

Analiza randamentelor unui sistem de cogenerare cu motoare termice cu combustie internă ca sursă primară și cazan de apă caldă ca sursă de vârf

Efficiency analysis of a CHP plant, based on reciprocating engines as prime movers and a hot water boiler as peak source

Gabriel Mărcuș, Vlad Iordache, Rodica Frunzulică, Florin Iordache

Universitatea Tehnică de Construcții București
Bd. Lacul Tei nr. 122-124, Sector 2, București, Romania
marcus_gabriell@yahoo.com

Rezumat. *Lucrarea abordează analiza variației randamentului motoarelor dintr-o centrală de cogenerare care deservește clădirile de birouri ale unui operator economic. În condițiile variației sarcinii termice anuale, motoarele termice intră sau ies pe rând din funcțiune, funcționează la capacitate nominală sau în regim de sarcină parțială. Randamentul termic al fiecărui motor se modifică în mod corespunzător cu sarcina termică solicitată determinând variația randamentului global. Randamentul electric al sistemului este de asemenea o funcție de nivelul sarcinii. Lucrarea de față prezintă un model de calcul și analiză a randamentelor motoarelor active în funcție de necesarul termic solicitat de către consumator, în relație cu trei modalități de operare. S-au întocmit graficele de funcționare în funcție de sarcina de încărcare pentru fiecare motor termic și pentru cazan și s-au trasat graficele randamentului termic total și al randamentului global în cele trei moduri de operare, cascadă, alternant și simultan.*

Cuvinte cheie: *cogenerare, motor termic, putere nominală termică, randament termic, sarcină parțială.*

Abstract. *The paper deals with the theme of the variation of the efficiency of the reciprocating engines in a cogeneration plant serving the office buildings of an economic operator. Under the conditions of yearly thermal load variation, reciprocating engines come in or out of order, operate at rated capacity or in partial load mode. The thermal efficiency changes accordingly, determining the overall efficiency variation. The electrical efficiency of the CHP is a function of the load level. The present paper presents a model for calculating and analyzing the efficiency of the active engine according to the thermal load demanded by the consumer, in relation to three modes of operation. Operating charts for each reciprocating engine as well for the boiler have been prepared, the total thermal efficiency and the total efficiency graphs were plotted in the three ways of operating modes, consecutively, alternating and simultaneously.*

Key words: *cogeneration systems, reciprocating engines, nominal power, thermal efficiency, partial load.*

Notații și simboluri:			
CZ	cazan termic	$Q_{th,cons}$	sarcina termică cerută de consumator (kW)
i	numărul de ordine al motorului termic	$q_{CZ,nom}$	putere termică nominală a cazanului 1 sau 2 (kW)
M_i	motor termic "i" (cu i de la 1 la 5)	$q_{el,nom}$	putere electrică nominală motor (kW)
PL	sarcina parțială de funcționare a motorului/cazanului (%)	$q_{th,nom}$	putere termică nominală motor (kW)
P_{elU}	putere electrică utilă data de motor (kW)	$\eta_{el,nom}$	randament electric nominal (%)
P_{thU}	putere termică utilă data de motor (kW)	$\eta_{el,PL}$	randament electric la sarcină parțială (%)
PI	putere primară introdusă de combustibil (kW)	$\eta_{th,nom}$	randament termic nominal (%)
PP	putere pierdută de motor/cazan/sistem (kW)	$\eta_{th,PL}$	randament termic la sarcină parțială (%)
PU	putere totală utilă, electrică+termică, motor/cazan/sistem (kW)	η_{CZ}	randament termic cazan (%)
		$\eta_{th,total}$	randament termic total al sistemului (%)
		η_{global}	randament global al sistemului (%)

1. Introducere

Cogenerarea, tehnologie de producere simultană a energiei termice și a energiei electrice, este o alternativă la sistemele clasice de producție separată a celor două forme de energie prin care randamentul global, termic+electric, poate ajunge la 85% față de 58% în sistemele classic [1], se reduc pierderile pe rețelele de transport prin construirea sistemului în apropierea locului de consum și se obține reducerea emisiilor de noxe în mod implicit odată cu reducerea consumului de combustibil [2]. În scopul unei funcționări eficiente a sistemului de cogenerare necesarul de energie termică și electrică trebuie să fie unul important, cele două forme de energie trebuie să coexiste minim 4500 h/an într-un raport ce nu are fluctuații mai mari de $\pm 10\%$ [3].

Motoarele termice, ca sursă primară de producere a energiei termice și a energiei electrice, funcționează bine în regim de încărcare parțială, regim de funcționare majoritar întâlnit în practică, și au răspuns rapid la variațiile sarcinii provocate de comportamentul consumatorului [4], [5]. La funcționarea în regim de sarcină parțială motoarele termice funcționează bine, fără modificarea semnificativă a randamentului, până la 50% din capacitatea nominală, sub această limită fiind interzisă funcționarea în specificațiile tehnice ale furnizorilor.

În practica curentă, funcționarea unui sistem de cogenerare se poate realiza în trei moduri de operare: modul 1 în care motoarele intră în funcțiune în cascadă, pe rând și rămân în funcțiune la sarcină nominală (100%) odată atinsă această limită, modul 2 în care motoarele funcționează alternant cu cazanul termic la aceeași sarcină de încărcare, în orice moment și modul 3 în care motoarele funcționează simultan, descărcând în mod egal orice sarcină termică ce depășește ca valoare 50% din capacitatea nominală a unui motor, fără intervenția cazanului.

În cadrul analizei din lucrarea de față s-a urmărit: prezentarea unui sistem de cogenerare cu motoare termice, metoda de calcul a randamentelor la sarcini parțiale, prezentarea celor trei moduri de operare posibile, analiza comparativă din punct de vedere energetic a randamentelor sistemului în cele trei moduri de operare. În finalul studiului sunt prezentate concluzii asupra modului de intrare în sarcină a motoarelor

Analiza randamentelor unui sistem de cogenerare cu motoare termice cu combustie internă ca sursă primară și cazan de apă caldă

termice din cadrul sistemului de cogenerare propus. Rezultatele prezentului studiu pot servi deciziei implementării și alegerii unui sistem de cogenerare similar.

2. Metodă

Modelul de calcul este bazat pe ecuația Sanaye S. și colab. [6] a randamentului termic la sarcină parțială, pe ecuația ASHRAE, 2008 [7] a variației randamentului generatorului electric și pe metodele de calcul a cerințelor energetice și a randamentelor sistemelor din SR EN 15316 [8]. Aprecierile temporale din studiul de față sunt făcute în ipoteza sensului crescător al sarcinii (puterii) termice solicitate de către consumator.

