

ЕНЕРГИЕН ФОРУМ 2019

МАТЕМАТИЧЕСКО МОДЕЛИРАНЕ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКАТА МОЩНОСТ НА ПРОТИВОНАЛЕГАТЕЛНА ПАРОТУРБИННА ИНСТАЛАЦИЯ

Иван Геновски, Калоян Христов

MATHEMATICAL MODELING OF ELECTRICITY POWER ON BACKPRESSURE STEAM TURBINE

Ivan Genovski, Kaloyan Hristov

Summary

The electrical power of steam turbine cogeneration systems depends on the size of the heat load released, the temperature inlet water temperature district heat exchanger (boiler-condenser) and the water flow through it. This report aims to develop a mathematical model for the determination of the electrical power of backpressure steam turbine PR-66-130/10 based on a developed simulation model and multivariate calculations using the computer code - GateCycle.

Комбинирано производство на електрическа енергия

Системите за централизирано топлоснабдяване включват източник на топлина, топлопреносна мрежа и топлинни потребители. В повечето случаи в една енергопреобразуваща инсталация се реализира когенерационно производство. При него в източника на топлина се изгаря органично гориво (най-често природен газ) и отделената топлина се използва за производство на електрическа и топлинна енергия. Загрялата мрежовата вода чрез топлопреносна мрежа доставя топлинна енергия до потребителите. В сравнение с разделния метод на производство на топлинна и електрическа енергия, комбинираният метод дава възможност за по-ефективно използване на енергийните ресурси [4, 7].

Комбинираното производството на топлинна и електрическа енергия се осъществява най-често или чрез паротурбинни инсталации с регулируеми пароотнемания или чрез противоналегателни паротурбинни инсталации.

Инсталациите с регулируеми пароотнемания произвеждат електри-

ческа енергия на базата топлинно потребление на консуматорите по комбиниран метод, както и по кондензационен метод. Енергията, получена чрез пара отпусната от регулируемите пароотнемания се счита за произведена по комбиниран метод, а енергията получена чрез пара, постъпила в кондензатора по кондензационен метод. Специфичният разход на гориво за производството на електрическа енергия по кондензационен метод е по-висок в сравнение с комбинирания метод. Следователно, икономичността на инсталациите с регулируеми пароотнемания нараства с увеличаване на дяла на електрическата енергия, получена на базата топлинно потребление (комбиниран метод).

Произведената електрическа енергия при противоналегателните паротурбинни инсталации зависи изцяло от отпускания топлинен товар на потребителите. При тях липсва производство на електрическа енергия по кондензационен метод, което ги прави по-икономични в сравнение с инсталациите с регулируеми пароотнемания. Генерирането на топлинна енергия се осъществява чрез парата, която постъпва в бойлер-кондензатор след последното стъпало на паротурбинната инсталация. Електрическата мощност на инсталацията зависи от големината на топлинния товар за потребителите, температурата и разхода на мрежова вода на топлоснабдителната система [3].

Настоящият доклад има за цел съставянето на математически модел за определяне на електрическата мощност на противоналегателна паротурбинна инсталация за комбинирано производство като се приложи симулационно моделиране.

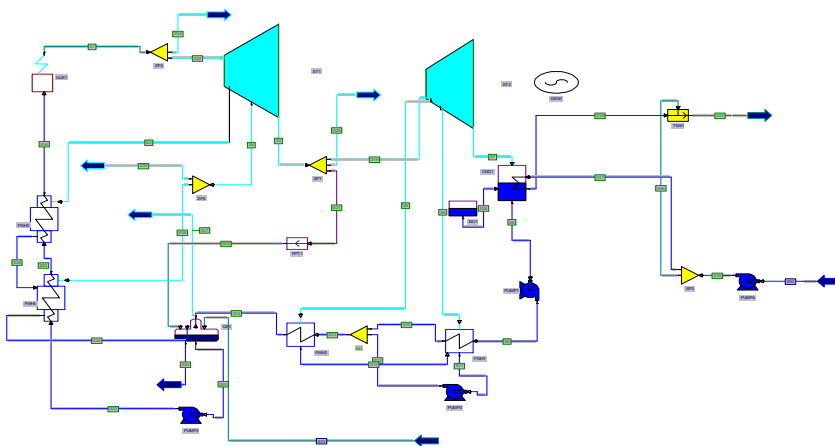
Широко приложение за симулационно моделиране на енергийни обекти намира софтуерният продукт *GateCycle*, който позволява изследване на котелната и паротурбинната инсталация при различни експлоатационни режими [2].

