Оценка на икономията на гориво при паротурбинни инсталации за комбинирано производство на основата на симулационно моделиране

К. Христов Ив. Геновски

Резюме

Топлоснабдителните системи задоволяват нуждите от топлина на широк кръг консуматори. В източника на топлина се произвежда електрическа и топлинна енергия основно от паротурбинни инсталации по комбиниран принцип, при което се реализира икономия на гориво, която зависи от големината на топлинния товар, температурата на мрежовата вода постъпваща в източника на топлина и температурата на водата към потребителите. Настоящият доклад има за цел да предложи подход за определяне икономията на гориво на основата на симулационно моделиране на работата на инсталациите.

Assessment of the fuel economy of cogeneration steam turbine based simulation modeling

K. Hristov *Iv. Genovski*

Summary

District heating systems meet the needs of a wide range of heat loads. In the heat source produces electrical and thermal energy mainly from the steam turbine plant in a combined basis, to realize fuel economy that depends on the magnitude of the heat load, the temperature of water entering the network at the source of heat and the temperature of the water to the consumers. This report aims to propose an approach for determining the fuel economy on the basis of simulations regime of the installation.

Въведение

Комбинираното производство на топлинна и електрическа енергия позволява по-ефективно използването на първичните източници на енергия в сравнение с разделното. Топлинната енергия се пренася към консуматорите с мрежова вода подгрята до определена температура и с разход съответстващ на топлинния товар. Съоръженията, в които се подгрява мрежовата вода, са бойлерни инсталации при парните турбини с регулируеми пароотбори от тип Т и ПТ или бойлер-кондензатори при противоналегателните турбини от типа Р и ПР.

Приетата през 2004 година директива на европейският съюз [1] изисква произведената електрическа енергия от инсталациите за комбинирано производство да е с висока енергийна ефективност. За да е налице високо ефективно комбинираното производство, съгласно приетата наредба, е необходимо инсталацията да реализира не по-малко от 10 % икономия на гориво (ΔB), която се установява чрез сравняването на разходите на гориво за производството на еднакви количества топлинна и електрическа енергия при разделен и комбиниран метод.

Настоящият доклад има за цел да представи подход и да предложи уравнения за определяне на икономията на гориво от паротурбинни инсталации за комбинирано производство чрез използване на симулационно моделиране.

Подход за определяне на икономията на гориво

Икономията на гориво на инсталациите за комбинирано производство зависи от топлинния товар $Q_т$, температурата на мрежовата вода в подаващия τ_1 и обратния τ_2 тръбопровод. В източника на топлина регулируеми параметри са топлинният товар на потребителите и температурата на подаващата мрежова вода. Температурата на обратната мрежовата вода е неуправляем параметър, върху който не могат да се реализират

въздействия, тъй като тя е резултатна величина от потреблението на топлина в системата за топлоснабдяване [3, 4].

Зависимостта на икономията на гориво от топлинния товар и температурите на водата в подаващия и обратния тръбопровод може да бъде представена чрез регресионно уравнение от втора степен [5], което има вида:

$$\Delta B(\tau_1,\tau_2,Q_T)=a_0+a_1\tau_1+a_2\tau_2+a_3Q_T+a_{11}\tau_1^2+a_{22}\tau_2^2+a_{33}Q_T^2+a_4\tau_1\tau_2Q_T \quad (1)$$

където: a_0, a_1, a_2, a_3, a_{11}, a_{22}, a_{33}, a_4 са коефициентите на регресионното уравнение.

Коефициентите на регресионното уравнение могат да се получат след обработка на опитни данни или след статистическа обработка на резултати от симулационно моделиране на работата на инсталацията. В случая се прилага симулационно моделиране на основата на ***GateCycle***.

Адекватността на математичния модел се оценява съгласно представената в [2] методика.

Моделиране на паротурбинни инсталации чрез *GateCycle*

GateCycle е базиран на съставяне на енергиен и масов баланс на енергийните обекти. Той има два основни модула проектантски(design) и променлив(off-design) [6].

