

---

## **Аналіз теплових схем і динамічних властивостей когенераційної енергетичної установки за умови використання несиртифікованих видів палива**

**Ольга Тарахтій**

Кафедра програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій /Інститут штучного інтелекту та робототехніки, Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, Україна  
ORCID 0000-0002-4266-3481

**Владислав Жуковський**

Кафедра програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій /Інститут штучного інтелекту та робототехніки, Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, Україна  
ORCID 0009-0002-5479-5278

**Андрій Іванєв**

Кафедра програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій /Інститут штучного інтелекту та робототехніки, Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, Україна  
ORCID 0009-0001-7618-3769

**Олександр Яворський**

Кафедра програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій /Інститут штучного інтелекту та робототехніки, Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, Україна  
ORCID 0000-0002-1101-1085

**Данило Шувалов**

Кафедра програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій /Інститут штучного інтелекту та робототехніки, Національний університет «Одеська політехніка», Одеса, Україна  
ORCID 0009-0009-4647-5830

### **Для цитування цієї статті:**

Тарахтій Ольга, Жуковський Владислав, Іванєв Андрій, Яворський Олександр, Шувалов Данило. Аналіз теплових схем і динамічних властивостей когенераційної енергетичної установки за умови використання несиртифікованих видів палива. International Science Journal of Engineering & Agriculture. Vol. 2, No. 5, 2023, pp. 9-19. doi: 10.46299/j.isjea.20230205.02.

**Надійшла до редакції:** 17 вересня 2023 р.; **Схвалено:** 30 вересня 2023 р.;

**Опубліковано:** 01 жовтня 2023 р.

---

**Анотація:** В статті проведений докладний аналіз існуючих теплових схем когенераційних енергетичних установок (КЕУ) з регенерацією тепла вихідних газів. Метою аналізу було встановлення найбільш ефективної з точки зору утилізації тепла схеми регенерації і подальше її дослідження. В якості показників ефективності схеми регенерації, насамперед, приймалися: коефіцієнт використання теплоти палива (ККД установки) і величини витрат палива на одиницю вироблення теплової енергії (тепловий ККД) і електричної енергії (електричний ККД). Для цього були проведені розрахунки енергетичних показників когенераційної енергетичної установки при різних варіантах схем регенерації тепла відхідних газів. Результати теплових та економічних розрахунків показали, що для когенераційних установок, в яких використовується в якості первинного двигуна газова турбіна, в першу чергу тепло вихідних газів слід використовувати для підігріву повітря після компресору, а вже потім – на потреби теплопостачання. Таким чином обрана схема дозволяє знизити витрату палива на 12,5

% і підвищити ККД установки до 91,22 %. Для обраної схеми витрата палива має найменше значення, а ККД – найбільше з усіх розглянутих схем. Також в роботі було проведено вдосконалення математичного опису динамічних властивостей теплових двигунів подібних енергетичних установок з метою отримання можливості урахування змін теплотворної здатності палива. В диференційне рівняння, яке описує динаміку камери згоряння теплового двигуна КЕУ введена похідна за теплотворною здатністю палива. Це дозволило провести аналіз впливу змінення теплотворної здатності палива на основні параметри енергетичної установки. Запропонована математична модель когенераційної енергетичної установки, що враховує зміну якості палива справедлива в області малих відхилень. Дана математична модель послугує основою для подальшого проведення синтезу комплексної системи автоматичного управління КЕУ.

**Ключові слова:** когенераційна енергетична установка, газотурбінна установка, математична модель, динамічні характеристики, система автоматичного управління, паливо штучного походження.

---

## 1. Вступ

Складний економічний стан енергетичної галузі України, зростання цін на імпорتنі енергоресурси, а також їх обмеженість вимагають більш економного і раціонального їх використання. Беручи до уваги те, що в Україні недостатньо власних енергоресурсів, впровадження енергоефективних технологій є питанням першорядної важливості для нашої країни, оскільки від його вирішення залежить не тільки економічна, але і політична незалежність. Висока ціна на енергоресурси, використання на підприємствах зношеного технологічного устаткування та застарілих технологій багаторазово завищує енергоємність продукції, що робить її не конкурентоспроможною. Крім того, понад 90% обладнання теплових електростанцій вичерпало нормативний ресурс роботи, а більше половини з нього наблизилася до межі фізичного та морального зносу [1–5].

Останнім часом широке поширення одержало використання стаціонарних газотурбінних установок (ГТУ). Такі установки можуть бути складовими частинами когенераційних і газопарових енергоблоків, або газоперекачувальних станцій. Як відомо коефіцієнт корисної дії (ККД) стаціонарних ГТУ, що працюють за циклом Брайтона невеликий, і може становити від 24 до 39 %. Для збільшення ККД цих установок застосовується утилізація теплоти відхідних газів в котлах-утилізаторах, для вироблення теплової енергії та регенерація теплоти за допомогою газо-повітряних підігрівачів для підігріву повітря після компресора.

