

ЕНЕРГИЕН ФОРУМ 2023

ИЗПОЛЗВАНЕ НА СИМУЛАЦИОННО МОДЕЛИРАНЕ ПРИ ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕНЕРГИЙНАТА ЕФЕКТИВНОСТ НА ПАРОТУРБИННА ИНСТАЛАЦИЯ SST-300CE2L/V36S

Каляян Христов

USE OF SIMULATION MODELING IN RESEARCHING THE ENERGY EFFICIENCY OF A STEAM TURBINE INSTALLATION SST-300CE2L/V36S

Kaloyan Hristov

Summary

In the contemporary district heating systems (DHS) heat energy for the customers is generated by cogeneration method, which leads to the saving of primary energy resources compared to the separate production method. The most widespread technology for combined production are steam turbine installations with adjustable steam extraction and backpressure steam turbine. In this technologies water from DHS are heated to the required temperature either in district heaters in case of steam turbine with adjustable steam extractions or in boiler-condenser in case of backpressure steam turbine installations. Current study presents the development of a simulation model of existing CHP backpressure steam turbine. The object studied is a backpressure steam turbine type SST-300CE2L/V36S.

ВЪВЕДЕНИЕ

В топлоелектрическите централи се реализира комбинирано производство на топлинна и електрическа енергия, което позволява по-ефективно използване на първичните енергийни ресурси. Генерираната в централата топлинна енергия (Q_{DHS}) се доставя на битовите и промишлените потребители чрез системата за централизирано топлоснабдяване.

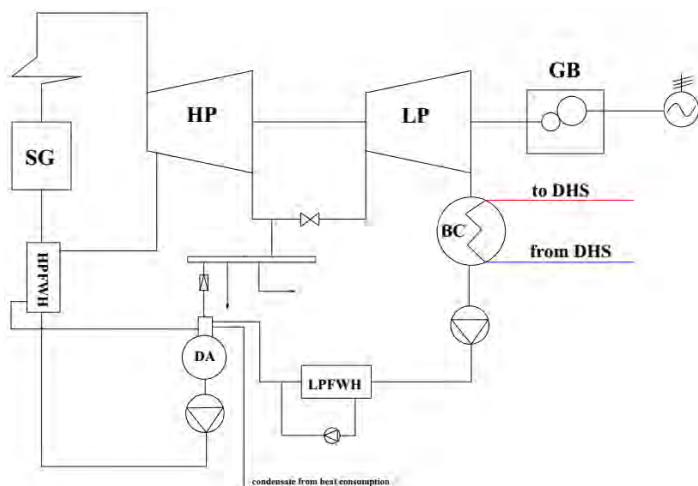
Когенерационното производство на електрическа и топлинна енергия най-често се реализира чрез парни турбини с регулируеми паротнемания или с противоналягане.

Парните турбини с регулируеми пароотнемания могат да развиват пълната си електрическа мощност, независимо от топлинния си товар. Произведената електрическа енергия е комбинирана, когато тя се генерира от парата, отведена от турбината за удовлетворяване на топлинния товар на потребителите и кондензационна, когато се генерира от парния поток, който постъпва в кондензатора.

Парните турбини с противоналягане произвеждат електрическа енергия само по комбиниран метод, а мощността им следва графика на отпускания топлинен товар на потребителите. Тъй като специфичният разход на гориво за производство на електрическата енергия по кондензационен метод е по-голям от специфичния разход на гориво за производство по комбиниран метод [1, 2], то тези инсталации са по-ефективни в сравнение с инсталациите с регулируеми пароотнемания.

Паротурбинната инсталация SST-300 CE2L/V36S включва парна турбина, която работи с високи обороти (5900 rpm). Въртящият момент на парната турбина се предава към електрическия генератор чрез редуктор, който понижава оборотите до 1500 rpm. Турбината е еднокорпусна и се състои от част високо налягане и част ниско налягане. Спомагателните съоръжения на инсталацията включват: подгревател ниско налягане, деаератор и подгревател високо налягане. Пароотнеманията от турбината са две: едно нерегулируемо и едно регулируемо. Мрежовата вода за топлоснабдителната система се подгръва в бойлер-кондензатора с пара, която постъпва след крайното стъпало на турбината.

На фиг.1 е представена топлинната схема на разглежданата инсталация за комбинирано производство.



Фиг.1 Топлинна схема на противоналягателна турбина SST-300 CE2L/V36S.

