

ANALYSE ÉXERGOÉCONOMIQUE DES INSTALLATIONS DE TRIGÉNÉRATION

Tănase PANAIT, Krisztina UZUNEANU,
Marcel DRĂGAN, Gheorghe CIOCEA, Ioana PANAIT

UNIVERSITE "DUNAREA DE JOS", Galati

Rezumat. Una dintre metodele de creștere a randamentului instalațiilor termoenergetice este producerea simultană de lucru mecanic, de căldură și de frig, în regim de trigenerare. Ținând cont de complexitatea instalațiilor cu trigenerare, definirea criteriilor de performanță reprezintă aplicarea noțiunilor de randament energetic, randament exergetic și randament exergoeconomic pentru aceste instalații.

Cuvinte cheie : performanță energetică/ cogenerare/ trigenerare/ analiză exergoeconomică.

Résumé. L'une des méthodes connues d'augmentation de l'efficacité des installations thermoénergétiques est la production simultanée de travail, de chaleur et de froid, dans un régime de trigénération. En tenant compte de la complexité des installations de trigénération, définir des critères de performance signifie l'application spécifique des notions de l'efficacité énergétique, efficacité exergetique et efficacité exergoeconomique pour ces installations.

Mots clés: performance énergétique / cogénération / trigénération / analyse exergoeconomique.

1. INTRODUCTION

Le problème majeur du réchauffement global de l'atmosphère impose l'adoption des installations thermoénergétiques avec une efficacité plus grande. Dans cette manière on réalise tant la réduction des émissions des gaz à effet de serre, qu'une économie importante des ressources énergétiques aussi. Dans ce sens, il est unanimement reconnu et recommandé la méthode de la production simultanée de travail, de chaleur et du froid dans les installations de cogénération et trigénération, "Casarosa et al. (2001), Bejan (1996), Korobitsyn (1998)".

Les performances des installations de cogénération et trigénération dépendent d'un grand nombre de paramètres et il persiste encore des controverses concernant la modalité de les définir. Il s'agit, spécialement, d'établir les connexions entre les consommations de l'énergie primaire (combustible) et chaque forme utile d'énergie produite (travail, chaleur, froid). Par ces connexions on peut comparer les diverses technologies de production des énergies demandées par les consommateurs et on peut adopter les meilleures structures des installations.

Les paramètres de performance pour chaque installation thermoénergétique sont définis conformément aux conventions basées sur les principes de la thermodynamique et sur la nomination des énergies consommées et des énergies utiles qui traversent les surfaces de frontière des systèmes analysés. Pour des installations thermoénergétiques simples, qui produisent un seul type d'énergie utile, il suffit de faire l'analyse des celles-ci par des paramètres de performance simples : rendement thermique, rendement thermodynamique, efficacité frigorifique, efficacité des pompes de chaleur, consommation spécifique de chaleur, consommation

spécifique de travail mécanique, "Bejan (1996), Feidt (2001)". Ces paramètres des performances peuvent être utilisés seulement pour l'analyse des systèmes individuels. Si l'on compare des systèmes différents, alors apparaissent des confusions.

Dans le cas des installations complexes, qui peuvent avoir des consommations et énergies utiles de différents types, (comme, par exemple, les installations de cogénération et trigénération), la définition de certains paramètres de performance simples, peut être réalisée seulement pour des analyses partielles. Les analyses complètes, qui peuvent permettre la comparaison des diverses technologies d'obtention des effets énergétiques utiles, nécessitent une rigoureuse définition des paramètres de performance. Dans ces sens, une première étape peut être constituée par l'analyse jusqu'au niveau de la détermination des consommations spécifiques d'énergie primaire (combustible). On peut établir les économies de combustible obtenues par la production des divers types d'énergie dans des installations de cogénération ou trigénération, par rapport aux situations de production séparée de ces énergies, "Korobitsyn (1998), Panait et al. (2006)". Mais la situation se complique si l'on essaye la répartition sur chaque type d'énergie utile des consommations des installations de cogénération ou trigénération, cela en connexion avec la détermination des coûts spécifiques de production. Jusqu'à présent, les tentatives de justification des manières de répartition des consommations par des type d'énergies utiles, en utilisant les paramètres de performance simples, (rendement thermique ou thermodynamique, ou l'efficacité frigorifique), ne sont pas toujours acceptables, parce qu'elles ne transfèrent pas correctement les avantages de la cogénération ou trigénération sur chaque type d'énergie produite. La solution correcte de cette situation peut être réalisée lorsqu'on fait appel à l'analyse exergoeconomique, "Bejan et al. (1996), Erlach et al. (2001), Panait (2003)".

