METODE ȘI TEHNICI ÎN ANALIZA SISTEMELOR COMPLEXE INTEGRATE

Drd. ing. Josef Romulus Weingärtner

Synerga GMBH, Stuttgart, Germania

Rezumat: Se definesc conceptele de sistem complex și sistem integrat și integrare cu ajutorul bazei de date. Sînt prezentate metode și tehnici de analiză sistemică: modelarea matematică a sistemelor complexe, descompunerea și ierarhizarea sistemelor complexe, agregarea sistemelor complexe și reducerea/simplificarea modelului. Dintre metodele și tehnicile de analiză computerizată sînt prezentate: metode și tehnici de simulare a sistemelor complexe și metode de calcul statistic.

Cuvinte cheie: sistem complex, sistem integrat, analiză sistemică, model matematic, descompunere, ierarhizare, agregare, reducere/simplificare, simulare, calcul statistic.

1. Sistem complex integrat

Complexitatea sistemelor cu care sîntem confruntați în prezent și am enumerat aici sistemele naturale (în principal sistemele ecologice), sistemele tehnologice, sistemele socio-economice ș.a., este unul dintre obstacolele cele mai grele, pe care le au de trecut teoria sistemelor și informatica, ca să ne rezumăm numai la aceste două științe (evident, această afirmație este valabilă și pentru unele științe specializate, ca de ex. ecologia, biologia ș.a.).

De aceea se poate afirma că toate teoriile mai vechi, care nu țin seama de complexitatea sistemelor, tind să fie depășite rapid.

Noile concepte care au apărut sînt cele de: subsistem, interacțiune, descompunere, agregare, ierarhizare, descentralizare, rețele neurale, incertitudine, (algoritm de) calcul paralel, rețele de calculatoare, sisteme bazate pe cunoștințe (baza de cunoștințe + motor inferențial) etc. Este de presupus că sistemele viitorului vor fi acelea care vor reuși să organizeze și să stăpînească complexitatea (vezi și [1-5, 22]).

1.1. Sistem complex

Definiție: prin sistem complex se înțelege un sistem caracterizat printr-un mare număr de variabile de stare, interconectate printr-un mare număr de legături de interacțiune, constituind bucle "feedback - feedforward", capabile să producă comportări și efecte contraintuitive.

Analizînd atent definiția de mai sus a sistemului complex rezultă că complexitatea unui sistem derivă din următoarele elemente:

● Dimensiunea mare a sistemului, caracterizată atît prin numărul mare de variabile de stare, dar mai ales prin numărul mare de interacțiuni dintre elementele constituiente (de fapt, dintre stările sistemului). Aceasta este sursa principală a complexității unui sistem, dar nu singura, cum vom vedea mai jos.

În referatul precedent am dat o măsură a complexității unui sistem ecologic [23]. Putem generaliza acum această măsură, punînd problema de a găsi o formulă de calcul, care să ne permită a calcula complexitatea unui sistem în funcție de următoarele elemente:

- numărul de elemente (mărimi de stare);
- numărul de interacțiuni între elemente;
- numărul legăturilor de feedback.

Dacă numărul de subsisteme este n și fiecare subsistem $i(i=1, 2,....., n)$ este caracterizat de n_i mărimi de stare, rezultă:

$$C_n = \sum_{i=1}^{n} \frac{n_i(n_i-i)}{2}$$, complexitatea datorată interacțiunilor dintre mărimile de stare.

Pe de altă parte, notând cu n_f = numărul de legături feedback și cu k_f = numărul de operațiuni în conexiunea feedback, rezultă complexitatea feedback-ului:

$$C_f = \sum_{f=1}^{q} k_f \, n_f$$

Măsura complexității datorată exclusiv dimensiunii sistemului rezultă din însumarea celor două:

$$C = \sum_{i=1}^{n} \frac{n_i(n_i-1)}{2} + \sum_{f=1}^{q} k_f \, n_f$$

Așa cum am arătat și în referatul precedent, complexitatea C a sistemului depinde de gradul de agregare al sistemului: cu cît un sistem este mai agregat C scade, dar scade totodată și cantitatea și calitatea informației.

● Neliniaritatea proceselor din sistem, poate fi privită și ca o sursă de complexitate. Un proces este considerat neliniar dacă N fiind un operator care descrie procesul respectiv și x_i, x_j două mărimi de stare (implicate în proces):

$$N\left(x_i + x_j\right) \neq Nx_i + Nx_j \text{, sau}$$
$$N\left(\alpha x_i\right) \neq \alpha N x_i$$

Neliniaritatea proceselor mărește complexitatea algoritmilor de calcul utilizați și, de fapt, mărește numărul de calcule efectuate pentru a determina valoarea unei mărimi de stare, de comandă, de interacțiune (ca să nu mai vorbim și de cazul cînd efectuarea calcului nici nu este posibilă). Datorită numărului mare de neliniarități care pot apare în descrierea sistemelor,este practic imposibil să elaborăm o formulă, care să evalueze contribuția neliniarității la măsura complexității unui sistem (așa cum a rezultat în cazul dimensiunii sistemului).

De la caz la caz se poate însă evalua contribuția neliniarității la măsura complexității sistemului. Acesta este și cazul sistemelor ecologice, în a căror descriere (modelare) pot apare neliniarități ca:

$$|x| . \sqrt{x} , \sqrt{|x|} , \text{signum}\, x , x^2 , x_i , x_j / \left(x_i + x_j\right) \text{ etc.}$$

De menționat că, complexitatea calculului scade prin liniarizarea modelului, dar se pierde din calitate.

• Incertitudinea ca sursă de complexitate

În teoria sistemelor complexe [1,2] se pornește de la supoziția că mărimile caracteristice ale unui astfel de sistem nu pot fi cunoscute precis, fie că se utilizează metode deterministe, fie stocastice. Principala sursă de incertitudine sînt interacțiunile dintre subsisteme, mai greu de controlat, în timp ce caracteristicile locale/parametrii subsistemelor pot fi în mod satisfăcător măsurate/măsurați, iar prin metode adecvate de predicție, evoluția lor ar putea fi determinată (dacă interacțiunile ar fi cunoscute).

Acest aspect al complexității este bine evidențiat de principiul de incertitudine în sistemele mari, complexe, al cărui enunț este [13]:

"În sistemele mari, complexe, compuse din n subsisteme interconectate, starea x_i a sistemului i (i=1,2,.....,n) și interacțiunea v_i, dintre subsistemul i și cecelalte n-1 subsisteme, pot fi simultan determinate numai pînă la un anumit grad de acuratețe".

