



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ ВАРНА

КАТЕДРА „ТОПЛОТЕХНИКА“

маг. инж. Надежда Огнянова Досева

***ТЕРМОИКОНОМИЧЕСКА ОПТИМИЗАЦИЯ НА
ТОПЛОТЕХНИЧЕСКИ СИСТЕМИ***

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертационен труд за присъждане на образователна – научна степен
„ДОКТОР“ по научна специалност 02.06.01 „Теоретична топлотехника“

Научен ръководител: доц. д-р инж. Даниела Чакърова

ВАРНА

2017

Дисертационният труд е с обем 161 страници. Съдържа увод, шест глави, заключение и едно приложение. Основният текст на дисертацията съдържа 24 фигури и 36 таблици. Използвани са 204 труда и източници на информация – цитирани са 182 броя литературни източници на латиница и 22 броя на кирилица.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за публична защита на заседание на Разширен катедрен съвет на катедра "Топлотехника" на Корабостроителен факултет към Технически университет – гр. Варна на 26. 04. 2017 г.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на г. от ч. в на открито заседание на жури, сформирано със заповед на Ректора №/..... г. Материалите по защитата (дисертация, рецензии и становища) са на разположение на интересувалите се в Докторантски център, стая 318 НУК.

ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Актуалност на проблема

Според доклада на световната петролна компания „British Petroleum” за състоянието и перспективите на световната енергетика от юни 2011 година (British Petroleum, BP Statistical Review of World Energy, 2011) глобалната консумация на енергия през 2010 година се покачва бързо в резултат на икономическото възстановяване, а оттам растат и цените на петрола. От представените данни става ясно, че следствие на индустриализацията и повишаването на благосъстоянието на населението в развиващите се страни, особено в Китай и Индия, потреблението на първична енергия ще нарастне значително и ще поддържа тези тенденции и в бъдеще. Изложените факти за световното потребление на първична енергия са потвърдени към днешна дата: съгласно официалния доклад на British Petroleum от юни, 2016 год., (British Petroleum, BP Statistical Review of World Energy, 2016) консумираната в световен план първична енергия през 2015 год. е с 1% повече, отколкото през предходния период. Най – голям растеж се наблюдава в консумацията в Китай - с 1.5% повече. Това означава, че световната зависимост и уязвимост на страните със слаб икономически растеж от петролните продукти ще продължи в дългосрочен план, въпреки бурното развитие на възобновяемите енергийни технологии – страна като България, например, според някои твърдения (*Агенция за икономически анализи и прогнози, 2005*), има нужда от повече енергия в сравнение с другите европейски страни за да произведе единица брутен вътрешен продукт (БВП) и е нетен вносител на енергия. Освен това, двата доклада показват, че глобалните емисии на въглероден диоксид от използването на енергия през 2011 год. са нарастнали с темп, който е най-висок от 1969 година насам, но през 2015 год. бележат най-ниския си ръст – с 0.1% спрямо предходния период. Следователно, от изложените по-горе данни повече от ясно е, че оптимизация на промишлените топлотехнически системи с оглед намаляване на енергопотреблението и свързаните с това емисии е една особено актуална тематика.

2. Цел на изследването:

Разработване на ефективна процедура за решаване на задача за термоикономически анализ и оптимизация на промишлени топлотехнически системи. Процедурата включва съставяне на термоикономически модели с отчитане на параметрите на околната среда, методи и алгоритми с програмна реализация за получаване на оптималните параметри на системата, както и извършване на сравнителен анализ на резултатите.

3. Обект и предмет на изследването:

Обект на изследването са широк клас от промишлени топлотехнически системи, за които е установена необходимостта от оптимизация. Разработените методики и модели, които са тествани на когенерационната система Пречиствателна станция за отпадни води (ПСОВ) гр. Варна.

4. Методи на изследването

Използван е метод за термоикономическа оптимизация, който включва следните методи и подходи:

- Метод за термодинамичен анализ – ексергиен метод.
- Метод за икономически анализ - на база метода на минимално изискваните печалби.
- Термоикономическият анализ е извършен въз основа на SPECO метода.
- Поставените оптимизационни задачи са решени чрез използване на генетичен алгоритъм, като метод за оптимизация.

5. Научна и практическа полезност:

Реализирането на заложената цел води до изводи и резултати, които могат да се разглеждат като оригинален принос в областта на теоретичната топлотехника. Получените резултати могат да се разглеждат като базови в случая на анализ и оптимизация на широк клас от промишлени топлотехнически системи, както и при проектиране и оптимизиране на когенерационни инсталации, задвижвани от биогазови двигатели с вътрешно горене.

6. Място на изследването:

Изследванията, необходими при разработването на дисертацията са проведени в Пречиствателна станция за отпадни води (ПСОВ) гр. Варна и в катедра „Топлотехника“ към ТУ-Варна.

7. Практическа ценност на изследването:

Получените резултати могат да се разглеждат като базови в случая на анализ и оптимизация на широк клас от промишлени топлотехнически системи, както и при проектиране и оптимизиране на когенерационни инсталации, задвижвани от биогазови двигатели с вътрешно горене.

8. Аprobация на изследването:

Основните положения и резултати от дисертационния труд са докладвани и публикувани на следните конференции:

- 1) Юбилеен конгрес с международно участие „Наука и образованието в бъдещето- 50 години ТУ Варна - 4-6 октомври, 2012 г. – 1 публикация;
- 2) The International Multidisciplinary Scientific GeoConferences, SGEM 2014; , ISBN 978-619-7105-15-5 / ISSN 1314-2704 – 2 публикации;
- 3) Младежки форум „Наука, технологии, иновации, бизнес - 2015“, 15-16 октомври, 2015; ISSN 2367-8569– 1 публикация;
- 4) XXI Научна конференция с международно участие, ЕМФ 2016, 18-21 септември, Созопол, България, 2016 - 1 публикация.

9. Публикации по дисертационния труд:

Направени са общо девет публикации, от които пет са докладвани на международни научни конференции и публикувани в четири научни сборника, а останалите четири са публикувани в научни журнали. Три от изследванията са самостоятелни, а останалите са в съавторство. Две от докладваните изследвания - [3] и [4] са реферирани в базата данни на Scopus и Web of Science, а една от тях –[6] е публикувана в научен журнал с Impact Factor 1.063.

Съгласно база данните на Google Scholar, известни са общо 6 цитирания на публикациите [3] и [5].

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Глава I: Литературен обзор

Глава I обхваща преглед и анализ на методите за термодинамичен и термоикономически анализ; методите за оптимизация на промишлени топлотехнически системи, както и обзор на критериите за оптималност (целева функция) на разглежданите в литературата задачи.

От литературния обзор произтичат следните изводи:

- Съвременните проблеми на енергийния сектор, отнесени към промишлените енергопреобразуващи системи могат да бъдат решени чрез оптимизационни изследвания на термоикономически модели. Получените от тях резултати биха позволили изготвяне на стратегии за по-ефективно използване на първичните енергоносители и намаляване на въздействието им върху околната среда.

- Ексергията, като термодинамична потенциална функция, притежава основното свойство на потенциалите – универсалността и поради това ексергийният анализ е особено подходящ за анализ на всякакъв тип топлотехнически системи.

- Малко на брой са научните публикации, разделящи деструкцията на ексергия в промишлени енергопреобразуващи системи на отстраняема и неотстраняема част. Не са известни подобни изследвания на когенерационни инсталации, задвижвани от двигатели с вътрешно горене.

- Повечето от цитираните литературни източници прилагат т.нар. СПЕСО метод за термоикономически анализ. Това създава предпоставка за твърдението, че подобен подход към задачата разкрива добре строгата връзка между паричен разход на материален и енергиен поток и физичните сили, отговорни за протичане на даден процес.

- За целите на термоикономическия анализ, научните разработки от областта показват, че повечето т.нар. микроикономически подходи за термоикономически анализ дават достоверни резултати, прилагайки ги към когенерационни системи.

- Термоикономическите модели на промишлени топлотехнически системи трябва да се разработват за целия икономически живот и да отчетат изменението в цените на горивата, инфлационните нива, стойността на парите във времето и други начални условия.

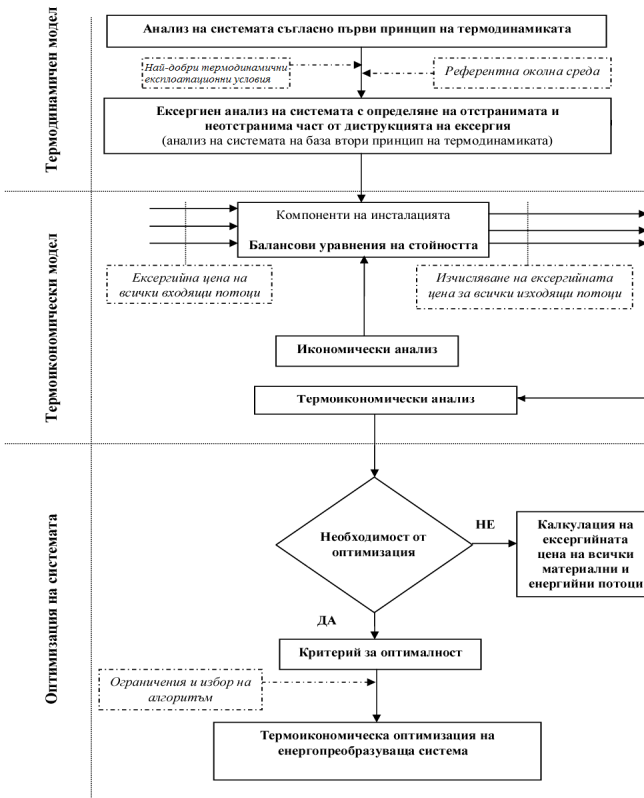
- Като обект на термоикономическа оптимизация се забелязват и характерни блокове и елементи от топлотехнически системи. Следователно, чрез методите на термоикономиката става възможно съставянето на модели с различна степен на сложност.

