Automatizări industriale
şi conducere de proces

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României
POPESCU, DUMITRU
Automatizări industriale şi conducere de proces / Dumitru Popescu, Cătălin Dimon. - Bucureşti : Editura Academiei Oamenilor de Ştiinţă din România, 2011
Bibliogr.
Index
ISBN 978-606-8371-25-2

I. Dimon, Cătălin

681.5

Editura Academiei Oamenilor de Ştiinţă din România

Adresa: Splaiul Independenței, nr. 54, sectorul 5, cod 050094 Bucureşti, România

Redactor: ing. Mihail CĂRUȚAŞU

Tehnoredactor: prof. Andrei PETRESCU

Documentarist: ing. Ioan BALINT

Coperta: ing. sist. Adrian Nicolae STAN

Dumitru Popescu

Cătălin Dimon

Automatizări industriale
şi conducere de proces

Editura Academiei Oamenilor de Ştiinţă din România

Bucureşti

2011

Cuprins

1. Procesul tehnologic, obiect al controlului automat	7
Mărimi de caracterizare proces	7
Sisteme dinamice	11
Sisteme automate	12
Modele matematice	14
2. Reglarea parametrilor din proces	23
Reglarea automată a proceselor de curgere	23
Reglarea automată a proceselor de umplere-golire	30
Reglarea automată a proceselor hidraulice de presiune	37
Reglarea automată a proceselor termoenergetice	41
Reglarea automată a proceselor cu transfer de masă pe componenți	46
3. Implementarea solutiilor de automatizare	55
Soluții de automatizare pentru coloane de separare	55
Soluții de automatizare pentru procese cu reacție	62
Soluții de automatizare pentru schimbătoare de căldură	67

Capitolul 1

Procesul tehnologic, obiect al controlului automat

Mărimi de caracterizare proces

Automatica poate fi definită ca fiind acea ramură a ştiinţei şi tehnicii care se ocupă cu studiul metodelor şi a mijloacelor tehnice de conducere a proceselor tehnologice fără intervenţia directă a omului.

Pentru a clarifica noţiunile de proces şi de conducere, asa cum vor fi ele utilizate în continuare, să consideram un reactor chimic (*Figura 1.1*) în care să presupunem ca sunt introduse debitele F_A şi F_B de materii prime, iar pentru asigurarea regimului regimului termic necesar prin cămaşa reactorului este circulat un debit F_a de abur tehnologic. În reactor se desfăşoară reacţii chimice în urma cărora ia naştere produsul dorit, evacuat în mod continuu cu un debit F_C.

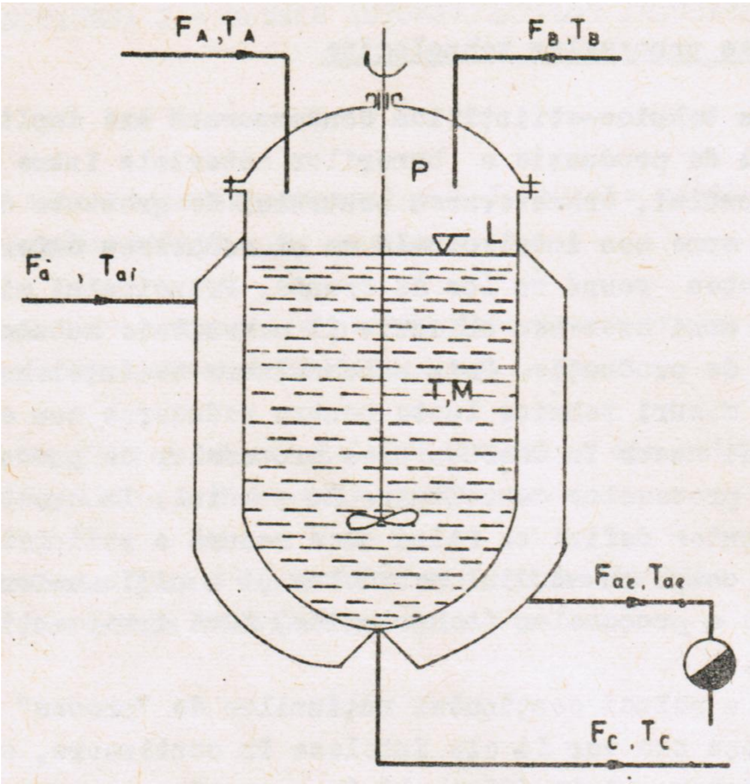

Figura 1.1: Reactor chimic [1]

O primă caracterizare a procesului tehnologic se poate face prin evidenţierea unui ansamblu de fenomene fizico-chimice, care implică transferuri şi transformări masice şi energetice cu o destinaţie funcţională precizată. O descriere cantitativă a procesului presupune evidenţierea unor mărimi caracteristice, precum şi a dependenţelor dintre acestea, stabilindu-se legăturile cauzale ce guvernează desfăşurarea sa în timp. Astfel de mărimi, în cazul prezentat, pot fi debitele masice şi energetice de intrare şi de ieşire, temperatura T a masei de reacţie, presiunea p din interiorul reactorului, cantitatea totala de reactivi din reactor, etc.

