

# ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ПРИКЛАДНОЇ ТЕРМОДИНАМІКИ ДЛЯ ОБГРУНТУВАННЯ РІШЕНЬ У СИС- ТЕМАХ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА БАЗІ ТЕПЛОНАСОСНИХ УСТАНОВОК

<sup>1</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»

## *Анотація*

*В роботі, на основі застосування методології поглибленого ексергетичного аналізу, визначені місця, значення та причини термодинамічних втрат у теплонасосних установках типу «повітря-вода» та «вода-вода» в складі системи теплозабезпечення будинку. Згідно отриманих даних, з метою підвищення енергетичної ефективності таких установок, необхідно у першу чергу знижувати необоротності спочатку у випарнику а потім у конденсаторі шляхом зменшення у них температурних напорів*

**Ключові слова:** поглиблений ексергетичний аналіз, сезонна деструкція ексергії, теплонасосна установка, теплозабезпечення будинку

## *Abstract*

*On the base of the advanced exergetic analysis the identification of the location, magnitude and sources of thermodynamic inefficiencies in heat pump systems providing space heating is performed. Decreasing irreversibilities in evaporator and condenser is of the first priority for improving the energy efficiency of such systems*

**Keywords:** advanced exergetic analysis, seasonal destruction of exergy, heat pump system, space heating

## **Вступ**

В теперішній час термодинамічні методи мають досить широке застосування. Як показує досвід багатьох фахівців їх можна використовувати не тільки у суто технічних задачах, але і у сфері економіки, охорони довкілля та, навіть, для розв'язання соціальних проблем. Огляд літературних джерел показує про значне зростання інтересу до розвинення і подальшого впровадження методів термодинаміки [1].

Термодинаміка ґрунтується на трьох фундаментальних законах (перший і другий з яких є найбільш значущими). Перший закон визначає принцип збереження кількості енергії. Другий стверджує, що енергія, крім кількості, характеризується також якістю, і процеси, що відбуваються у природі, самовільно знижують цю якість. Необхідність кількісного оцінювання якості енергії зумовила введення таких понять як ентропія та ексергія. Найбільш поширеними методами у даному випадку є методи ексергетичного аналізу. Так званий поглиблений ексергетичний аналіз на сьогоднішній день є одним із нових етапів розвитку даного методу і розроблений він представниками німецької школи прикладної термодинаміки [2].

Об'єкти теплоенергетики можна принципово розділити на такі, що працюють за постійних на певному проміжку часу (що характерно для промисловості) й мінливих (що характерно для систем опалення, вентиляції та кондиціонування приміщень будівель) режимів роботи.

Огляд літературних джерел показав, що методологія поглибленого ексергетичного аналізу реалізована, в основному, на прикладі холодильних машин або теплонасосних установок (ТНУ) промислового призначення, де розглядається тільки один режим роботи – номінальний [2 - 6]. У випадку роботи ТНУ у складі системи теплозабезпечення будинку має місце мінливість його режимів роботи, що визначається впливом погоднокліматичного чинника, як всередині опалювального сезону, так і у багаторічному перерізі [8].

Мета роботи – застосування методології поглибленого ексергетичного аналізу для кількісного

оцінювання необоротностей та визначення можливостей їх зниження для підвищення енергетичної ефективності ТНУ у складі системи теплозабезпечення будинку.

### Результати дослідження

Згідно методології поглибленого ексергетичного аналізу, в кожному елементі енергоперетворювальної системи можна позбутися тільки частини термодинамічних втрат. Через технологічні обмеження, пов'язаних, наприклад, із існуючими матеріалами, технологіями і/або вартістю матеріалів і виробничих процесів, максимальне значення ексергетичної ефективності  $k$ -го компонента не може бути збільшено при будь-яких інвестиціях. Частина деструкції ексергії, яка незалежно від досконалості компонента буде мати місце, називається неминучою, або та, якої позбутися неможна (англ. – unavoidable - UN). Інша частина деструкції ексергії - та, якої можна позбутися (англ. – avoidable - AV) [2 – 5]

$$\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{D,k}^{AV} + \dot{E}_{D,k}^{UN} \quad (1)$$

Отже, при удосконаленні енергосистеми, зусилля повинні бути направлені саме на ту частину деструкції ексергії, якої можна позбутися.

Доведено, що деструкція ексергії в окремому елементі системи залежить від необоротностей як безпосередньо у самому елементі так і в інших елементах, що входять у систему [2 – 5]. В результаті була розроблена теорія розділення деструкції ексергії на внутрішньо залежну (англ. – endogenous - EN) та зовнішньо залежну (англ. – exogenous - EX) [2 – 5]

$$\dot{E}_{D,k} = \dot{E}_{D,k}^{EN} + \dot{E}_{D,k}^{EX} \quad (2)$$

На основі отриманих значень внутрішньо та зовнішньо залежних частин деструкції ексергії можна розробити стратегію удосконалення системи [2 – 5]:

- при  $\dot{E}_{D,k}^{EN} > \dot{E}_{D,k}^{EX}$ , необхідно зробити акцент на удосконалення даного компонента;
- при  $\dot{E}_{D,k}^{EN} < \dot{E}_{D,k}^{EX}$ , даний компонент може бути удосконалений «автоматично» за рахунок удосконалення інших компонентів системи або структурних змін системи.
- при  $\dot{E}_{D,k}^{EN} = \dot{E}_{D,k}^{EX}$  варто перейти до аналізу інших елементів системи, оскільки удосконалення одного з інших елементів обов'язково вплине на значення деструкції ексергії в даному елементі, тобто призведе до перших двох випадків аналізу.