- Всяка една от съществуващите техники за нелинейно програмиране може да допълни термоикономическия анализ на една промишлена топлотехническа система, стига да се гарантира достигането на глобалния оптимум, както и ефективността на алгоритъма.

- От извършения литературен обзор се стига до извода, че генетичните алгоритми са особено подходящи в случая на промишлени топлотехнически системи, тъй като са в състояние да се справят с често срещани проблеми при оптимизацията на реални обекти.

- Публикации от областта на термоикономическата оптимизация, извършени за инсталации, намиращи се на територията на Република България, не са известни. Тъй като балансовите уравнения на стойността, включени в термоикономическия анализ, се изчисляват на парична основа, те са зависими от местоположението на анализираната система. Това означава, че една и съща промишлена система може да има различен оптимум в различните локации.

- Като заключение на представения литературен обзор може да се предложи следната структура на методиката за термоикономически анализ и оптимизация на промишлени топлотехнически системи (фигура 1).



Фигура 1: Блок – схема на стъпките при разработване на методика за термоикономически анализ и оптимизация на енергопреобразувачни системи

В съответствие с направените изводи е формулирана целта на дисертационната работа, за постигането на която се поставят за решаване следните основни **задачи**:

- (i) Съставяне на обобщен термодинамичен модел за широк клас от промишлени топлотехнически системи, даващ количествена и качествена оценка на материалните и енергийни потоци от системата.
- (ii) Прилагане на съществуващата в литературните източници методика за икономически анализ на енергопреобразувачни системи и допълването ѝ с конкретни показатели и критерии за оценка, съобразени със спецификата на условията в Република България. Разходите за инвестиции, поддръжка и експлоатация

- да се изразят като функция на ключови термодинамични параметри;
- (iii) Съставяне на методика за термоикономически анализ на промишлени топлотехнически системи на основата на SPECO метода. Въвеждане на критерии за оценка термоикономическото поведение на компонентно ниво. Извеждане на функцията на целта.
 - (iv) Разработване на модел за прилагане на избрания метод за оптимизация при промишлени топлотехнически системи. Задаване на специфични характеристики и настройки на оптимизационния метод.
 - (v) Тестване на разработените модели чрез числена реализация за работата на конкретна промишлена система и във функция на параметрите на референтната околна среда. Анализиране на получените резултати и сравняването им с данни на други автори.

Глава II: Методика за термодинамичен анализ на промишлени топлотехнически системи

В тази глава от дисертационната работа е представена методиката за провеждане на термодинамичен анализ. Твърди се, че е приложима за широк клас промишлени топлотехнически системи и е способна да даде както количествена, така и качествена оценка на степента им на термодинамичната ефективност.

Главата е структурирана по следния начин: първо е представен подходът за анализ на база първия принцип на термодинамиката. Това позволява да се идентифицират стойностите за изходните величини, необходими за провеждане на следващия етап от термодинамичния анализ. Анализът по първия принцип на термодинамиката е проведен въз основа на две фундаментални уравнения, а именно: масови и енергийни балансови уравнения:

$$\sum \dot{m}_m = \sum \dot{m}_{out} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_m + \dot{W}_m + \underbrace{\sum_{in} \dot{m} \cdot \left(h + \frac{w^2}{2} + gz \right)}_{\text{за всеки входящ поток}} = \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \underbrace{\sum_{out} \dot{m} \cdot \left(h + \frac{w^2}{2} + gz \right)}_{\text{за всеки изходящ поток}} \quad (2)$$

Уравнение (1) и (2) представляват общия вид на тези баланси и се съставят за всяко едно звено, съставляващо разглежданата топлотехническа система.

Вторият етап от текущия анализ е провеждане на термодинамичен анализ, съобразно втория принцип на термодинамиката. Целта е определяне на деструкцията на ексергия, наблюдавана във всеки един от компонентите

на системата. Използван е следния общ вид на ексергийното балансово уравнение:

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_{b,k}} \right) \cdot \dot{Q}_k - \dot{W} + \sum_{in} \dot{m}\varepsilon - \sum_{out} \dot{m}\varepsilon - \dot{E}x_D = 0 \quad (3)$$

където:

$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_{b,k}} \right) \cdot \dot{Q}_k$ - ексергията, обменена с околната среда чрез топлина;

\dot{W} - ексергията, обменена с околната среда чрез работа;

$\sum_{in} \dot{m}\varepsilon - \sum_{out} \dot{m}\varepsilon$ - ексергията, обменена с околната среда чрез потоци маса.

В дисертационната работа специфичната ексергия на масов поток, ε , е разглеждана като сума от потенциална, кинетична, физична и химична специфична ексергия, като подходът при определянето на тези четири съставляващи е детайлно описан при въвеждането на методиката за термодинамичен анализ на промишлени системи.

В края на Глава II е предложен подход за оценка на термодинамичната ефективност на промишлени топлотехнически системи, включително и когенерационни такива. Въведени са критерии като енергиен КПД, η , отношение на произведената електрическа енергия към топлинната енергия, PHR , и икономия на еквивалентна енергия на използваното гориво или ВЕИ за системата, η_{FESR} . В методиката за термодинамичен анализ на промишлени топлотехнически системи е предложено тези критерии да се изчисляват освен на енергийна основа, но и на ексергийна. Освен това, въведени са параметри за оценка (на база ексергийни характеристики), определяни на компонентно ниво с оглед по-задълбочен анализ на термодинамичната ефективност на отделните звена от системата.

В Глава II от дисертационната работа, традиционният метод за ексергиен анализ е надграден до по-задълбочен такъв, използвайки схващания на други двама автори – Tsatsaronis и Morosuk и за първи път, съдейки по референтната литература, приложен в случая на когенерационна система, задвижвана от двигатели с вътрешно горене, изгарящи биогаз.

От разработената методика за термодинамичен анализ са направени следните **изводи**:

- Предложен е метод за термодинамичен анализ на промишлени топлотехнически системи, който се базира както на първия, така и на втория принцип на термодинамиката. Освен това, включва определянето на отстранямата и неотстраняема част от деструкцията на ексергия и е приложима за широк клас от енергопреобразуващи системи, в това число и за когенерационни такива.

- Настоящата методика за термодинамичен анализ предлага регламентирани в нормативните актове оценъчни критерии за определянето на термодинамичната ефективност на дадена когенерационна система параметри (като PHR, FESR и т.н.) да бъдат изразявани на база ексергия.

- Методиката за термодинамичен анализ въвежда диаграмата на Грасман като подход за графична визуализация на получените от анализа резултати.

Глава III: Икономически анализ на енергопреобразуващи системи

В Глава III от дисертационната работа е предложен известния в литературата метод на минимално изискваните печалби в качеството на подход за изготвяне на икономически модел на промишлени топлотехнически инсталации.

Първият основен етап от провеждането на икономически анализ на промишлена топлотехническа система е определянето на общите капиталови инвестиции. В дисертационната работа са разглеждани като количеството парични средства, което трябва да се осигури за закупуване на оборудване и съоръжения, както и от разходите, включващи оборотния капитал, необходим с цел изплащане на заплати, основни суровини и други:

$$TCI = FCI + SUC + WC + O \& M + AFUDC, \quad (4)$$

където:

FCI – инвестиции в основен капитал; *O&M* – разходи за поддръжка и експлоатация; *SUC* – стартов капитал; *WC* – работен капитал; *AFUDC* – надбавка на капиталите, използвани по време на строителството.

Вторият етап от икономическия анализ е определяне на минимално необходимите печалби (TRR). Разглеждани са като сума от следните шест събираеми: възстановеният капитал (TCR), минималната възвръщаемост на собствения и привлечен капитал (ROI), данъците върху доходите (ITX), други данъци и застраховки (OTXI), разходите за гориво (FC), а също и разходите за поддръжка и експлоатация на системата (O&M):

$$TRR_j = TCR_j + ROI_j + ITX_j + OTXI_j + FC_j + O \& M_j \quad (4)$$

Накрая, въведени са критерии, оценяващи икономическите и социални ползи от инвестициите в промишлени енергопреобразуващи системи. В качеството на икономически параметри за оценка се разглеждат критерият нетна сегашна стойност, NPV, вътрешна норма на възвръщаемост, IRR, и срок на откупуване, τ_{PB} , а величината, с която е предложено да се оценяват ползите за обществото от реализирането на проекти на енергопреобразуващи технологии е т.нар. екологичен КПД, ε . Подходът, използван за

определянето на тези критерии е детайлно изложен в Глава III от дисертационната работа.

От извършеното в Глава III на дисертационната работа следват изводите:

- Избраният подход за икономически анализ е приложим за различни класове топлотехнически системи в етап на инвестиционно проектиране. Същевременно обобщените и представени тук данни могат да се използват и за вече изградени и пуснати експлоатация инсталации, за които липсва информация за извършени разходи по години от икономическия живот на обекта на анализ.

- Икономическият анализ на промишлена енергопреобразуваща система е разработен с помощта на метода на минимално изискваните печалби, като са въведени критерии, като нетна сегашна стойност (NPV), вътрешна норма на възвръщаемост (IRR) и срок на откупуване в качеството на величини, оценяващи парично - разходната ефективност на направените инвестиции в енергопреобразуващи системи, намиращи се на територията на България.

- Към така разработения модел е добавена оценка на социалните ползи от реализацията на проекти на промишлени топлотехнически системи чрез въвеждане на т.нар. екологичен КПД.

Глава IV: Методика за термоикономически анализ на промишлени топлотехнически системи

Глава IV представя методиката за термоикономически анализ и оценка за широк клас от промишлени топлотехнически системи, основаваща се на така наречения SPECO метод.

Представен е подходът, въз основа на който са определени цените и паричните стойности на всички ексергийни потоци от системата. С оглед изпълнението на тази задача, за всеки един контролен обем от дадена топлотехническа система е въведено т.нар. балансовото уравнение на стойността, имащо следния общ вид:

$$\dot{C}_p = \dot{C}_F + \dot{Z}_k - \dot{C}_{L,k} \quad (4)$$

където:

$\dot{Z}_k, [лв / h]$ - разходи за инвестиции, поддръжка и експлоатация за k -тия компонент на системата и отнесени към единица време. Явяват се резултат от икономическия анализ на системата.