Ще більш підвищити ефективність роботи таких установок дозволяє використання в них у якості палива несиртифікованих газів: горючих газів штучного походження і газів, що є побічним продуктом технологічних виробництв. Це дозволяє значно знизити витрати на паливо, оскільки такі гази значно дешевше природного або є умовно безкоштовними, а також знизити енергоємність продукції. Однак використання таких газів в якості основного палива ускладнюється тим, що нижча теплота згоряння цих газів може значно змінюватися і, таким чином, вносити збурення в режим роботи енергетичних установок [6,7].

## 2. Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є когенераційна енергетична установка на базі газової турбіни в якості теплового двигуна при номінальному режимі експлуатації.

Предметом дослідження є динамічна модель когенераційної енергетичної установки, що враховує зміну якості палива.

В енергетичній системі України склались обставини з дефіцитом високоефективних енергетичних генеруючих систем. Тому існує необхідність в проведенні досліджень і вирішенні науково-практичної задачі розробки когенераційних енергетичних установок, які дозволяють використовувати несиртифіковані види газоподібного палива, як спосіб підвищення ефективності їх роботи.

### 3. Мета та задачі дослідження

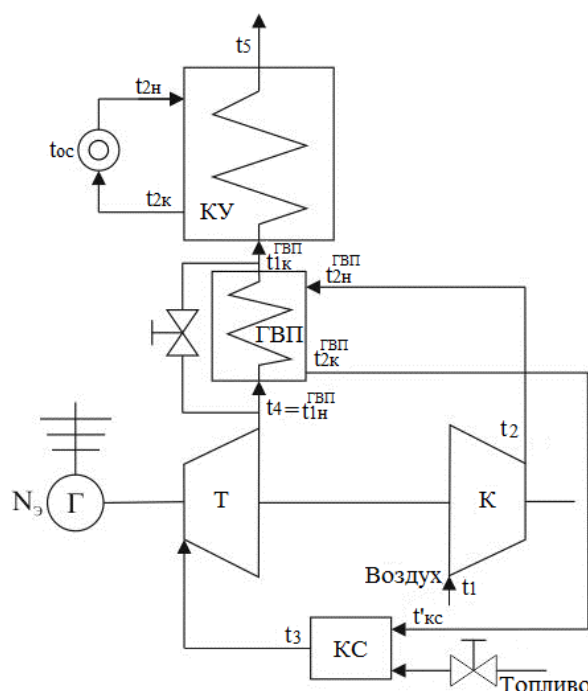
Метою роботи є: проведення докладного аналізу існуючих теплових схем регенерації тепла відхідних газів, з метою вибору найбільш економічної; удосконалення комплексної математичної моделі когенераційної енергетичної установки як об'єкта управління, яка враховувала б зміну якості палива і включала в себе модель газотурбінної установки, утилізаційних теплообмінників теплоти відхідних газів і споживача теплового навантаження, а також дослідження статичних і динамічних характеристик когенераційної установки при наявності внутрішніх і зовнішніх збурень з точки зору впливу їх на показники електричної і теплової потужності установки, а також на частоту обертання електрогенератора.

### 4. Аналіз літератури

Для досягнення поставлених цілей виконано аналіз технологічних схем з регенерацією тепла в когенераційних енергетичних установках. При виборі схеми регенерації для когенераційної установки слід керуватися основними показниками економічності роботи установки. До таких показників, насамперед, належать коефіцієнт використання теплоти палива (ККД установки) і величини витрат палива на одиницю вироблення теплової (тепловий ККД) і електричної енергії (електричний ККД) [9,10].

В роботі [11] показано багато різних варіантів утилізації тепла вихідних газів, проте залишається нез'ясованим, чим треба керуватися при виборі тої або іншої схеми регенерації. З метою з'ясування найбільш ефективної схеми утилізації було проведено теплові і економічні розрахунки різних схем регенерації. Результати теплових та економічних розрахунків показали, що для когенераційних установок, в яких використовується в якості первинного двигуна газова турбіна, в першу чергу тепло вихідних газів слід використовувати для підігріву повітря після компресору, а вже потім – на потреби теплопостачання. Таким чином обрана схема дозволяє знизити витрату палива на 12,5 % і підвищити ККД установки до 91,22 %.

Таким чином для подальшого дослідження було обрано схему, яка представлена на рис. 1. Для даної схеми витрата палива має найменше значення, а ККД – найбільше з усіх розглянутих схем. Це пояснюється найефективнішим використанням теплоти відхідних газів. Також схема, представлена на рис. 1, конструктивно простіша порівняно зі схемою з двоступеневим котлом-утилізатором, що, безсумнівно, є ще однією її перевагою [11].