Acest grad de acuratețe depinde de complexitatea C a sistemului, de neliniaritățile din sistem și de gradul de cunoaștere al structurii și proceselor, care au loc în sistem (date, informații, cunoștințe). În [13] au fost evaluate incertitudinile asupra stării (Δx_i) și a interacțiunii (Δv_i), în funcție de structura sistemului complex, fapt care are o indiscutabilă importanță teoretică și practică în evaluarea intervalelor de admisibilitate, sau chiar de suboptimalitate, în care trebuie să se găsească mărimile de stare. Aplicînd această teorie în cazul unui sistem ecologic complex, de exemplu, rezultă că mărimile de stare controlate (cum ar fi: biomasele unor specii, concentrațiile de nutrienți și de poluanți etc.) trebuie să se afle în anumite intervale (x_{imin}, x_{imax}). Limitele [x_{imin} , x_{imax}] pot fi stabilite în mod teoretic, sau pot fi stabilite de către expert. Menționăm faptul că introducerea intervalelor în analiza sistemelor complexe, deși aparent mărește complexitatea calculului, în realitate o micșorează, deoarece este mai ușor de determinat o mărime care să aparțină unui interval, decît una care are o valoare dată apriori. În orice caz, în sistemele naturale, lucrul cu intervale este unanim admis ca metodologie generală de calcul.

1.2. Sistem integrat

Definiție: Prin sistem integrat se înțelege un sistem complex ale cărui subsisteme de naturi diferite (naturale, tehnice sau tehnologice, economice, sociale, etc.) interacționează în vederea atingerii unui scop și a cărui comportare nu poate fi stăpînită decît prin considerarea sistemului în ansamblu.

Exemplu care ne stă cel mai la îndemînă este sistemul mediului înconjurător, care trebuie privit și tratat ca un sistem complex integrat, avînd ca subsisteme:

- (sub)sistemul ecologic (definit în [23]);
- (sub)sistemul tehnosferei;
- (sub)sistemul economic (în care includem totalitatea activităților de producție);
- (sub)sistemul social (în care includem populațiile umane).

Faptul că aceste (sub)sisteme interacționează este clar, mai puțin clar este cum trebuie cuantificate aceste interacțiuni și mai ales cum trebuie controlate.

Pentru aceasta trebuie să înțelegem faptul că nici unul din cele 4 (sub)sisteme nu poate funcționa în absența interacțiunilor cu celelalte 3, dar tot atît de adevărat este și faptul că necontrolate, aceste interacțiuni pot deveni stânjenitoare pentru unul sau altul dintre acestea. Astfel o activitate economică, bazată pe resurse din sistemul ecologic și care exploatează necontrolat aceste resurse riscă să le epuizeze (ex. tăierea necontrolată a pădurilor, sau consumul necontrolat al apei, exploatarea exagerată a solului etc.). Tot astfel activitățile tehnosferei, care sînt în general poluante, nu trebuie scăpate de sub control, în caz contrar sistemul ecologic și cel social fiind amenințate de grave pericole (ca: poluarea aerului, apelor și solului, deteriorarea echilibrului ecologic, dispariția unor specii rare etc.).

Așadar, un sistem complex integrat (conform definiției de mai sus) trebuie tratat ca un întreg, în toată complexitatea lui. Avînd însă în vedere complexitatea deosebită a lor, o abordare frontală a problemelor privind sistemele integrate, chiar dacă ar fi posibilă, ar fi prohibitivă din cauza consumului mare de resurse umane, materiale și de timp. Deși soluțiile avute în vedere nu trebuie elaborate în timp real, totuși de multe ori, sub presiunea evenimentelor, specialistul (analistul, informaticianul) trebuie să prezinte soluțiile rapid și sub o formă rapid implementabilă. Aceasta reclamă metode și tehnici de analiză specifice (vezi cap. 2 al lucrării).

În sistemele complexe integrate există deobicei părți componente (subsisteme) vii și altele nevii, care interacționează puternic și într-un mod adesea contraintuitiv, datorită neliniarităților din sistem și a incertitudinilor despre care am vorbit. De aceea analiza sistemelor complexe integrate este o știință interdisciplinară și multidisciplinară, care apelează la cunoștințe din: teoria sistemelor, analiza și logica matematică, fizica, chimie, tehnologie, economie, sociologie, psihologie ș.a.

Pe de altă parte natura interacțiunilor dintre subsistemele sistemului complex integrat nu este nici pe departe univocă; acestea putînd reprezenta după caz: flux de energie, flux de substanță, flux de fonduri financiare etc. Chiar dacă din punct de vedere matematic ele sunt simbolizate prin litere, care pot masca adevarata seminificație a interacțiunilor, este clar că ele pot reprezenta parametrii fizici, chimici, biologici, economici, sociali etc.

Sistemele complexe integrate au deobicei o întindere geografică mare și de aceea ele au, vrînd ne-vrînd și caracteristici de sisteme teritoriale. În același timp subsistemele respective sînt dinamice și cu scări de timp multiple, în sensul ca scara de timp la care se desfășoară procesele respective diferă mult de la un (sub)sistem la altul (ex. biomasa bacteriilor dintr-un sistem ecologic variază în cîteva ore semnificativ, în tip ce populația umană crește semnificativ într-o perioadă mult mai mare de timp). Acest fapt complică simularea pe calculator a evoluției sistemului complex integrat, în care procesele interacționează.

Poate că nicăieri, mai mult decît în sistemele complexe integrate, nu este mai adevarată formula: "Întregul este mai mult decît suma părților". În adevăr un sistem complex integrat, de tipul celui prezentat mai sus, sistemul ecologic - tehnologic - economico - social, reprezintă mai mult decît suma celor 4 (sub)sisteme, acest plus rezidînd în interacțiunile dintre acestea.

Rolul factorului de decizie este tocmai acela de a controla aceste interacțiuni și de a interveni în mod benefic, prin decizii administrative, dar cu variate efecte (ecologice, tehnologice și economico-sociale).

