

УДК 621.311

**ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ТЕПЛОВОГО КОНТУРУ КОГЕНЕРАЦІЙНОЇ
ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ПРИ ЗМІНІ ЇЇ
ЕЛЕКТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ**
**INVESTIGATION OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF
THE COGENERATION POWER PLANT THERMAL CIRCUIT WITH
CHANGING ELECTRICAL LOAD.**

**Оборський Г.О., д-р техн. наук, професор, Бундюк А.М., канд. техн. наук, професор
Одеський національний політехнічний університет
Oborskiy G.O., Bundyuk A.M.
Odessa National Polytechnic University**

Copyright © 2019 by author and the journal «Scientific Works»
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

DOI <https://doi.org/10.15673/swonaft.v2i83.1523>

Анотація. Когенераційна енергетична установка (КЕУ) включає два технологічних контури: контур генерації електричної енергії і контур генерації теплової енергії. Залежно від зовнішнього споживача електричного навантаження КЕУ може переходити на режими експлуатації з частковими навантаженнями. Перехід когенераційної установки на режими часткових електричних навантажень призводить до зміни технологічних параметрів і динамічних характеристик установки. Метою роботи є проведення моделювання та аналізу динамічних властивостей теплового контуру КЕУ при зміні електричного навантаження в діапазоні 100% - 50% і визначення динамічних характеристик теплового контуру для кожного з навантажень. Для опису динамічних властивостей газо-водяного поверхневого теплоутилізатора, водо-водяного підігрівача опалення і гарячого водопостачання, що входять в тепловий контур КЕУ, отримано математичну модель, що складається з дев'яти диференціальних рівнянь першого порядку. Динаміка теплообмінних апаратів описуються диференціальними рівняннями для гріючого середовища, для середовища, що нагрівається і для металу стінки трубок теплообмінника. Аналіз динамічних характеристик елементів теплового контуру показав їх суттєву зміну при зниженні електричного навантаження когенераційної енергетичної установки до 50%. Зі зниженням електричного навантаження по всіх каналах спостерігається зростання значень постійних часу і часу запізнювання і зниження значень коефіцієнтів передачі. Це свідчить про зростання інерційності в контурі і зниження збурюючих впливів на вихідні параметри. Чим нижче електричне навантаження, тим менш ефективним буде регулюючий вплив на регульований параметр.

Abstract. The cogeneration power plant (CPP) has two technological circuits: the circuit of electric energy generation and the circuit of thermal energy generation. Depending on the external consumer, the CPP may switch to partial load modes. The transition of the cogeneration unit to the modes of partial electrical loads leads to a change in technological parameters and dynamic characteristics. The purpose of the work is to perform modeling and analysis of the dynamic properties of the CPP thermal circuit during the electrical load change in the range of 100...50 %. A mathematical model consists of nine first order differential equations, which describe the dynamic properties of a gas-water surface heat utilizer, a water-water heater and hot water heater. The dynamics of heat exchangers are described by differential equations for the heating medium, for the heated medium, and for the metal of the wall of the heat exchanger tubes. The analysis of the dynamic characteristics of the thermal circuit elements showed their significant change while reducing the electrical load of the cogeneration power plant by up to 50 %. With the decrease of electrical load on all channels, there is an increase in the values of the constant time and delay time and the decrease in the values of the transmission coefficients. This indicates an increase in inertia in the circuit and a decrease in the influence on the parameters of disturbing influences. The lower the electrical load, the less effective the regulating effect on the adjustable parameter.

Ключові слова: когенераційна енергетична установка; тепловий контур; часткові електричні навантаження; динамічні характеристики; перехідні процеси

Keywords: cogeneration power plant; thermal circuit; partial electrical loads; dynamic characteristics; transitional processes

Вступ. Впровадження енергозберігаючих технологій обґрунтовано постійним зростанням цін на традиційні джерела енергії, до того ж їх запаси обмежені. За даними експертів запаси природного газу виснажаться приблизно через 50...60 років [1].

Перспективним напрямком розвитку «малої енергетики» є застосування когенераційних енергетичних установок (КЕУ). Відомо, що роздільне виробництво теплової та електричної енергії менш ефективно, ніж комбіноване. При комбінованому виробництві теплову енергію отримують за рахунок тепла відхідних газів теплового двигуна когенераційної установки, в той час як при роздільній генерації це тепло втрачається [2]. На 1 МВт електричної потужності когенераційна установка дозволяє отримати від 1 до 2 МВт теплової потужності. У літній період зайве тепло можливо перенаправляти в абсорбційну установку для виробництва холоду [3-5].

Когенераційна енергетична установка включає два технологічних контури: контур генерації електричної енергії і контур генерації теплової енергії. Залежно від зовнішнього споживача електричної енергії КЕУ може переходити на режими експлуатації з частковими навантаженнями. Перехід когенераційної установки на режими часткових електричних навантажень призводить до зміни технологічних параметрів і динамічних характеристик установки. Внаслідок чого, з'являється необхідність дослідження динамічних властивостей теплового контуру когенераційної енергетичної установки при роботі на режимах часткових електричних навантажень в діапазоні від 100% до 50%. Відомі дослідження динамічних властивостей когенераційної енергетичної установки при роботі на номінальному режимі генерації електричної і теплової енергії, тобто при режимі 100% і малого відхиленні від нього [6,7]. Однак режими роботи теплового контуру енергетичної установки при зниженні електричного навантаження до 75% ÷ 50% вимагають проведення додаткових досліджень. Виходячи з вищенаведеного, вивчення динамічних властивостей теплового контуру КЕУ при роботі на часткових електричних навантаженнях, відмінних від номінального, є актуальним завданням.