Sistemul de cogenerare studiat are ca sursă primară de producere a energiei 5 motoare termice cu combustie internă echipate cu generatoare electrice și cazan de apă caldă pentru acoperirea sarcinii de vârf și a fracțiilor de sarcină. Schema fluxurilor energetice ale sistemului considerat este prezentată în Fig. 1. Randamentul termic al fiecărui motor și al cazanului este analizat în ipoteza creșterii cu ecart de 1kW a puterii termice cerute de consumator. Randamentul termic al motoarelor la funcționarea în sarcină parțială este calculat cu ecuația Sanaye S. și colab., randamentul electric este calculat cu ecuația ASHRAE 2008 iar puterea electrică utilă este calculată conform standardului SR EN 15316 și raportului tehnic corespondent [9].

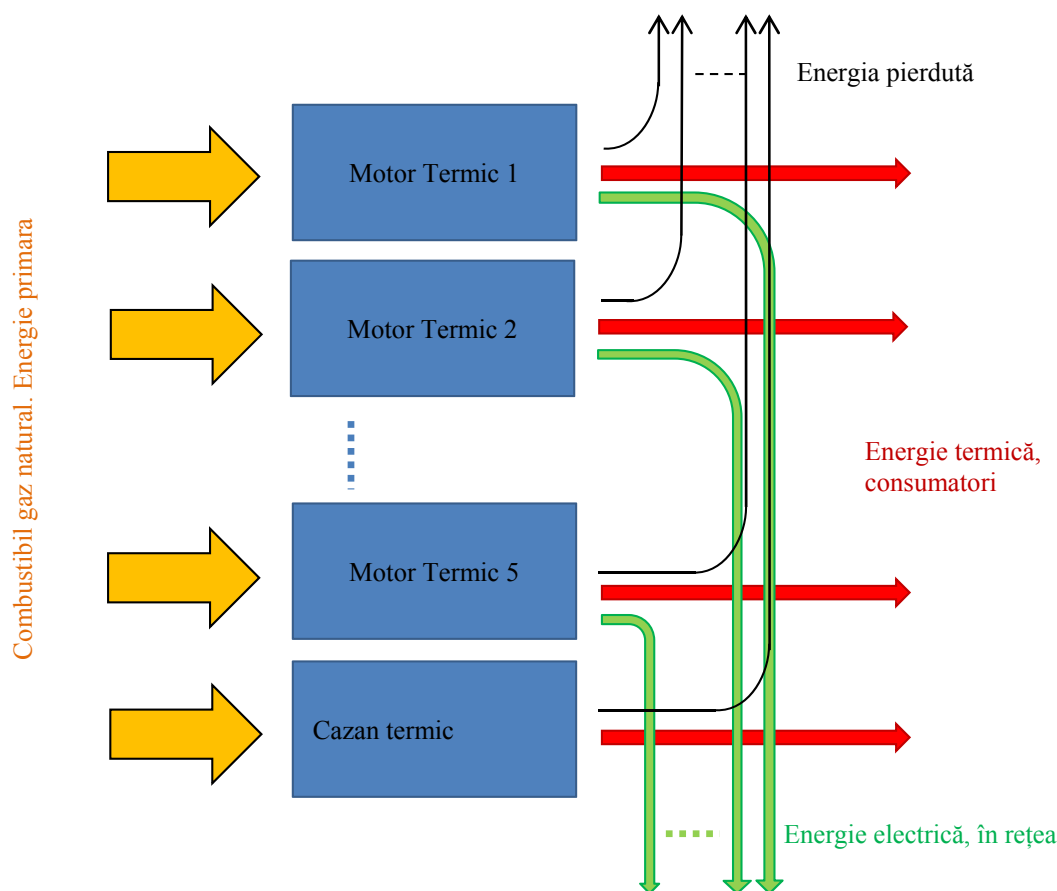


Fig. 1. Schema fluxurilor energetice în sistemul de cogenerare.

Primul mod de operare, în cascadă, presupune intrarea consecutivă în funcțiune a motoarelor termice în ordinea: M1, M2, M3, M4 și M5, pe măsura creșterii sarcinii cerute de consumator. Motoarele funcționează de la sarcini parțiale de 50% până la 100%, după care rămân în funcțiune la capacitatea nominală. Cazanul acoperă pe rând fracțiile de sarcină între 1% și 50% până la pornirea următorului motor.

Al doilea mod de operare, alternant, presupune intrarea consecutivă în funcțiune a motoarelor termice, similar modului 1, dar redistribuirea sarcinii consumatorului în mod egal între motoare la fiecare nouă intrare a unui motor. Practic, la solicitarea din partea consumatorului a unei sarcini termice de valoare egală cu 1,5 sarcini nominale în modul 1 va mai funcționa motorul M1 la capacitate 100% și motorul 2 la 50% iar în modul 2 vor funcționa ambele motoare la 75% din capacitate. În modul 2, similar modului 1, cazanul termic acoperă pe rând fracțiile de sarcină între 1% și 50% până la pornirea următorului motor. În modul 2 motoarele aflate în funcțiune operează în orice moment la aceeași sarcină parțială și ating sarcina nominală concomitent.

Al treilea mod de operare presupune ca odată intrat în funcțiune motorul M1 orice valoare superioară a sarcinii termice, ulterior apărută, să fie distribuită egal la numărul minim posibil de motoare termice, cu respectarea condiției privind minimul de 50% capacitate de funcționare, fără utilizarea cazanului termic. Practic, dacă în modurile 1 și 2 de operare, la o sarcină termică cuprinsă ca valoare numerică în intervalul deschis ($q_{th,nom}$, $1,5 \times q_{th,nom}$) intră în funcțiune cazanul termic, în modul 3 de operare această valoare a sarcinii se va distribui în mod egal motoarelor M1 și M2, funcționând fiecare la sarcini parțiale egale, între 50% (pentru $q_{th,nom}$) și 75% (pentru $1,5 \times q_{th,nom}$). Toate intervalele fracțiilor de sarcină acoperite de cazan în modurile 1 și 2 (între 1% și 50% până la pornirea următorului motor) sunt rezolvate în modul 3 prin augmentarea cu un motor a numărului de motoare în funcțiune și distribuirea egală a sarcinii.