Об'єднання цих чотирьох складових деструкції ексергії елемента системи забезпечило її поділ на такі частини: внутрішньо залежну і ту, якої неможна позбутися  $\dot{E}_{D,k}^{UN,EN}$  - не може бути усунута через існуючі технологічні обмеження даного елемента системи; зовнішньо залежну і ту, якої неможна позбутися  $\dot{E}_{D,k}^{UN,EX}$  - не може бути усунута через існуючі технологічні обмеження інших елементів системи та даного структурного рішення; внутрішньо залежну і ту, якої можна позбутися  $\dot{E}_{D,k}^{AV,EN}$  - може бути усунута за рахунок удосконалення даного елемента системи; зовнішньо залежну і ту, якої можна позбутися  $\dot{E}_{D,k}^{AV,EX}$  - може бути усунута за рахунок удосконалення інших елементів системи та/або структурного рішення системи.

Крім того, для кращого розуміння взаємного впливу компонентів системи, зовнішньо залежну деструкцію ексергії  $k$ -го компонента можна розділити за формулою [2]

$$\dot{E}_{D,k}^{EX} = \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq k}}^{n-1} \dot{E}_{D,k}^{EX,r} + \dot{E}_{D,k}^{mexo} \quad (3)$$

де  $\dot{E}_{D,k}^{EX,r}$  - частина зовнішньо залежної деструкції ексергії в  $k$ -му компоненті, яка спричинена  $r$ -м компонентом;

$\dot{E}_{D,k}^{mexo}$  - частина зовнішньо залежної деструкції ексергії в  $k$ -му компоненті, яка спричинена одночасною дією всіх компонентів системи одночасно.

На рис. 1 показана структура розділення деструкції ексергії у  $k$ -му компоненті системи у відповідності до наведеної вище класифікації.

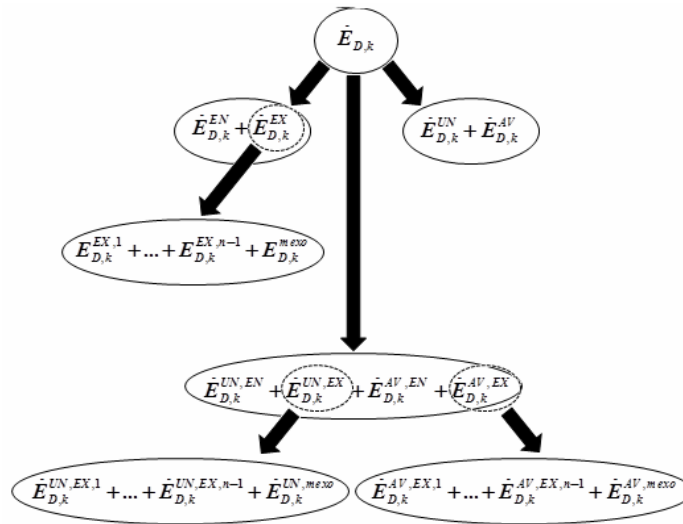


Рис. 1. Поділ деструкції ексергії у k-му компоненті системи [5]

З точки зору практичного удосконалення теплоенергетичної системи необхідно виділяти саме ту деструкцію ексергії, яку можна уникнути за рахунок удосконалення k-го елемента. Ця складова буде визначатися за формулою [2]

$$E_{D,k}^{AV,\Sigma} = E_{D,k}^{AV,EN} + \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq k}}^{n-1} \dot{E}_{D,r}^{AV,EX,k}, \quad (4)$$

де  $E_{D,k}^{AV,\Sigma}$  - сумарне значення деструкції ексергії, якої можна позбутися за рахунок термодинамічного удосконалення k-го компонента і яка має місце у даному елементі  $E_{D,k}^{AV,EN}$  та інших  $r$  елементах

$$\sum_{\substack{r=1 \\ r \neq k}}^{n-1} \dot{E}_{D,r}^{AV,EX,k}.$$

В роботі проведено дослідження із застосування методів поглибленого ексергетичного аналізу для ТНУ двох типів: «повітря-вода» та «вода-вода»

В проектному режимі роботи ТНУ типу «повітря-вода» прийняті наступні параметри: температура низькопотенційного джерела теплоти (зовнішнього повітря) знижується у випарнику від  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $-15^{\circ}\text{C}$ ; мінімальний температурний напір у випарнику дорівнює 12 К, а у конденсаторі становить 5 К. Розрахований ізентропічний ККД компресора становить у номінальному режимі роботи 70 %, а степінь стиснення робочого тіла дорівнює 12. Для оцінювання в розрахунковому режимі частини деструкції ексергії, якої позбутися неможливо через технологічні обмеження прийняті такі параметри: мінімально можливий для даного типу випарника температурний напір становить 3 К, мінімально можливий для даного типу конденсатора температурний напір рівний 1 К, максимально можливий за рахунок технічного удосконалення ізентропічний ККД процесу стиснення становить 88 %.