**Рис. 1.** Схема когенераційної установки з максимальною утилізацією тепла вихідних газів.

В результаті проведеного аналізу було визначено основні задачі дослідження, які полягають у синтезі математичної моделі когенераційної енергетичної установки, яка дозволить враховувати зміну якості палива, а також розробці системи автоматичного управління та дослідженні її динамічних характеристик за умов впливу основних зовнішніх та внутрішніх збурень.

У даній схемі газ, що йде з турбіни, спрямовують у газо-повітряний підігрівач (ГВП), де віддають тепло повітрю, яке надходить із компресора, а потім у котел утилізатор (КУ). Такий варіант регенерації дає змогу ще більше знизити витрату палива за рахунок збільшення температури повітря на вході в камеру згоряння. Витрата палива для вказаної схеми становить  $G_{\text{топ}} = 0,224 \text{ кг/с}$ , а теплова потужність КУ і ГВП відповідно дорівнює  $Q_{\text{КУ}} = 3536 \text{ кВт}$  і  $Q_{\text{ГВП}} = 1727 \text{ кВт}$ .

Загальний ККД установки дорівнює  $\eta_{\text{КЭУ}} = \eta_{\text{ТЕ}} + \eta_{\text{ЭЛ}}$ , тоді схема може забезпечити загальний ККД установки в межах  $\eta_{\text{КЭУ}} = 0,8189 - 0,9122$  і витрату палива –  $G_{\text{топ}} = 0,224 - 0,256 \text{ кг/с}$ . Також для даної схеми є можливість перерозподілу теплових потоків через теплообмінні апарати, що дає можливість варіювання теплового навантаження в досить широких межах ( $Q_{\text{КУ}} = 5292 - 3536 \text{ кВт}$ ). Для обраної схеми витрата палива має найменше значення, а ККД – найбільше з усіх розглянутих у [8] схем. Це пояснюється найефективнішим використанням теплоти вихідних газів.

### 5. Методи досліджень

Наступним кроком дослідження була розробка математичної моделі когенераційної енергетичної установки та аналізу її динамічних характеристик. Принципова схема, на якій базується математична модель когенераційної енергетичної установки наведена на рис. 2 [12].

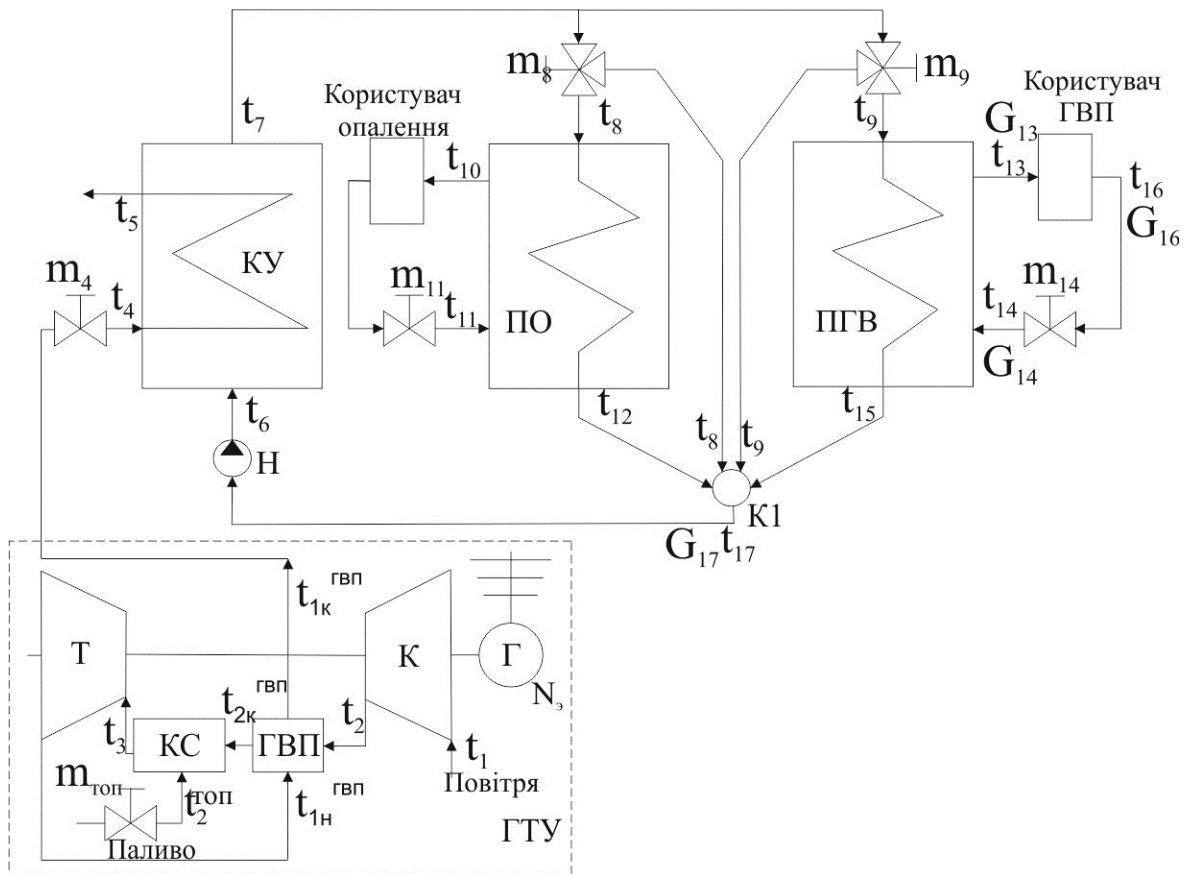


Рис. 2. Принципова схема когенераційної енергетичної установки.