Cele 5 motoare tip MWM TCG 2020 sunt alimentate cu gaz natural, au puterea termică nominală, $q_{th,nom}$, 1675kW, au un randament termic nominal, $\eta_{th,nom}$, 45,7%. Puterea electrică nominală, $q_{el,nom}$, ce poate fi furnizată de un astfel de motor este 1500 kW, cu un randament electric nominal, $\eta_{el,nom}$, 40,9%. Randamentul global al motorului termic (electric+termic) este 86,6%. Motoarele pot funcționa la orice capacitate de încărcare între 50% și 100% din capacitatea lor nominală fără ca randamentul motorului să fie afectat semnificativ. Producătorii motoarelor termice pentru cogenerare nu recomandă funcționarea acestor echipamente sub 50% din capacitatea nominală. La o cerere de putere termică din partea consumatorului situată sub 50% din capacitatea nominală, motorul este oprit iar sarcina este preluată de cazanul termic de apă caldă.

Modul 1 de operare - funcționare în cascadă

Cazanul de apă caldă de joasă presiune, alimentat cu gaz natural, are puterea termică nominală 850 kW, cu o variație a randamentului între 93,8% și 95,8%. Cazanul va asigura toate fracțiile de 837,5kW până la intrarea în funcțiune a motorului următor (cazul cererii crescătoare de putere termică).

Sarcina parțială a unui motor "i" se calculează în procente doar pentru sarcinile termice mai mari decât 50% din capacitatea nominală a motorului, conform Ecuației (1). Randamentul termic la sarcină parțială a motorului "i" se calculează funcție de sarcina parțială, conform Ecuației (2) [1]. Puterea utilă termică furnizată rezultă ca produsul dintre sarcina termică parțială și randamentul termic, Ecuația (3). Randamentul electric la sarcină parțială a motorului "i", definit pe conturul generatorului electric, se calculează conform Ecuației (4) [2]. Randamentul electric nominal, $\eta_{el,nom}$, dat în fișa producătorului de motoare oferă valoarea randamentului electric pe conturul mai larg al întregului echipament, motor + generator. Astfel, randamentul pe generatorul electric dat de Ecuația (4) are valoarea maximă, $MAX(\eta_{elPL})$, 91,13% la atingerea capacității nominale când motorul produce, conform producătorului, 1500 kW electrici utili, cu un randament electric pe conturul întregului echipament de 40,9%. Puterea electrică utilă furnizată de fiecare motor se calculează cu Ecuația (5), prin interpolare liniară din sarcina electrică nominală, $q_{el,nom}$, puterea termică utilă la sarcină parțială, P_{thU} și sarcina termică nominală, $q_{th,nom}$, [8], [9]. Puterea utilă totală furnizată de fiecare motor în parte este reprezentată de însumarea puterii utile termice și electrice, conform Ecuației (6). Puterea primară introdusă prin combustibilul se calculează cu Ecuația (7). Puterea pierdută de motor prin evacuarea gazelor de ardere la coș la 120 °C și prin mantaua motorului rezultă din Ecuația (8). Sarcina de încărcare parțială a cazanului termic este descrisă de Ecuațiile (9). Randamentul termic al cazanului este considerat constant, 95,8%, până la o sarcină de încărcare de 40% și se calculează cu Ecuația (10) pentru încărcări între 40% și 100%. Puterea utilă termică a cazanului se calculează conform Ecuației (11), puterea introdusă de combustibil în cazan se calculează conform Ecuației (12) și puterea pierdută de cazan se calculează cu Ecuația (13). În final au fost calculate randamentul termic total și randamentul global (termic+electric) ale sistemului cu Ecuațiile (14) și (15).

$$PL_{M_i} = \begin{cases} 100, & \text{dacă } Q_{th,cons} \geq i \cdot q_{th,nom} \\ \frac{Q_{th,cons} - (i-1) \cdot q_{th,nom}}{q_{th,nom}} \cdot 100, & \text{dacă } (i - \frac{1}{2}) \cdot q_{th,nom} \leq Q_{th,cons} \leq i \cdot q_{th,nom} \\ OFF, & \text{dacă } Q_{th,cons} < (i - \frac{1}{2}) \cdot q_{th,nom} \end{cases} \quad (1)$$

$$\eta_{th,PL_{M_i}} = \eta_{th,nom_{M_i}} \cdot (1,07 \cdot e^{-0,0005736 \cdot PL_{M_i}} - 1,259 \cdot e^{-0,05367 \cdot PL_{M_i}}) \quad (2)$$

$$P_{thU_{M_i}} = PL_{M_i} \cdot q_{th,nom} \quad (3)$$

$$\eta_{el,PL_{M_i}} = -0,149 \cdot PL_{M_i}^2 + 0,331 \cdot PL_{M_i} + 0,7293 \quad (4)$$

$$P_{elU_{M_i}} = \frac{q_{el,nom} \cdot P_{thU_{M_i}}}{q_{th,nom}} \quad (5)$$

$$PU_{M_i} = P_{thU_{M_i}} + P_{elU_{M_i}} \quad (6)$$

$$PI_{M_i} = \frac{P_{thU_{M_i}} + P_{elU_{M_i}}}{\eta_{el,PL_{M_i}} \cdot \eta_{el,nom}} \quad (7)$$

$$PP_{M_i} = PI_{M_i} - PU_{M_i} \quad (8)$$

$$PL_{CZ} = \begin{cases} \frac{Q_{th,cons}}{q_{CZ,nom}} \cdot 100, & \text{dacă } 0 < Q_{th,cons} < \frac{1}{2} q_{th,nom} \\ OFF, & \text{dacă } \left(i - \frac{1}{2}\right) \cdot q_{th,nom} \leq Q_{th,cons} \leq i \cdot q_{th,nom} \\ \frac{Q_{th,cons} - 5 \cdot q_{th,nom}}{q_{CZ,nom}} \cdot 100, & \text{dacă } 5 \cdot q_{th,nom} < Q_{th,cons} \end{cases} \quad (9)$$

$$\eta_{CZ} = -0,033 \cdot PL_{CZ} + 0,9712 \quad (10)$$

$$PU_{CZ} = PL_{CZ} \cdot q_{CZ,nom} \quad (11)$$

$$PI_{CZ} = \frac{PU_{CZ}}{\eta_{CZ}} \quad (12)$$

$$PP_{CZ} = PI_{CZ} - PU_{CZ} \quad (13)$$

$$\eta_{th,total} = \frac{\sum_1^5 (P_{th} U_{M_i}) + PU_{CZ}}{\sum_1^5 (PI_{M_i}) + PI_{CZ}} \quad (14)$$

$$\eta_{global} = \frac{\sum_1^5 (PU_{M_i}) + PU_{CZ}}{\sum_1^5 (PI_{M_i}) + PI_{CZ}} \quad (15)$$

