

УДК 621. 1.016.330.138

doi:10.20998/2413-4295.2018.45.08

ТЕРМОЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ КОГЕНЕРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ЕКСЕРГЕТИЧНОЇ ВАРТОСТІ

В. О. ТАРАСОВА, Д. Х. ХАРЛАМПІДІ*, А. О. КОСТИКОВ

Відділ моделювання та ідентифікації теплових процесів, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгоного НАН України, м. Харків, УКРАЇНА

**e-mail: kharlampidi@ipmach.kharkov.ua*

АНОТАЦІЯ Сучасні когенераційні системи являють собою складні енерготехнологічні комплекси з високою ступеню рекуперативності енергії. Передпроектний аналіз цих систем повинен враховувати як економічну, так і термодинамічну складові процесу перетворення енергії. Найбільш науково обґрунтованою базою щодо розробки рекомендацій для проектування агрегатів системи когенерації є сучасний метод термoeкономічного аналізу. На основі теорії ексергетичної вартості побудовано термoeкономічну модель когенераційної установки, яка враховує нееквівалентність ексергетичних втрат, що пов'язана зі структурно-топологічними особливостями її технологічної схеми. Термoeкономічна модель має ієрархічну структуру, до якої входять термодинамічна модель, що необхідна для визначення ексергетичних потоків, а також ексерго-топологічна модель, яка встановлює за допомогою поточкових графів взаємозв'язки між ексергетичними потоками в установці. Для візуалізації термoeкономічної моделі запропоновано функціональну ексергетичну поточкову діаграму когенераційної установки, яка допомагає здійснити поділ потоків за якісною ознакою «паливо» - «продукт» елемента. З метою подальшої сумісної оцінки ексергетичних та економічних показників системи до загальної термoeкономічної моделі можуть бути залучені функції капітальної вартості елементів.

На основі чисельної реалізації термoeкономічної моделі в технологічній схемі установки визначені ділянки, що мають надлишкове питоке споживання ексергетії, а також аномалії та дисфункції у кожному елементі схеми. Із залученням методів теорії планування експерименту побудовано регресійні моделі ексергетичного ККД установки у залежності від визначальних факторів, виконано факторний аналіз та визначений взаємопов'язаний їх вплив на ексергетичну ефективність установки.

Ключові слова: термoeкономічна модель; ексергетична вартість; когенерація; факторний аналіз; поточкові графи

THERMOECONOMIC ANALYSIS OF COGENERATION INSTALLATION (CGAM) BASED ON THEORY OF THE EXERGETIC COST

V. TARASOVA, D. KHARLAMPIDI, A. KOSTIKOV

Department of Modeling and Identification of Thermal Processes, A. M. Podgorny Institute Problem in Machinery of NAS of Ukraine, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT Modern cogeneration systems are complex energy-technology complexes with a high degree of energy recovery. Pre-design analysis of these systems must take into account both the economic and thermodynamic components of the process of energy conversion. The most scientifically grounded basis for the development of recommendations for the design of aggregates of the cogeneration system is the modern method of thermoeconomic analysis. On the basis of the theory of exergetic cost, a thermoelectric model of a cogeneration unit is constructed, which takes into account the nonequivalence of exergy losses, which is related to the structural-topological features of the technological scheme. The thermoeconomic model has a hierarchical structure, which is a thermodynamic model, which is necessary for the determination of exergy flows, as well as an exergo-topological model that establishes, by means of flow graphs, the interconnections between exergetic flows in the installation. For visualization of the thermoelectric model, a functional exergetic flow diagram of a cogeneration unit is proposed, which helps to perform the separation of flows for a qualitative sign "fuel" - "product" of the element. In order to further coherent assessment of the exergetic and economic indicators of the system to the general thermoelectric model, the functions of the capital cost of the elements can be involved.

On the basis of the numerical implementation of the thermoelectric model in the technological scheme of the installation areas are identified that have an excessive specific consumption of exergy, anomalies and dysfunctions for each element of the scheme. With the involvement of methods of the theory of experiment planning, regression models of the exergy efficiency of the installation were constructed depending on the determining factors, the factor analysis was performed and the interrelated influence of them on the exergy efficiency of the installation was determined.

Keywords: thermoeconomic model; exergetic cost; cogeneration; factor analysis; flow graphs

Вступ

Перспективним шляхом розвитку та вдосконалення теплогенеруючих установок є їх об'єднання з різнофункціональним теплотехнічним обладнанням і створення на базі цього системи когенерації з метою одночасного отримання декількох корисних ефектів (електроенергії, тепла). Такі

системи здатні вирішувати проблеми віддалених від центральної енергомережі населених пунктів, а також малих приватних підприємств промислового та сільськогосподарського призначення. Тому актуальним є створення високоефективної структури системи когенерації для комплексного вирішення питань економії енергоресурсів.

Сучасні когенераційні системи являють собою складні енерготехнологічні комплекси з високою ступеню рекуператії енергії. Передпроектний аналіз цих систем повинен враховувати як економічну, так і термодинамічну складові процесів. Між цим, у випадках коли кількість технологічних підпроцесів та елементів достатньо велика такий аналіз може значно ускладнитися. Тому у передпроектну практику слід активніше залучати сучасні підходи, що дозволить виконувати комплексну оцінку ефективності енерготехнологічної системи у цілому та її окремих елементів.

Мета роботи

Найбільш науково обґрунтованою базою для розробки рекомендацій щодо проектування агрегатів системи когенерації, а також визначення шляхів підвищення її ефективності, є сучасний метод термoeкономічного аналізу. На ранніх етапах розробки системи він дозволяє скорегувати прийняті технічні рішення або вказати на їх безперспективність, створити уявлення про низку інженерних факторів, таких як маса, габарити, якість конструктивних матеріалів та ін. У термoeкономічному аналізі враховується нееквівалентність потоків ексергії на різних ділянках системи, яка зумовлена незворотною реальних термодинамічних процесів та наявністю неенергетичних втрат.

Метою роботи є створення термoeкономічної моделі когенераційної установки, яка враховує структурно-топологічні особливості технологічної схеми та дозволяє визначити вплив на ефективність усіх складових ексергетичних втрат кожного елемента.

Розробка термoeкономічної моделі на основі теорії ексергетичної вартості

Термoeкономічний аналіз проводиться на основі сформованої термoeкономічної моделі виробничої структури енергоперетворюючої установки, яка включає в себе співвідношення, що описують перетворення ексергії. Ця модель є основою для визначення втрат ексергії, які пов'язані з кожним потоком, і оцінки ефективності всієї системи. Модель відображає топологію процесів перетворення ексергії, а не технічну топологію самої системи. Виробнича структура енергоперетворюючої установки представляється у вигляді функціональної схеми, в якій потоки ексергії на вході і виході з елемента поділяються за якісною ознакою на «паливо» і «продукт». Взаємозв'язок між елементами виробничої структури ідентифікується на основі їх функціонального зв'язку. Для розрахунку втрат ексергії використовується матрична форма запису ексергетичних балансів і метод графів для їх вирішення. Слід зазначити, що побудова термoeкономічної моделі процесу перетворення

енергії зі складною топологією технологічної схеми значно спрощується при використанні методу графів для опису структури схеми. Вершини сигнального графу відповідають сигналам системи, гілки – коефіцієнтам, що характеризують зв'язки між сигналами. Перевагою графів є можливість використання розвиненого математичного апарату, який здатний суттєво зменшити обсяг розрахунків.

