

УДК 621.1.016.4: 621.1.016.7

doi:10.20998/2413-4295.2021.02.07

## ФАКТОРНИЙ АНАЛІЗ ТЕПЛОВОЇ СХЕМИ ТЕЦ З СУПЕРКРИТИЧНИМ ПАРОВИМ ЦИКЛОМ НА ОСНОВІ ЕКСЕРГЕТИЧНОГО МЕТОДУ

**В. О. ТАРАСОВА**

Відділ моделювання та ідентифікації теплових процесів, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгоного НАН України, м. Харків, УКРАЇНА  
e-mail: tarasova@ipmach.kharkov.ua

**АНОТАЦІЯ** Найбільш перспективним напрямом модернізації ТЕЦ є впровадження енергоблоків на суперкритичних параметрах пари (СКП). Підвищення параметрів пари – це один з найбільш ефективних способів збільшення ККД ТЕЦ. Таким чином, розробка концепції створення теплових схем турбоустановок на СКП з урахуванням особливостей їх експлуатації на діючих ТЕЦ України є актуальною науковою проблемою. Вирішення цієї проблеми дозволить виконати заміну або модернізацію енергогенеруючого обладнання, що спрацювало свій ресурс, на сучасні енергоблоки, які відповідають світовим стандартам з економічності та екологічності. У статті адаптовано метод ексергетичного аналізу до дослідження теплових схем ТЕЦ з суперкритичним паровим циклом. Як приклад застосування методу проведено ексергетичний аналіз енергоустановки, що працює за одноступеневою тепловою схемою. У рамках запропонованого методу створено термодинамічну, а також тополого-ексергетичну модель енергоустановки. На основі тополого-ексергетичної моделі визначено показники термодинамічної ефективності енергоустановки, яка працює за суперкритичним паровим циклом. Запропоновано застосовувати теорію планування експерименту в ексергетичному аналізі теплової схеми ТЕЦ. Із залученням цієї теорії проведено багатофакторний чисельний експеримент по визначенню впливу на ексергетичну ефективність теплової схеми ТЕЦ основних визначальних варіюваних факторів, таких як адіабатні та теплотехнічні ККД елементів установки, а також режимні параметри її роботи. Отримано узагальнене рівняння функціонального взаємозв'язку ексергетичного ККД системи та ексергетичних ККД елементів теплової схеми ТЕЦ. Запропоноване рівняння може бути використане в якості інструментарію для подальшого навчання нейронних мереж та застосування їх як при проектуванні, так і при діагностиці енергетичної ефективності роботи ТЕЦ. За результатами факторного аналізу виявлено досить високу консервативність розглянутої одноступеневої схеми ТЕЦ до зміни варіюваних параметрів. Це свідчить про наявність досить жорстких структурних зв'язків між елементами теплової схеми, що в цілому є позитивним аспектом при її реконструкції.

**Ключові слова:** ексергетичний метод; суперкритичний паровий цикл; суперкритичні параметри пари; факторний аналіз; потокові графи; тополого-ексергетична модель; ТЕЦ

## FACTOR ANALYSIS OF THE THERMAL SCHEME OF CHP WITH SUPER CRITICAL STEAM CYCLE ON THE BASIS OF EXERGY METHOD

**V. TARASOVA**

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

**ABSTRACT** The most promising direction of CHP modernization is the introduction of power units on supercritical steam parameters. Increasing steam parameters is one of the most effective ways to increase the efficiency of a CHP plant. Thus, the development of the concept of thermal schemes turbines for supercritical steam parameters, taking into account the characteristics of their operation at the existing CHP Ukraine is an actual scientific problem. The solution to this problem will make it possible to replace or modernize the power generating equipment that has exhausted its resource with modern power units that meet world economic and environmental standards. The method of exergy analysis is adapted to the study of thermal schemes of CHP plants with supercritical steam cycle. As an example of application of a method the exergy analysis of the power plant working on the one-stage thermal scheme is carried out. Within the framework of the proposed method, a thermodynamic and topology-exergetic model of the power plant is created. Based on the topology-exergetic model the indicators of thermodynamic efficiency of the power plant operating on supercritical parameters of steam are determined. It is proposed to apply the theory of experiment planning in exergy analysis of the thermal circuit of a CHP. With the involvement of this theory, a multifactor numerical experiment was conducted to determine the impact on the exergetic efficiency of the thermal scheme of CHP of the main determining variable factors, such as adiabatic and thermal efficiency of the plant, as well as the operating parameters. The generalized equation of functional interrelation of exergetic efficiency of system and exergetic efficiency of elements of thermal scheme of CHP is received. The proposed equation can be used as a tool for further training of neural networks and their application both in the design and in the diagnosis of energy efficiency of CHP. According to the results of the factor analysis, a rather high conservatism of the considered one-stage scheme of CHP to the change of the varied parameters was revealed. This indicates the presence of more rigid structural links between the elements, which is generally a positive aspect of the reconstruction.

**Keywords:** exergy method; supercritical steam cycle; supercritical parameters of steam; factor analysis; flow graphs; topology-exergetic model; CHP

### Вступ

Актуальною проблемою сучасної енергетики України є переведення діючих енергогенеруючих

потужностей ТЕЦ на роботу при суперкритичних параметрах пари. Така реконструкція ТЕЦ може продовжити терміни експлуатації діючих

парогенераторів, поліпшити екологічні та економічні показники. Теплова потужність енергоблоків при переведенні їх на суперкритичні параметри циклу може зрости майже на 6–7 % (відносних), що дуже істотно. Наразі типовий діапазон суперкритичних параметрів складає від 245 бар до 285 бар при температурі від 540 °С до 596 °С. Подальше збільшення діапазонів режимів експлуатації, обумовлених введенням нових технологій і типів енергообладнання, вимагає докорінного перегляду підходів до якості проектування теплових схем. Відомо, що на розробку ТЕЦ витрачаються величезні кошти, тому в сучасних економічних умовах необхідно розвивати і вдосконалювати прогресивні методи аналізу і прийняття рішень при проектуванні теплових схем енергоперетворюючих систем.

### **Аналіз літератури і постановка задачі дослідження**

При аналізі доцільності проведення реконструкції теплової схеми ТЕЦ необхідно враховувати, що робота замінного обладнання визначається ефективністю не тільки основних, але і допоміжних елементів енергоблоку. Енергоблоки складаються з великого числа елементів, залежності між якими завжди складні. При цьому важливі не тільки параметри всередині енергоблоку, а й аналіз усіх можливих видів взаємодій потоків енергії на границях системи.

