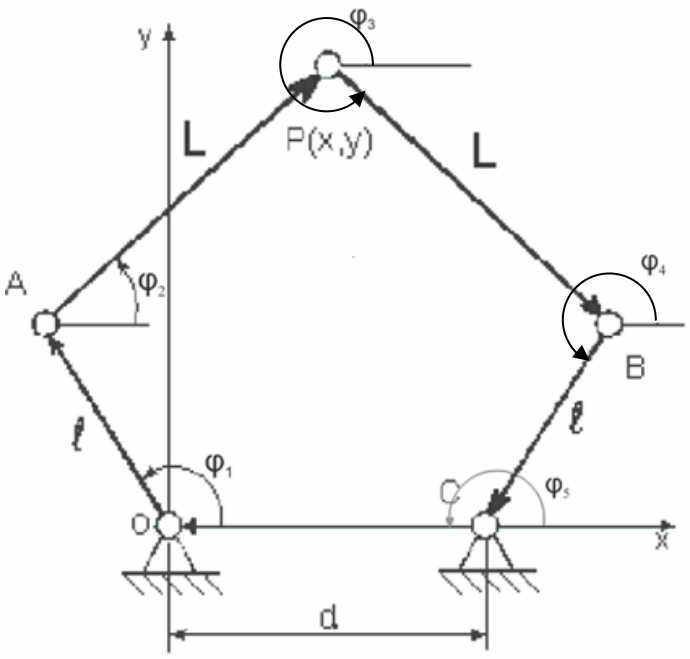


Figura 7.2. Schema cinematică a robotului

Pentru rezolvarea *problemei cinematice directe* se aplică metoda funcțiilor de transmitere [105]. Se consideră constante: ℓ, L, d, φ_5, iar φ_1, φ_2, φ_3, φ_4 sunt variabile. Se consideră cunoscute unghiurile φ_1 şi φ_4, care reprezintă coordonatele elementelor motoare. Proiectând cei cinci vectori pe axele *Ox*, respectiv *Oy*, se obțin relațiile:

$$\begin{cases} \ell\cos\varphi_1 + L\cos\varphi_2 + L\cos\varphi_3 + \ell\cos\varphi_4 + d\cos\varphi_5 = 0 \\ \ell\sin\varphi_1 + L\sin\varphi_2 + L\sin\varphi_3 + l\sin\varphi_4 + d\sin\varphi_5 = 0 \end{cases} \tag{7.1}$$

Mecanismul pentalater constituie un suport didactic util şi pentru a ilustra faptul că teorema potrivit căreia proiecția pe o axă a rezultantei mai multor vectori este egală cu suma proiecțiilor vectorilor componenți pe acea axă e valabilă indiferent de poziția elementelor cinematice ale robotului. Într-adevăr, prin trecerea în partea dreaptă a ultimului termen al fiecărei ecuații a sistemului (7.1) şi combinarea acestora într-o singură relație vectorială, se obține: $\overrightarrow{OA} + \overrightarrow{AP} + \overrightarrow{PB} + \overrightarrow{BC} = \overrightarrow{OC}$. Teorema menționată este studiată la nivelul liceului, atât la fizică, cât şi la matematică, în cadrul orelor alocate studiului algebrei vectoriale.

Revenind la relațiile (7.1), eliminând φ_3 şi ridicând la pătrat se obțin ecuațiile:

$$\begin{cases} \ell^2\cos^2\varphi_1 + L^2\cos^2\varphi_2 + \ell^2\cos^2\varphi_4 - d^2 + 2\ell L\cdot\cos\varphi_1\cos\varphi_2 + 2\ell^2\cos\varphi_1\cos\varphi_4 - \\ -2\ell d\cos\varphi_1 + 2L\ell\cos\varphi_2\cos\varphi_4 - 2Ld\cos\varphi_2 - 2\ell d\cos\varphi_4 = L^2\cos^2\varphi_3 \\ \quad \ell^2\sin^2\varphi_1 + L^2\sin^2\varphi_2 + \ell^2\sin^2\varphi_4 + 2\ell L\cdot\sin\varphi_1\sin\varphi_2 + 2\ell^2\sin\varphi_1\sin\varphi_4 + \\ \quad + 2\ell L\cdot\sin\varphi_2\sin\varphi_4 = L^2\sin^2\varphi_3. \end{cases} \tag{7.2}$$

Adunând cele două ecuații se obține:

$$\begin{aligned} &\ell^2 + L^2 + \ell^2 + d^2 + \cos\varphi_2\left(2L\ell\cdot\cos\varphi_1 + 2L\ell\cos\varphi_4 - 2Ld\right) + \sin\varphi_2\left(2\ell L\cdot\sin\varphi_1 + 2\ell L\cdot\sin\varphi_4\right) + \\ &+ 2\ell^2\cos\left(\varphi_1 - \varphi_4\right) - 2\ell d\cdot\left(\cos\varphi_1 - \cos\varphi_4\right) = L^2. \end{aligned} \tag{7.3}$$

Astfel, se obține expresia funcției de transmitere $R_2(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_4)$, care face legătura între poziția elementelor motoare şi unghiul care determină poziția punctului caracteristic P:

$$\begin{aligned} &R_2 = \cos\varphi_2\cdot 2\cdot L\cdot\left(l\cdot\cos\varphi_1 + l\cdot\cos\varphi_4 - d\right) + \sin\varphi_2\cdot 2\ell L\left(\sin\varphi_1 + \sin\varphi_4\right) + 2\ell^2\cos\left(\varphi_1 - \varphi_4\right) - \\ &- 2\ell d\left(\cos\varphi_1 - \cos\varphi_4\right) + 2\ell^2 + d^2 = 0. \end{aligned} \tag{7.4}$$

În final, se ajunge la ecuația trigonometrică

$$a\cdot\cos\varphi_2 + b\cdot\sin\varphi_2 + c = 0, \tag{7.5}$$

în care

$$\begin{aligned} a &= 2L\left(\ell\cos\varphi_1 + \ell\cos\varphi_4 - d\right), \\ b &= 2\ell L\left(\sin\varphi_1 + \sin\varphi_4\right), \\ c &= 2\ell^2\cos\left(\varphi_1 - \varphi_4\right) - 2\ell d\left(\cos\varphi_1 - \cos\varphi_4\right) + 2l^2 + d^2. \end{aligned} \tag{7.6}$$

Pentru a rezolva ecuația (7.5), se fac substituirile:

$$\sin\varphi_2 = \frac{2tg\frac{\varphi_2}{2}}{1+tg^2\frac{\varphi_2}{2}},\ \cos\varphi_2 = \frac{1-tg^2\frac{\varphi_2}{2}}{1+tg^2\frac{\varphi_2}{2}}. \tag{7.7}$$

După efectuarea calculelor, se obține ecuația:

$$(c-a)\cdot tg^2\frac{\varphi_2}{2} + 2\cdot b\cdot tg\frac{\varphi_2}{2} + c + a = 0. \tag{7.8}$$

Se notează $x = tg\frac{\varphi_2}{2}$ şi se rezolvă ecuația (7.8). În final, se obțin soluțiile care corespund celor două poziții pe care le poate ocupa punctul P pentru aceleaşi valori ale unghiurilor φ_1, respectiv φ_4:

$$\begin{aligned}\varphi_2^I &= 2a\tan(\frac{-b+\sqrt{b^2-(c^2-a^2)}}{c-a}),\\ \varphi_2^{II} &= 2a\tan(\frac{-b-\sqrt{b^2-(c^2-a^2)}}{c-a},\end{aligned} \tag{7.9}$$

în care *a*, *b*, *c*, sunt date de expresiile (7.6). În continuare, se va utiliza soluția φ_2^I, ea corespunzând configurației alese.

Ecuația care face legătura între viteza unghiulară a elementului condus 2 şi vitezele unghiulare ale celor două elemente motoare este:

$$\omega_2 = R_{21}^I\cdot\omega_1 + R_{24}^I\cdot\omega_4. \tag{7.10}$$

unde

$$R_{21}^I = -\frac{\frac{\partial R_2}{\partial\varphi_1}}{\frac{\partial R_2}{\partial\varphi_2}}\ \text{şi}\ R_{24}^I = -\frac{\frac{\partial R_2}{\partial\varphi_4}}{\frac{\partial R_2}{\partial\varphi_2}}. \tag{7.11}$$

Derivatele parțiale ale funcției R_2 sunt, succesiv:

$$\begin{aligned}\frac{\partial R_2}{\partial\varphi_1} &= -2\ell^2\sin(\varphi_1-\varphi_4) + 2\ell d\sin\varphi_1 - 2\ell L\sin\varphi_1\cos\varphi_2 + 2\ell L\sin\varphi_2\cos\varphi_1\\ &= 2\left[\ell d\sin\varphi_1 - \ell^2\sin(\varphi_1-\varphi_4) - 2\ell L\sin(\varphi_1-\varphi_2)\right],\end{aligned} \tag{7.12}$$

$$\frac{\partial R_2}{\partial \varphi_2} = 2\left[-L\sin\varphi_2\left(\ell\cos\varphi_1 + \ell\cos\varphi_4 - d\right) + \ell L\cos\varphi_2\left(\sin\varphi_1 + \sin\varphi_4\right)\right], \tag{7.13}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial R_2}{\partial \varphi_4} &= 2\ell^2\sin\left(\varphi_1 - \varphi_4\right) - 2\ell d\sin\varphi_4 - 2\ell L\sin\varphi_4\cos\varphi_2 + 2\ell L\sin\varphi_2\cos\varphi_4 \\ &= 2\left[\ell^2\sin\left(\varphi_1 - \varphi_4\right) - \ell d\sin\varphi_4 - 2\ell L\sin\left(\varphi_2 - \varphi_4\right)\right].\end{aligned} \tag{7.14}$$

Înlocuind (7.12)-(7.14) în (7.11), se obțin relațiile:

$$R_{21}^I = -\frac{-\ell^2\sin\left(\varphi_1 - \varphi_4\right) + \ell d\sin\varphi_1 - 2\ell L\sin\left(\varphi_1 - \varphi_2\right)}{-L\sin\varphi_2\left(\ell\cos\varphi_1 + \ell\cos\varphi_4 - d\right) + \ell L\cos\varphi_2\left(\sin\varphi_1 + \sin\varphi_4\right)}, \tag{7.15}$$

$$R_{24}^I = -\frac{\ell^2\sin\left(\varphi_1 - \varphi_4\right) - \ell d\sin\varphi_4 - 2\ell L\sin\left(\varphi_2 - \varphi_4\right)}{-L\sin\varphi_2\left(\ell\cos\varphi_1 + \ell\cos\varphi_4 - d\right) + \ell L\cos\varphi_2\left(\sin\varphi_1 + \sin\varphi_4\right)}. \tag{7.16}$$

Înlocuind relațiile (7.15), (7.16) în ecuația (7.10), se obține, în final, ω_2 în funcție de ω_1 și ω_4:

$$\begin{aligned}\omega_2 = &-\frac{-\ell^2\sin\left(\varphi_1 - \varphi_4\right) + \ell d\sin\varphi_1 - 2\ell L\sin\left(\varphi_1 - \varphi_2\right)}{-L\sin\varphi_2\left(\ell\cos\varphi_1 + \ell\cos\varphi_4 - d\right) + \ell L\cos\varphi_2\left(\sin\varphi_1 + \sin\varphi_4\right)}\cdot\omega_1 - \\ &-\frac{\ell^2\sin\left(\varphi_1 - \varphi_4\right) - \ell d\sin\varphi_4 - 2\ell L\sin\left(\varphi_2 - \varphi_4\right)}{-L\sin\varphi_2\left(\ell\cos\varphi_1 + \ell\cos\varphi_4 - d\right) + \ell L\cos\varphi_2\left(\sin\varphi_1 + \sin\varphi_4\right)}\cdot\omega_4.\end{aligned} \tag{7.17}$$

Se va prezenta în continuare problema cinematică inversă: considerând cunoscute poziția, viteza şi accelerația punctului P, dimensiunile elementelor ℓ, respectiv *L*, trebuie determinate legile de mişcare pentru cele două elemente motoare (în cazul particular analizat, se vor determina legile de variație ale unghiurilor dintre elementele motoare şi axa *Ox*) [150]. Se va folosi schema cinematică din figura 7.3.

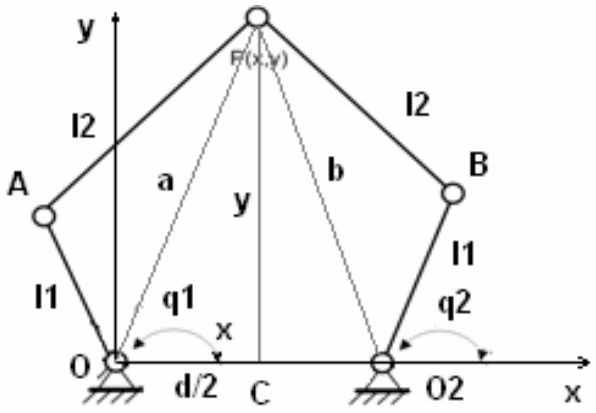


Figura 7.3. Schema pentru problema cinematică inversă

Se notează $q_1^I = P\hat{O}C$, $q_1^{II} = A\hat{O}P$, $q_2^I = C\hat{O}_2P$, $q_2^{II} = P\hat{O}_2B$. Pornind de la relațiile:

$$a = \sqrt{x^2 + y^2}\ , \tag{7.18}$$

$$b = \sqrt{(d-x)^2 + y^2}\ , \tag{7.19}$$

se obțin expresiile

$$q_1^I = \arctan\left(\frac{y_p}{x_P}\right), \tag{7.20}$$

$$q_1^{II} = \arccos\left(\frac{\ell_1^2 + x_P^2 + y_p^2 - \ell_2^2}{2\ell_1 a}\right). \tag{7.21}$$

În consecință, dependența lui q_1 de coordonatele lui P,(x_p, y_P), respectă relația:

$$q_1 = \arctan\left(\frac{y_P}{x_P}\right) \pm \arccos\left(\frac{\ell_1^2 + x_P^2 + y_P^2 - \ell_2^2}{2\ell_1\sqrt{x_P^2 + y_P^2}}\right). \tag{7.22}$$

Procedând analog în cazul lui q_2, se obțin relațiile:

$$q_2^I = \arctan\left(\frac{y_p}{d - x_P}\right), \tag{7.23}$$

$$q_2^{II} = \arccos\left(\frac{\ell_1^2 + (d-x_p)^2 + y_p^2 - \ell_2^2}{2\ell_1 b}\right), \tag{7.24}$$

Relațiile (7.23) şi (7.24) conduc imediat la expresia lui q_2:

$$q_2 = \arctan\left(\frac{y_p}{d - x_P}\right) \pm \arccos\left(\frac{\ell_1^2 + (d-x_p)^2 + y_p^2 - \ell_2^2}{2\ell_1\sqrt{(d-x_P)^2 + y_P^2}}\right) \tag{7.25}$$

Ecuațiile (7.22) şi (7.25) vor fi folosite în simularea sistemului pentru determinarea valorilor de referință ale unghiurilor celor două elemente motoare. Pe de altă parte, aceste formule reprezintă instrumente utile în vederea aprofundării conceptului de *lege de mişcare* la orele de fizică din liceu. Astfel, cum punctul caracteristic P al robotului se supune principiului perfectei localizări [128], acesta descrie o traiectorie continuă, bine determinată. Altfel spus, poziția efectorului este determinată în fiecare punct şi variază în timp în mod continuu. Prin urmare, coordonatele punctului P sunt funcții finite, uniforme şi continue în timp, deci pot fi scrise sub forma:

$$x_P = f_1(t),\ y_P = f_2(t), \tag{7.26}$$

Ecuațiile (7.26) sunt legile de mişcare şi reprezintă ecuațiile parametrice ale traiectoriei, parametrul fiind timpul. Prin eliminarea timpului din (7.26) ecuația traiectoriei poate fi scrisă şi sub forma:

$$F(x_P, y_P) = 0. \tag{7.27}$$

În cazul mişcării circulare însă, legea de mişcare descrie variația unghiului la centru, q, în funcție de timpul *t*. De pildă, legea mişcării circulare uniforme, studiată la fizică la nivel de liceu, are forma particulară:

$$q = q_0 + \omega(t - t_0), \tag{7.28}$$

unde q_0 reprezintă unghiul la centru la momentul inițial t_0, iar ω este viteza unghiulară. Dacă însă mişcarea circulară nu este uniformă, legea de mişcare este:

$$q = f(t), \tag{7.29}$$

forma funcției *f* depinzând de specificul mişcării circulare în cauză.

Se poate, deci, observa că relațile (7.25) şi (7.22) integrează ambele forme ale legii de mişcare, atât cea de forma (7.26) cât şi cea de forma (7.29), evidențiind legătura cauzală care există între variația în timp a coordonatelor punctului caracteristic *P* şi pozițiile elementelor motoare *OA* şi O_2B, definite prin intermediul unghiurilor q_1, respectiv q_2.

7.3.2. Analiza spațiului de lucru

Determinarea spațiului de lucru se face numeric, prin formularea unei reprezentări binare, reprezentând o secțiune a lui, obținută prin scanarea pozițiilor şi orientărilor, *p*, pe măsură ce problema cinematică directă a fost rezolvată prin determinarea lui *p* în funcție de variabilele articulare q_1, respectiv q_2. Se defineşte o matrice binară P_{ij} a spațiului de lucru astfel: dacă elementul (i,j) se află în spațiul de lucru, atunci $P_{ij} = 1$, în caz contrar $P_{ij} = 0$. Determinarea poziției (i,j) se va face prin incrementarea cu valoarea Δx, respectiv Δy, a poziției anterioare, aşa cum se poate observa în figura 7.4 [211], [212].