На рис. 2 наведено сумарні  $E_{D,k}^{year}$  за опалювальний період значення деструкції ексергії в елементах ТНУ типу «повітря-вода», піковому нагрівнику та опалювальному приладі для окремо взятого року в умовах м. Рівне. Бачимо, що найбільша сезонна деструкція ексергії характерна для ТНУ і становить 5254 кВт·год, а найменша – для пікового нагрівника і рівна 390 кВт·год. Сумарна за опалювальний період деструкція ексергії в опалювальному приладі становить 1514 кВт·год, тобто менше ніж у ТНУ на 72 %.

Якщо проаналізувати більш детально ТНУ, то, як видно із рис. 2, найбільші сумарні за опалювальний період значення деструкції ексергії характерні для компресора та дросельного вентиля. Згідно рис. 2 сумарні за опалювальний період значення деструкції ексергії становлять відповідно: у компресорі – 1752 кВт·год, у дросельному вентилі – 1632 кВт·год, у випарнику – 1144 кВт·год, у конденсаторі – 726 кВт·год. У порівнянні із компресором та дросельним вентилям деструкція ексергії у випарнику та конденсаторі є на 30...65 % менша.

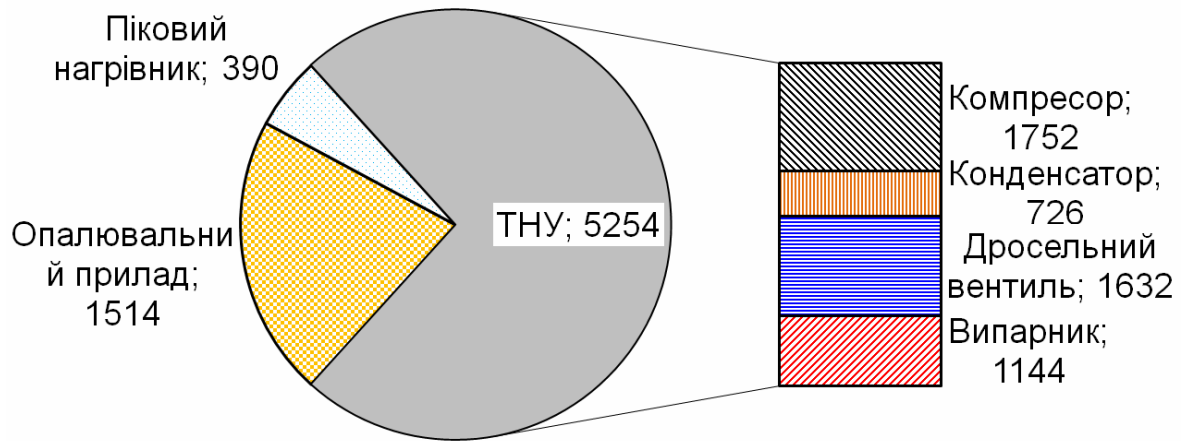


Рис. 2. Сумарні за опалювальний період значення деструкції ексергії  $E_{D,k}^{year}$ , кВт-год, в елементах ТНУ типу «повітря-вода», піковому нагрівнику та опалювальному приладі окремо взятого року

Розглянемо результати поглибленого ексергетичного аналізу ТНУ з урахуванням сезонних коливань режимів його роботи при теплозабезпеченні будинку. При цьому, виділимо саме ту частину деструкції ексергії в елементах ТНУ, яку можна уникнути (рис. 3). Саме ця частина і представляє найбільш практичний інтерес.

