

Авторефер.  
175

Н

Одеська державна академія холоду

**ЛОМОВЦЕВ ПАВЛО БОРИСОВИЧ**

УДК 621.57

**ДІАГНОСТИКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ  
ХОЛОДИЛЬНИХ І ТЕПЛОАСОСНИХ СИСТЕМ**

Спеціальність 05.05.14. – Холодильна і криогенна техніка,  
системи кондиціонування

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2003

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Одеській державній академії холоду Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – кандидат технічних наук, доцент Косой Борис Володимирович, Одеська державна академія холоду, доцент кафедри технічної термодинаміки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор Нікульшин Володимир Русланович, Одеський національний політехнічний університет, завідувач кафедрою теоретичної, загальної і нетрадиційної енергетики;

доктор технічних наук, професор Лагутін Анатолій Юхимович, Одеська державна академія холоду, професор кафедри холодильних установок.

Ведуча організація – Одеська національна академія харчових технологій, кафедра теплохладотехніки.

Захист дисертації відбудеться « 5 » червня 2003 року в 11.30 годин на засіданні спеціалізованої Вченої ради Д41.087.01 при Одеській державній академії холоду за адресою: 65026, м. Одеса, вул. Дворянська 1/3.

Дисертацію можна ознайомитися в бібліотеці Одеської державної академії холоду.

Відомості надіслані « 5 » травня 2003 року.

525



V.I. Мілованов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність.** Ефективне використання паливно-енергетичних ресурсів (ТЕР) і застосування енергозберігаючих технологій є найважливішою умовою стійкого розвитку економіки. Рішення проблеми забезпечення ТЕР для задоволення зростаючих потреб населення, промисловості, сільського господарства і комунального сектора зв'язано як з активним упровадженням технологій альтернативної енергетики, так і з пошуком раціональних способів зниження енергетичних втрат і енергоємності традиційних систем перетворення енергії.

Відомо, що одним з ефективних заходів щодо економії палива і захисту навколишнього середовища, є застосування термотрансформаторів (ТТ), що працюють у режимі теплового насоса, і перетворюють природну низькопотенційну теплоту і теплові відходи в тепло більш високого потенціалу, що в ряді випадків служить альтернативою центральному паровому і водяному опаленню, електрообігріванню і т.п. При цьому, найбільший енергетичний і економічний ефект зв'язаний з можливістю спільного вироблення тепла і холоду.

Рішення про доцільність застосування технологій комплексного вироблення холоду і тепла, а також вибір робочих параметрів установок вимагають аналізу енергетичних і економічних критеріїв ефективності, експериментальне визначення і моніторинг яких являють собою трудомістку і витратну процедуру. Це, у свою чергу, ініціює задачу розробки комп'ютерно-орієнтованих методик, що дозволяють здійснити чисельне дослідження і згенерувати на його основі рекомендації, як по раціональному проектуванню, так і по експлуатації діючих установок.

З іншого боку, важливою ланкою в механізмі енергозбереження є забезпечення ефективних режимів роботи (які характеризуються мінімальними відхиленнями режимних параметрів від їхніх проектних значень) енергоспоживаючих і енерготрансформуючих установок, що сприяє зниженню споживання ТЕР. Комп'ютерні системи діагностики і моніторингу, мабуть, повинні стати незамінним інструментом для рішення цієї задачі.

**Мета і задачі дослідження.** Основною метою даної роботи є розробка системного методу діагностики на основі створення ефективної моделюючої системи для парокompресійних ТТ, що дозволяє ідентифікувати раціональні режими роботи й установити причини зниження ефективності окремих елементів, а також холодильних і теплонасосних установок у цілому шляхом визначення і наступного аналізу термоекономічних показників ефективності.

**Об'єктом досліджень** є холодильні і теплонасосні системи.

**Предметом досліджень** є діагностика енергетичної ефективності холодильних і теплонасосних систем, яка ідентифікує їх штатні, еталонні і ефективні режими на основі методів ексергоекономіки.

**Методи дослідження:** теоретичні узагальнення, математичне моделювання, аналітичні і чисельні методи, апроксимація масиву табличних даних, комп'ютерне моделювання, чисельні

XV 1225  
ІНСТИТУТ ХОЛОДА  
ОНАХТ  
БІБЛІОТЕКА

експерименти, експериментальна апробація розробленої комп'ютерної програми системної діагностики для діючої виробничої установки.

**Основне наукове положення**, новизна якого захищається автором:

Системна діагностика одноступінчатої парокompресійної холодильної машини і теплового насосу здійснюється на основі декомпозиції її виробляючої структури на п'ять підсистем й три комунікатори (з'єднання).

**Наукова новизна** роботи визначається наступними результатами:

- розроблено метод системної діагностики холодильних машин (ХМ) і теплових насосів (ТН), заснований на теорії ексергетичної вартості що дозволяє оцінити енергетичну ефективність установки, ідентифікувати внутрікомпонентні і структурні необоротності, а також визначити зв'язані з ними додаткові втрати ТЕР;
- запропоновано методику ідентифікації ефективного режиму на базі локальної оптимізації питомої ексергетичної вартості підсистем, що дозволяє поліпшити термoeкономічні показники установки в порівнянні зі штатним режимом;
- створено відкриту універсальну багаторівневу модульну систему ТТ–RH для формування теплотехнічних моделей термотрансформаторів, що працюють по схемах R, H і RH, що дозволяє проводити параметричний і структурний аналіз на етапі передпроектних розробок, генерувати схеми ТТ, а також розраховувати характеристики і проводити діагностику ефективності роботи ТТ у заданих умовах, а також формувати довірливі запити, що відображають типові проектні процедури, реалізовувати сервісні проектні процедури, документувати результати розрахунків і діагностики, зберігати необхідну довідкову й іншу інформацію;
- за допомогою розробленої моделюючої системи ТТ–RH проведені чисельні експерименти з метою аналізу термодинамічної ефективності окремих процесів і циклів парокompресійних ХМ і ТН на холодильних агентах: R134a, R717, R152a, R113, R123 у широкому діапазоні зміни температур кипіння і конденсації в циклі.

