

Анатичук Л.І., Кузь Р.В., Прибила А.В.

Інститут термоелектрики НАН і МОНмолодьспорту України
вул. Науки, 1, Чернівці, 58029, Україна
Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича,
вул. Коцюбинського, 2, Чернівці, 58012, Україна

ПРО ВПЛИВ СИСТЕМИ ТЕПЛООБМІНУ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО КОНДИЦІОНЕРА

Наводяться результати розрахунку ефективності термоелектричного кондиціонера з урахуванням впливу системи теплообміну. Визначено оптимальні режими роботи системи теплообміну для досягнення максимальної ефективності кондиціонера.

Ключові слова: кондиціонер, теплообмін, термоелектрика.

Results of calculation of the efficiency of thermoelectric air conditioner with regard to the effect of heat exchange system are presented. Optimal operating conditions of heat exchange system for achieving the highest air conditioner efficiency are determined.

Keywords: air conditioning, heat, thermoelectricity.

Вступ

Загальна характеристика проблеми. Покращення ефективності термоелектричних кондиціонерів (ТЕК) [1] у більшості випадків зводиться до підвищення добротності [2] термоелектричних матеріалів. Однак, їх ефективність не меншою мірою залежить і від теплообмінних приладів та систем, якими здійснюється передача теплової енергії через термоелектричні перетворювачі енергії (так звані теплові насоси). Попередній аналіз показує, що реальні значення ефективності термоелектричних кондиціонерів значно нижчі від очікуваних навіть за досягнутих значень добротності матеріалу. Це пов'язано з тим, що під час проектування та оптимізації термоелектричної апаратури переважно користуються спрощеними фізичними моделями [3-6], що не враховують якості систем теплообміну, теплових та електричних втрат, які можуть значно погіршити енергетичні характеристики ТЕК. У роботі [7] розглянуто методику розрахунку ефективності ТЕК для узагальнених фізичних моделей термоелектричних перетворювачів енергії.

Мета пропонованої роботи – аналіз впливу реальної системи теплообміну на ефективність термоелектричного кондиціонера та оптимізація його роботи. Для цього здійснено багатопараметричну комп'ютерну оптимізацію ефективності ТЕК з врахуванням експериментально визначених характеристик системи теплообміну.

1. Фізична модель ТЕК

Фізичну модель ТЕК зображено на рис. 1. Охолодження замкненого об'єму 1 здійснюється за допомогою термоелектричних модулів охолодження 7. Система відведення

тепла складається з холодного та гарячого контурів 5, 10. Холодний контур містить рідинно-повітряний теплообмінник 3 з вентилятором 2, рідинний насос 4 та рідинний теплообмінник 6. Холодний контур забезпечує відведення тепла з камери охолодження 1 до термоелектричних модулів. Гарячий контур містить рідинний теплообмінник 8, рідинний насос 9 та рідинно-повітряний теплообмінник 11 з вентилятором 12. Гарячим контуром забезпечується відведення тепла від термоелектричних модулів у оточуюче середовище. Споживачами електричної енергії в фізичній моделі є термоелектричні модулі, електричною потужністю W_m , вентилятори рідинно-повітряних теплообмінників електричною потужністю W_{V1} та W_{V2} , і рідинні насоси електричною потужністю W_{N1} та W_{N2} відповідно для холодного і гарячого контурів.

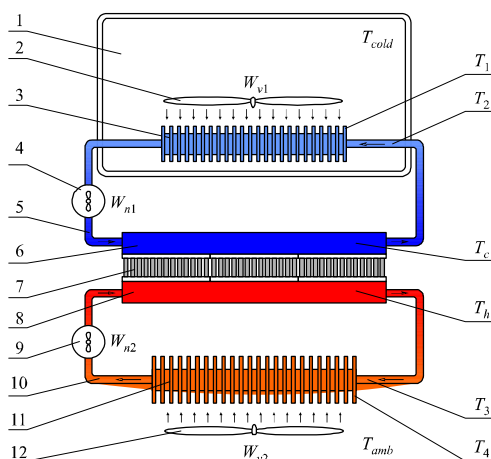


Рис. 1. Фізична модель термоелектричного теплового насоса: 1 – камера охолодження; 2, 12 вентилятори; 3, 11 – рідинно-повітряні теплообмінники; 4, 9 – рідинні насоси, 5, 10 – рідинні контури; 6, 8 – рідинні теплообмінники, 7 – термоелектричні модулі охолодження.

