TEORIA GENERALĂ A SISTEMELOR APLICATĂ SISTEMELOR TERMODINAMICE

Gheorghe DUMITRU

UNIVERSITATEA „Dunărea de Jos" din Galați

Abstract. *In this paper there is transformed mathematical models of the thermodynamic processes in the appearance of the models used in system theory. This has permitted, mostly to solve easier the analysis and synthesis of the automatic control of the thermodynamic systems.*

1. INTRODUCERE

Noțiunea de sistem, în accepțiunea generală, are caracteristicile sistemului termodinamic definit în forma cea mai generală în termodinamică [1], [2], prin care sistemul termodinamic este o porțiune finită din univers format din corpuri și câmpuri, mărginită de o suprafață de control, prin care se realizează interacțiuni cu mediul exterior, având diverse contacte distincte.

Sistemele termodinamice actuale se definesc considerându-se spațiile fizice închise de suprafața de control zero-dimensionale (0-D), unidimensionale (1-D), bidimensionale (2-D) sau tridimensionale (3-D).

În termostatică se consideră sistemul termodinamic (S.T.) zero-dimensional, în care de fapt pot avea loc procese termodinamice multivariabile, după numărul contactelor distincte cu mediul exterior. Aceste tipuri de S.T. pot fi liniare sau neliniare, multivariabile, care, din perspectiva teoriei generale a sistemelor, pot fi studiate sistematic si coerent, cu implicații deosebite în controlul automat al proceselor termodinamice [4], [5], [6].

Considerarea S.T. cu parametri distribuiți, formate din medii continue, prezintă dificultăți mai mari în evaluarea pe baza teoriei generale a sistemelor, pentru care s-au dezvoltat metode speciale de analiză [7].

2. MODELUL SISTEMULUI TERMODINAMIC ZERO-DIMENSIONAL MULTIVARIABIL

Considerând S.T. cu parametri concentrați, cu mai multe contacte distincte independente cu exteriorul, ecuațiile proceselor termodinamice deterministe, care constituie modelul matematic al acestora, sunt: ecuația principiului I al termodinamicii, pentru S.T. din spațiul de control:

$$\frac{dE}{d\tau}=\frac{\delta Q_0}{d\tau}+\sum_m\frac{\delta Q_m}{d\tau}+\sum_k\frac{dm_{1k}}{d\tau}\left(h_{1k}+\frac{c_{1k}^2}{2}+gz_{1k}\right)-$$
$$-\sum_e\frac{dm_{2e}}{d\tau}\left(h_{2e}+\frac{c_{2e}}{2}+gz_{2e}\right)- \qquad (1)$$
$$-\sum_i\frac{\delta L_{ext.util.i}}{d\tau}-\sum_i p_o dV_i-\sum_j\frac{\delta L_{teh.j}}{d\tau}$$

sau

$$\frac{dE}{d\tau}=\dot{Q}_o+\sum_m\dot{Q}_m+\sum_k\dot{m}_{1k}\left(h_{1k}+\frac{c_{1k}^2}{2}+gz_{1k}\right)-$$
$$-\sum_e\dot{m}_{2e}\left(h_{2e}+\frac{c_{2e}^2}{2}+gz_{2e}\right)- \qquad (1')$$
$$-\sum_i P_{ex.util.i}-p_o\dot{V}-\sum_j P_{teh.j}$$

