



УДК 621.577.4

# ЕКСЕРГЕТИЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ НЕПОЛАДОК У КОМПОНЕНТАХ ТЕПЛООВОГО НАСОСУ У ЗМІННИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

Некрасевич О.В.<sup>1</sup>, Волошук В.А.<sup>2</sup><sup>1,2</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

м. Київ, Україна

ORCID: <sup>1</sup> 0000-0003-2263-3549, <sup>2</sup> 0000-0003-0687-8968E-mail: <sup>1</sup> olena.nekrashevych@gmail.com, <sup>2</sup> vl.volodya@gmail.com

Copyright © 2022 by author and the journal “Automation of technological and business – processes”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

DOI: 10.15673/atbp.v14i4.2433

**Анотація.** Впродовж роботи теплоенергетичних систем показники роботи окремих компонентів можуть поступово відхилитися від проектних. У свою чергу це призводить до зниження енергетичної ефективності системи в цілому. Враховуючи взаємовплив між окремими компонентами, актуальною є задача кількісного оцінювання та ідентифікації тих компонентів, неполадки в яких впливають як на інші компоненти, так і на систему в цілому. У свою чергу це дасть можливість ефективно реалізувати предиктивне обслуговування системи.

В роботі, на основі ексергетичного аналізу запропоновано подальше розроблення та реалізацію методу діагностування неполадок в роботі компонентів теплового насосу системи теплозабезпечення з урахуванням змінних режимів роботи.

Показано, що визначення відхилень найбільш відомих параметрів компонентів від їх проектних значень не дає об'єктивної інформації щодо впливу цих відхилень на систему в цілому. Крім того, така інформація може призвести до помилкових висновків щодо неполадок у компонентах.

Використання в якості ключового показника діагностування умов роботи компонентів теплоенергетичної системи ендогенної частини деструкції ексергії та динаміку її зміни дає змогу ідентифікувати, кількісно оцінити неполадки в компонентах та їх вплив як на ефективність інших компонентів так і на ефективність системи в цілому.

Запропонований для досліджуваних умов сценарій предиктивного обслуговування теплового насосу дає можливість зекономити від 10 до 16% електроенергії за один опалювальний сезон.

**Abstract.** During continuous operation of thermal systems, the performance of components gradually deviates away from the reference conditions due to degradation. As a result, this leads to decreasing energy efficiency of the system. Taking into account complex interconnection among components, the quantitative assessment and identification of those malfunction components that affect other components and the whole system is of major importance. It provides a possibility of effective implementation of predictive maintenance of the system.

On the basis of exergy analysis the work proposes further development and implementation of the method of diagnosing malfunctions of the heat pump taking into account the variability of the operating mode.

It is shown that assesment of the conventional performance parameters and their deviations from the original values does not provide reliable information for the system performance evaluation. Moreover, this information can be misleading for the identification and quantification of malfunction components.

The application of endogenous exergy destruction as a key parameter for malfunction diagnosis of a thermal system can successfully and effectively identify and quantify malfunctions in components, which affect both the remaining components and the system as a whole

The proposed scenario of predictive maintenance for the specified conditions of the heat pump can save between 10% and 16% of electricity per one heating season.

**Ключові слова:** тепловий насос, ендогенна частина деструкції ексергії, випарник, конденсатор, компресор, споживання електроенергії.

**Key words:** heat pump, endogenous exergy destruction, evaporator, condenser, compressor, electricity consumption

## Вступ

Після певного періоду роботи системи можуть виникнути несправності, дефекти або порушення нормального режиму роботи. У порівнянні з вихідним еталонним станом, параметри компонентів можуть змінюватися. Тому



виявлення таких відхилень має велике практичне значення. Порівняння роботи між еталонним (в умовах відсутності аномалій) та дійсним станами є важливим для розроблення стратегій підвищення надійності та ефективності компонентів зокрема та системи загалом. Однак це порівняння, як правило, не враховує той факт, що погіршення ефективності не відбувається раптово в певний момент, а поступово накопичується від еталонного стану аж до відмови [[1]]. Крім того, через взаємозв'язок між компонентами має місце вплив зміни характеристик одного компонента на характеристики іншого.

Прикладами порушення умов роботи компонентів теплоенергетичної системи можуть бути: шлакування та ерозія поверхонь нагріву котлоагрегату [[2]], утворення відкладень та забруднення поверхонь нагріву теплообмінників [[3]], протікання теплообмінників [[4]], втомлюваність, корозія, ерозія та механічні пошкодження турбомашин [[5]], тощо. Всі ці несправності оцінюються різними показниками. Наприклад, зниження ефективності роботи котла через погіршення передачі теплоти від продуктів згорання до теплоносія ідентифікується енергетичним коефіцієнтом корисної дії, забруднення поверхонь нагріву теплообмінників спричиняє зростання температурного напору у ньому, несправності в турбомашинах знижують ізентропний коефіцієнт корисної дії [[1]]. Тобто ідентифікація різних за своєю природою несправностей здійснюється різними критеріями, що унеможливує їх порівняння між собою для виявлення найбільш значимих з точки зору зниження енергетичної ефективності системи в цілому.