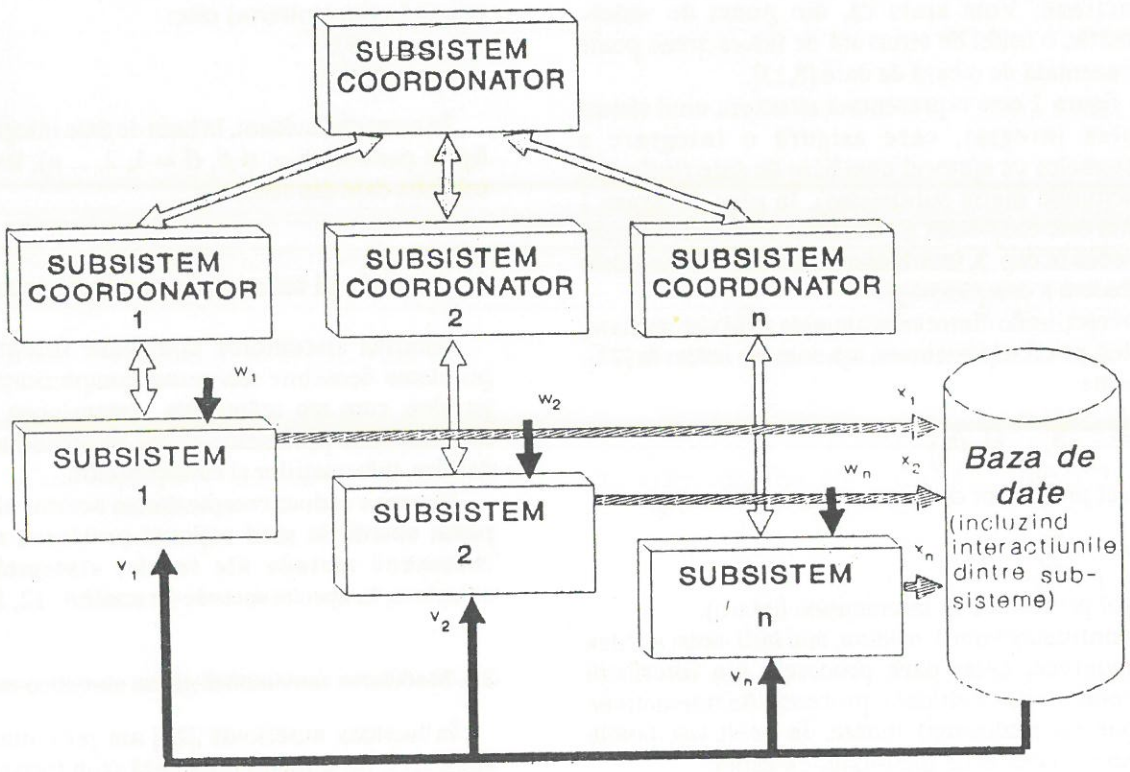

Figura 1. Structura unui sistem complex integrat

Pentru aceasta el are nevoie de sprijin în luarea deciziilor și aceasta se oferă prin ceea ce numim un SSD (Sistem pentru Sprijinirea Deciziei). În orice caz un astfel de sistem este bazat pe modele complexe, de fapt pe un sistem de modele interconectate, matematice sau statistico-matematice, reflectînd procesele ecologice, tehnologice, economice și sociale.

Trebuie să remarcăm faptul că pînă în prezent astfel de modele complexe nu s-au elaborat, dar avem în vedere elaborarea unui model de simulare a unui sistem complex integrat, care să pună accentul pe modelul (sub)sistemului ecologic, preluînd și elementele esențiale din modelele tehnologic și economico-social. Ca o concluzie la Sistemele Complexe Integrate (SCI), subliniem faptul că aceste sisteme sunt caracterizate prin:

- existența unor subsisteme de naturi diferite, care interacționează;
- comportarea SCI trebuie considerată ca un tot;
- SCI sunt sisteme cu o întindere geografică mare (sisteme teritoriale);
- subsistemele SCI sînt dinamice și au scări de timp diferite.

1.3. Integrarea cu ajutorul bazei de date

În alineatul precedent am arătat că principala caracteristică a sistemului complex integrat (SCI) este gradul ridicat de integrare a componentelor (subsistemelor) sale, cu ajutorul unei structuri de interacțiune. Vom arata că, din punct de vedere informatic, o astfel de structură de interacțiune poate fi reprezentată de o bază de date [8,13].

În figura 1 este reprezentată structura unui sistem complex integrat, care asigură o integrare a subsistemelor cu ajutorul unei baze de date (incluzînd interacțiunile dintre subsisteme). În plus, în figura 1 sistemul este considerat și ierarhizat deoarece, așa cum vom vedea în cap. 3, ierarhizarea este una din metodele de reducere a complexității.

Interacțiunile dintre subsistemele unui sistem mare, complex, pot fi reprezentate, așa cum am arătat în [23], sub forma:

$$v_i = \sum_{j=1, j=i}^{n} G_{ij}(x_j)$$

(în cazul proceselor de interacțiune neliniare) și:

$$v_i = \sum_{j=1, j=i}^{n} A_{ij}x_j$$

(în cazul proceselor de interacțiune liniare).

În continuare vom considera, mai întîi, acest al 2-lea caz, deoarece, chiar dacă procesele din interiorul subsistemelor sînt neliniare, procesele de interacțiune sînt (dar nu totdeauna) liniare. În acest caz putem reprezenta vectorul de interacțiune v astfel:

$$v = \begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ & & & \\ A_{n1} & A_{n2} & \cdots & A_{nn} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \\ x_n \end{vmatrix} = [A] \cdot [x]$$

De unde se poate vedea că integrarea sistemelor complexe integrate liniare se poate face, din punct de vedere a teoriei sistemelor sub forma matriceală; dacă matricea A este depusă în baza de date s-a realizat și integrarea informatică a sistemului.

În ipoteza că interacțiunea este neliniară (și un astfel de caz este chiar interacțiunea dintre speciile unei biocenoze), interacțiunea se realizează, din punctul de vedere al teoriei sistemelor astfel:

$$v = \begin{vmatrix} G_{11}(x_1) & G_{12}(x_2) & \cdots & G_{1n}(x_n) \\ G_{21}(x_1) & G_{22}(x_2) & \cdots & G_{2n}(x_n) \\ & & & \\ G_{n1}(x_1) & G_{n2}(x_2) & \cdots & G_{nn}(x_n) \end{vmatrix}$$

unde $G_{ij}(x_j)$ (i, j = 1, 2, ..., n) sunt funcții neliniare.

Este clar faptul că realizarea bazei de date de interacțiune este mai simplă în cazul liniar, când avem de introdus în baza elementele matricelor Aij, componentele matriceale ale matricei integratoare A. În cazul interacțiunilor neliniare, în baza de date integratoare se vor afla, în fapt, parametrii funcțiilor neliniare G_{ij}. Pentru a fixa mai bine ideile să revenim la procesul de interacțiune dintre două specii, de biomasă B_i (prada) si B_j (prădătorul); în acest caz relația de interacțiune neliniară (cunoscută și sub denumirea de relația Lotka-Volterra) este:

$$v_{ij} = \frac{\alpha_i B_i B_j}{\beta_i + B_i}$$

În acest caz, evident, în baza de date integratoare vor figura parametrii α_i și β_i (i = 1, 2, ... n), împreună cu celelalte date din sistem.

