

## Підвищення енергоефективності багатозональних VRF систем кондиціонування повітря

Н. В. Жихарєва<sup>✉</sup>, Є. О. Бабой, А. М. Басов

Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна

✉ e-mail: zhikhareva.nata@gmail.com

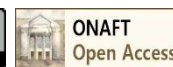
*Визначено енергозберігаючі заходи підвищення енергоефективності в області кондиціонування за допомогою методів математичного моделювання схемно-технічних рішень і режимів роботи обладнання систем кондиціонування громадських об'єктів при використанні сучасних VRF систем. Розроблена комплексна модель оптимізації систем кондиціонування громадських об'єктів. Ця модель враховує не тільки нестационарне зовнішнє і внутрішнє теплове навантаження в приміщенні, але також і фактори по мінімізації змінної частини наведених витрат, пов'язаних з витратами енергії. Протестована цільова функція оптимізації спільної сумарної величини капітальних і експлуатаційних витрат на тепловий захист приміщень і кліматичне енергозберігаюче обладнання протягом терміну їх експлуатації із забезпеченням найменших приведених витрат. Можливості енергозбереження проведені при розрахунку універсальної цільової функції та програм математичного моделювання щодо визначення термінів окупності та величин цільової функції для порівнюваних варіантів. Проведений порівняльний аналіз на базі розробленої математичної моделі Daikin, Mitsubishi Electric, Fujitsu, Mitsubishi Heavy для об'єктів, які працюють протягом добового циклу в екстремально-нестационарному режимі. До таких об'єктів громадського призначення можна віднести театри, ресторани, заводські їдальні, конференц-зали тощо. При розрахунках за цією моделлю можна отримати термін окупності обладнання із застосуванням економічно-доцільної товщини ізоляції.*

**Ключові слова:** енергоефективність, оптимізація, кондиціонування повітря, енергозбереження, цільова функція, моделювання, теплообмін

© The Author(s) 2018. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

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



### 1. Вступ

В умовах прискорення науково-технічного прогресу завдання підвищення енергоефективності систем кондиціонування має важливе народногосподарське значення, оскільки її рішення, крім підвищення ефективності капітальних вкладень, забезпечує її енергозбереження, економію матеріалів, а також поліпшення умов праці людей і навколишнього середовища.

Огляд методів енергозбереження в системах вентиляції та кондиціонування через масштабність проблеми ставить технокоекономічну задачу, рішення якої може бути корисним при проектуванні [1, 2, 3, 4].

Проектування систем кондиціонування повітря потребує системного аналізу та синтезу із застосуванням методів математичного моделювання. Для цього систему кондиціонування повітря підрозділяють на підсистеми й окремі елементи, для яких потім здійснюють кількісний аналіз на основі математичних моделей підсистем.

Одним з основних завдань цієї комплексної проблеми є енергозбереження. Ми вирішуємо триєдину проблему – оптимізацію (мінімізацію) енергоспоживання при жорсткому дотриманні нормативних вимог до комфортного середовища проживання в житлових, громадських і промислових об'єктах, неухильне дотримання технологічних вимог у виробничих процесах і мінімізацію шкідливого впливу на екологію навколиш-

нього середовища. Декомпозиція як єдиної енергетичної системи представляється трьома основними енергетично взаємопов'язаними підсистемами [2, 3, 5, 6].

У даній статті, використовуючи основні принципи моделювання, визначено енергозберігаючі заходи підвищення енергоефективності в області кондиціонування за допомогою методів математичного моделювання схемно-технічних рішень і режимів роботи обладнання систем кондиціонування громадських об'єктах при використанні сучасних VRF систем.

### 2. Основні цільові напрями вдосконалення багатозональних VRF систем кондиціонування повітря

В роботі [1] показано парадокси традиційної методики розрахунку VRF систем кондиціонування повітря і недоцільність.

З урахуванням підходу до моделювання енергоефективних систем [2] ми розглядаємо шляхи підвищення ефективності багатозональних систем кондиціонування.