Серед існуючих підходів діагностування енергетичних систем ексергетичні методи дають можливість визначити компоненти, аномалії яких спричиняють зниження ефективності системи в цілому, та кількісно оцінити їх негативний вплив [[1], [6] - [11]].

#### **Аналіз літературних даних і постановка проблеми**

У роботі [[7]] показано, що термoeкономічні методи діагностування, що базуються на використанні ексергетичних критеріїв, виявилися ефективними при оцінюванні впливів несправностей. Але, на думку авторів, існуюча математична формалізація, яку розроблено для відокремлення внутрішніх (тобто несправностей через деградацію компонентів) від індукованих (внаслідок взаємодії з іншими компонентами або втручання системи керування) для виявлення джерела аномалій часто виявлялася неефективною.

У рамках проекту TADEUS [[8], [9]] порівнювалися різні методи термoeкономічного діагностування, засновані на концепції вартості одиниці ексергії. Показано, що так звана формула впливу палива допомагає отримати інформацію про наслідки локальної несправності на загальному рівні системи. Однак через проблему індукованих ефектів запропоновані методи часто виявляються неефективними для виявлення джерел аномалій [[10]].

У роботі [[6]] запропоновано метод діагностування, що заснований на поглибленому ексергетичному аналізі, для ідентифікації та кількісного оцінювання компонентів із погіршенням ефективності. Запропонований метод був застосований на прикладі роботи пилувугільної електростанції. Аномалія в останній ступені турбіни була внесена шляхом зміни її робочого параметра, ізентропічного ККД, з 0,899 у еталонному стані до 0,8 в умовах несправності. Компонент із несправністю було точно ідентифіковано, а несправність оцінена кількісно запропонованим методом.

У роботі [[11]] метод діагностування несправностей, запропонований авторами в [[6]], був узагальнений для виявлення та кількісного оцінювання ефекту, викликаного кількома відхиленнями від еталонного режиму, що виникли одночасно в кількох різних компонентах. Цей підхід був успішно застосований на пилевугільній електростанції потужністю 1000 МВт.

В існуючих роботах методи ексергетичного аналізу застосовувалися для діагностування системи у проектному режимі. Але в багатьох випадках об'єкти теплоенергетики працюють у непроекtnих умовах. Це особливо стосується систем тепло- та холодозабезпечення будинків, режими роботи яких весь час змінюються.

#### **Мета і завдання дослідження**

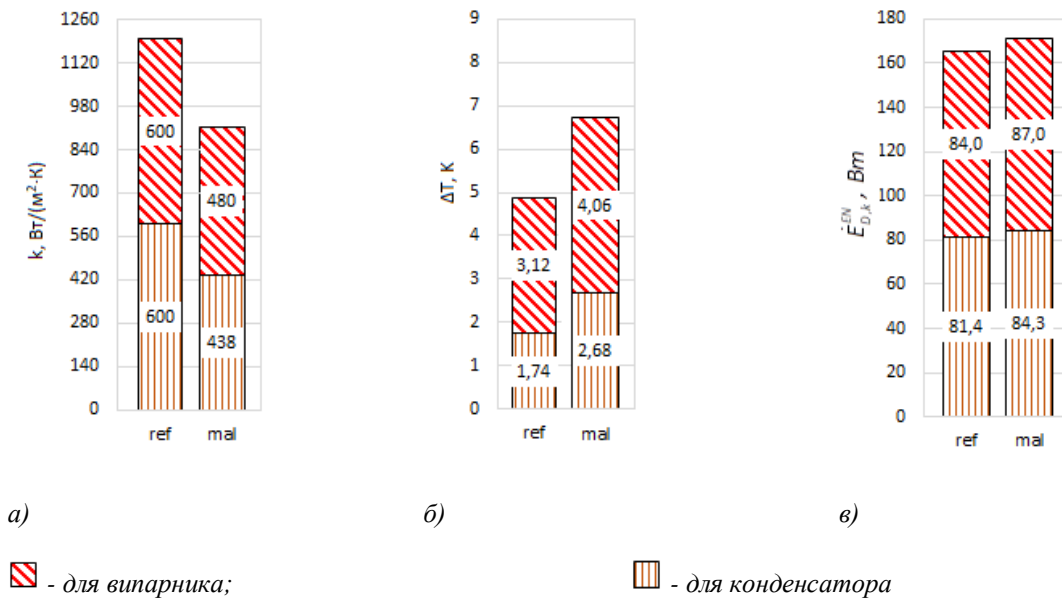
Метою роботи є подальше розроблення методів діагностування ефективності роботи компонентів теплоенергетичної системи на основі ексергетичного аналізу з урахуванням змінних режимів роботи на прикладі теплового насоса, що входить в склад системи теплозабезпечення.

#### **Методи і матеріали досліджень**

Використано підхід, що розроблено у [[1], [6]] і базується на поглибленому ексергетичному аналізі, згідно якого деструкція ексергії в межах кожного компонента ділиться на ендогенну та екзогенну частини. Компоненти з більш високим збільшенням ендогенної деструкції ексергії є першочерговими для удосконалення або заміни.