Първият модул позволява да се моделира нова централа със съставляващите я съоръжения. Проектирането на централата се извършва чрез помощните менюта на програмата. Необходимо е основните съоръжения да бъдат свързани в логическа схема. Логическото свързване на схемата е необходимо за да бъде съставен материален и енергийният баланс на отделните съоръжения и централата като цяло.

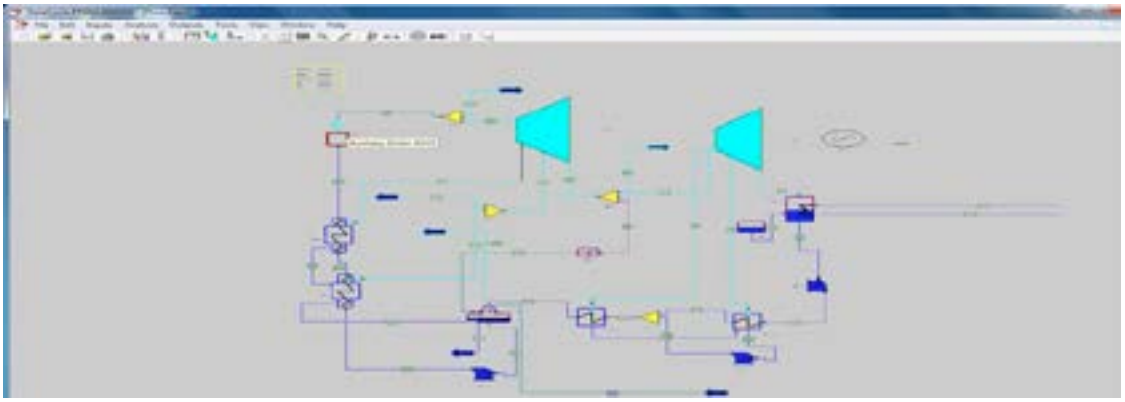
Вторият модул дава възможност да бъдат разгледани режими различни от заложените в проекта. При него може да се оцени влиянието на промяната на някой параметри върху ефективността на централата. Този модул позволява да се анализира степента на влияние от извършването на дадена реконструкция върху ефективността ѝ на работа.

При моделирането на съществуваща централа, преди да бъдат изследвани променливите режими (off-design), на начален етап е необходимо моделирането на нейния номинален режим чрез модула design.

Моделирането на топлинна схема в проектантски режим на нова централа дава информация за параметрите (температура, налягане, енталпия и агрегатно състояние) на работното вещество във всяка една точка нея. Програмата дава и подробна характеристика за всяко едно съоръжение от топлинната схема. При моделирането на отделните съоръжения, които изграждат разглежданата централа, могат да бъдат въведени техните конструктивните особености (нагревна повърхност, схема на движение на работните потоци и др.). Програмата позволява да бъде отчетено замърсяването на нагревните повърхности.

Регресионно уравнение за турбина ПР-66-130-10

С помощта на ***GateCycle*** е синтезирана топлинната схема на паротурбинна инсталация ПР-66-130-10 (фиг.1).



Фиг.1. Графично представяне на топлинната схема на ПР-66-130-10

В табл. 1 са представени резултатите от пресмятането за номиналния режим на работа на турбината. В същата таблица са представени данни от техническата документация на турбината за същия режим на работа. Вижда се, че отклонението на пресметнатите и паспортни данни е в допустими граници, което позволява моделът да бъде използван за пресмятания на други режими на работа.