Основними цільовими напрямками вдосконалення багатозональних систем кондиціонування останнім часом є такі:

– підвищення комфорту мікроклімату об'єкта, точність і надійність його забезпечення при цілорічній експлуатації;

– підвищення енергоефективності багатозональних систем за рахунок збільшення коефіцієнтів трансформації тепла;

– підвищення показників енергозбереження за рахунок рекуперації та акумуляції теплової енергії і постійного автоматичного оптимального управління режимами роботи, в залежності від сезонних параметрів зовнішнього повітря, сонячної радіації і геотермальних джерел тепла, а також внутрішніх нестаціонарних джерел тепло припливів / тепловтрат і джерела зміни вологості внутрішнього повітря;

– зниження шкідливого впливу на екологію навколишнього середовища;

– вдосконалення основних агрегатів багатозональної системи кондиціонування повітря: компресора, вентилятора, рекуператора, теплообмінника;

– акумулятор теплоти з використанням тепла фазового переходу, системи управління;

– інтеграція багатозональних систем с, сонячними колекторами, системою припливно-витяжної вентиляції;

– легкість інтеграції з системою «розумного будинку» (BMS з протоколами BACnet або LONwork, порти SC-LGW або SC-BGW);

– перевіірні розрахунки з розробкою монтажної схеми і повної специфікації;

– розробка віддаленого управління і комп'ютерної системи централізованого управління, узгодженого в необхідних випадках з пріоритетом індивідуального управління.

Необхідно відзначити, що енергозбереження найбільш ефективно, якщо воно проводиться на всіх стадіях життєвого циклу об'єкта. від вибору на етапі проектування кліматичного обладнання та величини теплового опору огорожень, опрацювання доцільності використання поновлюваних джерел енергії (ВДЕ), об'єктивного і висококваліфікованого енергоаудиту за результатами першого року експлуатації і енергоменеджменту до моменту капітальної модернізації об'єкта або його повної зупинки перед утилізацією обладнання [2, 3].

З огляду на вищевикладене, нами протестована наступна цільова функція спільної оптимізації теплового захисту об'єкта (теплового опору огорожень приміщення), в якому забезпечується заданий мікроклімат, і продуктивності енергозберігаючого кліматичного обладнання активної системи забезпечення цього мікроклімату. З огляду на особливості оптимізації систем кондиціонування повітря [3, 7] пропонується цільова функція (Ptf - target function) для спільної оптимізації дозволяє визначити з урахуванням можливої зміни вартості електроенергії та коефіцієнта дисконтування валюти [7]

$$Prf = \min \left[ \Delta Pst + Pesob - \sum_{i=1}^T \frac{\Delta Qg}{(1+d-R)^i} \right], \quad (1)$$

де  $\Delta Pst$  – додаткова вартість утеплення зовнішніх огорожень з метою посилення теплового захисту приміщень із заданим мікрокліматом (це може бути одна зовнішня стіна або всі стіни – зовнішні стіни для окремо розташованого об'єкта);

$Pesob$  – витрати на покупку і установку в систему енергозберігаючого обладнання;

$i$  – номер року після введення в експлуатацію енергозберігаючого обладнання;

$\Delta Qg$  – річна економія вартості споживаної електроенергії в результаті використання енергозберігаючого обладнання і посилення теплозахисту об'єкта (розраховується за середньомісячною температурою зовнішнього середовища), кВт;

$d$  – річний коефіцієнт дисконтування національної валюти

$R$  – коефіцієнт річного зростання вартості (кВт·год).

$pe1$  – вартість кВт години електроенергії з ПДВ.

Цільова функція (1), що визначається для заданих варіантів за допомогою програми, виконаної в обчислювальному середовищі Mathcad, дозволяє виконати спільний оптимальний вибір варіанта теплового захисту об'єкта і комплексу енергозберігаючого обладнання.

За результатами додаткового математичного моделювання, з урахуванням фактичних витрат енергії за перший рік роботи, можуть бути прийняті рекомендації, наприклад, по установці додаткового енергозберігаючого обладнання, посилення теплоізоляції огорожень, скорочення періоду між чистками фільтра і т. д.