2. Ефективність ТЕК

Система кондиціонування характеризується такими параметрами, як холодопродуктивність Q_0 , тобто кількістю теплоти, що відводиться з камери охолодження (вона залежить від різниці температур на термоелектричних модулях, від натікань тепла через ізоляцію камери кондиціонера із оточуючого середовища та від якості системи теплообміну), а також холодильним коефіцієнтом ε , що є відношенням холодопродуктивності Q_0 до затраченої електричної енергії на живлення термоелектричних модулів, вентиляторів та рідинних насосів. Очевидно, що реальний холодильний коефіцієнт ТЕК буде значно відрізнятися від холодильного коефіцієнта термоелектричних модулів. Причому він буде залежним від значень електричної потужності усіх споживачів системи.

$$\varepsilon(W_{N1}, W_{N2}, W_{V1}, W_{V2}, W_m, N) = \frac{Q_0}{W_{N1} + W_{N2} + W_{V1} + W_{V2} + W_m} \quad (1)$$

де N – кількість термоелектричних модулів.

Отже, для досягнення максимального холодильного коефіцієнта ТЕК необхідно знайти оптимальні режими роботи кожної з компонент системи теплообміну. Для цього в роботі використано експериментальні залежності параметрів компонент системи теплообміну від потужності споживання ними електричної енергії та проведено пошук багатопараметричного максимуму холодильного коефіцієнта за допомогою чисельних методів.

2.1. Рівняння теплових та енергетичних балансів

Запишемо рівняння теплових балансів у кондиціонері:

$$\begin{cases} Q_{r1} = Q_{\text{ТЕВ}} \\ Q_{r2} = Q_{\text{ТЕВ}} + W_0 \end{cases} \quad (2)$$

тут Q_{r1} – тепло, що поглинається на рідинно-повітряному теплообміннику холодного контура. Воно визначає холодопродуктивність кондиціонера Q_0 і відповідає теплу, що поглинається на холодній стороні термоелектричної батареї, Q_{r2} – тепло, що розсіюється на рідинно-повітряному теплообміннику гарячого контура. Воно відповідає теплу, яке виділяється на гарячій стороні термоелектричної батареї, $Q_{\text{ТЕВ}}$ – холодопродуктивність термоелектричної батареї, W_0 – потужність живлення термоелектричної батареї.

Баланс температур матиме такий вигляд:

$$T_{amb} = T_{cold} - \Delta T_{r1} - \Delta T_{t1} + \Delta T_{\text{ТЕВ}} - \Delta T_{r2} - \Delta T_{r2} \quad (3)$$

де T_{amb} – температура навколишнього середовища, T_{cold} – задана температура в ізольованій камері, $\Delta T_{r1} = T_{cold} - T_1$ – спад температури на рідинно-повітряному теплообміннику холодного контура, $\Delta T_{t1} = T_2 - T_c$ – спад температури на рідинному теплообміннику холодного контура, $\Delta T_{\text{ТЕВ}} = T_h - T_c$ – спад температури на термоелектричній батареї, $\Delta T_{r2} = T_h - T_3$ – спад температури на рідинному теплообміннику гарячого контура, $\Delta T_{r2} = T_3 - T_{amb}$ – спад температури на рідинно-повітряному теплообміннику гарячого контура.

Введемо наступні функціональні залежності характеристик компонент кондиціонера.

$Q_m(W_m, \Delta T, T_h)$ – холодопродуктивність термоелектричних модулів у залежності від електричної потужності модулів, перепаду температури на модулях та температури гарячої сторони модулів;

$G(W_N, N)$ – залежність витрати рідини у теплообмінному контурі від потужності живлення насоса та кількості термоелектричних модулів;

$Q_r(W_N, W_V, \Delta T_r, N) = F_r(W_N, W_V, N) \cdot \Delta T_r$ – теплова потужність, що передається рідинно-повітряним теплообмінником залежно від потужностей живлення рідинного насоса та вентилятора і різниці температур між повітрям і рідиною на вході теплообмінника;

$Q_t(\Delta T_t, W_N, N) = F_t(W_N, N) \cdot \Delta T_t$ – теплова потужність, що передається рідинним теплообмінником залежно від різниці температур між поверхнею термоелектричного модуля і рідиною на вході теплообмінника, потужності живлення рідинного насоса та вентилятора і різниці температур між повітрям і рідиною на вході теплообмінника.

