CONSIDERAŢII EXERGOECONOMICE ASUPRA SISTEMELOR ENERGETICE COMPLEXE

Al. DOBROVICESCU

UNIVERSITATEA POLITEHNICA din Bucureşti

Abstract. *The aim of this work is to bring an argument on behalf of the use of the exergy concept in the operating and optimization analysis of energetic complex systems. To assess the proper unitary cost to each one of the several products of a complex system, the economic global balance equation of the system must be completed with additional conditions.*

The exergetic equivalence succeeds in bringing to the same level different types of energy; by this way the cost assessing gets closer to reality. The extraction method and the principal product hypothesis can also be considered. For a single product system, the optimization procedure based only on the first principle of thermodynamics leads to extremely difficult calculations. The use of the exergy concept in this last case represents a useful instrument that can lead to the decentralization of the complex system making possible the local optimization of the productive zones.

Notaţii

C	cost (EU, kJ energie/exergie)
c	cost unitar (EU/kJ energie/exergie), căldură specifică (J/(kg K))
$\dot{C}$	cost anual (EU/an)
Cb	combustibil (EU, kJ energie/exergie), cameră de ardere (combustor)
Cd	condensator
E	energie (kJ)
Ex	exergie (kJ)
G	generator de abur
K	compresor
L	Lagrangian
$\dot{m}$	debit masic (kg/s)
p	presiune (N/m^2)
R	constanta particulară a gazului (J/(kg K))
Q	căldură (kJ)
$\dot{Q}$	flux de căldură (kW)
T	temperatură (K), turbină
x	parametru decizional
X	set de parametrii decizionali
y	parametru de stare
$\dot{Z}$	rata anuală a amortizării capitalului (EU/an)
z	funcţia care exprimă rata anuală a amortizării capitalului
$\dot{W}$	putere mecanică (kW)
W	energie mecanică (kJ)

Indici inferiori

a	aer
cb	combustibil, combustor
e	energetic, ieşire
el	electric
ex	exergetic
f	fix
G	generator de abur
k	compresor
0	parametrii mediului ambiant
p	presiune constantă
Q	căldură
T	turbină
W	energie mecanică (kJ)

Indici superiori

*	exergetic
k	exponent adiabatic

Litere greceşti

ε	funcţia de calcul a fluxului de exergie
Φ	condiţie restrictivă
Φ_0	funcţie obiectiv
η	randament energetic, isentropic
λ	multiplicator Lagrange, preţ de umbră, cost unitar
π_{cb}	$= p_3/p_2$
π_k	$= p_2/p_1$
π_T	$= p_3/p_1$
θ	preţ marginal
τ	timp de operare (s/an)
τ_i	$= T_i/T_1$

1. ATRIBUIREA COSTURILOR DE OPERARE

Pentru defini mai clar obiectul de studiu, cursul de „Analiză termoeconomică a sistemelor şi proceselor termice şi frigorifice" pe care-l predau în cadrul ciclului de studii aprofundate studenţilor Facultăţii de Inginerie Mecanică din Universitatea Politehnica din Bucureşti, îl încep cu discuţia unui caz simplu, cel al unui sistem de cogenerare lucru mecanic (energie electrică) şi căldură (energie termică), reprezentat printr-o instalaţie de turbină cu abur cu contrapresiune (fig. 1).

Pentru simplitate se ia în considerare numai costul operării sistemului încercându-se determinarea costului unitar real al fiecăruia dintre cei doi produşi. Acest lucru nu înseamnă altceva decât precizarea cantităţii de combustibil consumat de către sistemul global pentru realizarea fiecărei unităţi de produs.

Sistemului global i se poate aplica o singură ecuaţie de bilanţ economic

$$C_{cb} = C_W + C_Q \tag{1}$$

care conţine două necunoscute: costul lucrului mecanic C_W şi costul căldurii C_Q.

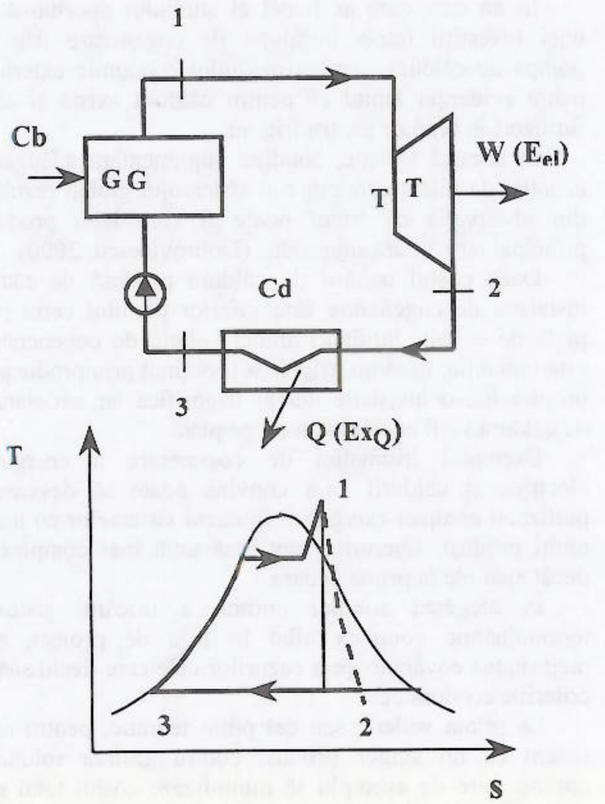

Fig. 1

Pentru precizarea valorii numerice a celor două variabile mai este necesară o condiţie.