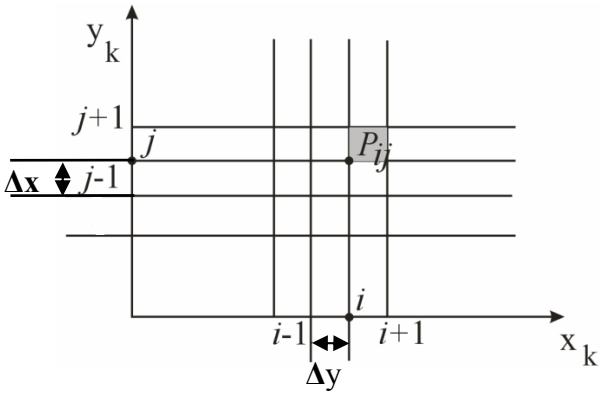


Figura 7.4. Metoda de determinare a ariei spațiului de lucru

Matricea P fiind definită, aria spațiului de lucru reprezintă suma ariilor secțiunilor dreptunghiulare cu laturile Δx, respectiv Δy:

$$A = \sum_{i=1}^{i_{MAX}} \sum_{j=1}^{j_{MAX}} \left(P_{ij} \Delta x \cdot \Delta y \right). \tag{7.30}$$

Pentru determinarea formei şi dimensiunii spațiului de lucru a fost creată o aplicație software care permite introducerea dimensiunii elementelor şi a lungimii elementului fix. Aplicația afişează grafic forma şi determină valoarea numerică a ariei spațiului de lucru. În figura 7.5 este prezentat rezultatul obținut pentru robotul care are dimensiunile $\ell_1 = 70\,mm$, $\ell_2 = 140\,mm$, respectiv $d = 140\,mm$. Aria spațiului de lucru determinată cu ajutorul aplicației este cea afişată: $250{,}38\,cm^2$

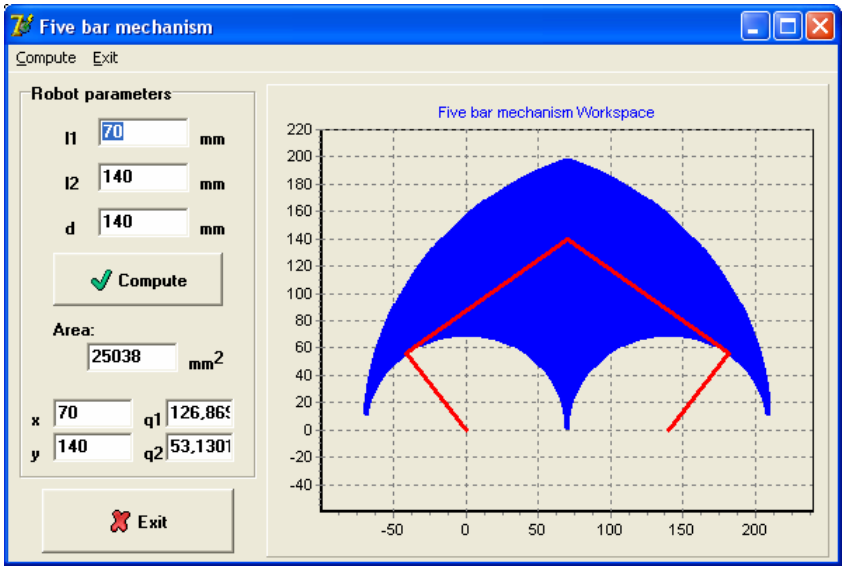


Figura 7.5. Aplicație pentru determinarea spațiului de lucru

7.3.3. Analiza dinamică a robotului

Modelarea sistemului mecatronic reprezintă o primă etapă în demersul pentru proiectarea acestuia. În cursul acestei etape se pot dezvolta şi testa algoritmi de control şi pot fi optimizate diferite componente din structura sistemului înainte de a fi realizat un prototip al acestuia. De asemenea, această metodă facilitează dezvoltarea unor sisteme mai compacte şi flexibile într-un timp mai scurt şi la un nivel de cost mai redus. Există trei metode consacrate pentru descrierea sub formă de model a componentelor sistemului: metoda *analitică*, metoda *black box* şi metoda *gray box*. Fiecare din cele trei metode e specifică unei anume situații, în funcție de complexitatea şi cunoştințele despre componenta modelată. Utilizarea metodei black box este indicată în cazul unor sisteme în care se cunosc puține informații privind structura lor, metoda bazându-se pe date măsurate experimental şi pe tehnicile de identificare de sistem. Metoda analitică utilizează ecuații pentru a descrie comportarea sistemului în raport cu intrările şi ieşirile acestuia. Metoda gray box se utilizează în cazul în care proprietățile

componentelor sunt cunoscute, dar nu se cunosc parametrii fizici ai acestora, determinarea lor facându-se prin metode experimentale.

Modelul dinamic pentru structura mecanică s-a realizat în mediul Matlab-Simulink cu toolbox-ul SimMechanics. Metoda aplicată se bazează pe ecuațiile Newton-Euler [166]; modelarea structurii se face prin definirea parametrilor de legătură şi dinamici ai fiecărui element, mediul Simulink generând ecuațiile necesare pentru rezolvarea problemei dinamice. SimMechanics este un toolbox utilizat în proiectarea sistemelor inginereşti ce conțin elemente mecanice rigide, folosind dinamica newtoniană standard a forțelor şi momentelor. Dezvoltarea modelului se face prin intermediul unor blocuri Simulink care reprezintă componentele structurii mecanice (cuple, elemente cinematice, batiu). Totodată, mediul permite introducerea de actuatori şi senzori, ceea ce facilitează intrările şi ieşirile din model.

În general, realizarea modelului pentru o structură mecanică se poate face pas cu pas, situație în care se porneşte de la evaluarea momentului de inerție al fiecărui element din structură, a gradelor de libertate şi a constrângerilor împreună cu coordonatele sistemului ataşat elementelor; în continuare, se setează senzorii pentru înregistrarea mişcărilor şi forțelor, se introduc actuatorii, se inițializează mişcarea şi se aplică forțele (care includ frecarea continuă sau discontinuă); în fine, se dă start simulării şi se apelează soluțiile Simulink pentru a determina mişcarea sistemului cu menținerea constrângerilor impuse. O altă abordare are în vedere *modelarea cu ajutorul unui mediu CAD – Solid Works*. Această metodă permite trecerea peste primul pas al metodei anterioare, pentru că momentele de inerție ale elementelor din structură, gradele de libertate, constrângerile împreună cu coordonatele sistemului ataşat elementelor se generează automat în momentul importării structurii în Matlab. Etapele care trebuie parcurse sunt: realizarea ansamblului structurii mecanice în mediul CAD; salvarea ansamblului într-un fişier de tip .xml; generarea automată a modelului în mediul Simulink, folosind comanda *import_physmod*; introducerea actuatorilor şi a senzorilor din structură; simularea comportării sistemului. În figura 7.6 se prezintă modelul CAD al structurii mecanice.

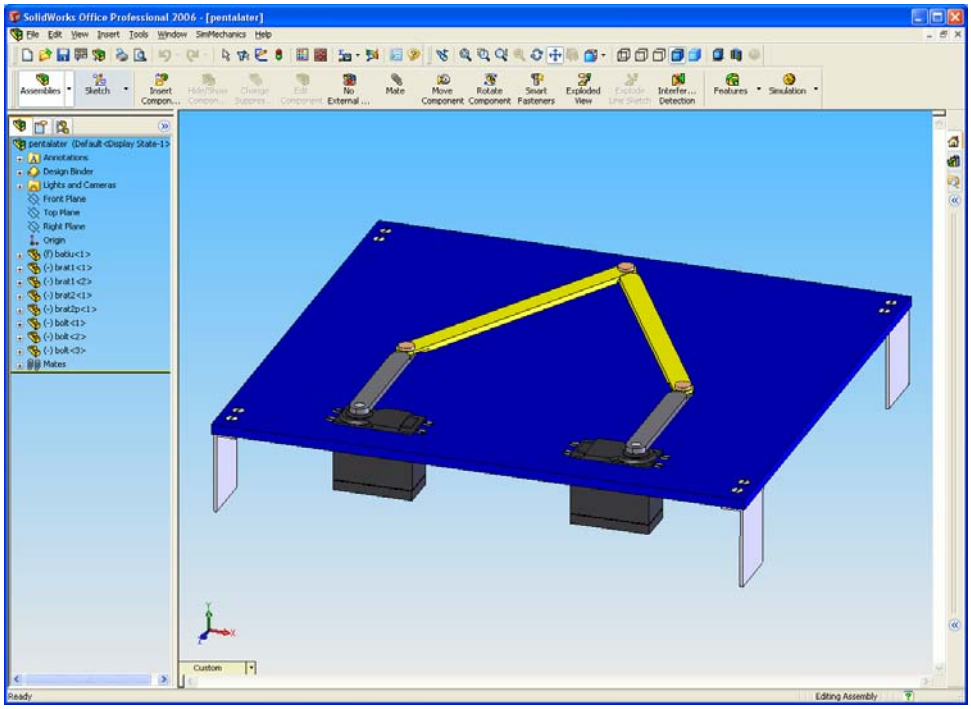


Figura 7.6. Model CAD al structurii mecanice

Sunt modelate cele 4 elemente mobile, batiul, precum şi cuplele cinematice. Pentru a putea importa în Matlab, ansamblul CAD este salvat din Solid Works într-un fişier cu extensia .xml. Importarea în mediul Simulink a structurii mecanice se face prin intermediul comenzii Matlab *import_physmod*. În figura 7.7 este prezentat modelul dinamic al structurii mecanice astfel obținut.

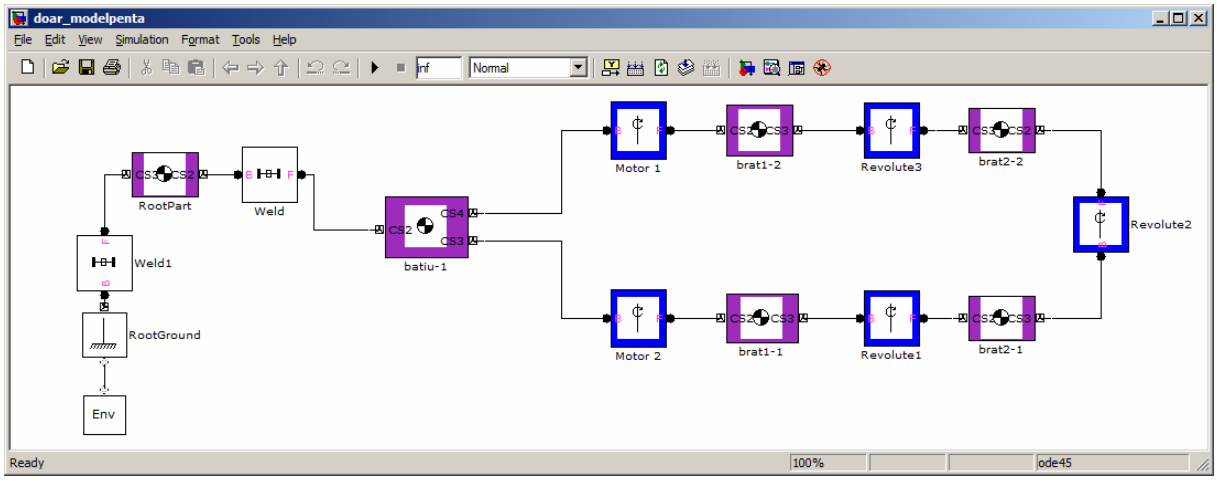


Figura 7.7. Modelul Simulink al robotului

Blocurile Simulink colorate cu violet reprezintă elementele cinematice, iar blocurile Simulink de culoare albastră reprezintă cuplele de rotație. Pentru a putea conecta modelul Simulink cu alte componente care alcătuiesc structura robotului se definesc porturi de intrare (elemente motoare) în model, respectiv porturi de ieşire din model (senzori). În figura 7.8 se observă, colorate în roşu, porturile de intrare, care sunt conectate la două blocuri *Joint* actuator. Blocurile galbene reprezintă porturile de ieşire, care sunt conectate la blocurile *Joint sensor*, în cazul determinării unghiului în cuplele motoare, respectiv la blocurile *Body Sensor*, în cazul determinării poziției punctului caracteristic (efectorului final).

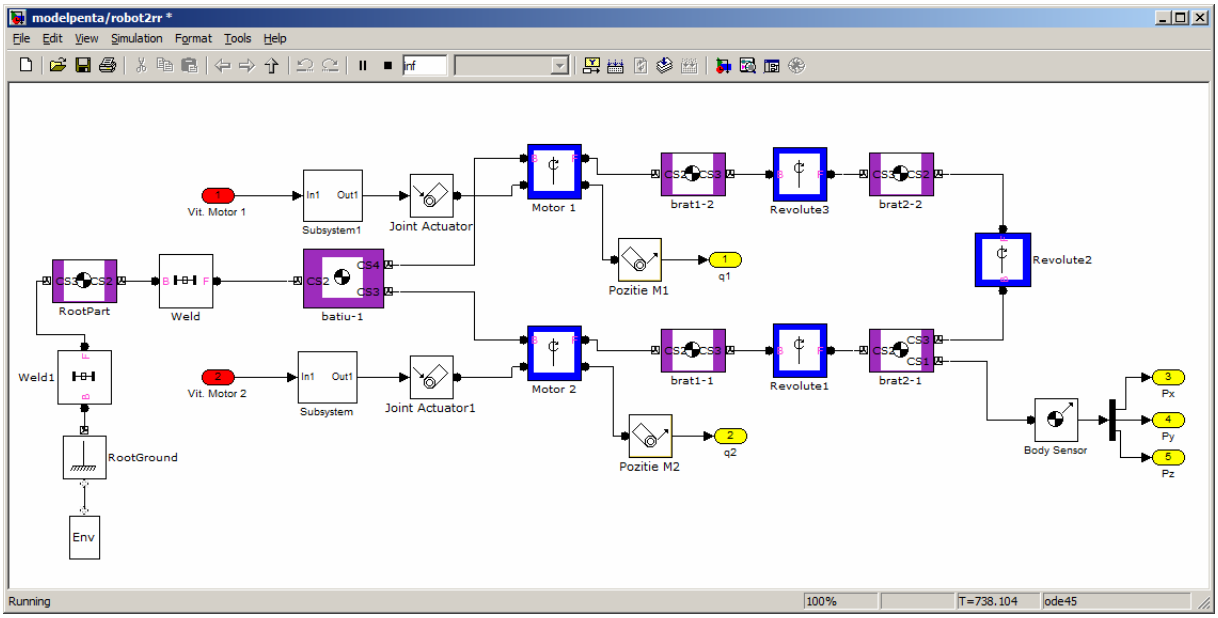


Figura 7.8. Modelul Simulink dezvoltat

În figura 7.9, este prezentat modelul dinamic al structurii mecanice ca subsistem. Se observă porturile de intrare în viteză, în stânga, respectiv porturile de ieşire corespunzătoare unghiurilor elementelor motoare q_1, q_2, precum şi poziția punctului P, în dreapta blocului.

Validarea modelului se face prin analizarea răspunsului sistemului la semnalul de intrare sinusoidal.

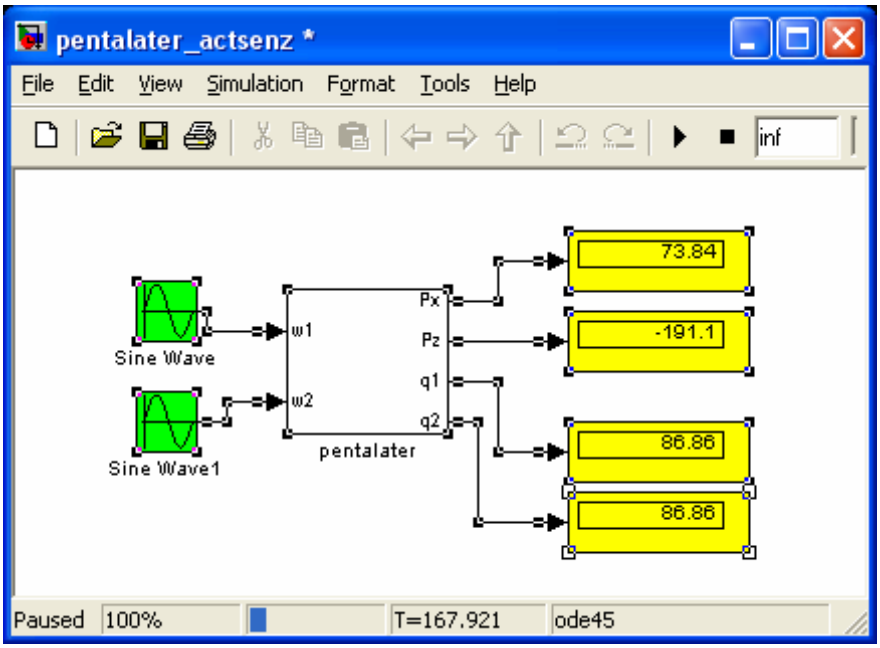


Figura 7.9. Model bloc- subsistemul mecanic al robotului

Actuatorii sunt materializați prin două servomotoare de curent continuu, în a căror structură sunt integrate reductoare cu roți dințate cilindrice şi senzori de poziție de tip potențiometric.

În continuare, sunt prezentate ecuațiile care definesc comportarea dinamică a motorului [105]. Pentru început, se vor stabili legăturile dintre momentul T al motorului şi curentul de alimentare I, respectiv dintre tensiunea indusă în rotor şi viteza unghiulară a acestuia. Dacă un conductor de lungime ℓ, parcurs de un curent de intensitate I, se află într-un câmp magnetic de inducție $\vec{B}$, asupra lui va acționa forța electromagnetică. În cazul în care conductorul este perpendicular pe liniile câmpului, expresia forței electromagnetice este:

$$F = B \cdot I \cdot \ell \ . \tag{7.31}$$

Deoarece, în cazul unui motor, conductorul execută o mişcare de rotație în jurul unui ax de rază r, mişcare perpendiculară pe câmpul magnetic, rezultatul este un moment.

$$T = r \cdot B \cdot I \cdot \ell \ . \tag{7.32}$$

Produsul elementelor r, B, l reprezintă constanta rotorului, k. Prin urmare, ecuația (7.32) devine:

$$T = k \cdot I \ . \tag{7.33}$$

În continuare, se va folosi schema echivalentă a unui motor de curent continuu, reprezentată în figura 7.10. S-au folosit următoarele notații: R_A – rezistența bobinei rotorului,

L_A – inductanța rotorului, R_B – rezistența periilor, $2V_B$ – căderea de tensiune pe perii. Transferul curentului spre bobina rotorului prin intermediul periilor se face cu pierderi, care pot fi exprimate prin rezistența R_B şi căderea de tensiune $2V_B$ pe cele două perii. Bobina de excitare din stator este alimentată cu un curent de intensitate I_E, dezvoltându-se astfel un câmp magnetic de intensitate $\vec{H}$, a cărui inducție magnetică are valoarea $B = \mu H$. Câmpul de excitare afectează fluxul magnetic produs de curentul din rotor cu o valoare Φ. Conform legii lui Faraday, în rotor apare, prin inducție electromagnetică, o tensiune V_i:

$$V_i(t) = -\frac{d\Phi(\varphi,t)}{dt} = -\frac{\partial\Phi}{\partial t} - \frac{\partial\Phi}{\partial\varphi}\cdot\frac{d\varphi}{dt}. \tag{7.34}$$

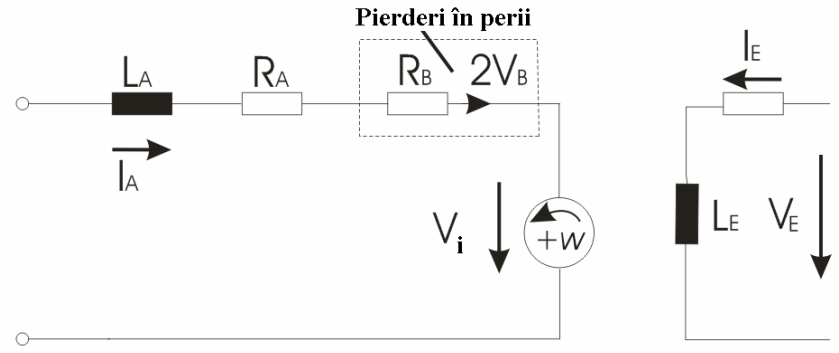


Figura 7.10. Schema bloc a motorului electric de curent continuu

Raportul $\partial\Phi/\partial t$ poate fi neglijat în cazul unei excitații constante, iar termenul $\partial\Phi/\partial\varphi$ poate fi exprimat, în funcție de unghiul φ de înclinare a bobinei rotorului, astfel:

$$\frac{d\Phi}{d\varphi} = \Phi\cos\varphi. \tag{7.35}$$

În cazul motoarelor de curent continuu cu mai multe bobine pe rotor, unghiul φ are o valoare foarte mică, deci se poate considera $\cos\varphi \cong 1$. Astfel, tensiunea indusă în rotor este:

$$V_i \cong -\Phi\cdot\omega = k\omega, \tag{7.36}$$

unde ω este viteza unghiulară a rotorului (egală cu $d\varphi/dt$), iar k reprezintă constanta motorului.