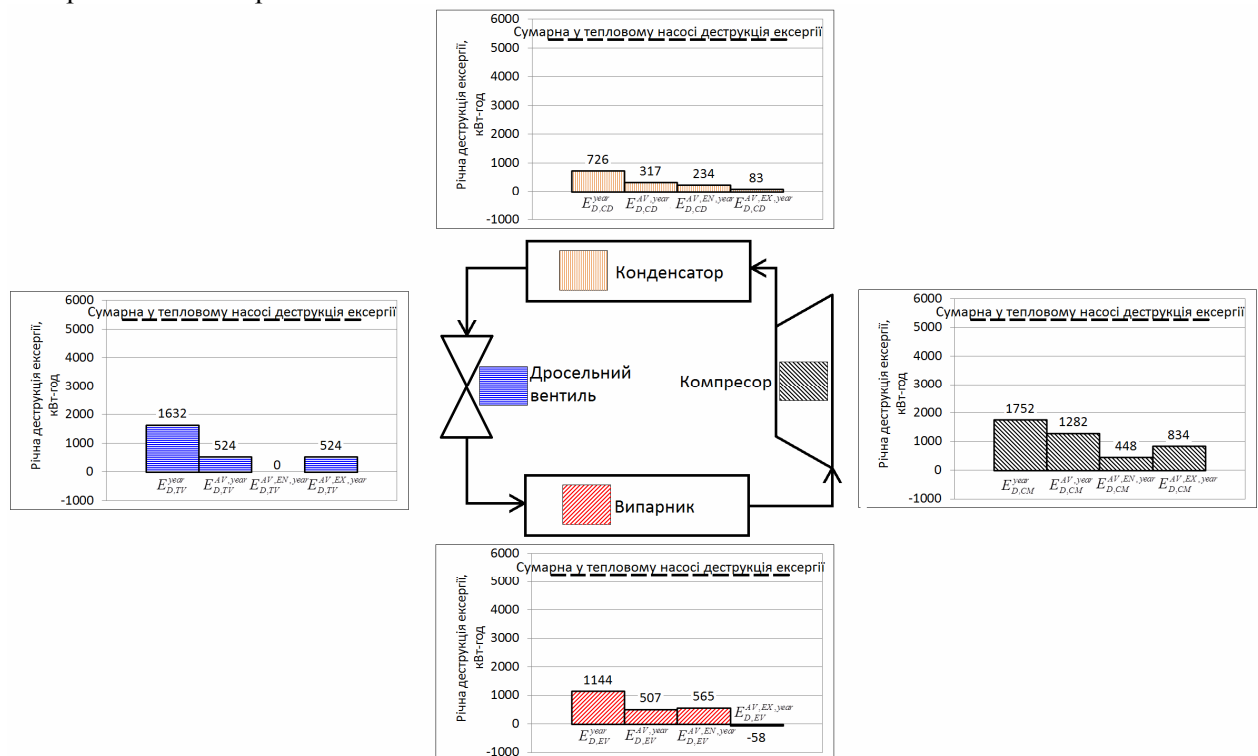


Рис. 3. Сумарні за опалювальний період значення тих частин деструкції ексергії, що можна уникнути у компонентах ТНУ типу «повітря-вода»

Отже, із рис. 3 бачимо, що найбільша частка цієї деструкції ексергії припадає на компресор і становить  $E_{D,CM}^{AV,year} = 1282$  кВт-год або 25 % від сумарної за опалювальний період деструкції ексергії у ТНУ в цілому. Для візуального порівняння на рис. 3 також показані значення всієї деструкції ексергії  $E_{D,k}^{year}$  у кожному елементі (лівий стовпчик на кожній діаграмі), а також штриховою лінією відмічений рівень сумарної у ТНУ деструкції ексергії. Найменша частка деструкції ексергії, що можна уник-

нути, припадає на конденсатор і рівна  $E_{D,CD}^{AV,year} = 317$  кВт·год або всього 6 % від сумарної за опалювальний сезон деструкції ексергії у ТНУ. У дросельному вентилі та випарнику дані частини деструкції ексергії відповідно становлять  $E_{D,TV}^{AV,year} = 524$  кВт·год та  $E_{D,EV}^{AV,year} = 507$  кВт·год.

Найбільша частка внутрішньо залежної деструкції ексергії, яку можна уникнути, належить випарнику і становить  $E_{D,EV}^{AV,EN,year} = 565$  кВт·год або 11 % від сумарної за опалювальний сезон деструкції ексергії у ТНУ. Трохи менше цієї частини деструкції ексергії належить компресору –  $E_{D,CM}^{AV,EN,year} = 448$  кВт·год або 9 % від сумарної за опалювальний сезон деструкції ексергії у ТНУ. Дана частина деструкції у редукційному вентилі відсутня, що узгоджується із методологією визначення цієї деструкції. У конденсаторі маємо  $E_{D,CD}^{AV,EN,year} = 234$  кВт·год або всього 5 % від сумарної за опалювальний сезон деструкції ексергії у ТНУ.

Найбільша частина зовнішньо залежної деструкції ексергії, яку можна уникнути, належить компресору і становить  $E_{D,CM}^{AV,EX,year} = 834$  кВт·год або 16 % від сумарної за опалювальний сезон деструкції ексергії у ТНУ. Трохи менше даної частини деструкції ексергії належить дросельному вентилю ( $E_{D,TV}^{AV,EX,year} = 524$  кВт·год). У конденсаторі маємо  $E_{D,CD}^{AV,EX,year} = 83$  кВт·год або всього 2 % від сумарної за опалювальний сезон деструкції ексергії у ТНУ. Особлива ситуація із зовнішньо залежною частиною деструкції ексергії у випарнику. Сумарне за опалювальний період значення цієї частини ексергії є від'ємним і становить  $E_{D,EV}^{AV,EX,year} = -58$  кВт·год. Це означає, що для зменшення цієї частини деструкції ексергії у випарнику необхідно збільшити деструкцію ексергії в інших елементах ТНУ. Подібний результат з отримання від'ємного значення частини деструкції ексергії отриманий також в роботах [3, 4].

Отже, найбільша частка ексергії, яку можна уникнути за рахунок удосконалення самого елемента, належить випарнику. Найбільша деструкція ексергії, що можна уникнути за рахунок інших елементів та структурних змін системи, належить компресору та дросельному вентилю. Для більш детального дослідження взаємного впливу компонентів системи, що спричиняє зовнішню залежну деструкцію ексергії  $k$ -го компонента ТНУ, перейдемо до наступного етапу поглибленого ексергетичного аналізу. Виділимо саме ту частину деструкції, що можна уникнути.