Термін розрахункової експлуатації  $T = 7$  років пропонується для подальшого обговорення. Прийнято вважати, що термін окупності енергозберігаючого обладнання, дорівнює терміну гарантії на це обладнання 2-4 роки, а термін отримання прибутку після терміну окупності, що дорівнює початковим інвестиціям в енергозберігаючі заходи, з урахуванням коефіцієнта дисконтування в межах 3-5 років. Використовувати термін служби на обладнання вентиляції та кондиціонування 15-20 років, наведений в ДБН В.2.5-67: 2013, в цільовій функції (1) нерационально.

### 3. Оптимізаційна модель СКП

Проектування систем кондиціонування повітря потребує системного аналізу та синтезу з застосуванням методів математичного моделювання. Для цього систему кондиціонування повітря підрозділяють на підсистеми й окремі елементи, для яких потім здійснюють кількісний аналіз на основі математичних моделей підсистем.

Декомпозиція як єдиної енергетичної системи представляється трьома основними енергетично взаємопов'язаними підсистемами [2, 3, 5, 6].

Основними рівняннями моделі є рівняння балансу повітря, повної теплоти ( $Q$ ), вологи ( $W$ ), газів ( $M$ ) і явної теплоти ( $Qя$ ) в приміщенні [4, 6]:

$$G_{n1} + G_{y1} - G_p + \sum_{i=2}^n G_{ni} - \sum_{j=2}^m G_{yj} = 0, \quad (2)$$

$$G_{n1} \cdot h_{n1} - G_{y1} h_{y1} - G_p h_p + \sum_{i=2}^n G_{ni} h_{ni} - \sum_{j=2}^m G_{yj} h_{yj} + \Delta Q + \Delta Q' = 0$$

$$G_{n1} d_{n1} - G_{y1} d_{y1} - G_p d_p + \sum_{i=2}^n G_{ni} d_{ni} - \sum_{j=2}^m G_{yj} d_{yj} + \Delta W + \Delta W' = 0$$

$$G \frac{\chi_{n1}}{\rho_{n1}} - G_{y1} \frac{\chi_{y1}}{\rho_{y1}} - G_p \frac{\chi_p}{\rho_p} + \sum_{i=2}^n G_{ni} \frac{\chi_{ni}}{\rho_{ni}} - \sum_{j=2}^m G_{yj} \frac{\chi_{yj}}{\rho_{yj}} + M_r = 0$$

$$CpG_{n1}t_{n1} - CpG_{y1}t_{y1} - CpG_p t_p + \\ + Cp \sum_{i=2}^n G_{ni}t_{ni} - Cp \sum_{j=2}^m G_{yj}t_{yj} + \Delta Q_y + \Delta Q' = 0$$

де  $G_n$ ,  $G_y$ ,  $G_p$  – витрати повітря припливного, повітря, що видаляється, та рециркуляційного повітря кг/с;  $h_n$ ,  $h_y$ ,  $h_p$  – ентальпія повітря припливного, повітря, що видаляється, та рециркуляційного повітря кДж/кг;  $d_n$ ,  $d_y$ ,  $d_p$  – вологовміст повітря припливного, повітря, що видаляється, та рециркуляційного повітря;  $t_n$ ,  $t_y$ ,  $t_p$  – температура повітря припливного, повітря, що видаляється, та рециркуляційного повітря;  $x/p_n$ ,  $x/p_y$ ,  $x/p_p$  – концентрація та густина повітря припливного, повітря, що видаляється, та рециркуляційного повітря;  $\Delta G_m$ ,  $\Delta Q_m$ ,  $\Delta W_m$ ,  $\Delta M_{гм}$ ,  $\Delta Q_{гм}$  – де баланси місцевої вентиляції по повітрю, повній теплоті, волозі, газам і явній теплоті.

На першому етапі оптимізується структура й продуктивність системи кондиціонування повітря, характер і навантаження.

На другому етапі здійснюється оптимізація підсистем за різними технологічними і конструктивними параметрами.

Нарешті, на третьому етапі базові варіанти структури й продуктивності систем кондиціонування повітря оптимізуються разом з оптимальними варіантами підсистем. При цьому розраховуються річні витрати холоду систем кондиціонування повітря.