în care: E(J) – energia S.T. din spațiul de control considerat, care poate avea o mișcare generală în câmpul gravitațional; $\dot{Q}_o\,(J/s)$ – fluxul de căldură schimbat cu mediul exterior care are temperatura T_o = ct.; $\dot{Q}_m$ (J/s) – fluxul de căldură schimbat cu sursa caldă cu temperatura $T_m^{(e)}$ = ct.; $\dot{m}_{1k}$ (kg/s) – debitul masic de substanță ce pătrunde în S.T. prin poarta "k"; m_{2e} (kg/s) – debitul masic de substanță ce iese din S.T. prin poarta "e"; $P_{ext.util.i}=\int_{Vi}(p-p_0)dV_i$ – schimbul de putere utilă cauzat de modificarea de volum al S.T.; $\sum_i\left(p_0\frac{dV_i}{d\tau}-p_0\frac{dV_{i0}}{d\tau}\right)=-p_0\frac{dV}{d\tau}=p_0\dot{V}$ – schimbul de putere efectuat cu mediul exterior caracterizat de p_o = ct, T_o = ct., cauzat de creșterea de volum a spațiului de control al S.T., $\frac{dV}{d\tau}$; ecuația principiului II al termodinamicii: pentru S.T. lărgit cu considerarea și a mediului exterior cu sursele lui de căldură care se caracterizează prin temperatura constantă și capacitatea lor calorică infinită (cu considerarea ireversibilităților interne și externe)

$$\frac{dS_{gen}}{d\tau}=\frac{dS_{S.T.}}{d\tau}-\frac{\dot{Q}_o}{T_o}-\sum_m\frac{\dot{Q}_m}{T_m^{(e)}}-\sum_k\dot{m}_k s_{1k}+\sum_e\dot{m}_{2e}s_{2e}\geq 0, \qquad (2)$$

pentru S.T. închis în spațiul de control la care contactele termice se fac la nivelul temperaturilor fluidului de lucru (fără a considera ireversibilitatea externă). Înmulțind ecuația (1) cu T_0 și adunând cu ecuația (2) obținem ecuația bilanțului exergetic cu considerarea tuturor tipurilor de ireversibilitate (interne și externe), pentru S.T.

$$\frac{dE}{d\tau}+T_o\dot{S}_{gen}=T_0\frac{dS_{ST}}{d\tau}+\sum_m\dot{Q}_m\left(1-\frac{T_0}{T_m^{(e)}}\right)+$$
$$+\sum_k\dot{m}_{1k}\left(h_{1k}-T_0s_{1k}+\frac{c_{1k}^2}{2}+g_iz_k\right)-$$
$$-\sum_e\dot{m}_{2e}\left(h_{2e}-T_0s_{2e}+\frac{c_{2e}^2}{2}+gz_{2e}\right)- \qquad (2')$$
$$-\sum_j P_{teh.j}-\sum_i P_{ext.util.i}-p_o\dot{V}$$

sau

$$\sum_j P_{teh.j}+\sum_i P_{ext.util.i}=-\frac{d}{d\tau}(E-T_0S)+\sum_m\dot{Q}_m\left(1-\frac{T_0}{T_m^{(e)}}\right)+$$
$$+\sum_k\dot{m}_{1k}\left(h_{1k}-T_0s_{1k}+\frac{c_{1k}^2}{2}+gz_k\right)-$$
$$-\sum_e\dot{m}_{2e}\left(h_{2e}-T_0s_e+\frac{c_{2e}^2}{2}+gz_{2e}\right)-p_0\dot{V}-T_0\dot{S}_{gen}$$

sau

$$\dot{E}_{disp}=-\frac{d}{d\tau}(E_{ex.ST})+\sum_m\dot{E}_{ex}\dot{Q}_m+ \qquad (2'')$$
$$+\sum_k\dot{m}_{1k}\dot{e}_{1k}-\sum_e\dot{m}_{2e}\cdot\dot{e}_{2e}$$

în care: $\dot{E}_{disp}$ = $P_{max.disp.}$ (W) – fluxul de energie corespunzător puterii mecanice produsă în exterior prin variație de volum sau la arbori; $\dot{E}_{ex.ST}$ (W) – variația în timp a exergiei fluidului din spațiul de control al S.T. care poate avea și o miscare față de un sistem de referință fix; $\dot{E}_{ex.\dot{Q}_m}$ (W) – fluxul de energie corespunzător fluxului de căldură $\dot{Q}_m$ care se află la nivelul de temperatură $T_m^{(e)}$; $\dot{e}_{ex.1k}$ (J/kg) – exergia totală specifică a fluxului de masă admis în spațiul de control S.T. prin poarta "k"; $\dot{e}_{ex.2e}$ (J/kg) – exergia totală specifică a fluxului de masă evacuat din spațiul de control al S.T. prin poarta "e"; $\dot{E}_{ex.ST}=E+p_oV-T_oS$ (W); $\dot{e}_{ex}=e_{ex}+\frac{c^2}{2}+gz$ (J/kg); V (m^3) – volumul spațiului de control al S.T. la momentul considerat; S (J/K) – entropia S.T. în spațiul de control; E (J) – energia totală S.T. din spațiul de control.