Метою даної роботи є проведення моделювання та аналіз динамічних властивостей теплового контуру КЕУ при зміні електричного навантаження в діапазоні 100...50 % і визначення динамічних характеристик теплового контуру для кожного з навантажень.

Виклад основного матеріалу. Для аналізу динамічних властивостей теплового контуру когенераційної енергетичної установки необхідно досліджувати динамічні характеристики всіх елементів, що входять в контур. Принципова схема теплового контуру КЕУ представлена на рис. 1. Основними елементами схеми є: газо-водяний поверхневий теплоутилізатор (ТУ), який відбирає теплоту відхідних газів від газової турбіни; водо-водяні підігрівачі опалення (ПО) і гарячого водопостачання (ПГВ); змішувальні колектори (К1, К2) і мережевий насос (Н).

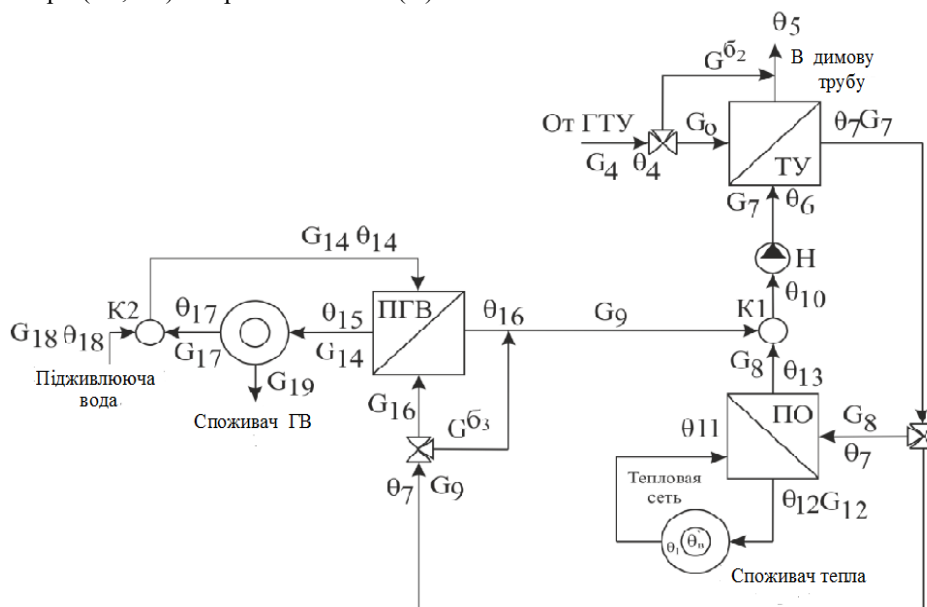


Рис. 1 – Принципова схема теплового контуру КЕУ

У схемі прийняті наступні позначення параметрів:

G_4, θ_4 - витрата і температура відхідних газів після газової турбіни, відповідно, (кг/с, °C); G^O, G^{B2} - витрата димових газів ТУ і байпас, (кг/с); G_5, θ_5 - витрата і температура газів після ТУ, відповідно, (кг/с, °C); G_7, G_8, G_9 - витрати води, що нагрівається після ТУ, (кг/с); G_{11}, G_{12} - витрати води в тепловій мережі опалення, (кг/с); G_{14}, G_{17}, G_{19} - витрати води в мережі гарячого водопостачання (ГВП), (кг/с); G_{18}, θ_{18} - витрата і температура підживлювальної води, відповідно, (кг/с, °C); G^{62}, G^{63} - витрати гріючої води в байпасних лініях, (кг/с), в даній статті байпаси закриті.

Відпрацьовані гази після газової турбіни з витратою G_4 і температурою θ_4 направляються в теплоутилізатор, де є гріючим теплоносієм. Байпас ТУ застосовується з метою зниження теплової потужності газового потоку через теплоутилізатор при підвищенні температури навколишнього середовища і температури води, що нагрівається після ТУ. Гази після ТУ направляються в димову трубу з температурою θ_5 . В ТУ вода з витратою G_7 і температурою θ_6 підігрівається до температури θ_7 . Нагріта вода паралельними потоками направляється в підігрівачі опалення та гарячого водопостачання. Витрата води через ПО дорівнює $G_8 = 64\% G_7$, а в ПГВ - дорівнює $G_9 = 36\% G_7$. Після ПО і ПГВ потоки гріючого теплоносія змішуються в колекторі К1, а потім через мережвий насос (Н) подаються назад в теплоутилізатор. Вода з теплової мережі опалення з температурою θ_{11} підігрівається в ПО до температури θ_{12} . У споживача тепла температура води дорівнює θ_v , а температура навколишнього середовища дорівнює θ_1 . У мережу ГВП надходить нагріта в ПГВ вода з витратою G_{14} і температурою θ_{15} . Від споживача гаряча вода з витратою G_{17} і температурою θ_{15} надходить в колектор К2, де змішується з підживлювальною водою, необхідною для стабілізації витрати води в мережі ГВП. Витрата підживлювальної води G_{18} повинна забезпечити сталість витрати теплоносія, що циркулює в мережі ГВП, тобто $G_{18} + G_{17} = G_{14}$. Динаміка мережі ГВП в цій статті не розглядається.