Utilizând (7.32), se obține ecuația diferențială de ordinul unu care descrie comportarea dinamică a circuitului electric al rotorului:

$$L_A\frac{dI_A(t)}{dt} + R_A I_A(t) = V_A(t) - V_i(t) - 2V_B\cdot\operatorname{sgn} I_A(t) = V_A(t) - k\omega(t) - 2V_B\cdot\operatorname{sgn} I_A(t) \tag{7.37}$$

Pentru a descrie comportarea mecanică a motorului, se porneşte de la ipoteza potrivit căreia momentul forței de frecare este suma dintre momentul forței de frecare columbiene (frecare uscată) şi cel al al forței de frecare vâscoasă:

$$T_F(t) = T_{F0} \cdot \operatorname{sgn}\omega(t) + F\omega(t), \tag{7.38}$$

unde F reprezintă coeficientul frecării vâscoase.

Astfel, cea de-a doua ecuație diferențială de ordinul unu care descrie modelul dinamic al motorului este:

$$J \cdot \frac{d\omega(t)}{dt} = T(t) - T_F(t) - T_L(t) = kI_A(t) - T_{F0} \cdot \operatorname{sgn}\omega(t) - F\omega(t) - T_L(t), \tag{7.39}$$

în care J este momentul de inerție al rotorului, iar $T_L(t)$ este momentul rezistent static.

Pentru modelul realizat în mediul Simulink, reprezentat în figura 7.11, s-au făcut simplificări privind forța de frecare, care se consideră constantă.

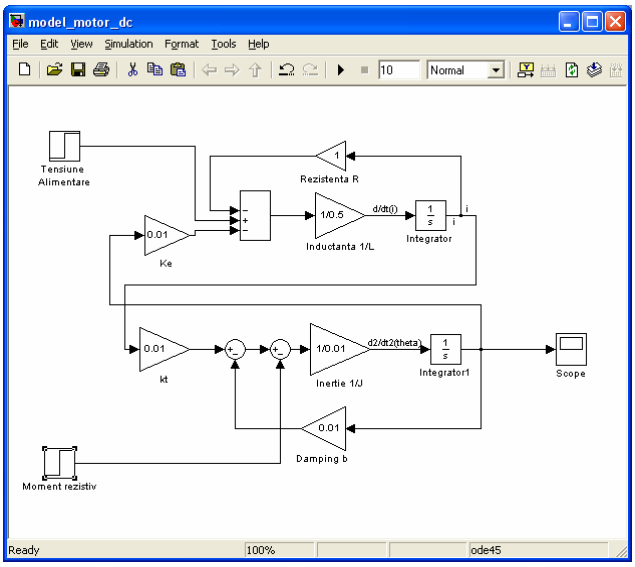


Figura 7.11. Schema bloc a modelului dinamic al motorului de curent continuu

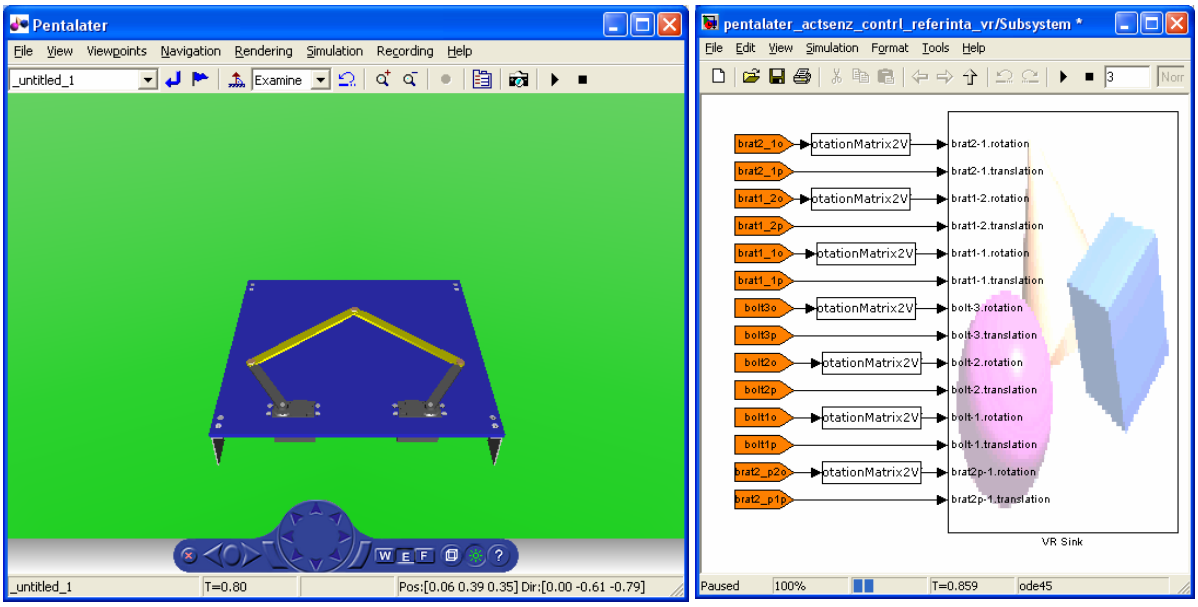
Formulele (7.31)-(7.39), precum şi explicitările prezentate, dovedesc faptul că analiza funcționării motorului de curent continuu este un demers extrem de util din punct de vedere didactic, întrucât permite evidențierea legăturilor care există între mărimi fizice (forța electromagnetică, momentul forței, flux magnetic, inductanță etc.), legi (legea lui Faraday, legile lui Kirchhoff etc.) şi fenomene (inducția electromagnetică, frecarea etc.) care aparțin unor domenii diferite ale fizicii studiate la gimnaziu şi liceu: electricitate, electromagnetism, mecanică. Un exemplu relevant în aceste sens îl constituie formula care arată legătura cauzală dintre puterea P a motorului, cuplul M_t dezvoltat de motor şi turația n a rotorului acestuia:

$$M_t = 71620\frac{P}{n}, \tag{7.40}$$

în care P e exprimat în *CP* (cai-putere), M_t în $daN \cdot cm$, iar n în *rot/min*.

7.3.4. Modelul virtual al robotului

Pentru a vizualiza comportarea robotului, a fost dezvoltat modelul virtual al acestuia, prin intermediul toolbox-ului *Virtual Reality* din Matlab. Modelul este reprezentat în figura 7.12.a. Pentru a putea încărca modelul virtual în blocul *VR Sink*, modelul CAD este salvat în formatul *vrml* din Solid Works. Folosind aplicația V-Realm Builder, fișierul salvat din Solid Works se prelucrează în vederea creării unei structuri compatibile cu mediul Matlab. În această etapă se vor defini elementele specifice unei scene de realitate virtuală: camera de unde se observă structura, spoturile de lumină din cadrul scenei, variabilele de stare ale scenei, imaginea de fundal etc. Modelul creat este utilizat în cadrul simulării prin intermediul blocului VR Sink. La încărcarea modelului s-au definit, pentru fiecare element al robotului, două porturi de intrare pentru matricea de poziție şi orientarea acestuia (figura 7.12.b). Elementele din modelul virtual au fost conectate cu elementele din modelul dinamic al structurii.



a. **b.**

Figura 7.12. Modelul virtual al robotului (a) şi blocul VR Sink (b)

Pentru aceasta s-a definit un nou port de conexiune, la care s-a ataşat un bloc *Body Senzor*, bloc care a determinat o matrice de poziție şi o matrice de rotație a elementului, matrici utilizate ulterior în *virtual reality* pentru poziționare.

7.3.5. Simularea robotului

Dezvoltarea algoritmului de control pentru structură s-a făcut în mai multe etape. În prima etapă s-a dezvoltat un controler de poziție pentru cele două motoare, folosind două controlere PI. În figura 7.13 se prezintă modelul robotului în care se face controlul poziționării la un anumit unghi impus prin cele două blocuri constante ca referință.

Modelul robotului conține modelul dinamic al structurii mecanice, modelul dinamic al actuatorului, în care au fost introduse amplificatorul de putere pentru alimentarea motorului precum şi reductorul. În figura 7.14.a este afişat răspunsul sistemului la un semnal treaptă.

Modificarea poziției se face doar pentru al doilea element motor, unghiul q_2 modificându-şi valoarea de la 90 grade la 70 grade.

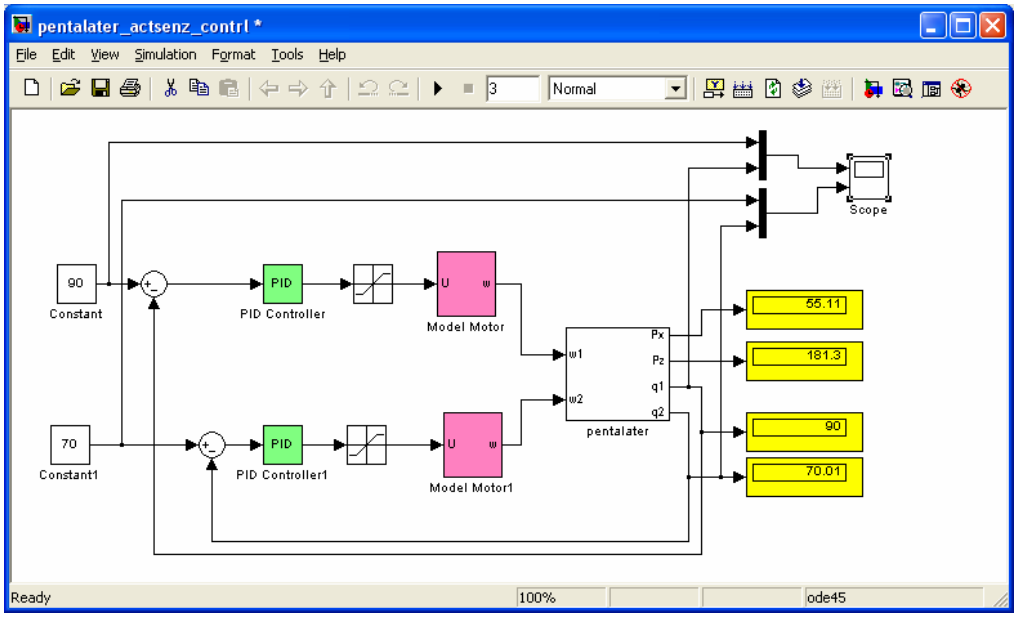
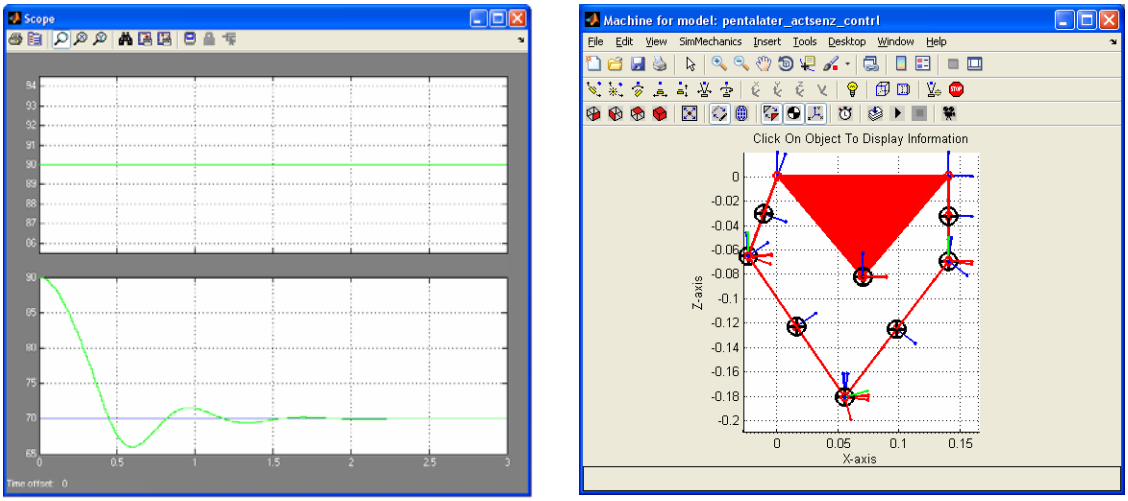


Figura 7.13. Modelul robotului pentru controlul poziționării

Modul în care se face tranziția se poate vizualiza atât pe osciloscop (figura 7.14.a), cât şi prin modelul grafic din SimMechanics (figura 7.14.b). Se observă că răspunsul sistemului conține supracreşteri şi oscilații amortizate, caracteristici care se doresc a fi eliminate, motiv pentru care se determină parametrii controlerului *Kp*, respectiv *Ki*. Determinarea parametrilor controlerului se face cu blocul Signal Constraints. În figura 7.15 se pot observa rezultatele obținute. Limitările care au fost impuse sunt: timp de creştere mai mic de 1 secundă, supracreşteri mai mici de 1% din semnal, timp de stabilizare 1,2 secunde şi eroare staționară mai mică de 1 % din semnal. Valorile obținute sunt $K_P = 0{,}038$, respectiv $K_i = 0{,}0000697$.



a. **b.**

Figura 7.14. Vizualizarea răspunsului sistemului la semnalul treaptă pe osciloscop (a) şi pe modelul grafic SimMechanics (b)

În figura 7.15.b. este prezentat răspunsul sistemului în noul context. Se observă că sistemul răspunde cerințelor impuse.

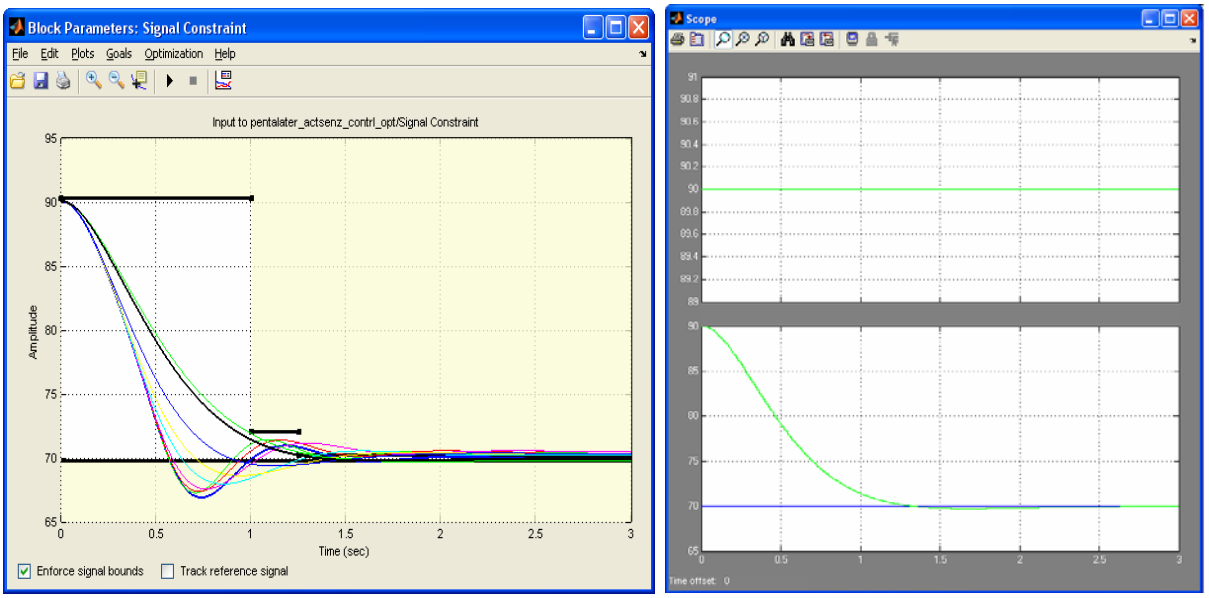
Următoarea etapă în dezvoltarea controlerului este introducerea ecuațiilor problemei cinematice inverse, ceea ce permite introducerea ca referință direct poziția efectorului final (punctului caracteristic). Ecuațiile sunt introduse folosind blocul *Embedded Function*, din mediul Simulink. Comenzile se introduc folosind limbajul m specific mediului Matlab. Liniile de cod care definesc funcția sunt:

```
function [q1,q2]= fcn(x,y)
l=70; %lungime brat 1
L=140; %lungime brat 2
d=140; %distanta dintre actuatori

z=sqrt(x^2+y^2);
q1 = acos(x/z)+acos((l^2+z^2-L^2)/(2*l*z));

z=sqrt((d-x)^2+y^2);
q2 = pi -(acos((d-x)/z)+acos((l^2+z^2-L^2)/(2*l*z)));

%transformare in grade
q1=q1*180/pi;
q2=q2*180/pi;
```



a. **b.**

Figura 7.15. Optimizarea parametrilor controlerului PI: fereastra de optimizare (a) şi răspunsul optimizat al sistemului (b)

Intrarea în bloc este poziția efectorului final, poziție dată de coordonatele x și y, iar ieșirea din bloc este poziția elementelor motoare, dată de unghiurile q_1, respectiv q_2. În figura 7.16 este prezentat modelul care include problema cinematică inversă: din poziția efectorului final de la intrarea în sistem se va determina referința pentru cele două controlere PI de pe actuatori. Răspunsul sistemului la un semnal de referință de tip treaptă şi modificarea poziției elementelor în timpul simulării pot fi urmărite pe osciloscopul din figura 7.17.a. sau în fereastra din figura 7.17.b. Inițial, sistemul se afla într-o poziție în care valorile ambelor

unghiuri q_1, respectiv q_2, erau de 90 de grade, valori care se modifică pentru o nouă poziție, dată de x şi y, cu unghiurile $q_1 = 152^0$ şi $q_2 = 27{,}9^0$.

