

Analiza energetica - sistem sursa hibrid. Cogenerare cu motoare cu ardere interna si pompe de caldura

Energy analysis - source hybrid system. Internal combustion engine cogeneration and heat pumps

Prof. dr. ing. Florin Iordache¹, ing. Radu Alexandru Baciuc²

¹Universitatea Tehnica de Constructii București
Bulevardul Lacul Tei 122-124, Sector 2, București, Romania
E-mail: *fliord@yahoo.com*

²Universitatea Tehnica de Constructii București
Bulevardul Lacul Tei 122-124, Sector 2, București, Romania
E-mail: *baciuc_radu_alexandru@yahoo.com*

Rezumat: Lucrarea își propune să analizeze sursa de energie a unui sistem hibrid format dintr-un grup de cogenerare și un grup de pompe de căldură cu compresie. Cele două grupuri de producere a energiei termice lucrează în paralel. Grupuri de pompe de căldură folosesc energia electrică produsă de grupul de motoare cu ardere internă și este considerată a extrage energie din mediul lichid (ape subterane sau apă de suprafață liberă). Evaluarea eficienței energetice a sistemului hibrid în ansamblu și performanțele sale. Analiza energetică este eficientă pentru un grup de consumatori din clădiri rezidențiale (încălzirea spațiului și consumul de apă caldă), luând în considerare și clima din diferite perioade. Rezultatele sunt prezentate grafic într-un mod mai sugestiv pentru înțelegerea corectă a aspectelor constructive și funcționale.

Cuvinte cheie: sursa hibrid, cogenerare

Abstract: This paper aims to analyze the energy source of a hybrid system consisting of a group of cogeneration and a group of heat pumps with compression. The two groups producing thermal power and working in parallel. Groups of heat pumps use electricity produced by the group of internal combustion engines and is considered to extract energy from liquid medium (groundwater or free surface water). Assessing the energy efficiency of the hybrid system as a whole and its performance. Energy analysis is effective for a consumer group capacity on type of residential buildings (space heating and hot water consumption), taking into consideration the request of climate different periods. The results are shown graphically in a manner more suggestive of proper understanding of constructive and functional aspects.

Keywords: hybrid power, cogeneration

1. Introducere

Lucrarea are ca obiectiv analiza energetica a unui sistem sursa hibrid compus dintr-un grup de cogenerare si un grup de pompe termice cu compresie. Cele doua grupuri producatoare de putere termica lucreaza in paralel. Grupul de pompe termice utilizeaza energie electrica produsa de grupul de motoare cu ardere interna si se considera ca extrage energie din mediu lichid (apa freatica sau apa cu suprafata libera la nivelul solului).

Se evalueaza eficienta energetica a sistemului hibrid in ansamblu si randamentul acestuia. Analiza energetica efectiva se face pentru un consumator cu capacitate data de tip grup de cladiri rezidentiale (incalzirea spatiilor si prepararea apei calde de consum), luandu-se in considerare solicitarea climatica diferentiata pe perioade de timp diferite. Rezultatele obtinute sunt prezentate grafic de o maniera cat mai sugestiva pentru intelegerea corecta a aspectelor constructive si functionale.

2. Analiza Energetica

Asa cum s-a mentionat in capitolul introductiv sistemul sursa hibrid este compus dintr-un grup de cogenerare si un grup de pompe termice cu compresie. Pompele de caldura functioneaza utilizand energie electrica produsa de grupul de motoare termice si aspira energie termica din mediul ambiant lichid (apa freatica sau apa cu suprafata libera la nivelul solului). Consumatorul alimentat cu energie termica si electrica de la sistemul sursa hibrid este un grup de cladiri rezidentiale (incalzirea spatiilor si prepararea apei calde de consum).

Pentru a usura intelegerea aspectelor energetice legate de functionarea sistemului hbrid descris, in fig. 1 se prezinta schematic cele doua grupuri producatoare de energie si grupul consumatorilor si fluxurile termice si electrice intre aceste grupuri.