Modul 2 de operare – funcționare alternantă la aceleași sarcini de încărcare

În ipoteza sensului crescător al cererii de sarcină termică, cazanul de apă caldă de joasă presiune va asigura, similar modului 1, toate fracțiile de 837,5 kW până la îndeplinirea condițiilor cererii de intrare în funcțiune a unui nou motor. În acest moment sarcina cerută se va împărți egal între acest nou motor și motorul/motoarele aflate deja în funcțiune. Această metodă face ca motoarele aflate în funcțiune să funcționeze în orice moment la aceeași încărcare parțială. La atingerea sarcinii nominale, 8375 kW, concomitent la toate cele 5 motoare, va reîntra în funcțiune aditional cazanul termic, până la acoperirea sarcinii de vârf în valoare de 9225 kW (pentru egalitatea intervalului de analiză).

Condițiile pentru calcularea în procente a sarcinii parțiale a fiecărui motor "i", în modul 2 de operare, sunt descrise în Ecuațiile (16):

$$PL_{M_i} = \begin{cases} OFF, & \text{dacă } Q_{th,cons} < \frac{1}{2} \cdot q_{th,nom}, & ptr.i = 1 \\ \frac{Q_{th,cons}}{i \cdot q_{th,nom}} \cdot 100, & \text{dacă } \left(i - \frac{1}{2}\right) \cdot q_{th,nom} \leq Q_{th,cons} \leq i \cdot q_{th,nom}, & ptr.i = 1 \dots 5 \\ 100, & \text{dacă } i \cdot q_{th,nom} < Q_{th,cons} < \left(i + \frac{1}{2}\right) \cdot q_{th,nom}, & ptr.i = 1 \dots 5 \\ 100, & \text{dacă } Q_{th,cons} > 5 \cdot q_{th,nom}, & ptr.i = 1 \dots 5 \end{cases} \quad (16)$$

În modul 2 de operare, randamentul termic la sarcină parțială a motorului, puterea utilă termică, randamentul electric la sarcină parțială, puterea electrică utilă,

Analiza randamentelor unui sistem de cogenerare cu motoare termice cu combustie internă ca sursă primară și cazan de apă caldă

puterea utilă totală furnizată, puterea primară introdusă de combustibilul de alimentare și puterea pierdută de motor se calculează, similar modului 1 de operare, cu Ecuațiile (2), (3), (4), (5), (6), (7) și (8). Pentru calcularea sarcinii de încărcare a cazanului termic se folosește, similar modului 1 de operare, Ecuația (9).

În modul 2 de operare, randamentul termic al cazanului, puterea utilă termică furnizată de cazan, puterea introdusă de combustibil și puterea pierdută de cazan se calculează, similar modului 1 de operare, cu Ecuațiile (10), (11), (12) și (13). În final au fost calculate, pentru modul 2 de operare, randamentul termic total și randamentul global (termic+electric) ale sistemului cu Ecuațiile (14) și (15).

Modul 3 de operare – funcționare simultană la aceleași sarcini de încărcare fără intervenția cazanului termic

În aceeași ipoteză a sensului crescător al cererii de sarcină termică, cazanul de apă caldă de joasă presiune va asigura sarcinile până la 837,5 kW când se îndeplinește condiția intrării în funcțiune a motorului M1. Din acest moment orice valoare a sarcinii termice cerută de consumator se va împărți egal la numărul minim de motoare ce o pot asigura, fără a se mai utiliza cazanul termic, iar atunci când sarcina depășește ca valoare un număr întreg multiplu al valorii sarcinii nominale se va adăuga la împărțitor motorul următor. Motoarele aflate în funcțiune operează în orice moment la aceeași încărcare parțială. La atingerea puterii termice utile maxime ce poate fi furnizată de cele 5 motoare, 8375 kW, intra în funcțiune aditional cazanul termic, până la acoperirea sarcinii de vârf în valoare de 9225 kW (pentru egalitatea intervalului de analiză).

Condițiile pentru calcularea în procente a sarcinii parțiale a fiecărui motor "i", în modul 2 de operare, sunt descrise în Ecuațiile (17):

$$PL_{M_i} = \begin{cases} OFF, & \text{dacă } Q_{th,cons} < \frac{1}{2} \cdot q_{th,nom}, & ptr.i = 1 \\ \frac{Q_{th,cons}}{i \cdot q_{th,nom}} \cdot 100, & \text{dacă } (i - \frac{1}{2}) \cdot q_{th,nom} \leq Q_{th,cons} \leq i \cdot q_{th,nom}, & ptr.i = 1 \dots 5 \\ \frac{Q_{th,cons}}{(i+k) \cdot q_{th,nom}} \cdot 100, & \text{dacă } (i+k-1) \cdot q_{th,nom} < Q_{th,cons} \leq (i+k) \cdot q_{th,nom}, \\ & \text{cu } k = 1 \dots 4, k \in \mathbb{Z}, ptr.i = 1 \\ & \text{cu } k = 1 \dots 3, k \in \mathbb{Z}, ptr.i = 2 \\ & \text{cu } k = 1, 2, k \in \mathbb{Z}, ptr.i = 3 \\ & \text{cu } k = 1, k \in \mathbb{Z}, ptr.i = 4 \\ 100, & \text{dacă } Q_{th,cons} > 5 \cdot q_{th,nom}, & ptr.i = 1 \dots 5 \end{cases} \quad (17)$$

În modul 3 de operare, randamentul termic la sarcină parțială a motorului, puterea utilă termică, randamentul electric la sarcină parțială, puterea electrică utilă, puterea utilă totală furnizată, puterea primară introdusă de combustibilul de alimentare și puterea pierdută de motor se calculează, similar modului 1 de operare, cu Ecuațiile

(2), (3), (4), (5), (6), (7) și (8). Pentru calcularea în modul 3 a sarcinii de încărcare a cazanului termic se folosește Ecuația (18).

$$PL_{CZ} = \begin{cases} \frac{Q_{th,cons}}{q_{CZ,nom}} \cdot 100, & \text{dacă } 0 < Q_{th,cons} < \frac{1}{2} q_{th,nom} \\ OFF, & \text{dacă } \frac{1}{2} q_{th,nom} \leq Q_{th,cons} \leq 5 \cdot q_{th,nom} \\ \frac{Q_{th,cons} - 5 \cdot q_{th,nom}}{q_{CZ,nom}} \cdot 100, & \text{dacă } 5 \cdot q_{th,nom} < Q_{th,cons} \end{cases} \quad (18)$$

În modul 3 de operare, randamentul termic al cazanului, puterea utilă termică furnizată de cazan, puterea introdusă de combustibil și puterea pierdută de cazan se calculează, similar modului 1 de operare, cu Ecuațiile (10), (11), (12) și (13). În final au fost calculate, pentru modul 3 de operare, randamentul termic total și randamentul global (termic+electric) ale sistemului cu Ecuațiile (14) și (15).