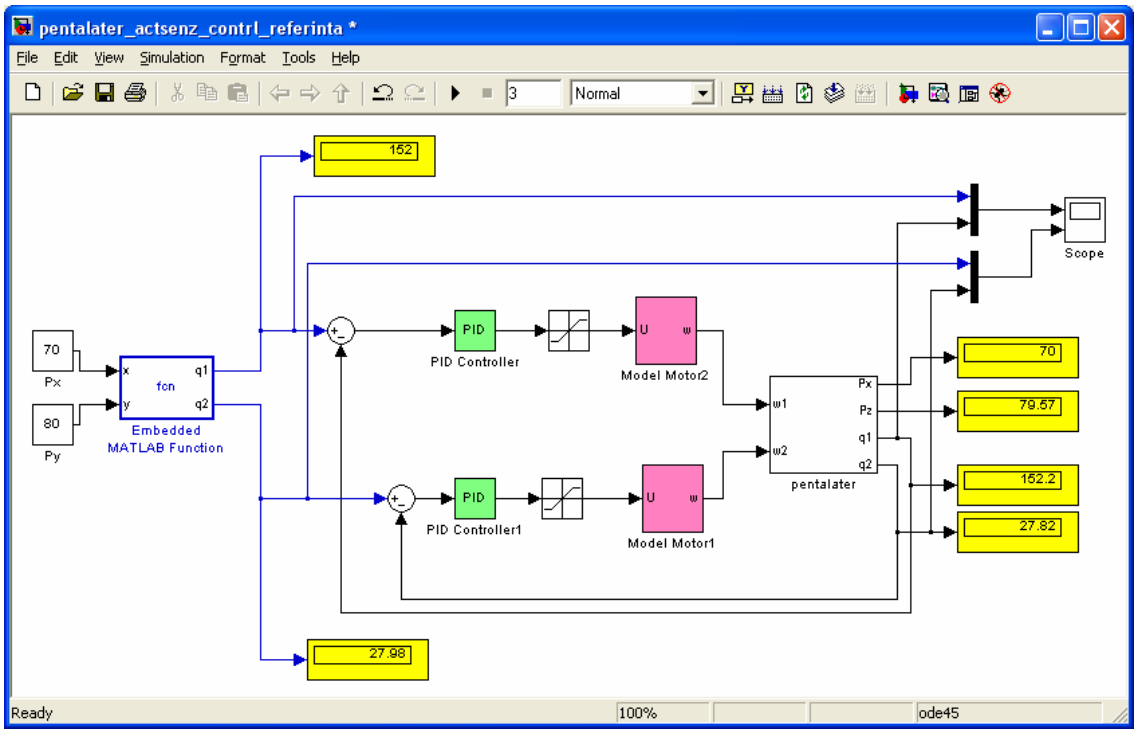
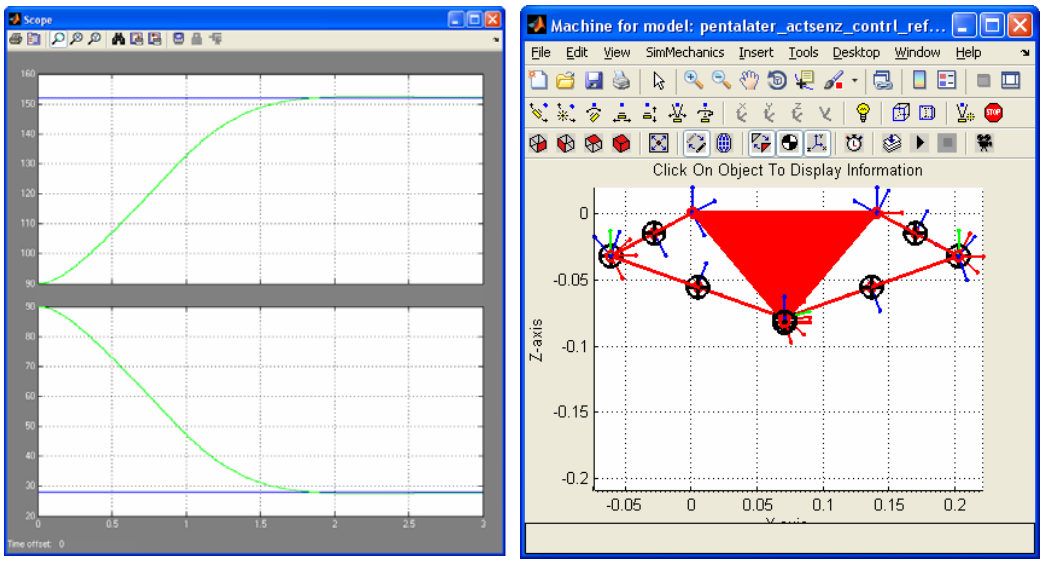


Figura 7.16. Modelul robotului bazat pe problema cinematică inversă

Parametrii controlerului sunt cei determinați anterior, comportarea dinamică a sistemului răspunzând cerințelor impuse.



a. **b.**

Figura 7.17. Răspunsul sistemului la semnal treaptă (a) şi vizualizarea structurii (b)

În continuare se va urmări introducerea unei referințe circulare şi implementarea modelului virtual pentru vizualizarea răspunsului robotului. În figura 7.18 este prezentat

blocul folosit pentru generarea unei traiectorii circulare, la ieşirea acestuia fiind coordonatele *x* şi *y* ale efectorului final (punctului caracteristic).

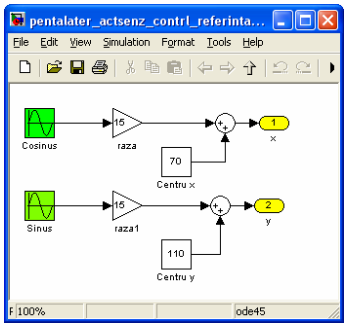


Figura 7.18. Blocul utilizat pentru generarea unei traiectorii circulare

Modelul robotului este prezentat în figura 7.19.

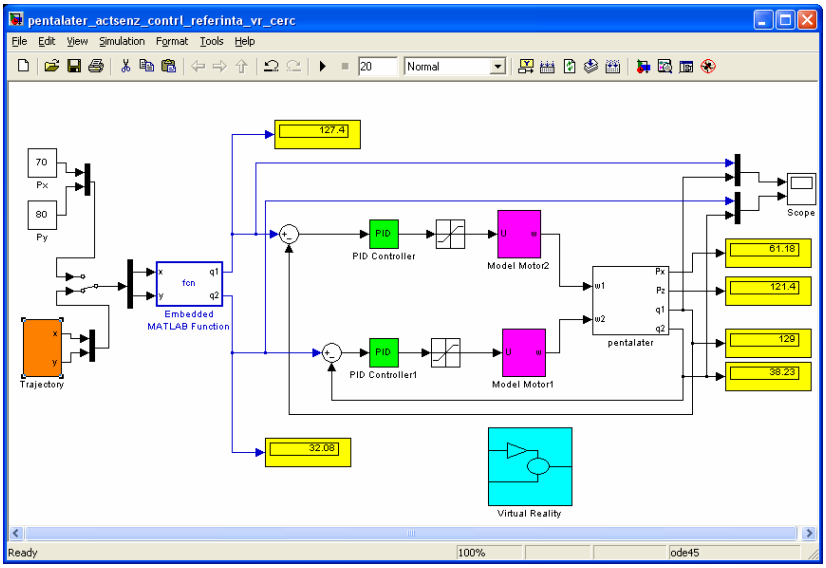
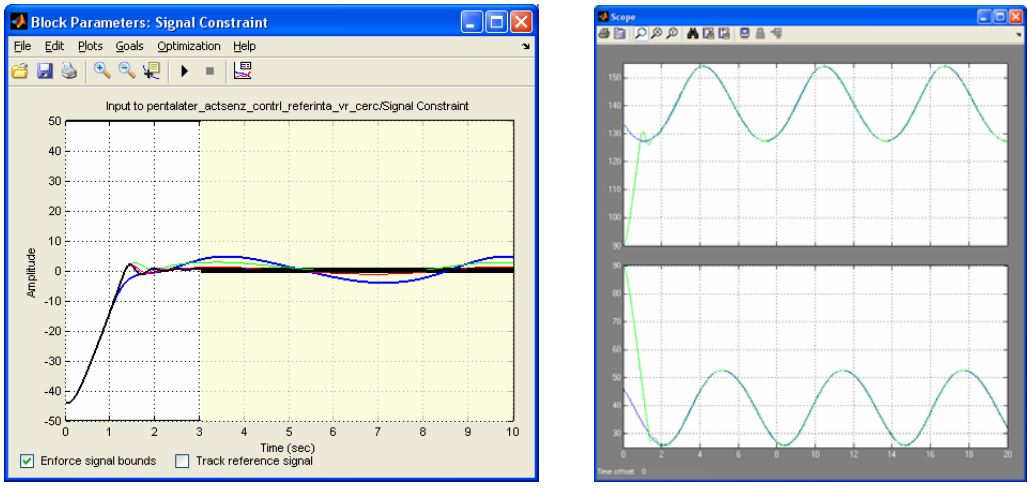


Figura 7.19 Modelul robotului



a. **b.**

Figura 7.20. Optimizarea parametrilor controlerului: bloc de optimizare (a); răspuns sistem (b)

Pe baza ecuațiilor problemei cinematice inverse se determină referințele pentru cele două motoare. Controlul poziţional al acestora se face prin intermediul a două controlere PI, care vor determina tensiunea de alimentare pentru cei doi actuatori. Optimizarea (figura 7.20) are drept scop modificarea parametrilor controlerului astfel încât eroarea obținută din diferența dintre referința şi unghiul elementului motor să fie mai mică de ± 4 grade. Valorile obținute pentru parametrii controlerului sunt $K_P = 0{,}53$ şi $K_i = 0{,}00051$.

Prezentul subcapitol evidențiază faptul că educația mecatronică presupune exploatarea corelațiilor existente între matematică şi informatică. Un exemplu reprezentativ în acest sens îl reprezintă liniile de cod ale limbajului m folosit pentru introducerea comenzilor controlerului; conceperea programului necesită atât deducerea matematică a ecuațiilor problemei cinematice inverse cât şi, evident, utilizarea codului specific limbajului.

7.4. Testarea sistemului pe baza tehnologiei de propotipare rapidă a controlului

Validarea rezultatelor obținute prin simulare se face folosind placa de control în timp real DS1104 produsă de firma dSpace. Aceasta permite încărcarea directă a modelului dezvoltat în Simulink, codul maşină necesar pentru procesor fiind generat automat. În figura 7.21 este prezentat standul experimental folosit pentru testarea robotului, care cuprinde următoarele componente: 1 – interfața de conectori cu placa de control DS1104; 2 – sursa de tensiune pentru alimentarea actuatorilor şi senzorilor; 3 – amplificatorul de putere pentru actuatori; 4 – interfața grafică Control Desk; 5 – structura robotului.

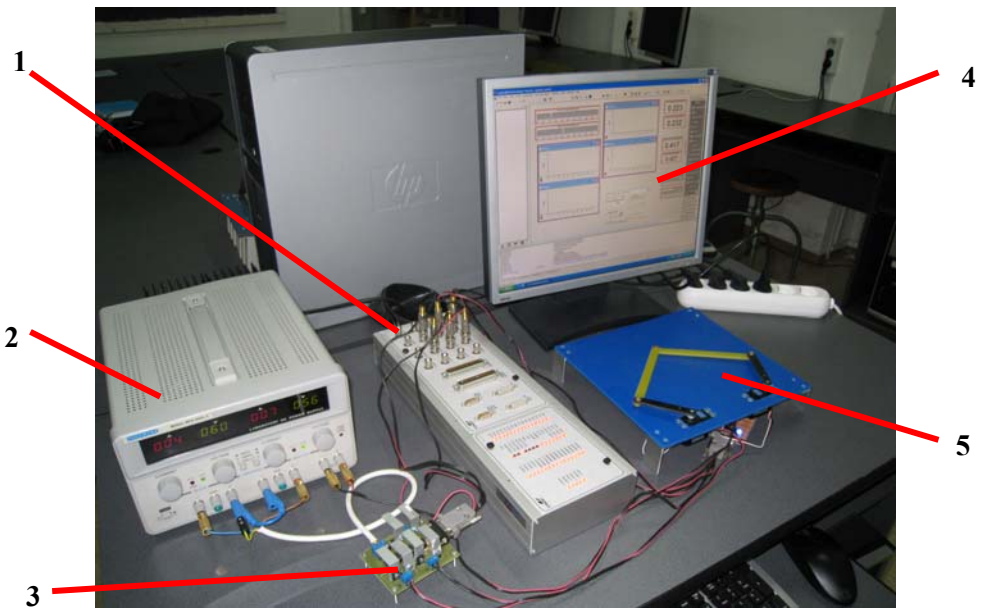


Figura 7.21. Stand experimental

Semnalul primit de la porturile DAC ale plăcii de control este amplificat în curent de un amplificator cu circuit integrat. Pentru acționarea robotului s-au folosit servomotoarele FS251S, a căror placă de control a fost înlocuită cu placa dSpace. Pentru determinarea poziției s-au folosit doi senzori rezistivi de rotație, semnalul generat fiind o tensiune proporțională cu

unghiul de rotație al elementelor motoare. Modelul folosit pentru simulare a fost modificat pentru a putea fi compilat şi încărcat în placa de control. În figura 7.22 este prezentat modelul folosit pentru testare. Se observă că modelul dinamic al robotului a fost înlocuit cu porturile de intrare/ieşire ale plăcii dSpace. Compilarea şi încărcarea modelului în placa de control se face prin comanda *Build Model* din meniul *Tools*, submeniul *Real Time Workshop*. Mediul Simulink generează automat codul maşină pentru model şi îl salvează în memoria plăcii.

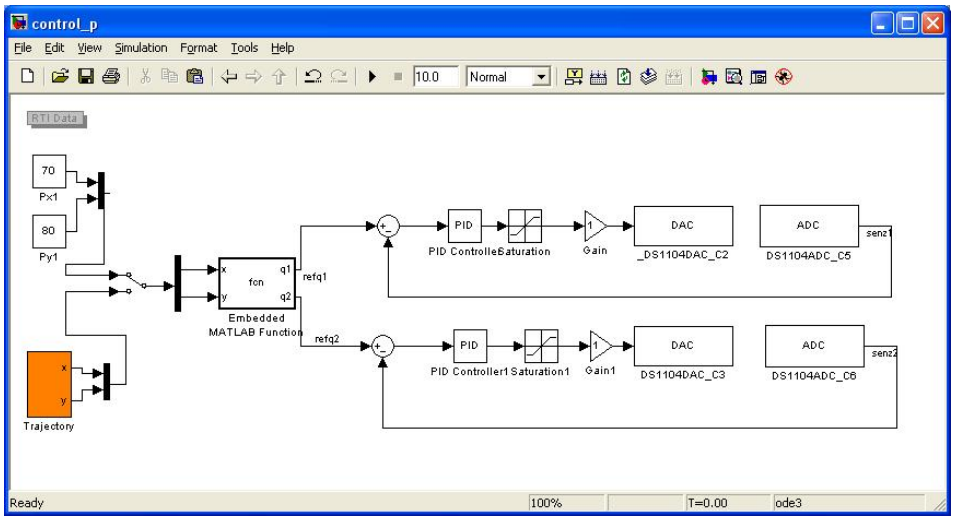


Figura 7.22. Modelul de implementare dSpace

Vizualizarea parametrilor sistemului şi controlerului în timpul testării se realizează cu aplicația Control Desk, componentă a tehnologiei dSpace (Fig.7.23).

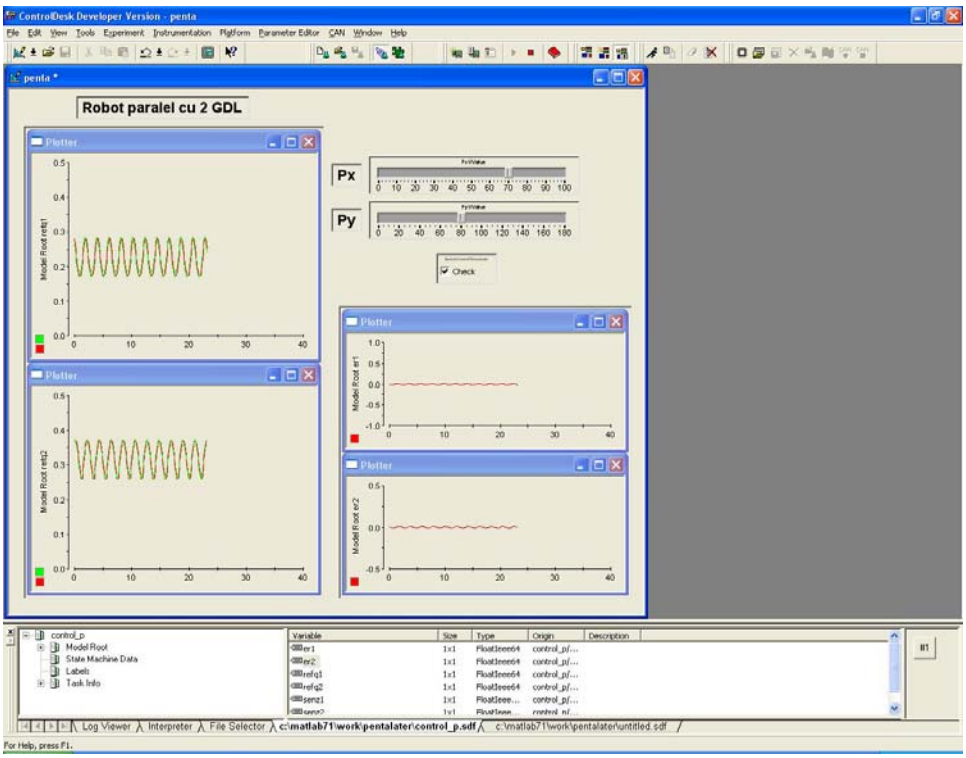


Figura 7.23. Interfața Control Desk

Aplicația permite totodată utilizarea de obiecte, cum sunt butoanele sau cursoarele, pentru modificarea acestor parametri. Interfața realizată pentru robot afişează grafic referința şi răspunsul sistemului pentru cei doi actuatori, precum şi eroarea dintre cele două semnale permițând de asemenea utilizatorului să aleagă dintre cele două metode de introducere a referinței pentru efectorul final: punct sau traiectorie curbilinie.

7.5. Implementarea sistemului

Implementarea sistemului vizează dezvoltarea produsului finit ca rezultat al etapelor anterioare care au presupus modelarea, simularea şi testarea acestuia. În figura 7.24, se prezintă modelul funcțional al robotului. Controlul acestuia se realizează prin intermediul unei plăci de dezvoltare cu microcontroler AtMega8. Interfața cu utilizatorul, creată pe PC, permite introducerea comenzilor şi simularea online/offline a robotului.