Нами розглянуті деякі технології і елементи, вдосконалення яких безпосередньо підвищує енергоефективність і знижує споживання електроенергії в річному циклі використання багатозональних систем кондиціонування. Цікава робота [2], виконана на основі енергетичних балансів теплофізичних процесів в VRF. Однак на стадії узгодження контракту, коли для обґрунтування кошторису робіт треба зробити попередній вибір, ми побудували нашу методику експериментального аналізу для вибору моделі зовнішнього блоку VRF на підставі таблиць з використанням формули (2) і при обліку нестационарного теплообміну в приміщеннях [5].

Необхідно також відзначити постійну роботу провідних світових фірм, які виробляють багатозональні системи кондиціонування, над системами їх управління та програмним забезпеченням, над полегшенням їх експлуатації та використанням таймерів, що настроюються на тривалий термін по запрограмованій автоматичній підтримці зміни параметрів мікроклімату в процесі добового, тижневого, а іноді і більш тривалого періоду.

#### 4. Результати досліджень

Проведені розрахунки показали поєднання зовнішніх блоків при конфігуруванні модулів багатозональних систем кондиціонування, що дозволяє отримати системи холодо- і теплопродуктивності від 10 до 180 кВт в одному модулі і підібрати оптимальну. Фірми пропонують варіанти найбільш компактних і найбільш енергоефективних модулів. Модульний принцип залишає можливість творчої оптимізації багатозональних систем кондиціонування, починаючи з етапу проектування, з урахуванням всіх особливостей конкретного об'єкта. Для цього використовуються програми-конфігуратори, які безперервно вдосконалюються.

Як правило, VRF-системи кондиціонування застосовуються в приміщеннях, де коефіцієнт неодноразності  $k < 1$ . Тобто основний принцип функціонування мультизональних систем перерозподілу холодоагенту між споживачами з неодноразним навантаженням припускає доцільність їх використання тільки при значеннях  $k < 1$ . За умови одночасного максимуму теплових навантажень в приміщеннях, оптимальним є застосування менш складних систем.

Тому при проектуванні VRF-систем необхідно вибирати внутрішні блоки в межах однієї системи з неодноразними максимумами навантажень, наприклад орієнтування по різних фасадах будівлі. Такий вибір призводить до рівномірного завантаження зовнішнього блоку протягом доби і меншій розрахунковій потужності зовнішнього блоку.

Коефіцієнт неодноразності  $k$  залежить в першу чергу від теплового режиму будівлі, але не може бути менше певних величин, залежних від конструкції VRF-систем. Тому для визначення потужності зовнішнього блоку необхідно знати три величини: суму максимальних теплоприпливів обслуговуваних приміщень, суму номінальних потужностей внутрішніх блоків, коефіцієнт неодноразності теплоприпливів приміщень.

Особливістю систем автоматичного регулювання VRF-систем є підтримка певного тиску на виході і вході зовнішнього блоку (рисунок 1). Втрати тиску в системі також залежать від витрати фреону  $G_{нар}$  і гідравлічної характеристики мережі  $k_{гидр}$ :

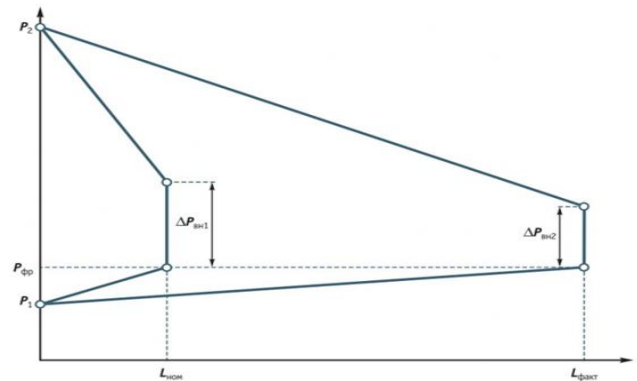


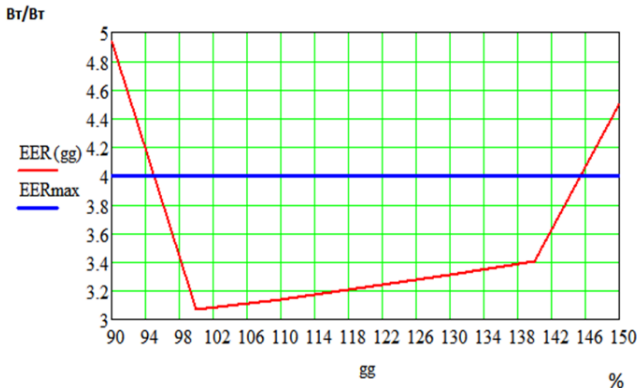
Рисунок 1 – Графік змінення тиску в нагнітаючому і всмоктуючому фреонопроводі