Notând generic ansamblul debitelor de substanţă şi energie introduse în reactor cu W_i, iar debitele de ieşire cu W_e, printre care şi debitul de produs finit, putem adopta următoarea reprezentare schematică a procesului (Figura 1.2):

Figura 1.2: Reprezentare intrare-ieşire [1]

Presupunând ca procesul este cu parametri concentraţi, deci neglijând pierderile de transfer precum şi distributiile spaţiale ale diverselor mărimi, putem distinge în funcţionarea procesului două tipuri de regimuri:

- *regimuri de echilibru staţionar (regimuri staţionare)* în care, cu ipotezele adoptate, sunt îndeplinite condiţiile de bilanţ de masă şi energie pe ansamblu ce pot fi exprimate prin relaţia:

$$W_e = W_i. \qquad \textbf{(1-1)}$$

- *regimuri dinamice (regimuri tranzitorii)* în care, datorită fenomenelor de acumulare şi dezacumulare internă energetică sau masică, egalitatea (1-1) nu mai este respectată, adica:

$$W_e \neq W_i. \qquad \textbf{(1-2)}$$

În consecinţă, pentru exprimarea cantitativă a echilibrului dinamic, respectiv a evoluţiei temporale a ansamblului de fenomene ce definesc procesul, este necesară evidenţierea, printre mărimile caracteristice, a unui set de mărimi numite *mărimi fizice de stare*, notat cu x, cu ajutorul cărora să poată fi descrise în mod univoc fenomenele tranzitorii interne. Ansamblul (vectorul) mărimilor fizice de stare trebuie să fie astfel definit încât, la un moment de timp precizat, valoarea mărimilor de stare să fie suficientă pentru a putea, pe baza legilor ce guvernează desfăşurarea procesului şi cunoscând evoluţia în timp a mărimilor din seturile W_i şi W_e, începând din momentul respectiv, să determinam univoc evoluţia ulterioară a tuturor mărimilor de stare.

În acest mod, regimurile staţionare pot fi definite prin menţinerea constantă în timp a tuturor mărimilor de stare, iar regimurile dinamice prin existenţa unor variaţii a cel puţin uneia dintre mărimile de stare.

În concluzie, un anumit proces tehnologic poate fi caracterizat prin ansamblul mărimilor caracteristice şi a legăturilor cauzale dintre acestea, date de legile fizice ale naturii.

Conducerea unui proces tehnologic impune în primul rând stabilirea unui obiectiv al conducerii care fixează destinaţia funcţională a procesului respectiv. Pentru aceasta este necesară introducerea unui nou set de mărimi, pe care le vom numi *mărimi de calitate* ale procesului şi le vom considera drept componente ale vectorului mărimilor de calitate notat cu z. Ele sunt dependente de mărimile de stare, unele dintre ele putând fi chiar identificate cu acestea. Cu ajutorul vectorului z, obiectivul conducerii poate fi exprimat simplu prin necesitatea atingerii şi menţinerii unui regim (în general staţionar) al procesului, în care mărimile de calitate au valori impuse – printr-un vector dat z^* – stabilite de tehnolog şi considerate optime. În cadrul exemplului considerat, mărimile de calitate pot fi compoziţia produsului, vitezele de reacţie, randamentul, dar şi temperatura masei de reacţie sau presiunea din reactor. Valorile optime sunt cele maxime posibile în cazul randamentului sau al vitezelor de reacţie şi nişte valori bine precizate în cazul temperaturii sau presiunii.

Prin urmare, putem defini, neformal, ***conducerea unui proces tehnologic*** prin ansamblul de acţiuni efectuate asupra procesului cu scopul aducerii şi menţinerii procesului într-o stare care satisface obiectivul precizat al conducerii.

Materializarea conducerii necesită, în plus, fixarea a încă două categorii din cadrul mărimilor caracteristice şi anume: un set de mărimi numite ***mărimi de execuţie*** (notate cu m) - prin modificarea cărora putem modifica starea procesului - şi un set de mărimi numite ***mărimi măsurate*** (notate cu y) - prin intermediul cărora se poate aprecia starea curentă. Alegerea corectă a mărimilor de execuţie este extrem de importantă. Pentru exemplificare, în cazul reactorului ales, debitele de reactanţi F_A şi F_B precum şi debitul de abur F_a pot îndeplini acest rol, având evident o influenţă semnificativă asupra stării reactorului. Ansamblul mărimilor măsurate este dictat, pe de o parte de posibilitatile tehnice de măsurare existente, iar pe de altă parte - de necesitatea de a putea extrage din acestea starea procesului. Evident, dacă o mărime de stare poate fi măsurată, este oportun ca acest lucru să fie făcut.

Un aspect extrem de important al acţiunii de conducere este caracterul său permanent. Într-adevar, odată atins obiectivul conducerii, păstrarea constantă a tuturor mărimilor de execuţie nu asigură menţinerea constantă şi a mărimilor de calitate. Pentru a evidenţia cauza unei astfel de situaţii, trebuie să luam în considerare un alt set de mărimi care au proprietatea că nu depind de cele introduse până acum şi, simultan, au variaţii necontrolate şi imprevizibile. Acestea sunt numite ***mărimi perturbatoare*** (sau mai simplu, *perturbaţii*), ansamblul lor fiind desemnat printr-un vector p.

Datorită acţiunii mărimilor perturbatoare, conducerea unui proces nu poate înceta decât odată cu oprirea acestuia din funcţiune. În exemplul urmărit, drept mărimi perturbatoare pot fi considerate variaţiile debitului de consum F_C, variaţiile de temperatură a materiei prime şi a aburului tehnologic etc.

În general, *intervenţia asupra procesului are loc prin intermediul unor aparate şi dispozitive numite* ***elemente de execuţie,*** care realizează adaptarea cu procesul condus, iar mărimile măsurate, după cum le arată şi numele, se obţin prin intermediul aparatelor de măsură sau a traductoarelor.

Mărimile de intrare ale elementelor de execuţie prin intermediul cărora se face de fapt conducerea procesului vor fi denumite *mărimi de comandă* şi se vor nota cu *u*.