Для аналізу динамічних властивостей теплового контуру КЕУ використані математичні моделі динаміки, представлені в [7]. Відомо, що динамічні властивості теплообмінного апарату описуються трьома диференційними рівняннями: для гріючого середовища, для середовища, що нагрівається і для металу стінки трубок теплообмінника [8]. Таким чином, для опису динамічних властивостей трьох теплообмінних апаратів, що входять в тепловий контур КЕУ ми отримуємо математичну модель, що складається з 9 диференційних рівнянь першого порядку. Отримана система диференційних рівнянь приведена нижче.

$$\left\{ \begin{array}{l} H^{ty} \Delta \theta'_5 + \Delta \theta_5 = h_1^{ty} \Delta G_4 + h_2^{ty} \Delta \theta_4 - h_3^{ty} \Delta \theta_{ст}^{ty}; \\ C^{ty} \Delta \theta'_7 + \Delta \theta_7 = c_1^{ty} \Delta \theta_6 + c_2^{ty} \Delta \theta_{ст}^{ty}; \\ R^{ty} \theta'_{ст}^{ty} + \Delta \theta_{ст}^{ty} = r_1^{ty} \Delta \theta_4 + r_2^{ty} \Delta \theta_5 - r_3^{ty} \Delta \theta_6 - r_4^{ty} \Delta \theta_7; \\ H^{no} \Delta \theta'_{13} + \Delta \theta_{13} = h_1^{no} \Delta G_8 + h_2^{no} \Delta \theta_7 - h_3^{no} \Delta \theta_{ст}^{no}; \\ C^{no} \Delta \theta'_{12} + \Delta \theta_{12} = c_1^{no} \Delta G_{11} + c_2^{no} \Delta \theta_{11} + c_3^{no} \Delta \theta_{ст}^{ty}; \\ R^{no} \theta'_{ст}^{no} + \Delta \theta_{ст}^{no} = r_1^{no} \Delta \theta_7 + r_2^{no} \Delta \theta_{13} - r_3^{no} \Delta \theta_{11} - r_4^{no} \Delta \theta_{12}; \\ H^{pnb} \Delta \theta'_{16} + \Delta \theta_{16} = h_1^{pnb} \Delta G_9 + h_2^{pnb} \Delta \theta_7 - h_3^{pnb} \Delta \theta_{ст}^{pnb}; \\ C^{pnb} \Delta \theta'_{15} + \Delta \theta_{15} = c_1^{pnb} \Delta G_{14} + c_2^{pnb} \Delta \theta_{14} + c_3^{pnb} \Delta \theta_{ст}^{pnb}; \\ R^{pnb} \theta'_{ст}^{pnb} + \Delta \theta_{ст}^{pnb} = r_1^{pnb} \Delta \theta_7 + r_2^{pnb} \Delta \theta_{16} - r_3^{pnb} \Delta \theta_{14} - r_4^{pnb} \Delta \theta_{15}. \end{array} \right. \quad (1)$$

Всі диференційні рівняння, що входять в систему рівнянь, були лінеаризовані шляхом розкладання рівнянь статички в ряд Тейлора і дійсні у діапазоні малих відхилень від номінального режиму роботи КЕУ.

Дану систему диференційних рівнянь слід доповнити алгебраїчними рівняннями зв'язку для визначення температур теплоносія після змішувальних колекторів К1 і К2, а також після насосу Н.

Зміну температури води після колектора К1 може бути визначено з виразу:

$$\Delta \theta_{10} = z_1 \Delta G_8 + z_2 \Delta \theta_{13} + z_3 \Delta G^{63} + z_4 \Delta \theta_7 + z_5 \Delta G_9 + z_6 \Delta \theta_{16} \quad (2)$$

Зміна температури води після колектора К2 визначається наступним чином:

$$\Delta \theta_{14} = k_1 \Delta G_{17} + k_2 \Delta \theta_{17} + k_3 \Delta G_{18} + k_4 \Delta \theta_{18} \quad (3)$$

Зміну температури води після насоса можна визначити за формулою (4):

$$\Delta\theta_6 = a\Delta\theta_{10} \tag{4}$$

Для проведення моделювання та аналізу динамічних властивостей теплового контуру КЕУ були прийняті наступні значення технологічних параметрів установки:

- розрахункове теплове навантаження теплоутилізатора $Q_{TV}^p = 3500$ кВт ;
- температура газів після газової турбіни на вході ТУ $\theta_4 = 584$ °С ;
- температура відхідних газів після теплоутилізатора $\theta_5 = 170$ °С ;
- температура води, що нагрівається, на вході теплоутилізатора $\theta_6 = 70$ °С ;
- температура води, що нагрівається, на виході теплоутилізатора $\theta_7 = 100$ °С .

При проведенні розрахунків і досліджень динамічних властивостей теплового контуру КЕУ були прийняті наступні допущення: 1) всі об'єкти, що входять в тепловий контур КЕУ розглядаються як об'єкти з зосередженими параметрами; 2) змінами таких параметрів теплоносіїв, як густина, теплоємність і температура газів після турбіни на вході ТУ можна знехтувати; 3) в початковий момент часу всі елементи теплового контуру КЕУ знаходяться в сталому режимі і зміни їх технологічних параметрів дорівнюють нулю.

До зовнішніх впливів теплового контуру відносяться:

- зміна витрати газів через ТУ (ΔG_4 , кг/с);
- зміна температури води на виході з теплової мережі опалення ($\Delta\theta_{11}$);
- зміна температури води на виході з мережі ГВП ($\Delta\theta_{14}$);
- зміна температури зовнішнього повітря ($\Delta\theta_1$).

До внутрішніх впливів теплового контуру відносяться:

- зміна витрати гріючої води через ПО (ΔG_8 , кг/с);
- зміна витрати гріючої води через ПГВ (ΔG_9 , кг/с);
- зміна температури води на виході ТУ ($\Delta\theta_7$).

На підставі диференціальних і алгебраїчних рівнянь, що представляють математичну модель теплового контуру, була запропонована комп'ютерна схема моделі, розроблена О.С. Тарахтій (рис. 2).