**Практичне значення отриманих результатів.** Розроблена автором методика діагностики ХМ і ТН дозволяє не тільки виявляти причини неефективності окремих елементів і всієї установки в цілому, але і, при її інтеграції в автоматичну систему керування, забезпечувати підтримку раціонального режиму роботи установки. Модульна система ТТ–RH є відкритою й адаптованою для поповнення баз даних і тому може бути використана для проектування і чисельних параметричних досліджень одно- і двоступінчатих парокompресійних ХМ і ТН на різних холодильних агентах, що забезпечує істотну економію часу і матеріальних ресурсів.

Результати проведених досліджень і розробок використовуються в планах розвитку і реконструкції системи хладопостачання ЗАТ «Одеса».

**Особистий внесок здобувача** складається в розробці методу системної діагностики ХМ і ТН і

створенні моделюючої модульної системи ТТ–RH.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи були представлені на:

республіканській науково-технічній конференції «Оптимізація керування, інформаційні системи і комп'ютерні технології», Південний науковий центр, м. Київ – Одеса, 1999 р.;

конференції «Енергозбереження, ефективність, екологія», у рамках програми виставки «Инстал-терм-2002», м. Одеса, 2002 р.;

II Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології», м. Одеса, 2002 р.

**Публікації.** По темі дисертації опубліковані шість друкованих праць у науково-технічних журналах і працях міжнародних науково-технічних конференцій.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертація викладена на 167 сторінках машинописного тексту, включаючи 46 рисунків, 7 таблиць і складається з вступу, чотирьох глав, списку літератури з 148 найменувань і додатків на 10 сторінках.

### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У **вступі** відображена актуальність роботи, сформульовані цілі і задачі дослідження, що впливають із сучасного стану проблеми, сформульовані наукові положення, новизна, основні результати роботи і визначена її практична цінність.

У **першому розділі** розглянуті види термотрансформаторів, які використовуються у техніці, у тому числі – парокompресійні установки, що працюють за комбінованою схемою RH для спільного вироблення тепла і холоду. Комбіновані установки RH ефективно використовуються в енергозберігаючих технологіях хімічної і нафтохімічної промисловості для тепlopостачання й охолодження води на основі утилізації низькопотенційного тепла.

Виконаний аналіз спеціальної науково-технічної літератури виявив відсутність розробок на рівні створення комп'ютерно-орієнтованих систем, що дозволяли б оцінити енергетичну ефективність, ідентифікувати внутрікомпонентні і структурні необоротності, а також визначити зв'язані з ними додаткові втрати ТЕР у холодильних і теплонасосних установках.

Існуючі методи аналізу ХМ і ТН як різноманітні, так і неоднозначні з позиції вибору критеріїв ефективності і визначення раціональних штатних режимів. При цьому, зведення про ефективні методи діагностики раціональних режимів роботи систем за комбінованою схемою RH практично відсутні, як у вітчизняній, так і в закордонній науково-технічній літературі.

Проведені дослідження показали, що для забезпечення адекватності математична модель (ММ) установки, що працює за схемою RH, повинна містити рівняння, що описують елементи ХМ і ТН, а також процеси і зовнішні зв'язки в них. Чисельний експеримент на основі такої моделі дозволяє аналізувати різні комбінації зовнішніх факторів і внутрішніх параметрів системи, у тому числі,

нереалізовані при натурних іспитах ХМ і ТН. При цьому використання відомих моделей окремих елементів дозволяє створити багаторівневу модульну систему термотрансформатора RH у цілому.

Другий розділ присвячений опису розробленої відкритої багаторівневої модульної системи ТТ–RH, що призначена для параметричного і структурного аналізу різних схем термотрансформаторів на етапах, що передують безпосередньому процесу проектування і конструювання. Предметною основою системи ТТ–RH служать модулі декількох рівнів, що описують характерні процеси в різних елементах ХМ і ТН (основних і допоміжних) в однакових вимогах, що забезпечують коректність і простоту їхньої спільної взаємодії. Блоки «А» – автономні і не залежать від модулів інших рівнів. Наповнення модулів відповідних рівнів показано на рис. 1.

Універсальні принципи синтезу моделей ХМ і ТН на основі зазначених модулів використовують умови нерозривності потоку, баланс потужності, тепловий баланс, враховують агрегатний стан робочого тіла. Такий підхід дозволяє здійснити складний процес синтезу моделі з типових модулів простим і доступним способом. На рис. 2 представлені копії екрана «ТТ–RH Ідентифікація вхідних даних ХМ (ТН)» і «ТТ–RH Результати моделювання ХМ (ТН)».

У третьому розділі приведені результати чисельних експериментів, здійснених за допомогою системи ТТ–RH, по термодинамічному моделюванню одно- і двоступінчатого парокompresійного термотрансформатора. Основними задачами моделювання були: визначення раціональних режимів роботи; виявлення неефективностей окремих ланок і рівня їхнього впливу на загальну енергетичну ефективність термотрансформатора.

При проведенні чисельних експериментів як критерій ефективності ХМ і ТН розглядався ексергетичний к.к.д. Для установок, що працюють за схемою RH

$$\eta_{ex}^{RH} = \frac{E_q^R + E_q^H}{E_{ex}} \quad (1)$$

де  $E_{ex}$ ,  $E_q^R$ ,  $E_q^H$  – підводима до установки ексергія, холодо- і теплопродуктивність, відповідно.