Симулационен модел на противоналегателна паротурбинна инсталация

Със софтуерния продукт за симулационно моделиране *GateCycle* е разработен модел на паротурбинната инсталация ПР-66-130/10. Тя е промишлено-противоналегателна турбина с максимална електрическа мощност 66 MW на клемите на генератора и максимална топлинна мощност 130 MW на бойлер-кондензатора, чрез който се отпуска топлина за топлоснабдителната система.

Парната турбина се състои от част високо налягане и част ниско налягане. Налягането в бойлер-кондензатора се изменя в интервала $0,10 \div 0,25$ МПа. Налягането на кондензация на парата в бойлер-кондензатора зависи от големината на отпускания топлинен товар, температурата и разхода на мрежова вода. Бойлер-кондензаторът има нагревна повърхност 2200 m^2 . Максималният разход на мрежова вода през него е 722 kg/s , а максималната температура на водата на входа в него е $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Турбината има промишлено регулируемо пароотнемане, чрез което може да се отпусна пара за индустриални топлинни консуматори с налягане на парата от $0,80$ до $1,30$ МПа. Регенеративното подгръване на основния кондензат се извършва в четири подгревателя и деаератор с пара от регулируемото пароотнемане и още четири нерегулируеми пароотнемания. Два от подгревателите са с ниско налягане и два с високо налягане. Деаераторът за основния кондензат работи при налягане $1,08$ МПа.

Топлинна схема на паротурбинна инсталация ПР-66-130/10, изразена чрез софтуерния продукт GateCycle е представена на фиг.1



Фиг.1. Топлинна схема на паротурбинна инсталация ПР-66-130/10, изразена чрез софтуерния продукт **GateCycle**

Софтуерът позволява всеобхватно разглеждане на режима на работа на съоръженията от топлинната схема на инсталацията за комбинирано производство. Програмата може да извежда информация за ха-

рактерни параметри (налягане, температура и разход на пара и вода) във всяка една точка от топлинната схема. При моделиране на съоръженията се въвеждат геометрични параметри и величини, характеризирани тяхната работа, както логическата схема на свързаност с останалите елементи. Пресмятанията в програмата се базират на закона за съхранение и преобразуване на енергията.

Входните данни, които се въвеждат, са: началното налягане p_0 и температурата t_0 на парата, разхода на пара на входа на турбината D_0 и относителния вътрешен КПД η_{oi} . Нерегулируемите пароотнемания на парната турбина са свързани със съоръженията (подгреватели ниско, високо налягане, деаератор), потребляващи пара от симулираната технологична схема.

За определяне на налягането в нерегулируемите пароотнемания при променливи режими на работа се използва зависимостта на Флюгел-Стодола:

$$\frac{D_i}{D_0} = \sqrt{\frac{P_{i1}^2 - P_{i2}^2}{P_{i0}^2 - P_{i1}^2}} \quad (1)$$

където: p_{i1} и p_{i2} са съответно налягането пред и след турбинното стъпало или група турбинни стъпала при разход на пара D_i , kPa;

p_{i0} и p_{i1} са съответно налягането пред и след турбинното стъпало или група турбинни стъпала при изчислителния разход на пара D_0 , kPa.

При изчисление на режимите на работа на теплообменен апарат (паро-воден или водо-воден) програмата GateCycle използва следното балансово уравнение:

$$Q = D \cdot (h - h'') \cdot \eta_p = G \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1) = k \cdot F \cdot \Delta t \quad (2)$$

където: D е разходът на пара за подгревателя, kg/s;

h и h'' - енталпията на парата и на нейния кондензат, kJ/kg;

G - разходът на вода през подгревателя, kg/s;

t_1 и t_2 - началната и крайната температура на подгръваната вода в паро-водния подгревател, °C;

η_p - коефициент, отчитащ топлинните загуби на подгревателя;

k - коефициентът на теплопреминаване за подгревателя,

$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$;

F - нагревната повърхност на подгревателя, m^2 .