Дана схема містить в собі по три моделі для кожного з теплообмінних апаратів, що входять в тепловий контур, розраховані для трьох режимів електричних навантажень. Для кожної з моделей були розраховані значення коефіцієнтів диференційних рівнянь, що визначають динамічні властивості теплового контуру на режимах 100%, 75% і 50% електричного навантаження КЕУ. Також і для моделі колектора К1 були отримані числові значення коефіцієнтів для кожного з електричних навантажень (2) і для температури води після насоса (4). Модель колектора К2 в даній статті не наводиться.

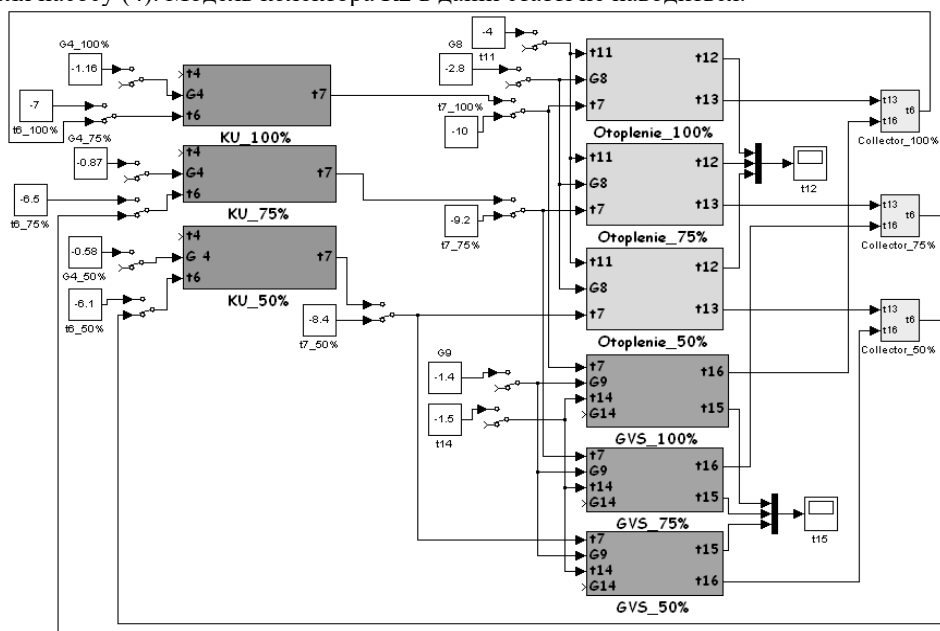
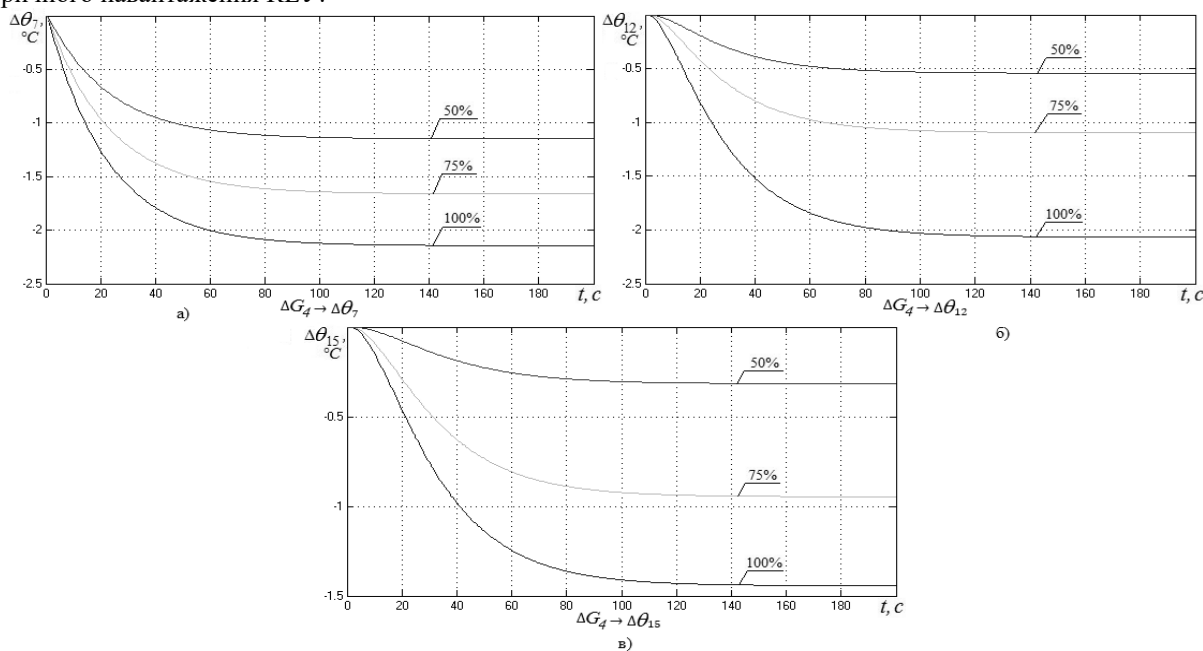


Рис. 2 – Комп'ютерна схема моделі теплового контуру КЕУ

При зміні електричного навантаження КЕУ в діапазоні від 100% до 50% спостерігається зниження витрати газів через газову турбіну, і як наслідок, через ТУ (ΔG_4) з 11,58 кг/с до 5,79 кг/с. Дане зниження є істотним і становить 5,79 кг/с, тобто в 2 рази менше номінального значення [10]. За результатами розрахунків статичних режимів теплового контуру таке зниження витрати газів після газової турбіни призводить до зниження температури води, що нагрівається на виході ТУ (θ_7) від 100 °С до 84 °С. А також знижується температура води, що нагрівається в теплообмінниках опалення з 80 °С до 69 °С і гарячого водопостачання - з 60 °С до 52 °С.