Одним з ефективних методів аналізу теплових схем є ексергетичний метод, який базується на використанні концепції ексергії [1–4]. Основою ексергетичного методу є оцінка стану енерготехнологічної системи в цілому і окремих її елементів за допомогою узагальненої термодинамічної характеристики (ексергії), що забезпечує кінцевий цільовий ефект. Метод дозволяє врахувати термодинамічну досконалість робочих процесів і вказати шляхи скорочення економічних витрат при створенні і експлуатації системи. Потоки ексергії є носіями вартості робочих процесів при отриманні корисного ефекту установки, а втрати ексергії, також як і економічні витрати, призводять до зростання вартості ексергії по ходу процесу перетворення енергії від точки введення в систему до отримання кінцевого продукту. Як відомо [5–7], у будь-якій енергоперетворюючій системі завжди існує елемент (або сукупність елементів), зміна термодинамічних втрат в якому найбільшою мірою позначається на ефективності системи в цілому. Наприклад, у енергоблоках з суперкритичними параметрами пари – це котлоагрегати [8,9].

З використанням ексергетичного методу комплексно можуть вирішуватися такі завдання, як термoeкономічна оптимізація енергоблоку або його підсистем, визначення раціональних умов функціонування, питання розподілу витрат між елементами енергоблоку.

Використовуючи ексергетичний підхід до проектування можна вибирати варійовані фактори,

зміна яких вирішальним чином впливає на ефективність системи. Таким чином вирішується завдання пошуку «вузького місця» в системі, де зростання витрат на одиницю ексергії відбувається особливо різко. Це дозволяє істотно звужити область варіації параметрів при пошуку раціональних технічних рішень по реконструкції елементів теплової схеми, що створює передумови для побудови еволюційних алгоритмів синтезу енергоперетворюючих систем. Тут виникає важливе завдання вибору стратегії розвитку виробничої енергосистеми.

Наразі в інженерну практику впроваджуються різні методи проектування складних технічних систем на основі застосування ексергетичного підходу [10,11]. Їх можна згрупувати у два класи: алгебраїчні і чисельні методи. Всі вони базуються на використанні термoeкономічних моделей або тополого-ексергетичних моделей, що сформовані зі складного набору лінійних рівнянь для визначення ексергетичного продукту кожного елемента системи. Серед алгебраїчних методів можна виділити: теорію ексергетичної вартості, теорію середніх витрат, метод вартісних ексергетичних витрат і модифікований продуктивний структурний аналіз [12–15]. До чисельних методів можна віднести термoeкономічний функціональний аналіз та інженерний-функціональний аналіз [9,16].

Серед авторів, які зробили істотний внесок у розвиток ексергетичного методу аналізу щодо застосування його у техніко-економічних розрахунках можна відзначити роботи А. І. Андрющенко, В. М. Бродянского, Ю. М. Хлебалина, Г. Н. Ноздренко [16–18]. Ними розроблені підходи, методи і алгоритми ексергетичного аналізу енергоперетворюючих систем, методики моделювання ексергетичних зв'язків і потоків витрат між енергоагрегатом і енергосистемами енергоблоків.

Разом із тим розроблені методи або спрощено, або взагалі не враховують вплив зворотних зв'язків при моделюванні потоків ексергії в теплових схемах енергоперетворюючих установок. Тим часом відомо [18], що внутрішні зв'язки і взаємодії підсистем в технічних системах, зворотні зв'язки в системах роблять будь-які, навіть лінійні задачі, нелінійними, так як підсистеми всередині системи впливають аналогічно тому, як наслідок впливає на причину. При проведенні ексергетичного аналізу найчастіше залишається без розгляду важливе питання: вплив якого фактору викликає безпосереднє зміну ексергетичних втрат в елементі, а який фактор надає непрямий вплив на ексергетичні втрати, оскільки не асоціюється з даним елементом?

Для аналізу чутливості схеми до зміни режимно-конструктивних параметрів використовуються структурні коефіцієнти, запропоновані в роботі [19]. Тим часом вони дають спрощену оцінку чутливості схеми. За допомогою структурних коефіцієнтів досліджується ефект одного

фактора і не враховується ефект взаємодії декількох факторів. У той же час відомо, що ефект одного фактора залежить від того, на якому рівні знаходиться інший фактор. Причому з ростом числа факторів число їх можливих взаємодій в системі значно зростає. Тому судити про те, чи є зміна будь-якого фактора позитивною в плані підвищення ефективності, можна лише відносно деяких окремих елементів схеми.

Визначення ефекту взаємодії факторів в теплових схемах ТЕЦ дозволить виявити приховані резерви для підвищення ефективності всієї системи. В цьому випадку розкриваються більш глибокі «кореневі» зв'язки між елементами, що дає можливість однозначно визначити пріоритетність заміни того чи іншого елемента при модернізації системи. Отримана в результаті інформація може служити основою для розробки технічних умов для проєктування і створення енергоблоків, організації їх управління, виявлення шляхів економії палива.

Метою даної частини роботи є розробка методики ексергетичного аналізу теплової схеми ТЕЦ, яка враховує взаємозв'язок ексергетичної цільової функції від ексергетичних ККД елементів.

Серед задач дослідження можна виокремити дві.

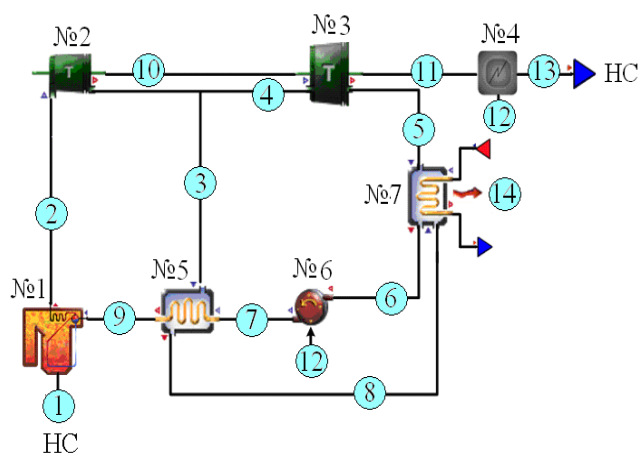
Перша задача – розробка термодинамічної та тополого-ексергетичної моделей енергоустановки.

Друга задача – знаходження функціональної залежності у вигляді регресійних рівнянь взаємозв'язку ексергетичної цільової функції від ексергетичних ККД елементів схеми ТЕЦ. Отримання регресійного рівняння взаємозв'язку ексергетичного ККД всієї системи і ексергетичних ККД елементів теплової схеми ТЕЦ. Встановлення залежності ексергетичної ефективності від контрольованих параметрів обладнання (наприклад, тиск, температура), а також показників теплотехнічної та ізоентропної ефективності обладнання.