Основними елементами схеми є: газотурбінна установка (ГТУ), яка є тепловим двигуном КЕУ і включає компресор (К), газо-повітряний підігрівач (ГВП), камеру згоряння (КС), газову турбіну (Т) і електрогенератор (Г), котел-утилізатор (КУ), підігрівачі опалення (ПО) і гарячого водопостачання (ПГВ), мережний насос (Н) і колектор (К1).

На підставі вивчення властивостей та особливостей роботи когенераційної енергетичної установки, аналізу вимог, що висуваються до її роботи, складено параметричну схему КЕУ (рис. 3).

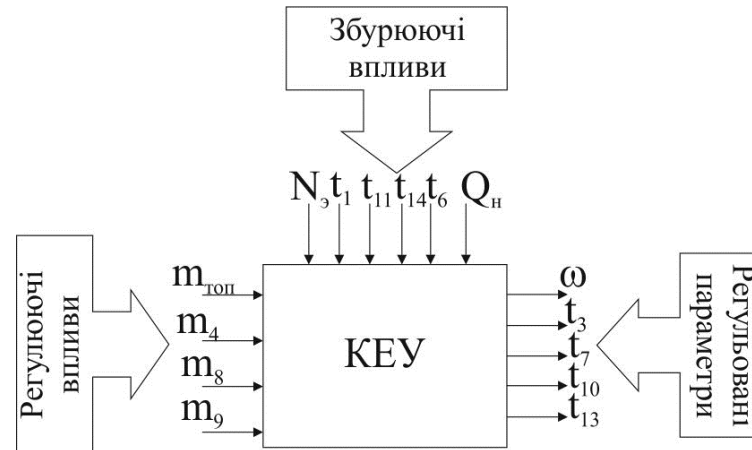


Рис. 3. Параметрична схема КЕУ як об'єкта управління.

В якості входів когенераційної установки обрано значення регулюючих впливів за витратою палива ( $m_{\text{топ}}$ ), витратою гріючих теплоносіїв на вході котла-утилізатора ( $m_4$ ), підігрівача опалення ( $m_8$ ) і підігрівача гарячого водопостачання ( $m_9$ ).

В якості регульованих параметрів обрано частоту обертання електрогенератора ( $\omega$ ), температуру вихідних газів на виході камери згоряння ( $t_3$ ), температуру води на виході котла-утилізатора ( $t_7$ ), температуру води на виході підігрівача опалення ( $t_{10}$ ) і температуру води на виході підігрівача гарячого водопостачання ( $t_{13}$ ).

На когенераційну енергетичну установку діють збурення зі сторони електричного навантаження електрогенератора ( $N_э$ ), теплотворної здатності палива ( $Q_н$ ), температури навколишнього середовища ( $t_1$ ), температури мережної води на вході до котла-утилізатора ( $t_6$ ), температури зворотної води з системи опалення ( $t_{11}$ ), і температури зворотної води з системи гарячого водопостачання ( $t_{14}$ ).

В основі математичної моделі когенераційної енергетичної установки лежать диференціальні рівняння теплового балансу для акумуляторів теплової енергії (теплообмінні апарати і камера згоряння), рівняння кількості моментів, що описують динаміку ротора турбіни і рівняння матеріального балансу, що описують динамічні властивості газів в газових об'єктах.

## 6. Результати досліджень

Динаміка теплообмінних апаратів описується трьома диференціальними рівняннями: рівняння, що описує динамічні властивості з боку теплоносіїв, що нагрівається (1) та гріючого (2), а також рівняння динаміки для стінки трубки теплообмінника (3):

$$C \frac{d\Delta t''_{\text{о6}}}{dt} + \Delta t''_{\text{о6}} = c_1 \Delta m_{\text{о6}} + c_2 \Delta t'_{\text{о6}} + c_3 \Delta t_{\text{ст}}, \quad (1)$$

$$H \frac{d\Delta t''_{\text{гп}}}{dt} + \Delta t''_{\text{гп}} = h_1 \Delta m_{\text{гп}} + h_2 \Delta t'_{\text{гп}} - h_3 \Delta t_{\text{ст}}, \quad (2)$$

$$R \frac{d\Delta t_{ст}}{dt} + \Delta t_{ст} = r_1 \Delta t'_{гр} + r_2 \Delta t''_{гр} - r_3 \Delta t'_{об} - r_4 \Delta t''_{об}, \quad (3)$$