В результаті моделювання динамічних властивостей теплового контуру КЕУ були отримані перехідні процеси при зовнішньому збуренні по таким каналам: $\Delta G_4 \rightarrow \Delta \theta_7$, $\Delta G_4 \rightarrow \Delta \theta_{12}$ і $\Delta G_4 \rightarrow \Delta \theta_{15}$ (рис. 3). Збурення на входах каналів складало 10% від номінальних значень витрат для різних режимів електричного навантаження КЕУ.



а) розгінні криві для каналу $\Delta G_4 \rightarrow \Delta \theta_7$, б) розгінні криві для каналу $\Delta G_4 \rightarrow \Delta \theta_{12}$
 в) розгінні криві для каналу $\Delta G_4 \rightarrow \Delta \theta_{15}$

Рис. 3 - Перехідні процеси в тепловому контурі при збуренні витратою ΔG_4

З наведених графіків видно (рис. 3а), що зниження витрати газів (ΔG_4) через ТУ на 10% від номінальних значень призводить до зниження температури води, що нагрівається на його виході ($\Delta \theta_7$), відповідно, на 2,15 °С при $N_e = 100\%$, на 1,6 °С при $N_e = 75\%$ і на 1,2 °С при $N_e = 50\%$. Динамічні властивості теплоутилізатора по каналу можна описати інерційною ланкою 1-го порядку без запізнення.

Динамічні властивості послідовно включених теплообмінних апаратів ТУ + ПО і ТУ + ПГВ, також змінюються при зменшенні витрати газів (ΔG_4) через ТУ. Динаміку цих теплообмінних апаратів по каналах можна описати інерційною ланкою 1-го порядку з запізненням (рис. 3б і 3в). Динамічні характеристики, отримані з графіків кривих розгону по цим каналам, представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 - Динамічні характеристики ТК при зміні витрати газів ΔG_4

Показник	N_e	100 %	75%	50%
$\Delta G_4 \rightarrow \Delta \theta_7$		$\Delta G_4 = -1.16$ кг/с	$\Delta G_4 = -0.87$ кг/с	$\Delta G_4 = -0.58$ кг/с
Постійна часу T, с		18	20	28
Коефіцієнт передачі K, °C/(кг/с)		1,85	1,91	1,98
$\Delta G_4 \rightarrow \Delta \theta_{12}$		$\Delta G_4 = -1.16$ кг/с	$\Delta G_4 = -0.87$ кг/с	$\Delta G_4 = -0.58$ кг/с
Постійна часу T, с		41	43	78
Час запізнення τ , с		4	5	6
Коефіцієнт передачі K, °C/(кг/с)		1,78	1,26	0,94

$\Delta G_4 \rightarrow \Delta \theta_{15}$	$\Delta G_4 = -1.16$ кг/с	$\Delta G_4 = -0.87$ кг/с	$\Delta G_4 = -0.58$ кг/с
Постійна часу T , с	51	52	52
Час запізнення τ , с	2	3	8
Коефіцієнт передачі K , °C/(кг/с)	1,24	1,09	0,55

Аналізуючи дані таблиці 1, можна зробити висновок, що динаміка теплового контуру за розглянутими трьома каналам ($\Delta G_4 \rightarrow \Delta \theta_7$, $\Delta G_4 \rightarrow \Delta \theta_{12}$, $\Delta G_4 \rightarrow \Delta \theta_{15}$) істотно змінюється. Постійна часу зі зниженням електричного навантаження КЕУ до 50% по каналу $\Delta G_4 \rightarrow \Delta \theta_7$ збільшуються на 55%, а коефіцієнт передачі зростає на 7%. Зростання коефіцієнта передачі в даному випадку характерне для газованих теплообмінних апаратів. Для каналу $\Delta G_4 \rightarrow \Delta \theta_{12}$ постійна часу збільшується на 90%, а коефіцієнт передачі знижується майже на 53%. За вказаним каналом також присутній час запізнення, яке зі зниженням електричного навантаження до 50% збільшується на 50%. Для каналу $\Delta G_4 \rightarrow \Delta \theta_{15}$ характерне істотне зростання часу запізнення в 4 рази і зниження коефіцієнту передачі на 44%.

Перехідні процеси в тепловому контурі, отримані при впливі зовнішніх збурень, а саме температур теплоносіїв з теплової мережі опалення $\Delta \theta_{11}$ і гарячого водопостачання $\Delta \theta_{14}$ представлені на рис. 4.

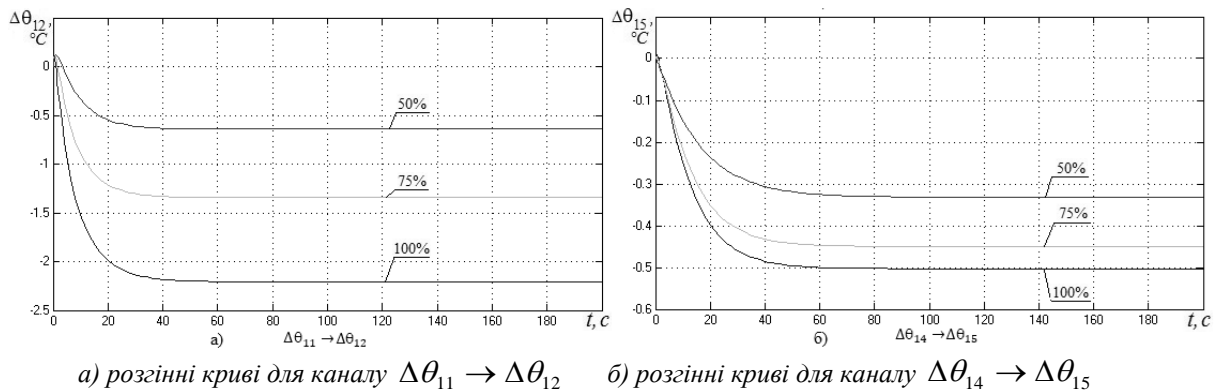


Рис. 4 – Перехідні процеси при зовнішніх збуреннях температурами $\Delta \theta_{11}$ і $\Delta \theta_{14}$

Зниження температури зворотної води в системі опалення $\Delta \theta_{11}$ на 10% призводить до зниження температури $\Delta \theta_{12}$ на виході ПО на 2,4 °C при $N_e = 100\%$, на 1,3 °C при $N_e = 75\%$, на 0,6 °C при $N_e = 50\%$.