За дефиниране паричната стойност на ексергийните потоци, свързани с горивото, \dot{C}_F , и продукта, \dot{C}_p , методиката за термоикономически анализ налага използването на спомагателни уравнения, които могат да се представят чрез следните изрази:

$$\frac{\dot{C}_{ex,F}}{\dot{E}x_{ex,F}} - \frac{\dot{C}_{uix,F}}{\dot{E}x_{uix,F}} = 0 \quad (5)$$

$$\dot{C}_{uixP,1} \frac{1}{\dot{E}x_{uixP,1}} - \dot{C}_{exP,1} \frac{1}{\dot{E}x_{exP,1}} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\dot{C}_{uixP,1} - \dot{C}_{exP,1}}{\dot{E}x_{uixP,1} - \dot{E}x_{exP,1}} - \frac{\dot{C}_{uixP,2} - \dot{C}_{exP,2}}{\dot{E}x_{uixP,2} - \dot{E}x_{exP,2}} = 0 \quad (7)$$

Вторият етап от методиката за термоикономически анализ на промишлени топлотехнически системи е извършване на термоикономическа оценка на компонентно ниво. Осъществено е чрез въвеждане на критерии като относителна разлика в цените, r_k , ексергоикономически фактор, f_k , както и парична стойност на деструкцията на ексергия, $\dot{C}_{D,k}$. В дисертационната работа се приема, че стойността на деструкцията на ексергия е цената на допълнителното гориво, което трябва да се достави до всеки един компонент от системата с цел да се обезпечи деструкцията на ексергия в k -тия компонент, тоест:

$$\dot{C}_{D,k} = c_{F,k} \cdot \dot{E}x_{D,k} \quad (8)$$

От методиката за термоикономически анализ става ясно, че за всяка една топлотехническа система е необходимо да се намери екстремумът на функция, изразяваща количествена връзка между необратимостта на термодинамичните процеси и експлоатационните разходи за компонентите от системата. Тази процедура се свежда до търсене на минимум на общите парични разходи, $\dot{C}_{система}$, а оптимизационната задача е с функция на целта, имаща вида:

$$\min \dot{C}_{система} = \sum_k \dot{Z}_k + \sum_k \dot{C}_{D,k} + \sum_k \dot{C}_{L,k} \quad (9)$$

От приложението на термоикономическия метод за анализ към обекта на изследване могат да бъдат направени следните **изводи**:

- Създадена е методика за термоикономически анализ, като са изградени взаимовръзките между паричните разходи и деструкцията и загубите на ексергия за широк клас от енергопреобразуващи системи.

- Предложени са критерии, които да оценяват термоикономическото поведение на компонентите, съставляващи енергопреобразуващи системи.

- Съставен е критерий за оптималност при решаване на термоикономически оптимизационни задачи с обект промишлени топлотехнически системи.

Глава V: Термоикономическа оптимизация на промишлени топлотехнически системи

Наличието на множество от разнообразни оптимизационни задачи налага разработването на подходяща структура, задаване на специфични характеристики и настройки на генетичния алгоритъм за всеки един случай на оптимизация. Поради това, в Глава V от дисертационната работа е описан теоретичния замисъл на избраната техника, заедно с особеностите при прилагането му в програмната среда на Matlab.

Блок-схема на ГА, използван за решаването на термоикономически оптимизационни задачи на промишлени топлотехнически системи, е представена на фигурата по-долу.

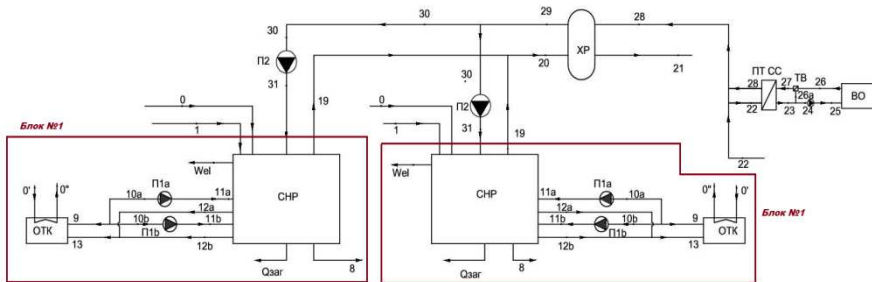


Фигура 2: Блок – схема на използвания генетичен алгоритъм

Приложението му към конкретен обект с дефиниран математически модел и критерий за оптималност би дал отговор на въпроса дали тази структура е ефективна, т.е. налице ли е глобално сходящ алгоритъм.

Глава VI: Приложение на методиката за термоикономически анализ и оптимизация върху конкретна промишлена топлотехническа система. Резултати и дискусия

В Глава VI, въведените в предходните тематични части на дисертационната работа методики за термодинамичен, икономически и термоикономически анализ са приложени към съществуваща енергопреобразуваща система – когенерационна система, утилизираща добитото биогазово гориво в Пречиствателна станция за отпадни води (ПСОВ) гр. Варна – фигура 3. След анализа на системата



Фигура 3: Принципна схема на намиращата се в ПСОВ гр. Варна промишлената топлотехническа система за утилизация на биогаз: СНР – когенерационен модул; П1а, П1б, П2 – циркуляционни помпи, ОТК – охладител технологичен контур; ХР – хидравличен разделител; ПТ СС – пластинчат топлообменник, част от охлаждащия контур; ВО – въздушен охладител.

посредством посочените техники, към последната е приложена разработеният в Глава V алгоритъм за термоикономическа оптимизация, а получените резултати – обобщени и дискутирани в текущата глава.

Решени са следните задачи:

- Изследване за определяне на термоикономически оптимални параметри през зимен режим на експлоатация на топлотехническа система с когенерационни модули, част от функционалната схема на ПСОВ гр. Варна;
- Изследване за определяне на термоикономически оптимални параметри през летен режим на експлоатация на топлотехническа система с когенерационни модули, част от функционалната схема на ПСОВ гр. Варна;
- Изследване за определяне на термоикономически оптимални параметри през пролетно - есенен режим на експлоатация на топлотехническа система с когенерационни модули, част от функционалната схема на ПСОВ гр. Варна.

Резултати от термодинамичния анализ на системата

По разработената в Глава II методика е определена големината на деструкцията на ексергия, ексергийните загуби, а също и ексергията на потоците гориво и продукт. Получените резултати за трите формулирани задачи са представени на Фигура 4, 5 и 6.

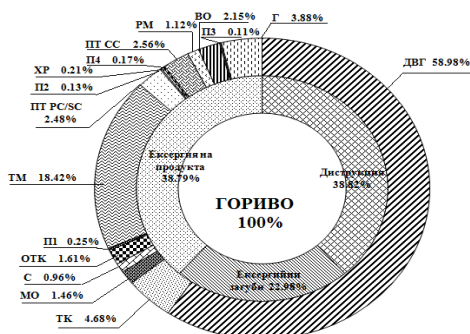
Представените по-долу диаграми недвусмислено показват следното: в летен режим на експлоатация около 39% от ексергията на горивото за системата се консумира в отделните компоненти, а почти 23% се явяват ексергийни загуби, докато 38.79% от ексергията на горивото се използва за преобразуването ѝ в топлинна и електрическа енергия. Става ясно, че делът на деструкция на ексергия в системата плавно намалява с понижението на T_0 .

Освен това, въведените критерии за оценка на компонентно ниво отличават биогазовите двигатели с вътрешно горене (ДВГа,b) и топлинният модул (ТМ) като компоненти, имащи най-голямо влияние върху

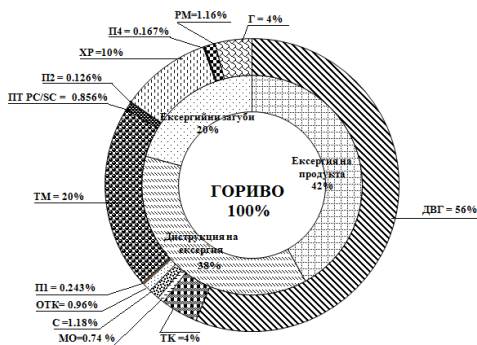
термодинамичната ефективност на системата и при трите разглеждани задачи.

Друга част от получените резултати, касаещи отново големината на ексергийните потоци, наблюдавани при отделните компоненти на системата, но и тяхната термодинамична ефективност, са показани в таблица 1, 2 и 3.

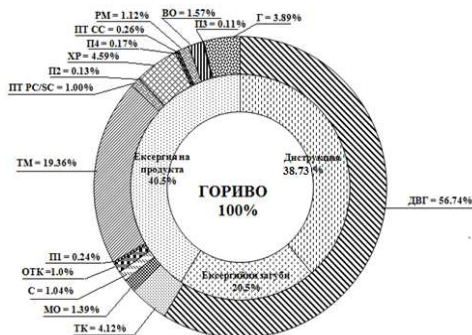
От таблица 1, 2 и 3 става ясно, че в случая на ДВГа,b, КПД по втория принцип на термодинамиката се увеличава с нарастване на T_0 . Резултатите от тези таблици показват, че при понижение на температурата на референтната околна среда, ексергийният КПД на турбокомпресорите (ТКа,b) и междинните охладители (МОа,b) се увеличава.



Фигура 4: **Задача №2:** Процентно разпределение на ексергията на горивото в системата и дял на деструкцията на ексергията на компонентите (като отношение на общата деструкция) при $T_0 = 298.15K$, $p_0=1.013bar$ и $\phi_0 = 55\%$



Фигура 5: **Задача №3:** Процентно разпределение на ексергията на горивото в системата и дял на деструкцията на ексергията на компонентите (като отношение на общата деструкция) при $T_0 = 276.15K$, $p_0=1.013bar$ и $\phi_0 = 80\%$



Фигура 6: **Задача №1:** Процентно разпределение на ексергията на горивото в системата и дял на деструкцията на ексергията на компонентите (като отношение на общата деструкция) при $T_0 = 288.15\text{K}$, $p_0 = 1.013\text{bar}$ и $\phi_0 = 60\%$

От друга страна, числените резултати от оценката на термодинамичната ефективност, проведена на компонентно ниво показва, че звената с най-ниски стойности на ексергийния КПД са центробежните помпи (П1a,b, П2, П3 и П4), следвани от въздушните охладители (ОТК и ВО). Обяснението за получените стойности се състои в голямата разлика в потенциалите (температура и налягане) и като следствие на това - високите нива на необратимост в анализираните термодинамични системи.