де  $t'_{об}, t''_{об}$  – температура теплоносія, що нагрівається на вході і виході теплообмінника відповідно, °С;

$t'_{гр}, t''_{гр}$  – температура гріючого теплоносія на вході і виході теплообмінника, °С;

$t_{ст}$  – температура стінки трубки теплообмінника, °С;

$m_{об}$  – витрата теплоносія, що нагрівається через теплообмінник, кг/с;

$m_{гр}$  – витрата гріючого теплоносія через теплообмінник, кг/с;

$C, H, R, c_1, c_2, c_3, h_1, h_2, h_3, r_1, r_2, r_3, r_4$  – постійні коефіцієнти.

Символ  $\Delta$  означає те, що використовується відхилення параметру від номінального значення.

Диференційне рівняння, що описує динамічні властивості камери згоряння наведено нижче:

$$A \frac{\partial \Delta t_{г}}{\partial t} + \Delta t_{г} = a_1 \Delta \omega + a_2 \Delta m_{топ} + a_3 \Delta t_2 + a_4 \Delta t_{топ} + a_5 \Delta Q_{н}^p \quad (4)$$

де  $\omega$  – частота обертання ротора турбіни, с-1;

$m_{топ}$  – витрата палива, кг/с;

$t_{г}$  – температура газів на виході з камери згоряння, °С;

$t_2$  – температура повітря на вході до камери згоряння, °С;

$t_{топ}$  – температура палива на вході до камери згоряння, °С;

$Q_{н}^p$  – теплота згоряння палива, кДж/кг;

$A, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  – постійні коефіцієнти.

Диференційне рівняння, яке описує динамічні властивості акумуляторів механічної енергії згідно теоремі моментів кількості руху (рівняння для ротора турбіни) має вигляд:

$$B \frac{d\Delta \omega}{dt} + \Delta \omega = b_1 \Delta P'_{г} + b_2 \Delta P''_{г} + b_3 \Delta t'_{г} - b_4 \Delta P'_{в} - b_5 \Delta P''_{в} - b_6 \Delta t'_{в} - b_7 \Delta N_{г}, \quad (5)$$

де  $P', P''$  – тиск робочого тіла на вході і виході відповідно турбіни і компресора, МПа;

$t'_{г}$  – температура газів і повітря на вході в турбіну і компресор, °С;

$N_{г}$  – електричне навантаження генератора, Вт;

$B, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7$  – постійні коефіцієнти.

Динамічні властивості зміни параметрів газів в об'ємах між компресором і камерою згоряння, між регулюючим органом подачі палива і камерою згоряння, газовий об'єм самої камери згоряння і об'єм між камерою згоряння і газовою турбіною описуються диференційним рівнянням у вигляді:

$$T_p \frac{\partial \Delta p}{\partial t} + \Delta p = T_{г} \frac{\partial T_{кц}}{\partial t} - k_{г} \Delta T_{кц} + k_m \Delta m_{топ} + k_{\omega} \Delta \omega \quad (6)$$

де  $p$  – тиск в газових об'ємах, МПа;

$T_{кц} = t_{г}$  – температура газів на виході з камери згоряння, °С;

$T_p, T_{г}, k_{г}, k_m, k_{\omega}$  – постійні коефіцієнти.

В отриманій математичній моделі вперше враховано зміну теплотворної здатності палива.

Повна система диференційних рівнянь, що описує динамічні властивості когенераційної енергетичної установки включає п'ятнадцять диференційних рівнянь: дванадцять рівнянь для опису динаміки теплообмінних апаратів (ГВП, КУ, ПО і ПГВ), одне для камери згоряння, одне для ротора турбіни і одне для газових об'ємів. Для повного опису властивостей КЕУ отриману систему слід доповнити алгебраїчними рівняннями зв'язку: для визначення температури повітря після компресора і температури газів на виході газової турбіни, а також для визначення значень температур після колектора і насоса [12-14].

Рівняння адиабатичного стиснення в компресорі має вигляд:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{1}{\eta_k} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^n - 1 \right] + 1 \quad (7)$$

де  $T_1, T_2$  – температура повітря до і після компресора відповідно, °К;

$p_1, p_2$  – тиск повітря до і після компресора відповідно, МПа;

$\eta_k$  – ККД компресора;

$n$  – показник політропи.

Рівняння адиабатичного розширення газів в турбіні має вигляд:

$$\frac{T_4}{T_3} = 1 - \eta_t \left[ 1 - \left( \frac{p_4}{p_3} \right)^n \right] \quad (8)$$

де  $T_3, T_4$  – температура газів до і після турбіни відповідно, °К;

$p_3, p_4$  – тиск газів до і після турбіни відповідно, МПа;

$\eta_t$  – ККД турбіни.