Виходячи з цього, отримаємо такі співвідношення для знаходження перелічених в (3) спадів температур:

$$Q_{r1} = F_r(W_{n1}, W_{v1}, N) \cdot \Delta T_{r1} = Q_0 \quad (4)$$

$$Q_{r2} = F_r(W_{n2}, W_{v2}, N) \cdot \Delta T_{r2} = Q_0 + W_0 \quad (5)$$

$$Q_{t1} = F_t(W_{n1}, N) \cdot \Delta T_{t1} = Q_0 \quad (6)$$

$$Q_{t2} = F_t(W_{n2}, N) \cdot \Delta T_{t2} = Q_0 + W_0 \quad (7)$$

Холодопродуктивність кондиціонера шукатимемо з рівняння (8)

$$Q_0 = Q_{TEB}(W_0, \Delta T_{TEB}, T_h) \quad (8)$$

Вираз для спаду температури на термоелектричній батареї ΔT_{TEB} отримаємо, підставивши (4) – (7) в (2):

$$\Delta T_{TEB} = T_{amb} - T_{cold} + Q_0 \left(\frac{1}{F_r(W_{n1}, W_{v1}, N)} + \frac{1}{F_t(W_{n1}, N)} \right) + (Q_0 + W_0) \left(\frac{1}{F_r(W_{n2}, W_{v2}, N)} + \frac{1}{F_t(W_{n2}, N)} \right). \quad (9)$$

Вираз для T_h отримаємо з рівняння

$$T_h = T_{amb} + \Delta T_{r2} + \Delta T_{t2}. \quad (10)$$

Підставивши (4) і (6) в (10), отримаємо:

$$T_h = T_{amb} + (Q_0 + W_0) \left(\frac{1}{F_r(W_{n2}, W_{v2}, N)} + \frac{1}{F_t(W_{n2}, N)} \right). \quad (11)$$

Вирази (8), (9) та (11) утворюють систему рівнянь для знаходження холодопродуктивності кондиціонера Q_0 , яку розв'язують відносно Q_0 , ΔT_{TEB} , T_h для заданих величин T_{amb} , T_{cold} та функцій $F_r(W_n, W_v, N)$, $F_t(W_n, N)$ та $Q_{TEB}(W_0, \Delta T_{TEB}, T_h)$.

Холодильний коефіцієнт кондиціонера знаходять з (1). Цільовою функцією оптимізації буде холодильний коефіцієнт кондиціонера, а параметрами оптимізації – електричні потужності компонент кондиціонера.

2.2. Методи оптимізації

Досить громіздкі та складні критерії оптимуму, описані вище, зумовлюють необхідність використання чисельних методів для пошуку оптимального значення цільової функції.

Цільова функція термоелектричного кондиціонера — холодильний коефіцієнт — функція нелінійна, що залежить від сукупності параметрів, які в свою чергу виражені неявно, за допомогою множини емпіричних рівностей. Тому немає можливості використання методів пошуку екстремуму першого та другого порядків (через неможливість визначення похідних). Для реалізації пошуку оптимального значення холодильного коефіцієнта був застосований безградієнтний метод нульового порядку – модифікований метод Хука-Дживса [8].

На кожній ітерації головного циклу програми розв'язується система нелінійних рівнянь (8 – 11) та визначається холодопродуктивність. У програмі розраховуються коефіцієнти апроксимуючих поліномів, за допомогою яких визначаються емпіричні співвідношення між фізичними параметрами задачі оптимізації.

3. Оптимізація ТЕК

3.1. Емпіричні функції параметрів компонент ТЕК

Термоелектричні модулі. На основі експериментальних досліджень залежності холодопродуктивності термоелектричного модуля охолодження Алтек-127 від потужності живлення та температур теплообмінників на його гарячій і холодній гранях у чисельних

розрахунках функція холодопродуктивності модуля Q_m була апроксимована аналітичними залежностями:

$$Q_m(W_m, \Delta T, T_h) = [F_m(W_m)(1 - 0.0015\Delta T) - (1.334 - 0.00233T_h)\Delta T] \times (0.07217 + 0.00317T_h), \quad (12)$$

$$\text{де } F_m = (8.45\sqrt{W_m} - 0.115 - 0.37W_m + 3.25). \quad (13)$$

Рідинні насоси. Залежність витрати рідини у теплообмінному контурі від потужності насоса та кількості модулів визначалася таким чином:

$$G(W_n, N) = \frac{\Delta P_{\max}(W_n)}{r_g + NR_g^t}, \quad (14)$$

де $\Delta P_{\max}(W_n)$ – залежність максимального тиску насоса від його потужності, R_g^t – гідроопір рідинного теплообмінника, r_g – гідроопір теплообмінного контура без теплообмінників.