Для опису процесів перетворення енергії та їх об'єктивної оцінки доцільно використовувати теорію ексергетичної вартості [1]. Теорія ексергетичної вартості заснована на загальноекономічних принципах представлення технічної системи, таких як ресурс, структура, ефективність і цільове призначення елемента. У термінологію вводиться якісне поділення ексергетичних потоків на «паливо» і «продукт». Використовуються такі поняття, як деструкція ексергії і втрати ексергії.

Визначаючи ресурс, який споживається елементом (його «паливо»), і виділяючи його «продукт», який виражається через ексергію пов'язаних матеріальних або енергетичних потоків, можна виявити додаткову витрату ексергії «палива» всієї системи, яка спричинена аномальною роботою будь-якого елемента схеми.

«Паливом» є потік ексергії, що входить в елемент системи, включаючи при цьому ексергію приводу, споживану в цьому елементі. Також «паливом» є будь-яке зменшення потоку ексергії між входом і виходом з елемента. «Продуктом» є потік ексергії, який прямує з розглянутого елемента до подальшого елемента, для якого він буде «паливом». «Продуктом» також є ексергія теплового потоку, яка отримана в цьому елементі, та будь-які збільшення ексергії потоку між входом і виходом з нього. Деструкція ексергії в елементі, безпосередньо пов'язана з капітальними і експлуатаційними витратами і залежить від розмірів елемента. Так, наприклад, в теплообмінних апаратах деструкція ексергії пов'язана з недорекуператією, від величини якої залежить мінімальний температурний напір, а відповідно, і площа поверхні апарату. Втрати ексергії визначені умовами взаємодії елемента з навколишнім середовищем.

З урахуванням зазначеного можна сформулювати задачі, на вирішення яких спрямовано розробка термoeкономічної моделі:

– виявлення «слабких місць» в технологічній схемі, які мають надлишкове питоме споживання ексергії, з урахуванням нееквівалентності ексергетичних втрат, що виникають по ходу процесу перетворення енергії;

– знаходження технічно можливої межі підвищення ефективності кожного елемента схеми;

– визначення ексергетичної вартості втрат від незворотної реальних процесів і монетарної вартості технічних заходів, спрямованих на їх зменшення;

– проведення термoeкономічної діагностики, яка дозволяє визначити складові ексергетичних втрат, їх взаємозв'язок в елементах схемі та оцінити вплив будь-яких відхилень від еталонного режиму роботи.

Розглянемо загальні принципи побудови моделі виробничої структури енергоперетворюючої установки.

Рівняння балансу ексергії для k -го елемента можна записати в наступному вигляді

$$F_k - P_k - R_k = E_{Dk}, \quad (1)$$

де F_k і P_k – відповідно «паливо» і «продукт» k -го елемента; R_k – потоки «залишки» (побічний продукт системи); E_{Dk} – деструкція ексергії в елементі.

На рис. 1 показані потоки ексергії, що входять в k -ий елемент з i -их елементів ($i = 1, 2, \dots, m$) і в навколишнє середовище (або з нього). Також на рисунку показано розподіл потоків «залишків» серед тих елементів, в яких була витрачена ексергія на їх виробництво. «Продукти» дисипативних елементів є залишковими потоками.

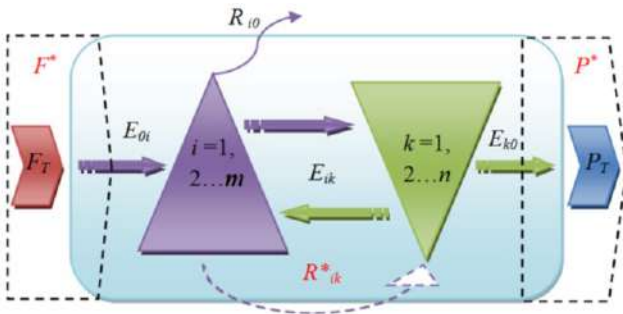


Рис. 1 – Узагальнена схема зображення цільових потоків ексергії у технічній системі

Виходячи зі схеми (рис. 1), вираз для потоку «палива» k -го елемента можна записати як

$$F_k = E_{0k} + \sum_{i=1}^m E_{ik}, \quad (2)$$

де E_{0k} – потоки ексергії, що надходять в систему від зовнішніх джерел; E_{ik} , – потоки ексергії, що є «продуктами» інших елементів і надходять в k -ий елемент у вигляді «палива».

При цьому потік з індексом i буде зі знаком «+», якщо він надходить з i -го елемента в k -ий, та – зі знаком «-», якщо потік виходить з k -го елемента і надходить в i -ий елемент (рис. 1).

«Продукт» елемента дорівнює

$$P_k = E_{k0} + \sum_{k=1}^n E_{ki}, \quad (3)$$

де E_{k0} – потоки ексергії, що є «продуктом» для навколишнього середовища; E_{ki} – потоки ексергії, що

виходять з k -го елемента в якості «продукту» і входять до i -го елемента як «паливо».

Питоме споживання ексергії в елементі визначається як відношення «палива» до його «продукту»

$$k_k = \sum_{i=0}^m k_{ik} = F_k / P_k, \quad (4)$$

де $k_{ik} = E_{ik} / P_k$.

Для проведення аналізу необхідна наявність двох режимів експлуатації установки: еталонного і реального. В якості еталонного режиму обирається режим, який визначається за допомогою процедури термодинамічної ідеалізації процесів, яка передбачає процедуру усунення технічних втрат ексергії в елементах і виділення власних (не усунених) втрат. Правила усунення технічних втрат при проведенні ідеалізації розглянуті в роботі [2].

Обов'язковою умовою аналізу є дотримання однакового ексергетичного «продукту» установки для обох режимів.

Оскільки аналіз проводиться шляхом порівняння еталонного і реального режимів, то уявивши рівняння (1) у вигляді

$$\Delta F_k = F_k - F_k^0 = (P_k - P_k^0) + (E_{Dk} - E_{Dk}^0) + (R_k - R_k^0), \quad (5)$$

можна визначити перевитрату «палива» в k -му елементі. В (5) нарядковим індексом «0» позначений еталонний режим.

Зміна деструкції ексергії в реальному режимі в порівнянні з еталонним $\Delta E_{Dk} = (E_{Dk} - E_{Dk}^0)$ являє собою усунену складову деструкції ексергії E_{Dk} , тому в еталонному режимі всі втрати вважаються неусувними.