Таким чином, при збільшенні довжини магістралей вище за номінал 7,5 метрів відбувається збільшення гідравлічної характеристики мережі і, відповідно, зменшення витрати фреону в системі.

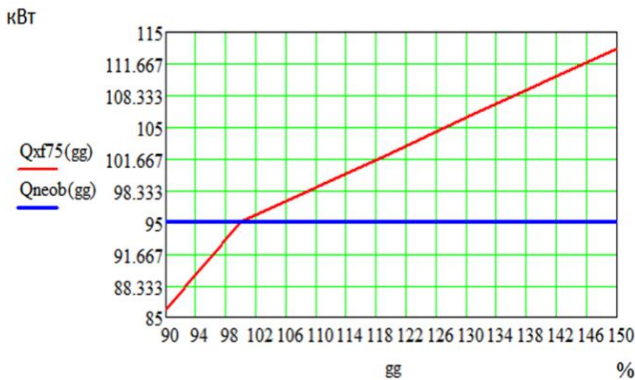
Пропорційно зменшенню витрати фреону (16) відбувається зменшення потужності зовнішнього блоку (рисунок 1).

Наша методика розглянута на прикладі світових лідерів в секторі виробництва обладнання: Daikin, Mitsubishi Electric, Fujitsu, Mitsubishi Heavy, де визначено найбільш ефективне обладнання. При цьому розраховувалося споживання енергії і термін окупності, залежність енергетичної ефективності роботи багатозональної системи від сумарного індексу в підключених внутрішніх блоках, залежність фактичної холодопро-

дуктивності від сумарного індексу (сумарної номінальної холодопродуктивності підключених внутрішніх блоків),  $gg$  та інше (рисунки 2, 3).



**Рисунок 2** – Залежність енергетичної ефективності роботи багатозональної системи від сумарного індексу (сумарної номінальної холодопродуктивності у відсотках) в підключених внутрішніх блоках



**Рисунок 3** – Залежність фактичної холодопродуктивності від сумарного індексу (сумарної номінальної холодопродуктивності підключених внутрішніх блоків) в підключених внутрішніх блоках

## Висновок

Розроблена комплексна математична модель з використанням отриманої цільової функції для приміщень містить принципово новий підхід до вибору оптимального кліматичного обладнання для підтримки комфортних параметрів. Ці заходи об'єднує те, що для їх реалізації, як правило, потрібні додаткові капіталовкладення. Для швидкої оцінки термінів окупності альтернативних і доповнення існуючих варіантів енергозберігаючих заходів потрібна наявність програмного інструментарію не тільки з дружнім інтерфейсом, але і імперативними обмеженнями по всіх параметрах мікроклімату в даному об'єкті відповідно до чинних нормативних документів.