На рис. 4 наведено сезонні значення внутрішньо залежної і тієї, що можна уникнути, деструкції ексергії  $E_{D,k}^{EN,AV,year}$  та зовнішньо залежної і тієї, що можна уникнути, деструкції ексергії  $E_{D,k}^{EX,AV,year}$  для кожного компонента ТНУ. Причому остання складова у свою чергу розподілена кількісно на ті інші елементи ТНУ, від яких вона залежить (див. формулу (3)).

Отже, із рис. 4 бачимо, що в компресорі більша половина деструкції ексергії, яку можна уникнути, (834 кВт·год або 65 %) залежить від термодинамічної досконалості інших елементів. У свою чергу, ця деструкція, в основному обумовлена недосконалістю випарника, через який у компресорі має місце 634 кВт·год сезонної деструкції ексергії. 111 кВт·год сезонної деструкції ексергії у компресорі спричинена конденсатором, 87 кВт·год – сумісною дією двох елементів (випарника та конденсатора).

Із рис. 4 видно, що на відміну від компресора, в конденсаторі більша половина деструкції ексергії, яку можна уникнути, (234 кВт·год або 75 %) залежить від термодинамічної досконалості самого конденсатора. Якщо проаналізувати зовнішню залежну деструкцію ексергії, то, як видно із рис. 4, найбільша частина її (56 кВт·год або 18 %) обумовлена сумісною дією одночасно двох елементів (випарника та компресора). Відповідно компресор спричиняє 16 кВт·год сезонної деструкції ексергії у конденсаторі, а випарник 8 кВт·год.

Із даних на рис. 4 видно, що у дросельному вентилі вся частина деструкції ексергії, яку можна уникнути, залежить від термодинамічної досконалості інших компонентів ТНУ. Причому, найбільша частка (403 кВт·год або 68 %) даної деструкції спричинена недосконалістю випарника. 154 кВт·год або 26 % зумовлена процесами необоротності при передачі теплоти у конденсаторі. Як видно із рис. 4, частина зовнішньо залежної і тієї, яку можна уникнути, деструкції ексергії у дросельному вентилі, що зумовлена компресором, є від'ємною (-16 кВт·год). Це означає, що деяка частина деструкції ексергії у дросельному вентилі може бути зменшена шляхом збільшення термодинамічної недоско-

налості у компресорі. Деструкція ексергії, обумовлена сумісною дією всіх трьох елементів (випарника, конденсатора та компресора) також є від'ємною (-17 кВт·год).