Зниження температури води після мережі ГВП $\Delta \theta_{14}$ на 10% призводить до зниження температури $\Delta \theta_{15}$ на виході ПГВ на 0,5 °C при $N_e = 100\%$, на 0,45 °C при $N_e = 75\%$, на 0,32 °C при $N_e = 50\%$. Зміна динамічних характеристик вказаних каналів при зниженні електричного навантаження КЕУ представлено в таблиці 2.

Таблиця 2- Динамічні характеристики ТК по каналах збурень температурами теплоносіїв $\Delta \theta_{11}$, $\Delta \theta_{14}$

Показник	N_e	100 %	75%	50%
$\Delta \theta_{11} \rightarrow \Delta \theta_{12}$		$\Delta \theta_{11} = - 4$ °C		
Постійна часу T , с		9	11	12
Коефіцієнт передачі K , °C/(°C)		0,55	0,35	0,16
$\Delta \theta_{14} \rightarrow \Delta \theta_{15}$		$\Delta \theta_{11} = - 1,5$ °C		
Постійна часу T , с		17	20	22
Коефіцієнт передачі K , °C/(°C)		0,33	0,3	0,22

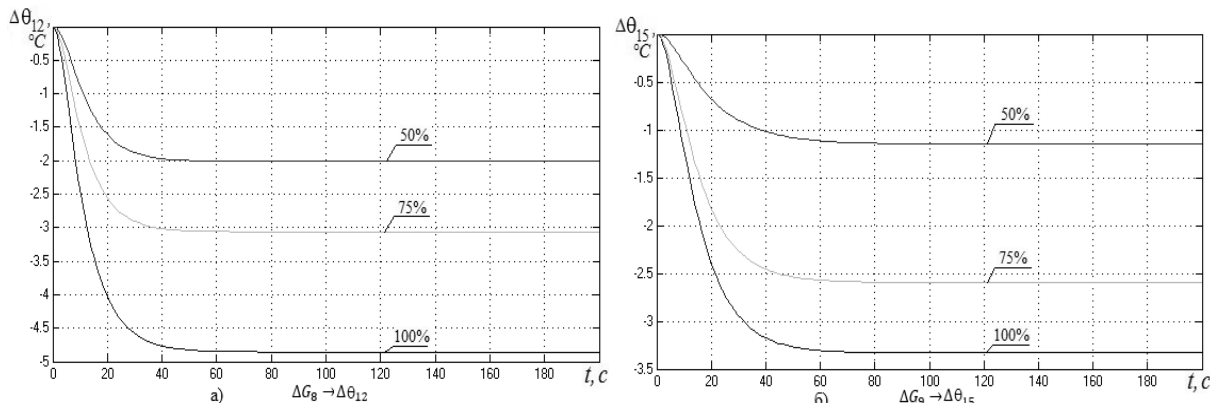
Як видно з таблиці 2, динамічні характеристики теплового контуру за даними каналами також істотно змінюються. Постійна часу по каналу $\Delta \theta_{11} \rightarrow \Delta \theta_{12}$ збільшується на 33%, а коефіцієнт передачі зменшується на 29%. Постійна часу по каналу $\Delta \theta_{14} \rightarrow \Delta \theta_{15}$ зростає на 29%, а коефіцієнт передачі зменшується на 66%.

Зміна температури навколишнього середовища (θ_1) впливає на температуру води, що нагрівається в мережі опалення (θ_{12}). Для визначення числового значення температури теплоносія мережі опалення (θ_{12}) в залежності від значення температури навколишнього середовища використовується наступна графічна залежність, представлена на рис. 5.



Рис. 5 - Залежність значення температури θ_{12} від температури довкілля θ_1

Перехідні процеси при внутрішньому збуренні зменшенням витрат гріючої води через ПО ($\Delta G_8 = -10\%$) і через ПГВ ($\Delta G_9 = -10\%$) показані на рис. 6.



а) розгінні криві для каналу $\Delta G_8 \rightarrow \Delta \theta_{12}$ б) розгінні криві для каналу $\Delta G_9 \rightarrow \Delta \theta_{15}$

Рис. 6 – Перехідні процеси при внутрішніх збуреннях витратою ΔG_8 і ΔG_9

Динамічні характеристики теплового контуру по каналах і представлені в таблиці 3.