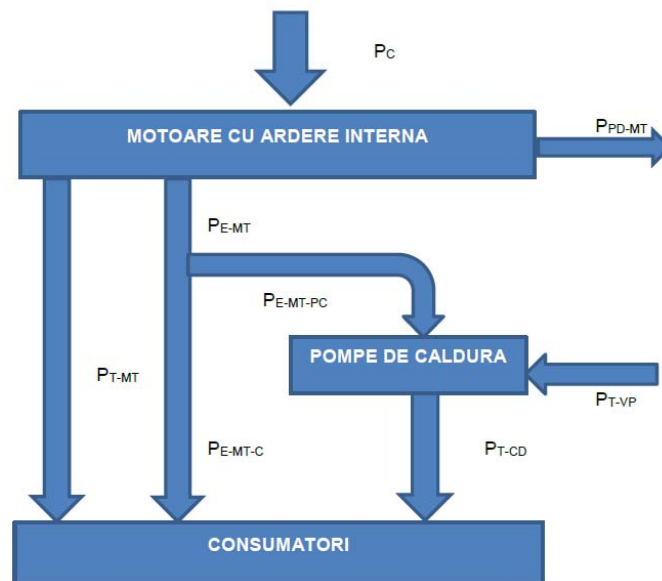


Fig. 1

2.1.Aspecte teoretice

Puterea obtinuta prin arderea debitului de combustibil in grupul de motoare termice cu ardere interna poate fi scrisa ca fiind compusa din suma dintre puterea termica, puterea electrica si o putere pierduta in mediul exterior :

$$P_c = P_{T-MT} + P_{E-MT} + P_{PD-MT} \quad (1)$$

unde :

$$\begin{aligned} P_{T-MT} &= \eta_T \cdot P_C \\ P_{E-MT} &= \eta_E \cdot P_C \end{aligned} \quad (2)$$

Puterea termica produsa de motoarele termice este utilizata direct la consumator pentru incalzirea spatiilor si prepararea apei calde de consum.

Puterea electrica produsa de motoarele termice este partial utilizata direct de utilizator si partial de catre grupul de pompe termice cu compresie, cuplate la motoarele termice.

$$P_{E-MT} = P_{E-MT-PC} + P_{E-MT-C} \quad (3)$$

unde :

$$\begin{aligned} P_{E-MT-PC} &= f_{PC} \cdot P_{E-MT} \\ P_{E-MT-C} &= f_C \cdot P_{E-MT} \\ f_{PC} + f_C &= 1 \end{aligned} \quad (4)$$

Sistemul de pompe de caldura cuplate cu motoarele termice, se considera ca extrag putere termica din apa freatica cu temperatura medie anuala de 15 °C, si livreaza putere termica catre un agent termic cu temperatura variabila intre 35 si 85 °C. In consecinta puterea termica livrata la condensator de pompele termice va fi [2]:

$$P_{T-CD} = COP_{CD} \cdot P_{E-MT-PC} = COP_{CD} \cdot f_{PC} \cdot P_{E-MT} = COP_{CD} \cdot f_{PC} \cdot \eta_E \cdot P_C \quad (5)$$

unde :

$$COP_{CD} = \eta_{E-PC} \cdot COP_{CD}^C \quad (6)$$

iar :

$$COP_{CD}^C = \frac{273,15 + \theta_{CD}}{\theta_{CD} - \theta_{VP}} = \frac{273,15 + \Delta t + t_{CD}}{t_{CD} - t_{VP} + 2 \cdot \Delta t} \quad (7)$$

Rezulta :

$$COP_{CD} = \eta_{E-PC} \cdot \frac{273,15 + \Delta t + t_{CD}}{t_{CD} - t_{VP} + 2 \cdot \Delta t} \quad (8)$$

Puterea termica primita de catre consumator va fi :

$$\begin{aligned} P_{T-C} &= P_{T-MT} + P_{T-CD} \\ P_{T-C} &= \eta_T \cdot P_C + \eta_{E-PC} \cdot \frac{273,15 + \Delta t + t_{CD}}{t_{CD} - t_{VP} + 2 \cdot \Delta t} \cdot f_{PC} \cdot \eta_E \cdot P_C \quad (9) \\ P_{T-C} &= \left(\eta_T + \eta_{E-PC} \cdot \frac{273,15 + \Delta t + t_{CD}}{t_{CD} - t_{VP} + 2 \cdot \Delta t} \cdot f_{PC} \cdot \eta_E \right) \cdot P_C \end{aligned}$$