Rezumând cele de mai sus putem detalia reprezentarea schematică din Figura 1.2 scoţând în evidenţă mărimile specificate (Figura 1.3):

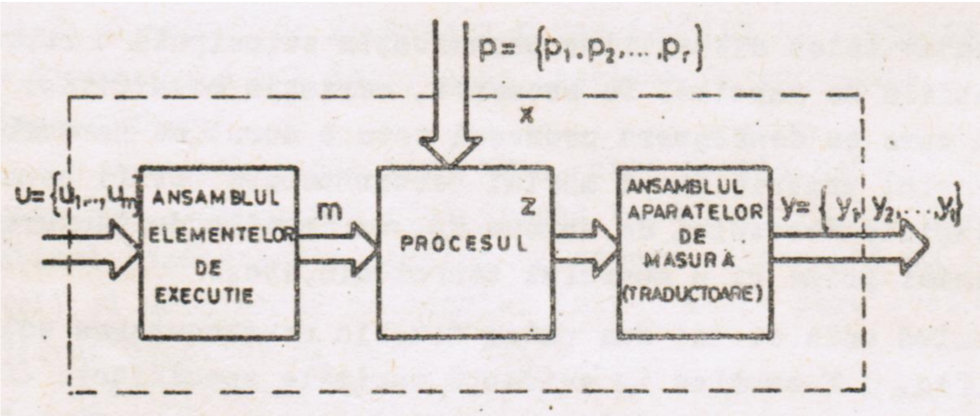

Figura 1.3: Mărimi de proces [1]

În cazul în care elaborarea şi aplicarea comenzilor se efectuează de către un operator uman avem o *conducere manuală,* iar în cazul în care aceste operatii sunt efectuate prin mijloace tehnice, fără interventieumana, avem o *conducere automată*.

Pentru exemplul reactorului elementele de execuţie pot fi ventile, robinete, clapete cu (sau fără) elemente de acţionare mecanica, electrica sau pneumatica prin intermediul cărora pot fi modificate mărimile de execuţie mentionate, iar ca mărimi măsurate pot fi considerate indicatiile aparatelor de măsura pentru temperatura masei de reacţie, a presiunii şi nivelului în reactor, sau semnalele de ieşire din traductoarele respective. Conducerea reactorului revine deci la a elabora comenzile necesare pentru elementele de acţionare a robinetelor, clapetelor pe baza cunoasterii permanente a valorilor mărimilor măsurate astfel încât să fie asigurata desfasurarea optima a procesului tehnologic, respectiv valorile mărimilor de calitate (randament, viteze de reacţie, temperatura, compozitia produsului final) să fie cele impuse de obiectivul conducerii.

Sisteme dinamice

Plecând de la faptul ca orice abordare teoretică presupune un anumit nivel de abstractizare în baza căruia este posibilă obţinerea unor rezultate cu caracter general, vom introduce un corespondent abstract al noţiunii de proces (fizic) pe care-l vom denumi sistem dinamic. Într-o primă accepţiune un sistem dinamic reprezintă o descriere matematică adecvată a unui proces fizic, descriere care apelează la mărimile introduse (mărimi de stare, calitate, comandă, măsura şi perturbatoare) şi exprimă legaturile cauzale dintre acestea. În mod inerent, o astfel de descriere nu poate surprinde decât aspectele esenţiale ale realităţii procesului respectiv şi, prin urmare, reprezintă un model matematic al unui proces mai mult sau mai puţin ideal. Într-o viziune mai largă, noţiunea de sistem dinamic poate fi desprinsă de legăturile directe cu procesele fizice concrete şi definită pe cale axiomatică. În acest fel sistemul dinamic devine un obiect matematic. Prin urmare putem privi sistemele dinamice drept modele matematice ale unor posibile procese fizice.

Fie variabila independentă *t*, cu semnificaţia de moment de timp, şi introducem:

- vectorul mărimilor de stare, *z*;
- vectorul mărimilor de comandă, *u*;
- vectorul mărimilor perturbatoare, *p*;
- vectorul mărimilor măsurate, *y*;
- vectorul mărimilor de calitate, *z*.

În legatura cu mulţimea momentelor de timp vom considera doua cazuri:

- $t \in \mathrm{R}$, situaţie în care vom vorbi de sisteme dinamice continue;
- $t \in \mathrm{Z}$, situaţie corespunzatoare sistemelor dinamice discrete.

Ţinând cont de faptul ca vom opera numai cu sisteme dinamice vom omite, în general, atributul dinamic în cele ce urmează.

Prin sistem continuu vom intelege un sistem de ecuaţii diferenţiale de forma:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f\left(t, x(t), u(t), p(t)\right) \\ y(t) = g\left(t, x(t)\right) \\ z(t) = h\left(t, x(t)\right) \end{cases} \quad , \ t \in \mathrm{R} . \qquad \textbf{(1-3)}$$

Prin ***sistem discret*** vom înţelege un model matematic dat printr-un sistem de relaţii de forma:

$$\begin{cases} x(t+1) = f\left(t, x(t), u(t), p(t)\right) \\ y(t) = g\left(t, x(t)\right) \\ z(t) = h\left(t, x(t)\right) \end{cases} \quad , \ t \in \mathrm{Z} . \qquad \textbf{(1-4)}$$

În cazul sistemelor discrete mărimile introduse au aceleaşi semnificaţii cu cele din cazul cantinuu, dar nu sunt definite decât la momente bine precizate de timp, distanţate de intervale egale cu o constantă numită perioadă de eşantionare sau pas de discretizare.

În studiul multor probleme ale teoriei sistemelor nu este necesară distincţia dintre mărimile de comandă şi cele perturbatatoare, interesând exclusiv atributul lor comun de cauze pentru evoluţia internă a procesului. În consecinţă le vom reuni sub denumirea de *mărimi de intrare* şi le vom nota cu *u*. De asemenea, mărimile măsurate şi de calitate sunt reunite sub denumirea comuna de *mărimi de ieşire* şi notate cu *y*, având în vedere faptul că ambele sunt efecte ale evoluţiei interne. Cu aceste observaţii vom întâlni adesea sistemele continue scrise sub forma:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f\left(t, x(t), u(t)\right) \\ y(t) = g\left(t, x(t)\right) \end{cases}, \quad t \in \mathrm{R}, \qquad \textbf{(1-5)}$$

iar cele discrete în forma:

$$\begin{cases} x(t+1) = f\left(t, x(t), u(t)\right) \\ y(t) = g\left(t, x(t)\right) \end{cases}, \quad t \in \mathrm{Z}. \qquad \textbf{(1-6)}$$

Sisteme automate

Pentru a evidenţia atributele fundamentale şi structura unui sistem automat, vom porni de la un exemplu de conducere manuală a unui proces tehnologic şi vom reliefa elementele definitorii ale unei acţiuni de conducere. Vom considera acelaşi proces tehnologic din Figura 1.1 şi, din motive de simplitate, vom presupune că singura mărime de calitate care interesează este temperatura masei de reacţie. Evident, cea mai bună mărime de execuţie pentru asigurarea valorii dorite a temperaturii este debitul de abur tehnologic vehiculat prin cămaşa reactorului şi în consecinţă vom alege F_a ca mărime de execuţie.