Данни за турбина ПР-66-130-10 Табл.1

	Техническа документация	Симулационен модел	Отклонение, %
Налягане на свежата пара, p_o, MPa	12,75	12,75	-
Температура на свежата пара, t_o, ^oC	530	530	-
Електрическа мощност, N, MW	66	66	-
Разход на свежа пара	122,2	124,9	2,2
Разход на пара през пром. пароотбор, $D_п$, kg/s	40	41,2	2,9
Разход на обратния кондензат, $D_{ок}$, kg/s	30	30	-
Налягане на парата в промишления пароотбор, рп, MPa	1,18	1,16	-1.7
Разход на пара в бойлер-кондензатора, $D_{БК}$, kg/s	60	60,4	-
Налягане на парата в бойлер-кондензатора, $p_{БК}$, MPa	0,20	0,20	-
Температура на подхранващата вода, $t_{пв}$, ^oC	230	227	-1.3
Специфичен разход на условно гориво за производството на електрическа енергия, $b_{у ел}$ g/kWh	148	151	2,0

С помощта на софтуера за симулационно моделиране са извършени пресмятания на променливи режими на паротурбинната инсталация. Моделното изследване е извършено при изменение на температурата на обратната мрежова вода на входа на централата в интервала от 50 до 70 ^oC. Разходът на гориво при разделното производство на електрическа енергия е определен при кпд 33 % за заместващата кондензационна мощност и при кпд 90 % за отпускане на топлина от водогреен котел.

Ограниченията, при които са извършени симулацонните изследвания, са:

- Изменение на топлинния товар в границите от $80 \le Q_T \le 130$ MW;
- Изменение на налягането на парата ($p_{БК}$) в бойлер-кондензатора в диапазона 0,10÷0,25 MPa
- Разход на мрежова вода през бойлер-кондензатора $G_{мв} \le 2600$ t/h.

Резултатите от пресмятането за турбината са представени в таблица 2.

Табл.2

№	τ_2, ^oC	τ_1, ^oC	Q_T, MW	ΔB,%
1	70	120	130	27,38
2	70	116	130	27,83
……				
98	50	98	80	29,07

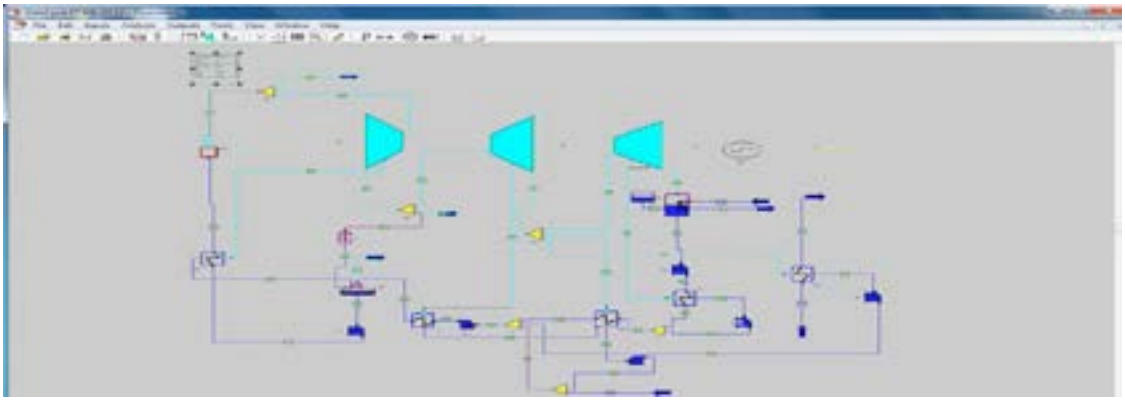
След обработка на резултатите с помощта на софтуер за математически анализи е получена икономията на гориво за противоналегателната инсталация в следния вид:

$$\Delta B(\tau_1,\tau_2,Q_T)=27{,}45-5{,}25.10^{-2}\tau_1+2{,}00.10^{-1}\tau_2+6{,}31.10^{-2}Q_T- \\ -2{,}70.10^{-4}\tau_1^2-1{,}79.10^{-3}\tau_2^2-2{,}3.10^{-4}Q_T^2+6{,}10.10^{-7}\tau_1\tau_2Q_T \quad (2)$$

Коефициентът на множествена корелация за получената аналитична зависимост (2) е R=0,98. Съгласно представената методика в [2], той е значим и получената зависимост може да се използва за пресмятания и при други режими на работа.