Puterea electrica primita de catre consumator este data de relatia (4₂) adica :

$$P_{E-MT-C} = f_C \cdot P_{E-MT} = f_C \cdot \eta_E \cdot P_C \quad (10)$$

In consecinta puterea totala livrata consumatorilor de catre sistemul hibrid motoare termice cu pompe de caldura va fi :

$$\begin{aligned} P_{CONS} &= P_{T-C} + P_{E-MT-C} = \\ &= f_C \cdot \eta_E \cdot P_C + \left(\eta_T + \eta_{E-PC} \cdot \frac{273,15 + \Delta t + t_{CD}}{t_{CD} - t_{VP} + 2 \cdot \Delta t} \cdot f_{PC} \cdot \eta_E \right) \cdot P_C \quad (11) \\ &= \left[(1 - f_{PC}) \cdot \eta_E + \eta_T + \eta_{E-PC} \cdot \frac{273,15 + \Delta t + t_{CD}}{t_{CD} - t_{VP} + 2 \cdot \Delta t} \cdot f_{PC} \cdot \eta_E \right] \cdot P_C \end{aligned}$$

Puterea consumata (aferenta debitului de combustibil) de sistem este P_C , iar puterea totala utilizata de sistem se compune din puterea consumata si puterea termica absorbita din mediu inconjurator (apa freatica) de catre grupul de pompe de caldura. Puterea termica absorbita din mediu se poate stabili ca fiind :

$$P_{T-VP} = COP_{VP} \cdot P_{E-MT-PC} = COP_{VP} \cdot f_{PC} \cdot P_{E-MT} = COP_{VP} \cdot f_{PC} \cdot \eta_E \cdot P_C \quad (12)$$

unde :

$$COP_{VP} = \eta_{E-PC} \cdot COP_{VP}^C \quad (13)$$

Analiza energetica - sistem sursa hibrid. Cogenerare cu motore cu ardere interna si pompe de caldura iar :

$$COP_{VP}^C = \frac{273,15 + \theta_{VP}}{\theta_{CD} - \theta_{VP}} = \frac{273,15 - \Delta t + t_{VP}}{t_{CD} - t_{VP} + 2 \cdot \Delta t} \quad (14)$$

Rezulta :

$$COP_{VP} = \eta_{E-PC} \cdot \frac{273,15 - \Delta t + t_{VP}}{t_{CD} - t_{VP} + 2 \cdot \Delta t} \quad (15)$$

si inlocuind in relatia (12) se obtine :

$$P_{T-VP} = \eta_{E-PC} \cdot \frac{273,15 - \Delta t + t_{VP}}{t_{CD} - t_{VP} + 2 \cdot \Delta t} \cdot f_{PC} \cdot \eta_E \cdot P_C \quad (16)$$

In consecinta puterea totala efectuiva intrata in sistemul sursa hibrid va fi :

$$P_S = P_C + P_{T-VP} = \left(1 + \eta_{E-PC} \cdot \frac{273,15 - \Delta t + t_{VP}}{t_{CD} - t_{VP} + 2 \cdot \Delta t} \cdot f_{PC} \cdot \eta_E \right) \cdot P_C \quad (17)$$

Se poate defini in consecinta eficienta sistemului sursa hibrid ca fiind raportul dintre puterea totala livrata de sistem consumatorului si puterea consumata de acesta (aferenta debitului de combustibil) :

$$COP_{SH} = \frac{P_{CONS}}{P_C} = f_C \cdot \eta_E + \eta_T + \eta_{E-PC} \cdot \frac{273,15 + \Delta t + t_{CD}}{t_{CD} - t_{VP} + 2 \cdot \Delta t} \cdot f_{PC} \cdot \eta_E \quad (18)$$

Si randamentul sistemului sursa hibrid ca fiind raportul dintre puterea totala livrata consumatorului si puterea totala intrata in sistemul sursa hibrid :

$$RND_{SH} = \frac{P_{CONS}}{P_S} = \frac{f_C \cdot \eta_E + \eta_T + \eta_{E-PC} \cdot \frac{273,15 + \Delta t + t_{CD}}{t_{CD} - t_{VP} + 2 \cdot \Delta t} \cdot f_{PC} \cdot \eta_E}{1 + \eta_{E-PC} \cdot \frac{273,15 - \Delta t + t_{VP}}{t_{CD} - t_{VP} + 2 \cdot \Delta t} \cdot f_{PC} \cdot \eta_E} \quad (19)$$