Celelalte mărimi a caror variaţie influenţeaza temperatura din interiorul reactorului (masa totală de reacţie, temperatura aburului tehnologic, debitul de energie termică introdus de materiile prime şi evacuat de produsul final etc.) vor fi considerate mărimi perturbatoare. Pentru modificarea debitului de abur este prevăzut un robinet R montat pe conducta de abur şi care constituie elementul de execuţie. Măsurarea temperaturii o vom realiza cu un termometru (de exemplu un termocuplu şi milivoltmetru indicator a cărui scală este gradata în unităţi de temperatură). Prin urmare, mărimea măsurata este temperatura T_y indicată de termometru (este necesar să o distingem de temperatura reală a masei de reacţie care este mărimea de calitate).

Pentru a realiza operaţia de conducere, al cărei obiectiv este menţinerea mărimii de calitate la o valoare T^* stabilită de tehnolog şi precizată în prealabil, este necesar să se facă o operaţie de comparaţie între valoarea măsurată a mărimii de calitate şi valoarea impusă acesteia şi, în funcţie de rezultatul acestei comparaţii, să se realizeze o decizie privind modificarea mărimii de execuţie, decizie care se concretizează prin aplicarea de comenzi corespunzătoare elementului de execuţie.

Dac-ar fi să consideram şi alte exemple, se pot observa anumite elemente comune, generale, care sunt independente de procesul tehnologic condus considerat. Vom încerca să evidenţiem astfel de elemente.

Plecând de la exemplul reglării automate a temperaturii din reactor, prin evidenţierea unor elemente cu corespondent fizic direct, obţinem structura din Figura 1.4.

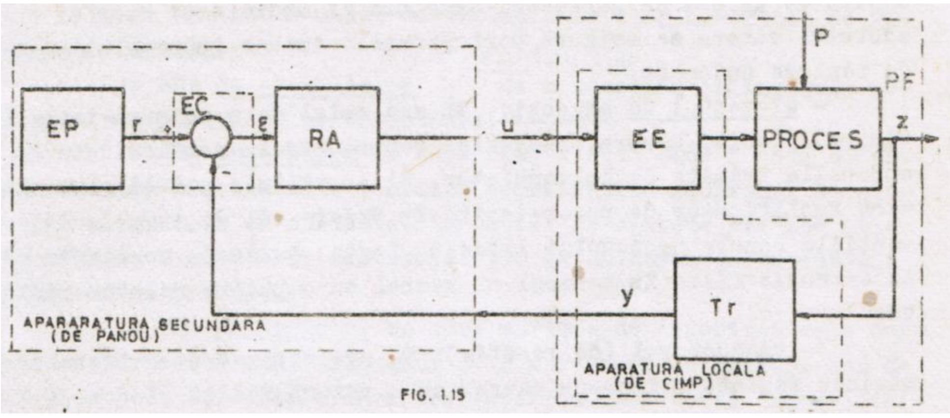

Figura 1.4: Elemente componente ale conducerii unui proces [1]

În această schema funcţională mărimile *u, m, z, y, p* au semnificaţiile pe care le-am utilizat deja, *r* este *mărimea de referinţă* şi corespunde valorilor impuse *z* ale mărimii de calitate dar având aceeaşi natură fizică cu mărimea măsurată *y*. Mărimea măsurată *y* mai poartă numele de *mărime de reacţie*.

Expresia:

$$\varepsilon(t) = r(t) - y(t)\,, \qquad \textbf{(1-7)}$$

defineste *eroarea de reglare* marcând existenţa în orice sistem automat a unei reacţii (influenţe a ieşirii asupra intrării) negative stabilizatoare, prin intermediul careia se realizează un control permanent al efectelor acţiunilor de comandă.

În ceea ce priveşte elementele fizice componente ale schemei funcţionale din Figura 1.4, acestea sunt:

- *elementul de prescriere* a mărimii de referinţă (sau elementul de programare) EP cu rolul de a fixa şi memora mărimea de referinţă sau variaţia dorita în timp a acesteia;

- *elementul de comparatie* EC care realizeaza o comparaţie prin diferenţă a mărimii de referinţă cu mărimea măsurată;

- *regulatorul automat* RA care realizează o prelucrare informaţională a semnalului de eroare conform unei legi fixate şi elaborează mărimea de comandă. Este elementul cel mai versatil din schema funcţionala în sensul că legile de prelucrare a informaţiei depind de un set de parametri care pot fi modificaţi usor şi cu ajutorul cărora se asigură performanţele impuse întregului sistem de reglare automat;

- *elementul de execuţie* EE are rolul de a asigura intervenţia nemijlocită asupra procesului tehnologic în conformitate cu comenzile primite de la regulator. El constituie principalul element amplificator de putere având în vedere că, de regulă, intervenţiile asupra procesului necesită forţe, cupluri mari, mărimea de execuţie fiind în general un semnal cu o putere relativ ridicată;

- *traductorul* T are rolul de a transforma mărimea reglata *z* într-un semnal cu o natură fizică şi domeniu de variaţie compatibile cu cele ale mărimii de referinţă şi cu intrarea regulatorului. Precizia traductorului este determinantă pentru precizia sistemului de reglare automată întrucât eventuale erori introduse de traductor sunt în principiu necompensabile de către sistem.

Având în vedere sensul fluxului informaţional, RA, EE şi procesul formează aşa numita cale directă a sistemului automat, iar traductorul calea de reacţie.