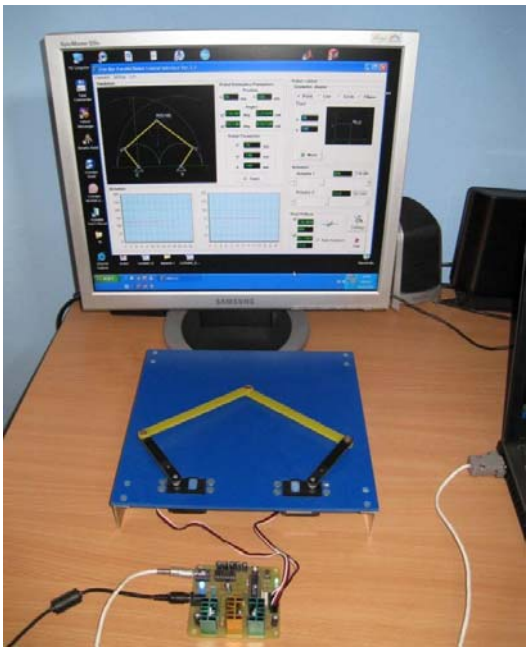


Figura 7.24. Modelul funcțional al platformei

În figura 7.25 se prezintă aplicația realizată în mediul de dezvoltare Delphi pentru controlul robotului. Aplicația utilizează ecuațiile problemei cinematice inverse şi permite simularea funcționării robotului în funcție de comenzile transmise de utilizator. De asemenea, aplicația permite afişarea poziției efectorului final şi a unghiurilor date ca referință pentru elementele motoare. Introducerea datelor de către utilizator se poate face în trei feluri: prin modificarea poziției efectorului final în funcție de mişcările pe care le face mouse-ul în spațiul de lucru, prin urmărirea unei traiectorii predefinite (linie, cerc, elipsă etc.) sau utilizatorul poate modifica diferiți parametri ale acestor figuri geometrice prin comanda directă a celor două servomotoare.

Pentru definirea figurilor geometrice se folosesc ecuațiile matematice ale acestora. Astfel, ecuația unei drepte determinată de două puncte $P_1(x_1, y_1)$, respectiv $P_2(x_2, y_2)$ este:

$$y = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} x + \frac{y_1 x_2 - y_2 x_1}{x_2 - x_1}. \tag{7.41}$$

Programul va trata şi excepțiile care apar, de pildă, în momentul în care $x_1 = x_2$, adică dreapta este paralelă cu axa *Oy*.

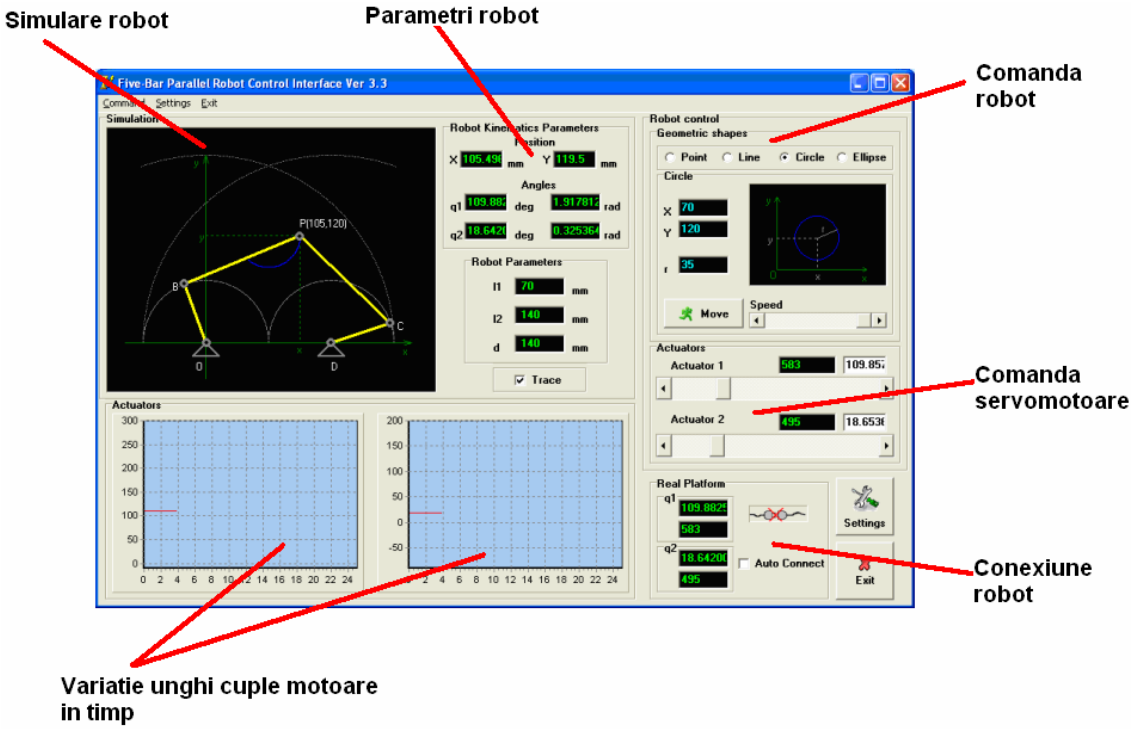


Figura 7.25. Interfața cu utilizatorul

Pentru a determina coordonatele punctelor cercului, respectiv elipsei, se scrie foloseşte ecuația cercului de rază *r* care are centrul în punctul $O(x_0, y_0)$

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2, \tag{7.42}$$

respectiv a elipsei de semiaxe *a* şi *b*, cu centrul în punctul $O(x_0, y_0)$:

$$\frac{(x - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b^2} = 1 \tag{7.43}$$

Numărul de puncte pe care efectorul final (punctul caracteristic) îl va face pe cerc va fi determinat de mărimea razei. Când cercul are rază mică şi incrementarea unghiului cu valoarea de 1 ar duce la calcularea unor puncte care au aceleaşi coordonate, efectorul final rămâne pe aceeaşi poziție timp de mai mulți paşi.

Aplicația permite totodată comanda alternativă, directă a fiecărui motor, caz în care efectorul final (punctul caracteristic) va descrie traiectorii circulare, iar mecanismul pentalater devine patrulater. În această situație, pentru a determina poziția efectorului final, aplicația utilizează ecuațiile problemei cinematice inverse. Această opțiune poate fi utilizată în cadrul

orelor de matematică, atât la nivel gimnazial, cât şi liceal, pentru a prezenta poligoanele ca figuri geometrice reconfigurabile. În această aplicație, mecanismul pentalater este un exemplu reprezentativ privind flexibilitatea şi reconfigurabilitatea unui sistem mecatronic.

Comunicarea cu placa de dezvoltare se face prin intermediul interfeței seriale RS232. Programul oferă utilizatorului posibilitatea de a alege portul pe care este conectat robotul la calculator şi poate avertiza vizual prezența conexiunii acestuia cu PC-ul. Placa electronică de dezvoltare (figura 7.26) este realizată pe baza microcontrolerului Atmel- AtMega8, produs de firma Atmel. Rolul funcțional al acesteia în cadrul sistemului este de a controla cele două servomotoare în funcție de comenzile primite de la interfața grafică de pe calculator. Totodată placa controlează tensiunea de alimentare pentru cei doi actuatori şi dispune de driverul necesar pentru comunicarea pe interfața serială 232.

Figura 7.26. Placa electronică de dezvoltare

Schema electronică a plăcii de dezvoltare este prezentată în figura 7.27. Componenta ei principală este microcontrolerul AtMega 8. Pentru a evita erorile de comunicare pe interfața serială, cuarțul ales are o frecvență de 14.07 *MHz*, acesta permițând comunicarea fără erori la un baudrate de 57600. Totodată, frecvența de ceas permite microcontrolerului să efectueze toate operațiile necesare pentru controlul robotului.

Comanda servomotoarelor se face prin intermediul a două semnale PWM cu perioada de timp de 20 ms. Semnalele PWM sunt generate folosind TIMER-ul 1 al microcontrolerului, în mod *fast pwm*. Pentru a comanda servomotoarele, factorul de umplere variază de la o perioadă de 0,8 *ms*, care va însemna un unghi de 160°, la valoarea de 2,2 *ms*, care va corespunde unui unghi de 0°. Datorită senzorilor potențiometrici integrați în structura servomotoarelor, unghiul de rotație maxim pe care îl pot efectua este de 160°, astfel că la montarea elementelor motoare trebuie efectuată o corelare între unghiul acestora şi unghiul dat de semnalul de comandă.

Stabilizarea tensiunii de alimentare, atât pentru microcontroler, cât şi pentru servomotoare, se face prin intermediul a două circuite integrate L7805. În cazul servomotoarelor, alături de circuitul de stabilizare, necesar pentru a permite trecerea unui curent mai mare, s-a utilizat şi un tranzistor de putere BD244.

Comunicarea dintre microcontroler şi PC se face folosind interfața serială USART, deoarece semnalele TTL, generate de microcontroler, nefiind compatibile cu standardul RS232C, trebuie convertite prin intermediul circuitului integrat RS232. Circuitul integrat are rolul de a converti semnalele TTL, cu valori de 0 logic (la 0 *V*) şi 1 logic (la 5 *V*), în semnale compatibile cu standardul de comunicare serială, unde 0 logic are o tensiune cuprinsă între -3 *V* şi -25 *V*, iar 1 logic are o tensiune +3 *V* şi +25 *V*.

În figura 7.28 este prezentat servomotorul utilizat pentru acționarea robotului. Servomotorul este rezultatul integrării mai multor dispozitive, în vederea controlului parametrilor funcționali (poziție, viteză etc.) în funcție de semnalul de intrare.

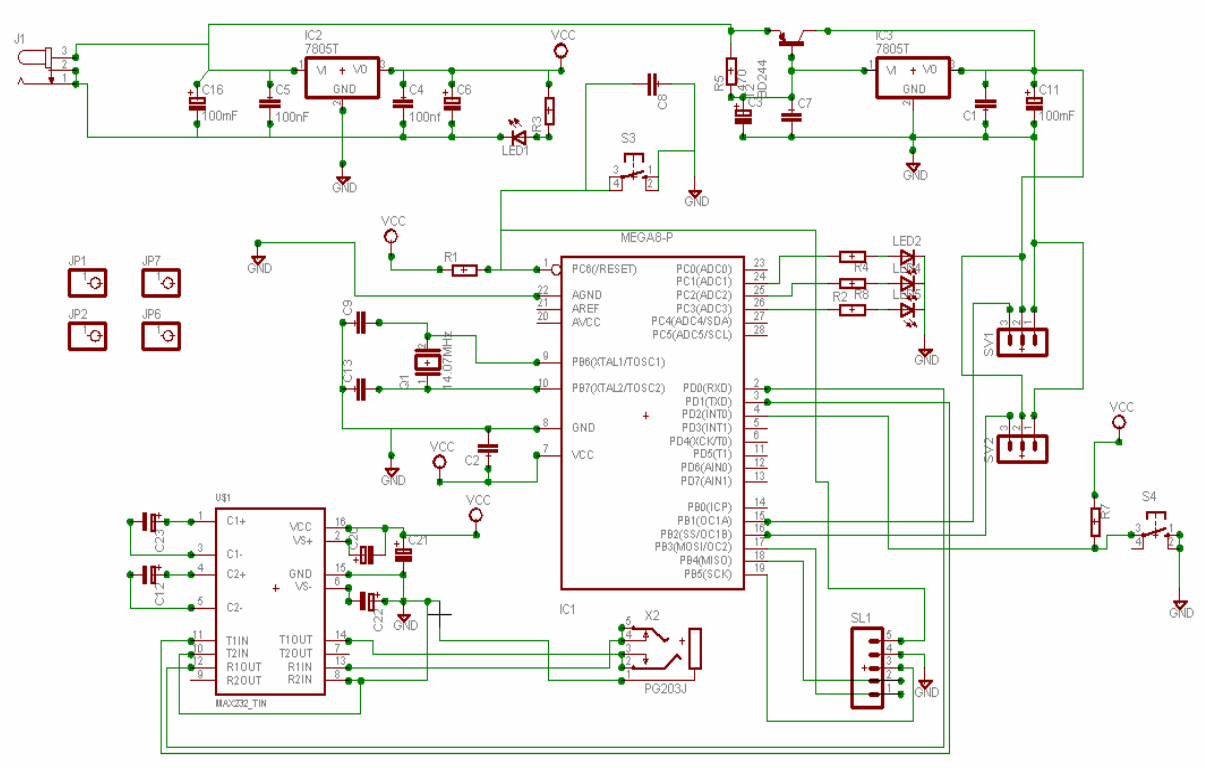


Figura 7.27. Schema electronică a plăcii de dezvoltare

Servomotorul transformă semnalul electronic de control în moment mecanic la cuplele motoare, moment necesar pentru poziționarea efectorului final al robotului. Acest proces are mai multe etape. Într-o primă fază, semnalul de intrare (semnal PWM) este analizat de circuitul de control.

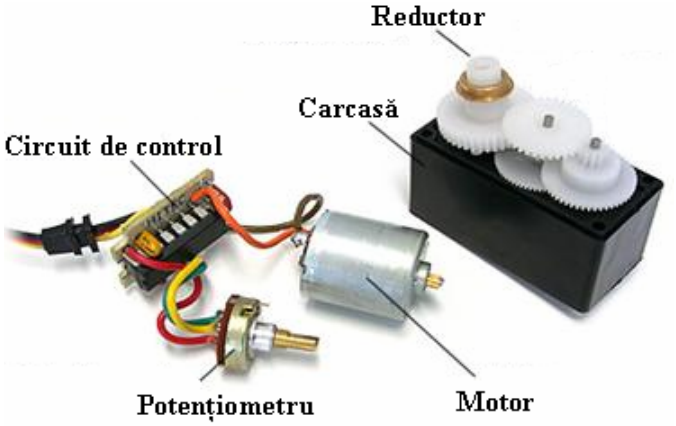


Figura 7.28. Structura servomotorului

La un interval de 20 de milisecunde, circuitul de control compară poziția unghiulară a axului servomotorului cu valoarea impusă (unghiul dorit), unghi dat de factorul de umplere al semnalului PWM. În funcție de valoarea obținută, circuitul de control va alimenta motorul de curent continuu cu o tensiune care să determine rotirea axului servomotorului în vederea

anulării diferenței dintre cele două valori. Reductorul montat pe axul servomotorului amplifică cuplul dezvoltat de acesta.

La dezvoltarea produsului final s-a avut în vedere modularizarea sistemului, pentru ca utilizatorul să poată interveni la fiecare modul al acestuia. Astfel, se pot dezvolta versiuni de software proprii, atât în ceea ce priveşte relația dintre interfață şi utilizator, cât şi în microcontroler, la nivelul programului de control. În plus, placa de dezvoltare poate fi utilizată în realizarea de noi aplicații.

7.6. Concluzii

O perspectivă transdisciplinară asupra mecatronicii implică o abordare integratoare a acesteia, la toate nivelurile de învățare. Dezvoltarea gândirii sistemice nu se poate face fără participarea studenților în toate etapele necesare realizării unui produs, începând cu faza de proiectare conceptuală şi sfârşind cu realizarea practică şi implementarea acestuia. Având în vedere atingerea acestui obiectiv, capitolul de față are un dublu scop: pe de-o parte, acela de a prezenta şi explicita etapele care trebuie parcurse pentru realizarea efectivă a unui robot plan cu două grade de libertate, în speță a unui mecanism pentalater, iar pe de altă parte acela de a evidenția rolul de suport educațional al acestui sistem, prin intermediul aplicațiilor lui în doemniul fizicii, matematicii şi informaticii. Cercetările experimentale prezentate au avut în vedere elaborarea unui chit de aplicații în studiul fizicii, matematicii şi informaticii ale platformei mecatronice pentru educație tehnologică, componentă a laboratorului portabil de mecatronică, brevetat de către colectivul Catedrei de Mecanisme, Mecanică Fină şi Mecatronică a UTC-N.

În prima fază, după ce s-a prezentat structura platformei – interfața cu utilizatorul, placa electronică de dezvoltare şi robotul paralel plan –, s-a trecut la prima etapă: modelarea sistemului. Modelarea a debutat cu analiza cinematică a robotului, care presupune rezolvarea problemei cinematice directe şi a problemei cinematice inverse. În continuare, după ce s-a determinat forma şi aria spațiului de lucru prin intermediul unei aplicații software, a fost prezentată analiza dinamică a robotului. Modelul dinamic a fost realizat pe baza ecuațiilor Newton-Euler, utilizând mediul Matlab-Simulink cu toolbox-ul SimMechanics. Pentru a vizualiza comportarea robotului a fost dezvoltat modelul virtual al acestuia, cu ajutorul toolbox-ului *Virtual Reality* din Matlab. Ultimul stadiu al modelării a fost acela în care s-a realizat simularea şi optimizarea parametrilor acestuia. Optimizarea parametrilor controlerului s-a făcut utilizând blocul Signal Constraints, ecuațiile au fost introduse utilizând blocul *Embedded Function* al mediului Simulink, iar comenzile au fost transmise în limbajul m, specific mediului Matlab.

A doua etapă a vizat testarea sistemului folosind tehnologia de prototipare rapidă a controlului. Pentru acționarea robotului s-au folosit două servomotoare FS251S, a căror placă de control a fost înlocuită cu placa dSpace. Controlul a fost asigurat prin placa de control în timp real DS1104. Pentru determinarea poziției unghiulare s-au folosit doi senzori rezistivi de rotație, iar compilarea şi încărcarea modelului în placa de control s-a făcut prin comanda *Build Model* din meniul *Tools*, submeniul *Real Time Workshop*. Accesul la parametrii sistemului şi ai controlerului, în timpul testării, s-a realizat prin aplicația Control Desk.

Ultima etapă, implementarea sistemului, a vizat dezvoltarea produsului finit, ținând cont de rezultatele obținute pe parcursul modelării, simulării şi testării acestuia. Pentru aceasta a fost creată o interfață cu utilizatorul pe baza unei aplicații realizate în mediul de dezvoltare Delphi. Aplicația simulează comportarea robotului în funcție de comenzile introduse de utilizator şi permite afişarea poziției efectorului final şi a unghiurilor date ca referință pentru

cei doi actuatori. Introducerea datelor de către utilizator se poate face în trei moduri: modificarea poziției efectorului final în funcție de mişcările pe care le face mouse-ul în spațiul de lucru; urmărirea unei traiectorii predefinite (linie, cerc, elipsă); acționarea directă a celor două servomotoare. În ceea ce priveşte dezvoltarea produsului final, s-a urmărit modularizarea sistemului, pentru ca utilizatorul să poată interveni la fiecare modul, în vederea dezvoltării unor noi configurații hardware şi versiuni software adecvate.

