



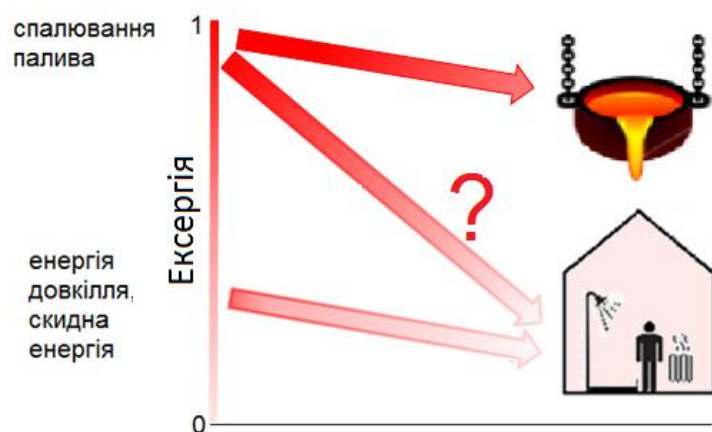
Оцінювання можливостей підвищення ефективності теплонасосних установок

Володимир Волощук,
завідувач кафедри
автоматизації енергетичних
процесів,
КПІ імені Ігоря Сікорського



Основна наукова гіпотеза досліджень

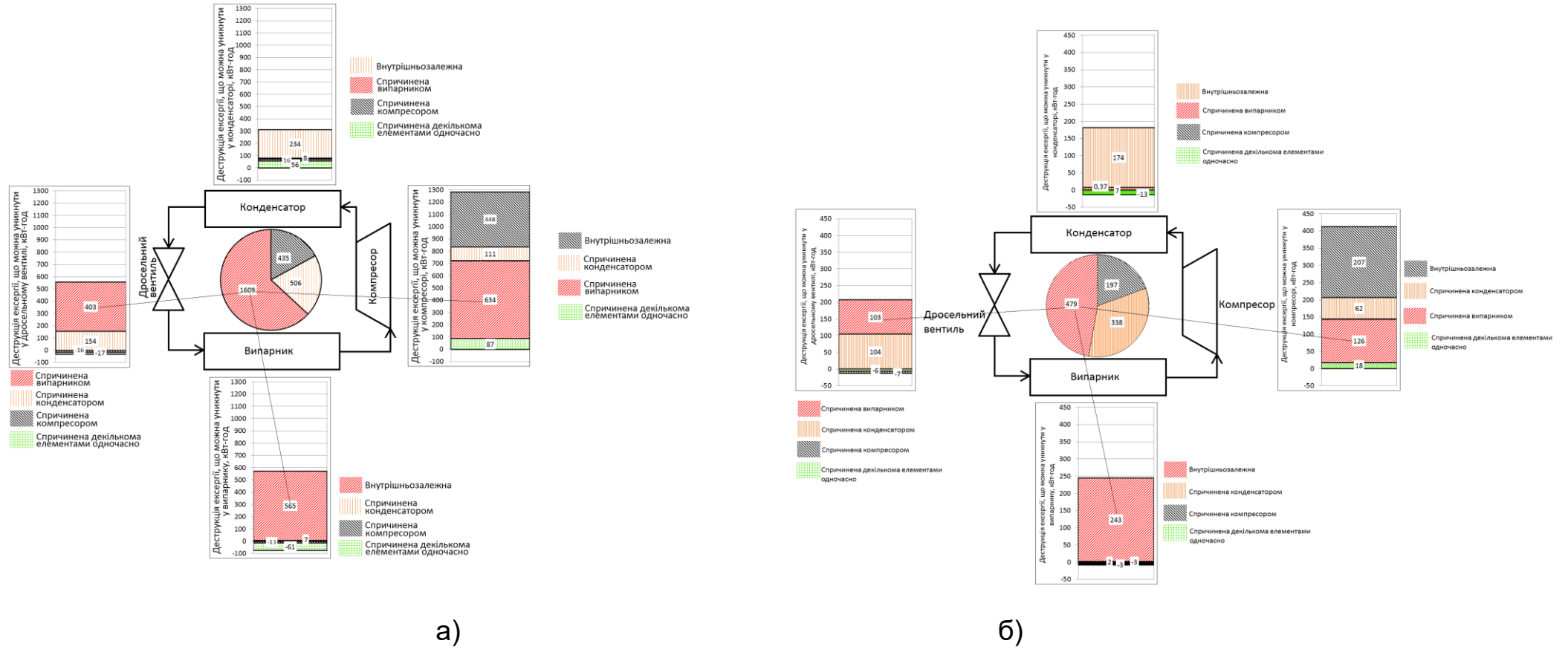
На відміну від методології енергетичного (ентальпійного) аналізу (найбільш поширеної в науковій та інженерній практиці) методологія ексергетичного оцінювання (термодинамічний підхід) дає можливість визначити **місцезнаходження, значення, джерела, вартість та негативний вплив на довкілля термодинамічних втрат** в процесах передачі та перетворення енергії.



Рівень втрат ексергії від різних джерел енергії при теплозабезпечення будівлі та у металургійному процесі