Було проведено моделювання одноступінчатої парокompresійної установки на R134a, R717, R123, R113, R152a. При цьому приймалися: кінцева різниця температур між робочим тілом і теплоносієм у випарнику і конденсаторі 5 град.; підігрів теплоносія (води) у конденсаторі 30 град.; охолодження теплоносія (води) у випарнику 7 град. Дослідження проводилися при постійній температурі конденсації  $t_k=80^\circ\text{C}$  у діапазоні температур кипіння  $t_o=-20...20^\circ\text{C}$ . Рівняння ексергетичного балансу установки, що працює за схемою RH, має вид:

$$e_x^{ex} = e_x^u + e_x^k + \sum d_e \quad (2)$$

де  $e_x^{ex}$ ,  $e_x^u$ ,  $e_x^k$ ,  $\sum d_e$  – питома кількість ексергії, підводимої до установки у вигляді електроенергії на привід компресора; питома ексергія, які підводяться до випарника і конденсатора; сума питомих

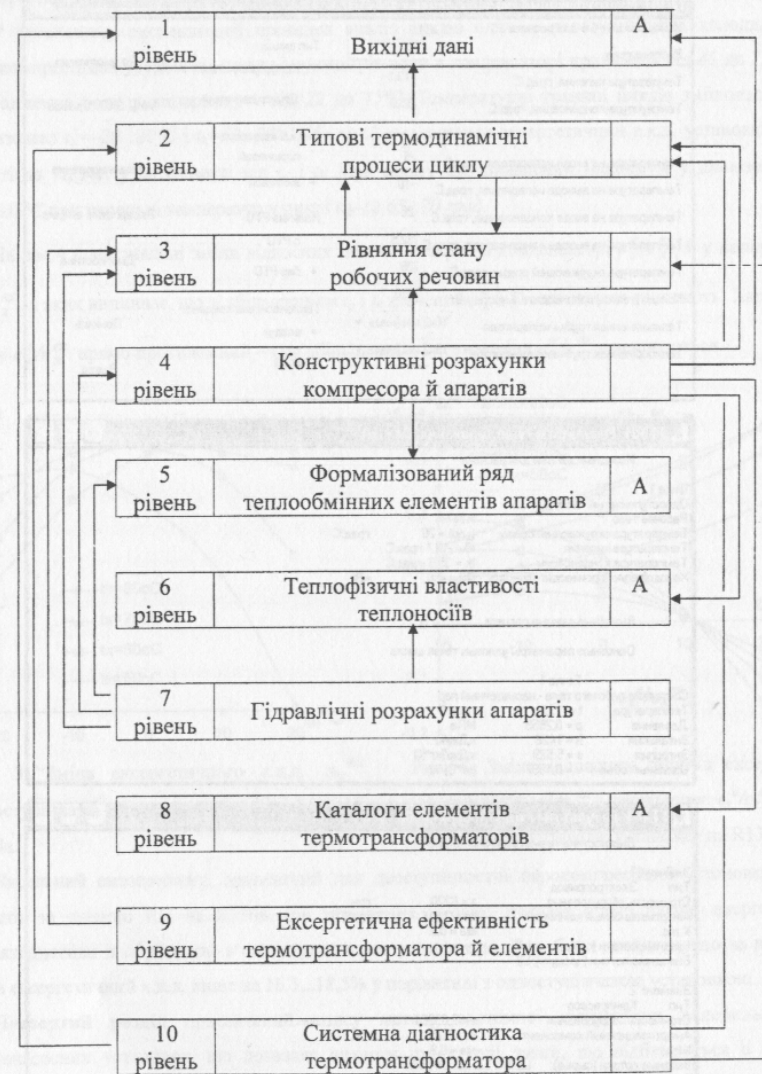


Рис. 1. Структура багаторівневої модульної системи ТТ–RH.

TT-RH Идентификация входных данных ХМ (ТН)			
Исходные данные для расчета			
Рабочее тело	R717	Тип цикла	По умолчанию
Температура кипения, град.С	-13,1	<input checked="" type="radio"/> Одноступенчатый	
Температура конденсации, град.С	35,6	<input type="radio"/> Двухступенчатый	АХУ ЗАО "Одесса"
Температура на входе испарителя, град.С		Тип компрессора	
-5		<input type="radio"/> поршневой	Моделирование
Температура на выходе испарителя, град.С		<input checked="" type="radio"/> винтовой	
-10		Наличие РТО	Эксергетич. анализ
Температура на входе конденсатора, град.С		<input type="radio"/> с РТО	
25		<input checked="" type="radio"/> без РТО	Диагностика
Температура на выходе конденсатора, град.С		Теплоноситель конденс.	
32,5		<input checked="" type="radio"/> вода	Помощь
Температура окружающей среды, град.С		<input type="radio"/> воздух	
28			Выход
Холодо (тепло-) производительность, кВт			
450			
Теплообменная трубка испарителя	16x2 мм (медь)		
Теплообменная трубка конденсатора	16x2 мм (медь)		

TT-RH Результаты моделирования ХМ (ТН)			
Исходные данные для расчета			
Цикл 1			
Одноступенчатый без РТО			
Рабочее тело	R717		
Температура окружающей среды	t <sub>out</sub> = 28	град.С	
Температура кипения	t <sub>0</sub> = -13,1	град.С	
Температура конденсации	t <sub>k</sub> = 35,6	град.С	
Холодо(тепло-)производительность	Q <sub>0</sub> = 450	кВт	
Выходные данные расчета			
Основные параметры узловых точек цикла			
Точка 1			
Состояние рабочего тела - насыщенный пар			
Температура	t = -13,1	град.С	
Давление	p = 0,2559	МПа	
Энтальпия	h = 1428	кДж/кг	
Энтропия	s = 5,529	кДж/(кг·К)	
Удельный объем	v = 0,4697	м <sup>3</sup> /кг	