In continuare este firesc sa punem problema dimensionarii capacitatii instalate in grupul de motoare termice si in grupul de pompe de caldura vis a vis de consumatorul considerat si care este caracterizat de anumite puteri termice si electrice necesare in functie de temperatura exterioara. Astfel se va considera ca relatia (9₃)

exprima puterea termica necesara consumatorului si relatia (10) puterea electrica necesara consumatorului :

$$P_{T-C} = \left(\eta_T + \eta_{E-PC} \cdot \frac{273,15 + \Delta t + t_{CD}}{t_{CD} - t_{VP} + 2 \cdot \Delta t} \cdot f_{PC} \cdot \eta_E \right) \cdot P_C \quad (9_3)$$

$$P_{E-MT-C} = (1 - f_{PC}) \cdot \eta_E \cdot P_C \quad (10)$$

Relatiile (9₃) si (10) formeaza un sistem de 2 ecuatii cu 2 necunoscute acestea fiind cota f_{PC} de putere electrica furnizata catre grupul pompelor de caldura si respectiv puterea la nivelul combustibilului de alimentare a motoarelor termice PC.

Raportand relatia (9₃) la relatia (10) se elimina necunoscuta P_C si se obtine o ecuatie cu o necunoscuta aceasta fiind f_{PC} . Astfel :

$$\frac{1 + \eta_{E-PC} \cdot \frac{273,15 + \Delta t + t_{CD}}{t_{CD} - t_{VP} + 2 \cdot \Delta t} \cdot f_{PC} \cdot \frac{\eta_E}{\eta_T}}{(1 - f_{PC}) \cdot \frac{\eta_E}{\eta_T}} = \frac{P_{T-C}}{P_{E-MT-C}} \quad (20)$$

Raportul dintre randamentul electric si randamentul termic (η_E / η_T) la grupul de motoare cu ardere interna, reprezinta factorul de cogenerare care caracterizeaza grupul de motoare. Termenul din membrul drept al ecuatiei (20) reprezinta o valoare calculabila care caracterizeaza consumatorul si care este functie de temperatura exterioara. Rezolvarea ecuatiei (20) este simpla si va fi efectuata in cadrul studiului de caz care va fi prezentat in continuare. Pentru determinarea capacitatii motoarelor termice instalate se va apela la relatia (10) pusa sub forma :

$$P_C = \frac{P_{E-MT-C}}{(1 - f_{PC}) \cdot \eta_E} \quad (21)$$

In continuare se stabileste capacitatea grupului de pompe de caldura ce trebuie instalata, pentru aceasta utilizand relatia (16) pusa sub forma :

$$P_{T-VP} = \eta_{E-PC} \cdot \frac{273,15 - \Delta t + t_{VP}}{t_{CD} - t_{VP} + 2 \cdot \Delta t} \cdot \frac{f_{PC}}{1 - f_{PC}} P_{E-MT-C} \quad (22)$$

2.2. Studiu de caz. Rezultate practice

Se va considera ca In relatiile (20), (21) si (22) sunt cativa parametrii care pot

Analiza energetica - sistem sursa hibrid. Cogenerare cu motore cu ardere interna si pompe de caldura fi precizati, si anume:

η_T – randamentul termic al motoarelor = 0,55;

η_E – randamentul electric al motoarelor = 0,35;

η_{E-PC} – randamentul electric al pompelor de caldura = 0,70;

Δt – diferenta medie de temperatura la condensatorul si vaporizatorul pompelor de caldura = 5°C;

t_{VP} – temperatura sursei reci = 15 °C;

t_{CD} – temperatura sursei calde = temperatura agentului termic utilizat in instalatia de incalzire a consumatorului si care are o valoare conforma graficului de reglaj termic calitativ, deci functie de temperatura exterioara, asa cum va fi prezentat in continuare, cand se vor preciza si puterea termica si electrica necesare consumatorului in diferite conditii de temperatura exterioara;

La fel ca si in cazul lucrarii [1] se va considera un consumator format din 6 blocuri avand fiecare 48 de apartamente si deci insumand 288 de apartamente in total. Descrierea mai detaliata a consumatorului se gaseste prezentata in [1] atat in ceea ce priveste puterile termice necesare cat si in ceea ce priveste puterile electrice necesare. Insa daca in lucrarea [1] s-a considerat ca parametrii nominali ai agentului termic din instalatia de incalzire au fost 90/70 °C, de aceasta data parametrii nominali considerati au fost 85/65 °C.