Δt - средният температурен напор, $^\circ C$

При симулиране на работата на кондензатора се задават: нагревната повърхност, броят на ходовете, вътрешният и външният диаметър на тръбите на неговата повърхност, материалът на тръбите. При анализа на променливите режими на работа е необходимо да се въведе номиналното налягане на парата в кондензатора пара и параметрите на охлаждащата вода (разход и температура).

Коефициентът на топлопреминаване k , за променливите режими на работа на кондензатора, се определя от зависимостта:

$$k = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4 \cdot \sqrt{v} \quad (3)$$

където: C_1 е корекционен коефициент, отчитащ външния диаметър на тръбите на кондензатора;

C_2 – корекционен коефициент, отчитащ температурата на охлаждащата вода на входа на кондензатора;

C_3 – корекционен коефициент, отчитащ вида на материала на тръбите на кондензатора;

C_4 – корекционен коефициент, отчитащ замърсеността на толообменната повърхност на кондензатора;

v – скорост на движение на охлаждащата вода в тръбите на кондензатора, m/s .

При моделиране на деаератора се задава налягането в него, а разходът на пара се определя от уравнението на топлинния баланс:

$$(D_{п} h_{п} + D_{ок} h_{ок} + \sum_i D_i h_i) \eta_{д} = D_{пв} h_{пв} + \sum_j D_j h_j \quad (4)$$

където: $D_{п}$, $h_{п}$ са съответно разходът (kg/s) и енталпията (kJ/kg) на парата за деаератора;

$D_{ок}$, $h_{ок}$ - разходът (kg/s) и енталпията (kJ/kg) на основния кондензат;

$D_{пв}$, $h_{пв}$ - разходът (kg/s) и енталпията (kJ/kg) на подхранващата вода;

D_i , h_i - разходът (kg/s) и енталпията (kJ/kg) на i -та постъпваща в деаератора среда;

D_j, h_j - разходът (kg/s) и енталпията (kJ/kg) на j -та постъпваща в деаератора среда;

η_d – коефициентът на полезно действие на деаератора.

Разработеният симулационен модел на паротурбинната инсталация е валидиран с данни от техническата документация [5]. Разликата между изчислените и паспортните величини се отклонява максимално 5 %.

Математическо моделиране на електрическата мощност на противоналегателна паротурбинна инсталация ПР-66-130/10

Електрическата мощност на противоналегателната паротурбинна инсталация зависи от изменението температурата на мрежовата вода на входа на бойлер-кондензатора τ_2 , разхода на мрежова вода през него G и големината на топлинния товар за топлоснабдителната система Q_T [6].

За прогнозиране на електрическата мощност (\hat{N} , MW) се използва уравнение от втора степен:

$$\hat{N} = b_0 + b_1 Q_T + b_2 \tau_2 + b_3 G + b_{11} Q_T^2 + b_{22} \tau_2^2 + b_{33} G^2 + b_{123} Q_T \tau_2 G \quad (5)$$

където: $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{123}$ – коефициентите на уравнението.

Коефициентите на уравнението се определят след статистическа обработка на данни, които се получават от симулационно изследване на различни режими на работа на паротурбинната инсталация.

Температурата на мрежовата вода на входа на бойлер-кондензатора (τ_2) е нерегулируема величина за инсталацията за комбинирано производство. Тя зависи от потреблението на топлинна енергия в системата за топлоснабдяване.

Топлинният товар (Q_T) и разходът на мрежова вода (G) са регулируеми величини за топлоснабдителната система. Ако се изменя температурата на мрежовата вода на изхода от бойлер-кондензатора, а разходът на мрежова вода през него се поддържа постоянен, то регулирането е качествено. Днес се прилага смесено регулиране, при което се изменят температурата на мрежовата вода τ_1 и разходът на мрежова вода G [1].