* COFRET'08, Juin 11-13, 2008, Nantes – France.

Pour mettre en évidence les avantages de l'application de l'analyse exergoéconomique, dans cette ouvrage on présente premièrement les paramètres de l'analyse énergétique, puis l'analyse exergetique et enfin on développe la méthode de l'analyse exergoéconomique pour les installations complexes de cogénération et trigénération.

2. L'ANALYSE ÉNERGÉTIQUE

On considère premièrement les diagrammes énergétiques de production séparée du travail, de la chaleur et du froid, conformément à la *figure 1*. Ainsi, dans le cas du *diagramme 1*, on considère une installation de production séparée de la puissance mécanique P , dans laquelle le flux nécessaire de chaleur est Q_C^P , provenant d'un débit correspondant de combustible, et ΔQ_1 représente le flux de chaleur perdue, y compris par la chaleur cédée à la source froide.

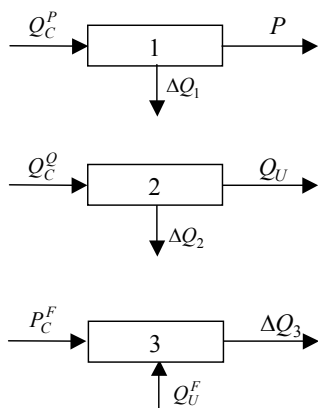


Fig. 1. Diagrammes énergétiques de production séparée: 1 – de de puissance; 2 – de la chaleur; 3 – du froid.

Par l'analyse énergétique, dans ce cas, le paramètre de performance utilisé est le rendement thermodynamique :

$$\eta_t = \frac{P}{Q_C^P} = 1 - \frac{\Delta Q_1}{Q_C^P} \quad (1)$$

Conformément au rendement thermodynamique on peut analyser les modalités de réduction des pertes d'énergie et on peut comparer les performances des installations de production séparée de travail mécanique qui ont des structures et des paramètres de fonctionnement différents.

Dans le *diagramme 2* on considère une installation de production séparée de flux de chaleur utile Q_U , dans laquelle on consomme un combustible équivalent au flux de chaleur Q_C^Q , et ΔQ_2 représente les pertes de chaleur. La performance énergétique est définie maintenant par le rendement thermique :

$$\eta_t = \frac{Q_U}{Q_C^Q} = 1 - \frac{\Delta Q_2}{Q_C^Q} \quad (2)$$

Dans ce cas aussi, la performance de l'installation peut être analysée à partir de l'analyse des causes des pertes d'énergie, par comparaison avec d'autres installations de production séparée de la chaleur avec des structures et des paramètres différents.

Mais on ne peut pas comparer le rendement thermodynamique des installation de production séparée de travail mécanique et le rendement thermique des installations de production séparée de la chaleur, parce que, dans le premier cas, après d'élaboration de la chaleur par la combustion du combustible, il s'agit des processus cycliques formés par des transformations thermodynamiques dont le résultat est la transformation de la chaleur en travail mécanique, et dans le deuxième cas, après la combustion, il s'agit seulement des processus de transport de chaleur.

Le *diagramme 3* représente les flux énergétiques correspondant à une installation de production séparée du froid. Si cette installation est du type avec compression mécanique de la vapeur, alors le produit utile est représenté par la chaleur extraite de l'espace refroidi Q_U^F , pour laquelle on consomme la puissance mécanique Q_U^F , et ΔQ_3 représente la chaleur dissipée dans le milieu ambiant dans le cadre du cycle thermodynamique inverse. Dans ce cas, on définit comme coefficient de performance l'efficacité frigorifique :

$$\varepsilon_f = \frac{Q_U^F}{P_C^F} \quad (3)$$

Evidemment, dans ce cas aussi, conformément à l'efficacité frigorifique, on peut établir les influences des paramètres de fonctionnement et de la structure de l'installation frigorifique sur les performances de celle-ci, mais sans rendre possible une comparaison avec les performances des installations de production séparée de travail ou de la chaleur.