Температура теплоносія після колектора К1 визначається таким чином:

$$\Delta t_{17} = z_1 t_{12} + z_2 t_{15} + z_3 t_8 + z_4 t_9 \quad (9)$$

де  $z_1, z_2, z_3, z_4$  – постійні коефіцієнти.

Температура теплоносія після насоса:

$$\Delta t_6 = k_n \Delta t_{17} \quad (10)$$

де  $k_n$  – постійний коефіцієнт.

Для всіх отриманих диференційних і алгебраїчних рівнянь системи були розраховані числові значення коефіцієнтів, які наведені в [14] і проведено аналіз динамічних характеристик КЕУ [12-14] Комп'ютерна схема моделі наведена на рис. 4.

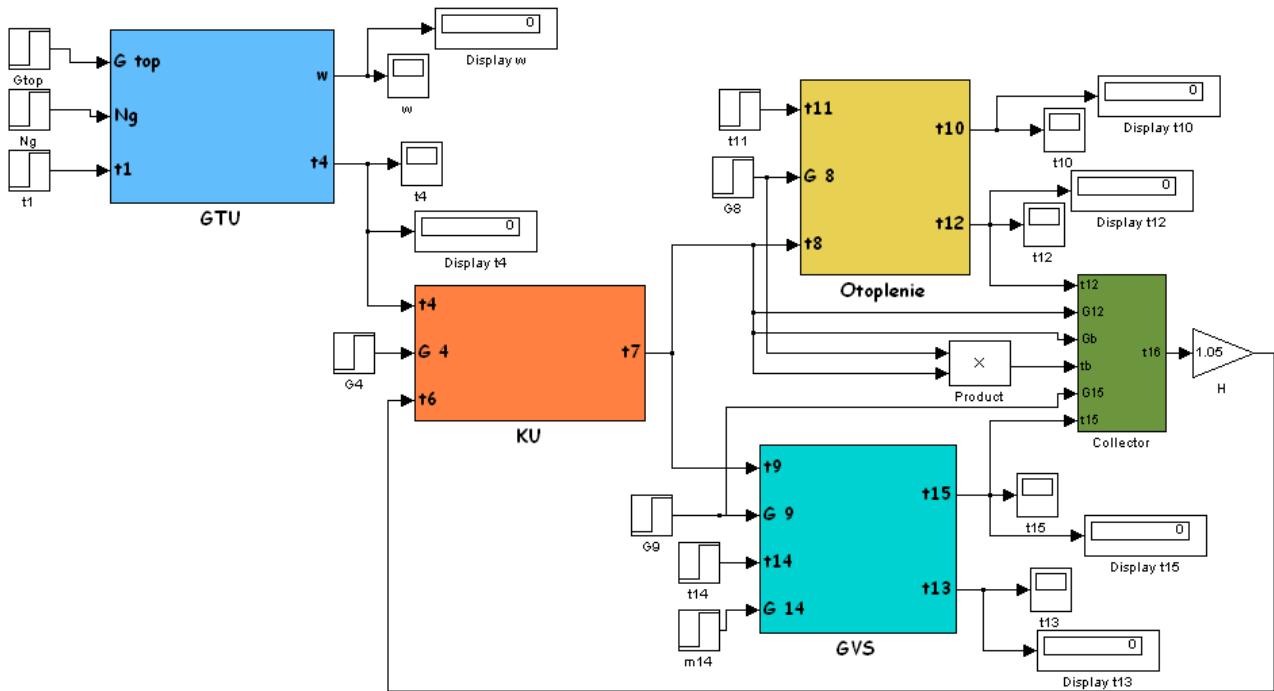


Рис. 4. Комп'ютерна схема моделі динаміки КЕУ.

## 7. Перспективи подальшого розвитку досліджень

Таким чином, в результаті проведених досліджень запропонована математична модель когенераційної енергетичної установки, яка враховує зміну якості палива і справедлива в області малих відхилень. Отримана математична модель є основою для подальшого проведення синтезу комплексної системи автоматичного управління КЕУ.

Ця модель справедлива в області малих відхилень від стаціонарного режиму і може бути ефективно використана для дослідження динаміки КЕУ в умовах впливу основних зовнішніх збурень: температура повітря на вході в компресор  $t_1$ , зміна електричного навантаження  $N_s$ , зміна теплоти згоряння палива  $Q_n^p$ , температура зворотної води із системи опалення  $t_{11}$  і температура води на вході в ПГВ  $t_{14}$ .

Виходячи з результатів проведеної роботи по вивченню динамічних характеристик когенераційної енергетичної установки, в подальшому можливо розробити наступне:

Каналами, що найсильніше впливають на динамічні характеристики когенераційної установки, є канали  $N_s \rightarrow \omega$ ,  $G_{\text{топ}} \rightarrow \omega$ ,  $Q_n^p \rightarrow t_3$ ,  $Q_n^p \rightarrow \omega$  і  $G_{\text{топ}} \rightarrow t_3$ .