За разлика от тези компоненти, както може да се види от 1, 2 и 3, смесителят (С) и генераторът (Г) са елементите на системата, имащи най – висок ексергиен КПД и през трите разглеждани периода.

Резултатите от определянето на критериите за оценка на анализираната промишлена когенерационна система (таблица 4) показват, че стойностите за енергийния и ексергийния КПД бележат повишение с понижение на температурата на референтната околна среда. Обратна тенденция се наблюдава и при другите два параметъра - η_{FESR} и PHR .

Таблица 4 показва значителна разлика между стойностите за PHR , определени на база енергия и тези, които са изразени като отношение на ексергията на произведената електрическа енергия към ексергията на произведения топлинен поток.

Таблица 1: **Задача №2:** Ексергийни показатели на компонентите от когенерационната система в летен режим на експлоатация ($T_0 = 298.15\text{K}$, $\phi_0 = 55\%$ и $p_0 = 1.013\text{bar}$)

Компонент	$\dot{E}_{X,D,K}^*$ [kW]	$\dot{E}_{X,D,K}^{AV}$ [kW]	$\dot{E}_{D,K}^{UN}$ [kW]	$\eta_{D,K}^*$ [%]	$EIP_{EX,K}^*$ [kW]	$\eta_{EX,K}^*$ [%]	$\eta_{EX,K}^*$ [%]	$\eta_{EX,K}^*$ [%]	$\eta_{D,K}^{AV}$ [%]	$\eta_{D,K}^{AV}$ [%]
ДВГ'a,b	76.0349	32.62677	43.40814	5.72343	18.6970	75.41	94.9998	75.41	42.910	2.456
ТК'a,b	6.0295	5.267252	0.762248	0.45386	1.4935	75.23	77.6651	75.23	87.358	0.396
МОa,b	1.8814	1.574439	0.306961	0.14162	0.8304	55.86	60.1975	55.86	83.684	0.119
С	2.4738	1.692708	0.781092	0.18621	0.0092	99.63	99.7449	99.63	68.425	0.127
ОТК	4.1553	3.7382	0.41734	0.31278	3.5848	13.73	13.9317	13.73	88.76	0.28
П1a,b	0.3178	0.252353	0.065447	0.02392	0.2928	7.87	9.7298	7.87	79.406	0.019
ТМ	47.4879	44.08511	4.061392	3.57459	34.7659	26.79	27.4955	26.79	91.564	3.318
ПТ(РС;С)	6.3913	4.674216	2.165884	0.48110	2.1775	65.93	71.8299	65.93	68.335	0.352
П2	0.336	0.286201	0.051599	0.02529	0.2954	12.09	13.4301	12.09	84.725	0.022
ХР	1.0782	1.0782	0	0.08116	0.0110	98.98	98.9800	98.98	100.00	0.081
П4	0.8913	0.773513	0.117786	0.06709	0.7465	16.25	18.2775	16.25	86.785	0.058
ПТ(С)	13.221	8.210570	5.01043	0.99519	5.9997	54.62	65.9604	54.62	62.102	0.618
РМ	2.8786	2.1932	0.6854	0.21668	1.6725	41.9	48.6874	41.9	76.190	0.170
ВО	11.063	8.906966	2.155334	0.83275	8.8570	19.94	23.6284	19.94	80.516	0.670
П3	0.556	0.540126	0.01474	0.04185	0.5201	6.46	7.1032	6.46	97.920	0.041
Г	10	5.102	4.898	0.75274	0.4	96.0	97.9184	96.0	51.02	0.38

Таблица 2: Задача №3 Ексергийни показатели на компонентите от когенерационната система в режим на експлоатация пролет / есен ($T_0 = 288.15\text{K}$, $\phi_0 = 60\%$ и $p_0 = 1.013\text{bar}$)

Компонент	$\dot{E}_{D,k}^{AV}$ [kW]	$\dot{E}_{D,k}^{AV}$ [kW]	$\dot{E}_{D,k}^{AV}$ [kW]	$y_{D,k}^*$ [%]	$E/P_{EX,k}$ [kW]	$\eta_{EX,k}^*$ [%]	$\eta_{EX,k}^*$ [%]	$x_{D,k}^{AV}$ [%]	$y_{D,k}^{AV}$ [%]
ДВTab	72.9676	29.1598	43.8078	5.49425	18.0157	75.31	90.306	39.9627	2.1957
TKa,b	5.2955	2.2222	3.0733	0.39874	1.2550	76.3	88.470	41.9640	0.1673
MOa,b	1.7888	0.9393	0.8295	0.13469	0.7821	56.28	59.0737	55.63	0.07223
C	2.6752	1.9029	0.7745	0.20143	0.0107	99.6	99.713	71.1312	0.1164
OTK	2.5752	2.1477	0.4251	0.19391	2.3911	7.15	7.7488	83.48	0.16
IIIa,b	0.3028	0.2004	0.0967	0.02280	0.2658	12.21	19.292	67.4504	0.0151
TM	49.7902	46.4002	3.3900	3.74906	35.4108	28.88	30.350	93.1915	3.4937
III(PC/SC)	2.5768	2.0443	0.5325	0.19403	0.3912	84.82	87.570	79.3360	0.1559
II2	0.3224	0.1874	0.1387	0.02428	0.2719	15.66	23.043	57.4547	0.0141
XP	23.6105	23.6105	0.0000	1.77780	4.1937	82.238	82.238	100.00	1.7890
II4	0.8527	0.6725	0.1876	0.06421	0.6832	19.88	23.292	78.1892	0.0506
III(CC)	1.336	0.3058	0.8278	0.10660	0.0689	94.84	98.866	26.9741	0.0250
PM	2.8786	2.1932	0.6854	0.21675	1.6725	41.9	48.687	76.1900	0.1700
BO	8.0575	6.4844	1.5731	0.60671	6.8344	15.18	18.652	80.4769	0.4883
II3	0.554	0.5313	0.0227	0.04171	0.5176	6.57	6.823	95.8969	0.0400
Г	10	5.102	4.898	0.75297	0.4	96.0	97.9184	51.02	0.38

Таблица 3: Задача №1 Ексергийни показатели на компонентите от когенерационната система в зимен режим на експлоатация ($T_0 = 276.15\text{K}$, $\phi_0 = 80\%$ и $p_0 = 1.013\text{bar}$)

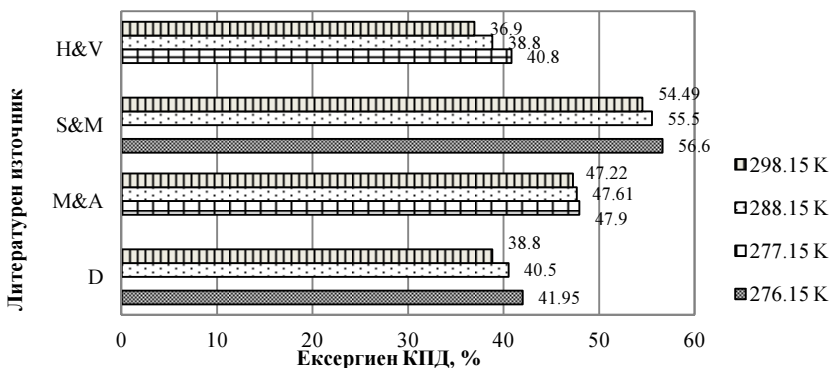
Компонент	$\dot{E}_{D,k}^{AV}$ [kW]	$\dot{E}_{D,k}^{AV}$ [kW]	$\dot{E}_{D,k}^{UN}$ [kW]	$y_{D,k}$ [%]	$EIP_{EX,k}$ [kW]	$\eta_{EX,k}$ [%]	$\eta_{EX,k}^*$ [%]	$s_{D,k}^{AV}$ [%]	$y_{D,k}^{AV}$ [%]
ДВab	69.5255	14.473	35.652	5.2369	17.40223	74.97	89.1796	20.817	1.090
ТКab	5.0053	1.8166	3.1887	0.3770	1.182752	76.37	89.9786	36.2945	0.150
МОab	0.9109	0.6548	0.2561	0.0686	0.391523	57.04	64.87283	71.886	0.054
С	2.9118	2.085	0.827	0.2193	0.012812	99.56	99.8856	71.596	0.157
ОТК	2.3707	2.2049	0.1658	0.1786	2.242445	5.41	5.7857	93.7638	0.182
Шab	0.3012	0.1991	0.1021	0.0227	0.252767	16.08	18.0302	66.1109	0.015
ТМ	50.0092	46.9943	3.0149	3.7688	33.53117	32.95	34.3337	0.9397	3.540
ПТ(РС)	2.119	0.4669	0.3607	0.1596	0.277801	86.89	33.6409	56.4171	0.035
П2	0.3129	0.1561	0.1568	0.0236	0.256171	18.13	30.7406	49.9	0.012
ХР	49.4846	49.4846	0	3.7273	14.90971	69.87	69.87009	100	3.727
П4	0.8276	0.4669	0.3607	0.0623	0.643542	22.24	33.6409	56.42	0.035
ПТ(СС) ¹	0	0	0	0	0	0	0	0	0
РМ	2.8786	2.1922	0.6854	0.2168	1.672467	41.9	48.8874	76.19	0.1652
ВО	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ПЗ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Г	10	5.102	4.898	0.7552	0.4	96	97.9184	51.02	0.384

¹ Оцветените в сив цвят редове от таблицата съответстват на неработещите през зимния период звена от охладителния контур на системата. Съгласно алгоритма за управление и автоматизация, ВО и ПЗ се включват, когато температурата на връщката се от кондензаторите вода стане равна на $T_{22} = 68^\circ\text{C}$. През ПТ СС преминава дебит студоносителя, ако $T_{22} > 68^\circ\text{C}$

Таблица 4: Ексергийни и енергийни критерии за оценка в случая на промишлена когенерационна система

Т _о , [К]	Енергиен анализ			Ексергиен анализ		
	298.15	288.15	276.15	298.15	288.15	276.15
Параметър						
КПД, [%]	66.825	69.83	72.723	38.8	40.5	41.95
η _{FESR} , [%]	50.024	50.024	50.02	50.0697	49.509	49.12
PHR	1.342	1.214	1.112	13.56	7.612	6.243

Фигура 7 представя съпоставка между стойностите на енергийния и ексергийния КПД на анализираната система като функция на параметрите на референтната околна среда и резултатите, получени в други сходни изследвания (Seyyedvalilua, Mohammadkhani, & Khalilarya, 2015; Mousafarash & Ameri, 2013; Hajidavalloo & Vosough, 2011). Не са известни литературни източници, разглеждащи влиянието на параметрите на околната среда върху стойностите на другите два параметъра в таблица 4 - η_{FESR} и PHR. Поради това те не са включени в извършената съпоставка.