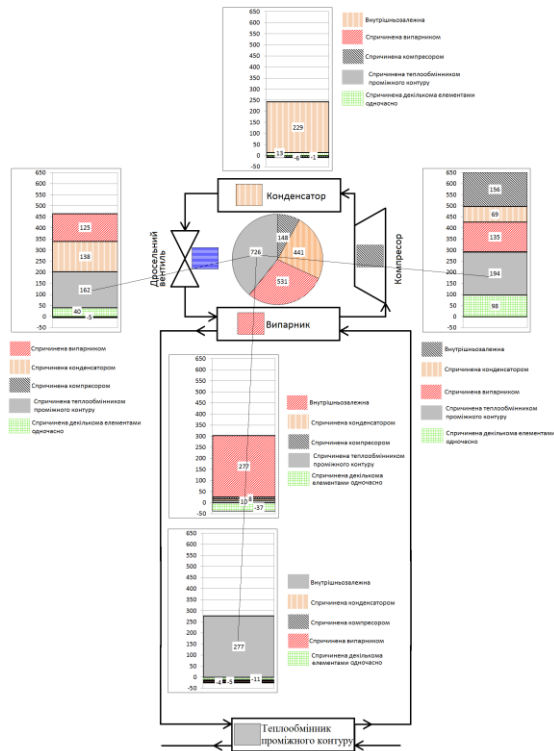
Основні практичні результати



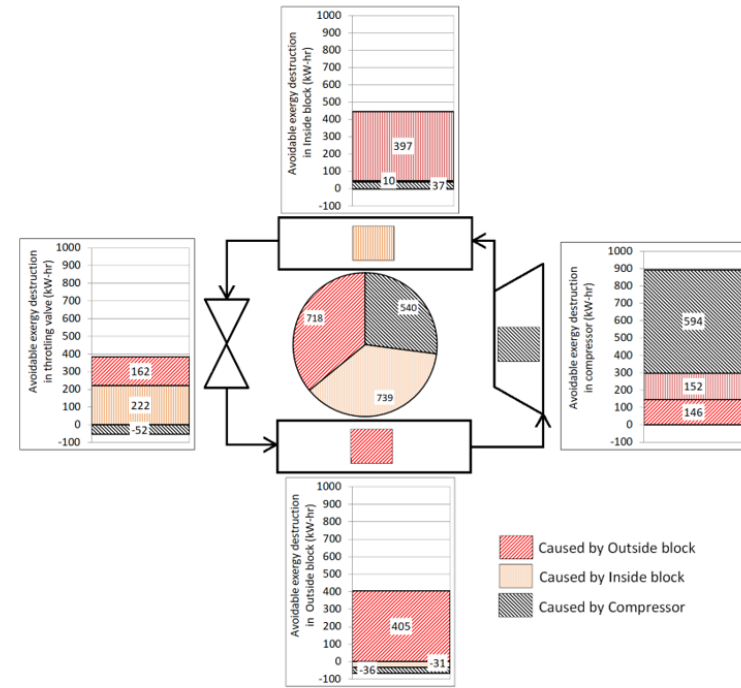
Річні значення деструкції ексергії, що можна уникнути за рахунок удосконалення k-го елемента ТНУ:
 а) - типу «повітря-вода»; б) - типу «вода-вода»



Основні практичні результати



в)



г)

Figure 3. Year values of the internally caused and the externally caused avoidable exergy destruction $E_{D,k}^{AP,\Sigma,INT,EXT,year}$ in the components of the investigated reversible chiller

Річні значення деструкції ексергії, що можна уникнути за рахунок удосконалення k-го елемента ТНУ:
 в) - типу «вода-вода» на стічних водах; г) – реверсивного типу «повітря-повітря»



Основні практичні результати

Задача підвищення термодинамічної ефективності реверсивних ТНУ із використанням робочих тіл із зверхнизькими GWP

Voloshchuk, V.; Gullo, P.; Nikiforovich, E. *Advanced Exergy Analysis of Ultra-Low GWP Reversible Heat Pumps for Residential Applications*. *Energies* 2023, 16, 703. <https://doi.org/10.3390/en16020703> (Scopus).

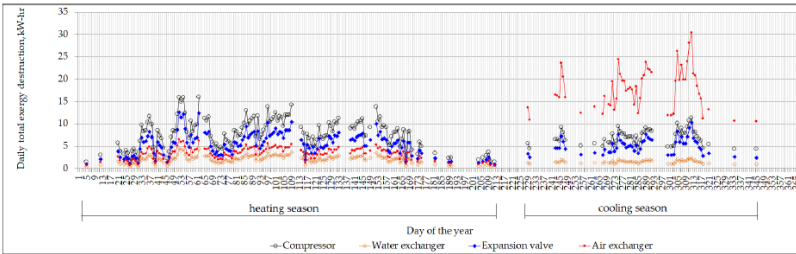


Figure 2. Distribution of daily total exergy destruction $E_{D,k}^{daily}$ (kW-hr) within the components of the investigated reversible heat pump operating with R290 over a year.

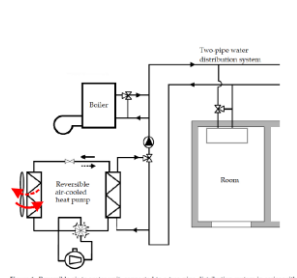


Figure 1. Reversible air-to-water unit, connected to a two-pipe distribution system in series with a boiler.

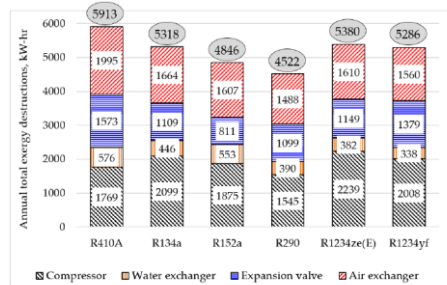


Figure 3. Values of the total exergy destruction $E_{D,k}^{yr}$ (kWh) in the components of the investigated heat pump with different working fluids.

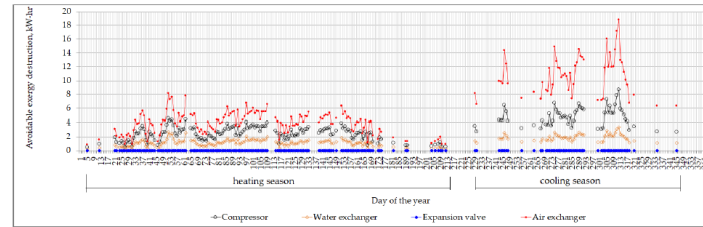


Figure 5. Distribution of daily internally caused and externally caused avoidable exergy destruction, $E_{D,k}^{AVΣ,INT,EXT,daily}$ (kWh) within the components of the investigated reversible heat pump operating with R290 over a year.

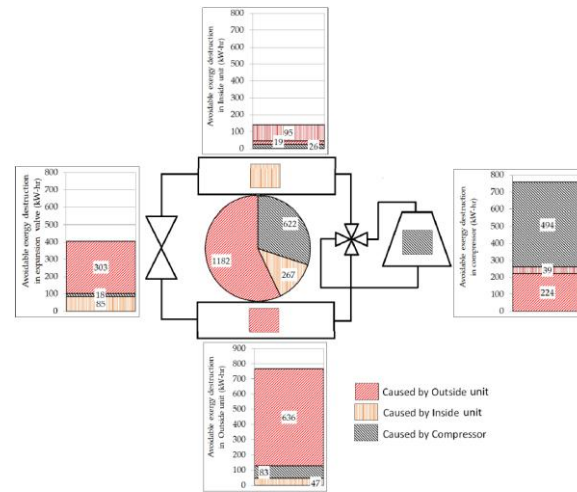


Figure 6. Annual values of the internally caused and externally caused avoidable exergy destruction $E_{D,k}^{AVΣ,INT,EXT,yr}$ (kWh) in the components of the investigated reversible heat pump operating with R290.