Tabel 1

t_e	t_{CD}	P_{t-c}	P_{e-c}	f_{PC}	P_c	P_{vp}	$P_c + P_{vp}$	$P_{t-c} + P_{e-c}$
°C	°C	kW	kW		kW	kW	kW	kW
-15	85	1584	144	0,665	1228,383	708,420	1936,596	1728,000
-10	77,38	1378	144	0,615	1068,352	629,620	1697,793	1522,000
-5	69,53	1173	144	0,552	917,758	544,320	1461,925	1317,000
0	61,39	967	144	0,471	777,232	450,017	1227,121	1111,000
5	52,84	761	144	0,367	649,644	345,431	994,968	905,000
10	43,74	555	144	0,236	538,588	227,704	766,204	699,000
20	20	144	144	-0,038	396,257	-70,165	326,030	288,000

In tabelul 1 se prezinta in sinteza rezultatele obtinute, constand in capacitatile necesare la diverse temperaturi exterioare pentru grupul de motoare termice si pentru grupul de pompe de caldura, rezultate care vor fi in continuare prezentate grafic mai detaliat.

In tabelul 2 se prezinta coeficientii de performanta rezultati pentru sistemul hibrid si randamentele de lucru ale acestuia, rezultate care de asemenea vor fi prezentate grafic mai detaliat.

Tabel 2

te	t _{CD}	COP _{SH}	RND _{SH}
°C	°C		
-15	85	1,407	0,892
-10	77,38	1,425	0,896
-5	69,53	1,435	0,901
0	61,39	1,430	0,905
5	52,84	1,393	0,910
10	43,74	1,298	0,912
20	20	0,727	0,883

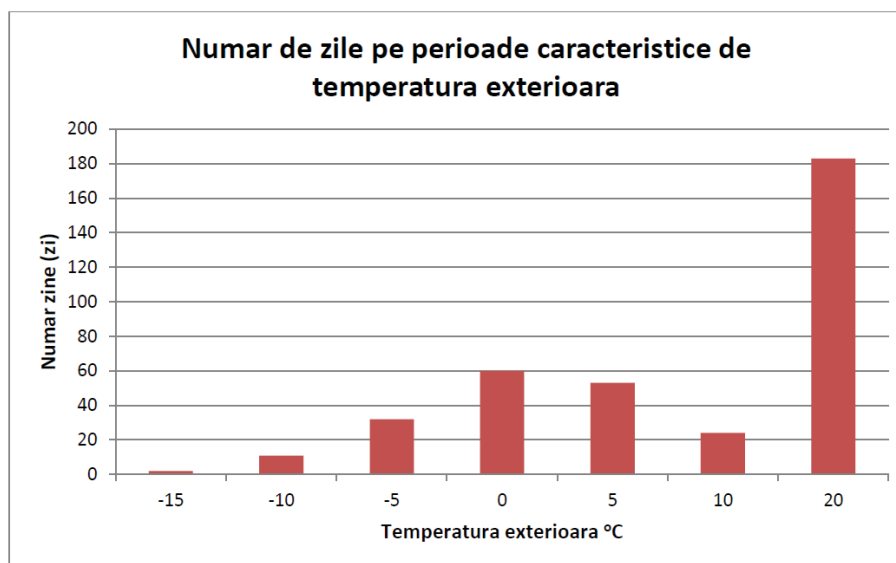


Fig. 2

In fig. 2 se prezinta distributia considerate a numarului de zile aferente perioadelor de temperaturi caracteristice date corespunzatoare tabelului 3.

Tabel 3

Domeniu temp. ext.	te	zile
	°C	zi
-17.5...-12.5	-15	2
-12.5...-7.5	-10	11
-7.5...-2.5	-5	32
-2.5...2.5	0	60
2.5...7.5	5	53
7.5...12.5	10	24
> 12.5	20	183