Налягането на парата в регулируемото пароотнемане се изменя от 0,78 до 1,27 MPa, а максималният разход на пара, през него е 14,01 kg/s. Захранването с пара на подгревател високо налягане се осъществява от нерегулируемото пароотнемане на парната турбина. Деаераторът и подгревателят ниско налягане се захранват с пара от регулируемото пароотнемане, след редуциране на неговото налягане. Максималната топлинна мощност на кондензатора е 90 MW, а максималният разход на мрежова вода през него - 650 kg/s. Налягането на парата в бойлер-кондензатора се изменя в интервала от 40 kPa до 250 kPa, което осигурява подгряване на мрежовата вода от 70 до 120 °C. Част от парата от регулируемото пароотнемане се използва за собствени нужди, а при излишък тя се насочва към бойлерните уредби на централата.

ПОКАЗАТЕЛИ ЗА ЕНЕРГИЙНА ЕФЕКТИВНОСТ НА ИНСТАЛАЦИИТЕ ЗА КОМБИНИРАНО ПРОИЗВОДСТВО

Ефективността на инсталациите за комбинирано производство се оценява с показатели на енергийна ефективност. Тези показатели са регламентирани с Директива

2012/27/EU [3]. Съгласно директивата ефективността на инсталациите за комбинирано производство се оценява чрез два показателя - коефициент на обща енергийна ефективност (total CHP system efficiency, брутен КПД) – $\eta_{\text{total. chp}}$, % и икономия на гориво – ΔF , % [2, 3].

Общата енергийна ефективност представлява отношение между сумата на произведената електрическа и топлинна енергия от инсталацията за комбинирано производство към топлинния еквивалент на вложеното гориво за тяхното производство:

$$\eta_{\text{total. chp}} = \frac{P + Q_{\text{chp}}}{F_{\text{chp}}} \cdot 100$$

(1)

където:

P е електрическата енергия, произведена от инсталацията за комбинирано производство, kWh;

Q_{chp} – отпуснатата топлинна енергия от инсталацията за комбинирано производство, kWh;

F_{chp} – вложената с горивото енергия, kWh.

Коефициентът на общата енергийна ефективност не дава пълна представа за съвършенството на топлинния процес на инсталациите за комбинирано производство, защото не винаги високите стойности на общата енергийна ефективност на инсталациите водят до икономия на гориво при производството [1].

Най-пълна оценка за енергийната ефективност на инсталациите за комбинирано производство се получава след определяне на икономията гориво при сравняване на комбинирания с разделния метод за производство на едно и също количество електрическа и топлинна енергия [1, 2]

Икономията на гориво се изчислява от израза:

$$\Delta F = \left(1 - \frac{F_{\text{chp}}}{\frac{P}{\eta_p} + \frac{Q_{\text{chp}}}{\eta_Q}} \right) \cdot 100$$

(2)

където:

η_p - референтната стойност на КПД за производство на електрическа енергия от заместващата инсталация, %;

η_Q - референтната стойност на КПД за производство на топлинна енергия от заместващата инсталация, %.

Референтните стойности за КПД при разделно производство, съгласно Директива 2012/27/EU, зависят от вида на изгаряното в нея гориво и годината на въвеждане в експлоатация на инсталацията за комбинирано производство.

Ефективността на работа на паротурбинната инсталация може да се оцени и със специфичните разходи на условно гориво за производството на електрическа ($b_{\text{el}}^{\text{chp}}$, g/kWh) и топлинна енергия (b_Q^{chp} , g/kWh) [1, 4]. При физическия метод на разпределение на горивото между двата продукта, приет в България, специфичният разход на гориво за производство на топлинна енергия не зависи от параметрите на отпускания топлинен товар. При условно гориво с долна топлина на изгаряне 29330 kJ/kg, специфичният разход на условно гориво за производство на топлинна енергия се определя от израза:

$$b_Q^{\text{chp}} = \frac{0,123}{\eta_Q^{\text{chp}}}$$

(3)

където:

η_Q^{chp} е коефициентът на полезно действие за производството на топлинна енергия на инсталацията за комбинирано производство, %.

Стойността на η_Q^{chp} зависи от ефективността на парогенератора, произвеждащ пара за инсталацията, паропроводите и мрежовия подгревател.