1.1. Echivalenţa energetică

Luând în considerare numai primul principiu al termodinamicii care nu face nici o diferenţă calitativă între diferitele tipuri de energii şi folosind aceeaşi unitate de măsură, se pot considera lucrul mecanic şi căldura ca fiind echivalente.

Costul energetic unitar al fiecăruia dintre cei doi produşi devine:

$$c_e = \frac{C_{cb}}{|Q| + W} \left[\frac{EU}{kWh}\right] \tag{2}$$

şi în consecinţă

$$C_W = c_e \cdot W \; [EU]$$
$$C_Q = c_e \cdot |Q| \; [EU] \tag{3}$$

Din ecuaţia de bilanţ energetic al sistemului

$$\eta_G \cdot C_{cb} = W + |Q| \tag{4}$$

se obţine

$$c_e = \frac{C_{cb}}{W + |Q|} = \frac{1}{\eta_G} = ct. \tag{5}$$

Rezultă că în cazul echivalenţei energetice costul unitar al energiei produse nu este influenţat de nivelul temperaturii la care se furnizează căldura (corespunzătoare presiunii p_2 din condensator) sau de performanţele turbinei, nesesizând în cazul acesteia din urmă, pierderile interne prin care parte din energia mecanică se transformă în căldură de frecare.

Costul energetic unitar depinde numai de pierderile externe ale generatorului de vapori (ardere incompletă, izolare termică incompletă etc.) exprimate prin randamentul termic η_G.

Se ajunge astfel la concluzia paradoxală de a atribui un cost şi deci o valoare de întrebuinţare unei călduri aflate la temperatura mediului ambiant pentru care economic este evident că nu se va găsi nici un cumpărător.

1.2. Echivalenţa exergetică

Keenan (1932) este considerat a fi primul care a propus utilizarea echivalenţei termodinamice (bazate atât pe primul cât şi pe cel de al doilea principiu al termodinamicii), numită mai târziu *echivalenţă exergetică*.

Keenan consideră că o parte din potenţialul energetic ce poate suferi o schimbare (exergia) a combustibilului se transformă în produsul care părăseşte sistemul iar altă parte este consumată (distrusă) în procesul de producţie.

Valoarea produsului la rândul său este exprimată prin capacitatea sa de a produce o schimbare (exergia produsului) iar costul său trebuie exprimat prin combustibilul consumat de sistem pentru realizarea acestui potenţial la care trebuie adăugat combustibilul consumat în procesul productiv.

Este evident că atunci când energia este utilizată în atribuirea costurilor, este imposibil a se ţine cont de combustibilul consumat în interiorul sistemului pentru realizarea produsului, deoarece energia se conservă.

În condiţiile echivalenţei termodinamice (exergetice) costul exergetic unitar al fiecăruia dintre cei doi produşi devine

$$c_{ex} = \frac{C_{cb}}{|Ex_Q| + W} \left[\frac{EU}{kWh\ exergie}\right] \tag{6}$$

în care exergia căldurii transferate consumatorului la temperatura T este

$$|Ex_Q| = |Q|\left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \tag{7}$$

Se observă că prin evaluarea exergetică, valoarea de utilizare a căldurii este determinată funcţie de cantitatea sa $|Q|$, de parametrul său de calitate T în corelaţie cu temperatura T_0 a mediului său ambiant.

Costul realizării celor doi produşi devine în acest caz

$$C^*_{El} = c_{ex} \cdot W \; [EU]$$
$$C^*_Q = c_{ex} \cdot |Ex_Q| \; [EU] \tag{8}$$

În cazul echivalenţei exergetice costul exergetic unitar scade la creşterea temperaturii (respectiv p_2) a căldurii furnizate consumatorului datorită creşterii în ansamblu a exergiei celor doi produşi.

Simpla analiză a operării sistemului de cogenerare considerat, arată cu claritate că în cazul existenței mai multor produși, pentru atribuirea corectă a costului fiecăruia dintre ei, ecuația de bilanț economic scrisă la nivelul global trebuie completată cu condiții suplimentare.

În cazul echivalenței energetice analiza se oprește la granița de separare dintre sistem și mediul său ambiant. În consecință sunt sesizate numai pierderile externe, cele interne nefiind luate în calcul. În plus datorită ignorării deosebirii calitative a diferitelor tipuri de energii se ajunge la situația imposibilă a atribuirii aceluiași cost unității de energie electrică și celei de căldură aflată la temperatura T_0 a mediului ambiant.

Numai echivalența exergetică reușește să aducă la același numitor diferitele tipuri de energie, costurile atribuite lor în acest mod apropiindu-se de realitate.

Dar analiza exergoeconomică este mult mai complexă decât cea termodinamică chiar dacă acesta din urmă apelează la cel de al doilea principiu.