Съставяне на математическия модел

За съставяне на математическия модел (5) се използват данни от симулационно изследване на работа на паротурбинната инсталация. За цял симулационния модел е решен многократно при следните условия:

- изменение на топлинния товар - от 80 до 130 MW;
- изменение температурата на мрежовата вода на входа на бойлер-кондензатора в интервала - от 50 до 70 °C;
- изменение на разхода на мрежова вода - от 380 kg/s до максималния 722 kg/s.

Получените резултатите от извършените пресмятания за режимите на работа на паротурбинната инсталация са представени в табл.1.

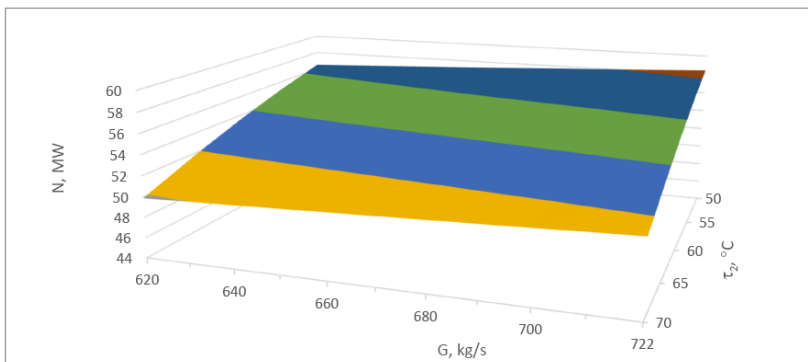
Табл. 1. Резултати от симулационното изследване

	Q _T , MW	τ ₂ , °C	G, kg/s	N, MW
1	130,0	70	617,7	49,1
2	130,0	70	643,6	49,7
.....				
198	80,0	50	397,7	35,5

Въз основа на данните от Табл.1 са определени коефициентите на математическия модел и уравнението за определяне на електрическата мощност придобива вида:

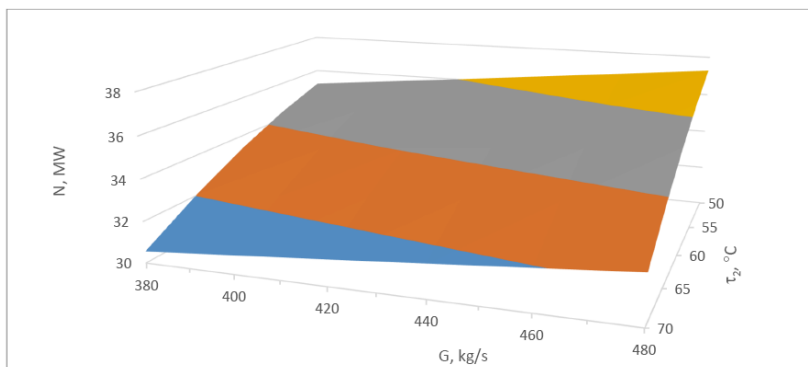
$$\hat{N} = -6,4526 + 0,3336 \cdot Q_T + 0,3576 \cdot \tau_2 + 0,0228 \cdot G + 0,2334 \cdot 10^{-3} \cdot Q_T^2 - 0,4420 \cdot 10^{-2} \tau_2^2 + 6,7060 \cdot 10^{-6} G^2 - 1,9728 \cdot 10^{-6} \cdot Q_T \cdot \tau_2 \cdot G \quad (6)$$

Коефициентът на множествена корелация на регресионното уравнение е R=0,99. Съгласно критерия на Фишер, коефициентът R е значим (F=1749,95, F(α,ν₁,ν₂)= 3,253) и математическият модел може да се използва за определяне на електрическата мощност на паротурбинната инсталация в зависимост от изменението на топлинния товар и температурата и разхода на мрежовата вода на входа на бойлер-кондензатора.



Фиг.2. Изменение на електрическата мощност на паротурбинната инсталация при топлинен товар $Q_m = 130 \text{ MW}$ в зависимост от разхода на мрежова вода G и нейната температура τ_2 на входа в бойлер-кондензатора.