Для стабілізації частоти обертання ротора турбогенератора як регульовальний вплив слід вибрати витрату палива  $G_{\text{топ}}$  (канал  $G_{\text{топ}} \rightarrow \omega$ ).

Для нейтралізації впливу змін теплоти згоряння палива  $Q_n^p$ , слід змінювати витрату палива  $G_{\text{топ}}$ , а в разі, коли витрата палива має граничне значення, і подальша зміна вже неможлива, то пропонується використовувати перерозподіл потоків первинного і вторинного повітря в камері згоряння.

Для регулювання температур  $t_{10}$  і  $t_{13}$  в якості регулюючого впливу слід обрати витрату газів на виході з КУ  $G_8$  (канали  $G_8 \rightarrow t_{10}$  і  $G_9 \rightarrow t_{13}$ ).

Подальше розвиток одержаних результатів полягає в тому, що в когенераційних енергетичних установках можливе використання в якості палива газів штучного походження, що дозволяє підвищити економічність роботи вказаних установок за рахунок зниження витрат на паливо.



## 8. Висновки

Під час проведення аналізу існуючих теплових схем утилізації теплоти відхідних газів було виявлено багато різних варіантів схем утилізації. З метою вибору найбільш економічної схеми було проведено розрахунок теплових схем ГТУ і техніко-економічних показників установки. Таким чином було обрано схему регенерації, що забезпечує зниження витрати палива на 12,5 % і роботу установки зі значенням ККД 91,22 %. Також в роботі проведено аналіз існуючих математичних моделей когенераційних енергетичних установок. В ході аналізу з'ясовано, що жодна з відомих моделей КЕУ не дозволяє врахування зміни якості палива. Таким чином, обґрунтовано необхідність вдосконалення математичної моделі когенераційної енергетичної установки з метою врахування зміни якості палива.

Спираючись на отриману математичну модель когенераційної енергетичної установки проведено дослідження динамічних характеристик КЕУ за умов впливу властивих їй внутрішніх та зовнішніх збурень на основні регульовані параметри:  $\omega$ ,  $t_3$ ,  $t_7$ ,  $t_{10}$  і  $t_{13}$ . Досліджено, що найвпливовішими є збурення по зміні електричного навантаження  $N_e$ , теплотворної здатності палива  $Q_n^p$  і температури навколишнього середовища  $t_1$ . Вплив цих збурень призводить до значного відхилення всіх регульованих параметрів.

---

### Список літератури:

- 1) Долінський, А., Басок, Б., Базєєв, Є. (2009). Державна цільова програма (проект) модернізації комунальної теплоенергетики на 2010–2014 роки. Вісн. НАН України, 10, 3 – 8.
- 2) Гришин, М., Беглов, К. (2021). Оцінка ефективності збагачення палива для зменшення ризику витрат ТЕС. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 32(71(3)), 82-89. [https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2021/3\\_2021/16.pdf](https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2021/3_2021/16.pdf)
- 3) Максимов, М., Давидов, В. (2020). Моделювання балансування енергосистеми за умови утримання в ній значної частки джерел енергії, що не диспетчеризуються. Automation of Technological and Business Processes, 11(4), 27-35. doi: <https://doi.org/10.15673/atbp.v11i4.1596>
- 4) Чепурний, М., Ткаченко, С., Антропова, О. (2010). Газопарові установки на базі газотурбінних і теплофікаційних парових турбін. Вісн. Вінницького політехн. інст., 2, 34 – 38.
- 5) Чепурний, М., Ткаченко, С. (2010). Теплоелектроцентралі на базі газотурбінних установок і парових турбін з низькотемпературним робочим тілом. Вісн. Вінницького політехн. Інст., 4, 21 – 25.
- 6) Максимов, М., Ложечников, В., Добровольская, Т., Бондаренко, А. (2014). Математическая модель сжигания несертифицированных видов топлива. Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2(8), 44-51.
- 7) Брунеткин, А., Максимов, М., А.В. Бондаренко, А. (2014). Идентификация количественного состава неизвестного газообразного горючего и его продуктов сгорания на основе измеренных технологических параметров процесса сжигания топлива. Вісник Національного технічного університету ХПІ. Сер.: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування, 12, 131-141.
- 8) Olexander, V., Kuzmenko, V., Soloviova O. (2022). Mathematical model of energy transformation processes in barrel system for determining shooting performance. Published by Lviv Polytechnic National University. JECS, 8(1), 28 – 39.
- 9) Бундюк, А., Тарахтий, О. (2016). Исследование энергетических характеристик когенерационной энергетической установки в условиях изменения качества топлива. Automation of technological and business processes, 8 (1), 13 -20.
- 10) Chirkov, V. (2007) Mini thermal power stations operating on pyrolyzed fuel. Thermal Engineering, 54(8), 626 – 630. doi: 10.1134/S004060150708006X
- 11) Тодорцев, Ю., Тарахтий, О., Бундюк, А. (2015). Выбор экономической схемы регенерации когенерационной энергетической установкой. Восточно-европейский журнал передовых технологий, 2/8(74), 17 – 22. doi: 10.15587/1729-4061.2015.40401

12) Ларіонова, О., Бундюк, А. (2009) Розробка математичної моделі динаміки когенераційної енергетичної установки. Наукові праці ОНАХТ. 2(35), 266 – 271.