Exergoeconomia, care reunește două tehnici de investigație reprezentate prin analiza termodinamică a proceselor ireversibile și analiza economică, se bazează pe observația că orice sistem termodinamic se găsește în interacțiune cu două medii înconjurătoare:

– *mediul său ambiant* caracterizat printr-un set de parametri (presiune, temperatură, potențial chimic) care oferă posibilitatea de a determina valorile termodinamice ale curenților de masă sau energie care traversează granițele sistemului;

– *mediul său economic* caracterizat printr-un set de prețuri care constituie baza de calcul a valorilor economice asociate curenților de masă sau energie care traversează granițele sistemului; acest mediu, la care se adaugă efectul de corodare a capitalului în timp, este construit în întregime de societate și se află sub influența schimbărilor politice și sociale.

Din punct de vedere al modului de investigare se remarcă următoarele:

- analiza cu ajutorul primului principiu al termodinamicii nu implică niciunul din cele două medii;
- studiul bazat pe cel de al doilea principiu ia în considerare numai mediul fizic, scoțând în evidență oportunitatea conservării energiei combustibilului, fără a face legătura cu mediul economic;
- numai analiza termoeconomică implică ambele medii, constituind singurul mod de studiu al comportării unui sistem în condiții reale.

Dacă analiza termodinamică se bazează pe legile universale ale naturii, lipsite fiind deci de orice echivoc, în cazul analizei economice soluțiile pot fi diferite și discutabile funcție de deciziile economice care depind de mecanismele de piață, de politicile economice și sociale.

De exemplu, atunci când pentru instalația de cogenerare studiată pe lângă costul operării se ia în calcul și costul amortizării capitalului investit, metoda „extracției" (Gaggioli și El-Sayed, 1987; Lozano, 1992) care consideră că costul exergiei cedate de vapori în turbină plus amortizarea turbinei trebuie să se regăsească în prețul energiei electrice produse, poate constitui condiția suplimentară pentru determinarea costului unitar al celor doi produși.

În alt caz, cum ar fi cel al studiului oportunității unei investiții într-o instalație de cogenerare frig – pompă de căldură, analiza mediului economic exterior poate evidenția faptul că pentru căldură există și alți furnizori în timp ce pentru frig nu.

În această situație, condiția suplimentară adăugată ecuației de bilanț economic al sistemului global rezultă din observația că frigul poate fi considerat produs principal iar căldura subprodus (Dobrovicescu, 2000).

Dacă costul unității de căldură produsă de către instalația de cogenerare este inferior prețului cerut pe piață de ceilalți furnizori atunci soluția de cogenerare este rentabilă; dacă nu, frigul va fi obținut prin producție proprie într-o instalație numai frigorifică iar necesarul de căldură va fi achiziționat de pe piață.

Exemplul instalației de cogenerare a energiei electrice și căldurii ne-a convins poate să devenim partizanii analizei exergetice în cazul sistemelor cu mai mulți produși. Lucrurile sunt însă mult mai complexe decât apar ele la prima vedere.

În alegerea soluției optime a oricărui sistem termodinamic complex aflat în faza de proiect, în majoritatea covârșitoare a cazurilor cele care decid sunt criteriile economice.

La prima vedere, sau cel puțin teoretic, pentru un sistem cu un singur produs, pentru găsirea soluției optime, care de exemplu să minimizeze costul total al sistemului atât din punct de vedere al operării cât și al investiției, nu este nevoie de calcul exergetic.

2. OPTIMIZAREA TERMOECONOMICĂ A UNUI SISTEM DE TURBINĂ CU GAZE

Se consideră cazul unei instalații simple de turbină cu gaze (fig. 2) al cărui unic produs este energia mecanică.

Investitorul precizează puterea mecanică $\dot{W}$ (produsul sistemului) și indică amplasamentul sistemului, oferind astfel informații asupra parametrilor mediului ambiant.

În aceste condiții parametrii impuși ai sistemului devin:

$$\{x_f\} = \{p_1, T_1, \dot{W}, \tau, R, c_p\}$$

Restul parametrilor sistemului se pot împărți în două categorii:

- *parametrii independenți* din a cărei categorie fac parte parametrii de echipament sau decizionali;
- *parametrii dependenți* sau de stare a căror valoare individuală poate fi calculată funcție de parametrii decizionali și de ceilalți parametri de stare.

Notând cu x_i parametrii decizionali și cu y_k pe cei de stare, aceștia devin:

$$\{x_i\} = \{\eta_k, \pi_k, \pi_{cb}, \tau_3, \eta_T\}$$

$$\{y_k\} = \{\tau_2, \dot{Q}_{cb}, \pi_T, \tau_4, \dot{m}_a\}$$

Soluția optimă se obține prin minimizarea funcției obiectiv care exprimă costul anual format din amortizarea echipamentelor și costul combustibilului procesat,

$$\text{Min}\dot{C} = (\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_3) + \tau \cdot c_{cb} \cdot \dot{Q}_{cb} \left[\frac{EU}{an}\right] \quad (9)$$