З експериментів з рідинним насосом було встановлено такі залежності:

$$\Delta P_{\max}(W_n) = 0.01283W_n \text{ (атм.)}, \quad (15)$$

$$G(W_n, N) = \frac{0.01283W_n}{6.31 \cdot 10^{-4} + N \cdot 1.835 \cdot 10^{-3}} \text{ (мл/с)}. \quad (16)$$

Рідинно-повітряні теплообмінники. Експериментальними дослідженнями встановлено значення потужності, які вони можуть передати від рідини до повітря залежно від перепаду між температурою води на вході теплообмінника та температурою повітря, витрати рідини у теплообмінному контурі та потужності живлення вентилятора $Q_r(\Delta T_r, G, W_v)$. Враховуючи те, що $G = G(W_n, N)$, а $Q_r \sim \Delta T_r$, величину Q_r отримано в такому вигляді:

$$Q_r(W_n, W_v, \Delta T, N) = F_r(W_n, W_v, N) \cdot \Delta T_r, \quad (17)$$

де $F_r(W_n, W_v, N)$ – експериментальна функція, яка характеризує теплообмінник.

Для досліджуваного теплообмінника функцію F_r було апроксимовано таким чином:

$$F_r(W_n, W_v, N) = [15.5783 + 0.3402G(W_n, N) - 0.0018G(W_n, N)^2] \times [0.15 + 0.14125W_v - 0.00437W_v^2]. \quad (18)$$

Рідинні теплообмінники. Експериментально визначено залежність потужності рідинного теплообмінника $Q_t(\Delta T_t, G)$ від перепаду температури між водою на вході теплообмінника та поверхнею теплообмінника і від витрати води в теплообмінному контурі. Враховуючи, що $G = G(W_n, N)$ та $Q_t \sim \Delta T_t$, залежність Q_t шукатимемо в такому вигляді:

$$Q_t(\Delta T_t, W_n, N) = F_t(W_n, N) \cdot \Delta T_t, \quad (19)$$

де $F_t(W_n, N)$ – експериментальна функція, що характеризує теплообмінник.

Для досліджуваного теплообмінника функцію F_t апроксимовано так:

$$F_t(W_n, N) = N [2.5349 + 0.08292G(W_n, N) - 3.02648 \cdot 10^{-4} G(W_n, N)^2]. \quad (20)$$

Результати оптимізації ТЕК

Результатом оптимізації термоелектричного кондиціонера є знаходження умов роботи компонент кондиціонера, за яких його холодильний коефіцієнт досягає максимального значення.

Використовуючи алгоритми та програму, описану в п. 2, зробили розрахунки холодильного коефіцієнта кондиціонера ϵ_0 для наступних вхідних параметрів задачі:

- температура навколишнього середовища $T_{amb} = 20, 25, 30, 35, 40$ °С,
- зниження температури в камері $\Delta T = T_{amb} - T_{cold} = 10, 15, 20$ °С.

У таблицях 1 – 3 наведено результати розрахунку максимального холодильного коефіцієнта ϵ_{max} кондиціонера та його холодопродуктивності залежно від кількості термоелектричних модулів N . Також в таблицях 1 – 3 наведено, за яких потужностей живлення систем кондиціонера досягається максимальне значення холодильного коефіцієнта.

Таблиця 1

Максимальний холодильний коефіцієнт кондиціонера за $T_{amb} = 20$ °С, $\Delta T = 10$ °С

N	ϵ_{max}	Q_0 , Вт	W_0 , Вт	W_{n1} , Вт	W_{v1} , Вт	W_{n2} , Вт	W_{v2} , Вт
2	0.519	24.38	21	5	8	5	8
4	0.628	32.01	25	5	8	5	8
6	0.667	36.01	28	5	8	5	8
8	0.676	38.58	31	5	8	5	8.1
10	0.668	41.86	35	5	8.5	5	9.5
20	0.587	41.36	48	5	10	5	12

Таблиця 2

Максимальний холодильний коефіцієнт кондиціонера за $T_{amb} = 20$ °С, $\Delta T = 15$ °С