Специфичният разход на условно гориво за производството на електрическа енергия $b_{\text{el}}^{\text{chp}}$ зависи от коефициента на полезно действие за производство на електрическа енергия на инсталацията за комбинирано производство $\eta_{\text{el}}^{\text{chp}}$, чиято стойност се влияе от големината и параметрите на отпускания на потребителите топлинен товар. За определяне на $b_{\text{el}}^{\text{chp}}$ се използва формулата:

$$b_{\text{el}}^{\text{chp}} = \frac{0,123}{\eta_{\text{el}}^{\text{chp}}} \quad (4)$$

За определяне на $\eta_{\text{el}}^{\text{chp}}$ е необходимо да се съставят уравнения за енергиен и материален баланс на когенерационната инсталация.

В настоящото изследване за оценка на енергийната ефективност на инсталацията за комбинирано производство се използва разработения симулационен модел.

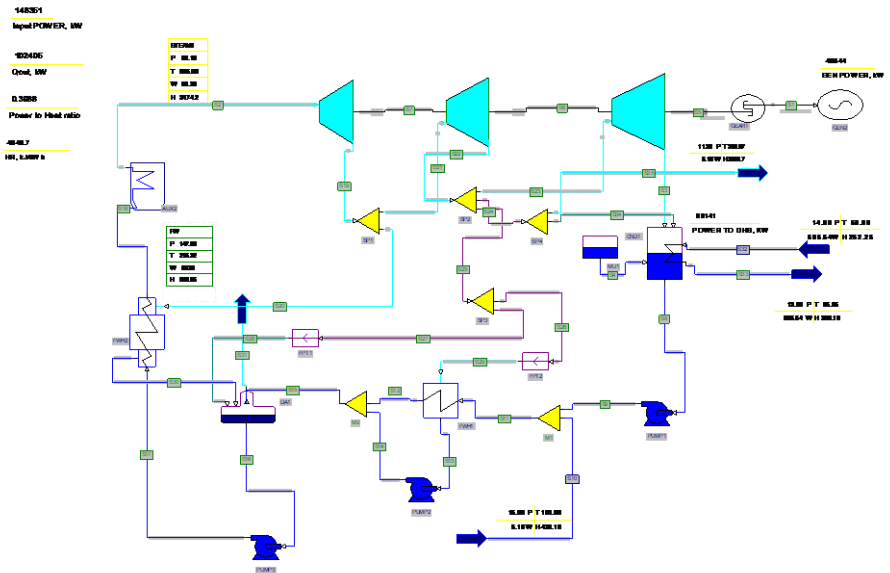
СИМУЛАЦИОНЕН МОДЕЛ НА ПАРОТУРБИННА ИНСТАЛАЦИЯ

Симулационните модели дават възможност да се изследва обектът без да се нарушава неговата цялост. За моделиране на инсталацията за комбинирано производство се използва софтуерният продукт **GateCycle** [5, 6, 7]. Той е удобен инструмент за моделиране топлинния режим на работа на паротурбинната инсталация. Позволява да се изследват различни променливи режими на работа на паротурбинните инсталации за комбинирано производство [8, 9].

Пресмятанията, които се извършват с него, се базират на закона за съхранение и преобразуване на енергията. Софтуерът позволява детайлно разглеждане на поведението на съоръженията, които са съставна част на паротурбинната

инсталация. Програмата дава информация за: налягане, температура и разход на работно вещество (въздух, водна пара, гориво) във всяка една точка от топлинната схема.

Схемата на паротурбинната инсталация за комбинирано производство **SST-300 CE2L/V36S** в средата за симулационно моделиране е показана на фиг.2.



Фиг.2. Симулационна схема на паротурбинна инсталация SST-300 CE2L/V36S

В средата за симулационно моделиране парната турбина е представена като трикорпусна посредством инструментите, с които програмата разполага. Това се налага, за да се моделира работата на регулируемото и нерегулируемото пароотнемане на парната турбина. Границата на първия корпус на турбината в симулационната среда е от нейния вход до нерегулируемото пароотнемане, което захранва ПВН. Параметрите на парата на изхода от първия корпус са начални параметри за втория корпус. Двата корпуса представляват ЧВН на парната турбина. За моделиране на регулируемото пароотнемане се използва елемента SPLITER с един вход и три изхода. Вход за инструмента е изхода на втория корпус. Първият изход е свързан с третия корпус в средата за моделиране, който съответства на

ЧНН на парната турбина. Разходът на пара през него се регулира в зависимост от топлинния товар на консуматорите. Регулируемото пароотнемане се представя с вторият изход, където посредством помощните менюта на софтуера се задава възможност за управление на разхода на пара. Третият изход захранва с пара деаератора на инсталацията и ПНН. Стойността за вътрешния относителен КПД на парната турбина е въведен 84,9 %.