Pour les installations frigorifiques avec compression de vapeur, la manière antérieure de définir l'efficacité frigorifique, d'ailleurs fréquente, déjà pose des problèmes. Ça se passe parce que l'efficacité frigorifique, donnée par la relation (3), est rapportée à la puissance mécanique consommée, sans considérer que cette puissance a été obtenue par une consommation de chaleur provenant par la combustion d'un combustible.

En conséquence, il est plus correct de définir l'efficacité frigorifique absolue sous la forme :

$$\varepsilon_f^a = \frac{Q_U^F}{Q_C^F} = \frac{Q_U^F}{P_C^F} \frac{P_C^F}{Q_C^F} = \varepsilon_f \eta_t \quad (4)$$

Donc, l'efficacité frigorifique absolue est donnée par le produit entre l'efficacité frigorifique classique et le rendement thermodynamique de l'installation de production du travail.

Si l'installation frigorifique est était de type avec absorption, alors le problème signalé n'apparaîtrait pas, parce que dans ce cas on ne consomme plus de la puissance mécanique, mais on consomme directement la chaleur obtenue par la combustion du combustible.

Passant maintenant aux installations thermoénergétiques de cogénération et trigénération, dans la *figure 2* on a représenté les diagrammes énergétiques correspondants aux diverses combinaisons.

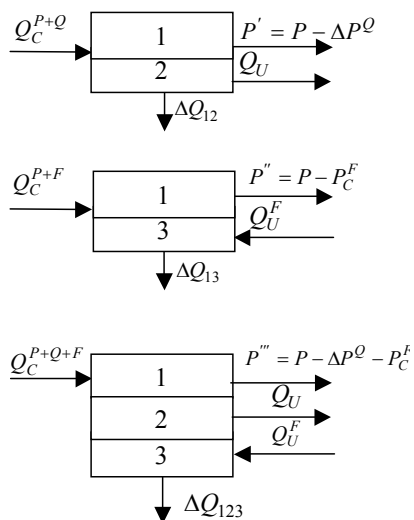


Fig. 2. Diagrammes énergétiques de production en cogénération et trigénération:
1 – de de puissance; 2 – de la chaleur; 3 – du froid.

Ainsi, le premier *diagramme 1-2* correspond à la production par cogénération de travail et de chaleur. Le flux de chaleur consommée est Q_C^{P+Q} , les produits utiles sont représentés par la puissance mécanique $P' = P - \Delta P^Q$ et le flux de chaleur Q_U , et ΔQ_{12} englobe toutes les pertes de chaleur. Ici ΔP^Q représente la réduction de la puissance mécanique à cause de la cogénération.

Dans ce cas, la méthode de l'analyse énergétique permet de définir un rendement sous la forme :

$$\eta_{P+Q} = \frac{P' + Q_U}{Q_C^{P+Q}} = 1 - \frac{\Delta Q_{12}}{Q_C^{P+Q}} \quad (5)$$

Celle-ci ne correspond ni au rendement thermodynamique de production de la puissance mécanique, ni au rendement thermique de production de la chaleur. Elle peut être nommée rien que « rendement d'utilisation de la chaleur primaire » et permet seulement l'analyse des pertes d'énergie des installations de cogénération.

Mais la manière de définir ce rendement détermine une série de confusions concernant la modalité dans laquelle on doit allouer (attribuer) les coûts par ces deux produits, travail et chaleur.

Le deuxième *diagramme 1-3* représente la production simultanée de travail et du froid. Ici la consommation de l'énergie primaire a été notée par Q_C^{P+F} , les produits utiles sont représentés par la puissance mécanique $P'' = P - P_C^F$, et par la chaleur extraite de l'espace

refroidi Q_U^F , et enfin ΔQ_{13} représente la somme des pertes d'énergie pour l'installation entière. On a noté avec P_C^F la puissance mécanique consommée par l'installation frigorifique. Dans ce cas il est impossible de définir un rendement global d'utilisation de la chaleur primaire, parce que, la chaleur utile dans les installations frigorifiques et la chaleur utile des installations de chauffage ont des sens opposés. Pour cette raison, il est absolument nécessaire d'effectuer une séparation des flux énergétiques, à partir de la consommation de l'énergie primaire jusqu'aux énergies utiles, comme si il s'agissait du fonctionnement parallèlement des deux installations simples. C'est à dire, la consommation totale Q_C^{P+F} se divise en des consommations partielles Q_C^P et Q_C^F , et comme coefficients de performance on utilise le rendement thermodynamique pour la production de travail mécanique, respectivement l'efficacité frigorifique absolue pour la production du froid, conformément aux relations (1) et (4).