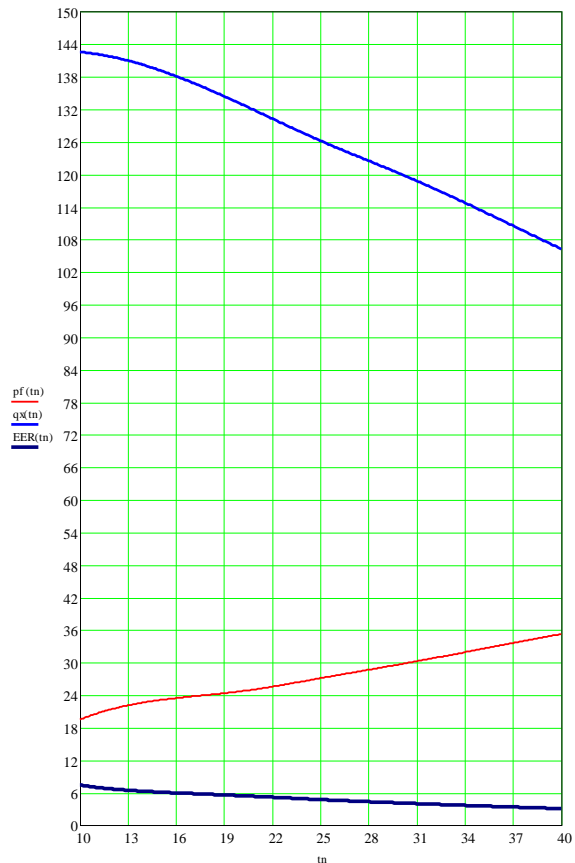
При підборі обладнання враховується вплив чинників (мінлива температура холодоагенту, інверторний привід, рекуперація) та параметрів обладнання (компресор, вентилятор, теплообмінники, фільтри.)

Враховуючи ці фактори проведений експрес-аналіз для вибору моделі зовнішнього блоку VRF на підставі таблиць фірм-представників та проведені розрахунки.

Розроблена оціночна методика може бути використана для спільного вибору агрегату приплив-

но-витяжної системи кондиціонування повітря з рекуперацією, інверторного кондиціонера і конструкції відповідних зовнішніх огорожень на ранній стадії проектування.

Результати математичного моделювання дозволяють визначити енергоефективне обладнання багатозональних систем кондиціонування повітря при рахуванні чинників та параметрів оптимізації. Графічне зображення залежностей фактичної потужності і холодопродуктивності від зовнішньої температури (рисунок 4) відповідає таблицями фірмових даних [3]. З цих рисунків також видно, що при збільшенні температури коефіцієнт енергетичної ефективності МЗС зменшується. Однак в сучасних інтелектуальних програмах управління числами оборотів компресора і температурою холодоагенту сезонне і річне споживання електроенергії буде значно нижче, ніж в системах без такого регулювання, тому сезонний коефіцієнт теплоефективності таких МЗС набагато вище.



**Рисунок 4** – Залежність фактичної холодовидатності  $qx(tn)$ , фактичній споживаній потужності  $pf(tn)$  і їх відношення  $EER(tn)$ , що визначає ефективність роботи ЗС на охолодження, від зовнішньої температури  $tn$ .

При використанні меншого типомінала зовнішнього блоку AJY072LALBH необхідно витратити більшу потужність – 7 кВт замість 6,16 кВт при використанні зовнішнього блоку AJY090LALBH. Тобто цей зовнішній блок більшого типомінала при такій температурі буде працювати з більшим СЕК = 3,636, ніж AJY072LALBH, який в цих же умовах буде відповідати СЕК = 3,2.

Зі сказаного ясно, що максимальна теплова потужність / холодопродуктивність БЗС повинна відповідати

максимальним теплоприпливам або тепловтратам кондиціонером об'єкта, а річна витрата електроенергії буде залежати від досконалості обладнання, яке автоматично підтримує з необхідною точністю задані сезонні температури повітря в об'єкті, в залежності від зміни зовнішніх умов і режиму тепловиділень і волого виділення всередині об'єкта. Таке вдосконалення функціональних параметрів МЗС спільно з їх постійним вдосконаленням в частині надання більш повного комфорту користувачам, включаючи шум і відносну вологість, і вдосконалення екологічної безпеки їх роботи, є сучасним трендом розвитку кліматичної техніки.

Конкретний термін окупності БЗС із зовнішнім блоком (модулем) більшого типомінала в порівнянні з блоком (модулем) меншого типомінала за рахунок економії електроенергії можливо визначити за апробованою методикою розрахунку теплоприпливів і тепловтрат об'єкта протягом річного циклу для середньомісячних зовнішніх температур.

## Литература

1. Табунщиков Ю. А. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. //

Ю. А. Табунщиков, М. М. Бродач. – М.: АВОК-ПРЕСС. – 2002. – 194 с.

2. Брух В. В. Парадоксы традиционной методики расчета VRF систем кондиционирования воздуха. // В. В. Брух / СОК – 2005. – № 5. – С. 62-64.