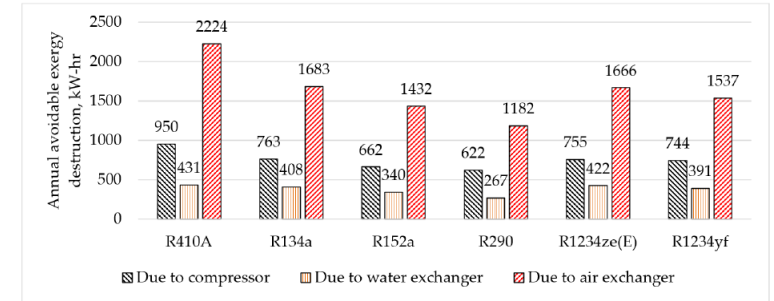


Figure 7. Annual values of the internally caused and externally caused avoidable exergy destruction $E_{D,k}^{AVΣ,INT,EXT,yr}$ (kWh) in the components of the investigated heat pump with different working fluids.

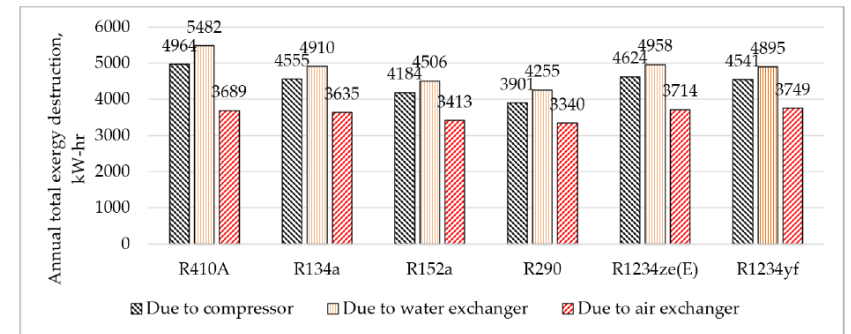


Figure 8. Values of the total exergy destruction $E_{D,k}^{yr}$ (kWh) in the investigated heat pump with different working fluids after thermodynamic improvement of its components.



Основні практичні результати

Пріоритети підвищення енергетичної ефективності ТНУ з конденсатором:

1. Підвищення коефіцієнта теплопередачі або площі проміжного теплообмінника перед випарником (за наявності);
2. Підвищення коефіцієнта теплопередачі або площі випарника;
3. Підвищення коефіцієнта теплопередачі або площі конденсатора;
4. Підвищення енергетичної ефективності компресора.



Основні практичні результати

Задача підвищення термодинамічної ефективності ТНУ із використанням CO₂ або сумішей із CO₂

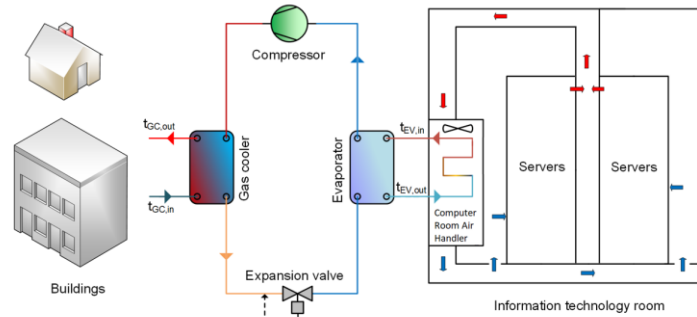


Figure 1: Schematic of the investigated heat pump system using surplus heat from data centre

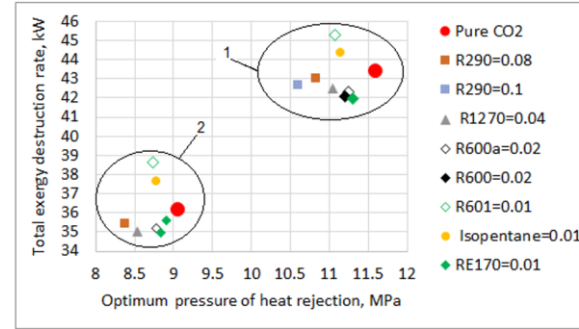


Figure 2: Total exergy destruction rates as a function of the heat rejection pressure:

1) 50/25, 2) 75/30

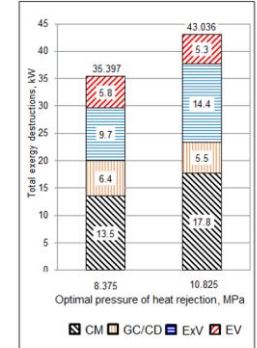


Figure 4: Values of the total exergy destruction rates (kW) in the components of the investigated heat pumps

with R744/R290 mass fraction 0.92/0.08: a) 50/25, b) 75/30

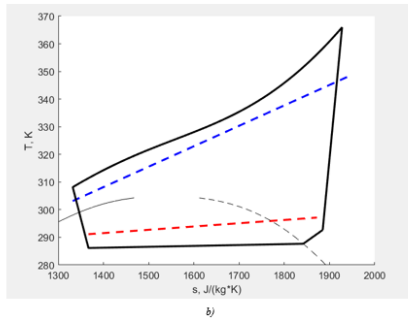
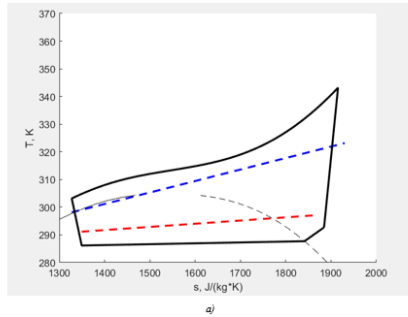


Figure 3: T-s diagrams of the thermodynamic cycles with mass fraction of R744/R290 of 0.92/0.08: a) 50/25, b) 75/30