Elementul de execuţie şi traductorul realizează cuplarea sistemului de conducere cu procesul, constituind elementele de interfaţă. Fiind plasate în imediata apropiere a instalaţiei tehnologice, formează aparatura locală sau de câmp. Elementul de prescriere, de comparaţie şi regulatorul pot fi plasate într-o altă locaţie, formând aparatura secundară sau de panou.

Ansamblul format din elementul de execuţie, proces şi traductor este numit şi *parte fixată* (PF) a sistemului.

Modele matematice

Abordarea ştiinţifică a problemelor conducerii automate a proceselor impune utilizarea unui formalism matematic adecvat, capabil să descrie, în limite de aproximaţie acceptabile, proprietăţile fundamentale ale proceselor reale. Edificarea unui astfel de formalism are la bază conceptele de sistem dinamic şi de stare, care formează elementele de construcţie ale teoriei moderne a sistemelor. Această teorie provine din aşa numita teorie clasică a sistemelor de reglare automată care se bazează pe un formalism intrare-ieşire, respectiv pe evidenţierea implicaţiilor cauzale ale elementelor. Astfel, se presupune ca orice proces real se prezintă ca o cutie neagra („*black box*”) la care se pot evidenţia un set de mărimi sau variabile-cauză de intrare şi un set de mărimi sau variabile-efect de ieşire, descrierea matematică a procesului realizându-se prin evidenţierea modului în care funcţiile de ieşire depind de funcţiile de intrare.

Pentru abordarea problematicii modelării matematice a fenomenelor şi proceselor fizice din aplicaţiile industriale sunt dezvoltate cele două abordări cunoscute şi anume modelarea analitică şi respectiv modelarea experimentală bazată pe tehnici de identificare şi sunt precizate diverse categorii de modele în funcţie de necesităţile lor de utilizare şi de gradul de adecvanţă la procesele fizice modelate, după cum urmează:

- *modele de cunoaştere*, obţinute din legile de funcţionare ale procesului, apropiate de proces şi exprimate cu ajutorul mărimilor fizice, modele care conservă caracterul neliniar al proceselor;

- *modele liniare (sau liniarizate) de comportament*, reprezentate în domeniul timpului prin ecuaţii diferenţiale sau în domeniul complex prin funcţii de transfer şi care ofera posibilităţi de simulare a evoluţiilor posibile ale procesului;
- *modele de comandă*, extrase în principal din date experimentale şi utilizate pentru proiectarea comenzii în sistemele de control automat;
- *modele de conducere*, folosite pentru luarea unor decizii eficiente în exploatarea proceselor, pentru optimizare şi siguranţa lor în funcţionare.

Modele de cunoaştere

În modelarea proceselor industriale se utilizează principiile fundamentale ale fizicii clasice şi anume: principiul conservării masei, principiul conservării cantităţii de mişcare, primul principiu al termodinamicii (conservarea energiei) şi al doilea principiu al termodinamicii (generarea entalpiei).

Această categorie de modele numite *de cunoaştere*, este construită din aplicarea legilor care guvernează procesul. Transcrierea acestor legi prin ecuaţii şi expresii analitice reprezintă în fapt modelul ai cărui parametri au evident semnificaţie fizică. Se pot da cateva exemple.

Legea Fourier exprimă dependenţa dintre fluxul de caldură şi gradientul de temperatură care îl provoacă. Pentru un mediu izotrop:

$$\overrightarrow{J_Q} = -\lambda\, \overrightarrow{grad T} \qquad \textbf{(1-8)}$$

unde λ este conductivitatea termica şi $\overrightarrow{J_Q}$ este fluxul de căldura.

În mod asemanator, prima lege a lui Fick arată că un gradient de concentraţie provoacă un flux de materie cu direcţia spre concentraţiile slabe dat de o ecuaţie similară ecuaţiei (2.1) şi anume:

$$\overrightarrow{J_m} = -D\, \overrightarrow{grad C} \qquad \textbf{(1-9)}$$

Mărimile barate au semnificaţia faptului că transferul termic şi masic tind să uniformizeze (medieze) temperatura şi respectiv concentraţia.

Se pot enunţa în continuare şi legile lui Darcy, Newton şi Ohm, care au formulări şi efecte asemanatoare. Toate aceste legi permit scrierea unor ecuaţii diferenţiale care să exprime dinamica proceselor pe care le guvernează pe baza mărimilor din tabelul 1.1.

Caracteristica principală a modelelor de cunoaştere este accea că exprimă evoluţia proceselor şi fenomenelor printr-o relaţie matematică. Ele se găsesc foarte aproape de procesele reale şi asigură reproducerea comportamentului procesului pe un domeniu larg de funcţionare. În general, aceste tipuri de modele sunt destul de complexe, contin parametri fizici, conservă neliniarităţile procesului şi sunt exprimate prin variabile tehnologice.

Cu aceste considerente, prima fază în elaborarea unui model de cunoaştere se referă la definirea procesului şi a fenomenelor care urmează să fie reprezentate.

Tabelul 1.1

Fluxul şi potentialul pentru legile fizice

Legea	**Fluxul**	**Potentialul**
Fourier	Cantitatea de căldura	Temperatura
Fick	Cantitatea de materie	Concentraţie
Darcy	Masa de fluid	Presiune
Newton	Cantitate de mişcare	Viteza de curgere
Ohm	Cantitate de electricitate	Potenţial electric

Cu aceste considerente, se va specifica şi delimita procesulul fizic, se vor alege variabilele care permit reprezentarea, se vor identifica fenomenele fizice sau chimice care îl definesc. Prima fază în elaborarea unui model de cunoaştere se referă la definirea procesului şi a fenomenelor care urmează să fie reprezentate. Se va specifica şi delimita procesulul fizic, se vor alege variabilele care permit reprezentarea, se vor identifica fenomenele fizice sau chimice care îl definesc.

Modelul de cunoaştere include astfel descrierile realizate prin ecuaţii sau sisteme de ecuaţii de bilanţ sau de conservarea materiei, energiei sau impulsului, fără o destinaţie şi interpretare sistemică. Ele exprimă într-o manieră matematică preliminară, fenomenele responsabile de dinamica procesului.