3. Перепека В. И. Расчеты систем кондиционирования и вентиляции. // В. И. Перепека, Н. В. Жихарева / Одесса: «ТЭС», 2014. – 240 с.

4. Zhykhareva N. Modeling of energy efficient air conditioning // N.V Zhykharieva. / The scientific method. Poland, 2017. – No. 3. – P. 3-6.

5. Zhykhareva N. Optimization of conditioning system for premises with non stationary heat exchanger // N. Zhykharieva / Norwegian Journal of development of the International Science, 2017. – Vol. 2, No. 5. – P. 94-99.

6. Грачев Ю. Г. Основы оптимизации систем кондиционирования микроклимата. // Н. В. Жихарева / Пермь, изд. Перм, политехн.ин-та, 1987 – 80 с.+ 1 вкл.

7. Жихарева Н. В. Оптимизация сумарной стоимости теплового зашиту помещений та климатического оборудования. // Н. В. Жихарева, М. Г. Хмельнюк / Холодильна техніка та технологія, 2017 – Том 53, вип. 4. – С. 17-20.

Отримана в редакції 12.10.2018, прийнята до друку 04.12.2018

## Increase of energy efficiency of multi-zone variable refrigerant flow air conditioning systems

N. Zhykharieva, E. Baboi, A. Basov

Odessa National Academy of Food Technologies, 112 Kanatna str., Odessa, 65039, Ukraine

*Energy-saving measures to improve efficiency in the field of air conditioning are determined using methods of mathematical modeling of circuit-technical solutions and modes of operation of air-conditioning equipment for public facilities while using modern multi-zonal variable refrigerant flow systems. Complex model of public objects air conditioning systems optimization has been developed. The model takes into consideration not only non-stationary external and internal heat load in the accommodation but also the factors on minimizing the variable portion of the reduced costs associated with energy costs. The target function of optimization of the total amount of capital and operating costs for thermal protection of premises and climatic energy saving equipment during the period of their operation with the provision of the least reduced costs has been tested. The energy saving capabilities were carried out in calculating the universal objective function and mathematical modeling software by determining the payback period and the objective function values for the compared options. The comparative analysis based on the developed mathematical model of Daikin, Mitsubishi Electric, Fujitsu, Mitsubishi Heavy for objects operating during the daily cycle in the extreme-non-stationary mode has been conducted. Such public objects include theaters, restaurants, factory canteens, conference halls and the like. The power saving features are carried out in calculating the universal target function and programs of mathematical modeling in determining the payback period and the values of the target function for comparable variants.*

**Keywords:** energy efficiency, optimization, air conditioning, energy saving, target function, modeling, heat exchange

## References

1. Tabunshchykov, Y. A., Brodach, M. N. (2002) Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiia teplovoi effektivnosti zdaniy. Moscow: Avok-PRESS, 194 p. (in Russian)

2. Brukh V.V. (2005) Paradoксы traditsionnoi metodiki rascheta VRF system konditsionirovaniia vozdukhа. SOK, No. 5, pp. 62-64 (in Russian)

3. Perepeka, V. I., Zhykhareva, N. V. (2014) The calculations of air conditioning and ventilation. Odessa «TEC», 240 p. (in Russian)

4. Zhykhareva N. Modeling of energy efficient air condition. *The scientific method, Poland*, No. 3, 3-6.

5. Zhykhareva N. (2017) Optimization of conditioning system for premises with non stationary heat exchanger. *Norwegian Journal of development of the International Science*, 2(5), 94-99.

6. Grachev Y.G. (1987) Osnovy optimizatsii system konditsionirovaniia mikroklimate. *Izd. Permskogo politekhnicheskogo instituta*, Perm, 80 p. (in Russian)

7. Zhykhareva N., Khmelniuk M. (1987) Buildings Thermal Protection and Air Conditioning Equipment Overall Cost Optimization. *Refrigeration Engineering and Technology*, 53(4), 17-20 (in Ukrainian)

DOI: <http://dx.doi.org/10.15673/ret.v53i4.706>

Received 12 October 2018  
Approved 04 December 2018  
Available in Internet 30 December 2018