3. Rezultate

Analiza grafică între modul 1, 2 și 3 de operare, a rezultat din trasarea curbelor de randament pentru fiecare motor, pentru cazan și pentru sistem în ansamblu pe intervale de putere termică. Analiza valorică rezultă din observarea valorilor minime, maxime și particulare pentru fiecare kW de putere termică din calculul tabelar.

Considerând motorul 1 în modul 1 de operare, Fig. 2, acesta atinge randamentul termic maxim de 45,98% la o putere termică cerută de consumator de 1437 kW funcționând la 85,79% din capacitatea nominală. Pe măsura creșterii cererii, randamentul termic scade insesizabil, atingând în sarcină nominală valoarea de 45,90%, după care funcționează cu randament termic constant, 45,90%, până la finalul intervalului de analiză. În modul 2 de operare comportamentul motorului 1 este identic pe primele două intervale de funcționare cu modul 1 de operare. În modul 2, la intrarea în sarcină a celui de-al doilea motor, vor funcționa ambele motoare la 75% din capacitatea nominală, cu randament termic de 45,81%. În modul 3 de operare randamentul motorului 1 are comportament identic cu celelalte două moduri doar pe primul interval de funcționare iar în momentul depășirii cu 1 kW a sarcinii nominale de 1675 kW intră în funcțiune și motorul al 2-lea, sarcina împărțindu-se egal la M1 și M2 care vor funcționa fiecare la 50,03% sarcină parțială. De la o cerere de putere termică mai mare de 2650 kW până la finalul intervalului de analiză, randamentul termic al motorului 1 este mai mare în modul 2 de operare decât în modul 1 iar de la o cerere mai mare decât 4188 kW modul 3 de operare înregistrează randamente termice mai mari decât modul 2 sau cel mult egale.

Motorul 2, Fig. 2, pornește în modul 1 de operare la solicitarea unui necesar termic de 2512,5 kW, cu randament termic minim 43,59% și atinge randamentul termic maxim, 45,98%, la o cerere de 3112 kW. În modul 2 de operare, motorul 2 pornește la același necesar termic de 2512,5 kW, dar cu randament termic semnificativ mărit, 45,81% și atinge randamentul termic maxim, 45,98%, pe mai multe intervale până la finalul intervalului de analiză. Pe intervalele de funcționare la sarcină nominală

Analiza randamentelor unui sistem de cogenerare cu motoare termice cu combustie internă ca sursă primară și cazan de apă caldă

(100%) când intră și cazanul termic în funcțiune, motorul 2 are în modul 1 și în modul 2 de funcționare randamente termice egale. În modul 3 de funcționare M2 pornește la solicitarea unui necesar termic de 1676 kW, cu randament termic egal modulului 1 de operare, se comportă similar modulului 2 pe intervalul 2513÷3350 kW, înregistrează o scădere a randamentului termic pe intervalul 3350÷3946 kW, după care valorile sunt în mod alternant mai mari sau egale cu valorile înregistrate în modul 2 de operare.

Motorul 3, Fig. 2, pornește în modul 1 de operare la un necesar termic de 4187,5 kW, cu randament termic minim 43,59% și atinge randamentul termic maxim, 45,98%, la o cerere de 4787 kW. În modul 2 de operare, motorul 3 pornește la același necesar termic dar cu randament termic semnificativ mărit, 45,96% și atinge randamentul termic maxim, 45,98%, pe mai multe intervale până la finalul intervalului de analiză, corespunzătoare respectiv intrărilor în sarcină a motoarelor 4, 5. În modul 2, la momentul intrării în funcțiune a motorului 3, acesta își echilibrează sarcina parțială de funcționare cu motoarele 1 și 2 la 83,34%. Pe intervalele de funcționare la sarcină nominală (100%), când intră și cazanul termic în funcțiune, motorul 3 are în modul 1 și în modul 2 de funcționare randamente termice egale. În modul 3 de funcționare M3 pornește la solicitări mai mici, 3350 kW, cu randament termic de 45,46%, se comportă similar modulului 2 de operare pe intervalele de tipul $\left(i - \frac{1}{2}\right) \cdot q_{th,nom} \div i \cdot q_{th,nom}$ și înregistrează randamente termice mai mari decât în modul 2 pe intervalele de tipul $i \cdot q_{th,nom} \div \left(i + \frac{1}{2}\right) \cdot q_{th,nom}$.

Algoritmul de funcționare și caracteristicile de randament termic individual descrise pentru motoarele 1, 2 și 3 se păstrează și pentru motoarele 4 și 5, așa cum se poate observa în graficele din Fig. 2. Motoarele intră în funcțiune la momentul îndeplinirii condițiilor de sarcină termică pentru fiecare din ele. În modul 1, în timp ce motoarele anterior intrate, odată atinsă sarcina nominală, rămân să funcționeze la sarcini de 100%, motorul nou intrat începe funcționarea cu sarcină parțială de 50%. În modul 2, intrarea unui nou motor în funcțiune presupune echilibrarea sarcinilor parțiale, 87,51% la intrarea motorului 4 și 90,01% la intrarea celui de-al 5-lea motor. Aceste sarcini parțiale corespund unui interval al sarcinilor parțiale de funcționare, 85,79% ÷ 91,46%, în care motorul termic atinge valori maxime de randament termic, 45,98%. În modul 3 de operare motoarele intră în funcțiune mai rapid, la puteri mai mici (decalajul este egal cu valoarea unei jumătăți din valoarea sarcinii nominale, 837,5 kW), sarcinile parțiale se echilibrează la momentul intrării cu motoarele aflate deja în funcțiune și nu se mai apelează la utilizarea cazanului termic. Randamentul termic maxim, 45,98%, este atins în modul 3 de operare la sarcini parțiale din intervalul 85,77% ÷ 91,47%. Modul 2 de funcționare asigură, per total, obținerea unor randamente termice individuale superioare modulului 1 iar modul 3 asigură, privind întreaga plajă de puteri termice, intervale mai largi cu randamente termice superioare în comparație cu modul 2.