2. Metode și tehnici de analiză sistemică

Analiza sistemelor complexe integrate pune probleme deosebite din cauza complexității lor, care provine, cum am arătat, din dimensiunea mare, din neliniaritatea proceselor și din incertitudinea asupra datelor, informațiilor și cunoștințelor.

Pentru a reduce complexitatea acestor sisteme și a putea aborda în mod rațional probleme, ne stau la îndemână metode ale teoriei sistemelor mari, complexe, în special metode de analiză [12, 13, 16, 19].

2.1. Modelarea matematică și/sau statistico-matematică

În lucrarea anterioară [23] am prezentat modelul matematic de simulare dinamică (sub forma continuă și discretă) și modele de predicție, bazate pe serii de timp și modele de corelație. În realitate aceste modele nu se utilizează separat deoarece, mai ales în cazul sistemelor complexe, unele procese au un caracter dinamic și se pretează la simulare cu ajutorul modelului matematic, altele au un caracter predominant statistic (ex. parametrii abiotici) [9].

Modelul de simulare dinamic, al unui sistem complex integrat.

Introducem următoarele notații (T înseamnă "transpus"):

$$x^T = [x_1\, x_2 \ldots x_i \ldots x_n]$$

pentru vectorul de stare, în care x_i (i=1,2,...,n) sînt subvectori de stare, de dimensiuni n_i (cîte unul pentru fiecare subsistem);

$$u^T = \left[u_1\, u_2 \ldots u_i \ldots u_n\right]$$

vectorul de comandă;

$$v^T = \left[v_1\, v_2 \ldots v_i \ldots v_n\right]$$

vectorul de interacțiune.

Cu aceste notații modelul de simulare dinamică se scrie, sub forma generală vectorială astfel:

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) + F(x)\,, \qquad (1)$$

$$x(0) = x_0$$

ipoteza de lucru fiind aceea că în orice sistem complex unele procese sînt (sau pot fi tratate ca) liniare.

În ecuația vectorială (1), funcția vectorială F(x) reprezintă neliniaritățile sistemului. Dacă ținem seama și de reprezentările lui x(t) și u(t) modelul respectiv poate fi scris dezvoltat astfel:

$$\begin{vmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \dot{x}_n \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_1 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & A_2 & \ldots & 0 \\ & & & \\ & & & \\ 0 & 0 & \ldots & A_n \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} B_1 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & B_2 & \ldots & 0 \\ & & & \\ & & & \\ 0 & 0 & \ldots & B_n \end{vmatrix} \begin{vmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ u_n \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} F_1(x) \\ F_2(x) \\ \cdot \\ \cdot \\ F_n(x) \end{vmatrix} \qquad (2)$$

O altă formă, mai utilă în experimentul de simulare este forma discretă a modelului (k = pasul de discretizare):

$$\begin{vmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n(k+1) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_1 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & A_2 & \ldots & 0 \\ & & & \\ & & & \\ 0 & 0 & \ldots & A_n \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n(k) \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} B_1 & 0 & \ldots & 0 \\ 0 & B_2 & \ldots & 0 \\ & & & \\ & & & \\ 0 & 0 & \ldots & B_n \end{vmatrix} \begin{vmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \\ \cdot \\ \cdot \\ u_n(k) \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} F_1(x) \\ F_2(x) \\ \cdot \\ \cdot \\ F_n(x) \end{vmatrix} \qquad (3)$$

Pentru determinarea elementelor maticelor A_i și B_i (i=1,2,..., n) și a parametrilor funcțiilor neliniare Fi, este nevoie, nu numai de măsurători directe (sau de laborator) ci și de calcule statistice (bazate pe serii de timp, corelație etc.) pe care le-am prezentat în [23] (vezi și [18]).

2.2. Descompunerea și ierarhizarea sistemelor complexe

Ce înseamnă un sistem complet integrat (ierarhizat) am arătat în figura 1 pentru a cărei elaborare am presupus că sistemul a fost în prealabil descompus în subsisteme care interacționează [12, 17]. Acest tip de descompunere se numește descompunere funcțională și ea are la baza funcțiunile subsistemelor. În acest context ne interesează însă descompunerea sistemelor complexe integrate prin mijloacele oferite de teoria sistemelor mari, complexe, care asigură un plus de acuratețe acestei operațiuni, ea bazîndu-se pe operațiunea matematică de descompunere a funcțiilor $F_i(x)$ în două funcții:$F_i(x_i)$, care descrie neliniaritățile dependente de variabila de stare x_i și $v_i(x)$, care descrie interacțiunile (neliniare) ale (sub)sistemului. Să revenim la modelul de simulare dinamică a sistemul;ui complex integrat, scris sub forma discreta (3). În ipoteza (dealtfel plauzibilă) că funcțiile $F_i(x)$ se pot scrie aditiv: $F_i(x) = f_i(x_i) + v_i(x)$, modelul (3) se poate descompune în n submodele (cîte unul pentru fiecare subsistem), astfel:

$$x_i\,(k+1) = A_i x_i\,(k) + B_i u_i(k) + F_i\,(x_i) + v_i\,(x) \qquad (4)$$

$$x_i(0) = x_{i0}, \qquad (5)$$

$$v_i(x) = \sum_{j=1,\, j \neq i}^{n} G_{ij}\left(x_j\right) \qquad (6)$$

(i = 1,2,3,....n) unde $v_i(x)$ reprezintă interacțiunile subsistemului i cu celelalte n-1 subsisteme ale sistemului complex integrat.

Descompunerea (modelului) unui sistem complex integrat, în subsisteme (submodele) are o mare importanță practică, reducînd complexitatea calculului, a experimentului de simulare, deoarece descompunerea poate evidenția interacțiuni slabe (neglijabile) și interacțiuni liniare (ușor calculabile).

Odată descompus sistemul complex integrat, în subsisteme interconectate, ierarhizarea acestora este o operațiune tehnică, ce se efectuează așa cum am arătat în figura 1. Figura 2 arată o schemă ierarhizată a sistemului informațional.

2.3. Agregarea sistemelor complexe

Agregarea unui model, al unui sistem complex, constă în înlocuirea ecuațiilor de stare (2), (3) cu alte ecuații de stare, depinzînd de vectorii z, respectiv z_i, de dimensiune redusă (vectori de stare agregați). Cum se obțin acești vectori de stare agregați este o problemă tehnică, de calcul material, dar care ascunde un substrat fizic, tehnic sau economic (după natura variabilelor agregate).