При моделирането на бойлер-кондензатора е зададен допустимият диапазон на изменение на налягането на парата в него и е зададено ограничение на разхода на мрежова вода през него (максимална стойност 650 kg/s). В модела са въведени основните конструктивни особености на бойлер-кондензатора (брой на ходовете, нагревна повърхност, вътрешен и външен диаметър на тръбите и др.).

Началните параметри на парата са съобразени с техническата документация на паротурбинната инсталация (начално налягане $p_0=8,91$ МПа и начална температура $t_0=535$ °С,).

Моделът е проверен за точност чрез извършване на симулационни пресмятания за режими на работа на инсталацията [10]. Резултатите от изчисленията са сравнени със съответните величини от нейната проектна документация. Сравнените параметри са: разход, температура и налягане на свежата пара, налягане и температура на парата в регулируемото пароотнемане, налягане на парата в бойлер-кондензатора, температура на подхранващата вода, генерирана електрическа енергия от паротурбинната инсталация и произведена топлинна енергия в бойлер-кондензатора.

Анализ на работата на паротурбинна инсталация SST-300 CE2L/V36S

Топлинният товар се доставя на потребителите с определен разход G (kg/s) и с определена температура на мрежовата вода (t_1 , °С). Температурата на обратната мрежова вода (t_2 , °С) е резултатна величина от потреблението на топлина в системата за топлоснабдяване и нейната стойност зависи от режима на работа топлоснабдителната система.

В настоящата публикация на основата на разработения симулационен модел се изследва влиянието на температурата на

обратната мрежова вода t_2 и големината на нейното подгриване в бойлер-кондензатора (Δt).

Входните данни за пресмятанията са:

- Максимално натоварване на бойлер-кондензатора 90 MW, като през регулируемото паротнемане на инсталацията не се отпуска топлинна енергия за външни потребители;
- Максимален разход на мрежова вода през бойлер-кондензатора - 650 kg/s;
- Изменение на температурата на мрежовата вода, която постъпва в бойлер-кондензатора от 50 до 60 °C;
- Подгриване на мрежовата вода в бойлер-кондензатора (Δt) от 44 до 50 °C;
- Изменение на налягането на парата в бойлер-кондензатора от 0,040 до 0,25 MPa.

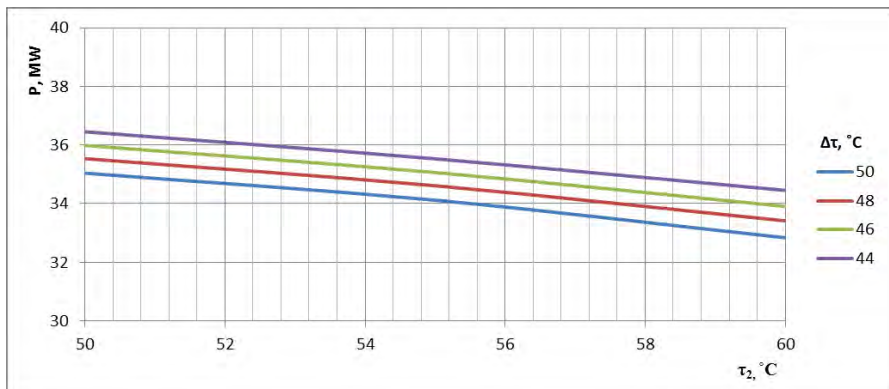
С модела са извършени многовариантни пресмятания.

Получени са резултати за изменението на следните величини:

- Електрическа мощност на инсталацията за комбинирано производство (P , MW);
- Специфичен разход на условно гориво за производство на електрическа енергия ($b_{el.chp}$, g/kWh);
- Обща енергийна ефективност ($\eta_{total.chp}$, %) на инсталацията за комбинирано производство;
- Икономия на гориво от инсталацията при комбинираното производство (ΔF , %).

Резултатите от симулационното пресмятане са представени графично в зависимост от температурата на обратната мрежова вода t_2 , с която тя постъпва към инсталацията за комбинирано производство.