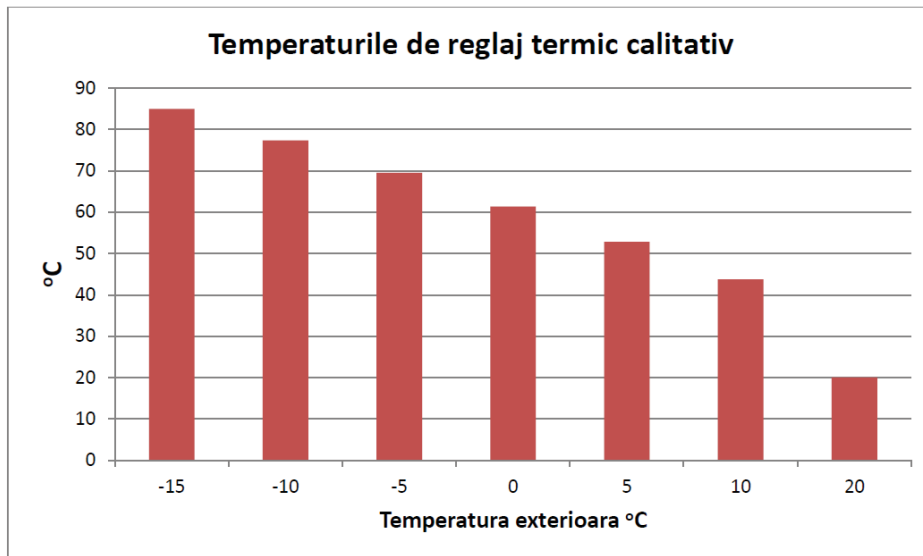


Fig. 3

In fig. 3 se prezinta valorile temperaturilor de intrare a agentului termic in instalatia de incalzire a grupului consumatorilor functie de temperature exterioara (conform reglajului termic calitativ considerat).

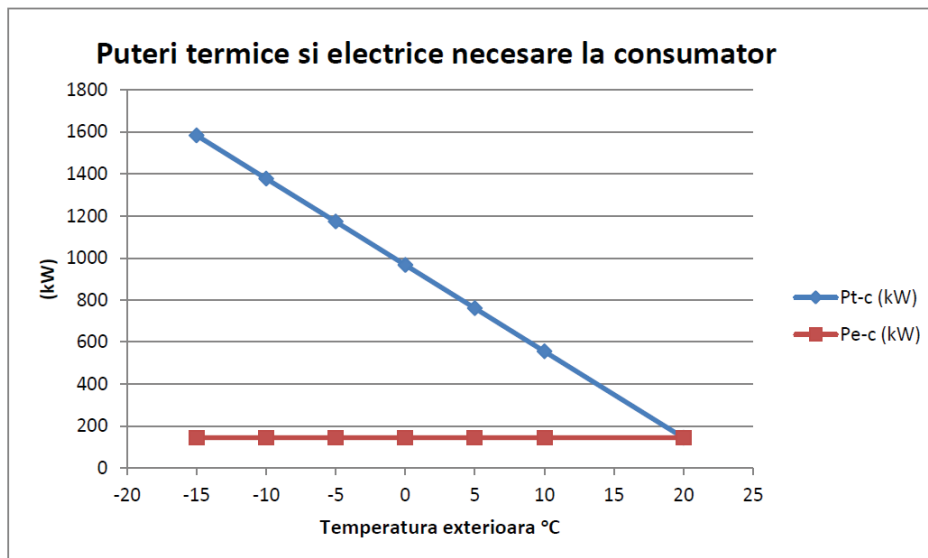


Fig. 4

In fig. 4 se prezinta puterile termice si electrice necesare grupului de consumatori functie de temperature exterioara.

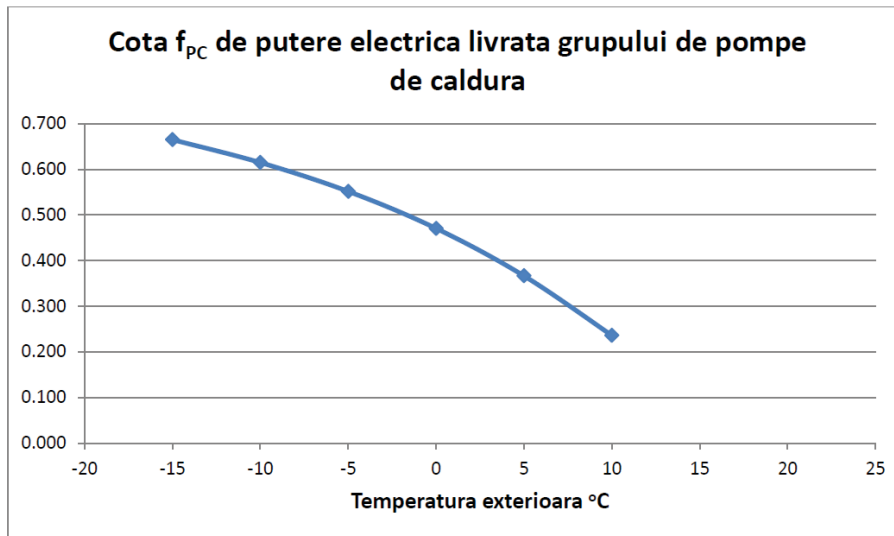


Fig. 5

In fig. 5 se prezinta cota f_{PC} de putere electrica livrata din partea grupului de motoare termice catre grupul pompe de caldura. Se observa ca aceasta cota este din ce in ce mai mare cu cat temperatura exterioara scade si necesarul de putere termica al grupului consumatorilor este mai mare.