У свою чергу, усунена складову деструкції ексергії також підрозділяється на ендогенну і екзогенну частини:

$$\Delta E_{Dk} = E_{Dk}^{EN} + E_{Dk}^{EX} = P_k^0 \Delta k_k + (k_k - 1) \Delta P_k. \quad (6)$$

Аномалія (аналог ендогенної деструкції в елементі E_{Dk}^{EN}) пов'язана виключно зі збільшенням питомого споживання «палива» в розглянутому елементі в порівнянні з еталонним режимом

$$MF_k = P_k^0 \Delta k_k = \sum_{i=0}^m MF_{ik} = \sum_{i=0}^m \Delta k_{ik} P_k^0, \quad (7)$$

де Δk_{ik} – зміна питомого споживання ексергії в елементі в порівнянні з еталонним режимом; P_k^0 – «продукт» елемента в еталонному режимі.

Дисфункція (аналог екзогенної деструкції в елементі) пов'язана з присутністю аномалій в інших елементах, які спричиняють у свою чергу змінення «продукту» елемента, який розглядається. Як відомо [3], дисфункції негативно впливають на

функціонування системи, їх зростання призводить до руйнування цілісності системи.

$$DF_k = \sum_{i=0}^m (k_{Pk}^* - 1) \Delta k_{ki} P_i^0, \quad (8)$$

де k_{Pk}^* – питома ексергетичної вартість «продукту» k -го елемента, яка визначається з урахуванням ексергетичної вартості інших елементів k_{Pi}^* ($i \neq k$), а також з урахуванням витраченої ексергії на виробництво «продукту» дисипативного елемента ρ_{ik} :

$$k_{Pk}^* = k_{0k} + \sum_{i=0}^m k_{Pi}^* (k_{ik} + \rho_{ik}). \quad (9)$$

Слід зазначити, що ексергетичної вартості, як окремої властивості потоку ексергії, не існує. Вона є інтегративною властивістю системи і залежить від її структури.

Якщо потік E_{ik} відноситься до «продукту» i -го елемента, то за правилом ексергетичної вартості [3]

$$k_{ik}^* = k_{Pi}^*,$$

де $k_{ik}^* = E_{ik}^* / E_{ik}$ – питома ексергетична вартість, яка дорівнює ексергії, що спожита елементом для виробництва 1 кВт його «продукту», кВт/кВт; E_{ik}^* – ексергетична вартість потоку.

У теорії ексергетичної вартості поділ елементів за функціональним призначення здійснюється за ознакою «продуктивні» та «дисипативні» елементи. Дисипативними елементами в енергоперетворюючих установках є конденсатор та градирня. З точки зору термoeкономіки дисипативний елемент, наприклад, конденсатор виконує функцію «закриття» термодинамічного циклу у якому здійснюється процес зі зменшенням ентропії. За рахунок відведення потоку енергії у навколишнє середовище через дисипативний елемент відбувається очищення термодинамічної системи від неперетворюваної енергії, що циркулює у системі. Аналогічну за призначенням дисипативну функцію виконує також градирня, яка відводить скидні гази у навколишнє середовище. Функціонально дисипативний елемент у схемі підвищує ефективність всієї системи.

Продуктивні елементи постачають у систему функціональний продукт, паливо для інших елементів, а також не цільовий (вторинний) продукт – так звані «залишки» потоку.

У виразі (9) ρ_{ik} визначає частку «залишків» i -го дисипативного елемента у вартості k -го елемента [3]:

$$\rho_{ik} = \psi_{ki} \cdot \frac{P_k}{P_i}, \quad (10)$$

де $\psi_{ki} = \frac{E_{ki}}{F_i}$ – відношення потоку ексергії, що входить в дисипативний елемент, до його «палива».

В цьому випадку P_i є «продуктом» дисипативного елемента, який дорівнює величині ексергії R_{i0} , що відводиться від дисипативного елемента в навколишнє середовище, F_i – «паливо» дисипативного елемента.

Вартість «залишків», які розподіляються між елементами, можна записати як

$$R_{ki}^* = \psi_{ki} \cdot R_{k0}^*. \quad (11)$$

За умови, що цільовий «продукт» установки в еталонному і реальному режимах рівні ($\Delta P_T = 0$), додаткове споживання «палива» установкою ΔF_T можна виразити через MF і DF як

$$\Delta F_T = \sum_{k=1}^n \left(MF_k + \sum_{i=1}^m DF_{ki} \right) = \sum_{k=1}^n MF_k^*, \quad (12)$$

де MF_k^* – вартість аномалії в елементі (витрати ексергії «палива», що підводиться до системи на усунення втрат ексергії в елементі).

Рівняння ексергетичного балансу (1) характеризує тільки наявність втрат і не відображає їх взаємозв'язок в різних елементах схеми. Крім того, в залежності від топології схеми витрати ексергії «палива», що підводиться до системи на компенсацію втрат від незворотності в елементах, можуть бути як більше, так і менше самих втрат в елементі. Визначальною є «довжина шляху» перетворення ексергії.

Для обліку впливу структури технологічної схеми використовується матрична форма запису ексергетичних балансів [4]. Застосування до термодинамічних балансів теорії лінійних систем дозволяє швидко визначити ексергетичні характеристики кожної підсистеми. Такий підхід в значній мірі сприяє подоланню обчислювальних і методологічних труднощів, які зумовлені структурою зв'язків в системі та розмірністю задачі. Матриця інцидентій однозначно визначає зв'язок між елементами схеми і являє собою, по суті, математичну модель топології її структури. Число одиниць в кожному рядку матриці визначає локалізацію елементів з поділом або змішанням потоків ексергії, а знак вказує на підпорядкованість потоків по відношенню до кожного елемента.

Представлення когенераційної установки як складної системи і розбиття її на підсистеми (рис. 2), що пов'язані матеріальними потоками ексергії, дозволяє здійснити єдиний методологічний підхід до кількісного та якісного дослідження.

Визначення термодинамічних характеристик системи здійснюється виконанням покрокових розрахункових процедур:

1. Представлення обраної системи у вигляді потокового графу, визначення ексергетичних потоків по дугам графу.
2. Побудова матриці інцидентій, що відповідає ексергетичному потоковому графу.

3. Розрахунок сумарних втрат, покомпонентних втрат ексергії з урахуванням складових деструкції ексергії та визначення ексергетичної вартості продукту елемента та системи у цілому.

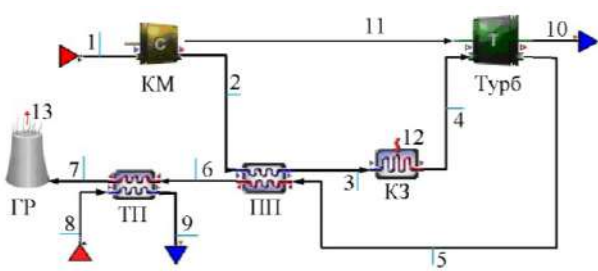


Рис. 2 – Принципова теплова схема когенераційної установки з нумерацією потоків між елементами

На рис. 2 підсистеми поділені наступним чином: компресор (КМ); турбіна (Турб); рекуперативний підігрівач повітря (ПП); камера згоряння (КЗ); теплообмінник парогенератор (ТП); градирня (ГР). Цифрами на рисунку означено номери ексергетичних потоків.