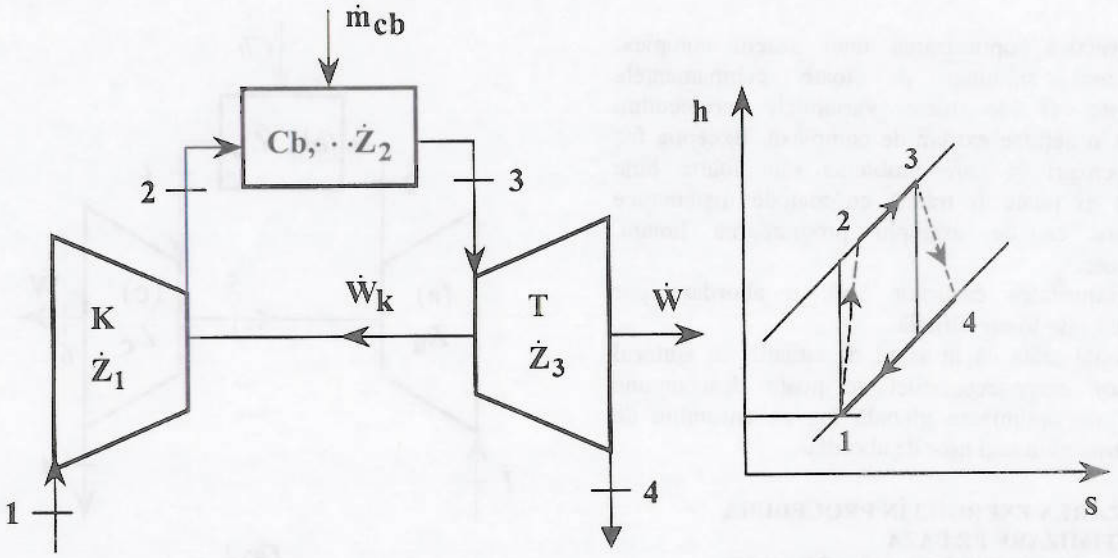

Fig. 2

în care amortizarea anuală $\dot{Z}(x_i, y_k)$ a fiecărui echipament este exprimată funcţie de parametrii de decizie şi de stare (Frangopoulos, 1983).

Minimizarea funcţiei obiectiv (9) se realizează în condiţiile unui set de constrângeri obţinut prin transpunerea comportării fizice a sistemului într-un model matematic.

Ecuaţiile de constrângere derivă din relaţiile de calcul ale parametrilor de stare şi sunt următoarele:

$$\Phi_1 = \tau_2 - 1 - \frac{1}{\eta_k}\left(\pi_k^{\frac{k-1}{k}} - 1\right) = 0 \qquad (10)$$

$$\Phi_2 = \dot{Q}_{cb} - \dot{m}_a \cdot c_p \cdot T_1(\tau_3 - \tau_2) = 0 \qquad (11)$$

$$\Phi_3 = \pi_T - \pi_k \cdot \pi_{cb} = 0 \qquad (12)$$

$$\Phi_4 = \tau_4 - \tau_3\left[1 - \eta_T\left(1 - \pi_T^{\frac{1-k}{k}}\right)\right] = 0 \qquad (13)$$

$$\Phi_5 = \dot{m}_a - \frac{\dot{W}}{c_p \cdot T_1(1 - \tau_2 + \tau_3 - \tau_4)} = 0 \qquad (14)$$

Elementele modelului matematic supus optimizării includ funcţia obiectiv

$$\text{Min}\ \dot{C}(x_1, ..., x_n, y_1, ..., y_m) \qquad (15)$$

în condiţiile restrictive

$$\Phi_k = y_k - g_k(x_1, ..., x_n, y_1, ..., y_{k-1}, y_{k+1}, ..., y_m) = 0 \qquad (16)$$

ceea ce conduce la construirea Lagrangianului

$$\dot{L} = \dot{C} + \sum_{k=1}^{5} \lambda_k \cdot \Phi_k \qquad (17)$$

Condiţiile de extrem sunt date de sistemul

$$\frac{\partial \dot{L}}{\partial x_i} = \frac{\partial \dot{C}}{\partial x_i} + \sum_{k=1}^{m} \lambda_k \frac{\partial \Phi_k}{\partial x_i} = 0 \quad (i = 1, ..., n) \qquad (18)$$

$$\frac{\partial L}{\partial y_k} = \frac{\partial \dot{C}}{\partial y_k} + \sum \lambda_k \frac{\partial \Phi_k}{\partial y_k} = 0 \quad (k = 1, ..., m) \qquad (19)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_k} = \Phi_k = y_k - g_k(x_1, ..., x_n, y_1, ..., y_m) = 0$$

$$(k = 1, ..., m) \qquad (20)$$

Sistemul de ecuaţii (18 – 20) este un sistem determinat oferind $(n+2m)$ ecuaţii pentru n parametri decizionali, m parametri de stare şi m multiplicatori λ.

În realitate, rezolvarea sistemului este extrem de anevoioasă, soluţia se poate obţine numai numeric ea depinzând de găsirea unui punct operaţional iniţial viabil, apropiat de optim.