Relațiile găsite sunt foarte generale putând fi particularizate și pentru sistemele termodinamice închise (S.T.Î.) și pentru S.T.D. obișnuite (fără deformarea frontierei spațiului de control). Ecuațiile principiilor I și II ale termodinamicii și ale bilanțurilor exergetice se pot scrie și în cazul cel mai general al proceselor termodinamice caracterizate de contactul termic și "n" contacte netermice printre care contactul mecanic, contactele de substanță (transfer de masă), etc., rezultând ca urmare și noțiunea de exergie generalizată a fluidului și în general a S.T. Astfel se pot scrie: – ecuația principiului I al termodinamicii:

$$\sum_m\frac{\delta Q_m}{d\tau}=\frac{dU}{d\tau}+p^{(e)}\frac{dV}{d\tau}+\sum_{i=1}^{n-1}A_i^{(e)}\frac{da_i}{d\tau}+$$
$$+\sum_{i=1}^{n-1}\mu_i^{(e)}\frac{d_en_i}{d\tau}-\sum_{j=1}^{k_1}A_{rj}\frac{d\lambda_j}{d\tau} \qquad (3)$$

– ecuația principiului II al termodinamicii:

$$\frac{dS}{d\tau}\equiv\frac{d_eS}{d\tau}+\frac{d_iS}{d\tau}=\sum_m\frac{1}{T_m^{(e)}}\frac{\delta Q_m}{d\tau}+$$
$$+\sum_{i=1}^{k_2}s_i^{(e)}\frac{d_en_i}{d\tau}-\sum_{j=1}^{k_1}s_j\frac{d_rn_j}{d\tau}+\frac{dS_{gen.}}{d\tau}, \qquad (4)$$

sau

$$\frac{dS}{d\tau}=\sum_m\frac{1}{T_m^{(e)}}\frac{\delta Q_m}{d\tau}+\sum_{i=1}^{k_2}s_i^{(e)}\frac{d_en_i}{d\tau}+\sum_{j=1}^{k_1}\Delta s_j\frac{d\lambda_j}{d\tau}+\frac{dS_{gen.}}{d\tau}, \qquad (4')$$

în care: $\Delta S_j=-\left(\sum_{i=1}^{k}\nu_{ij}s_i-\sum_{i=k+1}^{k_2}\nu_{i,j}s_i\right)$

– variația entropiei ce însoțește reacția independentă "j";

$$A_{rj}=\left(\sum_{i=1}^{k}\nu_{i,j}s_i-\sum_{i=k+1}^{k_2}\nu_{i,j}\mu_i\right)$$

– afinitatea chimică a reacției independente "j".

Înmulțind ecuația principiului II cu T_0 și adunând-o la ecuația primului principiu rezultă ecuația bilanțului exergetic pentru procese ireversibile:

$$\frac{dU}{d\tau}+T_0\frac{dS_{gen}}{d\tau}=\sum_m\frac{\delta Q_m}{d\tau}\left(1-\frac{T_0}{T_m^{(e)}}\right)+T_0\frac{dS}{d\tau}-$$
$$-p^{(e)}\frac{dV}{d\tau}-\sum_{i=1}^{n-1}A_i^{(e)}\frac{da_i}{d\tau}-$$
$$-\sum_{i=1}^{k_2}\left(\mu_i^{(e)}-T_0s_i^{(e)}\right)\frac{d_en_i}{d\tau}+\sum_{j=1}^{k_1}\left(A_{rj}-T_o\Delta S_j\right)\frac{d\lambda_j}{d\tau}$$