### Термодинамічна модель енергоустановки

Розглянемо одноступінчасту теплову схему ТЕЦ (рис. 1). На рисунку наведено індексацію ексергетичних потоків (цифри у колі), а також нумерацію елементів: №1 – котел, №2 – частина турбіни високого тиску (ВТ), №3 – частина турбіни низького тиску (НТ), №4 – електричний генератор, №5 – проміжний теплообмінник, №6 – насос конденсатора, №7 – конденсатор.

При розробці термодинамічної моделі енергоустановка розглядається на кожному етапі розрахунків як система, що знаходиться в стаціонарному стані. Всі без винятку її параметри, а саме масові витрати, температури та тиск вважаються постійними. Розраховуються такі параметри, як ентальпії потоків та ентропії. Як варійовані параметри можуть задаватися ізоентропні ККД, електричні ККД і теплотехнічні ККД обладнання схеми, теплота згоряння палива, а також величини охолодження і нагрівання потоків в проміжному теплообміннику.



НС – навколишнє середовище

Рис. 1 – Теплова схема ТЕЦ

Розглянемо рівняння термодинамічної моделі за основними елементами:

1. Котел.

Рівняння теплового балансу котла –

$$M_2 \cdot H_2 = H_1 \cdot M_1 + M_9 \cdot H_9,$$

де  $M$  – масова витрата;  $H$  – ентальпія.

Втрати тиску у котлі можна записати  $\Delta P_{\text{котл}}$  як

$$\Delta P_{\text{котл}} = P_9 - P_2,$$

у першому наближенні  $\Delta P_{\text{котл}} = 5$  бар.

Теплопродуктивність котла визначається як

$$Q_{\text{котл}} = H_1 \cdot M_1 = PCS \frac{\eta_{\text{котл}}}{100} M_1,$$

де  $PCS$  – теплота згоряння палива;  $\eta_{\text{котл}}$  – теплотехнічний ККД котла.

За ентальпією робочого тіла (пари) та тиску  $P_2$  на виході з котлоагрегату знаходиться температура пари  $T_2$  ;

2. Частина турбіни високого тиску.

Температура робочої речовини на виході з турбіни дорівнює

$$T_4 = T_2 \left\{ 1 - \eta_{\text{втр}}^{\text{турб}} \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_4} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right] \right\},$$

де  $\gamma$  – показник адиабати процесу розширення у турбіні.

Тиск, температура, ентальпія та ентропії потоків пари у лініях 3 та 4 після турбіни високого тиску рівні, а саме:  $P_4 = P_3$ ,  $T_4 = T_3$ ,  $H_4 = H_3$ ,

$S_4 = S_3$ . При цьому баланс масових витрат записується як

$$M_2 = M_4 + M_3.$$

Адіабатний ККД частини турбіни ВТ у відсотках визначається за залежністю

$$\eta_{\text{вт}}^{\text{турб}} = \left[ \frac{H_2 - H_4}{H_2 - H_{4S}} \right] \cdot 100,$$

де  $H_{4S}$  – ентальпія пари при параметрах  $P_4, S_4 = S_2$ .

Потужність частини турбіни високого тиску знаходиться як

$$W_{\text{вт}}^{\text{турб}} = M_2 \cdot (H_2 - H_4);$$

### 3. Частина турбіни низького тиску.

Температура робочої речовини на виході з газової турбіни дорівнює

$$T_5 = T_4 \left\{ 1 - \eta_{\text{вт}}^{\text{турб}} \left[ 1 - \left( \frac{P_4}{P_5} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \right] \right\}.$$

де адіабатний ККД частини турбіни НТ у відсотках –

$$\eta_{\text{нт}}^{\text{турб}} = \left[ \frac{H_4 - H_5}{H_4 - H_{5S}} \right] \cdot 100,$$

а ентальпія пари у ідеальному циклі  $H_{5S}$  знаходиться при параметрах пари  $P_5, S_5 = S_4$ .

Потужність частини турбіни низького тиску визначається за формулою

$$W_{\text{нт}}^{\text{турб}} = M_4 \cdot (H_4 - H_5),$$

де масові витрати пари  $M_5 = M_4$ ;

### 4. Конденсатор.

Тепловий потік відведений від конденсатора дорівнює

$$Q_{\text{конд}} = M_5 \cdot H_5 + M_8 \cdot H_8 - M_6 \cdot H_6,$$

де  $M_6 = M_5 + M_8$ . Тиск в лініях 5 та 6 рівний  $P_5 = P_6$ ;

### 5. Насос конденсатора.

Потужність насоса визначається як

$$W_{\text{нас}} = M_6 \cdot (H_7 - H_6),$$

де масова витрата води  $M_6 = M_7$ .

Ентальпію води на виході з насоса  $H_7$  можна визначити з виразу ККД насоса у відсотках, який визначається як

$$\eta_{\text{нас}} = \frac{H_{7S} - H_6}{H_7 - H_6} \cdot 100,$$

де  $H_{7S}$  – ентальпія води після насоса без врахування втрат від незворотності.

### 6. Проміжний теплообмінник.

Масові витрати робочого тіла в теплообміннику  $M_7 = M_9$ ,  $M_3 = M_8$ , при цьому  $P_3 = P_8$ .

Тепловий баланс у проміжному теплообміннику можна представити у наступному вигляді:

$$M_3 \cdot H_3 + M_7 \cdot H_7 = M_8 \cdot H_8 + M_9 \cdot H_9,$$

де  $H_8$  – ентальпія води;  $H_9$  – ентальпія пари.

Охолодження в проміжному теплообміннику дорівнює

$$TT_D = T_3 - T_9,$$

а нагрівання води в проміжному теплообміннику

$$A_E = T_8 - T_7;$$

### 7. Генератор.

Електричний ККД генератора можна записати як

$$\eta_{\text{ген}}^{\text{ел}} = \frac{W_{\text{ел}} + W_{\text{нас}}}{W_{\text{вт}}^{\text{турб}} + W_{\text{нт}}^{\text{турб}}}.$$

З цього рівняння можна визначити електричну потужність енергоустановки  $W_{\text{ел}}$ ;

Ексергія  $i$ -го потоку ( $i = 2$  по  $9$ ) визначається за формулою

$$E_i = M_i \cdot (H_i - H_0 - ((T_0 - 273,15) \cdot (S_i - S_0))),$$

Індксацію потоків показано на рис. 1. Тиск та температура навколишнього середовища дорівнює  $P_0 = 1,013$  бар;  $T_0 = 20$  °C.

Ексергія 1-го потоку дорівнює  $E_1 = Q_{\text{котл}}$ , а ентропія  $-S_1 = 0$ .