Enfin, le troisième *diagramme 1-2-3* correspond à une installation de trigénération, avec trois produits utiles simultanément : la puissance mécanique $P''' = P - \Delta P^Q - P_C^F$, la chaleur utile Q_U et la chaleur extraite de l'espace refroidi Q_U^F . Pour ça on consomme la chaleur Q_C^{P+Q+F} , et ΔQ_{123} représente la somme des pertes d'énergie pour l'installation entière. Dans ce cas aussi il est nécessaire de séparer les flux énergétiques de l'installation frigorifique de ceux de l'installation de cogénération qui produit du travail et de la chaleur. Ainsi, nous aurons une consommation Q_C^{P+Q} , pour la production de la travail mécanique et de la chaleur, avec un rendement déterminé par l'application de la relation (5), respectivement une consommation Q_C^F , pour la production du froid, avec l'efficacité absolue obtenue par l'application de la relation (4), la somme de ces consommations étant Q_C^{P+Q+F} . Dans ce cas aussi persiste le problème de l'impossibilité de la consolidation d'une méthode correcte de répartition des coûts sur les trois produits.

On doit remarquer que les performances des installations de cogénération ou trigénération peuvent être comparées partiellement avec celles des installations de production séparée de la puissance mécanique, si l'on part de la même consommation d'énergie primaire :

$$Q_C^P = Q_C^{P+Q} = Q_C^{P+F} = Q_C^{P+Q+F} \quad (6)$$

Par suite, les puissances mécanique P' , P'' , P''' , produites dans les installations à cogénération et trigénération de la *figure 2*, ont été exprimées en fonction de la puissance mécanique P produite dans l'installation séparée et les réductions de puissance mécanique dues à la cogénération ou trigénération, ΔP^Q , P_C^F .

3. L'ANALYSE ÉXERGÉTIQUE

Pour préparer le passage à l'analyse exergoéconomique il est absolument nécessaire de préciser les termes de l'analyse exergétique pour les systèmes considérés, "Radenco (1976), Panait et al. (1997), Panait et al. (2002)".

La figure 3 représente les diagrammes exergétiques pour la production séparée de travail mécanique, de la chaleur et du froid.

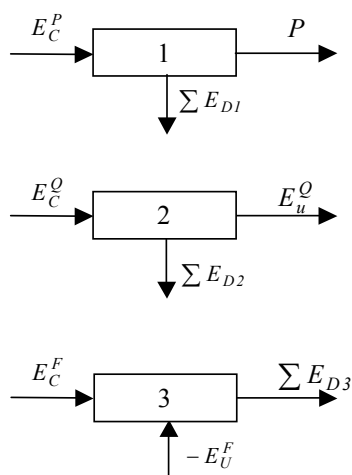


Fig. 13. Diagrammes exergétiques de production séparée: 1 – de de puissance; 2 – de la chaleur; 3 – du froid.

Les équations du bilan exergétique sont exprimées par les relations suivantes :

$$E_C^P = P + \sum E_{D1} \quad (7)$$

$$E_C^Q = E_U^Q + \sum E_{D2} \quad (8)$$

$$E_C^F = E_U^F + \sum E_{D3} \quad (9)$$

C'est à dire, dans tous les cas, les exergies consommées, E_C^P , E_C^Q , E_C^F , se retrouvent partiellement dans les exergies utiles (la puissance mécanique produite, P , l'exergie de la chaleur utile, E_U^Q , et l'exergie de la chaleur utile extraite de l'espace refroidi, E_U^F), et le reste, $\sum E_{D1}$, $\sum E_{D2}$, $\sum E_{D3}$, représentent des exergies détruites à cause de l'irréversibilité des processus.

Dans la figure 4 on a représenté les diagrammes exergétiques pour une installation de cogénération avec la production de travail mécanique et de chaleur, respectivement une installation de trigénération avec la production de travail mécanique, de chaleur et du froid.