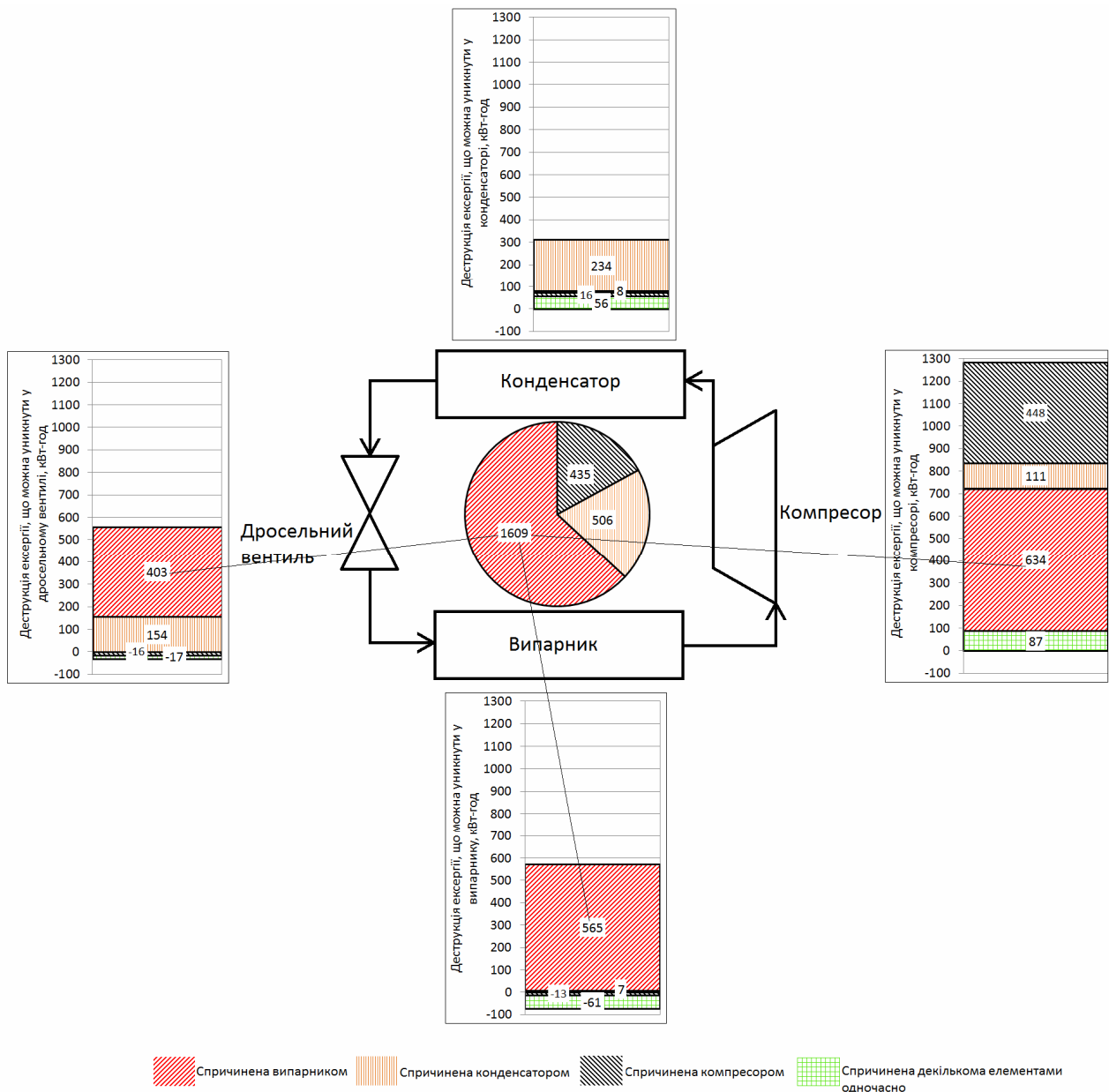


Рис. 4. Сезонні  $E_{D,k}^{AV,\Sigma,year}$  за опалювальний період значення деструкції ексергії, що можна уникнути за рахунок удосконалення k-го елемента ТНУ типу «повітря-вода»

Із рис. 4 видно, що у випарнику майже вся частина деструкції ексергії (565 кВт·год), яку можна уникнути, залежить від термодинамічної досконалості самого випарника. Що ж стосується зовнішньої залежної деструкції ексергії, то 7 кВт·год цієї частини ексергії обумовлена необоротністю у конденсаторі, 13 кВт·год, але з від'ємним знаком, обумовлена необоротністю у компресорі та 61 кВт·год, також з від'ємним знаком, обумовлена сумісними процесами необоротності у компресорі та конденсаторі. Для зменшення від'ємної частини деструкції ексергії у випарнику необхідно на цю величину збільшити деструкцію ексергії у: компресорі (13 кВт·год) та сумісно у компресорі та конденсаторі (61 кВт·год).

Як видно із рис. 4, найбільше значення деструкції ексергії, яку можна уникнути за рахунок удосконалення k-го елемента ТНУ (див. формулу (4)), характерне для випарника і становить

$E_{D,EV}^{AV,\Sigma,year} = 1609$  кВт·год. У конденсаторі та компресорі ці частини деструкції відповідно становлять  $E_{D,CD}^{AV,\Sigma,year} = 506$  кВт·год та  $E_{D,CM}^{AV,\Sigma,year} = 435$  кВт·год тобто відповідно у 3 та 3,7 рази менше, ніж у випарнику.

Отже, для даного випадку теплозабезпечення будику за допомогою ТНУ типу «повітря-вода», найбільшу частку деструкції ексергії у ТНУ можна знизити за рахунок удосконалення випарника, а саме зниження необоротності при передачі теплоти у цьому елементі шляхом зменшення температурного напору.

На рис. 5 наведені сумарні  $E_{D,k}^{year}$  за опалювальний період значення деструкції ексергії в елементах ТНУ типу «вода-вода», піковому нагрівнику та опалювальному приладі. В проектному режимі роботи ТНУ прийняті наступні параметри: температура низькопотенційного джерела теплоти у випарнику знижується від +6 °С до +3 °С; мінімальний температурний напір у випарнику та конденсаторі дорівнює 5 К, розрахований ізентропічний ККД компресора становить у номінальному режимі роботи 82 %. Для оцінювання в розрахунковому режимі частини деструкції ексергії, якої позбутися неможливо через технологічні обмеження прийняті такі параметри: мінімально можливий для даного типу випарника та конденсатора температурний напір становить 1 К, максимально можливий за рахунок технічного удосконалення ізентропічний ККД процесу стискання становить 92 %.

Із рис. 5. бачимо, що найбільша сезонна деструкція ексергії характерна також для ТНУ і становить 2439 кВт·год, а найменша – для пікового нагрівника і рівна 376 кВт·год. Сумарна за опалювальний період деструкція ексергії в опалювальному приладі становить 1745 кВт·год.

Якщо проаналізувати більш детально ТНУ, то як видно із рис. 5, найбільші сумарні за опалювальний період значення деструкції ексергії характерні для компресора та дросельного вентиля. Згідно рис. 5 сумарні за опалювальний період значення деструкції ексергії становлять відповідно: у компресорі – 623 кВт·год, у дросельному вентилі – 898 кВт·год, у випарнику – 438 кВт·год, у конденсаторі – 480 кВт·год.