Ексергії потоків з 10-го по 13-й можна записати як  $E_{10} = W_{\text{вт}}^{\text{турб}}$ ,  $E_{11} = W_{\text{нт}}^{\text{турб}}$ ,  $E_{12} = W_{\text{нас}}$ ,  $E_{13} = W_{\text{ел}}$ .

Потік ексергії 14 на виході з конденсатора визначається як

$$E_{14} = Q_{\text{конд}} \left[ 1 - \left( \frac{T_0 + 273,15}{T_5 + 273,15} \right) \right];$$

Ексергетичний ККД енергоустановки визначається за залежністю

$$\varepsilon_{\text{снст}} = \frac{E_{13}}{E_1}.$$

**Тополого-ексергетична модель енергоустановки на суперкритичних параметрах**

При побудові тополого-ексергетичної моделі використовується структурна теорія термoeкономіки, яка була розроблена представниками іспанської школи прикладної термодинаміки проф. А. Валеро і проф. М. Лозано [20]. Опис виробничої структури енергоблоку здійснюється за допомогою подання ексергетичних потоків за якісною ознакою паливо/продукт елемента енергоустановки з використанням LIFO-принципу декомпозиції потоків (останній виходить першим) [20]. Модель являє собою математичний опис роботи комплексу елементів енергоустановок, що взаємопов'язані потоками ексергії, з урахуванням процесу перетворення ексергії в кожному з них. За допомогою тополого-ексергетичної моделі встановлюється взаємозв'язок між ексергетичним ККД системи і ексергетичними ККД елементів.

Детальний алгоритм розробки тополого-ексергетичної моделі виробничої структури енергоустановки наведено авторами цієї роботи в монографії [11]. Тому в статті розглянемо лише загальні принципи її побудови.

Рівняння балансу ексергії для  $k$ -го елемента можна представити як

$$F_k - P_k - R_k = E_{D,k},$$

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

Для потоку «палива» кожного елемента можна записати таке співвідношення:

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

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

При цьому потік з індексом  $i$  буде зі знаком «+», якщо він входить з  $i$ -го елемента в  $k$ -й, а зі знаком «-», якщо потік виходить з  $k$ -го елемента та входить в  $i$ -й елемент.

«Продукт» елемента запишемо як

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

де  $E_{k0}$  – потоки ексергії, що є «продуктом» для навколишнього середовища;  $E_{ki}$  – потоки ексергії, що виходять з  $k$ -го елемента як «продукт» і входять до  $i$ -го елемента як «паливо».

Ексергетичний ККД елемента обчислюється наступним чином:

$$\varepsilon_k = P_k / F_k.$$

Для комп'ютерного моделювання структурних зв'язків схеми використовується матрична форма запису ексергетичних балансів. Структурні зв'язки представляються у вигляді орієнтованих графів  $D = (V; L)$ , які складаються з множини  $V$ , що відповідає елементам системи, та множини  $L$ , яка описує упорядковані пари вершин цієї системи.

Кожна функціонуюча частина енергоблоку, яка представлена на графі вершиною, розглядається як перетворювач ексергії і має уніфікований математичний опис. Величини потоків ексергії тут розглядаються як сигнали системи. По кожній дузі графа визначається ексергетична продуктивність окремої частини системи. Сформована таким чином топологічна модель дозволяє встановити залежність взаємозв'язку між зміною технологічної топології і кількісними характеристиками системи від вхідних змінних, які впливають на систему.

На рис. 2 представлено графічне відображення структурно-топологічної схеми ТЕЦ (див. рис. 1) у вигляді орієнтованого графа.

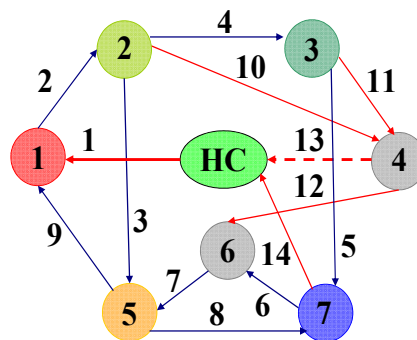


Рис. 2 – Орієнтований граф, що відображає роботу енергоустановки

Згідно з правилами структурної теорії термoeкономіки записується декомпозиція ексергетичних потоків на «паливо» та «продукт» (табл. 1) [10].

На основі матричної форми запису ексергетичного балансу визначаються вклади окремих потоків в ексергію «продуктів» системи та їх ексергетична вартість, знаходяться складові ексергетичних втрат в елементах енергоустановки, розраховуються ексергетичні ККД елементів.

У табл. 1 навколишнє середовище – це елемент, позначений номером «0».

Таблиця 1 – Декомпозиція ексергетичних вартісних потоків за ознакою «паливо»–«продукт» (рис. 2)

№ елемента	Паливо	Продукт
0	$E_{13} + E_{14}$	$E_1$
1	$E_1$	$E_2 - E_9$
2	$E_2 - E_3 - E_4$	$E_{10}$
3	$E_4 - E_5$	$E_{11}$
4	$E_{10} + E_{11}$	$E_{12} + E_{13}$
5	$E_3 - E_8$	$E_9 - E_7$
6	$E_{12}$	$E_7 - E_6$
7	$E_5 - E_6 + E_8$	$E_{14}$

Тополого-ексергетична модель виробничої структури теплової схеми ТЕЦ, що наведена вище, надалі є інструментом для пошуку оптимальних умов роботи енергоустановки.

#### Факторний аналіз теплової схеми ТЕЦ на основі тополого-ексергетичної моделі

При проведенні факторного аналізу, який спрямовано на визначення головних ефектів та ефектів взаємодії факторів, будемо використовувати теорію планування експерименту [21].

Для теплової схеми ТЕЦ потужністю 300 МВт, яку представлено на рис. 1, розглядалися дві задачі. По-перше досліджувався ефект впливу показників ефективності елементів енергоустановки на загальний ексергетичний ККД та окремі ККД елементів при заданому режимі роботи. Другим завданням було визначення впливу режимних параметрів роботи схеми при заданій ефективності обладнання.

При вирішенні першого завдання був побудований двоблоковий композиційний план, що включає 128 варіантів розрахунків при варіативності на різних рівнях 7 факторів. Як варійовані фактори були обрані: теплотехнічний ККД котла  $\eta_{\text{котл}}$ , адиабатний ККД частини турбіни ВТ  $\eta_{\text{вт}}^{\text{турб}}$ , адиабатний ККД частини турбіни НТ  $\eta_{\text{нт}}^{\text{турб}}$ , електричний ККД генератора  $\eta_{\text{ген}}^{\text{ел}}$ , ККД насоса  $\eta_{\text{нас}}$ , охолодження в проміжному теплообміннику  $TT_D$ , нагрів води в проміжному теплообміннику  $A_E$ . У табл. 2 вказано нижній і верхній рівні варіювання при проведенні 7-факторного експерименту.