Фигура 7: Сравнение на получените стойности за ексергийния КПД на системата като функция на параметрите на референтната околна среда с други литературни данни: D - текущо изследване; S&M - Seyyedvalilua, Mohammadkhani, & Khalilarya, 2015; M&A - Mousafarash & Ameri, 2013; H&V - Hajidavalloo & Vosough, 2011

Резултати от икономическия анализ

Прилагайки методиката за икономически анализ към промишлената топлотехническа система в ПСОВ гр. Варна, получени са стойности за минимално необходимите печалби, които системата трябва да реализира от работата си.

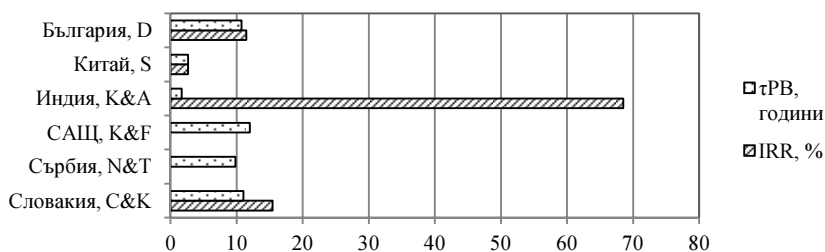
От извършените пресмятания относно икономическите показатели (NPV, IRR и τ_{рв}) на когенерационната система, представени в таблица 5, се доказва, че те са със задоволителни стойности. Вижда се, че критерият нетна

сегашна стойност е положително число, т.е. $NPV > 0$. Нещо повече, в съответствие със статистическата информация на Българската народна банка, към ноември, 2014 год. лихвеният процент по кредити за сектор „Нефинансови предприятия” е в размер на 5.76% (Българска национална банка, 2014), а данните от Таблица демонстрират, че изчислената стойност за вътрешната норма на възвръщаемост (IRR) е по-висока от цитирания лихвен процент.

Таблица 5: Резултати, получени от пресмятането на въведените критерии за икономическа оценка на направените инвестиции в когенерационни технологии

Параметър	NPV, лв	IRR, %	τPB, ГОДИНИ
Стойност	4719053.92	11.446	10.705

От таблица 5 става ясно, че срокът на откупуване на инвестициите в когенерационната система е около 11 години. Този числен резултат може да се разглежда като относително висок и е индикатор за наличие на риск, произтичащ от събития, външни за собствениците и извън техния контрол.



Вътрешна норма на възвръщаемост (IRR), % и срок на откупуване (τPB), години

Фигура 8: Графична съпоставка на стойностите за вътрешна норма на възвръщаемост и срок на откупуване, налични от други научни изследвания: D – текущо изследване; S - Sao, 2008 - Китай; K&A - Kumar & Abbi, 2005 - Индия; K&F - Kabouris, J., Forbes, B и колектив (2012) - САЩ; N&F - Nováček & Taušová, 2012 - Сърбия; C&K - Ciric & Kuzmanovic, 2014 - Словакия

Съпоставка на резултатите от проведената финансово – икономическа оценка на промишлената топлотехническа система с други стойности, налични от литературата е представена на Фигура 8. Цитираните резултати са сходни, но не и идентични със стойностите, получени в настоящата дисертация. Причината е, главно, поради различните цени на горивата и продажната цена на произведената по комбиниран начин електрическа енергия, следствие на спецификите на съответния пазар и наличните държавни политики за стимулиране на инвестиции в когенерационни технологии.

Резултатите на авторите от Индия и Китай могат да бъдат обяснени с характерните черти на азиатския енергиен пазар – ниски капиталови инвестиции в енергопреобразуващи системи и относително висока цена на изкупуване на произведената електрическа енергия.

Освен икономическите показатели, които въведената в Глава III методика предлага, с цел да се оценят социалните ползи от инвестициите в когенерационни технологии, тази своеобразна мярка за намаляване на въглеродните емисии е оценена чрез въведения т.нар. екологичен КПД на енергопреобразуващата технология.

Проведеният анализ показва, че е налице екологично подобрение в района на локализация на системата – като форма на социално влияние на разглежданата технология за енергопреобразуване. Стига се до извода, че използването на биогаза като гориво за когенерационни модули е по-удачния вариант, отколкото директното изхвърляне в околната среда на получения метан и въглеродния диоксид. Заключение е, че разглежданата когенерационна система е с екологосъобразна експлоатация е потвърдено от наблюдаваната в настоящия анализ висока стойност за екологичния КПД.

Анализът на получените в таблица 6 стойности за екологичния КПД като функция на параметрите на околната среда. Наблюдава се по-висока стойност за екологичния КПД при понижаване на T_0 . Обяснението за това се крие в намаляващите емисии CO_2 при същевременно увеличаващ се енергиен КПД. При емисиите CO_2 се наблюдава спад, тъй като се увеличава масовия дял на водните пари поради нарастващата стойност на относителната влажност на въздуха при прехода от летен към зимен период на експлоатация на системата.

Таблица 6: Продукти от горивния процес на добития в ПСОВ гр. Варна биогаз (kg/kg гориво), CO_2 еквивалент на емисиите, индикатор за замърсяване и екологичен КПД

Емисии, [kg/kg гориво]	ГОДИШЕН ПЕРИОД		
	Лято $T_0 = 298.15K$ $p_0 = 1.013bar$ $\varphi_0 = 55\%$	Пролет/есен $T_0 = 288.15K$, $p_0 = 1.013bar$, $\varphi_0 = 60\%$	Зима $T_0 = 276.15K$ $p_0 = 1.013bar$ $\varphi_0 = 80\%$
CO_2	1.4131	1.4096	1.4071
N_2	7.3253	7.3581	7.3773
O_2	0.9341	0.9498	0.9592
$H_2O(g)$	0.8539	0.8089	0.7828
Общо $(CO_2)_{eq}$, [kg/kg гориво]	1.4131	1.4096	1.4071
P_{g_2} , [kg/MJ]	0.0699	0.0697	0.0696
Екологичен КПД, [%]	95.37	95.38	95.56

Приложение на методиката за термоикономически анализ върху промишлената когенерационна система

Съгласно методиката за термоикономически анализ на промишлени топлотехнически системи, представена в Глава IV, прилагането на балансовото уравнение на стойността към всички компоненти от когенерационната система, води след себе си множество неизвестни величини. Това налага използването на спомагателни уравнения, които в случая са съставени на база т.нар. „Правило на горивото” и „Правило на продукта”.

Численото решение на получената система от линейни уравнения дава стойността и цената на ексергийните потоци в характерните състояния на когенерационната система. Резултатите са при летен режим на експлоатация на системата ($T_0 = 298.15\text{K}$, $\varphi_0 = 55\%$ и $p_0 = 1.013\text{bar}$) са представени в таблица 7.

Таблица 7: **Задача №2:** Резултати относно стойността и цената на ексергийните потоци в характерните състояния на когенерационната система ($T_0 = 298.15\text{K}$, $\varphi_0 = 55\%$ и $p_0 = 1.013\text{bar}$)

№	Поток	$c, [\text{лв}/\text{kWh}]$	$\dot{C}, [\text{лв}/\text{h}]$
0	въздух	0	0
1	биогаз	0.0425	28.2509
2	гориво – въздушна смес	0.0461	30.5009
2a, 2b	гориво – въздушна смес	0.0461	15.2505
3a, 3b	гориво – въздушна смес	0.0461	16.0946
4a, 4b	гориво – въздушна смес	0.0461	15.8982
5a, 5b	димни газове	0.0315	4.0043
6a, 6b	димни газове	0.0315	3.2378
7	димни газове	0.0315	6.4756
8	димни газове	0.0315	4.4334
9	антифриз	0.3143	6671.1
10a, 10b	антифриз	0.31429	3335.6
11a, 11b	антифриз	0.3143	3335.9
12a, 12b	антифриз	0.31431	3336.3
13	антифриз	0.31431	6672.7
14a, 14b	антифриз	0.0315	173.6248
15a, 15b	антифриз	0.0315	173.9201
16	антифриз	0.0315	347.8403
17	антифриз	0.0315	347.2497
18	вода	0.0049	3.4861

19	вода	0.0162	11.7536
20	вода	0.0162	23.8828
21	вода	0.0201	27.4512
21a	вода	0.0205	28.0623
22	вода	0.0029	3.8262
23	антифриз	0.0793	5561.4
24	антифриз	0.079285	11761.63
25	антифриз	0.079288	11762.06
26	антифриз	0.079288	11760.97
27	антифриз	0.079297	5560.81
28	вода	0.0029	3.7415
29	вода	0.0029	4.0464
30	вода	0.0029	2.0232
31	вода	0.0034	2.359
34	масло	0.0975	0.2023
35a, 35b	масло	0.0975	0.1012
36a, 36b	масло	0.0315	0.078
37	масло	0.0315	0.1516
32	Механична енергия	0.1704	21.3041
33	Електрическа енергия	0.2119	50.8458

Стойността на деструкцията на ексергията, както и въведените в качеството на термоикономически критерии за оценка на компонентно ниво, за разглежданите годишни периоди от експлоатацията на системата са представени в таблица 8, 9 и 11.