Регресионно уравнение за ПТ-30-90-10

На фиг.2 е графично представена топлинната схема на ПТ-30-90-10, чрез споменатия ***GateCycle.***



Фиг.2. Графично представяне на топлинната схема на ПТ-30-90-10

В табл. 3 са представени резултатите от пресмятането за номиналния режим на работа на турбината. В таблицата са представени данни от техническата документация на турбината за същия режим на работа.

Данни за турбина ПТ-30-90-10 Табл. 3

	Техническа документация	Симулационен модел	Отклонение, %
Налягане на свежата пара, p_o, MPa	8,80	8,80	-
Температура на свежата пара, t_o, ^oC	535	535	-
Електрическа мощност, N, MW	30	30	-
Разход на свежа пара, D_o kg/s	51	51,8	1,5
Разход на пара през пром. пароотбор, $D_п$ kg/s	17	17,2	1,1
Разход на обратния кондензат, $D_{ок}$, kg/s	5,56	5,56	-
Налягане на парата в промишления пароотбор, $p_п$, MPa	1,18	1,15	2,6
Разход на пара през топлофикационния пароотбор, $D_т$, kg/s	17	17,2	1,2
Налягане на парата в топлофикационния пароотбор, $p_т$, MPa	0,20	0,20	-
Налягане на парата в кондензатора, $p_к$, kPa	5	5,2	3,8
Температура на подхранващата вода, $t_{пв}$, ^oC	230	226	-1,7
Специфичен разход на условно гориво за производството на електрическа енергия, $b_{у ел}$ g/kWh	186	190	2,1

Отклонението на резултатите между модела и паспортните данни е с приемлива точност, което позволява моделът да бъде използван за пресмятане и на други режими.

При разглеждания режим на работа на турбината през част ниско налягане на турбината преминава само количеството пара необходимо за нейното охлаждане. Техническите ограничения, при които са извършени симулационните пресмятания са:

- Изменение на топлинния товар $Q_т$ в границите от 22÷36,75 MW;
- Изменение на налягането на парата в регулируемия топлофикационен пароотбор ($p_т$) в диапазона 0,12÷0,25 MPa
- Разход на мрежова вода през бойлерната уредба $G_{мв}$ ≤750 t/h.
- Изменение на температурата постъпващата мрежова вода инсталацията в интервала от 50 ^oC до 70 ^oC

Резултатите от извършените моделни изследвания са представени в Табл.4.

Табл.4

№	τ_2,°C	τ_1, °C	Q_T, MW	ΔB,%
1	70	120	36,75	24,44
2	70	116	36,75	24,81
……				
86	50	98	22	22,38

След обработка на получените резултати със софтуер за математически анализ се получава следното уравнение за икономията на гориво:

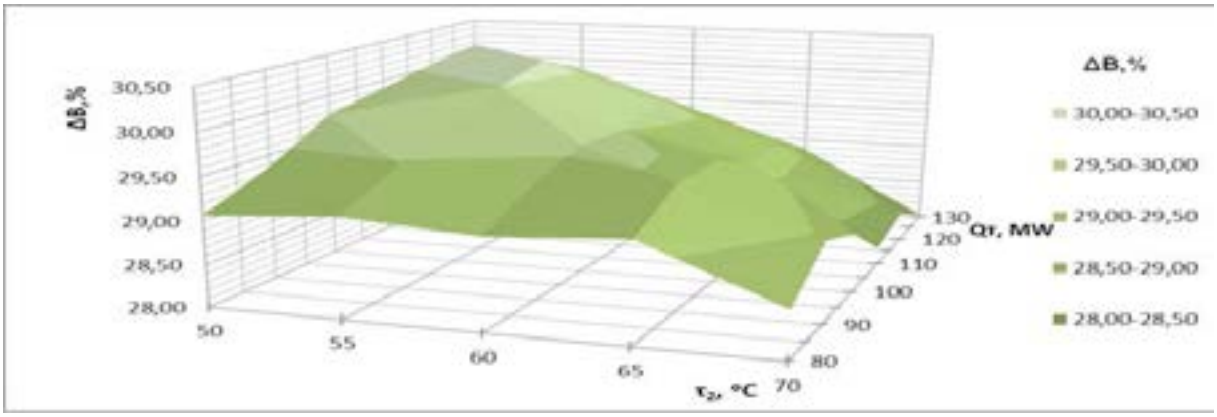
$$\Delta B(\tau_1,\tau_2,Q_T)=29{,}28-4{,}71.10^{-2}\,\tau_1-13.10^{-2}\,\tau_2+2{,}49.10^{-4}Q_T-$$
$$-1{,}41.10^{-4}\tau_1^2+5{,}45.10^{-5}\tau_2^2+5{,}45.10^{-5}Q_T^2+1{,}43.10^{-8}\tau_1\tau_2Q_T \qquad (3)$$

За изведената зависимост (3) коефициентът на множествена корелация е R=0,98. Съгласно методиката в [2], той е значим и уравнението може да се използва за оценка на икономията на гориво на изследваната паротурбинна инсталация.

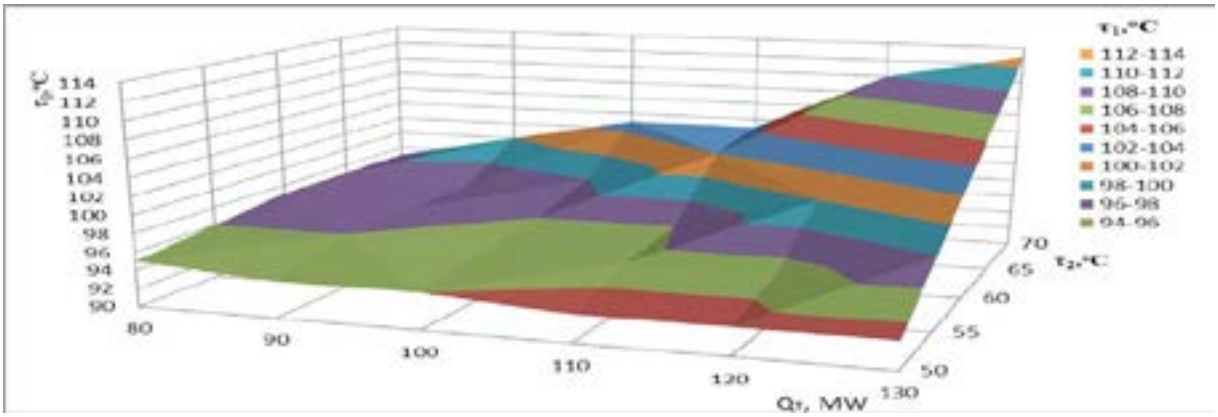
Графично представяне на резултатите от регресионните зависимости

Получените аналитични зависимости дават възможност да се определи оптималният вариант на отпускане на топлинна енергия, при който инсталациите за комбинирано производство ще реализират максимална икономия на гориво при известен топлинен товар, температура на подаващата и обратната мрежова вода.

На фиг.3 е графично представена максималната икономия на гориво, която инсталацията с противоналягане може да реализира. Температурата на мрежовата вода в подаващата топлинна магистрала, при която тя е достигната е визуализирана на фиг.4.