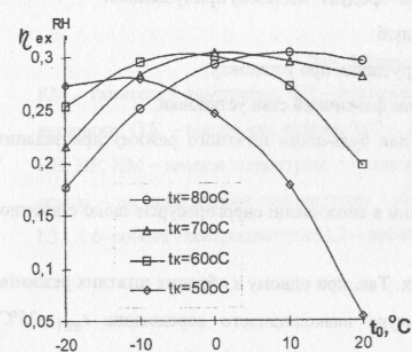
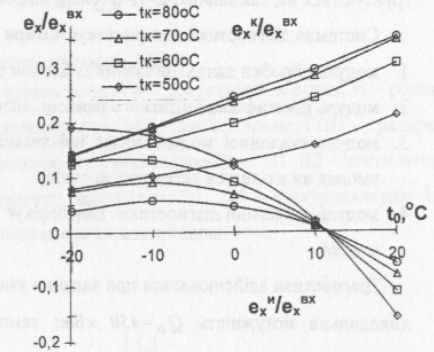
TT-RH Результаты моделирования ХМ (ТН)			
Диагностика термотрансформатора			
Элемент 1			
Тип	Электропривод		
Стоимость оборудования	z = 6220	грн.	
Амортизационный компонент	kz = 2,816	грн.	
К.п.д.	eta = 0,9		
Входные потоки (сырье): L1			
Выходные потоки (продукт): L2			
Элемент 2			
Тип	Компрессор		
Стоимость оборудования	z = 2,039E4	грн.	
Амортизационный компонент	kz = 16,51	грн.	
К.п.д.	eta = 0,9		
Входные потоки (сырье): L2, L4, L5, L6, Lw, SK			
Выходные потоки (продукт): PK, TK			
Поток PK			
Тип	P		
Статус	продукт		
Эксергия	e = 184,1	кВт	

Рис. 2. Работа із системою TT-RH.

необоротних втрат в установці, відповідно.

У чисельному експерименті проведено аналіз циклів одно- і двоступінчастої холодильних парокompресійних установок, при цьому підігрів води в конденсаторі приймався від 45 до 75°C, а охолодження води у випарнику – від 22 до 15°C. Температурні границі циклів змінювалися в діапазонах:  $t_0 = -20...20^\circ\text{C}$  і  $t_k = 50...80^\circ\text{C}$ . На рис.3 представлено ексергетичний к.к.д. установки при роботі на R134a, у залежності від  $t_0$  і  $t_k$ . При цьому був виявлений максимум у діапазоні  $t_0 \approx -12...10^\circ\text{C}$  при перепаді температур у циклі  $(t_k - t_0)$  63...70 град.

На рис.4 представлені зміни відносних потоків ексергії в конденсаторі  $e_x^k/e_x^{ax}$  й у випарнику  $e_x^u/e_x^{ax}$ , з яких випливає, що зі збільшенням  $t_0$  і  $t_k$  значення  $e_x^k/e_x^{ax}$  монотонно зростають. Характер зміни  $e_x^u/e_x^{ax}$  прямо протилежний – при збільшенні  $t_0$  і  $t_k$  значення  $e_x^u/e_x^{ax}$  зменшуються.

Рис. 3. Зміна ексергетичного к.к.д.  $\eta_{ex}^{RH}$  в одноступінчатій установці при роботі на R134a.Рис. 4. Зміна відносних потоків ексергії в конденсаторі  $e_x^k/e_x^{ax}$  і випарнику  $e_x^u/e_x^{ax}$  при роботі одноступінчатій установці на R134a.

Чисельний експеримент, проведений для двоступінчастої парокompресійної установки, що працює за схемою RH на R134a при зазначених умовах, показав більш високі енергетичні характеристики в порівнянні з одноступінчатою установкою. Так, було знайдено, що за певних умов ексергетичний к.к.д. вище на 16,3...18,5% у порівнянні з одноступінчатою установкою.

Четвертий розділ присвячений опису методу системної діагностики холодильних і теплонасосних установок, що дозволяє виявити структурні зміни, що відбуваються в них, і відображає процес формування і перерозподілу ексергетичних вартісних потоків.

Основна задача системної діагностики ХМ і ТН – визначення витрачених ресурсів, що можуть бути зекономлені при збереженні кількості і підтримці постійними технічних параметрів кінцевого продукту, і ідентифікація способів такої економії.



$$d_{en} = \mathcal{E}_n - \Pi_n = (k_n - 1) \cdot \Pi_n, \quad (4)$$

де  $d_{en}$ ,  $\mathcal{E}_n$ ,  $\Pi_n$  – необоротність, енергосировина і продукт у розглянутій підсистемі, відповідно;  $k_n$  – питома енергоспоживання,  $k_n = \mathcal{E}_n / \Pi_n$ .

Зниження росту необоротності в  $n$ -му компоненті можливо шляхом зміни його ефективності і/чи зміною кількості продукту:

$$\delta d_{en} = \Pi_n \cdot \Delta k_n + (k_n - 1) \cdot \delta \Pi_n = \delta d_{en,i} + \delta d_{en,j}, \quad (5)$$

де  $\delta d_{en,i} = \Pi_n \cdot \Delta k_n$ ;  $\delta d_{en,j} = (k_n - 1) \cdot \delta \Pi_n$  – структурна необоротність.