Для чисельної реалізації представленої вище термoeкономічної моделі нами розглянуто відому класичну схему когенераційної установки (CGAM-problem), що запропоновано у роботі [5]. Функціональну ексергетичну поточкову діаграму когенераційної установки з розташованою на ній контрольною поверхнею границь системи наведено на рис. 3. Тут кожна цифра в колі відповідає елементу установки (див. рис. 2) таким чином: 0 – навколишнє середовище (НС); 1 – КЗ; 2 – КМ; 3 – Турб; 4 – ПП; 5 – ТП; 6 – ГР.

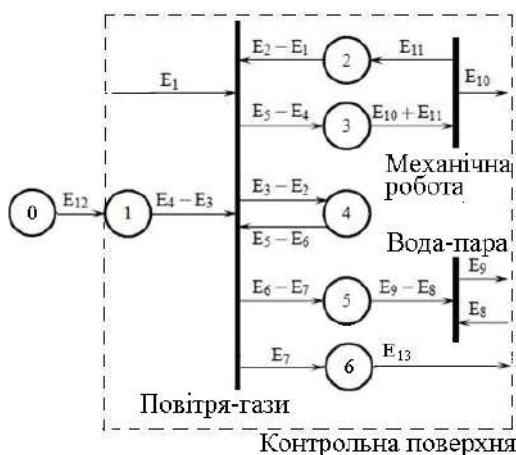


Рис. 3 – Функціональна ексергетична поточкова діаграма когенераційної установки

Декомпозиція ексергетичних потоків за ознакою «паливо» - «продукт» та за функціональним призначенням представлено в табл. 1, в якій прийнято наступні позначення: прод. – продуктивний елемент, а дис. – дисипативний елемент.

Таблиця 1 – Поділ ексергетичних потоків у когенераційній установці за ознакою «паливо» і «продукт» та за функціональним призначенням

| № | Назва елемента | Паливо F_i | Продукт P_i |
|---|----------------|-------------------------|-------------------|
| 0 | Н.С. (прод.) | $E_9 + E_{10} + E_{13}$ | E_{12} |
| 1 | КЗ (прод.) | E_{12} | $E_4 - E_3$ |
| 2 | КМ (прод.) | E_{11} | $E_2 - E_1$ |
| 3 | Турб (прод.) | $E_5 - E_4$ | $E_{10} + E_{11}$ |
| 4 | ПП (прод.) | $E_3 - E_2$ | $E_5 - E_6$ |
| 5 | ТП (прод.) | $E_6 - E_7$ | $E_9 - E_8$ |
| 6 | ГР (дис.) | E_7 | E_{13} |

Для комп'ютерного представлення структурних зв'язків схеми можна записати їх у вигляді орієнтованих графів $D = (V; L)$, що складаються з безлічі вершин V (елементи) і безлічі L упорядкованих пар вершин $i, k \in V$. По кожній дузі графа визначається ексергетична продуктивність окремої частини енергоперетворюючої системи.

Зв'язки між інцидентними елементами графа представлені матрицею A , далі – повною вхідною матрицею, в якій ряди відповідають елементам установки, а стовпці – потокам виробленої та споживаної роботи.

Вхідну матрицю A адекватну графу виробничої структури установки у загальному вигляді «паливо» і «продукт» (F/P) представлено у табл. 2.

Таблиця 2 – Узагальнений вигляд матриці A графу виробничої структури

| | F_0 | F_1 | ... | F_j | ... | F_n |
|-------|----------|----------|-----|----------|-----|----------|
| P_0 | | E_{01} | ... | E_{0j} | ... | E_{0n} |
| P_1 | E_{10} | E_{11} | ... | E_{1j} | ... | E_{1n} |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| P_i | E_{i0} | E_{i1} | ... | E_{ij} | ... | E_{in} |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| P_n | E_{n0} | E_{n1} | ... | E_{nj} | ... | E_{nn} |

Розмір матриці у нашому випадку 6 x 13 (6 – це основні елементи установки; 13 – потоки маси і робочі взаємодії). Вхідний в елемент потік позначається +1, а потік, що виходить – -1.

Для визначення ексергетичної вартості потоків E^* матрицю A необхідно доповнити рівняннями, які б відображали такі чинники:

1. Потоки, що вводяться в установку і їх ексергія.
2. Наявність у елемента кількох виходів, які з'єднані з іншим обладнанням системи.
3. Наявність «залишків», які мають нульову ексергію в тому випадку, якщо для їх усунення не витрачається додаткова ексергія, та, якщо витрачається – то її значення записується зі знаком «-».
4. Наявність побічних «продуктів».

В результаті система рівнянь для визначення E^* матиме вигляд:

$$\Lambda E^* = \Omega, \quad (13)$$

де $\Lambda = [\Lambda|\alpha]$ – квадратна розширена вхідна матриця, що складається з вхідної матриці Λ і внутрішньої матриці α , яка включає означені вище чинники; Ω – вектор-стовпець, який включає в себе наступні елементи: ексергію входу, ексергію «продуктів», ексергію «залишків».

На основі представленої вище матричної форми запису ексергетичного балансу визначаються вклади окремих потоків в ексергію «продуктів» системи і їх ексергетичну вартість, знаходяться складові ексергетичних втрат в елементах енергоустановки.

Ексергії потоків, що наведені у табл. 1 визначаються наступним чином. Для потоків з 1 по 7 рівняння для розрахунку ексергії у кВт має вигляд:

$$E_i = m_i(i_i - T_0 s_i),$$

де i_i, s_i – ентальпія та ентропія потоку, T_0 – температура навколишнього середовища, m_i – масова витрата робочої речовини циклу (повітря, топкові газу).

Ексергії потоків 8 та 9 (див. рис. 2) визначаються як

$$\begin{aligned} E_8 &= m_v [i_8 - i_0 - T_0 (s_8 - s_0)], \\ E_9 &= m_v [i_9 - i_0 - T_0 (s_9 - s_0)], \end{aligned}$$

де i_0, s_0 – ентальпія та ентропія речовини при температурі та тиску навколишнього середовища, m_v – масова витрата пари.

Ексергії інших потоків у системі: $E_{10} = W_{net}$, $E_{11} = W_{KM}$, $E_{12} = Q_{K3}$ та $E_{13} = E_7$, де W_{net} – корисна вихідна потужність турбіни W_{KM} – потужність приводу компресора, Q_{K3} – теплопродуктивність камери згоряння.

Ексергетичний ККД когенераційної установки визначається наступним чином

$$\eta_{sys} = \frac{W_{net} + (E_9 - E_8)}{E_{12}}. \quad (14)$$

Термодинамічна модель когенераційної установки

Для визначення ексергії потоків розглянемо термодинамічну модель когенераційної установки [6], яка є складовою загальної термоекономічної моделі та необхідна для визначення параметрів робочої речовини в основних вузлах схеми:

а. Повітряний компресор.

Температура повітря після стиснення у компресорі дорівнює

$$T_2 = T_1 \left\{ 1 + \frac{1}{\eta_{KM}} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k_a-1}{k_a}} - 1 \right] \right\},$$

при цьому тиск та температура на вході у компресор дорівнюють

$$P_1 = P_0; T_1 = T_0,$$

де T_0, P_0 – температура та тиск навколишнього середовища, ($T_0 = 298,15$ К; $P_0 = 1,013$ бар), k_a – показник адіабати процесу стиснення у компресорі. Потужність приводу компресора визначається як

$$W_{KM} = m_a c_{pa} (T_2 - T_1).$$

де m_a – масова витрата повітря у компресорі; c_{pa} – питома теплоємність повітря, ($c_{pa} = 1,004$ кДж/кг К).