При розрахунках задавалися наступні параметри пари на вході в турбіну ВТ:  $P_1 = 254$  бар,  $T_1 = 571$  °С; тиск пари на вході в турбіну НТ та на виході з неї:  $P_{\text{пр}} = 60,55$  бар,  $P_{\text{к}} = 0,0545$  бар.

Нижче наведені результати аналізу ексергетичної ефективності всієї схеми та окремих її елементів.

Регресійне рівняння зв'язку ексергетичного ККД системи  $\epsilon_{\text{сист}}$  та ексергетичних ККД елементів  $\epsilon_k$  має такий вигляд:

$$\epsilon_{\text{сист}} = (-1,0575 + 0,7542\epsilon_{\text{котл}} + 0,1878\epsilon_{\text{вт}}^{\text{турб}} + 0,242\epsilon_{\text{нт}}^{\text{турб}} + 0,3854\epsilon_{\text{ген}}^{\text{ел}} + 0,0665\epsilon_{\text{то}} + 0,0116\epsilon_{\text{нас}} + 0,2338\epsilon_{\text{конд}}).$$

Таблиця 2 – Діапазон варіювання при проведенні 7-факторного експерименту

Фактор	Нижній рівень	Верхній рівень
$\eta_{\text{котл}}$ , %	75	89
$\eta_{\text{вт}}^{\text{турб}}$ , %	85	95
$\eta_{\text{нт}}^{\text{турб}}$ , %	85	95
$\eta_{\text{ген}}^{\text{ел}}$ , %	92	97
$\eta_{\text{нас}}$ , %	80	90
$TT_D$ , К	10	20
$A_E$ , К	5	10

Значення максимальної помилки складає 0,00273; середньостатистичне відхилення – 0,00111.

Ступінь впливу ексергетичних ККД елементів на ККД енергосистеми:

$$\epsilon_{\text{котл}} - 0,885, \epsilon_{\text{вт}}^{\text{турб}} - 0,116, \epsilon_{\text{нт}}^{\text{турб}} - 0,335, \epsilon_{\text{ген}} - 0,3099, \epsilon_{\text{то}} - (-0,02), \epsilon_{\text{нас}} - 0,04, \epsilon_{\text{конд}} - 0,084.$$

Аналіз отриманого рівняння регресії показав, що найбільшим впливовим елементом схеми щодо підвищення ефективності є котел, а найменшим – проміжний теплообмінник. Знак «-» вказує на зворотну залежність. Удосконалення ТО не доцільно, а навіть призведе до гірших наслідків для всієї схеми, оскільки втрати в ньому обумовлені впливом структурної незворотності всієї теплової схеми.

На рис. 3 показано основний ефект впливу факторів на ексергетичний ККД енергоустановки. Залежність  $\epsilon_{\text{сист}}$  отримано при зміні від нижнього до верхнього почергово всіх розглянутих факторів, коли інші фактори мають середній рівень. Наприклад,  $\eta_{\text{котл}}$  змінюється від 75 % до 89 %, а  $\eta_{\text{вт}}^{\text{турб}} = 90$  %,  $\eta_{\text{нт}}^{\text{турб}} = 90$  %,  $\eta_{\text{ген}}^{\text{ел}} = 94,5$  % і так далі.

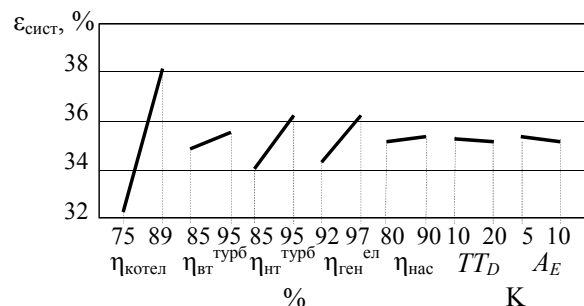


Рис. 3 – Основний ефект впливу факторів на ексергетичний ККД теплової схеми ТЕЦ

Розрахунки показали, що розглянута теплова схема ТЕЦ в цілому має низьку ексергетичну ефективність від 30 % (при нижньому рівні факторів) до 40,9 % (при верхньому рівні факторів), а ексергетичний ККД компресора змінюється від 42,6 % до 51 %. Тим часом, вона має певний прихований резерв для її підвищення. Про це можуть

свідчити високі значення ексергетичних ККД окремих її елементів, наприклад, конденсатора, які становлять 92 ÷ 96 % (рис. 4). Слід зазначити, що чим більше розбіжність між значеннями ексергетичного ККД системи і ексергетичними ККД її елементів, тим вище цей резерв при модернізації теплової схеми.

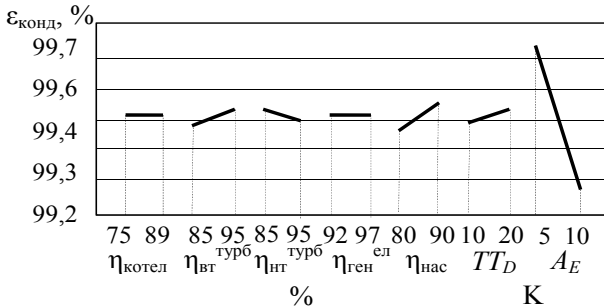


Рис. 4 – Вплив основних факторів на ексергетичний ККД конденсатора

Така ситуація обумовлена розвиненою внутрішньою регенерацією теплоти в схемі і наявністю циркуляційних потоків, які переносять ексергію, що перевищує ексергію на вході в систему.

Найбільший внесок в підвищення ефективності всієї схеми можна досягти вдосконаленням котла і частини турбіни низького тиску. Щодо котла, то такі заходи можуть мати деякі обмеження. За розрахунком максимально досяжний ексергетичний ККД котла в розглянутих умовах 50,6 %.

Можна відзначити фактично лінійний характер зміни ексергетичних ККД елементів від варійованих факторів без значного взаємовпливу на характеристики інших елементів. Це говорить про певну консервативність схеми, тобто вдосконалення розглянутого елемента позначиться тільки на самому елементі. Виняток становлять два елемента в схемі (конденсатор (див. рис. 4) і проміжний теплообмінник), при аналізі яких необхідно враховувати інтеграційні властивості системи.

На рис. 5 наведено залежність ексергетичного ККД проміжного теплообмінника в залежності від варійованих факторів.