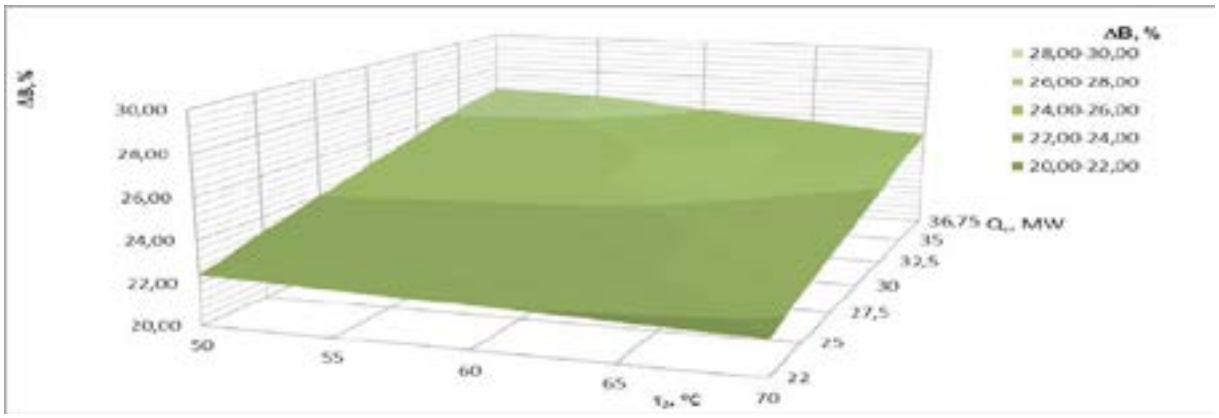
Фиг.3. Изменение на максималната икономия на гориво за ПР-66-130-10



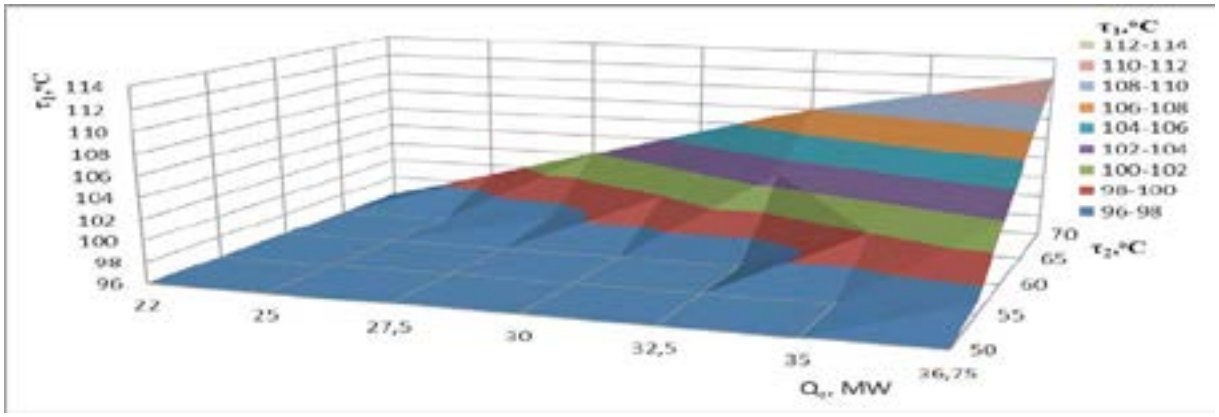
Фиг.4. Изменение на температурата на мрежовата вода в подаващата топлинна магистрала при максимална икономия на гориво

От графично представените резултати за максималната икономия на гориво от противоналегателната паротурбинна инсталация (фиг.3) се вижда, че тя се изменя в интервала от 28,55 до 30,2%. Ниските стойности съответстват на температура на мрежовата вода от 70 °C и топлинен товар от 80 MW, а по-високата стойност е при максималния топлинен товар и температура на мрежовата вода от 50 °C. Изменението на температурата на мрежовата вода в подаващата топлинна магистрала е в интервала от 93 °C до 113 °C (фиг.4).

Изменението на максималната икономия на гориво, която инсталацията с регулируеми пароотбори реализира е представено на фиг.5. На фиг. 6 е показано изменението на температурата на мрежовата вода в подаващата топлинна магистрала, при която тя се реализира.