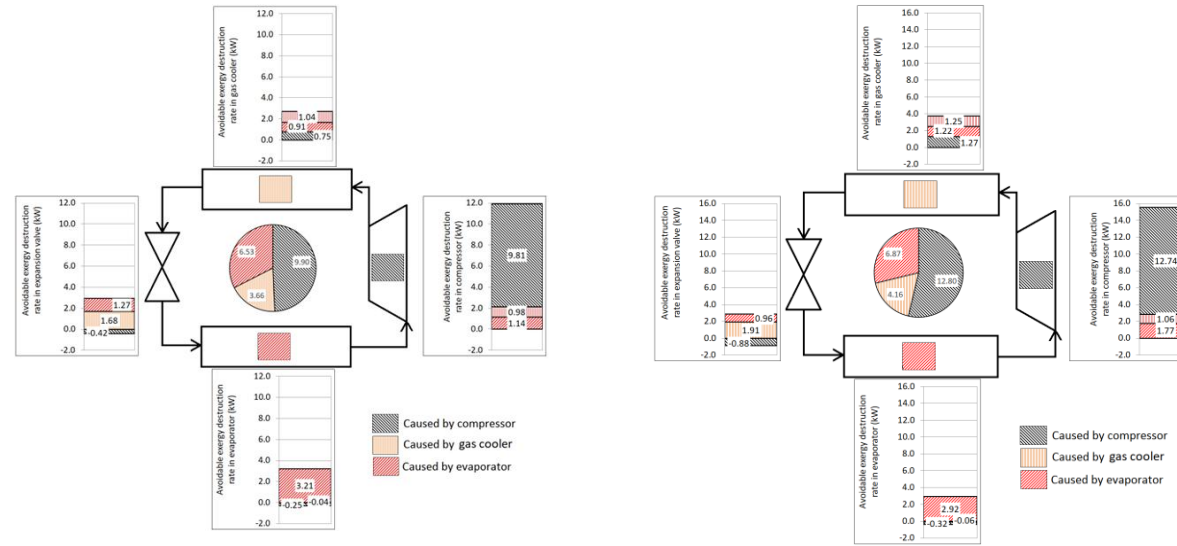
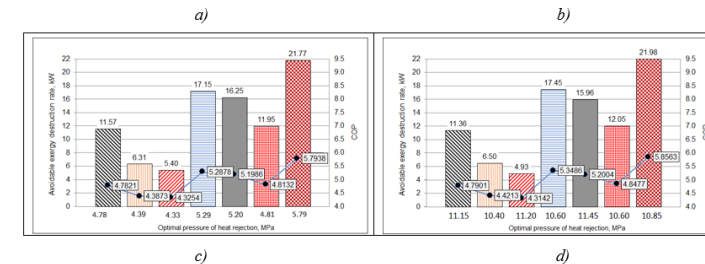
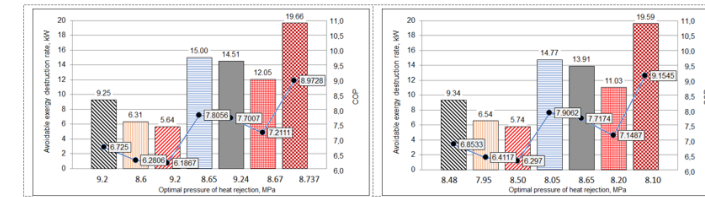


Figure 5: Values of the removable exergy destruction rates ($\dot{E}_{D,k}^{AV, \Sigma, INT, EXT}$) (kW) in the components of the investigated heat pump for the R744/R290 mass fraction of 0.92/0.08:

a) 50/25, b) 75/30



Legend for Figure 6:
 - Caused by CM (hatched)
 - Caused by EV (red)
 - Caused by CM and EV (grey)
 - Caused by CM, GC and EV (dark red)
 - Caused by GC (orange)
 - Caused by CM and GC (blue)
 - Caused by GC and EV (light red)

Figure 6: Values of the avoidable exergy destruction rates ($\dot{E}_{D,k}^{AV, \Sigma, INT, EXT}$, $\dot{E}_{D,k+i}^{AV, \Sigma, INT, EXT}$) (kW) and reachable COPs for the investigated heat pump with pure R744 (a) and with R744/R290 mass fraction 0.92/0.08 (b) after components improving for 50/25 (c, d) heating systems



Основні практичні результати

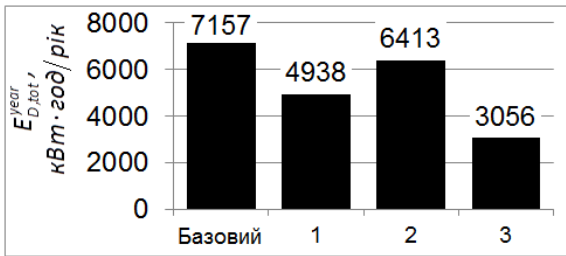
Пріоритети підвищення енергетичної ефективності ТНУ з газовим охолоджувачем та CO₂ :

1. Підвищення енергетичної ефективності компресора;
2. Підвищення коефіцієнта теплопередачі або площі випарника;
3. Підвищення коефіцієнта теплопередачі або площі конденсатора;

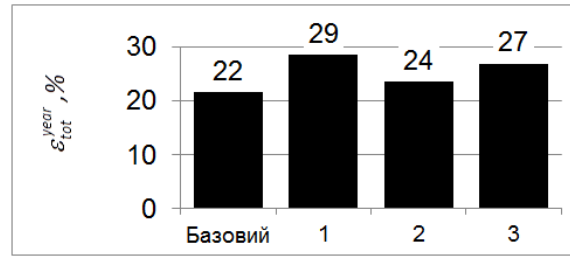


Основні практичні результати

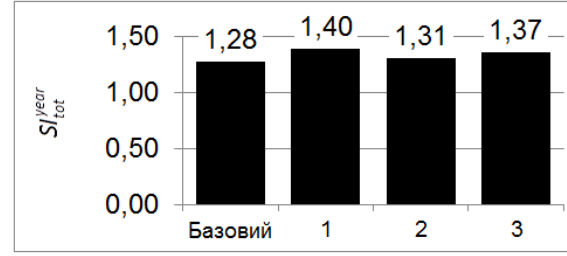
Задача одночасного підвищення енергетичної, економічної та екологічної ефективності ТНУ



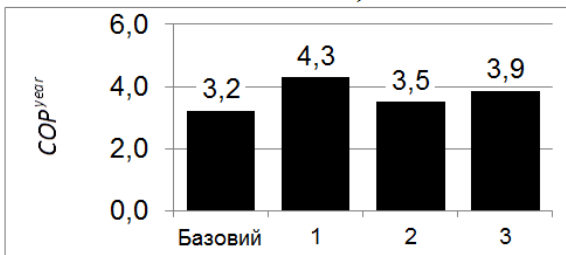
а)



б)



в)



г)



д)



е)

Зміна річних значень деструкції ексергії (а), ексергетичного ККД (б), фактора сталості (в), коефіцієнта трансформації ТНУ (г), ексергетичної вартості «продукту» (д) та негативного впливу на довкілля «продукту» (е) СТ на базі ТНУ

Варіант системи	Відмінні від базового варіанту характеристики системи
Базовий варіант	-
Варіант 1	Зниження мінімального температурного напору у випарнику від 12 К до 3 К, та конденсаторі від 5 К до 1 К
Варіант 2	Заміна опалювальних приладів на низькотемпературні шляхом збільшення їх площі нагріву. Система опалення переведена з температурного графіку 70 °C/50 °C на температурний графік 60 °C/40 °C
Варіант 3	Покращення теплотехнічних характеристик будинку за рахунок підвищення приведенного опору теплопередачі огорожувальних конструкцій



Основні практичні результати

Задача одночасного підвищення енергетичної та економічної ефективності ТНУ

На основі вищевикладених теоретичних положень запропоновано вирішення задачі одночасного підвищення енергетичної та економічної ефективності ТНУ для забезпечення гарячого водопостачання з проектною тепловою потужністю 12 кВт. В якості робочих рідин використано фреони R410A та R134a.