Se introduc așa numitele matrice de agregare, pe care le notăm cu C, respectiv C_i. În continuare vom arăta cum se agrega subvectorul de stare x_i (tehnica se aplică la fel și vectorilor v, x_i, v_i, etc.); fie:

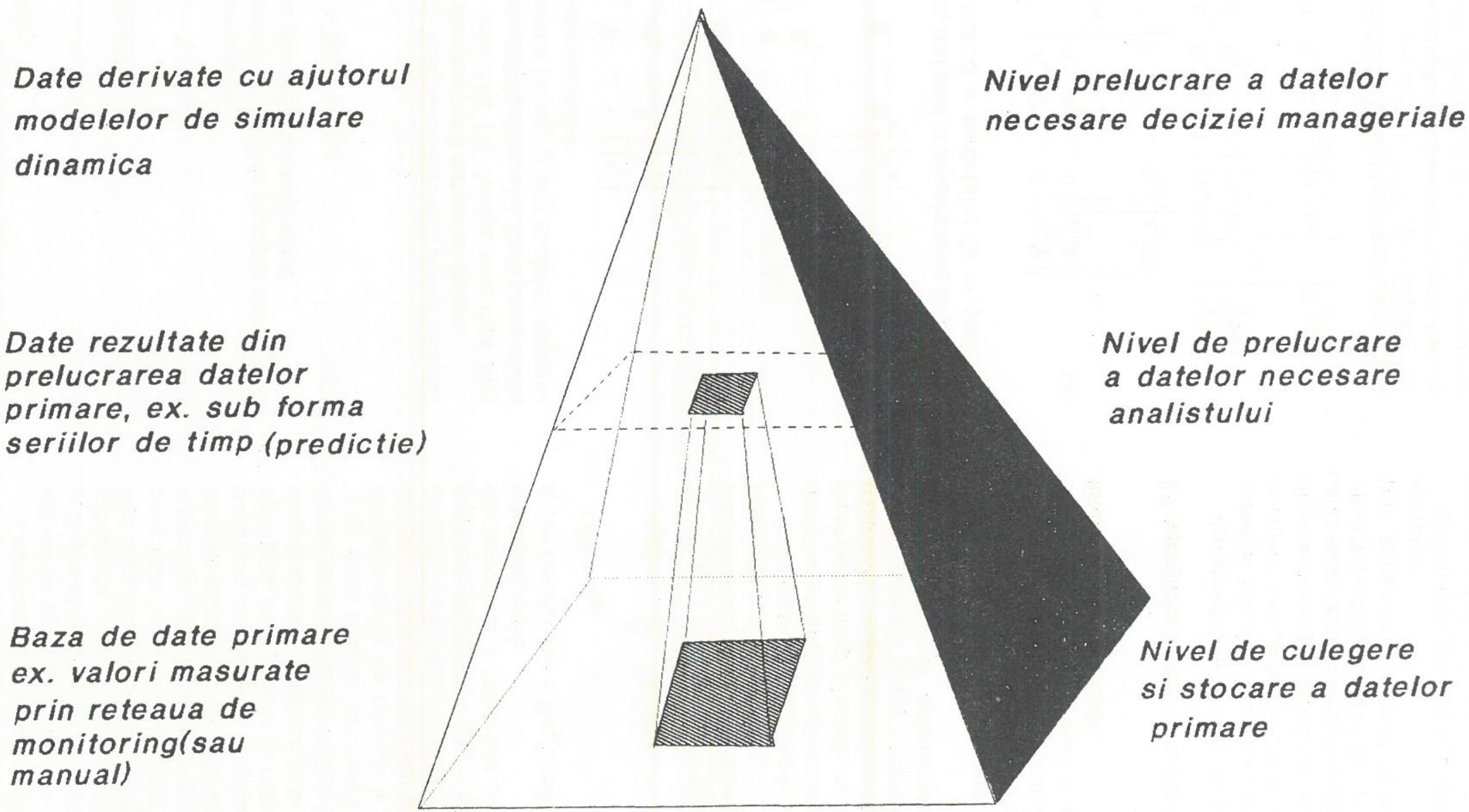

Figura 2. O schemă ierarhizată a sistemului informațional ecologic, indicînd prelucrarea orientată spre gestiunea datelor

$z_i = C_i x_i$, (7)

subvectorul de stare agregat; alegerea matricei se face astfel încît: (1) $\dim z_i < \dim x_i$; (2) agregarea elementelor vectorului x_i să cuprindă unei realități (de ex. în sistemele ecologice admitem agregarea biomasei populațiilor care aparțin aceleași specii, cum ar fi fitoplanctonul, sau descompunătorii).

Calculul componentelor lui z_i rezultă astfel:

$$z_i = \begin{vmatrix} C_i^{11} & C_i^{12} & \dots & C_i^{1n} \\ C_i^{21} & C_i^{22} & \dots & C_i^{2n} \\ \\ C_i^{m1} & C_i^{m2} & \dots & C_i^{mn} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \\ \\ x_{in} \end{vmatrix} =$$

$$= \left[\sum_{j=1}^{n} C_i^{1j} x_j \sum_{j=1}^{n} C_i^{2j} x_j \dots \sum_{j=1}^{n} C_i x_j^{mj} \right]$$

$$= \left[z_1 z_2 \dots z_m \right]$$

Rezultă așadar că vectorul agregat z_i are m componente. Dacă dorim o agregare puternică, se poate merge pînă la situația în care C_i este un vector de agregare:

$$C_i = \left[C_i^1 C_i^2 \dots C_i^n \right],$$

situație în care z_i devine un scalar:

$$z_i = \left[C_i^1 C_i^2 \dots C_i^n \right] \begin{vmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \\ \\ x_{in} \end{vmatrix} = \sum_{j=1}^{n} C_i^j x_j$$

Revenirea de la vectorul agregat z_i, la vectorul de stare neagregat x_i, se poate face în principiu, cu ajutorul operațiunii de inversare a relației (7); rezultă:

$$x_i = C_i^{\#} z_i$$

unde $C_i^{\#}$ simbolizează inversa generalizată a matricei C_i, cu precizarea că operațiunea "#" nu conduce la un rezultat univoc determinat, ceea ce induce un nou tip de incertitudine în calcul.

De aceea, cel mai corect este ca rezultatul analizei să fie prezentat și interpretat în termenii mărimilor de stare agregate.

În orice caz, este clar că agregarea variabilelor de stare constituie o metodă puternică de reducere a complexității sistemului.

2.4. Reducerea/simplificarea modelului

Prin reducerea/simplificarea modelului unui sistem complex înțelegem lăsarea deoparte, în mode deliberat, a unor variabile de stare și/sau de interacțiune, în urma analizei (inspecției) modelului. Acest lucru nu poate fi făcut decît în colaborare cu un expert, deoarece numai acesta poate evalua cît de semnificativă este o anumită variabilă în model. În orice caz, două căi ne stau la îndemînă pentru reducerea/simplificarea modelului:

- Eliminarea din model a unor variabile de stare și/sau interacțiune, operațiune care trebuie efectuată în cooperare cu un expert;
- Eliminarea din model a interacțiunilor slabe, dacă astfel de interacțiuni există.