Pentru simplificarea procedurii de calcul El-Sayed şi Tribus (1983) propun o metodologie interesantă bazată pe conceptele de „preţ marginal" $\left(\theta_i = \partial\dot{C}/\partial x_i\right)$ şi „preţ de umbră" $\left(\lambda_k = \partial\dot{C}/\partial y_k\right)$.

Bazat pe acestea, variaţia costului total (funcţia obiectiv) devine egală cu suma produselor dintre preţurile marginale şi variaţia deciziilor şi produsele dintre preţurile de umbră şi variaţia parametrilor de stare corespunzători.

$$\delta\dot{C} = \sum \theta_i \cdot \delta x_i + \sum \lambda_k \cdot dy_k \qquad (21)$$

Relaţia (21) permite estimarea impactului modificării unui parametru decizional sau a unei condiţii de constrângere, impusă de exemplu de modificări în configuraţia sistemului, asupra costului total al sistemului.

Exemplul instalaţiei de turbină cu gaze evidenţiază faptul că în cazul unui sistem cu un singur produs, precizarea soluţiei funcţionale şi constructive optime, poate fi cel puţin teoretic, obţinută fără a apela la cel de al doilea principiu al termodinamicii şi la conceptul de exergie.

Încercarea de optimizare globală a sistemului conduce însă la calcule anevoioase făcând apel la numeroase analize simplificatoare.

În practică, optimizarea unui sistem complex, ţinând cont simultan de toate echipamentele componente şi de toate variabilele proiectului, reprezintă o acţiune extrem de complexă. Excepţie fac puţinele cazuri în care problema este foarte bine cunoscută şi poate fi tratată cu metode matematice specializate ca de exemplu programarea liniară, dinamică etc.

În majoritatea cazurilor însă, o abordare pur matematică este foarte dificilă.

Se poate arăta că în astfel de situaţii, cu ajutorul conceptelor exergoeconomiei se poate descompune problema de optimizare globală într-un ansamblu de subprobleme mult mai uşor de abordat.

3. UTILIZAREA EXERGIEI ÎN PROCEDURA DE OPTIMIZARE PE BAZA MULTIPLICATORILOR LUI LAGRANGE

Strategia utilizată în acest caz implică împărţirea sistemului în zone care interacţionează între ele şi cu mediul exterior, cumpărând şi vânzând bunuri de întrebuinţare şi servicii.

Monitorizarea şi evaluarea acestor interacţiuni constituie procedura de localizare a optimului funcţional şi constructiv al sistemului.

În cazul proiectării sistemului pentru a consuma minim de combustibil, termodinamica indică fără echivoc o soluţie total reversibilă, fără distrugere de exergie.

Din păcate această variantă implică teoretic un capital investit infinit.

Rezultă deci evident, că procedura de căutare a optimului economic al sistemului global, se bazează pe relaţia antagonistă dintre costul capitalului (inclusiv întreţinere, mână de lucru, taxe etc.) şi costul exergiei distruse.

Dar aceeaşi interacţiune antagonistă există în fiecare zonă a sistemului impunând luarea deciziei corecte privind costul investiţiei locale de capital şi mărimea acceptată a distrugerii de exergie.

Procedura de optimizare va căuta în spaţiul soluţiilor fezabile acele cazuri pentru care creşterea cheltuielii cu capitalul investit atrage o reducere mai importantă a costului exergiei distruse.

Trebuie remarcat din nou că exergia este o măsură a valorii de întrebuinţare potrivită procedurilor de optimizare, deoarece în procesele productive spre deosebire de energie ea se consumă (se distruge) şi nu se conservă.

Studiul se realizează pe acelaşi sistem al instalaţiei de turbină cu gaze (fig. 3) în care zonele a, b, c corespund în ordine compresorului, camerei de ardere şi respectiv turbinei.

Un obiectiv tipic al procedurii de optimizare ar fi minimizarea costului total al investiţiei de capital şi operării sistemului în condiţiile unei producţii precizate de energie mecanică $\dot{W} = \dot{E}x_6$ (unicul produs al sistemului).

Costul total al sistemului este suma costurilor totale ale zonelor componente.

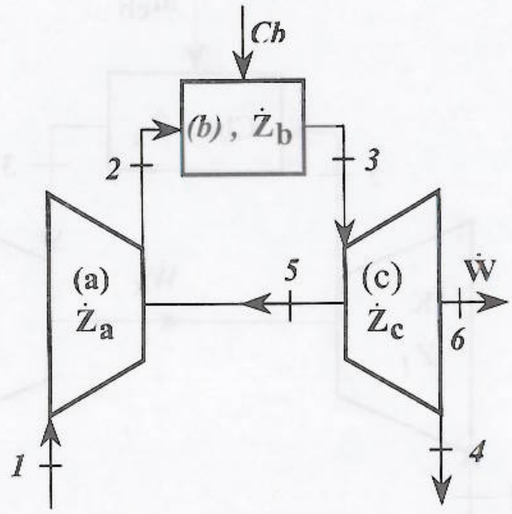

Fig. 3

Costul total al zonei reprezintă suma dintre capitalul investit şi cheltuielile cu exergia cumpărată din care se scade venitul obţinut prin vânzarea exergiei produsului.