Для реалізації запропонованого підходу в пакеті Matlab була створена комп'ютерна модель теплового насоса типу «вода-вода». Перша частина програми передбачає розрахунок проектних характеристик системи (площі поверхонь нагріву випарника та конденсатора, встановлена потужність компресора, витрати теплоносіїв, тощо). Друга частина моделі передбачає розрахунок параметрів у непроекtnому режимі (температури та тиски робочих тіл, тощо). Для розрахунку теплових властивостей робочих тіл використовувався програмний пакет CoolProp. На основі отриманих характеристик розраховувалися ексергетичні показники та здійснювалося діагностування роботи компонентів системи.

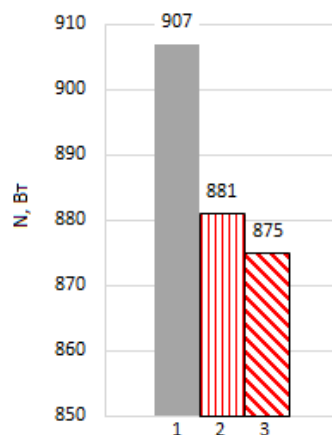
На рис. 1 показано результати розрахунку зміни параметрів конденсатора та випарника (коефіцієнта теплопередачі, температурного напору у пінч-перерізі, ендогенної частини деструкції ексергії) у непроекtnому режимі роботи теплового насоса для умов відсутності накипу або забруднення (ref) та при наявності таких дефектів (mal).



**Рис. 1 - Зміна параметрів конденсатора та випарника при утворенні накипу або забруднення на їх поверхнях: а) – коефіцієнт теплопередачі; б) – температурний напір; в) – ендогенна частина деструкції ексергії**  
**Fig. 1 - Change in the parameters of the condenser and evaporator when scale or contamination is formed on their surfaces: a) – heat transfer coefficient; b) – temperature pressure; c) is the endogenous part of exergy destruction**

Отже, бачимо, що внаслідок появи накипу на поверхнях теплообмінників коефіцієнт теплопередачі випарника зменшився від 600 до 480 Вт/(м²·К), тобто на 120 Вт/(м²·К), а конденсатора – на 162 Вт/(м²·К). Якщо використовувати цей параметр для ідентифікації більш значимого дефекту, то можна зробити висновок, що, оскільки коефіцієнт теплопередачі конденсатора зменшився на більше значення, то цей теплообмінник потрібно очищати чи міняти у першу чергу. Температурні напори в пінч-перерізах в обох теплообмінниках змінилися на однакове значення – на 0,939 К. Згідно цього параметра маємо рівноцінну доцільність очищення теплообмінників. Із рис. 1в бачимо, що після забруднення теплообмінників, ендогенна частина деструкції ексергії у випарнику зросла на 3,0 Вт, а у конденсаторі – на 2,9 Вт. Це означає, забруднення випарника має більший вплив на зниження енергетичної ефективності теплового насоса.

На рис. 2 показано результати розрахунків споживання електроенергії тепловим насосом за умови наявності накипу у теплообмінниках, та у випадках заміни (очищення) конденсатора та окремо випарника. Отже, бачимо, що очищення випарника забезпечує більше зниження споживання електроенергії ніж очищення конденсатора.



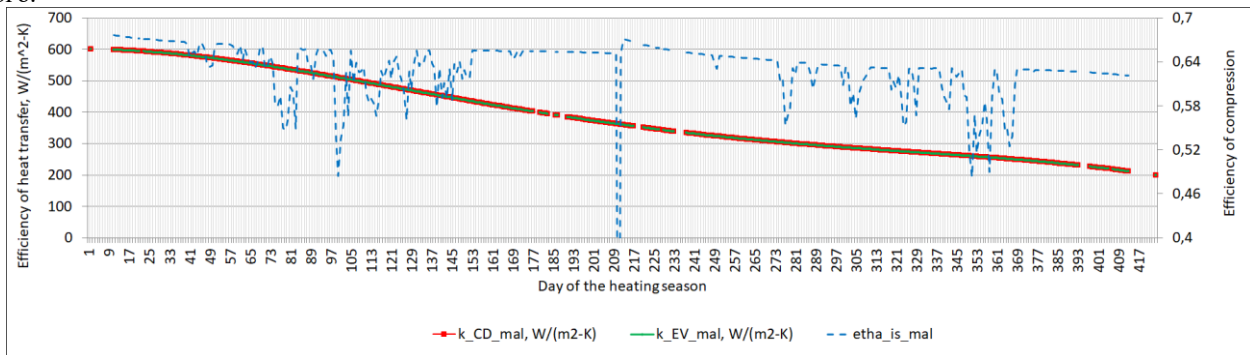
**Рис. 2 - Зміна споживання електроенергії тепловим насосом: 1 – у стані забруднення теплообмінників; 2 – після заміни конденсатора; 3 – після заміни випарника**  
**Fig. 2 - Change in electricity consumption by the heat pump: 1 – in the state of contamination of the heat exchangers; 2 – after replacing the capacitor; 3 – after replacing the evaporator**

Розглянемо більш складний випадок, коли у тепловому насосі впродовж опалювального періоду внаслідок утворення накипу поступово знижується ефективність теплопередачі у випарнику та конденсаторі (зменшуються