На рис.7 зображені всі підсистеми АХУ з внутрішньокomпонентними і структурними необоротностями, викликаними їхнім неефективним функціонуванням. Видно, що найбільші сумарні необоротні втрати 7,544 кВт спостерігаються в першій підсистемі – блоці електропривода компресора. Слідом розташовується друга підсистема – блок компресора, із сумарними втратами 6,612 кВт. Найменші сумарні втрати 0,840 кВт у п'ятій підсистемі – у випарному блоці. Найбільші внутрішньокomпонентні втрати 6,583 кВт має також блок електропривода, найменші 0,840 кВт – випарний блок. Найбільші втрати 3,346 кВт від структурної необоротності має компресорний блок, найменші 0,062 кВт – конденсаторний блок. На рис.8 показан розподіл додаткових витрат енергосировини стосовно повної його витрати в АХУ. Додаткова витрата сировини в штатному режимі в порівнянні з еталонним, прямо пропорційна сумарним необоротним втратам у підсистемах. Найбільша відносна додаткова витрата енергосировини 10,97% приходить на електропривід компресора, найменший 2,26% – на випарний блок.

Аналіз отриманих результатів діагностики показує, що в АХУ найбільше ефективно працює п'ята підсистема (випарний блок), а гірше інших – перша підсистема (блок електропривода компресора). Основна частина втрат у всіх підсистемах приходить на внутрішньокomпонентні необоротності, крім компресорного блоку, у якому співвідношення внутрішньокomпонентних і структурних необоротностей практично однакове. Порівняльний аналіз результатів штатного й еталонного режимів показує, що, як ексергетична, так і ексергоекономічна вартості потоків менше в еталонному режимі. У підсумку, повна ексергоекономічна вартість продукту  $\Pi_M$  у штатному режимі збільшилась з 36223 до 38669 грн/ГДж, тобто на 6,75%, а електричний холодильний коефіцієнт знизився з 2,694 до 2,471 (на 8,28%). Ексергетична  $V^*$  і питома ексергетична  $k^*$  вартості зросли на 4,31%. При цьому енергетична складова вартості у штатному режимі збільшилась з 8351 до 8766 грн/ГДж, що відповідає додатковим втратам в 4,97%. Амортизаційна складова вартості підвищилась з 27870 до 29902 грн/ГДж, тобто на 7,29%.

Для ідентифікації ефективних режимів роботи АХУ використовувалася гіпотеза Лозано і Валеро про те, що в будь-якій виробляючій структурі загальна термоекономічна вартість

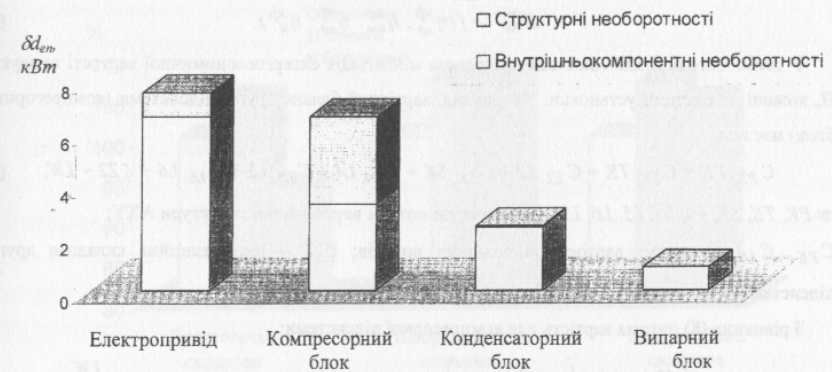


Рис. 7. Розподіл необоротних втрат ексергії для підсистем АХУ.

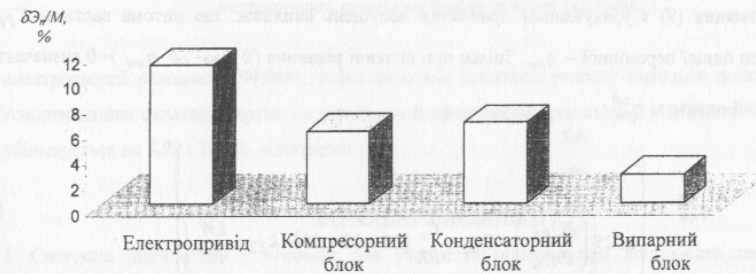


Рис. 8. Розподіл додаткових витрат енергосировини стосовно повної його витрати в термотрансформаторі АХУ.

кінцевого продукту мінімізується на основі послідовної локальної оптимізації одиничних складових установок. Зокрема, ідентифікація ефективних параметрів може бути реалізована при визначенні для кожної підсистеми мінімуму ексергоекономічної вартості продукту щодо локальної перемінної  $u_n$ :

$$\min C_{\Pi_n} = \min \Sigma C_{\mathcal{E}_n} k_n + k_{Z_n}, \quad (6)$$

де  $\mathcal{E}_n$  – питома ексергоекономічна вартість енергосировини  $\mathcal{E}_n$ , що вводиться в розглянуту підсистему;  $k_n = \mathcal{E}_n / \Pi_n = f(u_n)$ ;  $k_{Z_n} = \zeta Z_n / \Pi_n$ ;  $Z_n = f(u_n, \Pi_n)$ .