От таблица 8 се вижда, че топлообменниците (ВО, ТМ и ПТ СС) и центробежните помпи (П1а(б), П2 и П3) са сред компонентите от системата с най-високи стойности за относителната разлика в цените, r_k при летен режим на експлоатация на системата (задача №2). Тези резултати могат да бъдат обяснени с факта, че за цитираните звена ексергийната цена на продукта е в пъти по-висока от същата на горивото, поради високата числена стойност на деструкцията на ексергия (таблица 1). Изложеното становище до голяма степен е потвърдено и от резултатите за ексергоикономическия фактор.

Таблица 8: **Задача №2** Термоикономически критерии за оценка на компонентно ниво при летен режим на работа на системата ($T_0 = 298.15\text{K}$, $\phi_0 = 55\%$ и $p_0 = 1.013\text{bar}$)

Компонент		\dot{Z}_k , лв/ч	$\dot{C}_{D,k}$, лв/ч	$c_{F,k}$, лв/кWh	$c_{P,k}$, лв/кWh	$\dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k$, лв/ч	r_k , %	f_k , %
№	k							
1	ДВГа(б)	10.264	4.0062	0.0546	0.1587	14.2702	190.66	69.86
2	Г	8.267	1.6851	0.17	0.2119	9.9521	24.65	82.77
3	ТМ	6.248	1.4479	0.0315	0.4554	7.6959	1345.714	80.89
4	ВО	6.116	0.8539	0.0792	2.6085	6.9699	3193.561	87.43
5	ХР	4.264	0.0033	0.0029	0.0373	4.2673	1186.207	99.92
6	С	2.258	0.0972	0.0425	0.0461	2.3552	8.47	95.53
7	ОТК	0.78	1.3044	0.3143	3.4656	2.0844	1002.641	37.34
8	ПТ СС	1.768	0.0312	0.0029	0.039	1.7992	1244.828	97.92
9	ПТ РС/СC	0.539	0.1861	0.0315	0.0629	0.7251	99.6825	73.99
10	ПЗ	0.215	0.2049	0.3730	10.5496	0.4199	2728.311	51.00
11	МОа(б)	0.268	0.0854	0.0461	0.1945	0.3534	321.909	75.47
12	РМ	0.046	0.2809	0.0315	0.0975	0.3269	209.524	14.18
13	П2	0.194	0.1253	0.3730	7.58	0.3193	1932.172	60.52
14	П1а(б)	0.165	0.1186	0.3730	10.8244	0.2836	2801.984	58.20
15	ТКа(б)	0.078	0.1895	0.0315	0.0461	0.2675	46.3492	29.04
16	ТВ	0.039	0.1691	0.0792	0.0792	0.2081	0.0034	18.79

Таблица 9: **Задача №3** Термоикономически критерии за оценка на компонентно ниво при а работа на системата през преходните сезони – пролет / есен ($T_0 = 288.15\text{K}$, $\phi_0 = 60\%$ и $p_0 = 1.013\text{bar}$)

Компонент		\dot{Z}_k , лв/ч	$\dot{C}_{D,k}$, лв/ч	$c_{F,k}$, лв/кWh	$c_{P,k}$, лв/кWh	$\dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k$, лв/ч	r_k , %	f_k , %
№	k							
1	ДВГа(б)	10.264	3.8871	0.0546	0.1533	14.1511	180.7692	70.18
2	Г	8.267	1.6953	0.1697	0.2111	9.9623	24.39599	82.92
3	ТМ	6.248	1.5646	0.0316	0.4085	7.8126	1188.644	80.06
4	ВО	6.116	1.0568	0.051	9.4968	7.1728	18521.18	85.22
5	ХР	4.264	0.003	0.0029	0.0361	4.267	1144.828	99.93
6	С	2.258	0.1138	0.0425	0.0461	2.3718	8.470588	95.19
7	ОТК	0.78	1.3162	0.5116	12.1190	2.0962	2268.843	37.16
8	ПТ СС	1.768	0.0039	0.0029	0.0101	1.7719	248.2759	99.78
9	ПТ РС/СC	0.539	0.0938	0.0316	0.0555	0.6328	75.07886	85.11
10	ПЗ	0.215	0.1986	0.3730	7.2079	0.4136	1832.413	51.88
11	МОа(б)	0.268	0.0825	0.0461	0.3089	0.3505	570.0651	76.38
12	РМ	0.046	0.2821	0.0316	0.098	0.3281	209.1483	14.15
13	П2	0.194	0.1229	0.3730	6.3666	0.3169	1606.863	61.13
14	П1а(б)	0.165	0.1108	0.3730	6.1342	0.2758	1544.558	59.83
15	ТКа(б)	0.078	0.1679	0.0316	0.0461	0.2459	45.42587	31.63
16	ТВ	0.039	0.1278	0.0511	0.0511	0.1668	0.0413	23.42

Таблица 10: **Задача №1** Термоикономически критерии за оценка на компонентно ниво при зимен режим на работа на системата ($T_0 = 276.15\text{K}$, $\phi_0 = 80\%$ и $p_0 = 1.013\text{bar}$)

Компонент		\dot{Z}_k , лв/ч	$\dot{C}_{D,k}$ лв/ч	$c_{F,k}$ лв/kWh	$c_{P,k}$, лв/kWh	$\dot{C}_{D,k} + \dot{Z}_k$ лв/ч	r_k %	f_k %
№	k							
1	ДВГа(b)	10.264	3.8124	0.0546	0.1511	14.0764	176.7399	70.50
2	Г	8.267	1.6966	0.1695	0.2109	9.9636	24.39599	82.93
3	ТМ	6.248	1.5507	0.0317	0.3369	7.8051	966.1392	79.92
4	ХР	4.264	0.0029	0.0029	0.034	4.2699	1072.414	99.93
5	С	2.258	0.1239	0.0426	0.0461	2.3819	8.450704	94.78
6	ОТК	0.78	1.2455	0.5254	15.4636	2.0255	2843.205	38.46
7	ПТ PC/SC	0.539	0.0732	0.0317	0.0504	0.6122	59.49367	88.00
8	РМ	0.046	0.2812	0.0317	0.0977	0.3272	209.1772	14.11
9	П2	0.194	0.1177	0.3730	5.0453	0.3117	1252.627	62.14
10	МОа(b)	0.268	0.0420	0.0462	0.3015	0.31	552.5974	86.38
11	П1а(b)	0.165	0.1123	0.3730	6.7117	0.2773	1699.383	59.50
12	ТКа(b)	0.078	0.1581	0.0317	0.0462	0.2361	46.20253	32.95
13	ТВ ¹							
14	ПЗ							
15	ВО							
16	ПТ СС							

Таблица 8 показва, че дискутираните топлообменници (ВО, ТМ и ПТ СС), заедно с хидравличния разделител (ХР) са сред звената на системата с най-високи стойности на ексергоикономическия фактор, f_k . Освен със стойностите за r_k , високите резултати за този термоикономически критерий могат да се обяснят с факта, че инвестиционните и О&М разходи са много по-високи като числено значение отколкото стойността на деструкцията на ексергия при същите, а ниските стойности за $\dot{C}_{D,k}$ са следствие на невисоките резултати за ексергийната цена на горивото.

При анализа на резултатите, получени от термоикономическия анализ в разглежданите задачи, формулирани в началото на Глава VI, ДВГа(b), Г и ТМ са компонентите с най-висока стойност за $\dot{C}_D + \dot{Z}_k$, но в същото време, стойностите за относителната разлика в цените при ДВГа(b) и Г не са сред най-високите, тъй като ексергийният КПД на генератора е значително висок.

Освен това, съществуват и технологични ограничения, а едно от тях е, че част от компонентите на системата (С, ТКа,b, МОа,b, РМ, ДВГа,b, ПТ

¹ Оцветените в сив цвят редове от таблицата съответват на неработещите през зимния период звена от охладителния контур на системата. Съгласно алгоритма за управление и автоматизация, ВО и ПЗ се включват, когато температурата на връщата се от консуматорите вода стане равна на $T_{22} = 68^\circ\text{C}$. През ПТ СС преминава дебит студоносител, ако $T_{22} > 68^\circ\text{C}$

PS/SC, ТМ и Г) представляват единна и неразделна част от оборудването на системата, наречена когенерационен модул. Поради това, капиталовите инвестиции, съставляващи параметъра \dot{Z}_k , и свързани с ДВГa(b), ТМ и Г няма как да бъдат понижавани.

Компонентът, имащ четвърта по големина стойност за сумата $\dot{C}_D + \dot{Z}_k$ е въздушният охладител, част от охладителния контур на системата. Високите стойности за f_{BO} и r_{BO} , които се наблюдават при експлоатация в летния и пролетно – есенния период дават предпоставка за твърдението, че би било ефективно, от гледна точка на големината на паричните разходи в системата, да се намалят разходите му за поддръжка и/или да се увеличи ексергийния му КПД. При зимен режим на работа, обаче, както е видно от таблица 10, този компонент не работи.

На база получените стойности за термоикономическите критерии за това звено се твърди, че оптимум между термодинамични и икономически показатели на системата би могъл да се постигне, ако се изменя режима на натоварване на когенерационните модули.

Термоикономическа оптимизация на системата

Термоикономическата оптимизация на промишлената когенерационна система е извършена за три различни групи от параметри, характеризиращи референтната околна среда, явяващи се, от друга страна, параметри приети за константи в хода на търсене на минимум на функцията от уравнение (9). Стойностите им са подбрани така, че да изпълняват ролята на величини, окачествяващи „типични дни” от четирите годишни времена.