Dacă cu $\dot{E}x$ se notează fluxul de exergie vândut, şi dacă ε simbolizează fluxul de exergie cumpărat, iar λ este preţul asociat (fig. 3) fiecărui flux de exergie, costurile zonale devin:

$$\dot{C}_a = \dot{Z}_a + \lambda_5 \cdot \varepsilon_5 - \lambda_2 \cdot \dot{E}x_2 \tag{22}$$

$$\dot{C}_b = \dot{Z}_b + c_{cb} \cdot \dot{Q}_{cb} + \lambda_2 \cdot \varepsilon_2 - \lambda_3 \cdot \dot{E}x_3 \tag{23}$$

$$\dot{C}_c = \dot{Z}_c + \lambda_3 \cdot \varepsilon_3 - \lambda_5 \cdot \dot{E}x_5 - \lambda_5 \cdot \dot{E}x_6 \tag{24}$$

Deoarece procedura de optimizare a sistemului global se desfăşoară în condiţiile unui produs $\left(\dot{E}x_6\right)$ şi preţ de vânzare asociat acestuia $\left(\lambda_5\right)$ fixe, termenul $\lambda_5 \dot{E}x_6$ poate fi omis din ecuaţia (24).

Prin însumarea costurilor zonale, costul sistemului global devine:

$$\begin{aligned} \dot{C} &= \dot{C}_a + \dot{C}_b + \dot{C}_c = \dot{Z}_a + \dot{Z}_b + \dot{Z}_c + \\ &+ c_{cb} \cdot \dot{Q}_{cb} + \lambda_2\left(\varepsilon_2 - \dot{E}x_2\right) + \lambda_3\left(\varepsilon_3 - \dot{E}x_3\right) + \\ &+ \lambda_5\left(\varepsilon_5 - \dot{E}x_5\right) \end{aligned} \tag{25}$$

Se observă că în fiecare termen care se referă la o tranzacţie internă cantitatea de exergie vândută $\dot{E}x$ de către o zonă trebuie să fie egală cu cantitatea de exergie ε cumpărată de către altă zonă. Astfel toţi aceşti termeni ai ecuaţiei (25) au valori nule. Valorificarea schimburilor economice interne se realizează pe baza setului de preţuri $\{\lambda\}$.

Termenii care nu se anulează reprezintă tranzacţiile sistemului cu mediul exterior şi suma lor reprezintă costul total al operării şi al investiţiei de capital.

Ţinând cont de aceste observaţii, relaţia (25) devine:

$$\dot{C} = \sum \dot{Z} + c_{cb} \cdot \dot{Q}_{cb} + \sum \lambda_k \left(\varepsilon_k - \dot{E}x_k\right) \tag{26}$$

Forma ecuaţiilor (25) şi (26) corespunde structurii cerute de metoda optimizării pe baza multiplicatorilor lui Lagrange.

Tranzacţiile cu mediul exterior precizează funcţia obiectiv Φ_0 supusă optimizării (minimizării), iar schimburile economice interne împreună cu preţurile asociate lor definesc condiţiile restrictive Φ_k şi multiplicatorii lui Lagrange λ_k asociaţi lor.

Costul total al sistemului global poate fi exprimat prin Lagrangianul

$$\dot{L} = \Phi_0 + \sum_{k=1}^{n} \lambda_k \cdot \Phi_k \qquad (27)$$

În această interpretare ecuaţiile de constrângere $\Phi_k = 0$ sunt date de diferenţa dintre fluxul de exergie $\dot{E}x_k$ (cu rol de variabilă de stare) şi funcţia matematică care-l defineşte ε_k.

Optimizarea sistemului se reduce la:

- minimizarea funcţiei obiectiv $\Phi_0(x_i, \dot{E}x_k)$;
- în condiţiile setului de constrângeri $\Phi_k(x_i, \dot{E}x_k) = 0$,

unde x_i sunt variabile de decizie (independente), iar $\dot{E}x_k$ variabile de stare.

Ecuaţiile de constrângere mai pot fi scrise sub forma

$$\Phi_k = \varepsilon(x_i, \dot{E}x_{j \neq k}) - \dot{E}x_k = 0 \qquad (28)$$

Pentru aplicarea în această formă a procedurii de optimizare bazată pe multiplicatorii lui Lagrange, parametrii de stare (y_k) trebuie transformaţi în mărimi exergetice.

3.1. Aplicarea metodei descompunerii

Exprimarea matematică a descompunerii sistemului în zone disipative este posibilă în condiţiile în care costurile investiţionale şi de operare sunt exprimate prin funcţii continue.

În aplicarea metodei descompunerii (El-Sayed şi Evans, 1970) pentru fiecare zonă disipativă (i), fluxurile de exergie intrate (cumpărate) ε şi costul investiţiei zonale $\dot{Z}_i$, vor fi exprimaţi în funcţie de parametrii decizionali locali ai zonei $\{x_i\}$ şi de exergia fluxurilor de ieşire (produşi) $\dot{E}x$.