Для мінімізації загальної вартості продукту  $M$  розглядається цільова функція  $\Pi_M$  перемінних:  $\eta_{\mathcal{E}_n}, \eta_{k_n}, \eta_{k_{Z_n}}$  і  $\eta_{u_n}$ :

$$P_M^{\min} = f(\eta_{\text{эд}}, \eta_{\text{км}}^{\text{эф}}, \eta_{\text{кд}}, \eta_{\text{и}}^{\text{эф}}). \quad (7)$$

У даній методиці здійснюється послідовна мінімізація ексергоекономічної вартості продукту  $P_n$  кожної підсистеми установки. Наприклад, вартісний баланс другої підсистеми (компресорний блок) має вид:

$$C_{PK} PK + C_{TK} TK = C_{L2} L2 + C_{SK} SK + C_{L4} L4 + C_{L5} L5 + C_{L6} L6 + \zeta Z2 + LW, \quad (8)$$

де  $PK, TK, SK, L2, L4, L5, L6, LW$  – енергетичні потоки виробляючої структури АХУ;

$C_{PK} \dots C_{L6}$  – питомі вартості відповідних потоків;  $\zeta Z2$  – амортизаційна складова другої підсистеми.

З рівняння (8) питома вартість для компресорної підсистеми:

$$C_{PK} = \frac{C_{L2}}{1,025 \cdot \eta_{\text{км}}} + C_{SK} \left( \frac{1}{1,025 \cdot \eta_{\text{км}}} - 1 \right) + C_{L4} \cdot k_{L4} + C_{L5} \cdot k_{L5} + C_{L6} \cdot k_{L6} + k_{Z2} + \frac{LW}{PK}. \quad (9)$$

З рівняння (9) з урахуванням прийнятих допущень випливає, що питома вартість  $C_{PK}$  є функцією однієї перемінної –  $\eta_{\text{км}}$ . Звідси при рішенні рівняння  $(\partial C_{PK} / \partial \eta_{\text{км}}) = 0$  визначається локальний оптимум  $\eta_{\text{км}}^{\text{эф}}$ :

$$\eta_{\text{км}}^{\text{эф}} = \left\{ \frac{C_{L2} - C_{SK}}{1,025 \left[ \left( \frac{\partial C_{PK}}{\partial \eta_{\text{км}}} \right) + C_{SK} - \frac{C_o}{PK} (L4 + L5 + L6) - k_{Z2} - \frac{LW}{PK} \right]} \right\}^{0,5} \quad (10)$$

Далі, з рівняння (9) визначається локальний оптимум вартості  $C_{PK}^{\text{эф}}$ .

Виходячи зі знайдених локальних оптимумів, розраховуються ефективні вартості всіх енергетичних потоків в АХУ. Одночасно визначаються ефективні температури конденсації і кипіння в циклі, що і є основою для експериментального здійснення ефективного режиму.

Порівняльний аналіз штатного й ефективного режимів АХУ показує, що загальна ексергоекономічна вартість продукту  $P_M$  знизилася на 2,28%, холодильний коефіцієнт збільшився в 1,16 рази. Ексергетична  $B^*$  і питома ексергетична  $k^*$  вартості знизилася на 10,92%. Енергетична складова вартості знизилася на 11,63%, при цьому амортизаційна складова незначно збільшилася на 0,41%.

Основні енергетичні і ексергоекономічні характеристики еталонного, штатного й ефективного режимів установки АХУ, зображені на рис.9. У штатному режимі ексергоекономічна вартість виробництва холоду в АХУ збільшується на 6,75% у порівнянні з еталонним режимом. Однак, при переході на ефективний режим цей показник знижується до 4,41%. У штатному режимі витрати електроенергії збільшується на 4,97% у порівнянні з еталонним. В ефективному режимі витрати

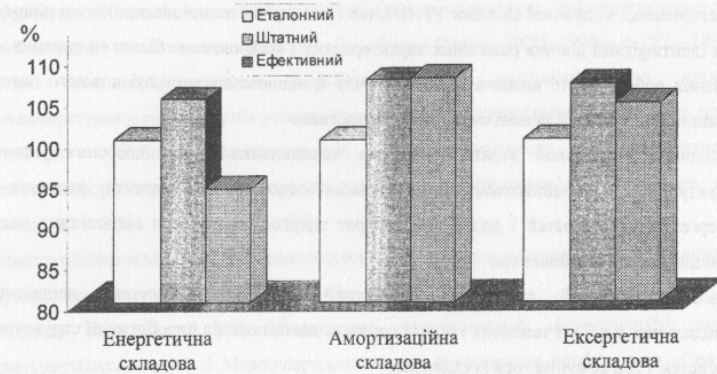


Рис. 9. Діаграма основних термоекономічних показників термотрансформатора АХУ в еталонному, штатному й ефективному режимах.

електроенергії складають 94,04%, тобто стосовно штатного режиму економія досягає 10,93%. Амортизаційна складова вартості у штатному й ефективному режимах у порівнянні з еталонним збільшується на 7,29 і 7,52%, відповідно.

### ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Системна діагностика є основою для ухвалення рішення про доцільність комплексного виробництва холоду і тепла, а також для вибору робочих параметрів холодильних і теплонасосних установок.
2. Діагностика енергетичної ефективності може здійснюватися на основі спеціально розробленої моделюючої багаторівневої модульної системи ТТ–RH, що забезпечує формування комп'ютерно-орієнтованих моделей термотрансформаторів, що працюють по схемах R, H і RH.
3. Створена система ТТ–RH дозволяє проводити параметричний і структурний аналіз на етапі передпроектних розробок, визначати термодинамічну ефективність окремих процесів у заданому діапазоні зміни параметрів, формувати довільні запити типових проектних процедур.
4. Модульна система ТТ–RH є відкритою й адаптованою для поповнення баз даних і тому може бути використана для проектування і чисельних параметричних досліджень одно- і двоступінчатих парокompресійних ХМ і ТН на різних холодильних агентах, що забезпечує істотну економію часу і матеріальних ресурсів.
5. Відповідність результатів чисельних експериментів, виконаних за допомогою системи ТТ–RH, відомим фізичним і технічним представленням свідчить як про адекватність моделюючої