sau:

$$T_0\frac{dS_{gen}}{d\tau}=-\frac{d(U-T_0S)}{d\tau}+$$
$$+\sum_m\frac{\delta Q_m}{d\tau}\left(1-\frac{T_0}{T_m^{(e)}}\right)-p^{(e)}\frac{dV}{d\tau}-\sum_{i=1}^{n-1}A_i^{(e)}\frac{da_i}{d\tau}- \qquad (4'')$$
$$-\sum_{i=1}^{k_2}\left(\mu_i^{(e)}-T_0s_i^{(e)}\right)\frac{d_en_i}{d\tau}+\sum_{j=1}^{k_1}\left(A_{rj}-T_0\Delta S_j\right)\frac{d\lambda_j}{d\tau}\geq 0$$

<u>Componentele exergiei</u> pentru un S.T., în absența efectelor nuclear, electric, magnetic și a tensiunilor superficiale, sunt:

$$e_{ex}=e_{ex.fizic}+e_{ex.cin}+e_{ex.pot}+e_{ex.chimic}, \qquad (5)$$

în care: $e_{ex.fizic}=(u-u_o)+p_0(v-v_0)-T_0(s-s_0)$ – exergia fizică specifică a fluidului ca S.T.Î.; $e_{ex.fizic}=(h-h_0)+(v-v_0)-T_0(s-s_0)$ – exergia fizică specifică a fluidului în curgere, S.T.D.; $e_{ex.cin}=\frac{c^2}{2}$ – exergia cinetică; $e_{ex.pot}$ = gz – exergia potențială; $e_{ex.chim}$ – exergia chimică specifică a S.T.

Pentru a închide modelul matematic al S.T. trebuie adăugate:

– ecuațiile bilanțului masic:

$$\frac{dn_i}{d\tau} = \frac{d_e n_i}{d\tau} + \sum_j \frac{dn_{ij}}{d\tau}; \quad i = 1,\ldots,k, \tag{6}$$

– ecuațiile termice de stare:

$$A_i = A_i(T, V, a_i, n_i, \lambda_j); \quad i = 1,\ldots,n, \tag{7}$$

– ecuația calorică de stare:

$$U = U(T, V, a_i, n_i, \lambda_j); \text{ sau } H = H(T, p, a_i, n_i, \lambda_j), \tag{8}$$

în care H este entalpia; condițiile inițiale și de frontieră.

În locul ecuațiilor termice și a ecuațiilor calorice de stare se poate folosi una dintre funcțiile caracteristice dintre care poate fi considerată și exergia, care însă este definită legând-o de starea de referință adoptată pentru mediului exterior.

Din relațiile anterioare se identifică usor parametrii de stare ai sistemului temodinamic, mărimile de intrare, dintre care unii pot fi controlati din exterior și mărimile de ieșire printre care identificăm și parametrii de performanță ai proceselor (randamentul exergetic, etc). Rezultă că pot fi definiți parametrii care definesc S.T. în accepțiunea teoriei sistemelor.