În instalaţia de turbină cu gaze analizată, compresorul şi camera de ardere au scopul comun de a furniza turbinei la intrare agent de lucru de entalpie (exergie) ridicată fapt care determină gruparea lor într-o singură zonă productivă (zona 1). Turbina care are rolul de a transforma căderea de entalpie (exergie) în putere mecanică va constitui cea de a doua zonă (zona 2).

În figura 4 este prezentată schema instalaţiei globale.

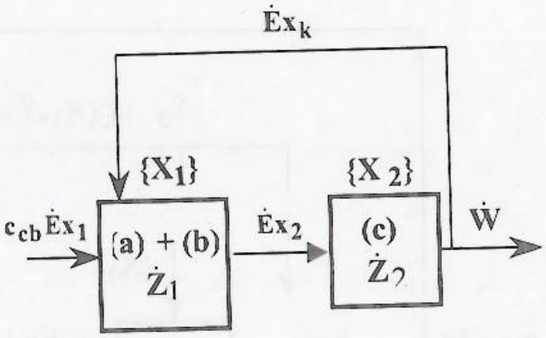

Fig. 4

Conform ipotezei adoptate în cadrul metodei descompunerii, costurile investiţiilor zonale şi ecuaţiile de constrângere devin:

$$\dot{Z}_1 = z_1(X_1, \dot{E}x_2) \qquad (29)$$

$$\dot{Z}_2 = z_2(X_2, (\dot{E}x_k + \dot{W})) \qquad (30)$$

$$\dot{E}x_1 = \varepsilon_1(X_1, \dot{E}x_2) \qquad (31)$$

$$\dot{E}x_2 = \varepsilon_2(X_2, (\dot{E}x_k + \dot{W})) \qquad (32)$$

$$\dot{E}x_k = \varepsilon_k(X_1, \dot{E}x_2) \qquad (33)$$

$$\dot{E}x_3 = \dot{W} \qquad (34)$$

Instalaţia de turbină cu gaze descompusă în zone disipative este data în figura 5.

Funcţia obiectiv de minimizat este costul total al sistemului global

$$\dot{C} = c_{cb} \cdot \dot{E}x_1 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 \qquad (35)$$

Ţinând cont de relaţia (35), de condiţiile restrictive (31) – (33) şi de funcţiile (29) şi (30), se construieşte Lagrangianul

$$\dot{L} = c_{cb} \cdot \dot{E}x_1 + z_1 + z_2 + \lambda_1(\varepsilon_1 - \dot{E}x_1) + \lambda_2(\varepsilon_2 - \dot{E}x_2) + \lambda_3(\varepsilon_k - \dot{E}x_k) \qquad (36)$$

Condiţiile necesare de minim pentru funcţia obiectiv $\dot{C}$ sunt:

$$\frac{\partial \dot{L}}{\partial X_1} = \frac{\partial}{\partial X_1}(z_1 + \lambda_1 \cdot \varepsilon_1 + \lambda_3 \cdot \varepsilon_k) = 0 \qquad (37)$$

$$\frac{\partial \dot{L}}{\partial X_2} = \frac{\partial}{\partial X_2}(z_2 + \lambda_2 \cdot \varepsilon_2) = 0 \qquad (38)$$

$$\frac{\partial \dot{L}}{\partial \dot{E}x_1} = 0 \Rightarrow c_{cb} = \lambda_1 \qquad (39)$$

$$\frac{\partial \dot{L}}{\partial \dot{E}x_2} = 0 \Rightarrow \frac{\partial}{\partial \dot{E}x_2}(z_1 + \lambda_3 \cdot \varepsilon_k + \lambda_1 \cdot \varepsilon_1) = \lambda_2 \qquad (40)$$

$$\frac{\partial \dot{L}}{\partial \dot{E}x_k} = 0 \Rightarrow \frac{\partial}{\partial \dot{E}x_k}(z_2 + \lambda_2 \cdot \varepsilon_2) = \lambda_3 \qquad (41)$$

Ecuaţiile (37) şi (38) reprezintă condiţiile necesare de minim ale costurilor totale locale ale zonelor 1 şi 2 în raport cu parametrii decizionali ai acestor zone, în condiţiile preţurilor unitare λ ale exergiilor cumpărate.