Spre exemplu, într-un model analitic de cunoaştere se pot regasi ecuaţii de transfer de masa, de căldura, schimb de concentraţie sau de poziţie etc. Variabilele care intervin în reprezentarea modelului sunt mărimi fizice la fel ca şi variabilele care reprezintă evoluţiile din proces.

Setul de variabile specifice se poate separa în următoarele categorii: *variabile de stare* – mulţimea variabilelor care permit descrierea stării procesului în orice moment; *variabile de intrare*, de acţionare sau de manipulare – sunt variabilele pe baza cărora se poate modifica evoluţia sistemului; *perturbaţii măsurabile* sau *nemăsurabile* sunt variabilele care afectează evoluţia sistemului, dar asupra cărora nu putem acţiona (pe cele pe care le putem măsura le numim perturbaţii măsurabile); *variabile de ieşire*, măsurate sau reglate – acestea sunt variabile din proces care pot fi măsurate şi care pot fi exprimate ca funcţii de variabilele de stare.

Urmează configurarea ecuaţiilor care leagă între ele toate variabilele descrise mai sus. Spre exemplu, se poate începe prin scrierea ecuaţiilor de bilanţ care traduc conservarea unei cantităţi X. Pe durata unui interval *dt,* exprimarea generală a unei ecuaţii de acest tip este de forma următoare:

$$\begin{aligned}&(\text{Acumularea lui X in sistem}) = (\text{Fluxul lui X care intra}) - (\text{Fluxul lui X care iese})\\&+ (\text{Suma de X care este produs de sistem}) - (\text{Suma de X care este consumat de sistem})\end{aligned} \quad \textbf{(1-10)}$$

Acest tip de relaţie se transformă foarte uşor într-o ecuaţie diferenţială care exprimă conservarea masei, impulsului sau energiei unui proces în regim dinamic.

În acest caz, ecuaţia generală din (2.3) se exprimă matematic prin modele de cunoaştere cu reprezentare pe stare sau intrare/ ieşire.

Rezultă, aşadar, că dinamica unui proces tehnologic este, în cele mai multe cazuri, cea corespunzătoare unui sistem neliniar cu reprezentare pe stare,

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= F(X,\theta,t) + B(U(t)) + V(t) \\ Y(t) &= C(X(t)) + D(U(t)) + W(t) \end{aligned}, \qquad \textbf{(1-11)}$$

unde avem:

- $X(t)$ vectorul de stare care conţine ansamblul variabilelor de stare;
- $U(t)$ vectorul variabilelor de intrare, de manipulare sau de acţiune;
- $Y(t)$ vectorul care conţine ansamblul variabilelor de ieşire, măsurate;
- $V(t)$ vectoriul perturbaţiilor care acţionează pe stare;
- $W(t)$ vectorul perturbaţiilor care acţionează pe ieşire.

În cazul unui sistem intrare-ieşire avem reprezentarea:

$$Y(t) = H(U(t)) \qquad \textbf{(1-12)}$$

cu:

- $U(t)$ vectorul intrarilor;
- $Y(t)$ vectorul ieşirilor.

Modele de comportament

Modelele de comportament sunt reprezentari sistemice (ecuaţii diferenţiale sau funcţii de transfer), care oferă, în primul rand, facilităţi pentru simularea dinamicii procesului. În general, un model de comportament se exprimă printr-o formă parametrizată. Coeficienţii săi adimensionali, de regulă, nu au o anume semnificaţie fizică şi deci reprezintă parametrii unui model abstract. Prin câteva transformări matematice efectuate asupra formei brute a modelului de cunoaştere (normare şi liniarizare), se poate obţine modelul de comportament.

Normarea este operaţiunea extrem de simplă şi se efectuează asupra mărimilor de descriere a modelului (considerate funcţii de timp), prin raportarea la valorile lor de regim staţionar.

Operaţiunea mai consistentă este cea de liniarizare. Aceasta se bazează pe conceptul de aproximare a modelului în jurul unui punct nominal de funcţionare (modele tangenţiale). Modelele liniarizate reprezintă aproximaţii satisfăcătoare cu rezultate concludente în vecinatatea punctului faţă de care s-a efectuat operaţiunea de liniarizare. Cu alte cuvinte, la variaţii mici în jurul punctului staţionar (nominal), modelul liniar aproximativ va fi acceptat pentru simulare sau control.

Pentru rafinarea rezultatelor obţinute prin liniarizare, adică pentru îmbunătăţirea gradului de aproximare pe un interval mai larg de pe caracteristica neliniară de funcţionare, se apelează la conceptul de „multimodel”, utilizat în mod curent în studiul sistemelor neliniare.

Dupa liniarizare, procesul este reprezentat prin structura unui astfel de model de comportament liniarizat (continuu şi constant), cu reprezentare în spaţiul stărilor:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \qquad \textbf{(1-13)}$$

respectiv în reprezentarea intrare-ieşire,

$$Y(t) = LU(t) \qquad \textbf{(1-14)}$$

cu proprietatea de liniaritate pentru operatorul L:

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t) = L(u_1(t) + u_2(t)) \qquad \textbf{(1-15)}$$

Regimul staţionar pentru sistemul neliniar din (1-11) se obţine pentru valorile constante ale setului mărimilor de descriere. Se exprimă prin condiţia *X=0*.

Daca notam cu *(Uo,Xo,Yo)* setul intrarilor, mărimilor de stare şi respectiv ieşirilor în regim staţionar, avem:

$$\begin{aligned} 0 &= f(X_0, U_0) \\ Y_0 &= g(X_0) \end{aligned} \qquad \textbf{(1-16)}$$

Caracteristica statică neliniară de funcţionare a sistemului se obţine prin eliminarea variabilei de stare X_o şi devine o exprimare de forma $Y_o=f(U_o)$.