Voloshchuk, V., Gullo, P. and Nekrashevych, O. (2022) 'Simultaneous thermodynamic and economic enhancement of heat pumps based on a new method for avoidable irreversibility assessment', *Int. J. Exergy*, Vol. 38, No. 2, pp.158–175. <https://doi.org/10.1504/IJEX.2022.123598>. (Scopus).

Таблиця 2.1. Значення параметрів ексергоекономічного оцінювання для досліджуваних ТНУ

Тип ТНУ	Робоче тіло	$\dot{E}_{D,HP}$, kW	\dot{Z}_{HP} , €·hr ⁻¹	$\dot{C}_{D,HP}$, €·hr ⁻¹	$\dot{Z}_{HP} + \dot{C}_{D,HP}$, €·hr ⁻¹	f_{HP} , %
«повітря-вода»	R410A	2,852	0,146	0,100	0,246	59
	R134a	2,232	0,188	0,079	0,267	70
«вода-вода»	R410A	2,720	0,133	0,096	0,229	58
	R134a	2,144	0,160	0,076	0,236	68

Таблиця 2.4 Параметри ексергетичного аналізу, визначені на основі необоротних процесів, яких можна позбутися, що відбуваються в к-му компоненті для ТНУ типу «повітря-вода»

Спричинена	$\dot{E}_{D,HP}^{AP,k}$, кВт		$\dot{Z}_{HP}^{AP,k}$, €·год ⁻¹		$\dot{C}_{D,HP}^{AP,k}$, €·год ⁻¹		$\dot{Z}_{HP}^{AP,k} + \dot{C}_{D,HP}^{AP,k}$, €·год ⁻¹	
	R410a	R134a	R410a	R134a	R410a	R134a	R410a	R134a
CM	0,2638	0,2429	-0,2644	-0,3589	0,0092	0,0085	-0,2551	-0,3504
CD	0,4654	0,3069	0,0009	0,0010	0,0163	0,0107	0,0171	0,0117
TV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
EV	0,7641	0,7126	-0,0343	-0,0285	0,0267	0,0249	-0,0075	-0,0035

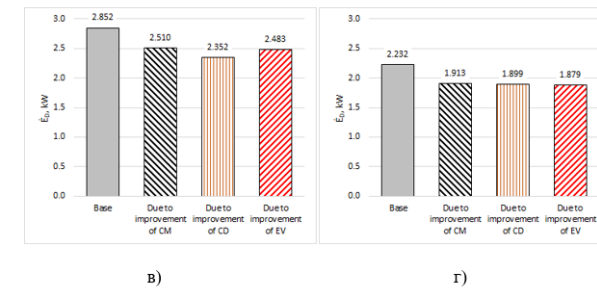
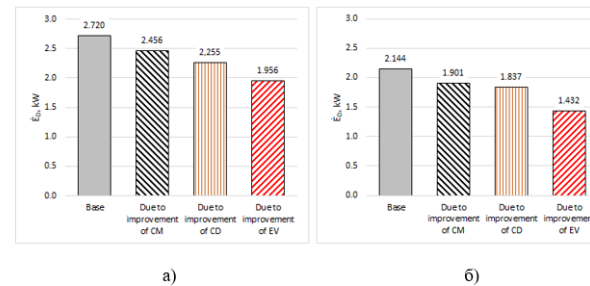


Рис. 2.1. Значення деструкції ексергії для досліджуваних ТНУ у базовому випадку та після термодинамічного удосконалення кожного компонента: а) ТНУ типу «повітря-вода» з R410a; б) ТНУ типу «повітря-вода» з R134a; в) ТНУ типу «вода-вода» з R410a; г) ТНУ типу «вода-вода» з R134a.

Таблиця 2.5 Параметри ексергетичного аналізу, визначені на основі необоротних процесів, яких можна позбутися, що відбуваються в к-му компоненті для ТНУ типу «вода-вода»

Спричинена	$\dot{E}_{D,HP}^{AP,k}$, кВт		$\dot{Z}_{HP}^{AP,k}$, €·год ⁻¹		$\dot{C}_{D,HP}^{AP,k}$, €·год ⁻¹		$\dot{Z}_{HP}^{AP,k} + \dot{C}_{D,HP}^{AP,k}$, €·год ⁻¹	
	R410a	R134a	R410a	R134a	R410a	R134a	R410a	R134a
CM	0,3412	0,3190	-0,7154	-1,0140	0,0119	0,0111	-0,7035	-1,0029
CD	0,5002	0,3329	0,0026	0,0032	0,0174	0,0116	0,0200	0,0148
TV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
EV	0,3682	0,3525	-0,0162	-0,0122	0,0128	0,0123	-0,0034	0,0001

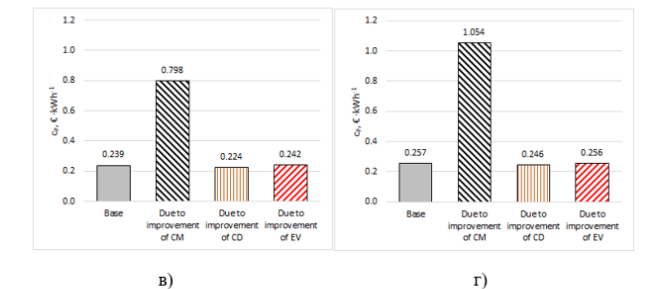
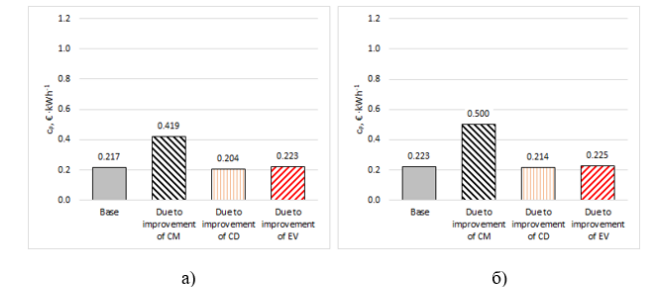


Рис. 2.2. Значення вартості ексергії продукту для досліджуваних ТНУ у базовому випадку та після термодинамічного удосконалення кожного компонента: а) ТНУ типу «повітря-вода» з R410a; б) ТНУ типу «повітря-вода» з R134a; в) ТНУ типу «вода-вода» з R410a; г) ТНУ типу «вода-вода» з R134a.