În cazul unui sistem cu parametrii constanți de tipul intrare-stare-ieșire (structural – funcțional), modelul matematic este potrivit S.T. și mai exact și eficient în identificarea comportării proceselor. Dacă notam prin U spațiul funcțiilor de intrare, prin Y spațiul funcțiilor de ieșire, cu $\vec{u}$ vectorul mărimilor de intrare $\vec{u}(t) = [u_1 u_2 u_m]^T$ sau cu $\vec{y}$ mărimile de ieșire $\vec{y}(t) = [y_1 \ldots y_p]^T$, atunci pot fi definite relațiile dintre variabilele de intrare și stare, respectiv relațiile intre variabilele de ieșire și variabilele de stare $\vec{x}(t) = [x_1 \ldots x_n]^T$, unde vectorul de stare $\vec{x}(t) \in R^n$. Spațiul stărilor X este spațiu euclidian n dimensional R^n, $X = R^n$, spațiul intrarilor este spațiul m dimensional R^m. Spațiul U al funcțiilor de intrare este mulțimea funcțiilor continue $\vec{u}(\bullet): R \to R^m$. Valoarea $u(t) \in R^m$ a funcției de intrare $\vec{u}(\bullet) \in U$ la momentul $t \in T = R$ se numește intrarea la momentul t, aceasta fiind selectată din clasa funcțiilor admisibile (a parametrilor) de intrare Ω. Spațiul ieșirilor este spatiul euclidian p – dimensional R^p. Spațiul Y al funcțiilor de ieșire este mulțimea funcțiilor continue $\vec{y}(\bullet): R \to R^p$. Valoarea $\vec{y}(t) \in R^p$ a funcției de ieșire $\vec{y}(\bullet) \in Y$ la momentul $t \in R$ se numește <u>ieșire la momentul t</u>. Variabilele de stare ale unui sistem reprezintă un set de parametri (o mulțime de parametri) care caracterizează complet starea sistemului în următorul sens: dacă la orice timp $t_0 \in T$, valorile variabilelor de stare $\vec{x}_i(t_0)$ sunt cunoscute, atunci ieșirea $\vec{y}(t_1)$ și valorile $\vec{x}_i(t_1)$, pot fi determinate pentru orice timp $t_1 \in T$, $t_1 > t_0$, în condițiile cunoașterii comenzii $\vec{u}(t)$, $t \in [t_0, t_1]$. Astfel, pentru fiecare domeniu de intrare definit pe intervalul de timp $[t_0, t_1]$ și pentru orice $t_0 \in T$ si $t > t_0$ cu $t \in T$, mulțimea minimă de parametri $\vec{x}_i(t_0)$ care reprezintă variabilele de stare (parametrii de stare independenți), determină unic un domeniu al parametrilor de ieșire considerat. Definiția dată variabilelor (parametrilor) de stare implică existența unei transformări de tipul: φ: T x T x X x U → X; unde φ poartă denumirea de funcție de tranziție a procesului (<u>funcția de transformare tranzitorie a procesului</u>);

$$\vec{x}(t_1) = \phi[t_0, t_1, \vec{x}(t_0), \vec{u}(t_0, t_1)], \tag{9}$$

Dacă $\vec{y}(t_1)$ este unic determinată, există o a doua transformare:

$$\vec{y}(t_1) = \eta[t_1, \vec{x}(t_1), \vec{u}(t_1)], \tag{10}$$

care poartă denumirea de <u>funcție de ieșire a stărilor sau funcția parametrilor de</u> ieșire ai procesului din sistemul considerat, măsurabili. Cu notațiile anterioare, relațiile (9) si (10) pot fi rescrise sub forma:

$$\begin{aligned} \vec{x}(t) &= \varphi(t, t_0, \vec{x}_0, \vec{u}(\bullet)); \\ \vec{y}(t) &= \eta[t, \vec{x}(t)] = \\ &= \eta[t, \phi(t, t_0, \vec{x}_0, \vec{u}(\bullet)] \overset{\Delta}{=} f[t, t_0, \vec{x}_0, \vec{u}(\bullet)] \end{aligned} \tag{11}$$

în care: $\vec{u}(\bullet)$ – reprezintă evoluția parametrilor de intrare în sistem în intervalul de timp $[t_0, t]$. Dacă se introduce notația $f(t_0, \vec{x}_0)(t, \vec{u}(\bullet)) = f[t, t_0, \vec{x}_0 \vec{u}(\bullet)]$ pentru $t_0 \in T$, $\vec{x} \in X$, atunci parametrii de ieșire ai sistemului (procesului) capătă forma: $\vec{y}(t) = f_{(t_0, \vec{x}_0)}[t, \vec{u}(\bullet)]$, iar sistemul poate fi reprezentat, în cazul unui sistem multivalent, ca în fig.1.