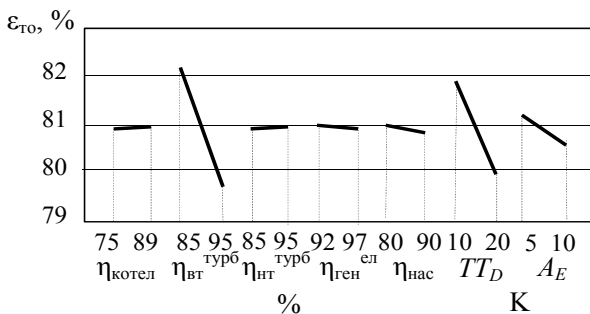


Рис. 5 – Ексергетичний ККД проміжного теплообмінника в залежності від варійованих факторів

При вирішенні другого завдання аналізу режимних параметрів був складений центральний композиційний план, який містить серію з 18 експериментів при варіативності 4 факторів. Як варійовані фактори були обрані: тиск пари на вході в турбіну високого тиску  $P_1$ , температура пари на вході в турбіну високого тиску  $T_1$ , проміжний тиск  $P_{пр}$ , тиск конденсації пари  $P_к$ . У табл. 3 вказано нижній та верхній рівні варіювання. Фіксованими приймалися такі показники роботи обладнання: ККД котла – 89 %, адіабатний ККД частини турбіни ВТ – 95 %, адіабатний ККД частини турбіни НТ – 95 %, ККД генератора – 97 %, ККД насоса – 90 %,  $TT_D = 20$  К,  $A_E = 10$  К.

Таблиця 3 – Діапазон варіювання факторів при аналізі режимних параметрів

Фактор	Нижній рівень	Верхній рівень
$P_1$ , бар	254	300
$T_1$ , °С	571	596
$P_{пр}$ , бар	60,55	70,3
$P_к$ , бар	0,0545	0,065

На рис. 6–9 показано залежності ексергетичного ККД системи та ексергетичних ККД елементів від зміни режимних параметрів.

Як можна бачити з рис. 6–9 неоднозначним фактором щодо впливу на ексергетичну ефективність всієї теплової схеми з надкритичними параметрами водяної пари і окремих її елементів є вибір тиску пари на вході в частину турбіни ВТ.

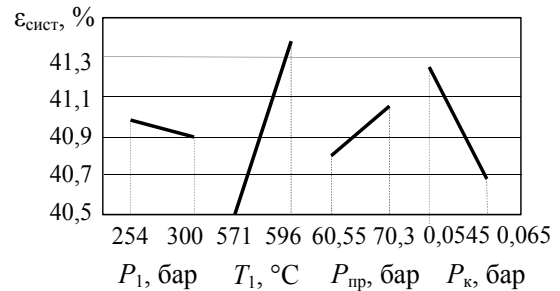


Рис. 6 – Ексергетичний ККД системи в залежності від зміни режимних параметрів

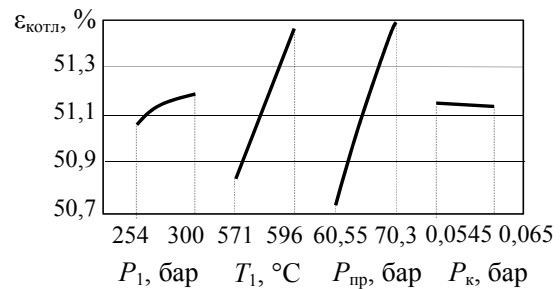


Рис. 7 – Ексергетичний ККД котла в залежності від режимних параметрів

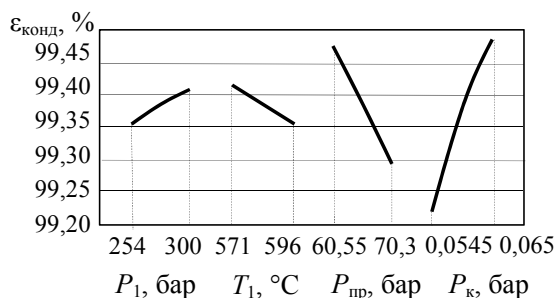


Рис. 8 – Ексергетичний ККД конденсатора в залежності від режимних параметрів

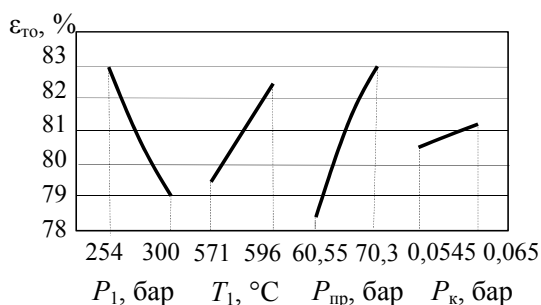


Рис. 9 – Ексергетичний ККД ТО в залежності від режимних параметрів

Для підвищення ефективності системи тиск пари  $P_1$  доцільно підтримувати на нижньому рівні обраного інтервалу варіювання. Це пов'язано з тим, що з ростом  $P_1$  збільшується вологість пари після турбіни низького тиску до 20 %. Проте підвищення  $T_1$  призводить до збільшення загальної ефективності схеми при зниженні вологості пари. Цей результат показує, що для роботи ТЕЦ на суперкритичних параметрах пари при подальшому підвищенні тиску слід обирати схеми з проміжним перегрівом пари. Це питання буде доопрацьовано в дослідженнях на наступному етапі з урахуванням обраних схем модернізації енергоблоків ТЕЦ.

### Висновки

У рамках розробленого підходу до проведення ексергетичного факторного аналізу теплових схем ТЕЦ з суперкритичними параметрами пара вирішено наступні завдання.

1. Створено термодинамічну і топологічно-ексергетичну модель теплової схеми ТЕЦ, що дозволило провести розрахунок статичних характеристик енергоустановки, визначити значення ексергії потоків і ексергетичної ефективності кожного елемента і системи в цілому.

2. Запропоновано застосовувати теорію планування експерименту в ексергетичному аналізі теплової схеми ТЕЦ, що працює за суперкритичними параметрами пари. На основі цієї теорії отримано регресійні рівняння функціонального зв'язку ексергетичного ККД системи і ексергетичних ККД елементів. Запропоноване рівняння може бути використане в якості інструментарію для подальшого

навчання нейронних мереж при створенні відповідного програмного забезпечення для розрахунку теплової схеми. Встановлено головні ефекти впливу варійованих параметрів і ефекти їх взаємодії на ексергетичну ефективність.

3. За результатами факторного аналізу виявлено досить висока консервативність розглянутої одноступеневої схеми ТЕЦ до зміни варійованих параметрів. Це свідчить про наявність досить жорстких структурних зв'язків між елементами, що в цілому є позитивним аспектом при реконструкції енергоустановки.