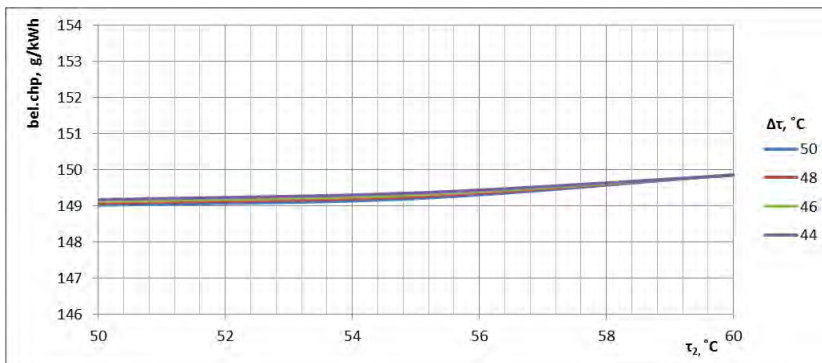
На фиг. 3 е представено изменението на електрическата мощност P на инсталацията за комбинирано производство. Вижда се, че с понижаване на температурата на обратната мрежова вода t_2 , се увеличава електрическата мощност на инсталацията, поради увеличаване на преработвания енталпиен пад от турбината. Същият ефект е налице и при намаляване на подгриването на водата Δt .



Фиг.3. Електрическата мощност на инсталацията за комбинирано производство в зависимост от температурата на обратната мрежова вода и големината на подгряването ѝ в бойлер-кондензатора.

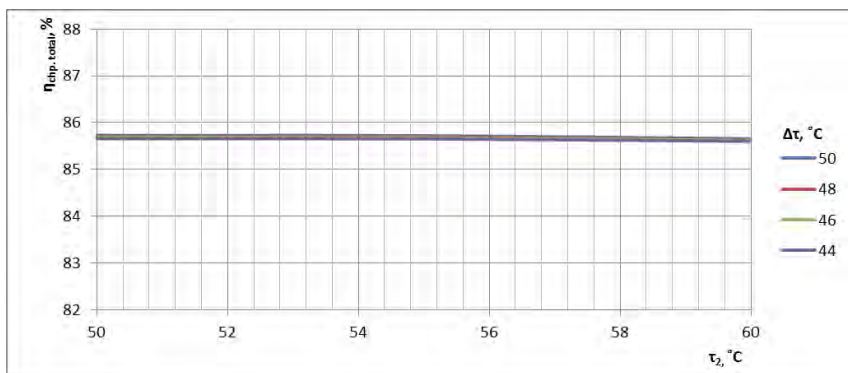
На фиг. 4 са представени резултатите от симулационното изследване за изменението на специфичния разход на условно гориво за производство на електрическа енергия от инсталацията за комбинираното производство в зависимост от температурата на обратната мрежова вода τ_2 . Специфичният разход на условно гориво е определен при 90% кпд на парогенератора и кпд на паропроводите 96%. С понижаване на температурата на постъпващата в бойлер-кондензатора мрежова вода се намалява специфичният разход гориво за производство на електрическа енергия, което се обяснява с увеличеното производство на комбинирана електрическа енергия.

Специфичният разход на гориво за производство на топлинна енергия от инсталацията не се влияе от параметрите на отпускания топлинен товар и е равен на 141 g/kWh. Това е особеност поради използвания у нас физически метод за разпределяне на разходите за гориво между произвежданата топлинна и електрическа енергия в когенерационната инсталация.



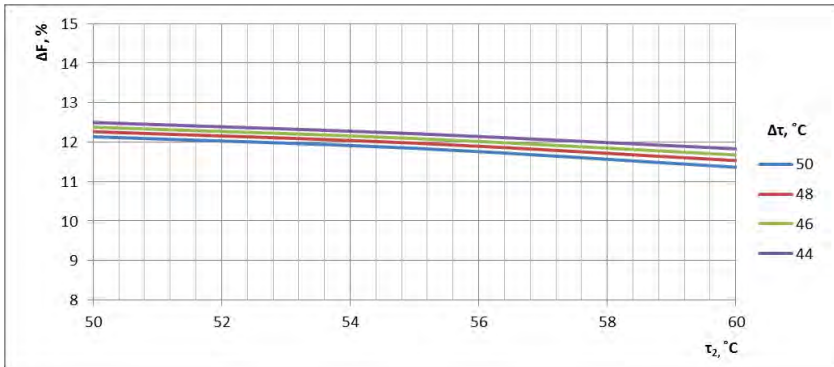
Фиг.4. Специфичен разход на условно гориво за производство на електрическа енергия на инсталацията за комбинирано производство в зависимост от температурата на обратната мрежова вода и големината на подгряването ѝ в бойлер-кондензатора.

Изменението на общата енергийна ефективност на инсталацията в зависимост от температурата на обратната мрежова вода е представено на фиг.5. Вижда се, че общата енергийна ефективност на инсталацията остава непроменена при изменение на температурата и степента на подгряване на обратната мрежова вода в бойлер-кондензатора на инсталацията.