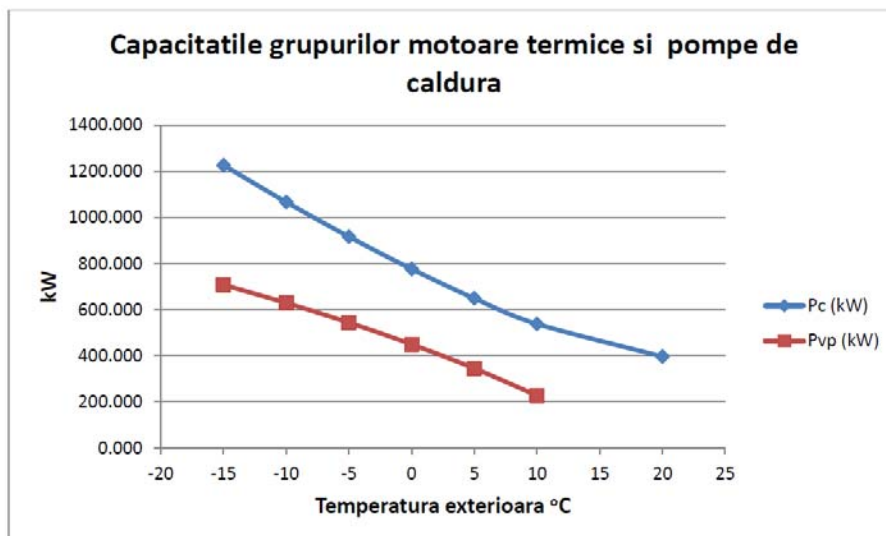


Fig. 6

In fig. 6 se prezinta capacitatile grupurilor de motoare termice si de pompe de caldura care trebuie activate functie de solicitarea climatica si deci de necesarurile de putere termica si electrica aferente grupului consumatorilor. Se observa ca au rezultat capacitati de aproximativ 2 ori mai mari pentru grupul motoarelor termice decat pentru grupul pompelor de caldura.

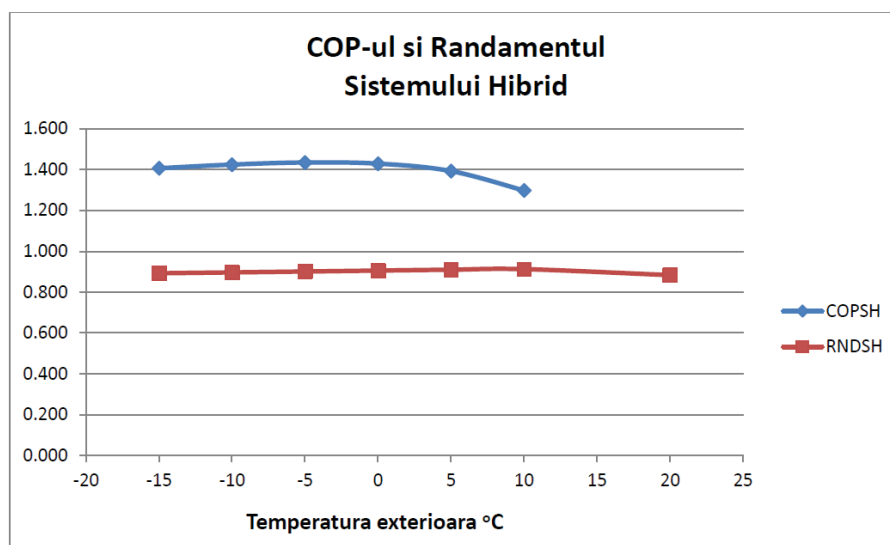


Fig. 7

In fig. 7 se prezinta indicatorii de performanta energetica aferenti sistemului hibrid, eficienta si randamentul acestuia definiti mai inainte in cadrul lucrarii. Se observa ca eficienta este de cca 1,4 iar randamentul de cca. 0.9.