### Список літератури

1. Kumar R. A critical review on energy, exergy, exergoeconomic and economic (4-E) analysis of thermal power plants. *Engineering Science and Technology, an International J.* 2017. Vol. 20. P. 283–292. doi:10.1016/j.jestch.2016.08.018.
2. Restrepo A., Miyake R., Kleveston F., Bazzo E. Exergetic and environmental analysis of a pulverized coal power plant. *Energy.* 2012. Vol. 45 (1). P. 195–202. doi:10.1016/j.energy.2012.01.080.
3. Li Y. Thermodynamic analysis and optimization of a double reheat system in an ultra-supercritical power plant. *Energy.* 2014. Vol. 74. P. 202–214. doi:10.1016/j.energy.2014.05.057.
4. Cui J., Chai T., Liu X. Deep-neural-network-based economic model predictive control for ultra-supercritical power plant. *IEEE Trans. Ind. Inform.* 2020. Vol. 16. P. 5905–5913. doi:10.1109/tii.2020.2973721.
5. Adibhatla S., Kaushik S.C. Energy and exergy analysis of a super critical thermal power plant at various load conditions under constant and pure sliding pressure operation. *Appl. Therm. Eng.* 2014. Vol. 73 (1). P. 49–63. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.07.030
6. Ahmadi Gh. R., Toghraie D. Energy and exergy analysis of montazeri steam power plant in Iran. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2016. Vol. 56. P. 454–463. doi:10.1016/j.rser.2015.11.074
7. Ahmadi P., Dincer I. Thermodynamic analysis and thermoeconomic optimization of a dual pressure combined cycle power plant with a supplementary firing unit. *Energy Convers. Manage.* 2011. Vol. 52 (5). P. 2296–2308. doi:10.1016/j.enconman.2010.12.023.
8. Liu X. J., Kong X. B., Hou G. L., Wang J.H. Modeling of a 1000 MW power plant ultra super-critical boiler system using fuzzy-neural network methods. *Energy Convers. Manage.* 2013. Vol. 53. P. 518–527. doi:10.1016/j.enconman.2012.07.028
9. Zhang, L.; Kong, X.; Lee, K.Y. Stacked auto-encoder modeling of an ultra-supercritical boiler-turbine system. *Energies.* 2019. Vol. 12 (21). 4035. doi:10.3390/en12214035.
10. Bejan A., Tsatsaronis G. Purpose in Thermodynamics. *Energies.* 2021. Vol. 14. 408. doi:10.3390/en14020408.
11. 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. Vol. 5. № 8 (89). P. 30–38. doi:10.15587/1729-4061.2017.112113
12. Lukowicz H., Dykas S., Rulik S., Stepczynska K. Thermodynamic and economic analysis of a 900 MW ultra-



- supercritical power unit. *Archives of thermodynamics*, 2011. Vol. 32. № 3. P. 231–244. doi:10.2478/v10173-011-0025-1.
13. Peyyala N. R., Govindarajulu Dr. K. Technology thermodynamic analysis of 1200 MW coal based supercritical thermal power plant with single and double reheating. *Int. J. of Engineering Sciences & Research Technology*, 2017. Vol. 3. P. 677–684.
  14. Hastia S., Aroonwilasa A., Veawaba A. Exergy Analysis of Ultra Super-Critical Power Plant. *Energy Procedia*, 2013. Vol. 37. P. 2544–2551. doi: 10.1016/j.egypro.2013.06.137.
  15. 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. Vol. 43. № 9. P. 1503–1518. doi:10.1016/S0196-8904(02)00032-8.
  16. Sun L., Li D., Lee K. Y., Xue Y. Control-oriented modeling and analysis of direct energy balance in coal-fired boiler-turbine unit. *Control Eng. Pract.* 2016. Vol. 55. P. 38–55. doi: 10.1016/j.conengprac.2016.06.013.
  17. Ноздренко Г. Н., Шинников П. А. *Комплексный эксергетический анализ энергоблоков ТЭЦ с новыми технологиями: монография*. Новосибирск: Изд. НГТУ, 2009. 190 с.
  18. Мацевитый Ю. М., Харлампида Д. Х., Тарасова В. А., Кузнецов М. А. *Термоэкономическая диагностика и оптимизация пароконденсаторных термотрансформаторів: монография*. Харьков: ЧП «Технологический Центр». 2016. 160.
  19. Бродянский В. М., Фратшер В., Михалек К. *Эксергетический метод и его приложения: монография*. Москва: Энергоатомиздат. 1988. 88 с.
  20. Pina E.A., Lozano M.A., Serra L.M. Thermoeconomic cost allocation in simple trigeneration systems including thermal energy storage. *Energy*, 2018. Vol. 153. P. 170–184. doi: 10.1016/j.energy.2018.04.012.
  21. Theodore A. *Introduction to Engineering Statistics and Lean Sigma: Statistical Quality Control and Design of Experiments and Systems*. Springer, 2018. 656 p.
  7. Ahmadi P., Dincer I. Thermodynamic analysis and thermoeconomic optimization of a dual pressure combined cycle power plant with a supplementary firing unit. *Energy Convers. Manage*, 2011, Vol. 52(5), pp. 2296–2308, doi: 10.1016/j.enconman.2010.12.023.
  8. Liu X. J., Kong X. B., Hou G. L., Wang J. H. Modeling of a 1000 MW power plant ultra super-critical boiler system using fuzzy-neural network methods. *Energy Convers. Manag*, 2013, Vol. 53, pp. 518–527, doi: 10.1016/j.enconman.2012.07.028.
  9. Zhang L., Kong X., Lee K.Y. Stacked auto-encoder modeling of an ultra-supercritical boiler-turbine system. *Energies*, 2019, Vol. 12 (21), 4035, doi: 10.3390/en12214035.
  10. Bejan A., Tsatsaronis G. Purpose in Thermodynamics, 2021, *Energies*, 2021, Vol. 14, p. 408, doi: 10.3390/en14020408.
  11. 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, Vol. 5. №8 (89), pp. 30–38, doi: 10.15587/1729-4061.2017.112113.
  12. Lukowicz H., Dykas S., Rulik S., Stepczynska K. Thermodynamic and economic analysis of a 900 MW ultra-supercritical power unit. *Archives of thermodynamics*, 2011, Vol. 32, № 3, pp. 231–244, doi: 10.2478/v10173-011-0025-1.
  13. Peyyala N. R., Govindarajulu Dr. K. Technology thermodynamic analysis of 1200 MW coal based supercritical thermal power plant with single and double reheating. *Int. J. of Engineering Sciences & Research Technology*, 2017, Vol. 3, pp. 677–684.
  14. Hastia S., Aroonwilasa A., Veawaba A. Exergy Analysis of Ultra Super-Critical Power Plant. *Energy Procedia*, 2013, Vol. 37, pp. 2544–2551, doi:10.1016/j.egypro.2013.06.137.
  15. 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, Vol. 43, no. 9, pp. 1503–1518, doi: 10.1016/S0196-8904(02)00032-8.
  16. Sun L., Li D., Lee K.Y., Xue Y. Control-oriented modeling and analysis of direct energy balance in coal-fired boiler-turbine unit. *Control Eng. Pract.*, 2016, Vol. 55, pp. 38–55, doi: 10.1016/j.conengprac.2016.06.013.
  17. Nozdrenoko G. N., Shinnikov P. A. *Kompleksnyy eksergeticheskiy analiz energoblokov TETS s novymi tekhnologiyami* [Complex exergy analysis of CHP power units with new technologies]. Novosibirsk, 2009, 190 p.
  18. Matsevity Yu. M., Kharlampidi D. Kh., Tarasova V.A., Kuznetsov M.A. *Termoekonomicheskaya diagnostika i optimizatsiya parokompressornykh termotransformatoriv* [Thermoeconomic diagnostics and optimization of steam compressor thermal transformers]. Kharkov, 2016, 160 p.
  19. Brodyansky V. M., Fratscher V., Mikhalek K. *Eksergeticheskiy metod i yego prilozheniya*. Moskva, *Energoatomizdat* [Exergetic method and its applications]. Moscow, 1988, 88 p.
  20. Pina E.A., Lozano M.A., Serra L.M. Thermoeconomic cost allocation in simple trigeneration systems including thermal energy storage. *Energy*, 2018, Vol. 153, pp. 170–184, doi: 10.1016/j.energy.2018.04.012.
  21. Theodore A. *Introduction to Engineering Statistics and Lean Sigma: Statistical Quality Control and Design of Experiments and Systems*: 3rd Edition. Springer, 2018, 656 p.