- багаторівневої модульної системи ТТ–RH, так і методу системної діагностики в цілому.
- Для ідентифікації діючих режимних характеристик і встановлення більш енергетично вигідних режимів роботи варто визначити ексергетичну й економічну вартості кожного потоку і всієї установки в цілому на основі системної діагностики.
  - Розділяючи необоротні втрати ексергії в холодильних і теплонасосних установках на структурні і внутрішньоконструктивні, можна однозначно визначити значення питомих ексергетичних вартостей і додаткових витрат енергосировини для відповідних неефективно функціонуючих компонентів.
  - Основою реалізації системної діагностики для одноступінчатих парокомпресійних холодильних машин і теплових насосів служить декомпозиція виробляючої структури на п'ять підсистем і три комунікатора (з'єднання).
  - Системна діагностика діючої аміачної холодильної установки виявила завищені значення ексергоекономічної вартості виробництва холоду, витрати електроенергії, амортизаційної складової і зниження холодильного коефіцієнта в порівнянні з проектними показниками.
  - Запропонована методика ідентифікації ефективних режимів дозволила поліпшити основні термоекономічні характеристики холодильної установки в порівнянні зі штатним режимом і навіть знизити енергетичну складову еталонного режиму.
  - Інтеграція системної діагностики в системи керування комплексних багатофункціональних установок на основі реалізації безупинного моніторингу забезпечить їх високу енергетичну ефективність протягом усього терміну експлуатації.

#### ПУБЛІКАЦІЇ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

- Косой Б.В., Ломовцев П.Б. Концепция автоматизированного проектирования энергетических установок // Холодильная техника и технология. – 1998. – №58. – с. 84 – 87.  
(дисертант запропонував нову концепцію автоматизованого проектування складних енергоспоживаючих установок, яка може бути певною основою спеціалізованих систем автоматизованого проектування для існуючих і нових холодильних і теплонасосних систем).
- Косой Б.В., Ломовцев П.Б. Представление знаний об энергетических установках в экспертных системах // Холодильная техника и технология. – 1999. – №63. – с. 77 – 80.  
(дисертант запропонував питання уявлення знань в експертних системах використати в сфері холодильної техніки, при цьому провів досконалі дослідження теплообмінного апарата різноманітних конструкцій і призначень).
- Косой Б.В., Ломовцев П.Б. Разработка системы автоматизированного проектирования низкотемпературных энергетических установок // Труды Украинской академии экономической

- кибернетики (Южный научный центр) «Оптимизация управления, информационные системы и компьютерные технологии». – Вып.1. – ч.2. – Киев – Одесса: ИСЦ. 1999. – с. 182 – 189.  
(дисертант розглянув питання розробки системи автоматизованого проектування низькотемпературних енергетичних установок і оптимізацію характерних структурних рішень).
- Ломовцев П.Б. Моделирование одноступенчатого парокомпрессионного термотрансформатора, работающего по комбинированной схеме // Холодильная техника и технология. – 2001. – №73. – с. 23 – 27.  
(дисертант здійснив моделювання парокомпресійної установки, працюючої по комбінованій схемі RH з урахуванням незворотних втрат в циклі).
  - Ломовцев П.Б., Косой Б.В. Мониторинг энергетической эффективности аммиачного термотрансформатора // II Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы холодильной техники и технологии». – 17 – 19 сентября 2002 г. – Одесса. – 171 с.  
(дисертант запропонував здійснювати моніторинг енергетичної ефективності аміачної установки за допомогою системної діагностики, розробленій на основі теорії ексергоекономічної вартості).
  - Ломовцев П.Б., Косой Б.В., Иванников Е.В., Новиков В.М. Системная диагностика аммиачной холодильной установки // Холодильная техника и технология. – 2002. – №77. – с. 16 – 19.  
(дисертант розробив концепцію системної діагностики холодильних і теплонасосних установок, яка дозволяє визначити енергетичну ефективність робочих режимів і пропонувати раціональні).

#### УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

ХМ – холодильна машина; ТН – тепловий насос; ТТ – термотрансформатор; RH – спільне охолодження і нагрівання;  $e_x$  – питома підводима ексергія,  $кДж/кг$ ;  $d_e$  – питома втрати ексергії,  $кДж/кг$ ;  $\eta_{ex}^{RH}$  – ексергетичний к.к.д. термотрансформатора RH; PK, PH, PD, PR – ізобаричні компоненти компресора, конденсатора, дросельного вентиля, випарника, відповідно,  $кВт$ ; TK, TH, TD, TR – ізотермічні компоненти компресора, конденсатора, дросельного вентиля, випарника, відповідно,  $кВт$ ; SK, SH, SD, SR – дисіпація ентропії в компресорі, конденсаторі, дросельному вентилі, випарнику, відповідно,  $кВт$ ; L – робота електродвигунів; B – потік ексергії,  $кВт$ ;  $B^*$  – ексергетична вартість потоку,  $кВт$ ; П – економічна вартість потоку,  $грн \cdot 10^{-6}/с$ ; C – ексергоекономічна вартість,  $грн/ГДж$ ; k – споживання ексергії;  $k^*$  – питома ексергетична вартість;  $\delta d_{e,i}$  – втрати ексергії, зв'язані з внутрішньоконструктивними необоротностями,  $кДж/кг$ ;  $\delta d_{e,j}$  – втрати ексергії, зв'язані зі структурними необоротностями,  $кДж/кг$ ;  $d_{en}$ ,  $\mathcal{E}_n$ ,  $\Pi_n$  – необоротність, енергосировина і продукт у підсистемі n, відповідно,  $кДж/кг$ .

## АНОТАЦІЯ

Ломовцев П.Б. Диагностика энергетичної ефективності холодильних і теплонасосних систем. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.05.14 – холодильна і криогенна техніка, системи кондиціонування. – Одеська державна академія холоду, Одеса, 2003 р.