Referitor la această a doua cale, putem face următoarea precizare importantă, revenind la modelul subsistemului i, rezultat din descompunerea sistemului complex, model pe care-l scriem ponderînd interacțiunile $v_i(x)$ cu un vector de pondere E_i:

$$x_i(k+1) = A_i x_i(k) + B_i u_i(k) + F_i(x_i) + E_i v_i(x) \quad (8)$$

cu precizarea că: $E_i < 1$. Dacă $E_i \approx 1$ se regăsește modelul (4); interacțiunile v_i sunt considerate, în acest caz, interacțiuni tari și ele nu pot fi eliminate din model. Dacă dimpotrivă $E_i < 1$, atunci interacțiunile v_i sînt considerate interacțiuni slabe și este posibilă o decuplare (totală sau parțială) a subsistemului respectiv, ceea ce pe lîngă faptul că micșorează complexitatea sistemului, reduce și pe aceea a calcului. Detalii despre acest mod de abordare pot fi găsite în [13].

3. Metode și tehnici de analiză computațională

Dintre metodele și tehnicile de analiză computațională, aplicabile la sistemele complexe, în lucrarea de față avem în vedere: metode și tehnici de simulare și metode statistice, cu mențiunea că aceste metode nu sînt disjuncte, ele putînd fi utilizate la rezolvarea unei aceleași probleme de analiză.

3.1. Metode și tehnici de simulare a sistemelor complexe

Definiție: Prin simulare a unui sistem complex înțelegem elaborarea unui model al acestui sistem (numit model de simulare) și efectuarea de experimente cu ajutorul calculatorului, utilizînd acest model.

Din definiția de mai sus rezultă cîteva elemente care constituie tot atîtea proprietăți caracteristice ale experimentului de simulare a unui sistem complex:

(1) Simularea unui sistem este o formă specifică a procesului de cunoaștere, ea putînd fi utilizată în investigarea și proiectarea sistemelor, dar și în activitatea de învățămînt și educație.

Există cel puțin două faze în cercetare, în care experimentul de simulare este de neînlocuit:

- caracterizarea stării actuale a sistemului complex simulat;

– predicția evoluției sistemului complex, inclusiv studiul stabilității sistemului.

La aceste două aplicații majore ale simulării, adăugăm și experimentul de simulare în faza de proiectare a sistemului complex, cînd acesta se află încă pe planșeta proiectantului (este vorba de sisteme create de om), scopul simulării fiind acela de a testa performanțele sistemului și de a preîntîmpina unele rezultate negative și foarte constisitoare, încă din această fază (ne gîndim la sisteme complexe ca: sisteme hidroenergetice, sisteme de protecție a mediului înconjurător, sisteme aerospațiale, nave mari, centrale atomo-electrice etc.).

(2) Subiectul simulării îl constituie sisteme complexe, în special dinamica acestora (în sensul schimbării în timp a comportării lor).

Subiectul simulării îl pot constitui sisteme complexe naturale (de exemplu simularea unui sistem ecologic) sau sisteme complexe create de om, fie că acestea există, sau sînt numai în faza de proiect.

(3) Simularea unui sistem complex se bazează pe analize și raționamente asupra sistemului simulat, cu ajutorul experimentelor în care se folosește modelul de simulare. De fapt utilizarea în experiment a modelului de simulare este ceea ce distinge simularea sistemelor de alte forme ale procesului cognitiv (de ex. experimentul de laborator). De aceea unii autori [22] consideră simularea într-un sens mai îngust, ca o metodă de investigație, de cercetare, calitativă. Pe baza rezultatelor obținute de noi, dar și de alți autori [7, 10, 14, 15, 19, 20] vom dovedi că acest punct de vedere este depășit și că la ora actuală simularea sistemelor complexe produce rezultate cantitative, efectiv utilizabile în proiectare, fundamentarea deciziilor manageriale etc.

Pentru a obține astfel de rezultate notabile simularea sistemului complex trece prin mai multe faze, și anume:

- definirea "obiectului" de simulat (sistemul complex) și delimitarea lui de exosistem;
- definirea obiectivelor experimentului de simulare (ce urmărim prin simulare: analiză, caracterizare, predicție, optimizare parametrică, optimizarea raportului cost/performanță etc.);
- analiza detaliată a sistemului de simulat (utilizînd toate metodele de analiză sistemică cunoscute);
- elaborarea modelului de simulare a sistemului complex (proiectarea modelului, identificarea modelului, colectarea datelor, implementarea modelului);
- efectuarea experimentului de simulare, cu ajutorul modelului de simulare, utilizînd un calculator electronic într-o configurație hardware adecvată;
- testarea corectitudinii (logice) a modelului de simulare a sistemului complex (prin compararea rezultatelor furnizate de model cu informațiile și cunoștințele despre sistemul simulat și dinamica sa);
- testarea vadilității modelului de simulare (prin compararea rezultatelor furnizate de model, cu cele obținute din măsurători directe, dacă sistemul simulat există);
- utilizarea modelului de simulare în aplicații curente (de tipul celor amintite mai sus).

(4) Modelul de simulare al unui sistem complex este o formă abstractă de reprezentare a cunoștințelor despre sistemul simulat (comportarea și dinamica sa).

Modelul de simulare poate îmbrăca forme foarte variate (care țin de structura sistemului simulat, de obiectivele urmărite prin simulare, de abilitatea modelistului etc.); în această lucrare vom utiliza modele de simulare dinamică (ecuații cu timp discret), cu condiții inițiale date, cărora le vom adăuga intervale (limita inferioară și superioară) de admisibilitate, sau chiar de (sub)optimalitate. Rațiunea introducerii acestor intervale (limite), în modelul de simulare este următoarea: utilizatorul rezultatelor de simulare (analist, proiectant, manager) dorește ca mărimile/variabilele de stare să aparțină unor inervale; el nu poate admite orice valori ar ieși din experimentul de simulare și de aceea experimentul trebuie reluat, cu date noi pînă ce dezideratul de mai sus este îndeplinit (de ex. ecologul dorește ca, concentrația de poluantt C să nu depășească limita superioară C_{max} deci ca $C \in [0, C_{max}])$.

3.1.1. Modelul de simulare standard

Avem acum toate elementele pentru a trece la faza de elaborare a modelului de simulare care, alături de algoritmul de simulare, este etapa cea mai importantă în experimentul respectiv, de acuratețea modelului depinzînd (evident) rezultatele obținute.