Таблиця 3- Динамічні характеристики ТК по каналах збурення витратами ΔG_8 і ΔG_9

Показник	N_3	100 %	75%	50%
$\Delta G_8 \rightarrow \Delta \theta_{12}$		$\Delta G_8 = -2,8 \text{ кг/с}$		
Постійна часу T, с		16	17	19
Час запізнення τ , с		1	2	3
Коефіцієнт передачі K, $^\circ\text{C}/(\text{кг/с})$		1,73	1,09	0,71
$\Delta G_9 \rightarrow \Delta \theta_{15}$		$\Delta G_9 = -1,4 \text{ кг/с}$		
Постійна часу T, с		22	26	28
Час запізнення τ , с		1	2	4
Коефіцієнт передачі K, $^\circ\text{C}/(\text{кг/с})$		2,38	1,86	0,82

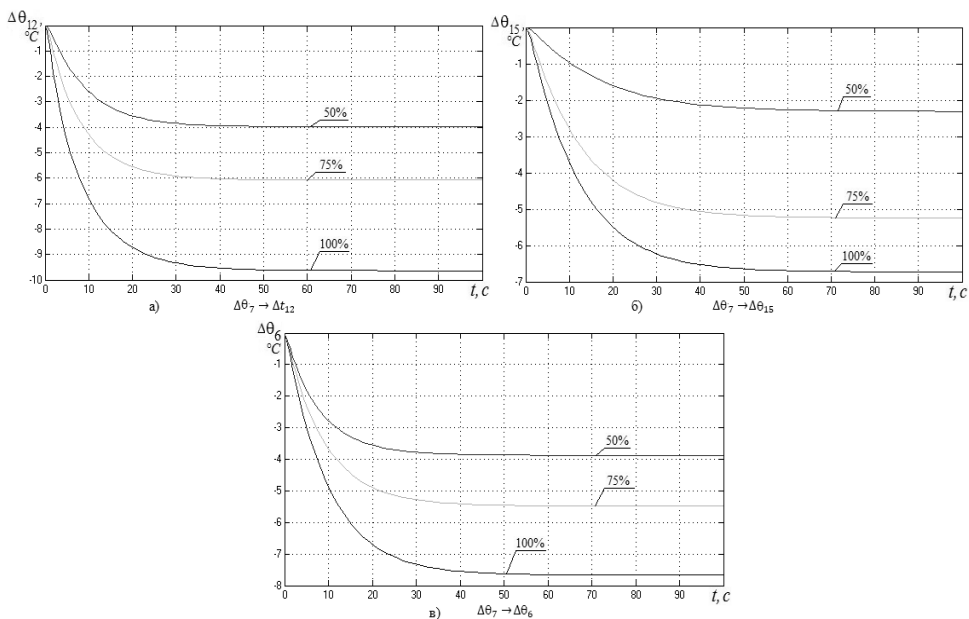
Для каналу $\Delta G_8 \rightarrow \Delta \theta_{12}$ постійна часу і час запізнення збільшуються зі зменшенням навантаження з 100% до 50%. Постійна часу T збільшується на 18%, час запізнення τ зростає в 3 рази, а коефіцієнт передачі зменшується на 41%.

Для каналу $\Delta G_9 \rightarrow \Delta \theta_{15}$ динамічні характеристики теплового контуру також змінюються зі зменшенням електричного навантаження. Постійна часу T зростає на 27 %, час запізнення τ зростає в 4 рази, а коефіцієнт передачі зменшується на 34 %.

Перехідні процеси в теплому контурі при внутрішньому збуренні температурою гріючого теплоносія $\Delta \theta_7$ наведені на малюнку 7.

По виду перехідних процесів можна стверджувати, що при цьому збуренні теплообмінники ПО і ПГВ можуть бути представлені інерційними ланками 1-го порядку без запізнення.

Динамічні характеристики теплового контуру по вказаним каналам представлені в табл. 4.



а) розгінні криві для каналу $\Delta\theta_7 \rightarrow \Delta\theta_{12}$ б) розгінні криві для каналу $\Delta\theta_7 \rightarrow \Delta\theta_{15}$
 в) розгінні криві для каналу $\Delta\theta_7 \rightarrow \Delta\theta_6$

Рис. 7 – Перехідні процеси при внутрішніх збуреннях температурою гріючого теплоносія $\Delta\theta_7$

Таблиця 4 - Динамічні характеристики ТК по каналам збурення температурою гріючого теплоносія $\Delta\theta_7$

Показник \ N_e	100 %	75%	50%
$\Delta\theta_7 \rightarrow \Delta\theta_{12}$	$\Delta\theta_7 = -10 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta\theta_7 = -9,2 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta\theta_7 = -8,4 \text{ }^\circ\text{C}$
Постійна часу T, с	9	11	13
Коефіцієнт передачі K, $^\circ\text{C}/(^\circ\text{C})$	0,965	0,66	0,48
$\Delta\theta_7 \rightarrow \Delta\theta_{15}$	$\Delta\theta_7 = -10 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta\theta_7 = -9,2 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta\theta_7 = -8,4 \text{ }^\circ\text{C}$
Постійна часу T, с	15	17	19
Коефіцієнт передачі K, $^\circ\text{C}/(^\circ\text{C})$	0,67	0,57	0,27
$\Delta\theta_7 \rightarrow \Delta\theta_6$	$\Delta\theta_7 = -10 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta\theta_7 = -9,2 \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta\theta_7 = -8,4 \text{ }^\circ\text{C}$
Постійна часу T, с	11	12	13
Коефіцієнт передачі K, $^\circ\text{C}/(^\circ\text{C})$	0,77	0,6	0,46

передачі зменшується на 59,7 %.

При подальшій розробці системи управління тепловим контуром КЕУ регульованими параметрами рекомендуються: температура води, що нагрівається після ТУ (θ_7); температура води, що нагрівається після ПО (θ_{12}); температура води, що нагрівається після ПГВ (θ_{15}) і витрата води в мережі ГВП (G_{14}).

Як відомо з теорії регулюючий канал повинен володіти максимальною величиною впливу і мінімальною інерційністю. Таким чином, спираючись на результати аналізу динамічних властивостей теплового контуру КЕУ регулюючими впливами для перерахованих вище параметрів слід вибрати такі: витрата газів після газової турбіни (G_4) для регулювання температури води після ТУ (θ_7); витрата гріючої води на вході в ПО (G_8) для стабілізації температури води, що нагрівається і надходить в теплову мережу опалення (θ_{12}); витрата гріючої води на вході в ПГВ (G_9) для підтримки температури води, що нагрівається і надходить в мережу гарячого водопостачання (θ_{15}).