На фиг.2 и фиг.3 е представено изменението на електрическата мощност на паротурбинната инсталация в зависимост от разхода G и температурата на мрежова вода τ_2 при максимален и минимален топлинен товар. Фиг.2 показва изменението на електрическата мощност при топлинен товар за топлоснабдителната система 130 MW, а фиг. 3 показва изменението на електрическата мощност при 80 MW.



Фиг.3. Изменение на електрическата мощност на паротурбинната инсталация при топлинен товар $Q_m = 80$ в зависимост от разхода на мрежова вода G и нейната температура τ_2 на входа в бойлер-кондензатора.

От получените резултати се вижда, че с увеличаване на топлиния

товар и понижаване на температурата на мрежовата вода, електрическата мощност на инсталацията за комбинирано производство нараства. Повишение на електрическата мощност се наблюдава и при увеличаване на разхода на мрежова вода през бойлер-кондензатора, което се обяснява с увеличаването на разполагаемия енталпиен пад.

Когато инсталацията генерира максималния топлинен товар, понижаване на температурата на мрежовата вода постъпваща в инсталацията с $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, води до увеличаване на електрическата мощност с около $0,360\text{ MW}$. При отпускане на минималния топлинен товар от 80 MW , нарастването на електрическата мощност е $0,230\text{ MW}$.

Заключение

В доклада е представен разработеният симулационен модел на противоналегателна паротурбинна инсталация ПР-66-130/10. Моделът е валидиран с данни от техническата документация. Със симулационния модел е извършено изследване на режими на работа на паротурбинната инсталация. Получените резултати са използвани за съставяне на математически модел, който е проверен за точност.

Математическият модел е използван за прогнозиране на електрическия товар на инсталацията за комбинирано производство при известен топлинен товар на потребителите, температура и разход на мрежовата вода на входа на бойлер-кондензатора.

Литература

[1] Бонев Б, Актуална проблематика на българската енергетика., „Енергиен форум – предизвикателства към българската енергетика“, София, стр. 84-89, 2018

[2] Григоров Ал., Т. Тотев, Б. Бонев, Симулационен модел на паротурбинна инсталация К-165-130, XII-та Научна Конференция с международно участие – ЕМФ '2007, ISSN 1314-5371, 16-18 септември 2007, „Св. св. Константин и Елена“, том 1, стр. 9-16;

[3] Григоров А., Енергийна ефективност на комбинирано топло и електропроизводство с използване на парна турбина с противоналягане, XIII НК “ЕМФ’2008”, т. I, стр. 145-154, Созопол, 17-19.09.2008.

[4] Сотиров Н., Т. Тотев, Б. Бонев, Финансов анализ на инвестиционни варианти за внедряване на система за комбинирано топло и електро производство в индустриално предприятие, XIV-та Научна Конфе-

рeнция с международно участие ЕМФ '2009, ISSN 1314-5371, 17–20 септември 2009, Созопол, Том 1, стр. 70-75;

[5] Христов К., Ив. Геновски, „Оценка на икономията на гориво при паротурбинни инсталации за комбинирано производство на основата на симулационно моделиране“, XVIII Научна конференция с международно участие ЕМФ 2013, Созопол 2013

[6] Alexander Grigorov, Comparative Analysis between Single- and Two-stage District Water Heating by Backpressure Steam Turbine, International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR) (2016) ISSN 2307-4531, Volume 27, No 1, pp 187-198.

[7] Mohamed Q. Jabbar, Boncho Bonev, Alexander Grigorov “Simulation calculation of Al Anbar combined power plant”, “Thermal Engineering”, Vol. 7, ISSN 1314-2550, pp.49-52, Varna, Bulgaria, 2014

Автори:

доц. д-р инж. Иван Кирилов Геновски, Технически Университет – София, катедра Топлоенергетика и ядрена енергетика, тел. 02/9652247, genovski@tu-sofia.bg

д-р инж. Калоян Христов Христов, „Топлофикация София“ ЕАД тел. 0893690182, korzy@abv.bg.