Prin dezvoltare în serie a funcţiilor *f(X,U)* şi *g(X)*, în jurul punctului (U_o,X_o), se obţine:

$$\begin{aligned} f(x,u) &= f(x_0,u_0) + \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{\substack{x=x_0\\u=u_0}} (x - x_0) + \left.\frac{\partial f}{\partial u}\right|_{\substack{x=x_0\\u=u_0}} (u - u_0) + \mu(x,u) \\ g(x) &= g(x_0) + \left.\frac{\partial g}{\partial x}\right|_{x=x_0} (x - x_0) + \nu(x) \end{aligned} \qquad \textbf{(1-17)}$$

În cazul unor abateri mici faţă de punctul staţionar, funcţiile *R(U,X) şi W(X)* se neglijază.

Notăm:

$$A \stackrel{\Delta}{=} \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{\substack{x=x_0\\u=u_0}}, B = \left.\frac{\partial f}{\partial u}\right|_{\substack{x=x_0\\u=u_0}}, C = \left.\frac{\partial g}{\partial x}\right|_{x=x_0} \qquad \textbf{(1-18)}$$

şi se obţine sistemul liniarizat:

$$\begin{aligned} \dot{\Delta x} &= A\Delta x + B\Delta u \\ \Delta y &= C\Delta x \end{aligned} \qquad \textbf{(1-19)}$$

Pe baza unui raţionament similar, în reprezentarea intrare-ieşire pentru caracteristica statică neliniară *Y=H(U)*, prin liniarizare în jurul punctului *(*Y_o*,* U_o*)*.

Notăm:

$$y_{st} = \overset{0}{y}_{st} + \left(\frac{\partial \eta}{\partial u_{st}} \right) \overset{0}{u}_{st} (u_{st} - \overset{0}{u}_{st}) + \frac{1}{2!} \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial u_{st}^2} \right) \overset{0}{u}_{st} (u_{st} - \overset{0}{u}_{st})^2 + \ldots \tag{1-20}$$

se obţine cu usurinţă, la variaţii mici, relaţia:

$$y_{st} = \overset{0}{y}_{st} + k(u_{st} - \overset{0}{u}_{st}) \tag{1-21}$$

Această caracteristică se ataşează componentei dinamice liniare (funcţiei de transfer) pentru descrierea sistemului liniarizat.

Avantajele tehnico-economice oferite de echipamentele de calcul sunt exploatate de sistemele de conducere. Prelucrarea informaţiei sub formă numerică este posibilă pe structuri discretizate. Achiziţia de date şi aplicarea comenzilor se realizează la momente discrete ale timpului în funcţie de performanţele echipamentelor de calcul şi complexităţii algoritmilor de comandă. În aceste condiţii, în momentul de faţă studiul sistemelor dinamice apelează în mod obligatoriu la reprezentarea sub formă discretizată. În operaţiunea de discretizare, alegerea perioadei de eşantionare este extrem de importantă. Pe de o parte este necesară păstrarea informaţiei între momentele de eşantionare (teorema lui Shannon) şi pe de altă parte este nevoie de o alegere corectă a vitezei de lucru a convertorului A/N pentru eşantionarea modelului asociat procesului continuu. Astfel, se poate determina echivalentul discretizat al sistemului continuu, liniarizat.

Fie sistemul liniar continuu din (1-12). Prin operaţiunea de discretizare cu o perioadă de eşantionare *h*, se obţine sistemul discretizat echivalent:

$$\begin{aligned} x((k+1)T) &= A_d x(kT) + B_d u(kT) \\ y(kT) &= C_d x(kT) \end{aligned} \tag{1-22}$$

unde:

$$A_d \overset{\Delta}{=} e^{AT}, B_d = [\int_0^T e^{A\rho} d\rho] B, C_d \overset{\Delta}{=} C \tag{1-23}$$

sau pentru cazul uzual de reprezentare cu T=1, avem:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A_d x(k) + B_d u(k) \\ y(k) &= C_d x(k) \end{aligned} \tag{1-24}$$

Modelul discretizat (1-24) rămâne o aproximaţie acceptabilă pentru sistemul liniar continuu care, la rândul său, aproximează modelul neliniar.

Printr-un raţionament inductiv asupra modelelor de comportament foarte simple (de primul sau al doilea ordin), se poate afirma că, în jurul unui punct de funcţionare, micile variaţii ale intrării unui sistem pot genera mici variaţii ale ieşirii pe baza ecuaţiei diferenţiale liniare de ordinul *n*, (model de comportament, liniarizat), care se scrie sub forma:

$$\begin{aligned} & a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + ... + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = \\ & b_m \frac{d^m y(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} y(t)}{dt^{m-1}} + ... + b_1 \frac{dy(t)}{dt} + b_0 u(t) = \end{aligned} \quad \textbf{(1-25)}$$

unde *n* este ordinul modelului.

Modelul continuu din (1-25) permite calculul răspunsului sistemului la intrarea dată şi exprimă comportamentul dinamic intrare-ieşire al sistemului. Din acest motiv reprezentarea (1-25) este considerată ca model de comporatment al procesului. Pentru manipularea cu usurinţă a relaţiei (1-25), se foloseşte instrumentul matematic cunoscut automatiştilor, transformata Laplace, care prelucrează reprezentarea diferenţială din domeniul timpului într-o reprezentare algebrică din domeniul frecvenţelor complexe *s*, şi deci simplifică calculul numeric.