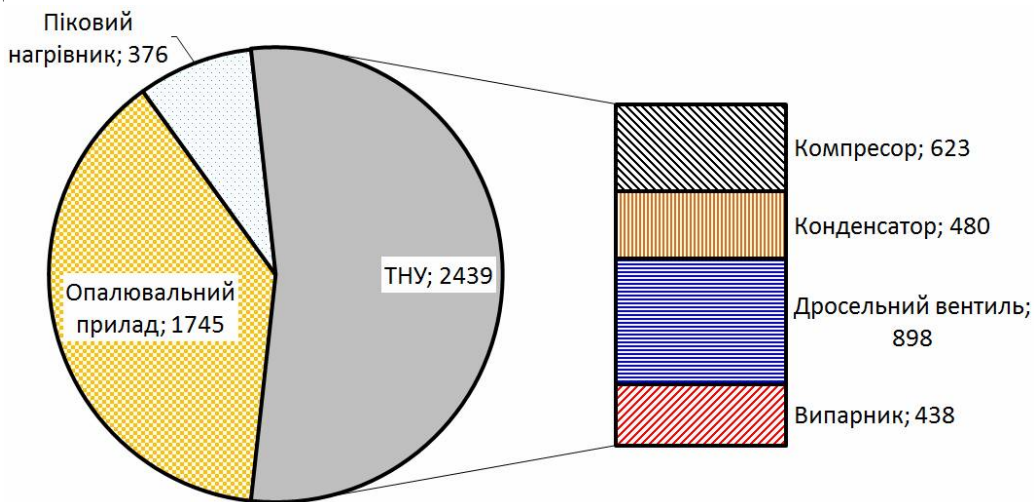


Рис. 5. Сумарні за опалювальний період значення деструкції ексергії  $E_{D,k}^{year}$ , кВт·год, в елементах ТНУ типу «вода-вода», піковому нагрівнику та опалювальному приладі окремо взятого року

На рис. 6 наведені згруповані відповідним чином сезонні значення внутрішньо залежної і тієї, що можна уникнути, деструкції ексергії  $E_{D,k}^{EN,AV,year}$  та зовнішньо залежної і тієї, що можна уникнути, деструкції ексергії  $E_{D,k}^{EX,AV,year}$  для кожного компонента ТНУ типу «вода-вода».

Бачимо, що найбільше сезонне значення сумарної деструкції ексергії, яку можна уникнути у ТНУ, спричинене випарником  $E_{D,EV}^{AV,\Sigma,year} = 479$  кВт·год. Для конденсатора ця частина деструкції виявилася на 29 % менша ніж у випарнику. Для компресора ця частина деструкції ексергії є досить малою і становить всього 197 кВт·год. Деструкція ексергії, яку можна уникнути за допомогою удосконалення дросельного вентиля  $E_{D,TV}^{AV,\Sigma,year}$  рівна нулю. Тобто у прийнятих умовах, термодинамічне удоскона-

лення ТНУ можливе за рахунок зменшення необоротностей при передачі теплоти у випарнику та конденсаторі – тобто зниження температурного напору у цих теплообмінниках. При цьому, випарник має більші можливості ніж конденсатор. У компресорі можливості незначні, а дросельний вентиль взагалі не в змозі підвищити термодинамічну ефективність установки.

Наступний етап реалізації методів поглибленого ексергетичного аналізу базується на поєднанні методів оцінювання впливу необоротностей на економічну та екологічну ефективність системи [9].