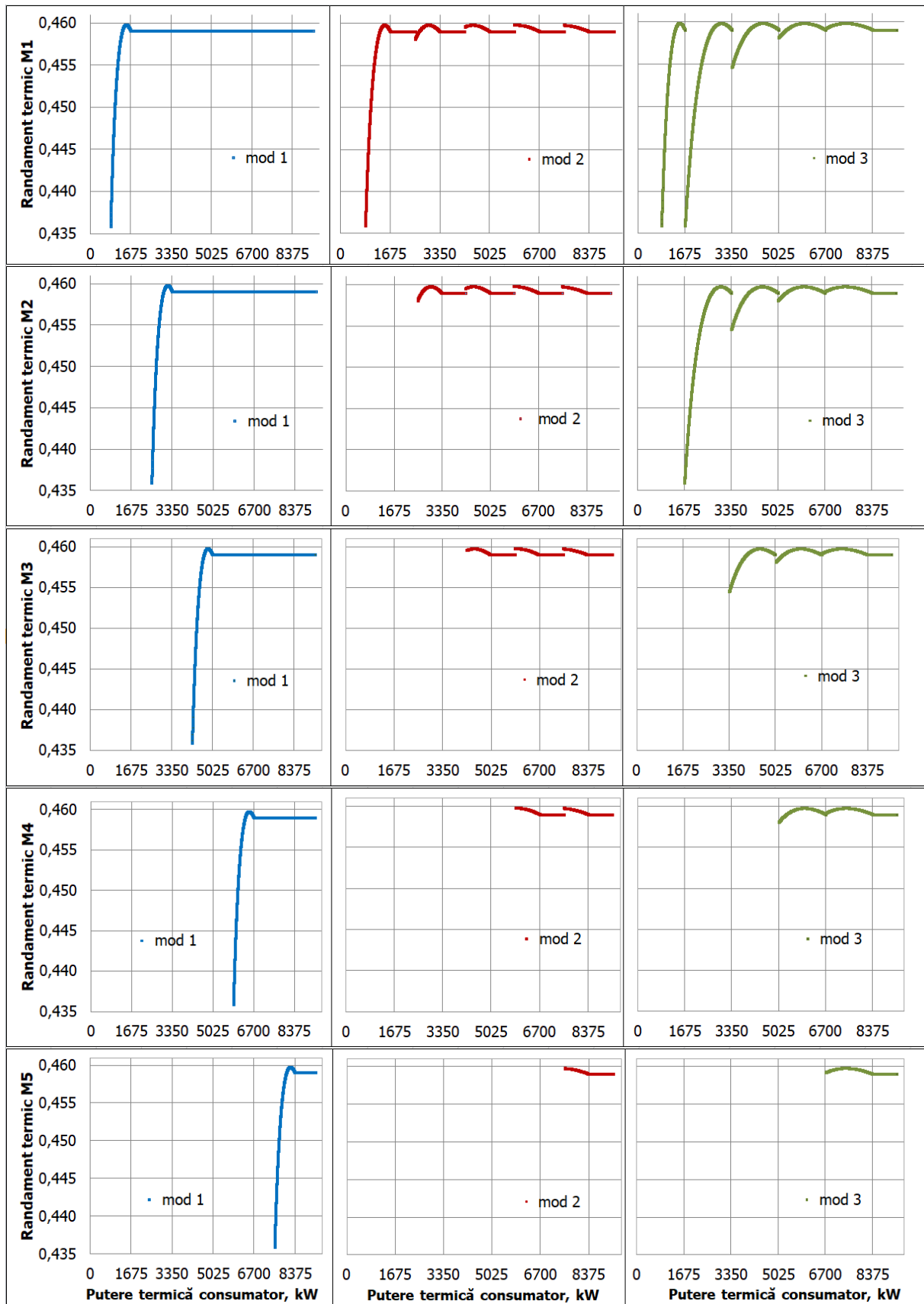


Fig. 2. Comparatia celor 3 moduri de operare din perspectiva randamentului termic individual

Analiza grafică și valorică a randamentului cazanului de apă caldă, Fig. 3, relevă pentru modurile 1 și 2 o aceeași frecvență și necesitate de utilizare a sursei de vârf pentru satisfacerea cererii maxime de energie termică. Se observă: similitudinea perioadelor de funcționare, egalitatea sarcinilor de încărcare parțială de funcționare și egalitatea valorilor de randament înregistrate. În modul 3 de operare cazanul termic nu mai este utilizat odată intrat primul motor în funcțiune. Pe primul interval de definiție al puterii termice ($0 \text{ kW} \div 837,5 \text{ kW}$), în toate modurile, cazanul funcționează solitar, motoarele termice staționează, sistemul nu produce energie electrică și nu putem vorbi de cogenerare, ca efect, în sensul strict al cuvântului.

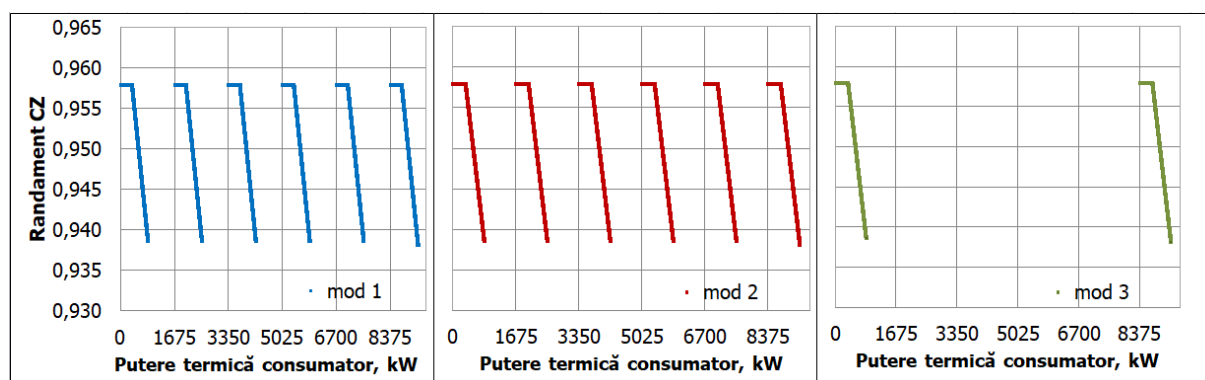


Fig. 3. Variația randamentului cazanului termic în cele 3 moduri de operare.