#### References (transliterated)

1. Kumar R. A critical review on energy, exergy, exergoeconomic and economic (4-E) analysis of thermal power plants. *Engineering Science and Technology, an International J.*, 2017, Vol. 20, pp. 283–292, doi: 10.1016/j.jestch.2016.08.018.
2. Restrepo A., Miyake R., Kleveston F., Bazzo E. Exergetic and environmental analysis of a pulverized coal power plant. *Energy*, 2012, Vol. 45(1), pp. 195–202, doi: 10.1016/j.energy.2012.01.080.
3. Li Y. Thermodynamic analysis and optimization of a double reheat system in an ultra-supercritical power plant. *Energy*, 2014, Vol. 74, pp. 202–214, doi: 10.1016/j.energy.2014.05.057.
4. Cui J., Chai T., Liu X. Deep-neural-network-based economic model predictive control for ultra-supercritical power plant. *IEEE Trans. Ind. Inform.*, 2020, Vol. 16, pp. 5905–5913, doi: 10.1109/tii.2020.2973721.
5. Adibhatla S., Kaushik S.C. Energy and exergy analysis of a super critical thermal power plant at various load conditions under constant and pure sliding pressure operation. *Appl. Therm. Eng.*, 2014, Vol. 73 (1), pp. 49–63, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.07.030.
6. Ahmadi Gh. R., Toghraie D. Energy and exergy analysis of montazeri steam power plant in Iran. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 2016, Vol. 56, pp. 454–463, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.074.

### Відомості про авторів (About authors)

**Тарасова Вікторія Олександрівна** – доктор 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** – Doctor of Technical Sciences, 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.

*Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

Тарасова В. О. Факторний аналіз теплової схеми ТЕЦ з суперкритичним паровим циклом на основі ексергетичного методу. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 2 (8). С. 46-55. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.07.

*Please cite this article as:*

Tarasova V. Factor analysis of the thermal scheme of CHP with super critical steam cycle on the basis of exergy method. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 2 (8), pp. 46-55, doi:10.20998/2413-4295.2021.02.07.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Тарасова В. А. Анализ тепловой схемы ТЭЦ с суперкритическим паровым циклом на основе эксергетического метода. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серія: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 2 (8). С. 46-55. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.07.

**АННОТАЦИЯ** Наиболее перспективным направлением модернизации ТЭЦ является внедрение энергоблоков на суперкритических параметрах пара (СКП). Повышение параметров пара – это один из наиболее эффективных способов увеличения КПД ТЭЦ. Таким образом, разработка концепции создания тепловых схем турбоустановок на СКП с учетом особенностей их эксплуатации на действующих ТЭЦ Украины является актуальной научной проблемой, решение которой позволит выполнить замену или модернизацию отработавшего свой ресурс энергогенерирующего оборудования на современные энергоблоки, соответствующие мировым стандартам по экономичности и экологичности. В статье адаптирован метод эксергетического анализа к исследованию тепловых схем ТЭЦ с суперкритическим паровым циклом. В качестве примера применения метода проведен эксергетический анализ энергоустановки, работающей по одноступенчатой тепловой схеме. В рамках предложенного метода создано термодинамическую, а также тополого-эксергетическую модель энергоустановки. На основе тополого-эксергетической модели определены показатели термодинамической эффективности энергоустановки, работающей на суперкритических параметрах пара. Предложено применять теорию планирования эксперимента при эксергетическом анализе тепловой схемы ТЭЦ. С привлечением этой теории проведено многофакторный численный эксперимент по определению влияния на эксергетическую эффективность тепловой схемы ТЭЦ основных определяющих варьируемых факторов, таких как адиабатные и теплотехнические КПД элементов установки, а также режимные параметры ее работы. Получено обобщенное уравнение функциональной взаимосвязи эксергетического КПД системы и эксергетических КПД элементов тепловой схемы ТЭЦ. Полученное уравнение может быть использовано в качестве инструментария для дальнейшего обучения нейронных сетей и применения, как при проектировании, так и при диагностике энергетической эффективности работы ТЭЦ. По результатам факторного анализа выявлено достаточно высокую консервативность рассматриваемой одноступенчатой схемы ТЭЦ к изменению варьируемых параметров. Это свидетельствует о наличии достаточно жестких структурных связей между элементами схемы, что в целом является положительным аспектом при ее реконструкции.

**Ключевые слова:** эксергетический метод; суперкритический паровой цикл; суперкритические параметры пара; факторный анализ; потоковые графы; тополого-эксергетическая модель; ТЭЦ

Надійшла (received) 26.04.2021