Фиг.5. Обща енергийна ефективност на инсталацията за комбинирано производство в зависимост от температурата на обратната мрежова вода и големината на подгряването ѝ в бойлер-кондензатора.

На фиг. 6 е представено изменението на икономията на гориво ΔF съгласно директива 2012/27/EU. При определянето на икономията на гориво са използвани референтни стойности на КПД за производство на електрическа енергия – 52,5 % и за производство на топлинна енергия – 90 %, които съответстват на използваното в инсталацията гориво природен газ, без да се извършва корекция по температура на външния въздух и без да се отчита консумацията на електрическа енергия за собствени нужди.



Фиг.6. Икономия на гориво на инсталацията за комбинирано производство в зависимост от температурата на обратната мрежова вода и големината на подгряването ѝ в бойлер-кондензатора

От получените резултати се вижда, че икономията на гориво в резултат на когенерационното производство е повече от 10 % в целият интервал на изменение на температурата на обратната мрежова вода и големината на нейното подгряване, поради което съгласно Директива 2012/27/EU произведената електрическа енергия е „високо ефективна“. Икономията на гориво нараства с увеличаване на производството на комбинирана електрическа енергия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В доклада е разработен симулационен модел на противоналегателна паротурбинна инсталация за комбинирано производство тип SST-300 CE2L/V36S. Моделът е валидиран като

е извършено сравнение на резултатите от два режима на работа с величините от проектната документация на турбината.

Със симулационният модел е извършен анализ на енергийната ефективност на паротурбинната инсталация при номинално топлинно натоварване на бойлер-кондензатора (90 MW), в зависимост от изменението на температурата на мрежова вода (от 50 до 60 °C) постъпваща в бойлер-кондензатора и големината на нейното подгриване в него (от 44 до 50 °C).

Получените резултати показват, че показателите на енергийна ефективност на инсталацията за комбинирано производство се подобряват с понижаване на температурата на обратната мрежова вода, която постъпва в бойлер-кондензатора. Същата закономерност е налице и при намаляване на нейното подгриване.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов Е. Я. *Теплофикация и тепловые сети*. - М., Энергоиздат. 2001
2. *Catalog of CHP Technologies*, U.S. EPA, (2017).
3. *Directive 2012/27/EU*.
4. . T. Al-Shemmeri, R. Beith, "Thermodynamics, performance analysis and computational modelling of small and micro combined heat and power (CHP) systems", ed: Woodhead Publishing, 42-69, (2011)
5. Ангелов Б., К. Тодоров, В. Раденков, "Моделни изследвания на предложение за нова конструкция на въглищен инерционен сепаратор на котли тип ПК 38-4", XIX-та Научна Конференция с международно участие ЕМФ 2014, ISSN 1314-5371, Том I, стр. 27-34, (14 – 17) септември 2014, Созопол;
6. Ангелов Б., Т. Тотев, „Осигуряване качеството на автоматизирани системи, чрез прилагане на процедура QAL2 съгласно стандарт БДС EN 14181:2015”, сп. „Машиностроене и машинознание”, ISSN 1312-8612, год. XV,

- кн.1, стр. 27-32, Национален комитет по теория на механизмите и машините, 2020.
7. Ангелов Б., К. Тодоров, В. Раденков, "Моделни изследвания на възлищен инерционен сепаратор, част от прахоприготвящата система на котли в „ТЕЦ Марица Изток 2“, XIX-та Научна Конференция с международно участие ЕМФ 2014, ISSN 1314-5371, Том I, стр. 17-26, (14 – 17) септември 2014, Созопол
 8. T. Totev, B. Ignatov and V. Radenkov, "Hydrogen as a Fuel in CCGT," 2022 14th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), Varna, Bulgaria, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/BulEF56479.2022.10021151.
 9. T. Totev, B. Ignatov, V. Radenkov and M. Zlateva, "Reducing the CO₂ Emissions from Coal Combustion in a Power Unit by Using Absorption Chillers," 2022 14th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), Varna, Bulgaria, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/BulEF56479.2022.10020195.
 10. I. Genovski, K. Hristov, "Model research of the energy efficiency of a cogeneration backpressure steam turbine installation" E3S Web Conf. 207 02004 (2020), DOI: 10.1051/e3sconf/202020702004

АВТОР:

гл. ас. д-р инж. Каляоян Христов Христов, Технически университет-София тел. 0893690182,
k.hristov@tu-sofia.bg.