Фиг.5. Изменение на максималната икономия на гориво за паротурбинна инсталация ПТ-30-90-10



Фиг.6. Изменение на температурата на мрежовата вода в подаващата топлинна магистрала при реализирането на максимална икономия на гориво.

От резултати за изменението на максималната икономия на гориво за паротурбинната инсталация с регулируеми пароотбори (фиг.5) се вижда, че тя се изменя от около 22 % до 26,7 %. По-ниската от двете стойности съответства на топлинен товар от 22 MW, температура 70 °C на мрежовата вода в източника и температура на водата на изхода от централата 96 °C. Икономията на гориво от 26,7 % се реализира при максимален топлинен товар отпускан чрез регулируемия пароотбор 36,75 MW, температура на мрежовата вода постъпваща в бойлерната уредба 50 °C и температура на водата след нея 96 °C. Изменението на температурата на мрежовата вода в подаващата топлинна магистрала в разглеждания режим е в интервала от 96 °C до 112 °C. По-ниските стойности съответстват на температура на мрежовата вода на входа на източника 50 °C.

Заключение

В настоящия доклад е предложен подход за определяне на икономията на гориво от паротурбинна инсталация за комбинирано производство на основата на аналитична зависимост, получени с помощта на симулационно моделиране на режимите й на работа. Регресионното уравнение отчита изменението на топлинния товар отпускан от инсталацията и температурите на мрежовата вода в подаващата и обратна топлинна магистрала. Подходът е приложен за противоналегателна инсталация тип ПР-66-130-10 и парна турбина с регулируем пароотбор ПТ-30-90-10 и са получени регресионни уравнения за тях.

С тях са извършени пресмятания за топлофикационния режим на работа на паротурбинните инсталации. От получените резултати се вижда, че изменението на максималната икономия на гориво за противоналегателната паротурбинна инсталация е около 2 % за разглежданите режими. За инсталацията с регулируеми пароотбори икономията на гориво е до 5 %. Максимална икономия на гориво за двете турбини се достига при температура 50 ^{o}C на постъпващата мрежова вода и максимален топлинен товар на всяка от тях.

Благодарности

Участието в настоящата конференция е осъществено с финансовата подкрепа на ОП РЧР, съфинансирана от ЕСФ по проект BG051PO001-3.3.06-0014. Авторът носи цялата отговорност за съдържанието на настоящия материал и при никакви обстоятелства не може да се приеме като официална позиция на Европейския съюз или МОМН

Литература

1. Директива 2004/8/ЕО на Европейския парламент и Съвета на Европа, 11. 02. 2004 г., относно насърчаване на комбинираното производство на енергия, основаващо се на търсенето на полезна топлоенергия във вътрешния енергиен пазар.
2. Вучков Ив., Ст. Стоянов, „Математическо моделиране и оптимизация на технологични обекти“, Техника, София 1986
3. Геновски Ив., К. Христов, „Влияние на температурата на обратната мрежова вода върху комбинираното производство от паротурбинни инсталации“, XVII конференция с международно участие ЕМФ, Созопол, 2012.
4. Яковлев Б. В., „Повышение эффективности систем теплофикации и теплоснабжения“, Новости Теплоснабжения, Москва, 2008
5. Savola T., Il. Keppo, “Off-desing simulation and mathematical modeling of small-scale CHP plants at part loads”, Elsavier Sciense, Applied Thermal Engineering, 2005
6. “GateCycle 5.51 – Getting Started & Installation Gide”, General Electric, 2003

Автори

инж. Калоян Христов Христов, ХТМУ-София, асистент, тел:+359898571366, e-mail: korzy@abv.bg
доц. д-р инж. Иван Кирилов Геновски, ТУ-София, ЕМФ, катедра ТЯЕ, тел: +35929652247, e-mail: genovski@tu-sofia.bg