В съставените оптимизационни модели на когенерационната система, входящите параметрите, x^u , и изходящите, y_j , не зависят от времето. Освен това, в структурата на моделите са включени: уравнения на материалния и енергийния баланс, ексергийни балансови уравнения, както и балансови уравнения на стойността. В резултат на това, при конкретни стойности на управляващия параметър, намиращ се в пространството Γ_x ($x \in \Gamma_x$), стойностите на изходните параметри, y_j , и целевата функция се определят чрез енергиен и ексергиен анализ и на база термоикономически зависимости, съставени за компонентите от системата.

Когато става дума за управляващи параметри на оптимизационните задачи, за такъв е избран режимът на натоварване на когенерационните модули, PL – изразен като процент от номиналната електрическа мощност на звената, тоест:

$$x = (PL)^T \in \Gamma_x \quad (10)$$

Тази независимата променлива PL в оптимизационната процедура е ограничена по технологични съображения, т.е. наложени ѝ са факторни ограничения от вида:

$$x_{\min,1} \leq x_1 \leq x_{\max,1} \text{ или } 50 \leq PL \leq 100 \quad (11)$$

Освен това, оптималната стойност на независимата променлива трябва да е такава, че големината на изходния параметър в оптимизационната процедура, величина T_{22} , да е изпълнено условието:

$$T_{22}(x_1) \geq 333.15K, \quad (12)$$

т.е. температурата на връщащата се от консуматорите вода не трябва да е по-ниска от 60°C , съгласно технологичните изисквания на фирмата – производител на когенерационните модули.

Не на последно място, топлинна мощност на системата, \dot{Q}_{cogen} , в съответния режим на натоварване на когенерационния модул, трябва да удовлетворява топлинните потребности на консуматорите на топлина, \dot{Q}_{KH} :

$$\dot{Q}_{cogen}(x_1) \geq \dot{Q}_{KH} \quad (13)$$

От гореизложеното следва, че целта на оптимизационната задача е да се намерят такива стойности на управляващия параметър, които удовлетворяват ограниченията, въведени чрез уравнение (10), (11) и (12), т.е. намиращи се в допустимата област от множества, Γ_x .

Прилагането на генетичния алгоритъм с предложената структура и стойности за конфигурируемите му параметри към оптимизационната задача води до следните оптимални резултати за независимата променлива –таблица 11.

Таблица 11: Стойности на независимата променлива в оптималния и базовия вариант на работа на системата в трите разглеждани годишни периода

Параметри на референтната околна среда	Независима променлива, PL [%]	
	Базов вариант	Оптимален вариант
$T_0 = 298.15K$, $\varphi_0 = 60\%$ и $p_0 = 1.013\text{bar}$	75	50
$T_0 = 288.15K$, $\varphi_0 = 65\%$ и $p_0 = 1.013\text{bar}$		54
$T_0 = 276.15K$, $\varphi_0 = 80\%$ и $p_0 = 1.013\text{bar}$		71

Таблицы 12, 13 и 14 съпоставят основни термоикономически показатели в случая на базовия вариант на експлоатация на когенерационната система (при който е извършен термодинамичният анализ на системата, т.е. при $PL = 75\%$) и оптималния вариант. Става ясно, че в летен режим на работа на системата, т.е. при $T_0 = 298.15K$, $\varphi_0 = 60\%$ и $p_0 = 1.013\text{bar}$, се постига около

22% понижение в стойността на целевата функция, като същевременно се наблюдава низходяща тенденция в изменението на този резултат с понижение температурата на околната среда. Причината е в повишаващите се топлинни потребности на утайката, а оттам – необходима е по-висока топлинна мощност на системата.

От таблици 12, 13 и 14 се вижда, че през летния и пролетно – есенния сезон се постигнато значително понижение в стойността на деструкцията на ексергия – с около 43% по-малко спрямо базовия вариант на работа. Дължи се на факта, че при термоикономически оптималната експлоатация на системата, компонентите от охлаждащия контур (ВО, ТВ, ПЗ и ПТ СС) не се експлоатират и, следователно, не реализират загуби на работоспособност. Това води и до намаляване на паричната стойност на ексергийните загуби. Понижението в стойността на деструкцията на ексергия през зимния период е по-ниско в сравнение с предходните два (около 15%), тъй като и в базовия вариант на работа на системата, компонентите от охлаждащия контур не се експлоатират.

По-ниските резултати за деструкцията на ексергия в оптималните режими на работа на системата водят след себе си до: по-ниска парична стойност на деструкцията на ексергия (с около -40% спрямо базовия вариант при летния и пролетно – есенния период и с около -36% в зимния период) при същевременно по-високи стойности в ексергийния КПД на системата.

Таблица 12: Сравнение в стойностите на основни термоикономически показатели, наблюдавани в базовия и оптималния вариант на работа на системата при $T_0 = 298.15\text{K}$, $\varphi_0 = 60\%$ и $p_0 = 1.013\text{bar}$

Термоикономически показател	Базов вариант	Оптимален вариант	Изменение $\pm\Delta$, %
Целева функция, [лв/ч]	132.2497	108.6683	-21.70
Деструкция на ексергия, [kW]	515.65	359.3713	-43.49
Ексергиен КПД, [%]	38.82	39.84	2.56
Стойност на ексергийните загуби, [лв/ч]	9.7947	5.4797	-78.75
Стойност на деструкцията на ексергия, [лв/ч]	30.2144	21.6344	-39.66
Ексергийна цена на продуктите (топлинна и електрическа енергия), [лв/kWh]	0.0705	0.0676	-4.29

Таблица 13: Сравнение в стойностите на основни термоикономически показатели, наблюдавани в базовия и оптималния вариант на работа на системата при $T_0 = 288.15\text{K}$, $\varphi_0 = 65\%$ и $p_0 = 1.013\text{bar}$

Термоикономически показател	Базов вариант	Оптимален вариант	Изменение $\pm\Delta$, %
Целева функция, [лв/ч]	129.0543	110.694	-16.59
Деструкция на ексергия, [kW]	514.4049	358.6368	-43.43
Ексергиен КПД, [%]	40.89	41.60	1.71
Стойност на ексергийните загуби, [лв/ч]	8.9340	6.3637	-40.39

Стойност на деструкцията на ексергия, [лв/г]	30.4357	22.3636	-36.09
Ексергийна цена на продуктите (топлинна и електрическа енергия), [лв/kWh]	0.0696	0.0663	-4.98

Таблица 14: Сравнение в стойностите на основни термоикономически показатели, наблюдавани в базовия и оптималния вариант на работа на системата при $T_0 = 276.15\text{K}$, $\phi_0 = 80\%$ и $p_0 = 1.013\text{bar}$

Термоикономически показател	Базов вариант	Оптимален вариант	Изменение $\pm\Delta$, %
Целева функция, [лв/г]	120.7453	118.8172	-1.62
Деструкция на ексергия, [kW]	495.08	429.1884	-15.35
Ексергиен КПД, [%]	41.95	43.3	3.12
Стойност на деструкцията на ексергия, [лв/г]	26.9206	26.0372	-3.39
Ексергийна цена на продуктите (топлинна и електрическа енергия), [лв/kWh]	0.0664	0.0662	-0.30

От анализа на резултатите на численото изследване могат да се направят следните основни **изводи**:

- Разработените методиките за термоикономически анализ и оптимизация могат да послужат в процеса на проектиране и експлоатация на когенерационни инсталации, задвижвани от биогазови ДВГ.

- Определените стойности на предложените икономически критерии (NPV, IRR и срок на откупуване) показват, че към настоящия момент българският енергиен пазар предлага задоволителна доходоносност на инвестициите в когенерационни технологии и би било удачно, ако в страната се засилят регулаторните и законови стимули за насърчаване комбинираното производство на топлинна и електрическа енергия в сектора на пречистване на отпадни води.

- Получената при настоящия анализ стойност за срока на откупуване е в добро съответствие с представените стойности на други автори, разглеждащи сходни системи. Въпреки това, се твърди, че този числен резултат е относително висок и е индикатор за наличие на риск, произтичащ от събития, външни за собствениците и извън техния контрол.

- От гледна точка на социалните ползи от инвестициите в биогазови когенерационни системи, проведеният анализ показва, че е налице екологично подобрение в района на локализация на системата – като форма на социално влияние на разглежданата технология за енергопреобразуване. Стига се до извода, че използването на биогаза като гориво за когенерационни модули е по-удачния вариант, отколкото директното изхвърляне в околната среда на получения метан и въглеродния диоксид.

Социалният ефект е оценен чрез въвеждането на параметъра екологичен КПД.

- Икономическият и термоикономически анализ на когенерационната система предоставят информация за цената (изразена както на енергийна, така и на ексергийна основа) на продуктите от системата – топлинна и електрическа енергия. Не са известни публикации, предоставящи подобна информация за когенерационни инсталации, утилизиращи биогазово гориво.

- При конкретното приложение на генетичния алгоритъм към формулираните задачи, получените оптимални стойности не нарушават ограниченията на термоикономическите модели на системата. Предложената структура на ГА се характеризира с бърза сходимост, тъй като жизнеспособността на най-добрия индивид в популацията съвпада с глобалния оптимум в пространството на решенията при краен брой поколения. Точността на полученото решение е гарантирана чрез въведен критерий за минимална околност за локализация на екстремума.

Изводи и заключения от дисертационната работа

По резултатите от изследванията могат да се направят следните изводи:

1. Анализът на литературните данни по темата на дисертацията показва, че основният проблем е в избора на критерий за провеждане на термоикономическа оптимизацията на промишлени топлотехнически системи. В теорията са известни два подхода: първият, при който целевата функция е базирана на енергийни характеристики, а във втория, в критерия за оптималност са включени ексергийни величини. Основното предимство при прилагане на ексергийния подход към оптимизационната задача е, че се дава както количествена, така и качествена оценка на материалните и енергийни потоци от разглежданата система.

2. Създадените математически модели служат за оптимизиране на експлоатационните параметри на широк клас от промишлени топлотехнически системи, които са приложими и за когенерационни инсталации. При съставянето на моделите е използван по-задълбочен метод за термодинамичен анализ, разделящ деструкцията на ексергията на отстранима и неотстранима част. Предложено е всички критерии за ефективност на системата да бъдат извеждани на база ексергия.