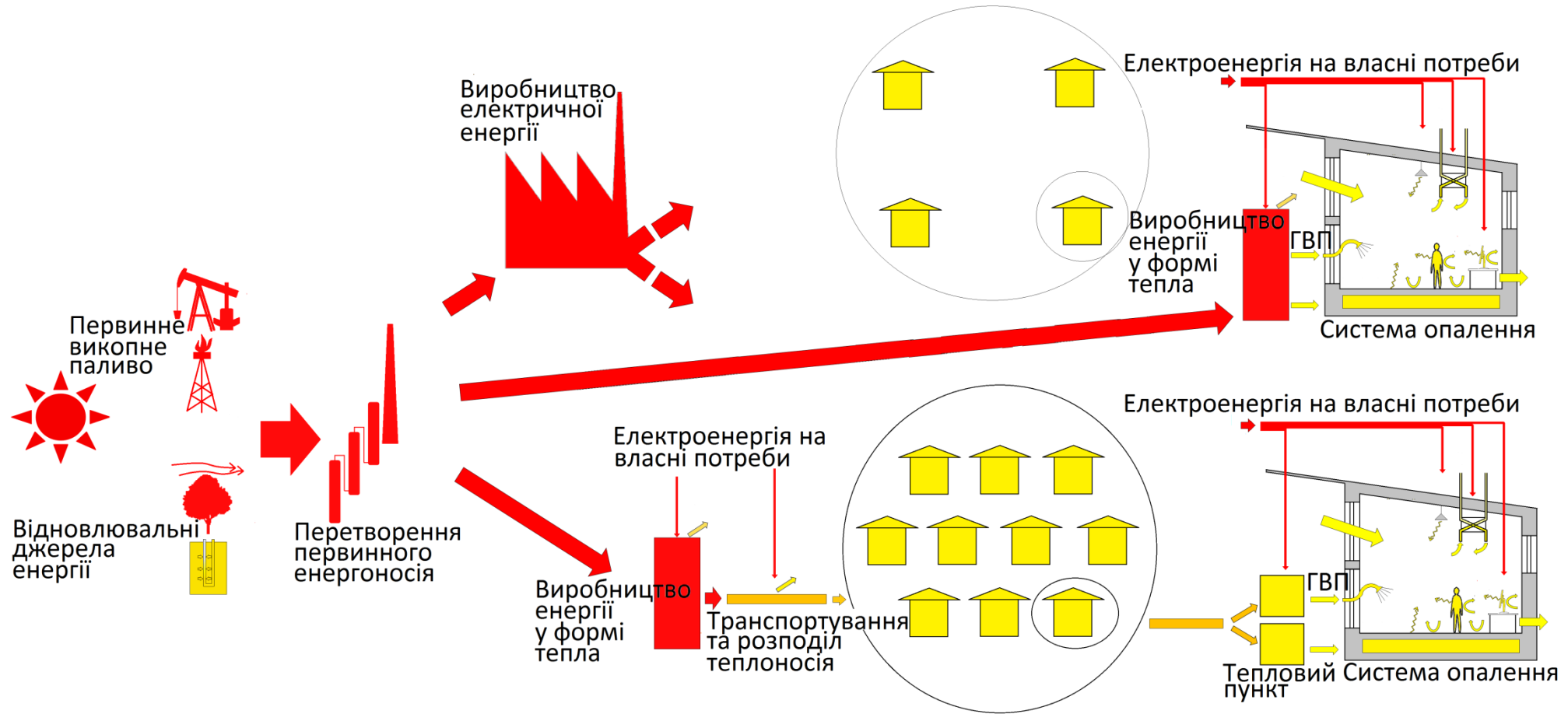
Основні практичні результати

Пріоритети одночасного підвищення енергетичної, економічної та екологічної ефективності ТНУ з конденсатором:

1. Підвищення коефіцієнта теплопередачі або площі випарника;
2. Підвищення коефіцієнта теплопередачі або площі конденсатора;



Основні практичні результати



Принципова розрахункова схема системи теплозабезпечення населеного пункту



Основні практичні результати

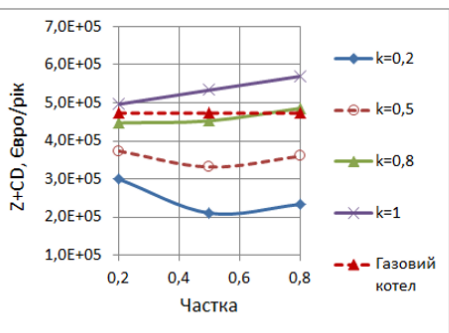
1 – газова котельня; 2 – твердопаливна котельня (покриває 50 % встановленої потужності); 3 – ТНУ (покриває 50 % встановленої потужності)

Зміна питомої вартості ексергії енергетичного потоку у системі централізованого теплозабезпечення на основі трьох видів джерел

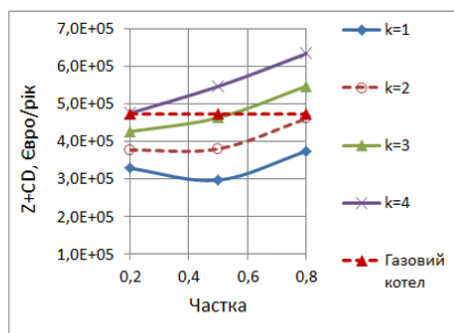
Питома вартість ексергії
Євро/кВт-год



Графіки зміни осереднених річних сумарних затрат централізованої системи теплозабезпечення житлового масиву будинків без підвищення та із одночасним підвищенням теплотехнічних характеристик при відповідному значенні співвідношення цін k на енергоносії для базового (твердопаливна котельня (а) та ТНУ (б) відповідно із часткою встановленої потужності 50 %) та пікового (газова котельня) джерел

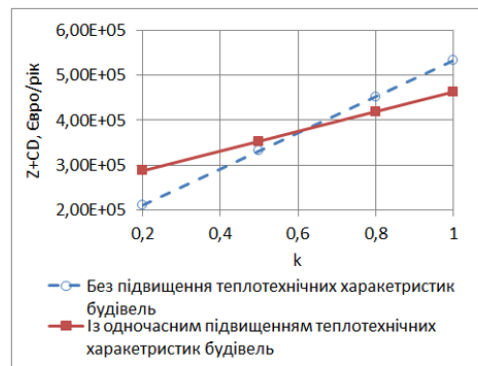


а)