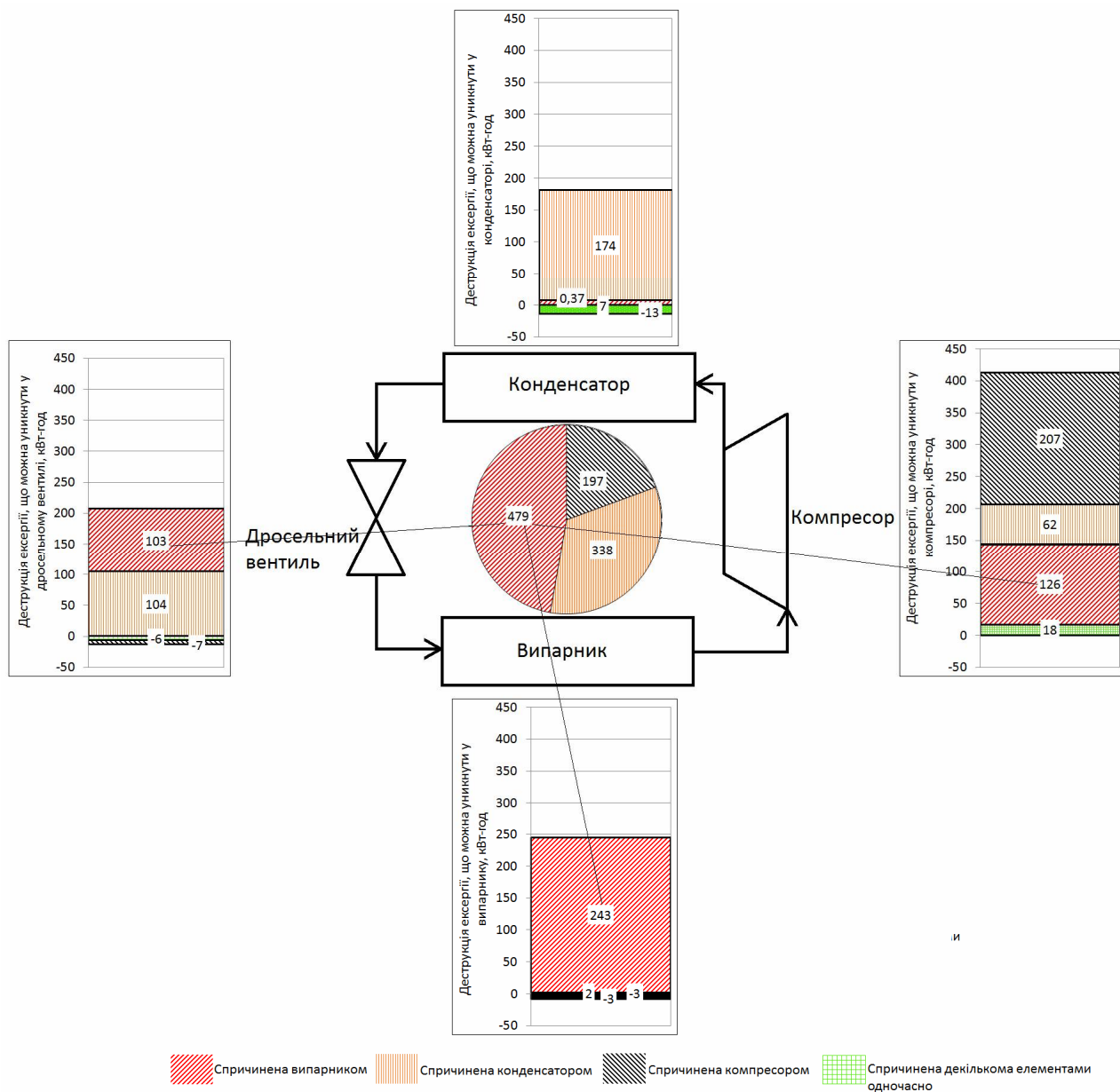


Рис. 3.8. Сезонні  $E_{D,k}^{AV,\Sigma,year}$  за опалювальний період значення деструкції ексергії, що можна уникнути за рахунок удосконалення k-го елемента ТНУ типу «вода-вода»

### Висновки

1. Реалізація методології поглибленого ексергетичного аналізу ТНУ в складі системи теплозабезпечення дала змогу уже при першій ітерації виявити місцезнаходження, причини, а також розрахувати значення термодинамічної неефективності елементів ТНУ.
2. Показано, що для найбільш розповсюджених на сьогоднішній день типів ТНУ зниження температурного напору у випарнику та конденсаторі сприяє найбільшому зниженню деструкції ексергії



не тільки у цих елементах, але і у дросельному вентилі та компресорі.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Bejan A. Thermodynamics today [Text] / A. Bejan // Energy. – 2018. – Vol. 160. – P. 1208–1219.
2. Tsatsaronis, G. Advanced exergy-based methods used to understand and improve energy-conversion systems/ G. Tsatsaronis, T. Morosuk [Text] // The 4th International Conference on Contemporary Problems of Thermal Engineering (CPOTE-2016). Program and Proceedings, Gliwice – Katowice, Silesia, Poland, September, 14-16, 2016. – Gliwice – Katowice, Silesia, 2016. – P. 75 - 89.
3. Morosuk T. New approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines [Text] / T. Morosuk, G. Tsatsaronis // Energy. – 2008. – Vol. 33. – P. 890–907.
4. Morosuk, T. Advanced exergetic evaluation of refrigeration machines using different working fluids [Text] / T. Morosuk, G. Tsatsaronis // Energy. – 2009. – Vol. 34. – P. 2248–2258.
5. Morosuk T. Advanced exergy analysis for chemically reacting systems-application to a simple open gas-turbine system [Text] / T. Morosuk, G. Tsatsaronis // Int J Thermodyn. – 2009. – Vol. 12 – P. 105–111.
6. Erbay, Z. Application of conventional and advanced exergy analyses to evaluate the performance of a ground-source heat pump (GSHP) dryer used in food drying [Text] / Z. Erbay, A. Hepbasli // Energy Conversion and Management. – 2014. – Vol. 78. – P. 499–507.
7. Харлампида, Д. Х. Структурный термодинамический анализ парокомпрессорной холодильной машины [Текст] / Д. Х. Харлампида, В. А. Тарасова // Технические газы. – 2012. – № 5. – С. 57–66.
8. Voloshchuk V. A. Advanced exergetic analysis of a heat pump providing space heating in built environment [Text] / V. A. Voloshchuk // Energetika. – 2017. – 63(3). – P. 83–92.
9. Tsatsaronis G. A general exergy-based method for combining a cost analysis with an environmental impact analysis. part I – theoretical development / G. Tsatsaronis, T. Morosuk // International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE-2008). Program and Proceedings, Boston, Massachusetts, USA, October 31-November 6, 2008. – Boston, Massachusetts, 2008. – P. 453 - 462.

**Волощук Володимир Анатолійович** — д-р техн. наук, доцент кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, e-mail: Vl.Volodya@gmail.com

**Любицький Сергій Вікторович** — старший викладач кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, e-mail: lyubitsky@gmail.com.

**Voloshchuk Volodymyr** — Dr. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Automation of Heat and Power Engineering Processes, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, email: Vl.Volodya@gmail.com

**Lyubitsky Serhii** — Senior Lecturer, Department of Automation of Heat and Power Engineering Processes, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, email: lyubitsky@gmail.com