Dans ce cas, les équations de bilan exergétique sont :

$$E_C^{P+Q} = P' + E_U^Q + \sum E_{D12} \quad (10)$$

$$E_C^{P+Q+F} = P''' + E_U^Q + E_U^F + \sum E_{D123} \quad (11)$$

Evidemment, on peut obtenir encore ces équations par la somme des équations (7), (8) et (9), correspondantes aux productions séparées.

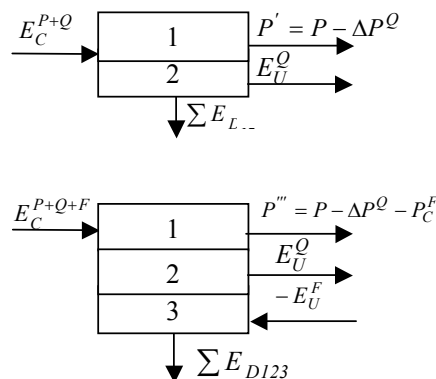


Fig. 4. Diagrammes exergétiques de production en cogénération et trigénération: 1 – de de puissance; 2 – de la chaleur; 3 – du froid.

4. L'ANALYSE ÉXERGOÉCONOMIQUE

Comme méthode complexe d'analyse de l'efficacité des installations thermoénergétiques, l'analyse exergoéconomique consiste dans la combinaison de l'analyse économique classique avec l'analyse exergétique. Concrètement, le bilan des coûts s'exprime par des termes qui représentent les coûts des flux exergétiques consommés et les flux exergétiques des produits utiles à lesquels on ajoute une série de coûts non-exergétiques, liés aux tranches d'amortissement des installations, des frais d'exploitation et de maintenance. Dans cette manière on réalise une liaison directe entre les coûts spécifiques des produits utiles, qui représentent des paramètres de performance, et la qualité de ceux-ci, exprimée en exergie.

Pour l'installation de cogénération de la travail mécanique et de la chaleur, le bilan des coûts exergétiques peut être exprimé, conformément aux relations de la figure 4, avec la relation :

$$c_P P' + c_{eq} E_U^Q = c_{ecb} E_C^{P+Q} + Z_{12} \quad (12)$$

Dans cette relation c_P [\$/kJ] et c_{eq} [\$/kJ] représentent les coûts spécifiques de l'énergie mécanique (de la puissance), respectivement de l'exergie de la chaleur et ils sont les grandeurs inconnues qui doivent être déterminées. La somme des tranches d'amortissement, d'exploitation et de maintenance pour le système thermoénergétique, Z_{12} , représente les coûts nommés non-exergétiques.

Le coût spécifique de l'exergie du combustible, c_{ecb} [\$/kJ], peut être déterminé en fonction du coût spécifique du combustible c_{cb} [\$/kg], par l'intermédiaire de l'exergie spécifique du combustible e_{cb} [kJ/kg].

$$c_{ecb} = \frac{c_{cb}}{e_{cb}} \quad [$/kJ] \quad (13)$$

Si le flux exergétique du combustible E_C^{P+Q} , de la relation (10), qui exprime le bilan exergétique, est remplacé dans la relation (12), l'équation de bilan des coûts exergétiques devient :

$$c_P P' + c_{eq} E_U^Q = c_{ecb} (P' + E_U^Q + \sum E_{D12}) + Z_{12} \quad (14)$$

Cette relation met en évidence plus nettement quelle est la structure des coûts des produits finaux. Analysant la deuxième partie de la relation, on constate que, en plus du coût du combustible équivalent aux flux utiles d'exergie (l'énergie mécanique P' et l'exergie de la chaleur fournie E_U^Q), au coût des produits finaux on ajoute des coûts du combustible nécessaire à la compensation des flux d'exergie détruits dans le système thermoénergétique. Donc, chaque irréversibilité interne ou externe se retrouve dans des coûts supplémentaires des produits finaux, "Panait et al. (2004 a)".

L'équation (14) de bilan des coûts exergetiques pour l'ensemble de l'installation ne peut pas être résolue directement, parce qu'elle contient deux grandeurs inconnues. Sa solution serait possible seulement dans le cas où l'on pourrait écrire encore une équation.