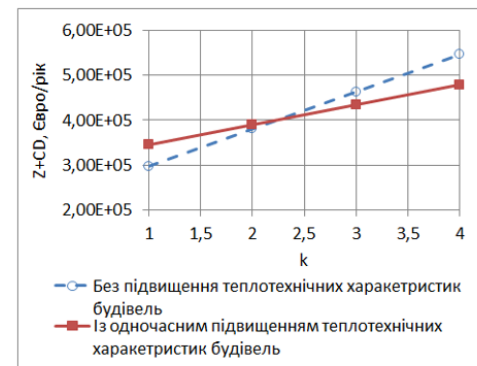


б)

Залежність осереднених у багаторічному перерізі річних сумарних ексероекономічних затрат централізованої системи теплозабезпечення від частки встановленої потужності твердопаливної котельні (а) та ТНУ (б) як базового джерела та співвідношення цін k на енергоносії для базового та пікового (газова котельня) джерел (вартість енергоносія для пікового джерела рівна 0,026 Євро/(кВт·год)



а)

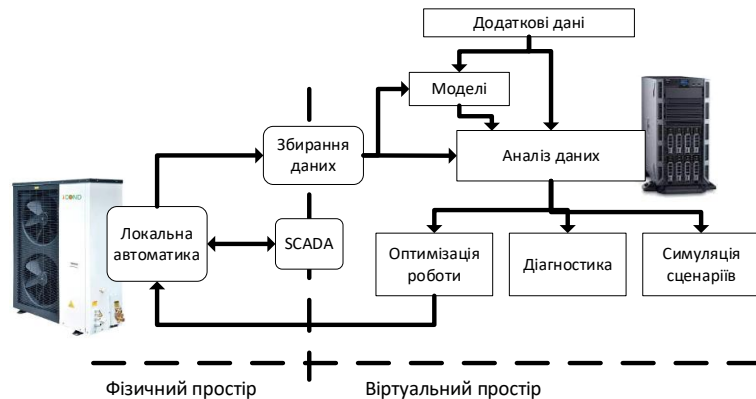


б)



Основні практичні результати

Створення цифрового двійника ТНУ



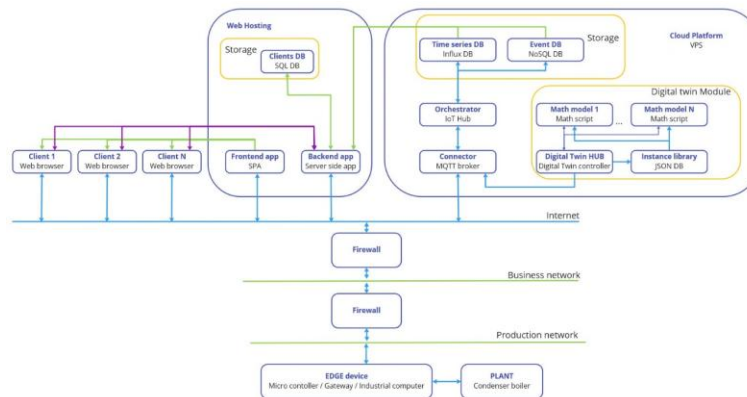
Концепція цифрового двійника ТНУ

Рівень	Задачі і засоби		
5. Сервіси	Оптимізація керування	Прогнозне обслуговування	Діагностика
4. Інтеграція	Засоби симуляції, аналітики та застосувань штучного інтелекту		
	Середовище симуляції	Середовище керування активами	Діагностика та обслуговування
3. Моделювання	Статичні та динамічні моделі, включно з моделями деструкції ексергії обладнання		
2. Передача даних	Засоби і способи комунікації		
1. Збір даних	Локальна автоматика	IIoT пристрої	

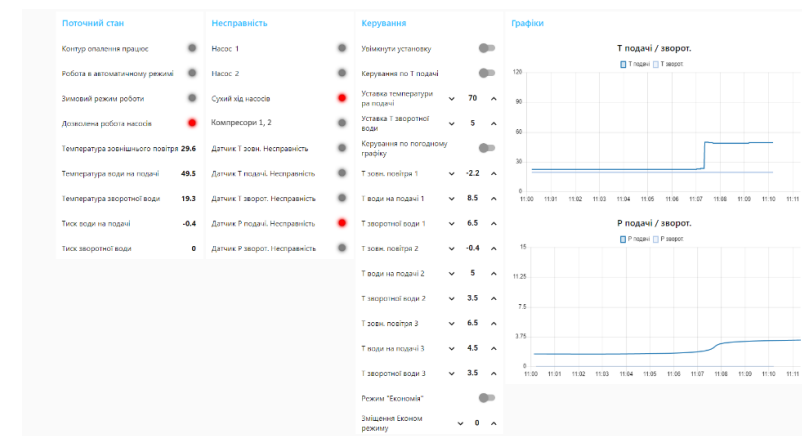
Архітектура цифрового двійника ТНУ



Сервіси цифрового двійника



Архітектура програмного забезпечення цифрового двійника ТНУ

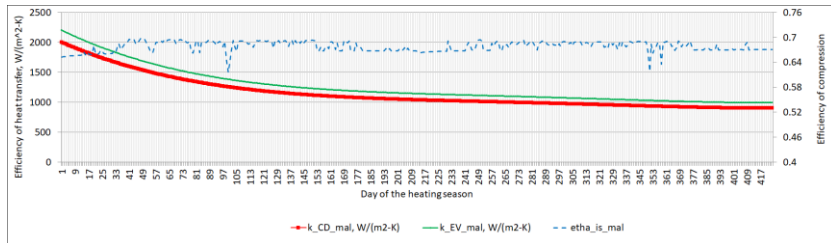


Відеокадр цифрового двійника з сервісними параметрами ТНУ

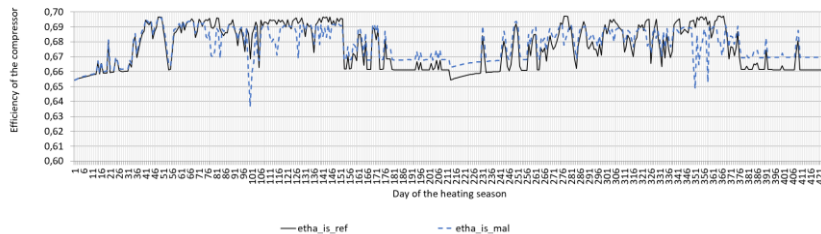


Основні практичні результати

Застосування ексергетичного аналізу для діагностування ТНУ



Динаміка зміни коефіцієнтів теплопередачі випарника та конденсатора, а також ізентропійного ККД впродовж двох опалюваних сезонів