Experiența ne-a dovedit că modelul de simulare dinamică a unui sistem complex cu cea mai largă aplicabilitate este un model standard, compus din mai multe ecuații cu timp discret (cîte una pentru fiecare subsistem) de forma (4)-(6), căruia îi adăugăm intervale de (sub)optimalitate pentru variabilele de stare și restricții pentru comenzi.

În această ipoteză modelul standard propus este:

$$x_i(k+1)=A_i x_i(k)+B_i u_i(k)+F_i(x_i)+v_i(x) \quad (9)$$

$$x_i(0) = x_{i0} \quad (10)$$

$$v_i(x) = \sum_{j=1,\, j\neq i}^{n} G_{ij}\left(x_j\right) \quad (11)$$

$$x_{imin} < x_i < x_{imax} \quad (12)$$

$$u_{imin} \le u_i < u_{imax} \qquad (13)$$
$(i = 1,2,\ldots, n)$
unde simbolurile utilizate au semnificațiile date anterior, n fiind numărul de subsisteme al sistemului complex.

3.1.2. Algoritmul de simulare

Ipoteza de lucru pe care o face (de altfel singura) este că sînt date: condițiile inițiale (la t=0), matricele de stare și comandă A_i și B_i, parametrii (forma) funcțiilor neliniare F_i și G_{ij}. În această ipoteză algoritmul de simulare propus este (vezi și [14]):

Pasul 1: Se rezolvă sistemele de ecuații discrete (9)-(11), pentru i = 1, 2,...n, începînd cu modelul corespunzător subsistemului cel mai puțin interconectat cu celelalte subsisteme (în sensul că ar avea nevoie de intrări de la acestea); rezultă vectorii de stare $x_i(k)$ $\left(i=1,2,\ldots,n; k\in\left[k_0,k_f\right]\right)$

Pasul 2: Se verifică dacă variabilele de stare x_i, obținute la pasul 1, aparțin sau nu intervalelor de (sub)optimalitate (12), adică dacă: $x_i \in (x_{imin}, x_{imax})$:
- dacă DA, se trece la pasul 3!
- dacă NU, se trece la pasul 4!

Pasul 3: Se verifică dacă nu există riscul ca variabila de stare x_i să iasă din intervalul (x_{imin}, x_{imax}) la pasul de simulare următor, pentru care fapt se testează dacă:

$x_i - x_{imin} < \varepsilon$ și

$x_{imax} - x_i < \varepsilon$

(unde ε este o valoare arbitrar de mică, de ex. 10^{-2});
- dacă DA, se trece la pasul 4!
- dacă NU, se trece la pasul 5!

Pasul 4: Se evaluează o nouă valoare $u_i(k+1)$ a comenzii u_i, (ținind seama și de restricția (13), cu ajutorul formulei:

$$u_i(k+1) = u_i(k) + \Delta u_i(k),$$

unde $\Delta u_i(k)$ reprezintă o modificare a comenzii $u_i(k)$ (modificare care ține seama de legile care guvernează sistemul complex simulat și de experiența expertului, în domeniul de cercetare respectiv, ex. ecologul, în cazul sistemelor ecologice).

Se revine la pasul 1 și se reia rezolvarea sistemului (9) - (11), cu noua comandă $u_i(k+1)$ $(i = 1, 2,\ldots,n)$!

Pasul 5: STOP!

Aplicat în cazul unor sisteme ecologice complexe, atît acvatice cît și terestre, acest algoritm a condus la rezultate utilizabile de către utilizatori (ecologi, hidrologi, pedologi etc.), (ex. [14])

3.2. Metode de calcul statistic

Metoda de simulare dinamică poate fi, în mod fericit întregită cu metode de calcul statistice, acestea putînd fi și o alternativă la metoda simulării. Așadar, considerăm metodele de calcul statistic în două ipostaze:

a) Utilizarea metodelor de calcul statistic în expertimentul de simulare cu ajutorul modelului dinamic.

Modelul de simulare standard necesită date, din care unele sînt rezultatul unor măsurători directe (în teren, sau în laborator), altele trebuie calculate prin metode statistice și acestea sînt:
- medii statistice (de ex. cînd experimentul de simulare se face cu pasul k = 1 lună, atunci datele trebuie prezentate ca medii lunare);
- calculul statistic al datelor care lipsesc (de exemplu în sistemele ecologice complexe, în lunile de iarnă, decembrie - februarie, unele date abiotice sau privind biocenoza sînt greu de măsurat; metoda practicată este interpolarea lor din datele existente, lunile martie - noiembrie);
- extrapolarea unor date cu ajutorul seriilor de timp (sau cronologice; dacă dispunem de o serie de timp, cu măsurători pe un interval de timp suficient de lung, de ex. pe 10 ani, cu medii lunare, putem exprapola curba obținută din cele 120 de puncte pe o perioadă de încă 5 luni÷1 an);
- calculul funcției (curbei) de corelație, simplă sau multiplă (între un parametru și unul sau mai mulți alți parametrii), pe baza datelor prelevate cu ajutorul măsurătorilor efectuate asupra sistemului.

Menționăm că metodele de calcul statistic au fost prezentate de noi în [23].

b) Simularea cu ajutorul seriilor de timp

Există situații cînd modelul bazat pe analiza seriilor de timp poate fi utilizat, nu ca un adjuvant în simularea dinamică (deci ca furnizor de date), ci ca model de simulare, pentru predicția evoluției unor variabile de stare. Acesta este cazul în care dispunem de o serie de timp suficient de lungă, deci dispunem de un număr de măsurători suficient de mare (acest număr este dat de teoria seriilor de timp [18]).

Deoarece în această lucrare ne interesează mai ales modelarea și simularea sistemelor ecologice, nu vom insista aici asupra aspectelor matematice generale, legate de analiza seriilor de timp, ci ne vom referi la seriile de timp legate de fenomenele cu periodicitate anuală (sezonieră), cum ar fi fenomenele naturale (meteorologice, hidrologice, hidrochimice, biochimice etc.).

De-a lungul unui an fenomenul reprezentat de seria de timp are o tendință generală (seculară), în general monotonă: creștere, staționaritate, descreștere, variațiile de la an la an nefiind spectaculoase.

Valoarea înregistrată la momentul k, pentru seria de timp, poate fi descompusă astfel:

$$X(k) = T(k) + S(k) + C(k) + E(k) \qquad (14)$$

unde: X(k) este variabila a cărei predicție se urmărește.

T(k) este valoarea tendinței generale a seriei,

S(k) este valoarea componentei sezoniere,

C(k) este valoarea componentei ciclice,

E(k) este valoarea factorului aleator.