Evidemment, les choses se simplifient pour les installations de production séparée de la travail ou de la chaleur, quand soit $E_U^Q = 0$, (l'installation produit seulement du travail mécanique), soit $P' = 0$ (l'installation produit seulement de la chaleur). Par suite, les coûts spécifiques de la puissance mécanique et de la chaleur produites dans des installations séparées, seront :

$$c_P = \frac{c_{ecb}(P + \sum E_{D1}) + Z_1}{P} \quad [$/kJ] \quad (15)$$

$$c_{eq} = \frac{c_{ecb}(E_U^Q + \sum E_{D2}) + Z_2}{E_U^Q} \quad [$/kJ] \quad (16)$$

Si l'installation fonctionne en régime de cogénération ($P' > 0$ și $E_U^Q > 0$), alors la détermination des coûts spécifiques de la puissance mécanique et de l'exergie de la chaleur qui interviennent dans la relation (12), doit se fonder sur une analyse très attentive des connexions entre les destructions d'exergie et chacun des produits finaux.

Le plus simple serait d'introduire comme relation supplémentaire, l'égalité entre les coûts spécifiques de la puissance mécanique et de l'exergie de la chaleur ($c_P = c_{eq}$), parce que les deux produits représentent des exergies. Par suite, dans ce cas, on résulte :

$$c_P = c_{eq} = \frac{c_{ecb}(P' + E_U^Q + \sum E_{D12}) + Z_{12}}{P' + E_U^Q} \quad [$/kJ] \quad (17)$$

Conformément à ce mode de détermination du coût d'exergie de la chaleur produite par cogénération, on arrive à un coût spécifique de la chaleur, proportionnel à la qualité de celle-ci, exprimée par le facteur exergetique moyen, fonction de la température moyenne à laquelle on transmet la chaleur T_m , et la température du milieu T_0 , "Panait et al. (2004 b)":

$$c_q = c_{eq} \left(1 - \frac{T_0}{T_m} \right) \quad [$/kJ] \quad (18)$$

Ce mode de répartition des coûts paraît justifié par le fait que les deux produits ont la même qualité (la puissance mécanique et l'exergie de la chaleur), "Panait et al. (2004 c)".

Mais, à une analyse plus attentive, on constate que la production de chaleur est désavantagée en faveur de la production d'énergie mécanique. Ça se passe parce que, par la relation (17) résulte qu'on répart à ces deux produits finaux les coûts entiers pour les destructions et les pertes d'exergie, et aussi la somme entière des tranches d'amortissement, exploitation et maintenance.

Lorsqu'on analyse la composition de l'installation avec des turbines à vapeur avec cogénération, on constate qu'une partie importante des agrégats de celle-ci sert seulement pour la réalisation du cycle thermodynamique de production de la puissance mécanique. Ces agrégats (le turbogénérateur, le condensateur, les réchauffeurs de l'eau d'alimentation) n'ont aucun rôle dans la production de la chaleur et par suite leur influence sur le coût de celle-ci n'est pas correcte. Dans ce contexte, nous proposons de faire une dissociation de l'équation de bilan des coûts exergetiques, en deux équations correspondantes à ces deux produits. Pour ça, on divise les coûts des destructions et des pertes d'exergie, et aussi les coûts non-exergetiques en fonction de l'apport du chaque agrégat aux produits finaux.

Plus précisément, la relation (14) peut être dissociée en deux relations :

$$c_P P' = c_{ecb} \left(P' + \sum E_{D1}^{CG} \right) + Z_1^{CG} \quad (19)$$

$$c_{eq} E_U^Q = c_{ecb} \left(E_U^Q + \sum E_{D2}^{CG} \right) + Z_2^{CG} \quad (20)$$

Dans ces relations $\sum E_{D1}^{CG}$, Z_1^{CG} , respectivement $\sum E_{D2}^{CG}$, Z_2^{CG} , représentent la somme des destructions d'exergie et les coûts non-exergetiques dans le cas de la production de la puissance mécanique et de la chaleur, en cogénération. Celles-ci sont inférieures à $\sum E_{D1}$,

Z_1 , respectivement à $\sum E_{D2}$, Z_2 , qui correspondent à la productions séparée, parce que en cogénération il y a des composantes d'installations communes pour la production de la puissance mécanique et de la chaleur et les destructions d'exergie et les coûts non-exergetiques doivent être repartis sur les deux produits proportionnellement à la valeur des exergies produites.