7.7. Contribuții personale

Doctorandul a participat la elaborarea chitului pentru aplicații ale platformei mecatronice pentru educație tehnologică în studiul fizicii, matematicii şi informaticii, aducând contribuții majore în explicitarea etapelor privind conceperea, proiectarea şi realizarea acesteia, cu scopul utilizării cât mai eficiente a platformei pentru dezvoltarea şi implementarea tehnologiilor educaționale moderne

Câteva dintre contribuțiile personale se referă la:

- sublinieri şi explicitări privind importanța dezvoltării gândirii sistemice, integratoare, pentru stimularea inițiativei şi creativității;
- explicitări privind potențialul educațional al platformei mecatronice portabile, prin facilitățile create pentru efectuarea experimentului oriunde şi oricând, precum şi prin dezvoltarea aplicațiilor la diferite discipline, care să faciliteze şi deopotrivă să stimuleze materializarea principiilor educației mecatronice integrale;
- evidențierea şi exemplificarea rolului modelelor (fizice şi matematice), al modelării şi programării, în parcurgerea etapelor privind realizarea unor produse şi sisteme mecatronice;
- explicitarea şi exemplificarea modalităților de materializare a conceptelor de: *rigid*, *legătură*, *lege de mişcare*, *legătură informațională*, *lanț cinematic informațional*, *proiectare integrată*, *proiectare pentru control* etc.;
- explicitări şi exemplificări privind conceptele de *flexibilitate*, *reconfigurabilitate* şi *interfațare* în funcționarea sistemelor mecatronice;
- analiza şi detalierea modalităților de integrare hardware şi software a componentelor din structura platformei mecatronice. Astfel, în structura mecanismului pentalater, cuplele cinematice realizează integrarea prin constrângere, iar corelarea mişcării celor două motoare, pentru a realiza legile de mişcare dorite, se asigură prin lanțul cinematic informațional (componentele hardware şi software din structura plăcii de dezvoltare, senzorii de pe axele motoarelor etc.).

CAPITOLUL 8

CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII

8.1. Concluzii generale

Mecatronica, datorită caracterului său sinergic şi integrator, poate constitui punctul de pornire al unui proces de reconfigurare a educației tehnologice prin articularea unei noi paradigme educaționale care să permită formarea unei gândiri flexibile, creatoare, inovatoare a elevilor şi studenților. Pe de altă parte, faptul că însăşi apariția mecatronicii a fost posibilă datorită evidențierii unor corelații noi, a unor punți între discipline ce păreau separate, este relevant în ceea ce priveşte acordul existent între natura profundă a mecatronicii şi finalitatea viziunii transdisciplinare a lui Basarab Nicolescu: înțelegerea lumii prin unitatea cunoaşterii.

Pornind de la această realitate, a fost propusă, prin intermediul prezentei lucrări, o perspectivă transdisciplinară asupra mecatronicii. S-a argumentat că, întrucât identitatea mecatronicii este fundamentată pe conceptul thematic de complexitate, concept care reprezintă una dintre fațetele unei idei-simbol, mecatronica este un domeniu deschis, a cărei identitate este trans-tematică.

Mecatronica răspunde exigențelor raportului Delors, care evidențiază necesitatea unei educații integrale a fiecărei ființe umane, reprezentând un excelent suport pentru acest tip de educație. În sprijinul acestei idei s-a propus modelul hexagonal pentru educație mecatronică integrală, care relevă non-separabilitatea unor aspecte ale mecatronicii care păreau contradictorii. Cercetările dezvoltate în vederea prezentării unei perspective transdisciplinare coerente şi riguroase asupra mecatronicii s-au concretizat în mai multe contribuții personale, care vor fi prezentate în continuare.

8.2. Contribuții personale. Valorificarea rezultatelor cercetării

Principalele contribuții care se regăsesc în prezenta teză sunt:

- conturarea semnificațiilor unor noțiuni utile în contextul abordării propuse (*non-separabilitate*, *abordare sistemică*, *unitatea cunoaşterii*, *complementaritate*), precum şi a corelațiilor existente între acestea;
- prezentarea unei perspective integratoare proprii, prin care s-a demonstrat ideea potrivit căreia convergența mecanicii cuantice cu teoria sistemelor se asigură prin intermediul teoriei bootstrap-ului şi al complexității;

- evidențierea armoniei existente între metodologia transdisciplinară şi modelele russelliene, respectiv tarskiene, ale nivelurilor, unele concepte specifice mecanicii cuantice şi logica trivalentă a lui Ştefan Lupaşcu, întemeiată pe principiul terțului inclus;
- enunțarea şi argumentarea ideii potrivit căreia, tot aşa cum paradoxurile logice şi semantice pot fi evitate folosind teoria nivelurilor russelliene, respectiv tarskiene, contradicțiile mecanicii cuantice pot fi conciliate folosind un model structurat pe niveluri de Realitate;
- demonstrarea faptului că, abordată din perspectiva transdisciplinarității, mecatronica favorizează conturarea unei noi viziuni educaționale, întrucât caracterul integrator, sinergic al mecatronicii, care s-a manifestat prin apariția de noi punți între discipline aparent separate, este în acord cu finalitatea viziunii transdisciplinare: înțelegerea lumii prin unitatea cunoaşterii;
- fundamentarea unei abordări interdisciplinare proprii a conceptului de *informație*, prin utilizarea entropiei statistice, a entropiei informaționale şi a entropiei sociale;
- formularea şi argumentarea faptului că principala caracteristică a sistemelelor vii nu este ordinea, ci existența structurilor complexe, adică a aranjamentelor caracterizate de specificitate, aperiodicitate şi asimetrie;
- enunțarea concluziei potrivit căreia – pornind de la faptul că un sistem organizat dispune de un conținut informațional incomparabil mai mare față de un sistem care e doar ordonat – complexitatea e o consecință a organizării şi structurării mai degrabă decât a ordinii;
- sistematizarea explicațiilor şi precizărilor legate de structura şi funcționarea pompelor ionice, prin care s-au evidențiat similitudinile existente între sistemele mecatronice şi cele ale lumii vii în ceea ce priveşte utilizarea inteligentă a informației în vederea organizării la nivelul sistemului;
- evidențierea caracterului interdisciplinar al noțiunii de *autoorganizare*, prin prezentarea similitudinilor dintre autoorganizarea unor sisteme care constituie obiecte de studiu ale unor discipline diferite: reacții chimice (modelul Brusselator, reacții chimice descrise de mecanismul Lotka-Voltera), reacții metabolice (reacții oscilante în lanțul glicolitic), sisteme deschise din lumea vie (amibele acrasiale, termitele *Macrotermes subhyalinus*, furnicile *Leptothorax albipennis*, furnicile *Messor Sancta*), fizică (Celulele Bénard), sisteme mecatronice (autoorganizarea homeokinetică a comportamentului unui robot, autoorganizarea stigmergică a unui sistem mecatronic multiagent);
- stabilirea unor punți între următoarele domenii: mecatronică, termodinamica neliniară, teoria sistemelor, cibernetică;
- nuanțarea semnificațiilor unor concepte de bază din teoria sistemelor, cibernetică şi inteligența artificială: *emergență*, *complexitate*, *sinergie*, *sinergetică*, *inteligență swarm*, *stigmergie*;
- evidențierea caracterului transdisciplinar al conceptului de *homeokinesis*, prin formularea şi argumentarea ideii potrivit căreia funcționarea optimă a sistemului mecatronic se realizează atunci când antagonismul actualizare-potențializare, respectiv omogenizare-eterogenizare e maxim, situație care corespunde, pe de-o parte, regimului dinamic atins de sistemul mecatronic prin autoorganizarea homeokinetică, iar pe de altă parte, stării T a epistemologiei lupasciene, concept de referință al metodologiei transdisciplinare a lui Basarab Nicolescu;
- argumentarea faptului că identitatea mecatronicii, fundamentată pe conceptul

thematic de complexitate, este *trans-tematică*;

- justificarea statutului de *domeniu deschis* care poate fi atribuit mecatronicii, întrucât identitatea sa e legată de o idee-simbol: principiul bootstrap-ului, care concepe natura ca pe o entitate globală, non-separabilă la nivel fundamental;
- fundamentarea *modelului hexagonal pentru educație mecatronică integrală*, care armonizează aspecte ale mecatronicii ce păreau alternative ireconciliabile: legitimitate formală/legitimitate funcțională, selecție orizontală/selecție verticală, comunicare activă/comunicare interactivă;
- prezentarea unei modalități concrete de stimulare a inventivității, creativității şi flexibilității elevilor, precum şi a muncii în echipă: Concursul de fizică şi inventică Irenaeus, la care doctorandul a participat în calitate de organizator, autor de probleme, profesor pregătitor pentru elevi şi membru al Comisiei de Evaluare;
- detalierea funcționării unor exemple concrete de senzori şi actuatori, care pot reprezenta noi extinderi ale aplicațiilor conținuturilor cuprinse în programele de fizică la nivel liceal şi gimnazial;
- evidențierea caracterului interdisciplinar al aplicațiilor propuse, prin prezentarea modului în care conceptele, legile şi fenomenele fizicii stau la baza funcționării senzorilor şi actuatorilor, componente de bază ale sistemelor mecatronice complexe;
- articularea unei abordări informaționale proprii a funcționării senzorilor şi actuatorilor, pornind de la noțiunea de *purtător de informație*;
- prezentarea modului în care rolul informației în funcționarea sistemelor mecatronice complexe impune extinderea conceptului clasic de *legătură* prin introducerea noțiunilor de *cuplă cinematică informațională* şi *lanț cinematic informațional*;
- utilizarea unor reprezentări grafice sugestive originale, pentru a ilustra principalele idei ale tezei;
- sublinieri şi explicitări privind importanța dezvoltării gândirii sistemice, integratoare, pentru stimularea inițiativei şi creativității;
- explicitări privind potențialul educațional al platformei mecatronice portabile, prin facilitățile create pentru efectuarea experimentului oriunde şi oricând, precum şi prin dezvoltarea aplicațiilor la diferite discipline, care să faciliteze şi deopotrivă să stimuleze materializarea principiilor educației mecatronice integrale;
- evidențierea şi exemplificarea rolului modelelor (fizice şi matematice), al modelării şi al programării, în parcurgerea etapelor privind realizarea unor produse şi sisteme mecatronice;
- explicitarea şi exemplificarea modalităților de materializare a conceptelor de: *rigid*, *legătură*, *lege de mişcare*, *legătură informațională*, *lanț cinematic informațional*, *proiectare integrată*, *proiectare pentru control* etc.;
- explicitări şi exemplificări privind conceptele de *flexibilitate*, *reconfigurabilitate* şi *interfațare* în funcționarea sistemelor mecatronice;
- analiza şi detalierea modalităților de integrare hardware şi software a componentelor din structura platformei mecatronice. Astfel, în structura mecanismului pentalater, cuplele cinematice realizează integrarea prin constrângere, iar corelarea mişcării celor două motoare, pentru a realiza legile de mişcare dorite, se asigură prin lanțul cinematic informațional (componentele hardware şi software din structura plăcii de dezvoltare, senzorii de pe axele motoarelor etc.).

Cercetările realizate în vederea realizării tezei au fost valorificate prin:

- publicarea a 9 lucrări ştiinţifice, dintre care 5 ca prim autor, în cadrul unor manifestări ştiinţifice naţionale şi internaţionale: [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21], [22], [26].
- participarea doctorandului la Concursul de fizică şi inventică Irenaeus, în calitate de organizator, autor de probleme, profesor pregătitor pentru elevi şi membru al Comisiei de Evaluare.
- participarea doctorandului la elaborarea chitului pentru aplicaţii ale platformei mecatronice pentru educaţie tehnologică în studiul fizicii, matematicii şi informaticii, concretizată prin contribuţii majore în explicitarea etapelor privind conceperea, proiectarea şi realizarea acesteia, cu scopul folosirii cât mai eficiente a platformei în activităţile educaţionale.

8.3. Noi direcţii de cercetare în domeniu

Rezultatele cercetării teoretice, didactice şi experimentale reprezintă deschideri către noi investigaţii în domeniul tehnologiei şi educaţiei mecatronice. Aceste deschideri sunt justificate deopotrivă de potenţialul creator al metodologiei transdisciplinare şi de statutul de domeniu deschis care poate fi atribuit mecatronicii.

Câteva dintre aceste deschideri sunt:

- dezvoltarea la nivel conceptual a modelului hexagonal pentru educaţie mecatronică integrală şi validarea acestuia prin organizarea unor competiţii de proiecte şi produse mecatronice;
- cercetarea şi definirea unor noi deschideri privind extinderea conţinuturilor programelor disciplinelor din aria curriculară matematică şi ştiinţe ale naturii, prin integrarea unor aplicaţii moderne ale principiilor, legilor şi fenomenelor fizicii, chimiei şi biologiei în mecatronică şi biomecatronică;
- cercetarea, dezvoltarea şi implementarea tehnologiilor educaţionale interactive pe platforme mecatronice şi exploatarea potenţialului inovator al laboratorului portabil şi al laboratorului regional multifuncţional de mecatronică, în promovarea dialogului ştiinţă-societate.

După cum s-a dovedit şi prin intermediul prezentei teze, mecatronica poate furniza atât mijloacele conceptuale cât şi pe cele aplicative în vederea fundamentării unor studii suplimentare pornind de la deschiderile menţionate.

BIBLIOGRAFIE

[1] ALUȚEI, A., MĂTIEŞ, V., TĂTAR, O., 2009, Platformă mecatronică pentru studiul aplicațiilor cu agenți autonomi mobili, Conferința Națională de Educație Tehnologică şi Tehnologii Educaționale, Cluj-Napoca, pag. 364-379.

[2] ARISTOTEL, 1961, Organon, vol. III, Editura Ştiințifică, Bucureşti.

[3] ARISTOTEL, 1996, Metafizica, Editura IRI, Bucureşti.

[4] ARISTOTEL, 2005, Despre interpretare, Editura Humanitas, Bucureşti.

[5] ARKIN, R., 1998, Behaviour-Based Robotics, MIT Press, Cambridge.

[6] ASHBY, W., 1960, Design for a Brain: The Origin of Adaptive Behaviour, Chapman and Hall, London.

[7] ATKINS, P.W., 1996, Tratat de chimie fizică, Editura Tehnică, Bucureşti.

[8] BACHELARD, G., 1934, Le nouvelle ésprit scientifique, Les Presses universitaires de France, Paris.

[9] BACON, F., 1957, Noul Organon, Editura Academiei RSR, Bucureşti.

[10] BAILEY, K., 1990, Social Entropy Theory, State University of New York Press, New York.

[11] BALCH, T., 2000, Hierarchic Social Entropy: An Informational Theoretic Measure of Robot Group Diversity. Autonomous Robot, vol. 8, nr. 3, pag. 209-237.

[12] BECKERS, R., HOLLAND, O.E., DENEUBOURG, J.L., 1994, From local actions to global tasks: Stigmergy and collective robotics, în Brooks, R., Maes, P. (ed.), Proceedings of the 4th Workshop on Artificial Life, pag. 181–189, Cambridge, MIT Press.

[13] BENI, G., WANG, J., 1989, Swarm Intelligence in Cellular Robotics Systems, Proceedings of NATO Advanced Workshop on Robots and Biological System, Tuscany, Italy, pag. 26-30.

[14] BENI, G., WANG, J., 1989, Swarm intelligence, Proceedings of the Seventh Annual Meeting of the Robotics Society of Japan, Tokyo, Japan, pag. 425-428.

[15] **BERIAN S**., MĂTIEŞ, V., 2007, Integrative Valencies of the Transdisciplinary Approach, Proceedings of the International Scientific Conference "Interdisciplinarity in Engineering", Inter-Ing 2007, Târgu Mureş, vol. 3 nr. 5, pag.1-8.

[16] **BERIAN S**., MĂTIEŞ, V., 2008, Considerations Regarding the Process of Stigmergic Self-Organization in the Functioning of Mechatronical Systems, Scientific Bulletin of the "Politehnica" Institute of Timişoara, vol. 53, nr. 67, pag. 219-224.

[17] **BERIAN, S**., MĂTIEŞ, V., 2009, Aspecte privind rolul informației în organizarea şi autoorganizarea sistemelor mecatronice complexe, Lucrările Conferinței Naționale de Educație Tehnologică şi Tehnologii Educaționale, Cluj-Napoca, pag. 549-561.

[18] **BERIAN, S**., MĂTIEŞ, V., 2009, Considerations Regarding the Transdisciplinary Nature of the *Homeokinesis* Concept, as a Result of its Integration in the Theory of Complex Mechatronical Systems, Proceedings of the 10th IFToMM International Symposium on Science of Mechanisms and Machines - SYROM'2009, Braşov, pag. 679-686.

[19] **BERIAN, S**., MĂTIEŞ, V., 2009, The Trans-Thematic Identity of Mechatronics, Proceedings of the 4th edition of the Interdisciplinarity in Engineering International Conference, Târgu Mureş, 2009.
[20] **BERIAN, S**., **Referat nr. 1**, Stadiul actual al cercetărilor în domeniu, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, iunie 2008.
[21] **BERIAN, S**., **Referat nr. 2**, Contribuții privind modelarea şi simularea proceselor de integrare în mecatronică, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, noiembrie 2008.
[22] **BERIAN, S**., **Referat nr. 3**, Cercetări numerice şi experimentale, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, martie 2009.
[23] BERTALANFFY, L., 1969, General System Theory, George Braziller, New-York.
[24] BIRKHOFF, G., NEUMANN, J., 1936, The Logic of Quantum Mechanics, Annals of Mathematics, Princeton University Press, vol. XXXVI, Princeton, U.S.A.
[25] BISHOP, R.H., 2005, Mechatronics: An Introduction, CRC Press, New York.
[26] BOGDAN, K., **BERIAN, S**., 2008, Concursul de fizică şi inventică Károly József Irenaeus, Editura Didactică Militans, Oradea.
[27] BOHM, D., 1995, Plenitudinea lumii şi ordinea ei, Editura Humanitas, Bucureşti.
[28] BOLTON, W., 2003, Mechatronics, Prentice Hall, New Jersey.
[29] BONABEAU, E., DORIGO, M., THÉRAULAZ, G., 1999, Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems, Santa Fe Institute in the Sciences of the Complexity, Oxford University Press, New York.
[30] BONABEAU, E., THERAULAZ, G., DENEUBOURG, J.L., CAMAZINE, S., 1997, Self-organization in Social Insects, Trends in Ecology & Evolution, vol. 12, nr. 5. pag. 188-193.
[31] BONABEAU, E., THERAULAZ, G., DENEUBOURG, J.L., FRANKS, N.R., RAFELSBERGER, O., JOLY, J.-L., BLANCO, S., 1998, A Model for the Emergence of Pillars, Walls and Royal Chambers in Termite Nests, Philosophical Transactions of the Royal Society of London B., vol. 353, nr. 1375, pag. 1561-1576.
[32] BONABEAU, E., THERAULAZ, G., FOURCASSIÉ, V., DENEUBOURG, J.L., 1998, Phase-ordering Kinetics of Cemetery Organisation in Ants, Physical Review E, vol. 57, nr. 4, pag. 4568- 4571.
[33] BORN, M., Fizica atomică,1973, Editura Ştiinţifică, Bucureşti.
[34] BOSCHETTI, F., PROKOPENKO, M., MACREADIE, I., GRISOGONO, A.M., 2005, Defining and Detecting Emergence in Complex Networks, în Khosla, R., Howlett, R.J., Jain, L.C. (ed.), Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, Proceedings of the 9th International Conference, KES 2005, Melbourne, Australia, Part IV, vol. 3684 of Lecture Notes in Computer Science, pag. 573-580.
[35] BOTEZATU, P., 1973, Semiotică şi negaţie, Editura Junimea, Iaşi.
[36] BOYER, C., 1959, The History of the Calculus and Its Conceptual Developement, Dover, New York.
[37] BRAUER, J., 2006, Magnetic Actuators and Sensors, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey.
[38] BROGLIE, L., 1980, Certitudinile şi incertitudinile ştiinţei, Editura Politică, Bucureşti.
[39] BRUINSMA, O.H., 1979, An Analysis of Building Behaviour of the Termite Macrotemes Subhyalinus, Ph.D. Thesis, Landbouwhogeschool, Wageningen, Netherlands.
[40] BYRNE, D., 1998, Complexity Theory and the Social Sciences, Routledge, London.
[41] CAMAZINE, S., DENEUBOURG, J., FRANKS, N., SNEYD, J., THERAULAZ, G., BONABEAU, E., 2001, Self-Organization in Biological Systems, Princeton University Press. Princeton, New Jersey.