б. Камера згоряння.

Витрата топкового газу розраховується як

$$m_g = m_a + m_f,$$

де m_f – масова витрата палива для всієї системи

Рівняння теплового балансу камери згоряння –

$$m_a i_3 + m_f Q_L = m_g i_4 + Q_{K3},$$

де i – ентальпія робочої речовини.

Теплопродуктивність визначається як

$$Q_{K3} = m_f Q_L (1 - \eta_{K3}),$$

а тиск на виході з камери згоряння –

$$P_4 = P_3 (1 - \Delta P_{K3}),$$

де Q_L – нижча теплота згоряння природного газу (50000 кДж/кг); η_{K3} – ККД камери згоряння; ΔP_{K3} – втрати тиску у камері згоряння.

в. Повітряний підігрівач.

Функціональним призначенням повітряного підігрівача є підвищення температури повітря перед камерою згоряння. За рахунок цього досягається підвищення адіабатної температури горіння палива у камері згоряння, що призводить відповідно до зменшення втрат ексергії у процесі згоряння.

Рівняння теплового балансу для повітряного підігрівача записується як

$$m_a c_{pa} (T_3 - T_2) = m_g c_{pg} (T_5 - T_6),$$

де c_{pg} – питома теплоємність топкового газу, ($c_{pg} = 1,17$ кДж/кг К).

Тиск повітря на виході із підігрівача (на вході у камеру згоряння)

$$P_3 = P_2 (1 - \Delta P_{III}^a),$$

а тиск топкових газів на виході із підігрівача –

$$P_6 = P_5 (1 - \Delta P_{III}^g),$$

де $\Delta P_{III}^a, \Delta P_{III}^g$ – втрата тиску потоку повітря та топкових газів у підігрівачеві відповідно.

Теплотехнічний ККД повітряного підігрівача

$$\eta_{III} = \frac{T_3 - T_2}{T_5 - T_2}.$$

г. Газова турбіна

Температура робочої речовини на виході з газової турбіни дорівнює

$$T_5 = T_4 \left\{ 1 - \eta_{Турб} \left[1 - \left(\frac{P_4}{P_5} \right)^{\frac{1-k_g}{k_s}} \right] \right\},$$

де k_g – показник адиабати процесу розширення у турбіні.

Потужність турбіни визначається за рівнянням

$$W_{Турб} = m_g c_{pg} (T_4 - T_5),$$

а корисна вихідна потужність турбіни –

$$W_{net} = W_{Турб} - W_{KM}.$$

е) Теплообмінник парогенератор.

Парогенератор за функціональним призначенням являє собою теплообмінник для регенерації енергії, який відновлює тепло від потоку гарячого газу. Принципова схема парогенератора та $T-Q$ діаграма потоків у ньому представлена на рис. 4.

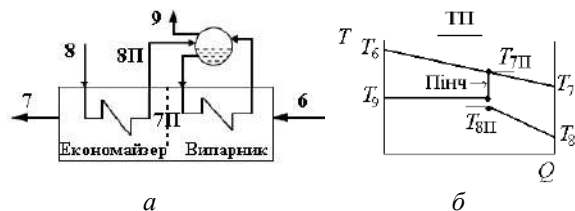


Рис. 4 – Принципова схема (а) та $T-Q$ діаграма потоків (б) у теплообміннику парогенераторі

Температура пари на виході з економайзерної ділянки теплообмінника парогенератора знаходиться як

$$T_{8П} = T_9 - \Delta T_A,$$

де ΔT_A – різниця між температурою генерованої пари і температури на виході з економайзерної ділянки теплообмінника, $\Delta T_A = 15$ К.

Рівняння теплового балансу парогенератора записується у наступному вигляді:

$$m_g c_{pg} (T_6 - T_{7П}) = m_s (i_9 - i_{8П}),$$

де m_s – масова витрата пари у теплообміннику парогенераторі.

Ентальпія у точці $7П$ (див. рис. 4) визначається за рівнянням

$$i_{7П} = c_{pg} (T_6 - T_0),$$

а різниця температур в точці пінча –

$$\Delta T_{П} = T_{7П} - T_9.$$

Температура газів на виході з теплообмінника дорівнює

$$T_7 = T_6 - \frac{m_s (i_9 - i_8)}{m_g c_{pg}}.$$

Тиск, газів після теплообмінника –

$$P_0 = P_6 (1 - \Delta P_{III}),$$

де ΔP_{III} – втрати тиску у теплообміннику парогенераторі.

Факторний аналіз термодинамічної моделі когенераційної установки

Метою факторного аналізу є побудова регресійної моделі ексергетичного ККД установки, яка визначається за рівнянням (14), як функції від основних визначальних факторів. Ця модель відображує функціональну взаємодію між елементами. Факторний аналіз проводився на основі теорії планування експерименту [7]. Був побудований композиційний план, що містив 16 варіантів експериментів з різним рівнем варіювання факторів. У якості визначальних факторів було обрано термічний ККД камери згоряння $\eta_{кз}^T$, який варіювався в діапазоні від 0,78 до 0,98, ізоентропний ККД компресора $\eta_{кМ}^{is}$ (0,74÷0,84), ізоентропний ККД турбіни $\eta_{Турб}^{is}$ (0,77÷0,8786), теплотехнічний ККД повітряного підігрівача η_{III}^T (0,72÷0,88). Досліджувався вплив визначальних факторів на показник ексергетичної вартості «продукту» кожного елемента. Вплив визначальних факторів на показник ексергетичної вартості «продукту» кожного елемента наведено на рис. 5.

Як можна бачити з рис. 5 при встановленні для факторів $\eta_{кз}^T$, $\eta_{кМ}^{is}$, $\eta_{Турб}^{is}$ та η_{III}^T верхнього рівня варіювання набувається зниження показника ексергетичної вартості «продукту» практично для всіх елементів установки. Виключення складає підігрівач повітря для якого підвищення ізоентропної ефективності компресора та турбіни навпаки призводить до збільшення показника його ексергетичної вартості. Це на нашу думку є типовим проявом інтеграційних властивостей системи.