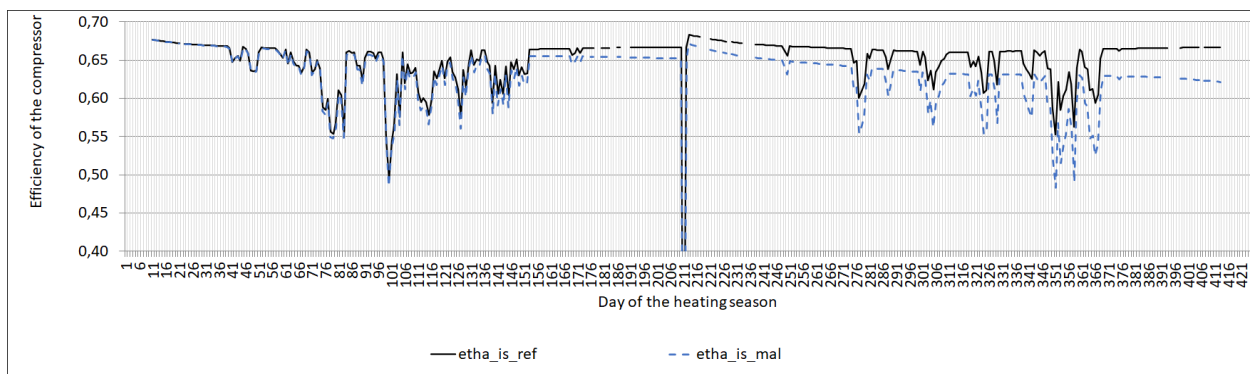
коефіцієнти теплопередачі цих теплообмінників). В той же час компресор не зазнає ніяких змін. Динаміка зміни цих параметрів впродовж двох опалювальних періодів представлено на рис. 3. Бачимо, що впродовж опалюваного періоду коефіцієнти теплопередачі мають стійку динаміку зниження через ріст забруднення цих теплообмінників. Що ж стосується коефіцієнта корисної дії компресора, то видно, що його значення як збільшується, так і зменшується, що обумовлено зміною ступеня стиснення. Разом з тим, степінь стиснення змінюється через зміну температури води в системі опалення в різних режимах роботи, а також внаслідок збільшення температурного напору у теплообмінниках через появу накипу. У даному прикладі прийнято, що у компресорі відсутнє погіршення безпосередньо його характеристик. Разом з тим, як видно із рис. 4, коефіцієнт корисної дії компресора зменшується. Але це зменшення спричинено не погіршенням характеристик компресора, а появою накипу у випарнику та компресорі.

Отже, на основі даних, що представлено на рис. 3 складно сказати, яке із вказаних порушень нормальної експлуатації є найбільш значимим з точки зору зниження енергетичної ефективності системи в цілому, а також, що є причиною погіршення ефективності того чи іншого компонента (приклад компресора). По-перше, це обумовлено тим, що ці показники мають різну фізичну природу (коефіцієнт теплопередачі та ККД компресора), що не дає можливості їх порівняти між собою. По-друге, як показано вище (див. рис. 1 та 2) більше зниження коефіцієнта теплопередачі в теплообміннику не означає пропорційне зниження енергетичної ефективності системи в цілому. І по-третє, через взаємовплив компонентів, зниження ефективності одного компонента може впливати на зниження ефективності іншого.



**Рис. 3 - Динаміка зміни коефіцієнтів теплопередачі випарника та конденсатора, а також ізентропійного ККД впродовж двох опалюваних сезонів**

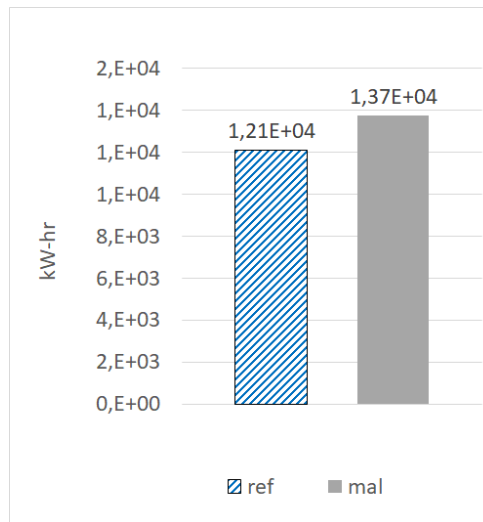
**Fig. 3 - Dynamics of changes in heat transfer coefficients of the evaporator and condenser, as well as isentropic efficiency during two heated seasons**



**Рис. 4 - Динаміка зміни ізентропійного ККД впродовж двох опалюваних сезонів у випадку відсутності зниження коефіцієнта теплопередачі випарника та конденсатора (ref), та у випадку зниження коефіцієнта теплопередачі випарника та конденсатора (mal)**