[42] CAMPBELL, D.T., 1974, "Downward Causation" in Hierarchically Organized Biological System. Studies in the Philosophy of Biology, în Ayala, F.J., Dobzhansky, T. (ed.), Studies in the Philosophy of Biology, Macmillan, New York, pag. 179-186.
[43] CANNON, W.B., 1939, The Wisdom of the Body , Norton, New York.
[44] CARNAP, R., Semnificație și necesitate, 1972, Editura Dacia, Cluj-Napoca.
[45] CASTELLANO**,** C., FORTUNATO, S., LORETTO, V., 2009, Statistical Physics of Social Dynamics, Reviews of Modern Physics, vol. 81, nr. 2, pag. 591-646.
[46] CASTI, J.L., 1997, Would-be Worlds: How Simulation is Changing the Frontiers of Science, John Wiley & Sons, New York.
[47] CHO, H., 2006, Optomechatronics: Fusion of Optical and Mechatronic Engineering, CRC Press, London.
[48] CHURCH, A., 1956, Introduction to Mathematical Logic, Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
[49] CORNING, P.A., 2002, The Re-Emergence of "Emergence": A Venerable Concept in Search of a Theory*,* Complexity, vol. 7, nr. 6, pag. 18-30.
[50] CORNING, P.A., 2003, Nature's Magic: Synergy in Evolution and the Fate of Humankind, Cambridge University Press, Cambridge.
[51] CRAIG, K., 2001, Is Anything Really New in Mechatronics Education?, IEEE Robotics and Automation Magazine, vol. 8 **,** nr. 2, pag. 12–19.
[52] CUILENBURG, J.J., SCHOLTEN, O., NOOMEN, G.W., 2000, Ştiința comunicării, Editura Humanitas, București.
[53] DELORS, J., 2000, Comoara lăuntrică. Raportul UNESCO al Comisiei Internaționale pentru Educație în secolul XXI, Editura Polirom, Iași.
[54] DENEUBOURG, J.L., GOSS, S. FRANKS, N., SENDOVA-FRANKS, A., DETRAIN, C., CHRÉTIEN, L.,1991, The Dynamics of Collective Sorting: Robot-Like Ants and Ant-Like Robots, în Meyer, J.A., Wilson, S.W. (ed.), Simulation of Adaptive Behaviour; From Animals to Animats, pag. 356-363, MIT Press, Cambridge.
[55] DENNETT, D., 2000, Making Tools for Thinking, în Sperber, D. (ed.), Metarepresentation, Oxford University Press, New York.
[56] DER, R., HESSE, F., LIEBSCHER, R., 2004, Self-organized Exploration and Automatic Sensor Integration from the Homeokinetic Principle, Proceedings of Workshop on SOAVE'04, Düsseldorf, Fortschritt-Berichte VDI, vol. 10, nr. 743, pag. 220-230.
[57] DER, R., HESSE, F., MARTIUS, G., 2006, Rocking Stamper and Jumping Snake from a Dynamical System Approach to Artificial Life, Adaptive Behavior, vol. 14, nr. 2, pag. 105-115.
[58] DER, R., LIEBSCHER, R., 2002, True Autonomy from Self-organized Adaptivity, Proceedings Workshop Biologically Inspired Robotics, Bristol.
[59] DER, R., PANTZER, T., 2000, Emergent Robot Behavior from the Principle of Homeokinesis, Proceedings of Workshop on SOAVE' 2000, Ilmenau, Fortschritt-Berichte VDI, vol. 10, nr. 643, pag. 39-46.
[60] DER, R., STEINMETZ, U., PASEMANN, F., 1999, Homeokinesis - a new Principle to Back Up Evolution with Learning, Computational Intelligence for Modelling, Control, and Automation, volume 55 of Concurrent Systems Engineering Series, IOS Press, Amsterdam, pag. 43–47.
[61] DESCARTES, R., 1964, Regulae ad directionem ingenii, Editura Ştiințifică, București.
[62] DESCARTES, R., 1993, Meditații metafizice, Editura Crater, București.
[63] DESCARTES, R., 1999, Discurs asupra metodei, Editura Mondero, București.
[64] DESCARTES, R., 2000, Principiile filosofiei, Scrisoare-prefață, Editura IRI, București.

[65] DI PAOLO, E., 2003, Organismically-Inspired Robotics: Homeostatic Adaptation and Natural Teleology Beyond the Closed Sensorimotor Loop, în Murase, K., Asakura, T. (ed.), Dynamical System Aproach to Embodiment and Sociality, Advanced Knowledge International, Adelaide, Australia, pag. 19-42.
[66] DOPPLET, Y, 2005, Assessment of Project-Based Learning in a Mechatronic Context, Journal of Engineering Technology, vol. 16, nr. 2, pag. 7-14.
[67] DORIGO, M., BORNABEAU, E., THERAULAZ G., 2000, Ant Algorithms and Stigmergy, Future Generation Computers Systems, vol. 16, nr. 9, pag. 851-871.
[68] DUMITRIU, A., 1941, Logica lui D. Hilbert, Revista Fundațiilor Regale, Bucureşti.
[69] DUMITRIU, A., 1968, Mecanismul logic al matematicilor, Editura Academiei RSR, Bucureşti.
[70] DUMITRIU, A.,1969, Istoria logicii, Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti.
[71] DUMITRIU, A.,1986, Eseuri, Editura Eminescu, Bucureşti.
[72] DUNCAN, T., 1982, Physics: A Textbook for Advanced Level Students, John Murray, London.
[73] ENESCU, G., 1967, Logică şi adevăr, Editura Politică, Bucureşti.
[74] ENESCU, G., 1973, Filozofie şi logică, Editura Ştiințifică, Bucureşti.
[75] ENESCU, G., 2003, Paradoxuri, sofisme, aporii, Editura Tehnică, Bucureşti.
[76] ERKMEN, A.M., TSUBOUCHI, T., MURPHY, R., 2001, Mechatronics education, IEEE Robotics and Automation Magazine, vol. 8, nr. 2, pag. 4.
[77] FÉVRIER, P., 1937, Les relation d'incertitude d'Heisenbeg et la logique, Travaux de IX-e Congrès International de Philosophie, VI, Paris.
[78] FEYNMAN, R.P., 1970, Fizica modernă, Editura Tehnică, Bucureşti.
[79] FLAKE, G.W., 1998, The Computational Beauty of Nature: Computer Explorations of Fractals, Chaos, Complex Systems, and Adaptation, MIT Press, Cambridge.
[80] FLEISCHER, M., 2003, Foundation of Swarm Intelligence: From Principle to Practice, Technical Research Report TR-2003-10, Institute for Systems Research, University of Maryland, College Park, Maryland.
[81] FLOOD, R.L., CARSON, E.R., 1993, Dealing with Complexity: An Introduction to the Theory and Application of Systems Science, Plenum Press, New York.
[82] FÖSTER, H., 1960, On Self-organizing Systems and Their Environments, în Yovitz, L., Cameron, S. (ed.), Self-organizing Systems, Pergamon Press, New York, pag. 31-50.
[83] FRANKS, N.R., DENEUBOURG, J.L., 1997, Self-organizing Nest Construction in Ants: Individual Worker Behaviour and the Nest's Dynamics, Animal Behaviour, vol. 54, pag. 779-796.
[84] FRANKS, N.R., SENDOVA-FRANKS, A.B., 1992, Brood Sorting by Ants: Distributing the Workload Over the Work-Surface, Behavioral Ecology and Sociobiology, vol. 30, nr. 2., pag. 109-123.
[85] FREGE, G., 1977, Scrieri logico-filosofice, vol.I, Studiu introductiv de Sorin Vieru, Editura Ştiințifică şi Enciclopedică, Bucureşti.
[86] FUNKESTEIN, A., 1998, Teologie şi imaginație ştiințifică, Editura Humanitas, Bucureşti.
[87] FÜRST, M., TRINKS, J., 1997, Manual de filozofie, Editura Humanitas, Bucureşti.
[88] GERSHENSON, C., 2007, Design and Control of Self-organizing Systems, CopyIt ArXives, Mexico City.
[89] GERSHENSON, C., HEYLIGHEN, F., 2005, How Can We Think the Complex? în: Richardson, K.A. (ed.), Managing Organizational Complexity: Philosophy, Theory and Application, Information Age Publishing, Greenwich, pag. 47-62.

[90] GIBBS, J.W., 1902, Elementary Principles of Statistical Mechanics, Yale University Press, New Haven.
[91] GLANSDORFF, P., PRIGOGINE, I., 1971, Thermodinamics Theory of Structure, Stability and Fluctuation, Wiley-Interscience, New York.
[92] GOLDBETER, A., 2006, Oscillations and Waves of Cyclic AMP in *Dictyostelium*: A Prototype for Spatio-Temporal Organization and Pulsatile Intercellular Communication, Bulletin of Mathematical Biology, vol. 68, nr. 5, pag. 1095-1109, Springer, New York.
[93] GOLDBETER, A., BERRIDGE, M.J., 1997, Biochemical Oscillations and Cellular Rhythms: The Molecular Bases of Periodic and Chaotic Behaviour, Cambridge University Press, Cambridge.
[94] GOLDBETER, A., NICOLIS, G., 1976, An Allosteric Enzime Model with Positive Feedback Applied to Glyolytic Oscillations, în Snell, F., Rosen, R., Progress in Theoretical Biology, vol. 4, Academic Press, New York, pag. 65-160.
[95] GOLDSTEIN, J., 1999, Emergence as a Construct: History and Issues, Emergence: A Journal of Complexity Issues in Organizations and Management, vol. 1, nr. 1, pag. 49-72.
[96] GRAHAM, R., WUNDERLIN, A., ENGLUND J.C., 1989, Applied Optics, vol. 28, nr. 12, pag. 2182.
[97] GRASSÉ, P.P., 1959, La reconstruction de nid et les coordinations interindividuelles chez bellicositermes natalensis et cubitermes sp. la theorie de la stigmergie: Essai d'interpretation des termites constructeurs, Insectes sociaux, vol. 6, nr. 1, pag. 41-83.
[98] GRAY, W. (ed.), 1973, Unity Through Diversity. A Festschrift for Ludwig von Bertalanffy, Gordon and Breach, New York.
[99] GRIMHEDEN, M., 2006, Mechatronics Engineering Education. Doctoral Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
[100] GRIMHEDEN, M., HANSON, M., 2003, How Might Education in Mechatronics Benefit from PBL, Proceedings of the 4th International Workshop on Education in Mechatronics, pag. 211-218.
[101] HAKEN, H., 1983, Synergetics: An Introduction. Nonequilibrium Phase Transitions and Self-organization in Physics, Chemistry and Biology, Springer Verlag, Berlin.
[102] HAKEN, H., 1987, Synergetics, în Yates, E.F. (ed.), Self-organizing systems: The Emergence of Order, Plenum Press, New York.
[103] HAKEN, H., 1996, Principles of Brain Functioning, Springer Verlag, Berlin.
[104] HAKEN, H., 2000, Information and Self-organization, Springer Verlag, Berlin.
[105] HANDRA-LUCA, V, 1983, Funcțiile de transmitere în studiul mecanismelor, Editura Academiei, Bucureşti.
[106] HARASHIMA, F., TOMIZUKA, M., FUKUDA, T., 1996, Mechatronics–What Is It, Why, and How?, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 1, nr. 1, pag. 1-4.
[107] HARTLEY, R.V.L., 1928, Transmission of Information. Bell System Technical Journal, vol. 7, pag. 535-563.
[108] HEISENBERG, W., 1971, Physique et philosophie, Éd. Albin Michel, Paris.
[109] HEISENBERG, W., 1977, Paşi peste granițe, Editura Politică, București.
[110] HERSCH, J., 1997, Mirarea filozofică. Istoria filozofiei europene, Editura Humanitas, Bucureşti.
[111] HESS, B., 1979, The Glycolityc Oscillator, Journal of Experimental Biology, vol. 81, nr. 1, pag. 7-14.
[112] HESS, B., BITEUX, A., KRÜGER, L., 1969, Cooperation of Glyolytic Enzymes, în Advances in Enzyme Regulation, vol. 7, Pergamon Press, New York, pag. 149-167.

[113] HESS, B., GOLDBETER, A., LEFEVER, R., 1978, Temporal, Spatial and Functional Order in Regulated Boichemical Cellular System, Advances in Chemical Physics, vol. 38, Wiley & Sons, New York, pag. 363-413.
[114] HESSE, F., DER, R., HERRMANN, J.M., 2007, Reflexes from Self-organizing Control in Autonomous Robots, în Berthouze, L., Prince, C.G., Littman, M., Kozima, H., Balkenius, K. (ed.), 7th International Conference on Epigenetic Robotics: Modelling Cognitive Development in Robotic Systems, Rutgers University, Piscataway, NJ, Lund University, pag. 37-44.
[115] HEYLIGHEN, F., 1989, Self-organization, Emergence and the Architecture of Complexity, in Proceedings of the 1st European Conference on System Science (AFCET, Paris), pag. 23-32.
[116] HEYLIGHEN, F., 1990, Classical and Non-classical Representations in Physics I, Cybernetics and Systems, vol. 21, nr. 4, pag. 423-444.
[117] HEYLIGHEN, F., 1990, Representation and Change. A Metarepresentational Framework for the Foundations of Physical and Cognitive Science, Communication and Cognition, Phd. Thesis, Gent, Belgium.
[118] HEYLIGHEN, F., 2001, The Science of Self-organization and Adaptivity, în Kiel, L.D. (ed.), Knowledge Management, Organizational Intelligence and Learning and Complexity, în The Encyclopedia of Life Support Systems, Eolss Publishers, Oxford, U.K.
[119] HEYLIGHEN, F., 2007, Why is Open Source Development so Successful? Stigmergic Organization and the Economics of Information**,** în Lutterbeck, B., Baerwolff, M., Gehring, R.A. (ed.), Open Source Jahrbuch 2007, Lehmanns Media, pag. 165-180.
[120] HEYLIGHEN, F., CILLIERS, P., GERSHENSON, C., 2007, Complexity and Philosophy, în Bogg, J., Geyer, R. (ed.), Complexity, Science and Society, Radcliffe Publishing, Oxford, U.K.
[121] HOFKIRCHNER, W., 2005, Ludwig von Bertalanffy. Forerunner of Evolutionary Systems Theory, în Gu, J., Chroust, G. (ed.), The New Role of Systems Sciences For a Knowledge-based Society, Proceedings of the First World Congress of the International Federation for Systems Research, Kobe, Japan.
[122] HOFSTADTER, D.R., 1989, Gödel*,* Escher, Bach: An Eternal Golden Braid, Vintage Books, New York.
[123] HOLLAND, J.H., 1998, Emergence: From Chaos to Order, Addison-Wesley Publishing Company, New York.
[124] HOLLAND, O., 1996, Multi-agent Systems: Lessons from Social Insects and Collective Robotics, Coevolution and Learning in Multiagent Systems, în Adaptation, Coevolution and Learning in Multiagent Systems, Papers from the 1996 AAAI Spring Symposium, Menlo Park, CA: AAAI Press, pag. 57-62.
[125] HOLLAND, O., MELHUIS, C., 1999, Stigmergy, Self-organization and Sorting in Collective Robotics, Artificial Life, vol. 5, nr. 2, pag. 173-202.
[126] HOLTON, G., 1978, The Scientific Imagination: Case Studies, Cambridge University Press, Cambridge.
[127] HOWE, R.D., KONTARINIS, D.A., PEINE, W.J., 1995, Shape Memory Alloy Actuator Controller Design for Tactile Displays, Proceedings of the 34th IEEE Conference on Decision & Control, IEEE Press, New Orleans, U.S.A., vol. 4, pag. 3540-3544.
[128] HRISTEV, A., 1981, Mecanică şi acustică, Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti.
[129] HUME, D., 1987, Cercetare asupra intelectului omenesc, Editura Ştiințifică şi Enciclopedică, Bucureşti.