N	ϵ_{max}	Q_0 , Вт	W_0 , Вт	W_{n1} , Вт	W_{v1} , Вт	W_{n2} , Вт	W_{v2} , Вт
2	0.422	22.34	27	5	8	5	8
4	0.475	29.92	35	5	8	5	8
6	0.481	32.68	42	5	8	5	8
8	0.468	36.94	50	5	8	7	11
10	0.448	40.06	58	5	9.5	9	12
20	0.331	40.99	87	5	11	21	12

Таблиця 3

Максимальний холодильний коефіцієнт кондиціонера за $T_{amb} = 20$ °С, $\Delta T = 20$ °С

N	ϵ_{max}	Q_0 , Вт	W_0 , Вт	W_{n1} , Вт	W_{v1} , Вт	W_{n2} , Вт	W_{v2} , Вт
2	0.334	20.03	34	5	8	5	8
4	0.353	28.70	51	5	8	8	9.5
6	0.340	38.48	75	5	8	16	10
8	0.320	43.0	87	5	9	22	12
10	0.26	40.2	124	5.6	10.5	25	12
20	0.18	39.3	162	6	12	28	12

На рис. 2 наведено порівняння холодильного коефіцієнта термоелектричних модулів та кондиціонера за інших оптимальних умов роботи компонент ТЕК.

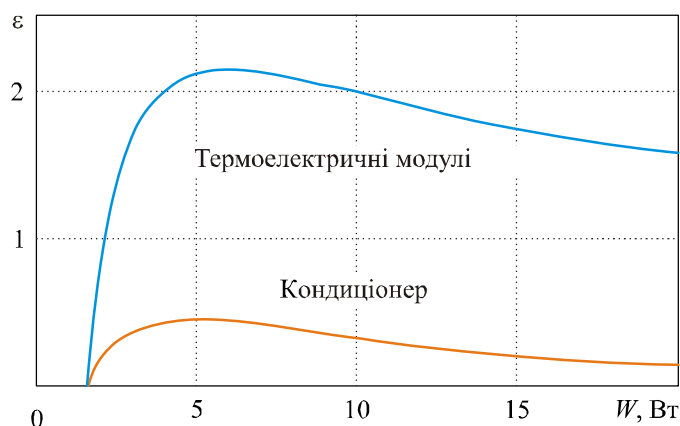


Рис. 2. Залежності холодильного коефіцієнта термоелектричних модулів та ТЕК від потужності живлення електричних модулів. $T_{amb} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Delta T = 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Висновки

1. Розроблено фізичну і математичну модель кондиціонера, алгоритми та комп'ютерну програму пошуку багатопараметричного максимуму холодильного коефіцієнта ТЕК.
2. Для конкретних конструкцій термоелектричного кондиціонера виявлено багатопараметричні максимуми холодильного коефіцієнта в діапазонах потужностей роботи термоелектричної батареї, рідинних насосів, повітряних вентиляторів для заданої глибини охолодження.
3. Встановлено, що навіть за оптимальних умов роботи компонент кондиціонера холодильний коефіцієнт ТЕК відрізняється у ~ 7 разів від холодильного коефіцієнта термоелектричних модулів. Це свідчить про необхідність вдосконалення компонент теплообмінних систем ТЕК.

Література

1. Анатичук Л.І. Термоелектричество. Т.2. Термоелектрические преобразователи энергии / Л.І. Анатичук – Киев, Черновцы: Институт термоелектричества, 2003. – 376 с.
2. Анатичук Л.І. Современное состояние и некоторые перспективы термоелектричества / Л.І. Анатичук // Термоелектричество. – 2007. – №2. – С. 7 – 20.
3. Термоелектричний кондиціонер для приміщень / Л.І. Анатичук, К. Місав, Н. Судзукі [та ін.] // Термоелектрика. – 2003. – №1. – С. 53 – 56.
4. Розвер Ю.Ю. Термоелектричний кондиціонер для транспортних засобів / Ю.Ю. Розвер // Термоелектрика. – 2003. – №2. – С. 70 – 72.
5. <http://www.fujitaka.com>
6. <http://www.hi-z.com>
7. Анатичук Л.І. Про вплив теплообмінних систем на ефективність термоелектричних приладів / Л.І. Анатичук, А.В. Прибила // Термоелектрика. – 2012. – №3. – С. 39 – 44.
8. Вержбицкий В.М. Численные методы (линейная алгебра и нелинейные уравнения): Учеб. пособие для вузов / В.М. Вержбицкий – М.: «Издательский дом «ОНИКС 21 век», 2005. – 432 с.

Надійшла до редакції 19.12.2012.