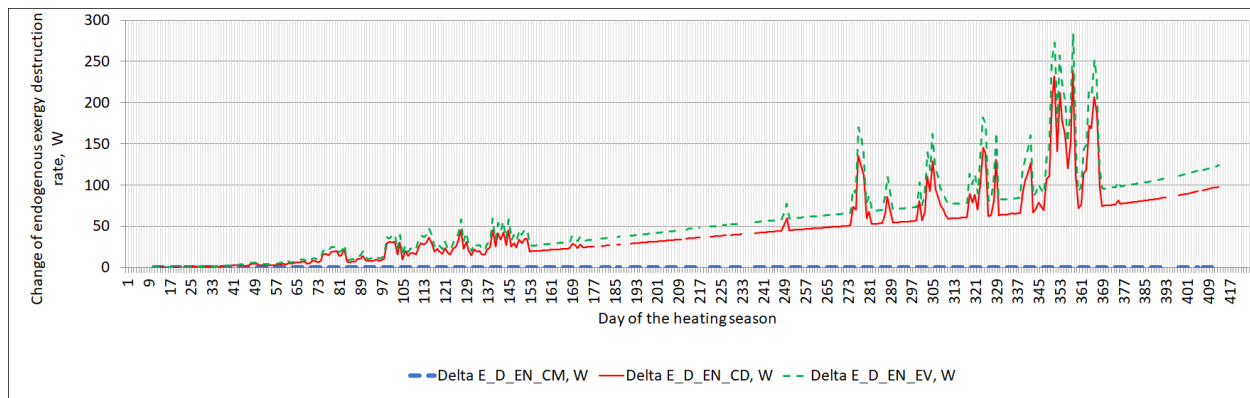
**Fig. 4 - Dynamics of changes in isentropic efficiency during two heated seasons in the absence of a decrease in the heat transfer coefficient of the evaporator and condenser (ref) and in the case of a decrease in the heat transfer coefficient of the evaporator and condenser (mal)**

Як показали результати моделювання, внаслідок погіршення показників компонентів теплового насосу впродовж двох опалюваних сезонів відповідно до даних рис. 3, у порівнянні із випадком відсутності цих погіршень на 13,6% збільшилося споживання електроенергії системою в цілому (див. рис. 5).



**Рис. 5 - Підвищення споживання електроенергії у тепловому насосі внаслідок погіршення показників компонентів теплового насосу (mal) у порівнянні із випадком відсутності такого погіршення (ref)**  
**Fig. 5 - Increase in electricity consumption in the heat pump due to the deterioration of the heat pump components (mal) compared to the case of no such deterioration (ref)**

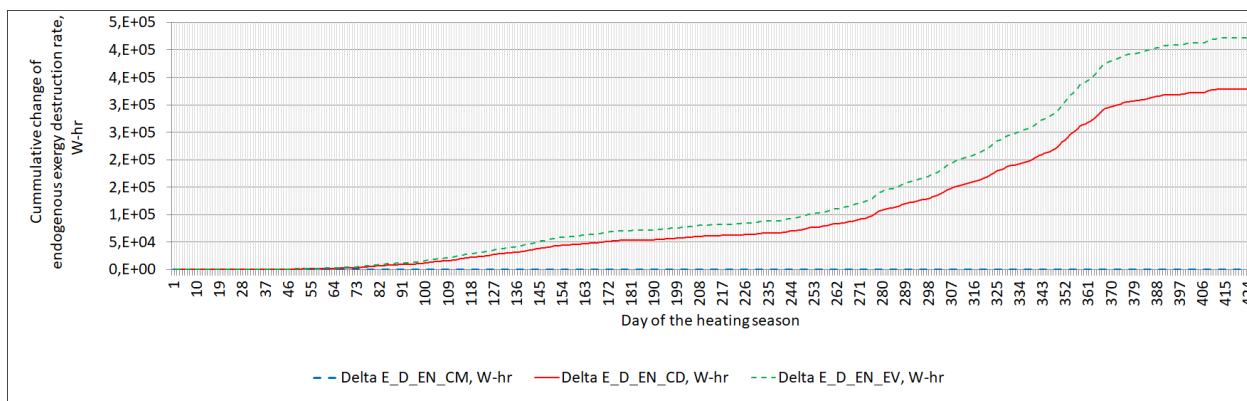
На рис. 6 показана динаміка зміни ендогенної частини деструкції ексергії впродовж опалювального сезону у компонентах теплового насосу. Отже, із рис. 6 бачимо, що ефективність компонентів з різною фізикою процесів (передача теплоти у теплообмінниках та стиснення у компресорі) оцінена одним і тим же показником – зміною ендогенної деструкції ексергії, що дає можливість порівняти ці компоненти між собою. Як видно із рис. 6 більша зміна ендогенної частини деструкції ексергії належить випарнику (штрихова лінія). Одне і те ж, що і у випарнику, погіршення коефіцієнта теплопередачі у конденсаторі має менший вплив на зниження ефективності системи в цілому. Про це свідчить менше у порівнянні із випарником зростання ендогенної частини деструкції ексергії у конденсаторі (суцільна лінія на рис. 6). Отже, маючи такий графік динаміки зміни ендогенної частини деструкції ексергії можна ефективно вирішувати задачі діагностування та контролю стану обладнання в часі в рамках реалізації предиктивного обслуговування обладнання.