Висновки. Розроблено математичну модель теплового контуру когенераційної енергетичної установи при зміні електричного навантаження в діапазоні 100...50 %. На базі цієї математичної моделі побудована електронна модель теплового контуру КЕУ. Було проведено моделювання, в результаті чого отримані динамічні характеристики елементів теплового контуру КЕУ при електричних навантаженнях 100, 75 і 50 %.

Аналіз динамічних характеристик елементів теплового контуру показав їх суттєву зміну при зменшенні електричного навантаження когенераційної енергетичної установки до 50%. Зі зменшенням елект-

ричного навантаження для всіх каналів спостерігаються зростання значень постійних часу і часу запізнення та зниження значень коефіцієнтів передачі. Це говорить про зростання інерційності в контурі і зниженні впливу на параметри збуджуючих факторів. Іншими словами, чим нижче електричне навантаження, тим менш ефективним буде регулюючий вплив на регульований параметр.

Отже, при роботі когенераційної енергетичної установки на режимах часткових електричних навантажень (100% ÷ 50%) слід враховувати зміни динамічних властивостей елементів теплового контуру при розробці системи автоматичного керування установкою.

Література

1. Мазуренко, А. С., Денисова, А. Е., & Нго, М. Х. Экономическая эффективность парогазовых установок на биотопливе. *Энергетика*, (1), 15. 2013. С. 15 – 19.
2. Редько, А. А., Павловский, С. В. Усовершенствованная тепловая схема котельной установки с когенерацией электроэнергии. Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит, (11 (93)). 2011. С. 23 – 27.
3. Кривчик Д., Волошин А. Когенераторные установки электростанции // VI Всероссийская НПК молодых ученых. Краснодар. 2012. С. 351 – 354.
4. Боровков, В. М., Бородин, О. А. Малая когенерация и ее особенности. *Академия энергетики*, (5), 2010. 62 – 71.
5. Баласанян Г. А., Дубковский В. А. Оптимизация режимов нагрузок системы энергоснабжения на базе газопоршневой когенерационной установки в режиме тригенерации // Экотехнологии и ресурсосбережение. Академия энергетики. 2008. (1), 2. С. 12 – 15.
6. Тарахтій О. С., Бундюк А.М. Аналіз динамічних характеристик когенераційної енергетичної установки (КЕУ) // Холодильная техника и технология. 2012.(134), 4. С. 71 – 74. <https://doi.org/10.1007/s00503-011-0171-1>
7. Оборский Г.О., Бундюк А.М., Моргун Б.О., Тарахтій О.С., Улицкая О.О. Новые и нетрадиционные технологии в энергетике: монография. Одеса: ПП Фенікс, 2016. 160 с.
8. Тодорцев, Ю. К., Бундюк, А. М., & Ларіонова, О. С. Математична модель контура тепlopостачання когенераційної енергетичної установки. Автоматика, автоматизація, електротехнічні комплекси та системи, (2), 24. 2009. 8 – 11.

References

1. Mazurenko, A. S., Denisova, A. E., & Ngo, M. H. (2013). Ekonomicheskaya effektivnost parogazovyykh ustanovok na biotoplive. *Energetika*, (1), 15. 15 – 19.
2. Redko, A. A., Pavlovskiy, S. V. (2011). Usovershenstvovannaya teplovaya shema kotelnoy ustanovki s kogeneratsiyey elektroynergii. *Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit*, (11 (93)). S. 23 – 27.
3. Krivchik, D., Voloshin, A. (2012). Kogeneratornyye ustanovki elektrostantsii // VI Vserossiyskaya NPK molodykh uchenykh, Krasnodar. 351 – 354.
4. Borovkov, V. M., Borodina, O. A. (2010). Malaya kogeneratsiya i ee osobennosti. *Akademiya energetiki*, (5), 62 – 71.
5. Balasanyan, H. A., Dubkovskiy, V. A. (2008). Optimizatsiya rezhimov nahruzok sistemy energhosnabzheniya na baze hazoporshnevoy koheneratsionnoy ustanovki v rezhime triheneratsii // *Ekotekhnologii i resursosberezhenie. Akademiya enerhetiki*. (1), 2. 12 – 15.
6. Tarakhtii, O. S., Bundiuk, A.M. (2012). Analiz dynamichnykh kharakterystyk koheneratsiinoi enerhetychnoi usta-novky (KEU) // *Kholodylnaia tekhnika y tekhnolohiya*. (134), 4. 71 – 74. <https://doi.org/10.1007/s00503-011-0171-1>
7. Oborskiy, G.O., Bundyuk, A.M., & Morgun, B.O., Tarahtiy, O.S., Ulitskaya, O.O. (2016). Novyye i netraditsionnyye tehnologii v energetike: monografiya. *Odesa: PP Feniks*, 160.
8. Todortsev, Yu. K., Bundiuk, A. M., & Larionova, O. S. (2009). Matematychna model kontura teplopостачання koheneratsiinoi enerhetychnoi ustanovky. *Avtomatyka, avtomatyzatsiia, elektrotekhnichni komplekxy ta systemy*, (2), 24. 8 – 11.

Cite as

Оборський Г.О., Бундюк А.М., Дослідження динамічних характеристик теплового контуру когенераційної енергетичної установки при зміні її електричного навантаження // Наук. пр. / Одес. нац. акад. харч. технологій. Одеса, 2019. Т. 83, вип. 2. С. 143 – 151.

Отримано в редакцію 08.07.2019

Прийнято до друку 09.09.2019

Received 08.07.2019

Approved 09.09.2019