Randamentul termic total al sistemului de cogenerare considerat, Fig. 4, are caracteristici asemănătoare în primele două moduri de operare cu o ușoară diferență. Primul interval din cele 3 grafice corespunde perioadei de funcționare a cazanului termic, perioadă în care randamentul termic total este randamentul cazanului, evident identic în ambele moduri și fără relevanță pentru cogenerare - nu se generează putere electrică. Valorile randamentului termic total pe capetele de final ale intervalelor, când se ating sarcinile nominale de funcționare ale motoarelor (100%) sunt identice deasemenea în cele 3 moduri de operare. În modul 3 de operare, datorită neutilizării cazanului termic, randamentul termic total prezintă caracteristici aplatizate, cu valori mai mici decât valorile înregistrate în modurile 1 și 2. Diferențele, util de consemnat, dintre valorile randamentului termic total în modurile 1 și 2 apar în momentele de pornire ale motoarelor. La pornirea motorului 2 sistemul de cogenerare înregistrează în modul 2 de operare un randament termic total ușor mărit de 45,33% față de 44,93% corespunzător modului 1 de operare. La pornirea motorului 3 sistemul de cogenerare înregistrează în modul 2 de operare un randament termic total de 45,60%, mai mare față de randamentul termic total al modului 1 de operare, 45,27%. La pornirea motorului 4 sistemul de cogenerare înregistrează în modul 2 de operare un randament termic total de 45,68%, mai mare față de randamentul termic total al modului 1 de operare, 45,42%. La pornirea motorului 5 sistemul de cogenerare înregistrează în modul 2 de operare un randament termic total de 45,72%, mai mare față de randamentul termic total al modului 1 de operare, 45,79%.

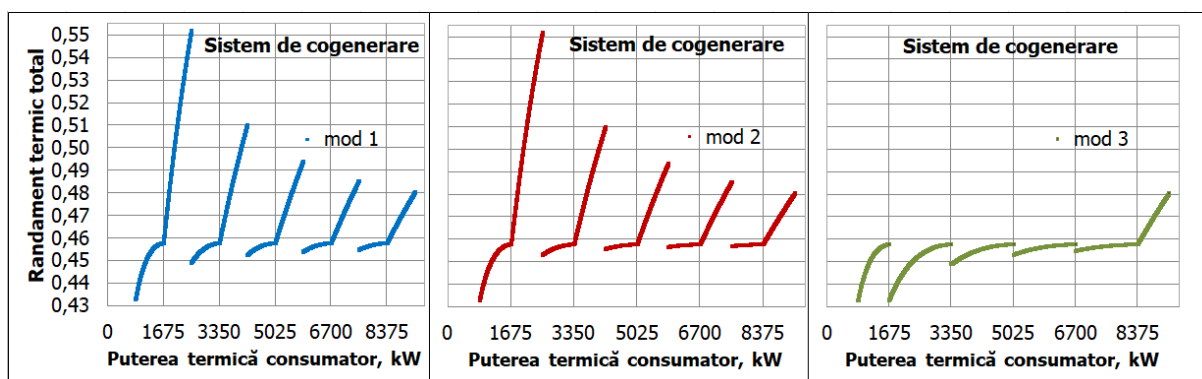


Fig. 4. Comparatia celor 3 moduri de operare din perspectiva randamentului termic total

Randamentul global, electric+termic, al sistemului de cogenerare este ilustrat de graficele din Fig. 5. Valorile maxime ale randamentului global în modurile 1 și 2 de operare, comparate pe intervale, sunt identice și se ating în capetele în care funcționează atingând sarcina nominală (100%) atât motorul cât și cazanul termic. În modul 3 de operare valorile randamentului global sunt egale cu valorile modului 2 de operare pe intervalele de tipul $\left(i - \frac{1}{2}\right) \cdot q_{th,nom} \div i \cdot q_{th,nom}$, sunt inferioare celorlalte două moduri pe intervalele de tipul $i \cdot q_{th,nom} \div \left(i + \frac{1}{2}\right) \cdot q_{th,nom}$ (corespunzătoare perioadelor de funcționare a cazanului termic) și sunt identice pe intervalul de capăt $8375 \div 9225$ kW. Diferența între modul 1 și modul 2 de operare apare între valorile randamentului global în momentele de pornire a motoarelor 2, 3, 4 și 5. Avantajul valorilor mai mari este în favoarea modului 2 de operare (85,93% față de 85,17%, 86,43% față de 85,82%, 86,59% față de 86,10% și 86,66% față de 86,25%). Pe intervalele de definiție a puterii termice corespunzătoare perioadelor de funcționare a cazanului termic caracteristicile randamentului global al sistemului de cogenerare se suprapun în modurile 1 și 2 de operare, lucru evident din moment ce motoarele aflate în funcțiune operează atât în modul 1 cât și în modul 2 la aceeași sarcină nominală, 100%, furnizând puterea termică utilă maximă fiecare (1675 kW) și puterea electrică utilă maximă fiecare (1500 kW), la care se însumează puterea utilă termică a cazanului de apă caldă (aceeași pentru fiecare dintre cele două moduri de operare, Fig. 3).

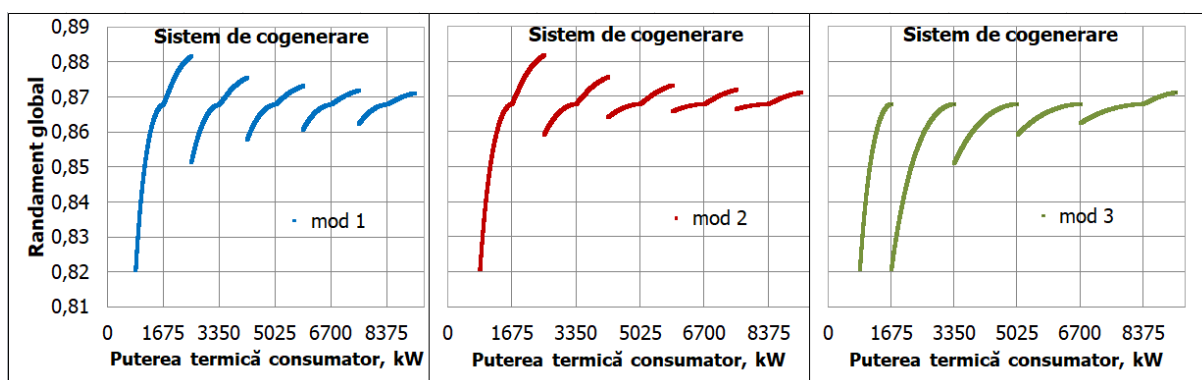


Fig. 5. Comparatia celor 3 moduri de operare din perspectiva randamentului global

6. Concluzii

Din punct de vedere al randamentelor termice individuale, analiza rezultatelor prezentate în Fig. 2 asupra motoarelor relevă o mai eficientă funcționare în cazul operării în modul 3, simultan. În modul 3 de operare motoarele ating randamentul termic individual maxim, funcționând între sarcini parțiale de la 85,77% până la 91,47%, pe mai multe intervale comparativ cu modul 1 sau pe intervale mai largi comparativ cu modul 2.