**Рис. 6 - Динаміка зміни впродовж двох опалювальних сезонів зміни ендогенної частини деструкції ексергії у компонентах теплового насосу**

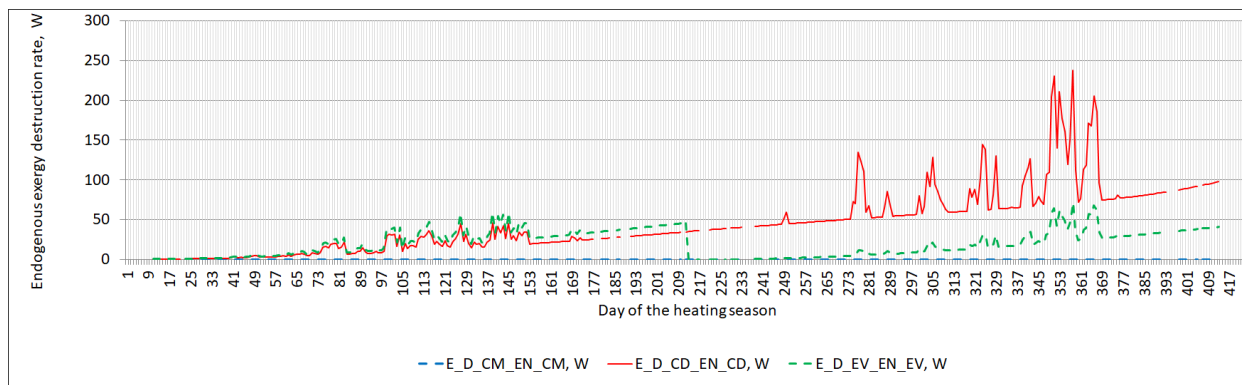
**Fig. 6 - Dynamics of changes during the two heating seasons of changes in the endogenous part of exergy destruction in heat pump components**

В якості аналізу також можна використовувати кумулятивні значення зміни ендогенної частини деструкції ексергії у компонентах системи. На рис. 7 наведені такі значення на основі даних з рис. 6. Бачимо, що в процесі експлуатації теплового насосу кумулятивні значення зміни ендогенної частини деструкції ексергії зростають відповідно до даних на рис. 6. Із рис. 7 видно, що найбільша динаміка росту ендогенної частини деструкції ексергії характерна для випарника (штрихова лінія). Тобто саме випарник є той компонент, утворення накопичення у якому в найбільшій мірі впливає на зростання споживання електроенергії теплового насосу у порівнянні із еталонними режимами роботи.



**Рис. 7 - Кумулятивні значення зміни ендогенної частини деструкції ексергії у компонентах системи**  
**Fig. 7 - Cumulative values of changes in the endogenous part of exergy destruction in system components**

Із рис. 6 та 7 бачимо, що уже після першого опалювального періоду має місце доцільність проведення превентивних робіт саме у випарнику – для нього зміна ендогенної частини деструкції ексергії через забруднення поверхні нагріву найбільша. Якщо після першого опалювального періоду передбачити очищення або заміну випарника, то будемо мати суттєве зниження додаткової частини ендогенної деструкції ексергії у випарнику у порівнянні із конденсатором (див. рис. 8). У випадку очищення/заміни конденсатора після першого опалювального сезону також буде мати місце зниження додаткової частини ендогенної деструкції ексергії. Але це зниження забезпечить меншу економію електроенергії у порівнянні із очищення/заміною випарника.



**Рис. 8 - Динаміка зміни впродовж опалювального сезону зміни додаткової частини ендогенної частини деструкції ексергії у компонентах теплового насоса у випадку очищення/заміну випарника**  
**Fig. 8 - Dynamics of changes during the heating season of changes in the additional part of the endogenous part of exergy destruction in heat pump components in case of cleaning/replacement of the evaporator**

### Результати досліджень

Для підтвердження отриманих висновків проведено моделювання режимів роботи теплового насоса у випадку почергового, а також одночасного усунення несправностей в конденсаторі та випарнику після першого сезону експлуатації системи. Отримані дані у вигляді зміни споживання електроенергії тепловим насосом впродовж двох опалювальних сезонів наведено на рис. 9.

Із наведених результатів можна зробити висновок, що у випадку відновлення перед початком другого сезону випарника (очищення від накипу або заміни) до його початкового стану можна забезпечити підвищення енергетичної ефективності теплового насоса таким чином, що споживання електроенергії системою у другому опалювальному періоді зменшиться від  $6,52 \cdot 10^3$  кВт·год до  $5,84 \cdot 10^3$  Вт·год або на 10,4%. Якщо ж перед другим сезоном відновити параметри конденсатора до його проектних даних, то у другому опалювальному періоді можна забезпечити зниження споживання електроенергії від  $6,52 \cdot 10^3$  кВт·год до  $6,14 \cdot 10^3$  або на -5,9%. Якщо одночасно замінити або відновити і конденсатор і випарник, то у другому сезоні можна досягти зниження споживання електроенергії від  $6,52 \cdot 10^3$  кВт·год до  $5,45 \cdot 10^3$  кВт·год або на 16,4%. Результати досліджень показують, що у випадку заміни компресора споживання електроенергії у другому опалювальному періоді не змінюється – це обумовлено тим, що із компресором насправді ніяких змін не відбулося і немає потреби здійснювати ремонт/заміну цього компонента.