13) Тарахтій, О., Рура А. (2020). Застосування нечіткого регулятора для регулювання рівня води в барабані парового котла Е-50. Інформатика та математичні методи в моделюванні, 10(3-4), 190 – 196. [http://immm.op.edu.ua/files/archive/n3-4\\_v10\\_2020/immm\\_n3-4\\_v10\\_2020.pdf](http://immm.op.edu.ua/files/archive/n3-4_v10_2020/immm_n3-4_v10_2020.pdf)

14) Ларіонова, О., Тодорцев, Ю., Бундюк А.(2011). Математическая модель динамики энергетической когенерационной газотурбинной установки. XXIV Международная научная конференция Математические методы в технике и технологияхММТТ-24., 6, 87 – 89.

15) Grishyn, M., Tarakhtij, O. (2023). Імітаційне моделювання відбору проб та заміни постачальників вугілля на теплові електростанції. Прикладні аспекти інформаційних технологій, 6(2), 175–189. doi: <https://doi.org/10.15276/aait.06.2023.13>. <http://aait.ccs.od.ua/index.php/journal/article/view/185>

16) Kozlov, O., Kondratenko, Y., Lysiuk, H., Kryvda, V., Maksymova, O. (2022). Fuzzy Automatic Control of the Pyrolysis Process for the Municipal Solid Waste of Variable Composition. Journal of Automation, Mobile Robotics and Intelligent Systems, 16(1), 83-94. doi:10.14313/JAMRIS/1-2022/9

17) Lysiuk, H., Maksymova, O. (2023). Model and Method of Solid Household Waste Sorting for Their Effective Thermal Disposal “Energy Engineering and Control Systems”, 9(1), 31-46. doi: <https://doi.org/10.23939/jeecs2023.01.031>

---

## **Automated control of a cogeneration plant using non-certified types of gaseous fuel**

### **Olga Tarakhtij**

Department of Software and Computer-Integrated Technologies / Institute of Artificial Intelligence and Robotics, Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine  
ORCID 0000-0002-4266-3481

### **Vladyslav Zhukovskiy**

Department of Software and Computer-Integrated Technologies / Institute of Artificial Intelligence and Robotics, Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine  
ORCID 0009-0002-5479-5278

### **Andrii Ivaneiev**

Department of Software and Computer-Integrated Technologies / Institute of Artificial Intelligence and Robotics, Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine  
ORCID 0009-0001-7618-3769

### **Oleksandr Yavorskyi**

Department of Software and Computer-Integrated Technologies / Institute of Artificial Intelligence and Robotics, Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine  
ORCID 0000-0002-1101-1085

### **Danylo Shuvalov**

Department of Software and Computer-Integrated Technologies / Institute of Artificial Intelligence and Robotics, Odesa Polytechnic National University, Odesa, Ukraine  
ORCID 0009-0009-4647-5830

---

**Abstract:** The article provides a detailed analysis of the existing thermal schemes of cogeneration power plants with heat regeneration of source gases. The purpose of the analysis was to establish the most effective regeneration scheme from the point of view of heat utilization and its

further research. The efficiency indicators of the regeneration scheme were, first of all, the coefficient of fuel heat utilization (installation efficiency) and the amount of fuel consumption per unit of thermal energy production (thermal efficiency) and electrical energy (electrical efficiency). For this purpose, calculations of the energy indicators of the cogeneration power plant were carried out with various variants of waste gas heat regeneration schemes. The results of thermal and economic calculations showed that for cogeneration plants, in which a gas turbine is used as the primary engine, the heat of the output gases should be used first of all for heating the air after the compressor, and only then - for heat supply needs. Thus, the selected scheme allows to reduce fuel consumption by 12.5% and increase the efficiency of the installation to 91.22%. For the selected scheme, fuel consumption is the least important, and the efficiency is the highest among all the considered schemes. The work also improved the mathematical description of the dynamic properties of heat engines of similar power plants in order to obtain the possibility of taking into account changes in the calorific value of the fuel. In the differential equation, which describes the dynamics of the combustion chamber of the KEU heat engine, the derivative of the calorific value of the fuel is introduced. This made it possible to analyze the impact of changing the calorific value of the fuel on the main parameters of the power plant. The proposed mathematical model of the cogeneration power plant, which takes into account the change in fuel quality, is valid in the area of small deviations. This mathematical model serves as the basis for the further synthesis of a complex automatic control system.

**Keywords:** cogeneration power plant, gas turbine plant, mathematical model, dynamic characteristics, automatic control system, fuel of artificial origin.

---