Vom aplica transformata Laplace ecuaţiei (1-25) şi vom preciza condiţiile iniţiale: pentru variabilele de descriere *y(t) şi u*(t) în aceste condiţii se obţine relaţia:

$$\begin{aligned} & \left(a_n s^n + ... + a_0\right) Y(s) - \left[s^{n-1}\left(a_n y(0)\right) + s^{n-2}\left(a_n \frac{dy}{dt}(0) + a_{n-1} y(0) \right) + \right. \\ & \left. ... + s^0 \left(a_n\right) \frac{d^{n-1} y}{d^{n-1} t}(0) + a_1 y(0) \right] = \left(b_m s^m + ... + b_0\right) U(s) \end{aligned} \quad \textbf{(1-26)}$$

Se defineşte ***funcţia de transfer asociată***, considerând ca toate condiţiile iniţiale sunt nule:

$$F(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + ... + b_0}{a_n s^n + ... + a_0} \quad \textbf{(1-27)}$$

În mod echivalent, pentru modelele continue din (1-26) şi (1-27) există reprezentările obţinute prin discretizare exprimate prin ecuaţii cu diferenţe:

$$a_0 y(k) + a_1 y(k\text{-}1) + ... + a_n y(k\text{-}n) = b_0 u(k) + b_1 u(k\text{-}1) + ... + b_m (k - m) \quad \textbf{(1-28)}$$

si respectiv, printr-o funcţie de transfer în z^{-1}:

$$F\left(z^{-1}\right) = \frac{Y\left(z^{-1}\right)}{U\left(z^{-1}\right)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + ... + b_m z^{-m}}{a_0 + a_1 z^{-1} + ... + a_n z^{-n}} \quad \textbf{(1-29)}$$

Este evident că un model de comportament exprimă complexitatea şi evoluţia procesului, iar ecuaţia diferenţiala sau funcţia de transfer reprezintă exprimarea abstractă a procesului. Acest tip de model dă posibilitatea de-a propune o structură adecvată pentru clasa modelelor de comandă în reprezentare discretă. Deci, modelul de comportament este o prelungire a modelului de cunoaştere şi este folosit pentru evaluarea dinamicii unui proces real prin simulare. Acest tip de model exprimă informaţii despre structura procesului într-o ecuaţie diferenţială standard cu coeficienţi adimensionali, normalizaţi. Există un interes special pentru modelul de comportament, pentru legătura sa cu modelul de cunoaştere (cu procesul) pe de o parte şi, pe de altă parte, cu modelele abstracte de comandă (cu sistemul automat).

Modele de comandă

Modelele de comandă, în principal, sunt extrase din date achiziţionate din proces prin tehnici de identificare. Se determină structura care defineşte ordinul modelului sau, altfel spus, complexitatea acestuia, şi se estimează parametrii sau coeficienţii modelului. Prin identificare se obţine, într-o manieră directă, forma de reprezentare discretă a modelului care este de regula I/O.

Modelul de comandă, înainte de utilizare, este validat astfel încât să reproducă cu bună aproximaţie evoluţia procesului fizic întrucât modelul identificat este folosit pentru obiectivul final, elaborarea unei comenzi care să fie aplicată procesului printr-un sistem de control automat (*sinteza comenzii pe bază de model*).

În această lucrare propunem tehnici experimentale pentru identificare, bazate pe măsuratorile efectuate în proces, pentru clasa modelelor liniare SISO invariante în timp, frecvent utilizate în simulare şi control automat.

Tehnicile cele mai cunoscute şi mai des folosite sunt tehnicile *Celor mai Mici Pătrate varianta Recursivă*, CMMPR. Avantajele metodelor CMMPR rezultă din simplitatea algoritmilor de calcul şi de punere în practică, inclusiv pentru aplicaţii de control în timp real.

Notăm că structura modelului este adesea inspirată din modelul de cunoaştere iar estimaţia parametrilor este rezultatul unei proceduri recursive de calcul.

Unul dintre elementele-cheie pentru abordarea identificării modelelor proceselor este *algoritmul de adaptare parametrică* (A.A.P.) care obţine parametrii modelului ajustabil pe baza predicţiei şi informaţiilor obţinute din proces, la fiecare moment de eşantionare. Acest algoritm are o structură recursivă, adică noua valoare a parametrilor se obţine din valoarea precedentă corectată cu un termen care depinde de ultimele măsuratori.

Forma recurenta a algoritmului,

$$\hat{\theta}(k+1)=\hat{\theta}(k)+F(k+1)\Phi(k)\varepsilon(k+1) \quad \textbf{(1-30)}$$

este rezultatul unei probleme de optimizare:

$$\min_{\hat{\theta}(k+1)} J\left(\hat{\theta}(k)\right) = \sum_{i=1}^{k}\left[y(i) - \hat{\theta}(k)\Phi(i-1)\right]^2 \tag{1-31}$$

unde:

$$\begin{gathered} F(k+1) = F(k) - \frac{F(k)\Phi(k)\Phi^T(k)F(k)}{1+\Phi^T(k)F(k)\Phi(k)} \\ F(0) = \alpha I \qquad (\alpha > 0); \;\; \hat{\theta}(0) = \theta_0 \\ F(k+1) < F(k) \end{gathered} \tag{1-32}$$

este matricea de adaptare parametrică şi

$$\varepsilon(k+1) = y(k+1) - \hat{\theta}^T(k)\Phi(k) \tag{1-33}$$

este eroarea de predicţie.

Modelele de comandă sunt prezentate în formele următoare:

$$\hat{y}(t+1) = -\sum_{i=1}^{nA}\hat{a}_i y(k+1-i) + \sum_{i=1}^{nB} u(k+1-i+d) \tag{1-34}$$

sau matricial-vectorial cu:

$$\begin{gathered} \hat{\theta}(t+1) = \left[\hat{a}_1, \hat{a}_2, ..., \hat{a}_{nA}; \hat{b}_1, \hat{b}_2, ..., \hat{b}_{nB}\right] \\ \Phi^T(k+1) = \left[-y(k), -y(k-1), ..., -y(k+1-n_A); u(k-d), ..., u(k+1-d-n_B)\right] \\ \hat{y}(k+1) = \hat{\theta}^T(k)\Phi(k), \;\; \forall k \in N \end{gathered} \tag{1-35}$$

sau în reprezentare polinomială:

$$\begin{aligned} \hat{y}(k) &= q^{-d}\,\frac{\hat{B}(q^{-1})}{\hat{A}(q^{-1})}u(k) \\ \hat{A}(q^{-1}) &= 1 + a_1 q^{-1} + \ldots + a_{nA}q^{-nA} \\ \hat{B}(q^{-1}) &= 1 + b_1 q^{-1} + \ldots + b_{nB}q^{-nB} \end{aligned} \tag{1-36}$$