3. Concluzii

Cuplarea unui grup de pompe de caldura cu un grup de motoare termice, in situatia in care exista aceasta posibilitate reprezinta o solutie energetica buna prin faptul ca ofera posibilitatea remodelarii raportului intre puterea termica si cea electrica furnizata de sistemul sursa in asamblu si bine inteles datorita aportului suplimentar de energie pe care grupul de pompe de caldura in aduc din mediul ambiantal.

In functie de puterile termice si electrice necesare grupului de consumatori, capacitatile activate ale grupurilor de motoare termice si de pompe de caldura vor lua valori din ce in ce mai mari cu cat temperature exterioara scade si de ci cu cat solicitarea climatica asupra consumatorilor deserviti este mai intensa.

Cota de putere electrica livrata de grupul de motoare termice catre grupul de pompe de caldura creste cu cat necesarul de putere termica la grupul de consumatori creste si in consecinta, avand in vedere ca si capacitatea activa a grupului de motoare creste rezulta o crestere din ce in ce mai pronuntata a puterii electrice de alimentare a grupului de pompe de caldura. In sezonul cald se remarca faptul ca nu este necesara utilizarea pompelor de caldura. Daca insa s-ar fi tinut cont de necesarul de frig al grupului consumatorilor atunci ar fi trebuit avute in vedere niste pompe de caldura reversibile.

Lista de Notatii

P_C – puterea termica aferenta debitului de combustibil de alimentare al motoarelor termice, W;

P_{T-MT} – puterea termica livrata de motoarele termice, W;

P_{E-MT} – puterea electrica livrata de motoarele termice, W;

P_{PD-MT} – puterea pierduta la nivelul motoarelor termice, W;

$P_{E-MT-PC}$ – puterea electrica livrata de motoarele termice catre pompele de caldura, W;

P_{E-MT-C} – puterea electrica livrata de motoarele termice catre consumatorii deserviti, W;

P_{T-CD} – puterea termica livrata de pompele de caldura la consumatorii deserviti, W;

P_{T-VP} – puterea termica absorbita de pompele de caldura din mediul ambiental, W;

P_{CONS} – puterea totala livrata de sistemul sursa hibrid consumatorului, W;

P_S – puterea totala intrata in sistemul sursa hibrid, W;

θ_{CD} – temperatura de condensare a agentului de lucru din pompele de caldura,

θ_{VP} – temperatura de vaporizare a agentului de lucru din pompele de caldura,

t_{CD} – temperatura sursei calde aferente pompelor de caldura, °C;

t_{VP} – temperatura sursei reci aferente pompelor de caldura, °C;

Δt – diferenta medie de temperatura la condensatorul si vaporizatorul pompelor de caldura intre temperatura agentului din pompa de caldura si temperatura sursei calde respectiv reci, °C;

η_T – randamentul termic al motoarelor, -;

η_E – randamentul electric al motoarelor, -;

η_{E-PC} – randamentul electric al pompelor de caldura, -;

RND_{SH} – randamentul sistemului sursa hibrid, -;

f_{PC} – cota de putere electrica livrata de motoarele termice catre pompele de caldura, -;

f_C – cota de putere electrica livrata de motoarele termice catre consumatorii deserviti, -;

COP_{CD} – coeficientul de performanta la nivelul condensatoarelor pompelor de caldura, -;

$COP^{C_{CD}}$ – coeficientul de performanta aferent ciclului Carnot asociat, la nivelul condensatoarelor pompelor de caldura, -;

COP_{VP} – coeficientul de performanta la nivelul vaporizatoarelor pompelor de caldura, -;

$COP^{C_{VP}}$ – coeficientul de performanta aferent ciclului Carnot asociat, la nivelul vaporizatoarelor pompelor de caldura, -;

COP_{SH} – coeficientul de performanta al sistemului sursa hibrid, -;

Bibliografie

1. Florin Iordache, Radu Alexandru Baci, Stefan Burchila – Analiza energetica privind utilizarea unui sistem de cogenerare pentru alimentarea cu caldura a unui ansamblu de blocuri din mediul urban – ed. MATRIXROM – Revista romana de inginerie civila, vol. 6, 2015, nr. 2;
2. Florin Iordache, Mugurel Talpiga – Sistem sursa cu captatoare solare si pompa de caldura – ed. MATRIXROM – Revista romana de inginerie civila, vol. 6, 2015, nr. 3;
3. Florin Iordache – Energetica echipamentelor si sistemelor termice din instalatii – ed. Conspress, 2010, Bucuresti;
4. Ioan Boian, Florea Chiriac – Pompe de caldura – ed. MATRIXROM, 2013;