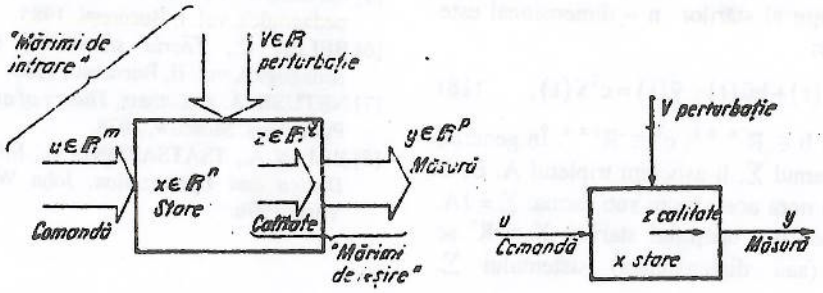

Fig. 1. Schema echivalenta a S.T.

Sistemele dinamice continue cu parametrii concentraţi pot fi reprezentate în formalismul intrare- stare - ieşire printr-un sistem de ecuaţii diferenţiale de ordinul întâi şi un sistem de ecuaţii algebrice:

$$\dot{\vec{x}} = \vec{g}[\vec{x}, \vec{u}, t]\ ; \quad \vec{y} = \vec{h}[\vec{x}, \vec{u}, t], \qquad (12)$$

în care: $\vec{g}$ - funcţie vectorială, în general neliniară; $\vec{h}$ - funcţie vectorială, în general neliniară. Soluţia unică pentru $(t, \vec{x}_0)$, $\vec{x}_0(t)$ în cazul ecuaţiei (11) cu o intrare continuă este:

$$\vec{x}(t) = \vec{x}(t_0) + \int_{t_0}^{t} \vec{g}[\vec{x}(\tau), \vec{u}(\tau), \tau] d\tau, \qquad (13)$$

Ecuaţiile (11), (12) sunt neliniare, însă pentru cazul particular al sistemelor liniare (liniarizate) modelul matematic capătă forma:

$$\dot{\vec{x}}(t) = A(t) \cdot \vec{x}(t) + B(t)\vec{u}(t);$$

$$\vec{y}(t) = C(t) \cdot \vec{x}(t) + D(t) \cdot \vec{u}(t), \qquad (14)$$

care pentru sisteme liniare invariante în timp capătă aspectul:

$$\dot{\vec{x}}(t) = A\vec{x}(t) + B\vec{u}(t);\ \vec{y}(t) = C\vec{x}(t) + D\vec{u}(t), \qquad (15)$$

în care: A, B, C şi D sunt matrici care aparţin spaţiilor: $A \in R^{n \times m}$ matricea coeficienţilor; $B \in R^{n \times m}$ matricea de comanda; $C \in R^{p \times n}$ matricea de ieşire; $D \in R^{p \times n}$ matricea de transfer; n – numărul variabilelor de stare; m – numărul parametrilor de intrare; p – numărul de parametri de ieşire.

Forma uzuală a modelului matematic pentru un sistem liniar, invariant în timp şi multivariabil este:

$$\dot{\vec{x}}(t) = A\vec{x}(t) + B\vec{u}(t);\ \vec{y}(t) = C\vec{x}(t) \qquad (16)$$

Pentru un sistem în care parametrii de intrare, de stare şi de ieşire capătă valori discrete (sunt mărimi discretizate în timp), modelul matematic capătă forma:

$$\vec{x}(k+1) = A(k)\vec{x}(k) + B(k)\vec{u}(k);$$

$$\vec{y}(k) = C(k)\vec{x}(k), \qquad (17)$$

în care: A(k), B(k), C(k) – matrici cu valori discrete similare celor cu valori continue A(t), B(t), C(t); T = Z – mulţimea numerelor întregi; k – reprezintă un moment de timp definit prin $t_k = t_0 + k\Delta t$, $k \in Z$, $\Delta t = T$ – intervalul de timp de discretizare.