[130] HUME, D., 1990, Dialogues Concerning Natural Religion, Penguin Books, London.
[131] IACOB, I., 1998, Comunicarea didactică în psihopedagogie pentru examenele de definitivare şi grade didactice, Editura Polirom, Iaşi.
[132] IBERALL, A.S., 1997, Nonlinear Dynamics From a Physical Point of View, Ecological Psychology, vol. 9, nr. 3, pag. 223-244.
[133] JANOCHA, H. (ed.), 2004, Actuators. Basics and Applications, Springer, New York.
[134] JANOCHA, H. (ed.), 2007, Adaptronics and Smart Structures, Springer, New York.
[135] JAYNES, E.T., 1965, Gibbs versus Boltzmann Entropies, American Journal of Physics, vol. 33, nr. 5, pag. 391-398.
[136] JOSLYN, C., HEYLIGHEN F., 1999, Cybernetics, în Hemmendinger, D., Ralston, A., Reilly, E. (ed.), The Encyclopedia of Computer Science, Nature Publishing Group, London, pag. 470-473.
[137] KANT, I., 1987, Prolegomene, Editura Ştiinţifică, Bucureşti.
[138] KANT, I., 1994, Critica raţiunii pure, Editura IRI, Bucureşti.
[139] KAUFFMAN, S.A., 1995, At Home in the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity, Oxford University Press, New York.
[140] KAUFMANN, S.A., 2002, Investigations, Oxford University Press, New York
[141] KLIPP, E., HERWIG, R., KOWALD, A., WIERLING, C., LEHRACH, H., 2005, Systems Biology in Practice, Wiley-VCH, Berlin.
[142] KÖRNER, S., 1965, Introducere în filosofia matematicii, Editura Ştiinţifică, Bucureşti.
[143] KÖRNER, S., 1986, The Philosophy of Mathematics, Dover Publications, London.
[144] KRAMER, N.J.T.A., DE SMITH, J., 1977, Systems Thinking, Martinus Nijhoff Publishers, Leiden, The Netherlands.
[145] KUBAT, L., ZEMAN, J. (ed.), 1975, Entropy and Information in Science and Philosophy, Academia Publishing House, Prague, Czechoslovakia.
[146] KUHN, T.S., 1999, Structura revoluţiilor ştiinţifice, Humanitas, Bucureşti.
[147] LANGTON, C.G., 1990, Computation at the Edge of Chaos: Phase Transitions and Emergent Computation, Physica D, 42, nr. 1-3, pag. 12-37.
[148] LAPLACE, P.S., 1814, Essai philosophique sur les probabilités, Gauthier-Villars, Paris.
[149] LARSES, O., EL-KHOURY, J., 2005, Views on General System Theory, Technical Report TRITA-MMK 2005:10, Royal Institute of Technology, KTH, Stockholm, Sweden.
[150] LĂPUŞAN, P., 2006, Cercetări privind modelarea şi simularea sistemelor mecatronice, Lucrare de disertaţie, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca.
[151] LIAPUNOV, M.L., 1947, Problème général de la stabilité du mouvement, Annal of Mathematics Studies, vol. 17, Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
[152] LISSACK, M.R., 1999, Complexity: The Science, Its Vocabulary, and Its Relation to Organizations, Emergence vol. 1, nr. 1, pag. 58-62.
[153] LOCKE, J., 1961, Eseu asupra intelectului omenesc, Editura Ştiinţifică, Bucureşti.
[154] LUPAŞCU, Ş., 1940, L'éxpérience microphysique et la pensée humaine, Fundaţia pentru literatură şi artă „Regele Carol al II-lea", Bucureşti.
[155] LUPAŞCU, Ş., 1970, La tragédie de l'énergie, Tournai, Casterman.
[156] LUPAŞCU, Ş., 1982, Logica dinamică a contradictoriului, Editura Politică, Bucureşti.
[157] LURIE, D., VALLS, J., AND WAGENSBERG, J., 1983, Thermodynamic Approach to Biomass Distribution in Ecological Systems, Bulletin of Mathematical Biology, vol. 45, nr. 5, pag. 869-872.

[158] MANO, J.P., BOURJOT, C., LOPARDO, G., GLIZE, P., 2006, Bio-inspired Mechanisms for Artificial Self-organized Systems, Informatica Journal, vol. 30, pag. 55-62.
[159] MARCUS, S., 1984, Paradoxul, Editura Albatros, Bucureşti.
[160] MARTIUS, G., HERRMANN, J.M., DER, R., 2007, Guided Self-organisation for Autonomous Robot Development, în A. e Costa and Francesco (ed.), Advances in Artificial Life 9th European Conference, ECAL 2007, Lisbon, Portugal, Lecture Notes in Computer Science, Springer, vol. 4648, pag. 766-775.
[161] MĂTIEŞ, V. (ed.), 2009, Platforme mecatronice pentru educație şi cercetare, Editura Todesco, Cluj-Napoca.
[162] MĂTIEŞ, V., MÂNDRU, D., MIRESCU, S.C., BĂLAN, R., TĂTAR, O., RUSU, C., 2002, Tehnologie şi educație mecatronică, Editura Economică Preuniversitaria, Bucureşti.
[163] MĂTIEŞ, V., MÂNDRU, D., TĂTAR, O., MĂTIEŞ, M., CSIBI, V, 2000, Actuatori în mecatronică, Editura Mediamira, Cluj-Napoca.
[164] MĂTIEŞ, V., ș.a., Laborator portabil pentru educație mecatronică, Brevet de invenție, Hotărâre O.S.I.M., nr. 6/170 din 30.12.2008.
[165] MERCHEŞ, I., BURLACU, L., 1983, Mecanica analitică şi a mediilor deformabile, Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti.
[166] MERLET, J.-P., 2000, The Parallel Robots, Kluwer Academic Publication, Netherland.
[167] MILLER, J.G., 1978, Living Systems, McGraw-Hill, New York.
[168] MOLLEMAN, E., 1998, Variety and the Requisite of Self-Organization, International Journal of Organizational Analysis, vol. 6, nr. 2, pag. 109-131.
[169] MORI, T., 1969, Mecha-tronics, Yasakawa Internal Trademark Application Memo 21.131.01., July 12.
[170] MORRIS, N.M., 1991, Control Engineering, McGrow-Hill Book Company, London.
[171] NAGAI, K., 2002, Learning While Doing: Practical Robotics Education, IEEE Robotics and Automation Magazine, vol. 8, nr. 2, pag. 39-43.
[172] NICOLESCU, B., 1999, Transdisciplinaritatea. Manifest, Editura Polirom, Iaşi.
[173] NICOLESCU, B., 2002, Noi, particula şi lumea, Editura Polirom, Iaşi.
[174] NICOLESCU, B., STAVINSCHI, M., (ed.), 2003, Science and Religion. Antagonism or Complementarity?, Editura XXI: Eonul Dogmatic, Bucureşti.
[175] NICOLESCU, B., STAVINSCHI, M., (ed.), 2006, Science and Orthodoxy, a Necessary Dialogue, Editura Curtea Veche, Bucureşti.
[176] NICOLIS, G., PRIGOGINE, I., 1977, Self-Organization in Non-equilibrium Systems, J. Wiley & Sons, New York.
[177] NICOLIS, G., PRIGOGINE, I., 1981, Symmetry Breaking and Pattern Selection in Far from Equilibrium Systems, Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, vol. 78, nr. 2, pag. 659-663.
[178] ONSAGER, L., 1931, Reciprocal Relations in Irreversible Processes. I., Physical. Review, vol. 37, nr. 4, pag. 405-427.
[179] ORGEL, L.E.,1973, The Origins of Life, John Wiley & Sons, New York.
[180] OSTER, G.F., WILSON E.O., 1978, Caste and Ecology in the Social Insects, Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
[181] PAIS, A., 1982, Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein, Clarendon Press, Oxford, U.K.
[182] PARUNAK, H.D., 2005, Expert Assessement of Human-Human Stigmergy, Analysis for the Canadian Defence Organization, Altarum Institute, Ann Arbor, Michigan.
[183] PATAPIEVICI, H.R., Omul recent, Editura Humanitas, Bucureşti, 2005.

[184] PAWLAK, A.M., 2007, Sensors and Actuators in Mechatronics: Design and Applications, CRC / Taylor & Francis, Boca Raton., U.S.A.
[185] PENROSE, R., 2006, Mintea noastră cea de toate zilele, Editura Tehnică, Bucureşti.
[186] PETRESCU, S., PETRESCU V., 1983, Principiile termodinamicii, Editura Tehnică, Bucureşti.
[187] PONS, J.L., 2005, Emerging Actuator Technologies, John Wiley & Sons, New York.
[188] PRIGOGINE, I., 1947, Étude thermodynamique des phénomènes irréversibles, Desoer, Liège.
[189] PRIGOGINE, I., 1978, Time, Structure and Fluctuations, Science, vol. 201. nr. 4358, pag. 777-785.
[190] PRIGOGINE, I., STENGERS, I., 1984, Noua alianță, Editura Politică, Bucureşti.
[191] PRIGOGINE, I., STENGERS, I., 1997, Între eternitate şi timp, Editura Humanitas, Bucureşti.
[192] QUE, C., KENYON, C.M., OLIVENSTEIN, R., ş.a., 2001, Homeokinesis and Short Term Variability of Human Airway Caliber, Journal of Applied Physiology, vol. 91, nr. 3, pag. 1131-1141.
[193] RESTIAN, A., 1989, Integronica, Editura Ştiinţifică şi Enciclopedică, Bucureşti.
[194] REYNOLDS, C., 1987, Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioural Model, Journal of Computational and Graphical Statistics, vol. 21, no. 4, pag. 25-34.
[195] ROSENBLEUTH, A., WIENER, N., BIGELOW, J., 1943, Behaviour, Purpose and Teleology, Philosophy of Science, vol. 10, nr. 1, pag. 18-24.
[196] ROSSI, P., 2004, Naşterea ştiinţei moderne în Europa, Editura Polirom, Iaşi.
[197] RUSS, J., 2002, Panorama ideilor filosofice. De la Platon la contemporani, Editura Amarcord, Timişoara.
[198] RUSSELL, A., 1990, Robot Tactile Sensing, Prentice Hall, Australia.
[199] RUSSELL, B., 1910, Principia Mathematica, vol. I, Cambridge University Press, Cambridge.
[200] RUSSELL, B., 1927, The Analysis of Matter, Allen & Unwin, London.
[201] RUSSELL, B., 1975, A Critical Exposition of the Philosophy of Leibnitz, Allen & Unwin, London.
[202] RUSSELL, S.J., NORVIG, P., 2003, Artficial Intelligence: A Modern Approach, Prentice Hall, New Jersey.
[203] RUSU, C., 2006, Contribuţii privind studiul mecanismelor pentru mecatronică, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca.
[204] SCHRÖDINGER, E., 1980, Ce este viaţa? Spirit şi materie, Editura Politică, Bucureşti.
[205] SHANNON, C.E., 1948, A Mathematical Theory of Communication, The Bell System Technical Journal, vol. 27, pag. 379-423, 623-656.
[206] SILAŞ, G., GROŞANU, I., 1977, Mecanica, Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti.
[207] SILBURN, L., 1989, Instant et cause. Le discontinu dans la pensée philosophique de l'Inde, De Boccard, Paris.
[208] SKYTTNER, L., 2001, General Systems Theory: Ideas & Applications, World Scientific Publishing, Singapore.
[209] SMOLIN, L., 2006, Spaţiu, Timp, Univers, Editura Humanitas, Bucureşti.
[210] SMULLYAN, R.M., 1957, Language in which Self-Reference Is Possible, Illinois, Journal of Symbolic Logic, vol. 22, pag. 55-67.
[211] STAN, S.D., 2006, Workspace Optimization of a Two Degree of Freedom Mini Parallel Robot, 2006 IEEE-TTTC International Conference on Automation, Quality and

Testing, Robotics – AQTR 2006 (THETA 15), Cluj-Napoca, Romania, IEEE Catalog number: 06EX1370, pag. 278-283.
[212] STAN, S.D., MĂTIEŞ, V., BĂLAN, B., 2006, Optimal Design of 2 DOF Parallel Kinematics Machines, DOI: 10.1002/pamm.200610333, PAMM, vol. 6, nr. 1, Copyright © 2006 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, pag. 705-706.
[213] SULIS, W., 1997, Fundamental Concepts of Collective Intelligence. Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences, New York, U.S.A., vol. 1, nr. 1, pag. 35-53.
[214] SWENSON, R., 1989, Emergent Attractors and the Law of Maximum Entropy Production: Foundations to a Theory of General Evolution, Systems Research, vol. 6, nr. 3, pag. 187-197.
[215] TARSKI, A., 1956, Logic, Semantics, Metamathematics, Clarendon Press, Oxford, U.K.
[216] TER HAAR, D., 1954, Elements of Statistical Mechanics, Reinehardt & Company Inc., New York.
[217] THAXTON, C.B., BRADLEY, W.L., OLSON, R.L., 1984, The Mistery of Life's Origin. Philosphical Library, New-York.
[218] THERAULAZ, G., BONABEAU, E., 1999, A Brief History of Stigmergy, Artificial Life, vol. 5, nr. 2, pag. 97–116.
[219] THERAULAZ, G., BONABEAU, E., DENEUBOURG, J.L., 1998, The Origin of Nest Complexity in Social Insects, Complexity, vol. 3, nr. 6, pag. 15-25.
[220] TOFFLER, A., 1983, Al treilea val, Editura Politică, Bucureşti.
[221] VÂLCU, R., DOBRESCU, A., 1982, Termodinamica proceselor ireversibile, Editura Tehnică, Bucureşti.
[222] VAN GIGCH, J.P., 1978, Applied General Systems Theory, Harper & Row, New York.
[223] VAN GIGCH, J.P., 1991, System Design, Modeling, and Metamodeling, Plenum Press, New York.
[224] VIŞA, I., ALEXANDRU, P., TALABĂ, D., ALEXANDRU, C., 2004, Proiectarea funcțională a mecanismelor. Metode clasice şi moderne, Editura Lux Libris, Braşov.
[225] WALDROP, M., 1992, Complexity: The Emerging Science at the Edge of Order and Chaos, Viking, London.
[226] WHEELER, W.M., 1911, The Ant Colony as an Organism, Journal of Morphology, vol. 22, nr. 2, pag. 307-325.
[227] WHITE, T., 2005, Expert Assessment of Stigmergy: A Report for the Department of National Defence, Contract No. W7714-040899/003/SV, File No. 011 sv. W7714-040899, Requisition No. W7714-040899, Carleton University, Ottawa.
[228] WIENER, N., 1948, Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Maschine, MIT Press, Cambridge.
[229] WILSON, E.O., 1994, The Diversity of Life, Penguin, London.
[230] YATES, E., GARFINKEL, A., WALTER, D., 1987, Self-Organizing Systems, The Emergence of Order, Plenum Press, New York.
[231] ZAWIRSKI, Z., 1932, Les logiques nouvelles et le champs de leur application, Revue de Métaphysique et de Morale, vol. 39, pag. 503-519.
[232] ZEH, H.Z., 2007, The Physical Basis of the Direction of Time, Springer, Berlin.
[233] ***, Laborator regional multifuncțional de mecatronică, Proiect PN2-Capacități-CP 111/2007, director-Prof. Dr. Ing. V. Mătieş.
[234] ***, *Români în cultura* universală, 1992, vol. 13, ARA Publications, Los Angeles, U.S.A.

[235] http://abyss.uoregon.edu/~js/ast123/lectures/lec05.html
[236] http://arxiv.org/list/nlin.AO/recent
[237] http://chemoton.wordpress.com/tag/collective-intelligence/
[238] http://concursul-irenaeus.blogspot.com/
[239] http://en.wikipedia.org/wiki/DNA
[240] http://en.wikipedia.org/wiki/Glycolysis
[241] http://epress.anu.edu.au/info_systems/mobile_devices/index.html
[242] http://homepage.mac.com/dtrapp/eChem.f/labB5.html
[243] http://inf.ucv.ro/~cstoean/courses/ia/c1.pdf
[244] http://invsee.asu.edu/nmodules/Carbonmod/crystalline.html
[245] http://openlearn.open.ac.uk/mod/resource/view.php?id=245488
[246] http://pespmc1.vub.ac.be/CYBSWHAT.html
[247] http://pespmc1.vub.ac.be/REQVAR.HTML
[248] http://robot.informatik.uni-leipzig.de/research/videos/
[249] http://robotics.ece.auckland.ac.nz/index.php?option=com_content&task=view&id=13&Itemid=27
[250] http://robotics.ee.uwa.edu.au/eyebot/doc/robots/vehicle.html
[251] http://sprott.physics.wisc.edu/chaos/mispoint.htm
[252] http://teachers.web.cern.ch/teachers/archiv/HST2002/Bubblech/mbitu/electron-positron.htm
[253] http://trc.ucdavis.edu/biosci10v/bis10v/week10/homeostasis.gif
[254] http://tsokolov.info/dochtml/Fellow-Lecture-2003.htm
[255] http://www.accessexcellence.org/RC/VL/GG/ecb/ATP_ADP.php
[256] http://www.arthuryoung.com/the1exc.html
[257] http://www.autodidactproject.org/other/themata1.html
[258] http://www.biologie.uni-hamburg.de/b-online/library/crofts/bioph354/lect2.html
[259] http://www.complexity.ro/html/complexitate.html
[260] http://www.ece.osu.edu/~passino/swarms.pdf
[261] http://www.edu.ro/index.php/articles/c155/
[262] http://www.eecs.harvard.edu/~rad/
[263] http://www.electromagneticworks.com/pages/successes/AnalysisLorentzForceLinearActuator.pdf
[264] http://www.etc.ugal.ro/imunteanu/Csemnale_bmk.pdf
[265] http://www.freshbrainz.com/2009/02/familiar-part-3-general-system-theory.html
[266] http://www.informatics.sussex.ac.uk/users/eji21/master/ei_ami_jan2004.pdf
[267] http://www.ingfiz.ro/if1/cursuri/teoremaluibell.htm
[268] http://www.ipod.org.uk/reality/reality_mathematical_universe.asp
[269] http://www.jameskay.ca/musings/thermomusings.pdf
[270] http://www.kgroesner.de/
[271] http://www.lassp.cornell.edu/sethna/OrderParameters/Intro.html
[272] http://www.mdpi.org/lin/
[273] http://www.mdpi.org/lin/01meetings/korea/Lin-mam-abs.htm
[274] http://www.mecanica.utcluj.ro/mmfm/Proiecte/Lrmm/scop.html
[275] http://www.metafysica.nl/dissipative_systems.html
[276] http://www.myspace.com/alvin_toffler
[277] http://www.nature.com/nature/journal/v408/n6815/fig_tab/408917a0_F1.html
[278] http://www.psihodiagnostic.ro/lucrari-psihomil-iv/535/feed-back-si-feed-forward-in-comunicarea-didactica.html
[279] http://www.sciencemusings.com/musingsarchive/2006_08_20_musings.html

[280] http://www.sftw.umac.mo/~yangmin/project.html
[281] http://www.sfu.ca/~epalsson/research.html
[282] http://www.uni-magdeburg.de/abp/picturegallery.htm
[283] http://www.wyrdology.com/mind/creativity/variety.html
[284] http://www.esf.edu/efb/turner/termite/stigmergy%20&%20complexity.html.
[285] http://www.builderbill-diy-help.com/tropical-building.html
[286] http://www.altechcorp.com/HTML/Sensors_Standard-A.html
[287] http://www.ab.com/sensors/sensorstoday/march2004/whats_next/index.html
[288] http://www.automationdirect.com.au/Welcome/lswiches/inputdevices.html
[289] http://www3.sea.siemens.com/step/pdfs/snrs_3.pdf
[290] http://www.lionprecision.com/tech-library/technotes/cap-0020-sensor-theory.html
[291] http://autonics.tradeindia.com/Exporters_Suppliers/Exporter19517.324163/Capacitive-Proximity-Sensors.html
[292] http://www.omron-ap.com/product_info/E2K-/proxsensor_E2KC_pic01_01oct2000.jpg
[293] http://www.omega.com/literature/transactions/volume3/strain.html#sendes
[294] http://www.piezomaterials.com/
[295] http://news.thomasnet.com/fullstory/814054
[296] http://www.applied-piezo.com/about/piezo-sensor.php
[297] http://emedicine.medscape.com/article/860444-overview