Randamentul termic total obținut de sistem, Fig. 4, prezintă valori superioare în modurile 1 și 2 de operare datorate sursei de vârf (cazanul termic de apă caldă). Modul 2 de operare alternantă înregistrează ușor avantaj datorită valorilor randamentului termic total din momentele de pornire ale motoarelor, așa cum se arată în prezentarea rezultatelor, Fig. 4. Modul 3 de operare înregistrează valori mai scăzute ale randamentului termic total datorate utilizării restricționate a cazanului termic. La sarcină de vârf cele 3 moduri de operare realizează același randament termic total.

Randamentul global al cogenerării, analizat cu Fig. 5, are valori cuprinse între 82,08% și 88,19% pentru modurile 1 și 2 de operare și între 82,08% și 87,14% pentru modul 3 (în afara intervalului $0 \div 837,5$ kW, de putere utilă electrică nulă). Din punct de vedere al randamentului global, graficele relevă situații avantajoase modurilor în cascadă și alternant. Dacă este să privim asupra valorilor maxime de pe cele 5 curbe caracteristice din fiecare dintre primele două moduri de operare observăm că randamentul global al sistemului înregistrează aceleași valori maxime. Valorile minime ale randamentului global de la începutul curbelor caracteristice fac însă diferența între modul 1 și modul 2 de operare, în favoarea modului 2 - randamente mai bune la pornire în modul 2.

Analiza randamentelor sistemului de cogenerare, realizată în amănunt pe plaja de puteri acoperită de echipamentele sursei de bază și a celei de vârf, deși a semnalat diferențe mici între valori, aduce argumente pentru operarea alternantă, recomandată în cazul unei cereri puternic variabile din partea consumatorului. Dacă cererea de putere termică a consumatorului se încadrează într-un interval stabil, bine definit, interval ce se determină în faza de proiectare întocmind curba clasată a necesarului termic al consumatorului, modul 3 de operare simultană oferă deasemenea avantaje. Utilizarea motoarelor termice, fără intervenția alternativă a cazanului, presupune mentenanță pentru un singur tip de echipament și avantajul furnizării suplimentare de energie electrică utilă. Dacă, spre exemplu, în modurile 1 și 2 la o sarcină egală ca valoare cu $1,4 \cdot q_{th,nom}$ vom avea putere electrică utilă dată doar de motorul 1 funcționând la sarcina nominală (100%), adică 1500 kW electrici, în modul 3 vom avea 2100 kW electrici utili, furnizați de motoarele M1 și M2 funcționând fiecare la sarcini parțiale de 70%. Prin urmare, din perspectiva consumatorului ce pune accent pe energia utilă electrică, modul 3 de operare este cel mai avantajos. Adoptarea unuia sau a altuia dintre modurile de operare se va face cu ajutorul modelului descris în strânsă corelație cu necesarul de consum, atât termic cât și electric, al beneficiarului. Totodată modelul numeric poate fi extrapolat pe sisteme de cogenerare alcătuite din mai multe motoare termice sau cu alte caracteristici tehnice.

Creșterea randamentului global al unui sistem de cogenerare cu unul-două procente poate însemna, în condițiile unui necesar termic și electric important, de ordinul megawattilor, o economie de combustibil considerabilă. Justa apreciere a economiilor de energie primară ce pot fi realizate se face prin considerarea producției și a consumurilor energetice pe perioada unui an de funcționare. Eficientizarea într-o și mai mare măsură a modului de obținere și folosire a energiei termice și electrice se poate face prin implementarea tehnologiei de trigenerare, respectiv prin adăugarea în sistem a chillerelor cu absorbție, măsură propusă pentru o lucrare viitoare.

Referințe

- [1] *EDUCOGEN Tool* - „The European Educational Tool on Cogeneration”, Second Edition, December 2001.
- [2] *K. F. Fong, C. K. Lee*, „Performance analysis of internal-combustion-engine primed trigeneration system for use in high-rise buildings in Hong Kong”, 12 December 2014.
- [3] *Rodica Frunzulică*, „Cogenerare de mică putere”, București, CONSPRESS 2009.
- [4] *Javier Galvan Villamarin*, „Simulation of Tri-generation Systems with application of optimization”, 2011, Master of Science Thesis EGI 2011-120MSC, KTH Industrial Engineering and Management.
- [5] *Houssein Al Moussawi, Farouk Fardoun, Hasna Louahlia-Gualous*, „Review of tri-generation technologies: Design evaluation, optimization, decision-making, and selection approach”, 30 April 2016.
- [6] *Sepehr Sanaye, Mehdi Aghaei Meybodi, Shahabeddin Shokrollahi*, „Selecting the prime movers and nominal powers in combined heat and power systems”, 2007 Elsevier Ltd., Available online at www.sciencedirect.com 22 August 2007, Applied Thermal Engineering 28 (2008) 1177–1188.
- [7] *ASHRAE. (2008)*, Handbook - „Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems and Equipment” (I-P Edition). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- [8] SR EN 15316-4-4, Performanța energetică a clădirilor. Metodă de calcul a cerințelor energetice și a randamentelor sistemelor. Partea 4-4: Sisteme de producere a căldurii: instalații de cogenerare integrate în clădiri, Modulele M8-3-4, M8-8-4, M8-11-4
- [9] SR CEN/TR 15316-6-7, Performanța energetică a clădirilor. Metodă de calcul a cerințelor energetice și a randamentelor sistemelor. Partea 6-7: Explicarea și justificarea EN 15316-4-4, Modulele M8-3-4, M8-8-4, M8-11-4