Отже, запропонований метод на основі оцінювання зміни ендогенної частини деструкції ексергії у непроектованих режимах роботи системи дає можливість кількісно оцінити динаміку впливу дефектів на зниження енергетичної



ефективності системи в цілому і забезпечити ефективну реалізацію предиктивного обслуговування (Predictive Maintenance) теплоенергетичного обладнання підприємства [[12]].

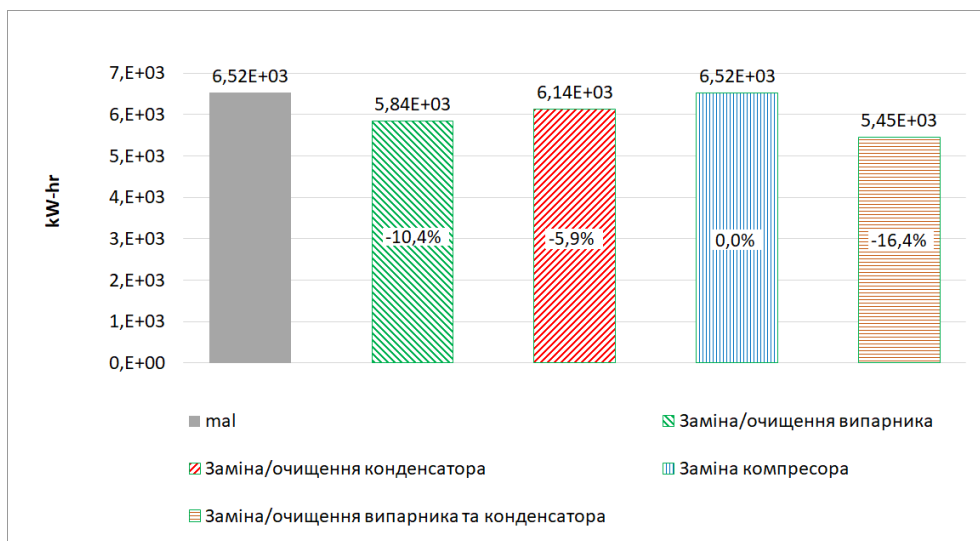


Рис. 9 - Зміна споживання електроенергії ТН у другому сезоні після проведення предиктивного обслуговування компонентів

Fig. 9 - Change in TN electricity consumption in the second season after predictive maintenance of components

#### Висновки

1. В роботі, в рамках задач предиктивного обслуговування теплоенергетичного обладнання, на основі ексергетичного аналізу, шляхом визначення зміни ендегенної частини деструкції ексергії, запропоновано реалізацію методу діагностування ефективності роботи компонентів теплового насосу у складі системи теплозабезпечення з урахуванням змінних режимів роботи.

2. Спочатку для умов одного непроєктного режиму роботи системи показано, що у випадку появи накипу або забруднення конденсатора та випарника, що у свою чергу може по-різному збільшувати коефіцієнти теплопередачі, зміна температурного напору у пінч-перерізах може залишатися без змін. На основі цієї інформації неможливо об'єктивно та коректно оцінити вплив того чи іншого дефекту на збільшення споживання електроенергії компресором в системі. Значення зміни ендегенної частини деструкції ексергії показали, що випарник більше впливає на зниження енергетичної ефективності теплового насосу ніж конденсатор, що підтверджено визначенням споживання електроенергії системою.

3. У випадку аналізу роботи теплового насосу впродовж двох опалювальних сезонів також показано, що застосування ендегенної частини деструкції в якості критерія діагностування поступового утворення накипу в конденсаторі та випарнику і його впливу на ефективність системи є доцільним.

4. Для досліджуваних в роботі умов запропонований критерій однозначно вказав на найбільш неефективний компонент (випарник) та дав можливість ідентифікувати той компоненти (компресор), який не має дефектів впродовж роботи хоча і змінює свої характеристики через змінні режими роботи та вплив дефектів в інших компонентах (випарник та конденсатор).

5. Запропонований для досліджуваних умов сценарій предиктивного обслуговування системи дав можливість зекономити від 10 до 16% електроенергії за один опалювальний сезон.

#### Список використаних джерел

- [1]. Wang L, Fu P, Wang N, Morosuk T, Yang Y, Tsatsaronis G. Malfunction diagnosis of thermal power plants based on advanced exergy analysis: the case with multiple malfunctions occurring simultaneously. *Energy Convers Manage* 2017;148: 1453–67. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.086>
- [2]. M.-J. Li, S.-Z. Tang, F.-L. Wang, Q.-X. Zhao, W.-Q. Tao, Gas-side fouling, erosion and corrosion of heat exchangers for middle/low temperature waste heat utilization: A review on simulation and experiment, *Appl. Therm. Eng.* 126 (2017) 737–761. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.095>
- [3]. Arsenyeva O P, Crittenden B, Yang M, Kapustenko P O, Accounting for the thermal resistance of cooling water fouling in plate heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 61(1): 53-59. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.02.045>
- [4]. Zhou S, O'neill Z, O'neill C. A review of leakage detection methods for district heating networks. *Appl. Therm. Eng.* 2018, 137, 567–574. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.010>
- [5]. Dowson D. Metallurgical failure analysis of steam turbine, compressor, and hot gas expander components. *Proceedings*