Par suite, pour le calcul des coûts exergetiques spécifiques illustrés par les relations (19) et (20), premièrement il faut réaliser une analyse détaillée de tous les éléments composants de l'installation de cogénération et deuxièmement, il faut répartir les destructions d'exergie et aussi les coûts non-exergetiques pour la production de la puissance mécanique et de la chaleur.

Passons maintenant à l'installation de trigénération, l'équation de bilan des coûts exergetiques est :

$$c_P P''' + c_{eq} E_U^Q + c_{ef} E_U^F = c_{ecb} \left(P''' + E_U^Q + E_U^F + \sum E_{D123} \right) + Z_{123} \quad (21)$$

Conformément aux mêmes considérations comme pour l'installation de cogénération, l'équation (21) sera dissociée en trois équations correspondantes à chaque produit :

$$c_P P''' = c_{ecb} \left(P''' + \sum E_{D1}^{TG} \right) + Z_1^{TG} \quad (22)$$

$$c_{eq} E_U^Q = c_{ecb} \left(E_U^Q + \sum E_{D2}^{TG} \right) + Z_2^{TG} \quad (23)$$

$$c_{ef} E_U^F = c_{ecb} \left(E_U^F + \sum E_{D3}^{TG} \right) + Z_3^{TG} \quad (24)$$

À partir de ces relations, on peut déterminer les coûts spécifiques c_p , c_{eq} , c_{ef} , pour la puissance mécanique produite, l'exergie de la chaleur produite, et l'exergie de la chaleur utile extraite de l'espace frigorifique. Dans ce cas, les sommes des destructions d'exergie et les coûts non-exergétiques qui reviennent à la production en trigénération de la puissance mécanique, de la chaleur et du froid, $\sum E_{D1}^{TG}$, Z_1^{TG} , $\sum E_{D2}^{TG}$, Z_2^{TG} , $\sum E_{D3}^{TG}$, Z_3^{TG} , sont plus petits par rapport au cas de la production séparée.

5. CONCLUSIONS

L'analyse exergoéconomique représente l'instrument le plus évolué pour la détermination des performances des installations thermoénergétiques de cogénération et trigénération, à cause du fait qu'elle permet la réalisation de la connexion directe entre les coûts spécifiques des produits énergétiques et la qualité de ces produits exprimée par leur exergie.

Concrètement, nous avons établi des relations par lesquelles on peut déterminer les coûts spécifiques de la puissance mécanique produite, de l'exergie de la chaleur produite, ou de l'exergie de la chaleur utile extraite de l'espace frigorifique. Ces coûts sont donnés par le coût spécifique de l'exergie du combustible consommé, auxquelles on ajoute les tranches non-exergétiques d'amortissement, exploitation et maintenance. Le coût d'exergie du combustible consommé est proportionnel aux flux exergétiques produits et aux flux d'exergies détruits à cause de l'irréversibilité des processus.

Les relations établies peuvent constituer le fondement de l'extension de l'analyse des systèmes thermoénergétiques simples, de cogénération ou trigénération, dans le sens de la détermination des influences des paramètres de travail et des paramètres structuraux sur les coûts spécifiques. Ces coûts spécifiques peuvent être convertis facilement en consommations spécifiques de combustible, ce qui permettra l'évaluation de l'impact sur le milieu de la production des diverses formes de produits énergétiques par des installations séparées ou par des installations de cogénération ou trigénération, "Panait et al. (2007)".

Evidemment, c'est par l'analyse exergoéconomique que l'on peut déterminer les performances des divers types d'installations thermoénergétiques.

Nomenclature

P [kW]	Puissance mécanique
Q [kW]	Chaleur
F [kW]	Froid = chaleur extraite de l'espace frigorifique
Q_C [kW]	Flux de chaleur consommé
ΔQ_C [kW]	Perte de chaleur
Q_U [kW]	Chaleur utile
Q_U^F [kW]	Chaleur utile extraite de l'espace frigorifique
P_C [kW]	Puissance mécanique consommée
η_t []	Rendement thermodynamique / thermique
ε_f []	Efficacité frigorifique
\dot{E}_C [kW]	Exergie consommée
E_D [kW]	Exergie détruite