Було встановлено залежність ексергетичного ККД установки від ексергетичних ККД її елементів, які є оберненими величинами ексергетичних вартостей елементів

$$\eta_k^{ex} = 1/k_k.$$

Ексергетична вартість k_k визначається за формулою (4) як відношення «палива» до «продукту» k -го елемента, які наведені у табл. 1. Регресійне рівняння,

що встановлює залежність між η_{sys} та визначальними факторами має наступний вигляд

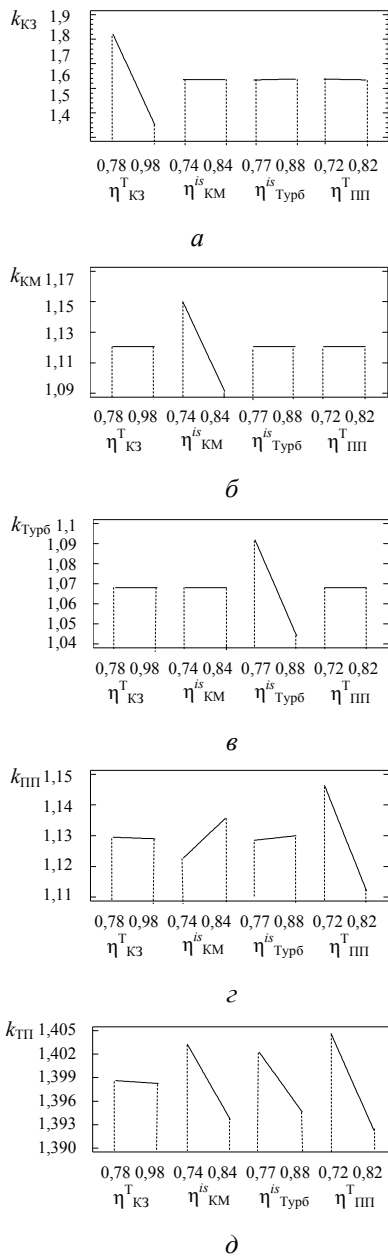


Рис. 5 – Вплив η_{kz}^T , η_{km}^{is} , η_{turb}^{is} та η_{pp}^T на показники k_{kz} (а), k_{km} (б), k_{turb} (в), k_{pp} (г), k_{tp} (д)

$$\eta_{sys}^{ex} = -0,5239 + 0,4831\eta_{kz}^T + 0,244\eta_{km}^{is} + 0,399\eta_{turb}^{is} + 0,00623\eta_{pp}^T$$

Ступень впливу на η_{sys} фактору η_{kz}^T дорівнює 0,90837; $\eta_{km}^{is} - 0,4350$; $\eta_{turb}^{is} - 0,5498$; $\eta_{pp}^T - 0,28594$.

Рівняння, що встановлює залежність між ексергетичним ККД установки та ексергетичними ККД її елементів ($\eta_k = 1/k_k$) має вигляд ступеневого поліному

$$\eta_{sys} = 0,582 \cdot \eta_{kz}^{0,994} \cdot \eta_{km}^{1,405} \cdot \eta_{turb}^{2,525} \cdot \eta_{pp}^{0,450} \cdot \eta_{tp}^{-1,628}$$

Ступень впливу на η_{sys} ексергетичних ККД елементів дорівнює: $\eta_{kz} - 0,9044$; $\eta_{km} - 0,4665$; $\eta_{turb} - 0,5216$; $\eta_{pp} - 0,3861$; $\eta_{tp} - 0,4486$.

Чисельна реалізація термoeкономічної моделі когенераційної установки

Розробка загальної термoeкономічної моделі на основі теорії ексергетичної вартості потребує визначення ексергій потоків у еталонному та дійсних режимах роботи установки. При визначенні параметрів еталонного режиму використовується процедура термодинамічної ідеалізації процесів, яка передбачає усунення технічних ексергетичних втрат згідно з рекомендаціями роботи [8].

У табл. 2 наведено вхідні параметри, при яких отримано ексергетичні характеристики системи у еталонному та дійсному режимах.

Розрахункові параметри установки для дійсного режиму наведено у табл. 3.

Таблиця 2 – Вхідні параметри

| Параметр | Еталонний режим | Дійсний режим |
|---|--------------------|---------------|
| Втрата тиску у камері згоряння, ΔP_{kz} , (бар) | 0,005 | 0,05 |
| ККД | η_{km}^{is} | 0,9 |
| | η_{turb}^{is} | 0,92 |
| | η_{pp}^T | 0,98 |
| Температура газів на вході в турбіну T_4 , °C | 1300 | 1200 |
| Різниця температур в точці пінча, ΔT_{p} , °C | 2 | 8 |

Таблиця 3 – Термодинамічні характеристики потоків системи когенерації для дійсного режиму

| № п/п | Потік | Масова витрата m , кг/с | Температура T , °C | Тиск p , бар | Ексергія потоку E , кВт |
|-------|-----------------------|---------------------------|----------------------|----------------|---------------------------|
| 1 | Повітря | 1,033 | 25 | 1,013 | 0 |
| 2 | -- | 1,033 | 325 | 8,634 | 285,5 |
| 3 | -- | 1,033 | 634,3 | 8,202 | 472,5 |
| 4 | Продукти згоряння | 1,049 | 1200 | 7,792 | 1043 |
| 5 | -- | 1,049 | 702,3 | 1,099 | 405 |
| 6 | -- | 1,049 | 441 | 1,066 | 195,6 |
| 7 | -- | 1,049 | 137,5 | 1,013 | 20,92 |
| 8 | Вода | 0,1383 | 25 | 1,013 | 0 |
| 9 | Водяна пара | 0,1383 | 212,4 | 20 | 126,3 |
| 10 | Потужність "нетто" | - | - | - | 300 |
| 11 | Потужність компресора | - | - | - | 311 |
| 12 | Метан | 0,0165 | 25 | 12,00 | 827,1 |
| 13 | Продукти згоряння | 1,049 | 137,5 | 1,013 | 20,92 |

Важливою складовою загальної термoeкономічної моделі є ексерго-топологічна модель установки на графах [9]. У табл. 4 наведені ексергії потоків для еталонного та дійсного режимів роботи та відповідне кодування потоків «паливо» - «продукт». Для чисельної реалізації побудованої ексерго-топологічної моделі був використаний програмний продукт вільного доступу TAESS у середовищі Excel [10].

Таблиця 4 – Ексергії потоків для еталонного та дійсного режимів

| Потік | Еталонний режим E, кВт | Дійсний режим E, кВт | Вихід з елемента | F/P | | |
|-------|------------------------|----------------------|------------------|----------------|-----|---|
| | | | | Вхід в елемент | F/P | |
| 1 | 0,00 | 0,00 | 0 | P | 2 | P |
| 2 | 281,51 | 285,12 | 2 | P | 4 | P |
| 3 | 468,25 | 472,45 | 4 | P | 1 | P |
| 4 | 1034,07 | 1042,7 | 1 | P | 3 | F |
| 5 | 401,61 | 404,96 | 3 | F | 4 | F |
| 6 | 192,78 | 195,57 | 4 | F | 5 | F |
| 7 | 20,98 | 20,92 | 5 | F | 6 | F |
| 8 | 0,00 | 0,00 | 0 | P | 5 | F |
| 9 | 124,27 | 126,26 | 5 | P | 0 | F |
| 10 | 300,00 | 300,00 | 3 | P | 0 | F |
| 11 | 305,92 | 310,96 | 3 | P | 2 | F |
| 12 | 820,73 | 827,11 | 0 | P | 1 | F |
| 13 | 20,96 | 20,92 | 6 | P | 0 | F |

Обговорення результатів чисельного експерименту

Результати розрахунку ексергетичних втрат, аномалій та дисфункцій, а також ексергетичної вартості в елементах наведено на рис. 6 – 9.