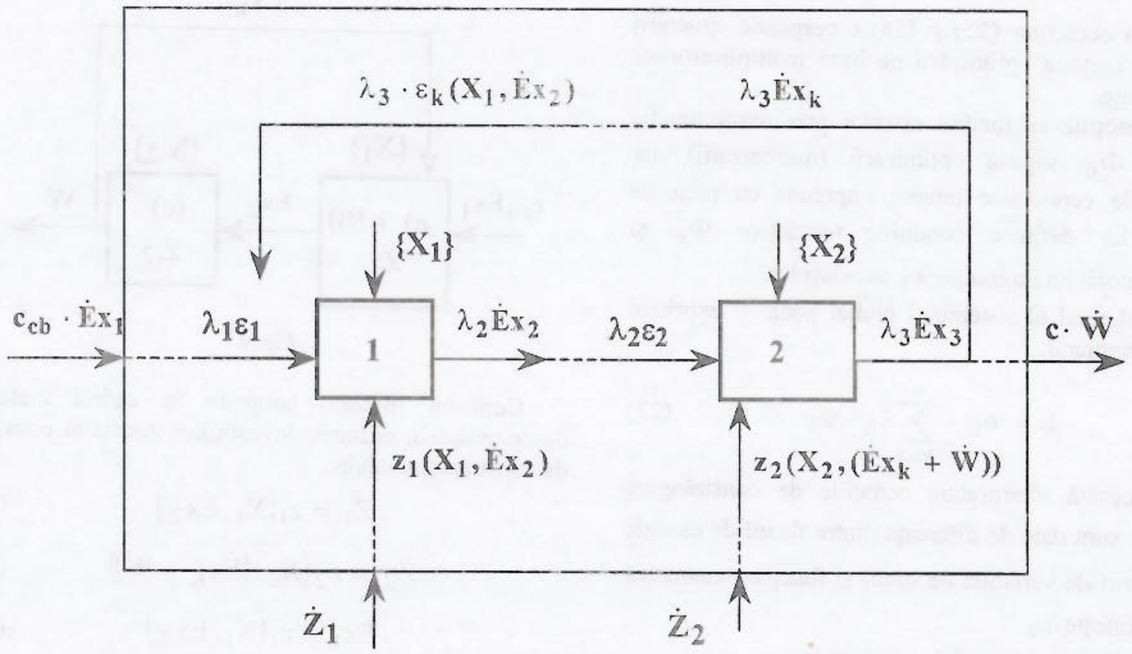

Fig. 5

Optimizarea locală realizează un balans între costul investiției și al combustibilului cumpărat.

Ecuațiile (39) – (41) precizează valoarea multiplicatorilor λ a căror semnificație economică o reprezintă prețurile exergoeconomice de umbră ale combustibilului la intrarea în fiecare echipament, adică cu cât se modifică funcția obiectiv a unei zone la modificarea cu o unitate a produsului zonal.

Rezultă deci, că dacă ratele investițiilor zonale și curenții de exergie la intrarea în zone sunt exprimate funcție de fluxurile de exergie ieșite (produși zonali) și de parametrii decizionali locali, sistemul global se poate descompune în zone independente care pot fi optimizate separat pe baza obiectivelor zonale și a multiplicatorilor lui Lagrange. Multiplicatorii lui Lagrange capătă semnificația economică a prețurilor exergiilor intrate (cumpărate) în fiecare zonă.

Analiza prezentată ne permite să ajungem la concluzia că se poate optimiza la scară locală un echipament sau un subproces al unui sistem complex, considerând costurile unitare ale combustibilului consumat ca fiind costuri exergoeconomice de umbră.

4. CONCLUZII

Studiul operării sistemului de cogenerare a energiei electrice și căldurii (fig. 1), arată cu claritate că în cazul existenței mai multor produși, pentru atribuirea corectă a costului fiecăruia dintre ei, ecuația de bilanț economic scrisă la nivelul global trebuie completată cu condiții suplimentare.

În cazul echivalenței energetice sunt sesizate numai pierderile externe, cele interne nefiind luate în calcul. Numai echivalența exergetică reușește să aducă la același numitor diferitele tipuri de energie, costurile atribuite lor în acest mod apropiindu-se de realitate.

Optimizarea termoeconomică a instalației de turbină cu gaze (fig. 2), sistem caracterizat printr-un produs unic, a relevat faptul că, teoretic, procedura poate fi realizată făcând apel numai la primul principiu al termodinamicii. În acest caz însă, căutarea optimului funcțional și constructiv este anevoioasă.

Utilizarea în schimb a exergiei poate conduce în anumite condiții la descentralizarea sistemului complex și optimizarea locală a zonelor productive. Acest fapt conduce la simplificarea majoră a procedurii de optimizare.

Se demonstrează cu această ocazie că analiza exergetică se poate constitui într-un instrument extrem de util în atingerea scopului final al proiectării oricărui sistem, obiectiv care este de obicei obținerea profitului maxim în anumite condiții precizate.

BIBLIOGRAFIE

Dobrovicescu, A., *Analiza exergetică și termoeconomică a sistemelor frigorifice și criogenice*, AGIR, București, 2000.

El-Sayed, Y.M., Evans, R.B., „Thermoeconomics and the Design of Heat Systems", *Transaction of the ASME, Journal of Engineering for Power*, 92, Series A, Nr. 1, p. 27, 1970.

El-Sayed, Y.M., Tribus, M., „The Strategic Use of Thermoeconomic Analysis for Process Improvement", *Efficiency and Costing Second Law Analysis of Processes, ACS Symposium*, Series 235, Ed. R. Gaggioli, Washington, 1983.

Frangopoulos, C.A., *Thermoeconomic Functional Analysis: A Method for the Optimal Design or Improvement of Complex Thermal Systems*, Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, 1983.

Gaggioli, R.A., El-Sayed, Y.M., „A Critical Review of Second-Law Costing Methods", *ASME Book, 100236*, pp. 59 – 73, 1987.

Keenan, J.H., „A Steam Chart for Second Law Analysis", *Mechanical Engineering, Trans. ASME*, 54, 195, pp. 195–204, 1932.

Lozano, M.A., *Termoeconomia*, Universidad de Zaragoza, 1992.