Determinarea (calculul) funcțiilor T(k), S(k), C(k) și E(k), se realizează prin calcule statistice, ele fiind funcții liniare, exponențiale, logaritmice, sau polinoame (a se vedea și [23]).

Așadar, combinînd modelul de analiză a seriilor de timp, dat în [18, 23], cu relația de calcul (14), se obține un util model de predicție prin simulare a unor mărimi de stare ale sistemelor ecologice complexe, cu sublinirea că pentru aceasta trebuie să dispunem de suficient de multe date, prelevate din măsurători, ceea ce nu este cazul întotodeauna.

4. Concluzii

În această lucrare se definesc conceptele de sistem complex și acela de sistem complex integrat și se avansează metoda integrării sistemelor complexe cu ajutorul unei baze de date integratoare, în care sînt stocate, sub forma matriceală și/sau parametrică, interacțiunile dintre subsistemele sistemului complex, considerate ca elemente de integrare.

Metodele de analiză sunt grupate în două mari capitole:

- metode și tehnici de analiză sistemică și
- metode și tehnici de analiză computațională.

Din prima categorie fac parte: modelarea matematică (dar nu exclusiv), descompunerea și ierarhizarea sistemelor, agregarea sistemelor și reducerea/simplificarea modelului, iar din cea de-a doua categorie, metodele și tehnicile de simulare a sistemelor complexe și metodele de calcul statistic (inclusiv predicția pe baza seriilor de timp). Simularea este considerată ca o metodă de cunoaștere, atît calitativă cît și cantitativă.

Bibliografie

1. SILJAK, D.D.: Complex Dynamic Systems: Dimensionality, Structure and Uncertainty. In: Large-Scale Systems, 4, 1983, pp. 179-194.
2. CASTI, J.: Connectivity, Complexity and Catastrophe in Large - Scale Systems. J. Wiley & Sons, Chichester (UK) and New York (USA), 1979.
3. SAGE, A.D.: Systems Engineering: Fundamental Limits and Future Prospects. In: Proceedings of the IEEE, Vol. 69, No.2, 1981, pp. 158-166.
4. DRENICK, R.F.: Large-Scale System Theory in the 1980's. In: Physica, 50, 1991, pp. 341-366.
5. JACKSON, E.A.: On the Control of Complex Dynamic Systems. In: Physica, 50, 1991, pp. 341-366.
6. BENVENISTE, A. et al: Multiscale System Theory. Rapport de Recherche no. 1194, INRIA, mars 1990.
7. STREJE, V.: Mathematical Modelling of Large-Scale Systems. In: Proceedings of IFAC Symposium on LSSTA (Zürich), Pergamon Press, Oxford, 1986, pp. 1-9.
8. ZENKIN, C.V.: A Methodology for Building a Data Base for Large-Scale Simulation Model. In: Proceedings of IFAC Symposium on LSSTA (Zürich), Pergamon Press, Oxford, 1986, pp. 543-548.
9. VEMURI, V.: Modelling of Complex Systems. Acamedic Press Inc., New York, 1978.
10. LINDEN, J. et al: Methodological Aspects of High Performance Scientific Computing. In: A. Sydow (Ed.) Computational Systems Analysis, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1992, pp. 1-10.
11. BORNE, P. et al: On Some Recent Results in the Field of Constrained Dynamical Systems. In: A. Sydow (Ed.) Computational Systems Analysis, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1992, pp. 29-38.
12. SINGH, M., TITLI, A.: Decomposition and Control. Pergamon Press, London, 1978.
13. STĂNCIULESCU, F.: Dinamica sistemelor mari. Editura Academiei Române, București, 1992.
14. STĂNCIULESCU, F.: Principles of Modelling and Simulation of Large-Scale and Complex Systems. Applications in Ecology. In: Systems Analysis, Modelling, Simulation, 3, 1985, pp. 409-423.
15. WENZEl, V. et al: An Interactive Simulation System for Design, Validation and Usage of Ecosystem Models. In: Proceedings of 2nd International Symposium System Analysis and Simulation, Berlin, 1985, Vol. 2, pp. 120-123.
16. VIDYASAGAR, M.: Input - Output Analysis of Large-Scale Interconnected Systems, Springer-Verlag, New York, 1981.
17. ARAKI, M. et al: Generalized Decompositions for Transient Stability Analysis. In: Large-Scale Systems, 3, 1982, pp. 111-122.
18. BOX, G. E. P., JEKINS, G. M.: Time Series Analysis: Forecasting and Control. Holden Day, San Francisco, 1976.
19. SYDOW, A.: System Analysis at ZKI. 2nd International Symposium System Analysis and Simulation, Berlin, 1985.
20. SCHEL, T. et al: An Approach to the Simulation of Heterogeneous Systems. In: A. Sydow (Ed.) Computational Systems Analysis. Elsevier Science Publishers.

21. GERARDIN, L.A.: How complex is complex? In: Large-Scale Systems, 2, 1981, pp. 45-63.

22. KOTVA, M.: New Version of the Agreement on Understanding the Notion "Simulation of Systems". In: Proceedings of European Congress on Simulation, Vol. A, Academia Praha, 1987, pp. 263-266.

23. WEINGÄRTNER, J.: Sistemul ecologic ca sistem informațional complex. Referatul nr. 1 (în cadrul activității de doctorat), mai 1993.

Cheia reuşitei în afaceri
este
INFORMAŢIA

Sunteţi convinşi de aceasta?

DA.

* Nu ştiţi însă cum să obţineţi informaţia necesară, cum să o prelucraţi şi cum să o folosiţi în folosul dumneavoastră?
* Aveţi o idee, o propunere şi doriţi ajutorul unui specialist pentru a o finaliza?
* Aveţi o soluţie dar nu ştiţi cui să vă adresaţi ca să o aplicaţi în practică?

NU.

* Aveţi totuşi curiozitatea să vedeţi un sistem informatic la lucru (şi să-i constataţi eficienţa)?

RĂSPUNSUL ESTE:

Consultanţă
Tehnologie de vârf
Transfer de cunoştinţe
Soluţii prompte
Sisteme la cheie
Decizii optime

adică:

CENTRUL DE TRANSFER TEHNOLOGIC PENTRU SISTEME SUPORT DE DECIZIE

? **CTT - SSD** !

TECHNOLOGICAL TRANSFER CENTER FOR DECISION SUPPORT SYSTEMS

ÎNCERCAŢI! Veţi fi uimiţi ce răspunsuri simple sunt la problemele dumneavoastră.

O vizită la sediul institutului va fi benefică atât pentru dumneavoastră cât şi pentru noi.

D&B/27