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)

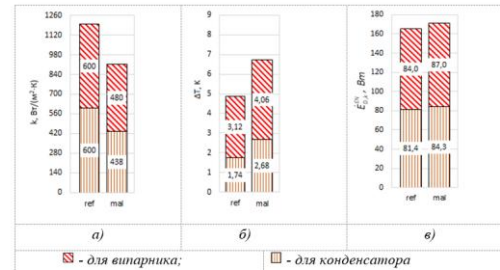
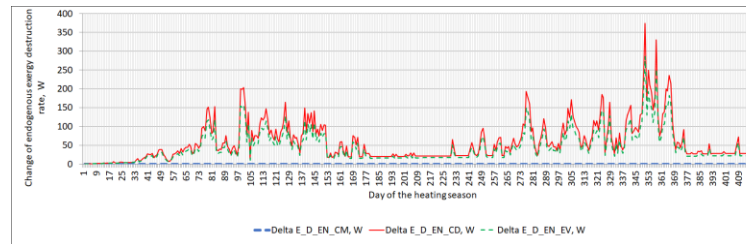
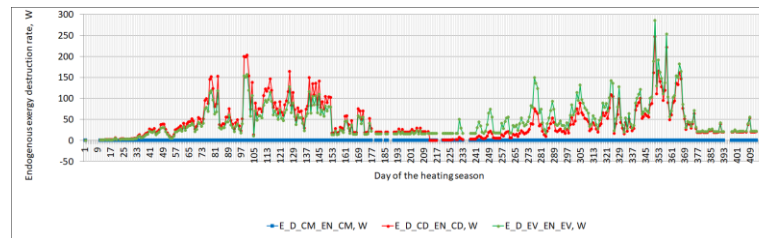


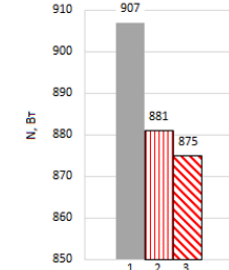
Рисунок 4.35 - Зміна параметрів конденсатора та випарника при утворенні накипу або забруднення на їх поверхнях: а) коефіцієнт теплопередачі; б) температурний напір; в) ендогенна частина деструкції ексергії



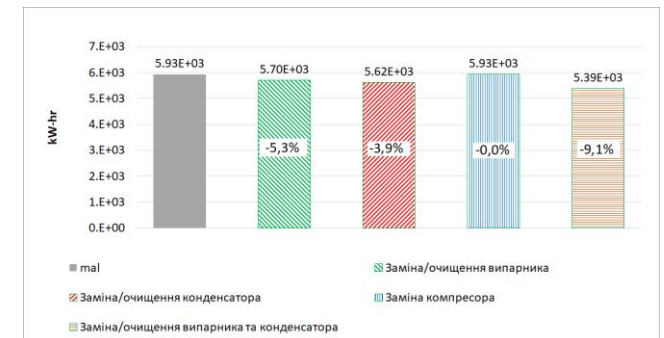
Динаміка зміни впродовж двох опалювальних сезонів зміни ендогенної частини деструкції ексергії у компонентах ТНУ



Динаміка зміни впродовж опалювального сезону зміни додаткової частини ендогенної частини деструкції ексергії у компонентах ТНУ у випадку очищення/заміну конденсатора



Зміна споживання електроенергії ТНУ: 1 – у стані забруднення теплообмінників; 2 – після заміни конденсатора; 3 – після заміни випарника[236]

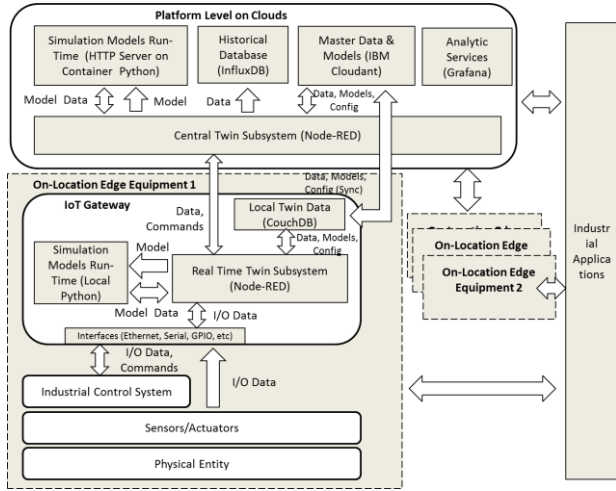


Зміна споживання електроенергії ТНУ у другому сезоні після проведення предиктивного обслуговування компонентів

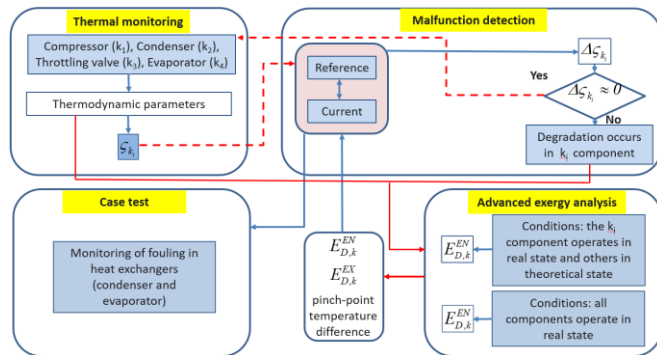


Основні практичні результати

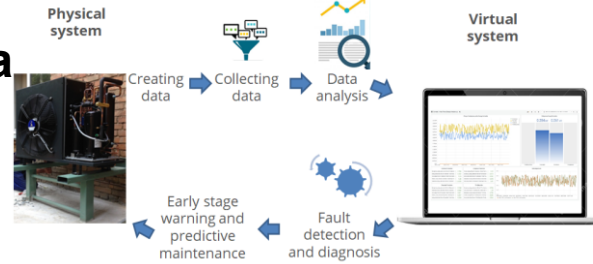
Створення цифрового двійника ТНУ



Структура підходу ЦД для діагностики несправностей



Процедура виявлення, ідентифікації та кількісної оцінки несправностей у досліджуваному тепловому насосі



Принцип цифрового двійника



Приклад приладової панелі для діагностики на основі ексергетичного аналізу несправностей у тепловому насосі



Дякую за увагу