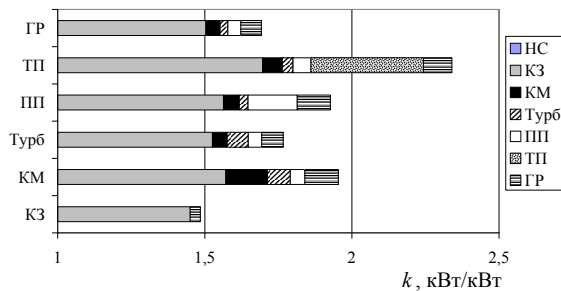


Рис. 6 – Ексергетична вартість «продукту» (еталонний режим)

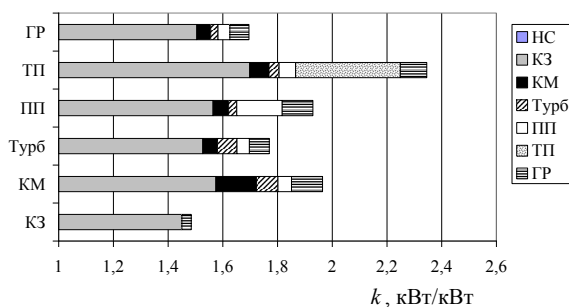


Рис. 7 – Ексергетична вартість «продукту» (дійсний режим)

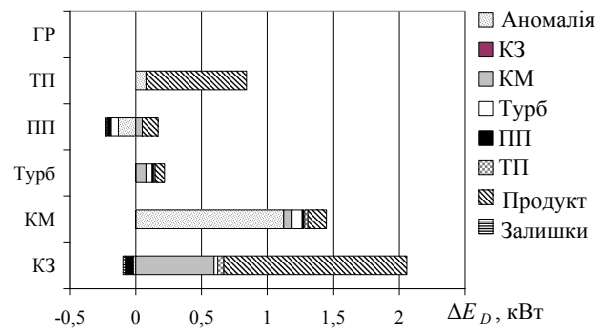


Рис. 8 – Змінення складових ексергетичних втрат в елементах енергоустановки

Як можна бачити з рис. 8 майже всі компоненти схеми (камера згоряння, компресор, турбіна, повітряний підігрівач) мають високу частку дисфункції (екзогенної складової деструкції ексергії), тобто їх ефективність у більшості визначається ексергетичними втратами у інших компонентах системи.

Наприклад, у камері згоряння та турбіні частка дисфункції складає більш 80 % від повних втрат у елементі. З практичної точки зору, це свідчить про те, що удосконалювати камеру згоряння за рахунок лише зменшення деструкції ексергії у неї, тобто без урахування деструкцій у інших компонентах, технічно не доцільно, тому що це не призведе до загального підвищення ефективності установки. Дещо меншою, але також значною є частка дисфункції у компресорі та повітряному підігрівачу (близько 30 %). Виключенням є теплообмінник парогенератор, у якому в порівнянні з еталонним режимом його роботи спостерігається збільшення частки аномалії (ендогенної складової деструкції ексергії) та втрат, пов'язаних з «продуктом» цього елемента.

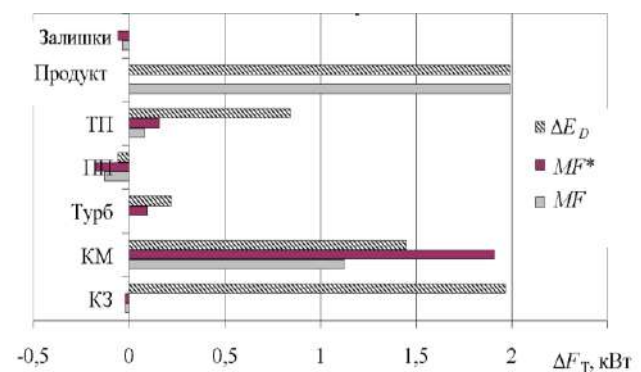


Рис. 9 – Аномалія, ексергетична вартість аномалії та ексергетичні втрати в елементах енергоустановки

Як можна бачити з рис. 9, ексергетична вартість аномалії в таких елементах, як компресор та підігрівач повітря, більше, ніж сама аномалія в елементі. Це пов'язано з нееквівалентністю

ексергетичних втрат в елементах, яка зумовлена «довжиною шляху» по ходу ланцюгу перетворення енергії в установці. Чим далі від входу в систему знаходиться елемент, тим більше вартість аномалії у цьому елементі. Так, наприклад, у першому по ходу перетворення енергії елементі – камері згоряння – ці величини є рівними.

Висновки

На основі створеної термoeкономічної моделі визначено вартість ексергетичних втрат в енергоустановці, розглянуто усі зміни, що відбуваються з ексергетичним потоком з моменту введення його в систему і до моменту вироблення кінцевого «продукту» установки з урахуванням вартості кожного внутрішнього потоку. Побудовані за результатами чисельної реалізації термoeкономічної моделі узагальнені регресійні залежності ексергетичного ККД системи від визначальних факторів дають змогу на етапі первинного проектування визначити енергоефективні режими роботи. Створена модель може бути доповнена функціями капітальної вартості елементів та використана у подальшій процедурі покрової термoeкономічної оптимізації.

Список літератури

1. **Lozano, M. A.** Theory of The Exergetic Cost / **M.A. Lozano, A. Valero** // *Energy*. – 1993. – № 18(9). – P. 939 – 960. – doi:10.1016/0360-5442(93)90006-Y.
2. **Мацевитий, Ю. М.** Термoeкономическая диагностика и оптимизация парокomppressorных термотрансформаторов / **Ю. М. Мацевитий, Д. Х. Харлампи, В. А. Тарасова, М. А. Кузнецов.** – Харьков: ЧП «Технологический Центр», 2016. – 160 с.
3. **Torres, C.** Structural theory and thermoeconomic diagnosis. Part 1. On malfunction and dysfunction analysis / **C. Torres, A. Valero, L. Serra, J. Royo** // *Energy Conversion and Management*. – 2002. – Vol. 43, № 9. – P. 1503–1518. – doi:10.1016/S0196-8904(02)00032-8.
4. **Чеджне, Ф.** Эксергeоeкономический анализ систем / **Ф. Чеджне, В. Ф. Флорес, Дж. К. Ордонес, Е. А. Ботеро** // *Теплоэнергетика*. – 2001. – № 1. – С. 74–79.
5. **Тсатсаронис, Дж.** Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы / **Дж. Тсатсаронис.** – Одесса: Негоциант, 2002. – 152 с.
6. **Valero, A.** CGAM Problem: Definition and Conventional Solution/ **A. Valero, M. A. Losano, G. Tsatsaronis, J. Pisa, C. Frangopoulos, M. R. Von Spakovsky** / *Energy*. – 1994. – Vol. 19. – №. 3. – P. 279-286. – doi: 10.1016/0360-5442(94)90112-0.