3. Разработените алгоритми, реализиращи създадените математически модели с помощта на генетичния алгоритъм като метод за оптимизация се използват за търсене на оптимален режим на топлотехнически системи, в частност на такива с когенерационни модули.

4. Извършена е верификация с резултати, получени в други литературни източници. Тенденциите, отразени в тях до голяма степен са отразени от получените в дисертацията стойности.

5. Предложената структура на генетичния алгоритъм дава възможност да се избират параметрите му така, че да не се нарушава неговата сходимост и едновременно с това да се получат резултати с желаната точност.

6. Разработените методика и алгоритми за термоикономическа оптимизация на разглежданата топлотехническата система с когенерационни модули са основа, която чрез разширяване и допълване, в това число и конкретизиране на други независими променливи, може да се използват при параметрична оптимизация за широк клас енергопреобразуващи системи.

Заклучение: В резултат на изпълнението на дисертационната работа е разработен математически модел и е реализирана методика, основаваща се на генетичния алгоритъм като метод за оптимизация, за търсене на оптимални експлоатационни параметри на топлотехническата система с когенератори, утилизирани биогоривото, добивано в ПСОВ гр. Варна и анализ на факторите, които влияят на тяхната динамика.

Приноси по дисертационния труд:

I. В научно – приложен аспект:

- Разработване на методика за термодинамичен анализ, където деструкцията на ексергия се разделя на отстранима и неотстранима част за когенерационна система, задвижвана от биогазови двигатели с вътрешно горене.

- В сравнение с широко използваните в практиката и утвърдените в действащите нормативни актове критерии за оценка термодинамичната ефективност на когенерационни инсталации, предложените тук параметри, изразявани на ексергийна основа, предоставят обективна, по-пълна и задълбочена информация относно термодинамичното поведение не само за системата като цяло, но и на компонентно ниво.

- В случая на когенерационни инсталации, задвижвани от биогазови ДВГ е въведен критерий, означен като екологичен КПД. Изследвано е влиянието на параметрите на околната среда върху стойностите му.

- В предходни научни разработки (Данчев, 1974) бе доказано, че високият КПД и ниските експлоатационни разходи не са единствения най-добър показател за качествата на една корабна енергетична уредба. Приложението на моделите, разработени в настоящата дисертационна работа към съществуваща когенерационна система допълват, че за такъв критерий може да служи и паричната стойност на продуктите от системата, изрязани на база ексергия.

II. В инженерно - приложен аспект

- Създаден е пакет от приложни програми, с помощта на които се определят термоикономическите показатели на когенерационни инсталации, задвижвани от биогазови ДВГ;

- Разработени са оптимизационни модули, базирани на генетичен алгоритъм за промишлена когенерационна система.

- Извеждане на регресионни зависимости за определяне на характерни променливи (температури на някои от работните вещества, част от технологичните кръгове на системата, дял на топлината, отведена с охлаждащата двигателя среда, цена за закупуване на елементите от системата и други) като функция на режима на натоварване на когенерационните модули.

- Формулиран е аналитичен израз за определяне на цената на закупуване на когенерационни модули с малка мощност (от 77kW до 320kW електрическа мощност).

- Изследвано е влиянието на параметрите на референтната околна среда върху стойностите на PHR и η_{FESR} (изразени както на енергийна, така и на ексергийна основа).

- Предоставена е информация за цената (изразена както на енергийна, така и на ексергийна основа) на продуктите (топлинна и електрическа енергия) от когенерационната система, утилизираща биогазово гориво и намираща се на територията на страната.

- Получените резултати от числената реализация на методиките за термоикономически анализ и оптимизация могат да послужат в процеса на проектиране и експлоатация на когенерационни инсталации, задвижвани от биогазови ДВГ.

- На база въведените в представената дисертационна работа методики и на резултатите, получени от тяхното приложение, биха могли да бъдат разработени нормативните актове в сектора на енергийната ефективност на промишлени топлотехнически системи.

III. Други възможности за приложение

- Настоящата дисертационна работа не третира въпросите, свързани с кръга на утайките в ПСОВ гр. Варна. Важно е да се знае, обаче, че за ефективно управление на подобни обекти е необходим адекватен модел на разходите, тъй като постъпващите от канализационната мрежа суровини са непрекъснати в хода на денонощието, а третирането им е в пряка връзка с цената на добиваното биогазово гориво.

- При провеждането на термодинамичния анализ на разглежданата когенерационна технология беше показано, че този клас системи се характеризира с ексергиен КПД, чувствително по-нисък от този, който се наблюдава при когенерационните системи с горивни клетки. Би било полезно, от практическа и научно-изследователска гледна точка, да се изясни

термоикономическия потенциал на горивните клетки, използващи биогаз и внедряването им в структурата на промишлените топлотехнически системи.

- Тъй като при провеждане на икономическия анализ бяха извършени редица допускания, необходимо е да се извърши анализ на чувствителността, който да изследва влиянието на нивата на инфлация и лихвения процент за възвръщаемост на капитала върху стойностите на икономическите показатели на системата.

ПУБЛИКАЦИИ ВКЛЮЧЕНИ В ДИСЕРТАЦИОННИЯТ ТРУД

[1] Н. Досева, Д. Чакърва "Оценка производителността на теоретична когенерационна инсталация", Юбилеен конгрес с международно участие „Наука и образованието в бъдещето“ - 50 години ТУ Варна - 4-6 октомври, том 5, стр. 147-153, 2012.

[2] Н. Досева, Д. Чакърва, Р. Русев „Енергиен и ексергиен анализ на когенерационна инсталация, задвижвана от двигател с вътрешно горене, изгарящ биогаз”, Сборник научни доклади „Принос за развитието на технологичен предприемачески дух и насоченост на инженерните изследвания към развитие на икономика, базирана на знание и иновации”, стр. 126-132, 2014.

[3] N. Doseva “Advanced exergetic analysis of cogeneration system with a biogas engine”, SGEM2014 Conference Proceedings, ISBN 978-619-7105-15-5 / ISSN 1314-2704, June 19-25, , Book 4, Vol. 1, pp.11-18 pp, 2014; <http://www.sgem.org/sgemlib/spip.php?article4622>.

[4] N. Doseva, D. Chakyrova “Energy and exergy analyses of cogeneration system with a biogas engine”, SGEM2014 Conference Proceedings, ISBN 978-619-7105-15-5/ISSN 1314-2704, June 19-25, Book 4, Vol. 1, pp. 173-180, 2014;<http://www.sgem.org/sgemlib/spip.php?article4643>.

[5] N. Doseva, D. Chakyrova “Energy and Exergy Analysis of Cogeneration System with Biogas Engines”, Journal of Thermal Engineering, ISSN2148-7847, 3 (1), pp.391-401, July, 2015; <http://dergipark.ulakbim.gov.tr/thermal/article/view/5000118796>.

[6] N. Doseva, N. Nikolova, D. Chakyrova “Profitability Evaluation of Investments in CHP Technologies: a Case Study of Varna Wastewater Treatment Facility, Bulgaria”, International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology, ISSN Print 2349-4751, ISSN Online: 2349-476X, 2 (6), pp. 71-81, 2015; <http://ijrsset.org/volume-2-issue-6>.

[7] Н. Досева „Термоикономически анализ на когенерационна инсталация, задвижвана от биогазови двигатели с вътрешно горене”, Сборник доклади от Младежки форум „Наука, технологии, иновации, бизнес - 2015“, 15-16 октомври, ISSN 2367-8569, Vol. 1., pp. 35-40, 2015; http://www.hst.bg/bulgarian/YOUTH%20FORUMS_2015_Proceedings.pdf

[8] N. Doseva, D. Chakyrova “Thermoeconomic analysis of a biogas engines powered cogeneration system”, Journal of Thermal Engineering, **Article in press.**

[9] Н. Досева, Д.Чакърлова „Термоикономическа оптимизация на промишлена топлотехническа система посредством генетичен алгоритъм”, XXI Научна конференция с международно участие, ЕМФ 2016, Сборник с доклади, 18-21 септември, Созопол, България, Volume I, pp. 191-199, 2016.

[10] Н. Досева „Термоикономическа оптимизация на промишлена топлотехническа система с когенератори”. Топлотехника, година VIII, книга 1, pp. 96-100, 2017.

ABSTRACT

Thermoeconomic optimization of thermal energy systems

The aim of this thesis is to develop a procedure for solving the problems related to drawing up of thermoeconomic models as a function of parameters of reference environment. It is necessary these models to be applicable to the common classes of energy systems. Moreover, the objective of this study is to establish the methodology with algorithms for costs optimization of a thermal system thermoeconomically. It is necessary to carry out a comparative analysis of the results, in order to obtain universal dependencies.

The object of this thesis is a wide range of industrial thermal systems that have been established need of optimization. The develop methodology and models are applied to an existing cogeneration system driven by biogas internal combustion engines (ICE) is a subject of thermoeconomic optimization. The system is installed in the Varna Wastewater Treatment Plant (Varna WWTP), Bulgaria and its purpose is to utilize the methane produced as a byproduct of the solids stabilization process at Varna WWTP. The schematic of cogeneration system is illustrated in Figure 1.

In the dissertation is used the method for thermoeconomic optimization, which consists of the following approaches:

- Method for thermodynamic analysis: by means of the exergy method- eq. 1 – eq. 3.
- Method for economic analysis: based on revenue requirement method - eq. 4 – eq. 5.
- The thermoeconomic analysis: based on SPECO method - eq. 6 – eq. 11.
- A genetic algorithm is used to solve formulated thermoeconomic optimization problems – fig. 2.

Results are shown in the fig. 4 – fig. 8 and in the tabl. 1 – tabl. 14.

The realization of the aim of the dissertation leads to results and conclusions that can be considered as an original contribution in theoretical heat engineering. The obtained results can be considered as a base in the case of the analysis and optimization of a wide class of complex energy systems, as well as the design and optimization of biogas ICE powered cogeneration plants.