E_U [kW]	Exergie utile
c_p [\$.kWh ⁻¹]	Coût spécifique de la puissance mécanique
c_{eq} [\$.kWh ⁻¹]	Coût spécifique de l'exergie de la chaleur
c_{ef} [\$.kWh ⁻¹]	Coût spécifique de l'exergie du froid
c_{ecb} [\$.kWh ⁻¹]	Coût spécifique de l'exergie du combustible
Z [\$.h ⁻¹]	Tranche des coûts non-exergétiques

Reconnaissance

Cet ouvrage a été élaboré dans le cadre des contrats CEEEX nr. 183 / 2006 et 281 / 2006 . financés par CNCISIS, Roumanie.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Bejan, A., *Termodinamică tehnică avansată*. Editura Tehnică, București, 1996.
- [2] Bejan, A.; Tsatsaronis, G.; Moran, M. *Thermal design and optimization*. John Wiley & Sons, New York, 1996.
- [3] Casarosa, C.; Franco, A. *Thermoeconomic Optimization of HRSG Operative Parameters for Combined Plants*. In: Proceedings, ECOS'01, Öztürk, A. and Göğüş, Y.A., ed., Istanbul – Turkiye, 2001, Vol. II, pp. 801 – 812.
- [4] Erlach, B.; Tsatsaronis, G.; Czesla, F. *A New Approach for Assigning Costs and Fuels to Cogeneration Products*. In: Proceedings of ECOS'01, Öztürk, A. and Göğüş, Y.A., ed., Istanbul – Turkiye, 2001, Vol. II, pp. 759-770.
- [5] Feidt, M.L., *Termodinamica și optimizarea energetică a sistemelor și proceselor*. Editura BREN, 2001, București.
- [6] Korobitsyn, M.A. *Analysis of Cogeneration, Combined and Integrated Cycles*. Feboodruk BV 1998, Enschede, Netherland.
- [7] Panait, T.; Gheorghiu, C.; Uzuneanu, K. *The improvement of heat recovery plants from burnt gases by means of exergetic analysis*. In: Proceedings, Sixth International Expert Meeting POWER ENGINEERING, 13-15 May, Maribor, Slovenija, 1997, Vol. B, pp. 237 – 244.
- [8] Panait, T.; Gheorghiu, C.; Uzuneanu, K.; Drăgan, M. *Application de l'analyse d'exergie à l'étude des systèmes thermoénergétiques complexes*. In: Travaux du Colloque Franco-Roumain COFRET'02, Université "Politehnica" Bucarest, 25 – 27 Avril 2002, pg. 68 – 71.
- [9] Panait, T. *Exergoeconomia sistemelor termoenergetice*. Editura Fundației Universitare "Dunărea de Jos", Galați, 2003.
- [10] Panait, T., Gheorghiu, C., Uzuneanu, K., Drăgan, M., *About the costs of exergy destruction in the steam turbines plants with cogeneration*. In Buletinul Institutului Politehnic din Iasi, Roumanie, 2004 a, Tomul L (LIV), Fasc. 6C, Sectia constructia de masini, pag. 195-200.
- [11] Panait, T., Dragan, M., Uzuneanu, K., 2004, *Exergoeconomic analysis of cogeneration thermoenergetic plants*. WEC Regional Energy Forum – FOREN 2004 b, Neptun, Roumanie.
- [12] Panait, T., Uzuneanu, K., Dragan, M., *Cogénération – principe du développement durable*. Colloque Réseau EURECO – COFRET'04, Nancy, France, 2004 c, pg. 208-212, ISBN: 2-905267-41-0.
- [13] Panait, T., Drăgan, M., Baltă, A. I., Stratulat, E., *Analyse des performances des installations cogeneratives*. Troisième Edition du Colloque Franco - Roumain - COFRET'06. Scientific bulletin of the „Politehnica” University of Timisoara, Transactions on mechanics, Roumanie, 2006, Tom 51 (65), Fascicola 1, pg. 235-240, ISSN 1224-6077.
- [14] Panait, T., Uzuneanu, K., Drăgan, M., Condrea, A.I., Stratulat, E., Dogărescu, G., *Sustainable development by using biomass in co-generation energetic plants*. 2nd International Conference on Thermal Engines and Environmental Engineering – METIME, June7-9, Galati, Romania, 2007, ISSN 1843-2794, Vol. 2 pg.149-154.
- [15] Radenco, V., *Termodinamică tehnică și mașini termice. Procese ireversibile*. Edp. București, 1976.