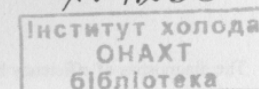
У дисертації представлений метод діагностики холодильних і теплонасосних систем, що дозволяє при заданих умовах і обсягах виробництва ідентифікувати відхилення штатних режимів роботи від еталонних методом визначення внутрішньокomпонентних і структурних необоротностей в окремих підсистемах і установці в цілому, а також визначити можливі заходи для підвищення ефективності. Так, для діючої аміачної холодильної установки на основі здійснення діагностики було встановлено збільшення ексергоекономічної вартості виробництва холоду на 6,75%, витрати електроенергії на 4,97%, амортизаційної складової на 7,29% і зниження холодильного коефіцієнта на 8,28% у штатному режимі в порівнянні з еталонним. Разом з тим, були виявлені такі можливі коректування експлуатаційних характеристик установки, врахування яких приводить до зниження ексергоекономічної вартості виробництва холоду на 2,28% і витрати електроенергії на 10,93%, при цьому електричний холодильний коефіцієнт підвищується в 1,16 рази в порівнянні зі штатним режимом.

У своїй основі діагностика ефективності використовує спеціально створену моделюючу багаторівневу модульну систему ТТ–RH, що забезпечує формування комп'ютерно-орієнтованих моделей термотрансформаторів, що працюють по схемах R, H і RH. Крім того, ця система дозволяє проводити параметричний і структурний аналіз на етапі передпроектних розробок, визначити термодинамічну ефективність окремих процесів у заданому діапазоні зміни параметрів, формувати довірливі запити типових проектних процедур. У дисертації приведені результати чисельних експериментів, виконаних за допомогою системи ТТ–RH, по аналізу термодинамічної ефективності процесів і циклів парокompресійних установок. Відповідність отриманих результатів відомим фізичним і технічним представленням свідчить як про адекватність моделюючої багаторівневої модульної системи ТТ–RH, так і методу системної діагностики в цілому.

**Ключові слова:** системна діагностика, енергозбереження, парокompресійна холодильна установка, тепловий насос, термотрансформатор, ексергетичний аналіз, внутрішньокomпонентні і структурні необоротності, ексергоекономіка.

## АННОТАЦИЯ

Ломовцев П.Б. Диагностика энергетической эффективности холодильных и теплонасосных систем. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14. – “Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования”. –



Одесская государственная академия холода, Одесса, 2003 г.

В диссертации представлен метод диагностики холодильных и теплонасосных систем, который позволяет при заданных условиях и объемах производства идентифицировать отклонения штатных режимов от эталонных при помощи определения внутриконтентных и структурных необратимых потерь в отдельных подсистемах и в установке в целом, а также определять возможные способы повышения эффективности. В своей основе диагностика эффективности использует специально разработанную моделирующую многоуровневую модульную систему ТТ–RH, которая обеспечивает формирование компьютерно-ориентированных моделей термотрансформаторов, работающих по схемам R, H и RH. В диссертации приведены результаты экспериментальных исследований энергетической эффективности производственной аммиачной установки при помощи системной диагностики и числовых экспериментов, осуществленных при помощи системы ТТ–RH, по анализу термодинамической эффективности процессов и циклов парокompрессионных установок. Соответствие полученных результатов известным физическим и техническим положениям свидетельствует как про адекватность моделирующей модульной системы ТТ–RH, так и метода системной диагностики в целом.

**Ключевые слова:** системная диагностика, энергосбережение, парокompрессионная холодильная установка и тепловой насос, термотрансформатор, эксергетический анализ, внутриконтентные и структурные необратимые потери, эксергоэкономика.

## SUMMARY

Lomovtsev P.B. Diagnostics of energy efficiency of refrigerating and heat pump systems. – The Manuscript. The dissertation for a scientific degree of Cand. Tech. Sci. on a speciality 05.05.14 – Refrigerating and cryogenic engineering, air-conditioning systems. – Odessa State Academy of Refrigeration, Odessa, 2003.

In the dissertation the method of diagnostics of refrigerating and heat pump systems is submitted, allowing under the set conditions and production turnover to identify deviations of operating modes from reference by the definition of intracomponental and structural irreversibilities in separate subsystems and installation as a whole, and also to determine possible actions for efficiency improvement. Thus, for the real ammonia refrigerating system the increase of exergoeconomic costs of cold generation on 6,75 %, the charge of the electric power on 4,97 %, the amortization component on 7,29 % and reduction in COP on 8,28 % have been determined by means of the diagnostics in an operating conditions in comparison with reference one. At the same time, such possible updatings of operational characteristics of the system have been revealed, which results in decrease of exergoeconomic cost of cold generation on 2,28 % and the charge of the electric power on 10,93 %, thus the refrigerating factor raises in 1,16 times in comparison with the operating conditions.

The diagnostics of efficiency bases on specially created modeling multilevel modular system TT–RH providing formation of computer - oriented models of heat transformers, working under circuits R, H and RH. Besides this system allows the parametrical and structural analysis at a stage of pre-design development, to define a thermodynamic efficiency of separate processes in the set range of change of parameters, to form any inquiries of typical design procedures. Results of the numerical experiments executed by means of system TT–RH, under the analysis of thermodynamic efficiency of processes and cycles of vapor compression systems are presented in the dissertation. Conformity of the received results to known physical and technical representations testifies as to adequacy of modeling multilevel modular system TT–RH, and a method of system diagnostics as a whole.

**Key words:** system diagnostics, energy savings, vapor compression refrigerating system, heat pump, heat transformer, exergetic analysis, intracomponental and structural irreversibility, exergoeconomics.