Un sistem monovariabil, liniar, invariant, cu o intrare (un parametru de intrare), o ieşire (un parametru de ieşire) şi un spaţiu al stărilor n – dimensional este definit prin ecuaţiile:

$$\dot{\vec{x}}(t) = A\vec{x}(t) + b\vec{u}(t);\ \vec{y}(t) = c^T\vec{x}(t), \qquad (18)$$

în care: $A \in R^{n \times n}$; $b \in R^{n \times 1}$; $c^T \in R^{1 \times n}$. În general, pentru a defini sistemul Σ, îi asociem tripletul A, B, C sau A, b, c^T şi vom nota acest lucru sub forma: $\Sigma = (A, B, C)_n$. Dimensiunea n a spaţiului starilor $X = R^n$ se numeşte ordinul (sau dimensiunea) sistemului Σ. În planul fazelor traiectoria stării sistemului considerat dată de $\vec{x}_0(0) = \vec{x}_0 \in X$ si funcţia de intrare $\vec{u}(0) \in U$ este:

$$x(t) = \varphi[t, \vec{x}_0, \vec{u}(\bullet)] = e^{At}\vec{x}_0 + \int_0^t e^{(t-\tau)A} Bu(\tau) d\tau, \qquad (19)$$

în care:

$$\varphi(t) = e^{tA} = \sum_0^{\infty} \frac{t^i}{i!} A^i,\ t \in R\ ;\ A^\circ = I \text{ (matricea unitate)}, \qquad (20)$$

$\varphi(t) \in R^{n \times n}$ – matricea de tranziţie a lui Σ, care descrie tranziţiile sistemului Σ liber cu intrare nulă. Pentru S.T. liniare continue şi discrete se pot aplica metodele de analiză şi sinteză, în vederea stabilirii: comportării dinamice cu analiza stabilităţii proceselor; proiectarea optimală a unui regulator automat de conducere; proprietăţilor structurale; realizabilităţii; estimării stărilor sistemului; stabilizării sistemelor etc. Similar în cazul S.T. neliniare se pot studia foarte bine problemele: stabilităţii sistemelor; optimizării proceselor termodinamice fară restricţii; optimizării proceselor termodinamice cu restricţii etc.

CONCLUZII

Modelele matematice ale proceselor termodinamice din S.T. zero-dimensionale, monovariabile sau multivariabile, liniare sau neliniare, continue sau discrete, pot fi aduse la formele folosite în teoria generală a sistemelor [4], [5], [6], care pun la dispozitie metode specifice de analiză şi sinteză a acestora în vederea optimizării proceselor cât şi pentru conducerea automată a acestora prin metode specializate.

Modele matematice similare pot fi găsite şi pentru optimizarea termoeconomică a S.T., modelul anterior fiind completat de modelul care permite analiza economică şi termoeconomică a acestora [7].

BIBLIOGRAFIE

[1] BAEHR H.D., *Thermodynamik*, Springer Verlag, Berlin/ Heidelberg/ New York, 1966.

[2] BAZAROV I.P., *Termodinamica*, Editura Tehnică, Bucureşti, 1962.

[3] GABOS Z., GHERMAN O., *Termodinamica şi fizica statistică*, Editura Didactică şi Pedagogică, Bucureşti, 1967.

[4] ZADEH L.A., POLAK E., ş.a., *Teoria sistemelor*, Editura Tehnică, Bucureşti, 1985.

[5] IONESCU V., *Teoria sistemelor*, Editura didactică şi pedagogică, vol. I, Bucureşti, 1985.

[6] BELEA C., *Teoria sistemelor*, Editura didactică şi pedagogică, vol. II, Bucureşti, 1985.

[7] NETUSIL A. and others, *Theory of automatic Control*, Mir Publishers, Moscow, 1978.

[8] BEJAN A., TSATSARONIS G., MORAN M.J., *Thermal Design and Optimization*, John Wiley and Sons, New York, 1996.