7. **Джонсон, Н.** Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы планирования эксперимента / **Н. Джонсон, Ф. Лион.** – М.: Мир, 1981. – 520 с.
8. **Мацевитий, Ю. М.** Инновационные системы термотрансформации. Анализ. Синтез. Оптимизация / **Ю. М. Мацевитий, Д. Х. Харлампи, В. А. Тарасова, М. А. Кузнецов.** – Харьков: ЧП «Технологический Центр», 2018. – 192 с.
9. **Kharlampidi, D.** Thermodynamic analysis of air-compression refrigerating machine based on the exergy cost theory / **D. Kharlampidi, V. Tarasova, M. Kuznetsov, E. Voytenko** // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2017. – Vol. 5, № 8 (89). – P. 30–38. – doi:10.15587/1729-4061.2017.112113.
10. **TAESS – Thermoeconomic Analysis of Energy Systems Software.** URL: <http://www.exergoecology.com/taess>.

References (transliterated)

1. **Lozano, M. A., Valero, A.** Theory of The Exergetic Cost. *Energy*, 1993, **18**(9), 939 – 960, doi:10.1016/0360-5442(93)90006-Y.
2. **Macevityj, Ju. M., Harlampidi, D. H., Tarasova, V. A., Kuznecov, M. A.** Термoeкономическая диагностика и оптимизация парокomppressorных термотрансформаторов. Харьков: ЧП «Технологический Центр», 2016, 160.
3. **Torres, C., Valero, A., Serra, L., Royo, J.** Structural theory and thermoeconomic diagnosis. Part 1. On malfunction and dysfunction analysis. *Energy Conversion and Management*, 2002, **43**, 9, 1503–1518, doi:10.1016/S0196-8904(02)00032-8.
4. **Chedzhne, F., Flores, V. F., Ordones, Dzh. K., Botero, E. A.** Jeksergеoeкономический анализ систем. Теплоэнергетика, 2001, **1**, 74–79.
5. **Tsatsaronis, Dzh.** Vzaimodejstvie termodinamiki i jekonomiki dlja minimizacii stoimosti jenergoпреобразующей системы. Odessa: Negociant, 2002, 152.
6. **Valero, A., Losano, M. A., Tsatsaronis, G., Pisa, J., Frangopoulos, C., Von Spakovsky, M. R.** CGAM Problem: Definition and Conventional Solution. *Energy*, 1994, **19**, 3, 279-286, doi: 10.1016/0360-5442(94)90112-0.
7. **Dzhonson, N., Lion, F.** Statistika i planirovanie jeksperimenta v tehnikе i nauke. Metody planirovanija jeksperimenta. M.: Mir, 1981, 520.
8. **Macevityj, Ju. M., Harlampidi, D. H., Tarasova, V. A., Kuznecov, M. A.** Innovacionnye sistemy termotransformacii. Analiz. Sintez. Optimizacija. Har'kov: ChP «Tehnologicheskij Centr», 2018, 192.
9. **Kharlampidi, D., Tarasova, V., Kuznetsov, M., Voytenko, E.** Thermodynamic analysis of air-compression refrigerating machine based on the exergy cost theory. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, **5**, 8 (89), 30 – 38, doi:10.15587/1729-4061.2017.112113.
10. **TAESS – Thermoeconomic Analysis of Energy Systems Software.** Available at: <http://www.exergoecology.com/taess>.

Сведения об авторах (About authors)

Тарасова Вікторія Олександрівна – кандидат технічних наук, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України, старший науковий співробітник відділу моделювання та ідентифікації теплових процесів; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-3252-7619; e-mail: vat523710@gmail.com.

Victoria Tarasova – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), A. M. Podgorny Institute Problem in Machinery of NAS of Ukraine, Senior Researcher of Department of Modeling and Identification of Thermal Processes, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-3252-7619; e-mail: vat523710@gmail.com.

Харлампіді Діоніс Харлампійович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України, провідний науковий співробітник відділу моделювання та ідентифікації теплових процесів; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-4337-6238; e-mail: kharlampidi@ipmach.kharkov.ua.

Dionis Kharlampidi – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, A. M. Podgorny Institute Problem in Machinery of NAS of Ukraine, Leading Researcher of Department of Modeling and Identification of Thermal Processes, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-4337-6238; e-mail: kharlampidi@ipmach.kharkov.ua.

Костіков Андрій Олегович – доктор технічних наук, член-кореспондент НАН України, доцент, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України, заступник директора інституту; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-6076-1942; e-mail: kostikov@ipmach.kharkov.ua.

Andrey Kostikov – Doctor of Technical Sciences, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine, docent, A. M. Podgorny Institute Problem in Machinery of NAS of Ukraine, Deputy Director of the Institute, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6076-1942; e-mail: kostikov@ipmach.kharkov.ua.

Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Тарасова, В. О. Термoeкономiчний аналіз когенераційної установки на основі теорії ексергетичної вартості / **В. О. Тарасова, Д. Х. Харлампіді, А. О. Костіков** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 45 (1321). – С. 59-69. – doi:10.20998/2413-4295.2018.45.08.

Please cite this article as:

Tarasova, V., Kharlampidi, D., Kostikov, A. Thermoconomic analysis of cogeneration installation (cgam) based on theory of the exergetic cost. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, **45** (1321), 59–69, doi:10.20998/2413-4295.2018.45.08.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Тарасова, В. А. Термoeкономический анализ когенерационной установки на основе теории эксергетической стоимости / **В. А. Тарасова, Д. Х. Харлампиди, А. О. Костиков** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2018. – № 45 (1321). – С. 59-69. – doi:10.20998/2413-4295.2018.45.08.

АННОТАЦИЯ Современные когенерационные системы представляют собой сложные энерготехнологические комплексы с высокой степенью рекуперации энергии. Предпроектный анализ этих систем должен учитывать как экономическую, так и термодинамическую составляющие процесса преобразования энергии. Наиболее научно обоснованной базой для разработки рекомендаций по проектированию агрегатов системы когенерации является современный метод термoeкономического анализа. На основе теории эксергетической стоимости построена термoeкономическая модель когенерационной установки, которая учитывает неэквивалентность эксергетических потерь в элементах, которая обусловлена структурно-топологическими особенностями технологической схемы. Термoeкономическая модель имеет иерархическую структуру, которая включает термодинамическую модель, необходимую для определения эксергий потоков, а также эксерго-топологическую модель, устанавливающую с помощью потоковых графов взаимосвязи между эксергетическими потоками в установке. Для визуализации термoeкономической модели предложена функциональная эксергетическая потоковая диаграмма когенерационной установки, которая помогает осуществить разделение потоков по качественному признаку «топливо» - «продукт» элемента. С целью дальнейшей совместной оценки эксергетических и экономических показателей системы в общую термoeкономическую модель могут быть привлечены функции капитальной стоимости ее элементов.

На основе численной реализации термoeкономической модели в технологической схеме установки определены участки, имеющие избыточное удельное потребление эксергии, а также аномалии и дисфункции в каждом элементе схемы. С привлечением методов теории планирования эксперимента построены регрессионные модели эксергетического КПД установки в зависимости от определяющих факторов, проведен факторный анализ и определено их взаимосвязанное влияние на эксергетическую эффективность установки.

Ключевые слова: термoeкономическая модель; эксергетическая стоимость; когенерация; факторный анализ; потоковые графы

Поступила (received) 20.11.2018