- of the Asia Turbomachinery & Pump Symposium (ATPS) 2018. Singapore, 12 – 15 March, 2018.
- [6]. Fu P, Wang N, Wang L, et al. Performance degradation diagnosis of thermal power plants: a method based on advanced exergy analysis. *Energy Convers Manage* 2016;130:219–29. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.054>
- [7]. Lazzaretto A, Toffolo A. A critical review of the thermoeconomic diagnosis methodologies for the location of causes of malfunctions in energy systems. *ASME J Energy Resour Technol* 2006;128(4):335–42. <https://doi.org/10.1115/1.2358148>
- [8]. Torres C, Valero A, Serra L, Royo J. Structural theory and thermoeconomic diagnosis: Part I. On malfunction and dysfunction analysis. *Energy Convers Manage* 2002; 43:1503–18. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00032-8](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00032-8)
- [9]. Valero, A.; Correas, L.; Zaleta, A.; Lazzaretto, A.; Verda, V.; Reini, M.; Rangel, V. On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy system malfunctions: Part 1: The TADEUS problem. *Energy* 2004, 29, 1875–1887. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.04.053>
- [10]. Valero, A.; Correas, L.; Zaleta, A.; Lazzaretto, A.; Verda, V.; Reini, M.; Rangel, V. On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy system malfunctions: Part 2. Malfunction definitions and assessment. *Energy* 2004, 29, 1889–1907. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.03.008>
- [11]. Usón S, Valero A. Thermoeconomic diagnosis for improving the operation of energy intensive systems: comparison of methods. *Appl Energy* 2011;88:699–711. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.09.010>
- [12]. Zonta, T.; da Costa, C.A.; da Rosa Righi, R.; de Lima, M.J.; da Trindade, E.S.; Li, G.P. Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. *Comput. Ind. Eng.* 2020, 150, 106889. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106889>

## References

- [1]. Wang L, Fu P, Wang N, Morosuk T, Yang Y, Tsatsaronis G. Malfunction diagnosis of thermal power plants based on advanced exergy analysis: the case with multiple malfunctions occurring simultaneously. *Energy Convers Manage* 2017;148: 1453–67. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.086>
- [2]. M.-J. Li, S.-Z. Tang, F.-L. Wang, Q.-X. Zhao, W.-Q. Tao, Gas-side fouling, erosion and corrosion of heat exchangers for middle/low temperature waste heat utilization: A review on simulation and experiment, *Appl. Therm. Eng.* 126 (2017) 737–761. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.095>
- [3]. Arsenyeva O P, Crittenden B, Yang M, Kapustenko P O, Accounting for the thermal resistance of cooling water fouling in plate heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 61(1): 53-59. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.02.045>
- [4]. Zhou S, O'neill Z, O'neill C. A review of leakage detection methods for district heating networks. *Appl. Therm. Eng.* 2018, 137, 567–574. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.010>
- [5]. Dowson D. Metallurgical failure analysis of steam turbine, compressor, and hot gas expander components. *Proceedings of the Asia Turbomachinery & Pump Symposium (ATPS) 2018. Singapore, 12 – 15 March, 2018.*
- [6]. Fu P, Wang N, Wang L, et al. Performance degradation diagnosis of thermal power plants: a method based on advanced exergy analysis. *Energy Convers Manage* 2016;130:219–29. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.054>
- [7]. Lazzaretto A, Toffolo A. A critical review of the thermoeconomic diagnosis methodologies for the location of causes of malfunctions in energy systems. *ASME J Energy Resour Technol* 2006;128(4):335–42. <https://doi.org/10.1115/1.2358148>
- [8]. Torres C, Valero A, Serra L, Royo J. Structural theory and thermoeconomic diagnosis: Part I. On malfunction and dysfunction analysis. *Energy Convers Manage* 2002; 43:1503–18. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00032-8](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00032-8)
- [9]. Valero, A.; Correas, L.; Zaleta, A.; Lazzaretto, A.; Verda, V.; Reini, M.; Rangel, V. On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy system malfunctions: Part 1: The TADEUS problem. *Energy* 2004, 29, 1875–1887. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.04.053>
- [10]. Valero, A.; Correas, L.; Zaleta, A.; Lazzaretto, A.; Verda, V.; Reini, M.; Rangel, V. On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy system malfunctions: Part 2. Malfunction definitions and assessment. *Energy* 2004, 29, 1889–1907. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.03.008>
- [11]. Usón S, Valero A. Thermoeconomic diagnosis for improving the operation of energy intensive systems: comparison of methods. *Appl Energy* 2011;88:699–711. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.09.010>
- [12]. Zonta, T.; da Costa, C.A.; da Rosa Righi, R.; de Lima, M.J.; da Trindade, E.S.; Li, G.P. Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. *Comput. Ind. Eng.* 2020, 150, 106889. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106889>

Отримана в редакції 27.10.2022. Прийнята до друку 04.11.2022. Received 27 October 2022. Approved 04 November 2022. Available in Internet 30 December 2022.