

*Робота присвячена вдосконаленню методів та моделей автоматизованого керування системою теплопостачання міста для підвищення економічної ефективності за рахунок цільової зміни структури об'єкту керування. Був проаналізований об'єкт керування, розроблено його імітаційні моделі, синтезовано та обґрунтовано критерії та цільова функція оптимізації, розроблено рішення задачі оптимізації процесу теплопостачання міських районів*

*Ключові слова: об'єкт керування, імітаційна модель, цільова функція, теплопостачання міста, теплові мережі*

*Робота посвящена совершенствованию методов и моделей автоматизированного управления системой теплоснабжения города для повышения экономической эффективности за счет целевого изменения структуры объекта управления. Был проанализирован объект управления, разработаны его имитационные модели, синтезированы и обоснованы критерии и целевая функция оптимизации, разработано решение задачи оптимизации процесса теплоснабжения городских районов*

*Ключевые слова: объект управления, имитационная модель, целевая функция, теплоснабжение города, тепловые сети*

УДК 681.5:658.264

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.40539

# ДОСЛІДЖЕННЯ ПИТАНЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ СИСТЕМОЮ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ МІСТА З ОПТИМІЗАЦІЄЮ СТРУКТУРИ ОБ'ЄКТА

М. В. Максимов

Доктор технічних наук, професор\*

E-mail: prof.maksimov@gmail.com

С. В. Бабич

Аспірант\*

E-mail: babich07@mail.ru

\*Кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів  
Одеський національний політехнічний університет  
пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044

## 1. Вступ

У сучасному великому місті України з переходом на ринкові ціни на енергоносії зростає рівень вимог до функціональних характеристик комп'ютерно-інтегрованих систем керування (КІСК), які забезпечують керування технічними засобами теплопостачання (ТП).

Сучасні КІСК ТП роблять можливим підключення технічних засобів теплопостачання, із тих які працюють в системі, з мінімальними поточними витратами фінансових ресурсів при зміні середовища їх використання з відсутністю або мінімізацією втручання оператора під час функціонування. На даний час рівні розвитку теорії адаптивних систем та методів керування, а також теорії оптимального керування (ОК), дозволяють розв'язати завдання керування за структурою взаємозамінного обладнання системи теплопостачання, яке забезпечить пошук мінімальних витрат ресурсів. При цьому апріорно розуміється, що кожна одиниця обладнання яка керується за параметром працює в оптимальному режимі. Метою автоматизованого керування є підтримка мінімальних витрат фінансових ресурсів в системі теплопостачання, при умовах існування альтернативних енергетичних ресурсів (потоків), що відрізняються різноманітною вартістю, яка змінюється в часі.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми.

Окремі аспекти синтезу системи управління теплопостачанням міських районів раніше вже були розглянуті в ряді робіт. Так, в [1] наведені результати дослідження системи теплопостачання окремого котеджу. Показана можливість управління структурою технічних засобів. Синтезований комплексний критерій управління, що враховує такі параметри як надійність системи, вартість енергоресурсів, ефективність перетворення ресурсів в теплову енергію і якість забезпечення заданої температури. В [2] наведено результати аналізу економічної ефективності розглянутих систем теплопостачання міських районів у складі яких знаходяться джерела теплової енергії різні за своєю природою і використовуваних енергоресурсів. В [3] наведено результати синтезу та адаптації цільової функції управління системою теплопостачання стосовно до міських районів.

Аналіз відкритої літератури показав, що спочатку під управлінням структурою складних технічних систем розумілося управління структурою регулятора з метою оптимізації його поточних налаштувань. Для дослідження літальних апаратів була розроблена теорія координатно-параметричного управління, яка передбачала можливість зміни в будь-який момент часу математичної моделі об'єкта управління [4]. Але в області теплоенергетики структурна оптимізація

об'єкта управління системно не вивчалася і розглянута на рівні окремих робіт, присвячених вирішенню приватних або прикладних завдань [5, 6].

На даний час виникло протиріччя, яке не дозволяє відомим моделям та методам керування системою теплопостачання міста, або його районів проводити керування при мінімальних економічних витратах в умовах наявності альтернативних енергетичних потоків, що відрізняються різноманітною вартістю. Необхідність вдосконалення КІСК, яка підвищить економічну ефективність за рахунок цільової зміни структури об'єкта керування, на основі аналізу вартості альтернативних енергетичних потоків і визначає актуальність даної роботи.

### 3. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є вдосконалення методів та моделей автоматизованого керування системою теплопостачання міста для підвищення економічної ефективності за рахунок цільової зміни структури об'єкта керування.

Досягнення мети здійснюється розв'язанням таких завдань:

- аналіз об'єкта керування, методів та моделей, що використовуються при керуванні процесом теплопостачання міста та міських районів, обрання прототипу системи теплопостачання;
- розробка імітаційних моделей об'єкта керування, що функціонує в умовах наявності альтернативних енергетичних потоків що відрізняються різноманітною вартістю;
- синтез та обґрунтування критеріїв та цільової функції оптимізації процесу теплопостачання міста;
- рішення задачі оптимізації процесу теплопостачання міських районів за рахунок переходу від структурної оптимізації об'єкта керування до керування структурою ціни запропонованих споживачу енергетичних потоків.

### 4. Модель об'єкта управління та оптимізація процесу теплопостачання міських районів

Для дослідження обрана система теплопостачання міського району, який складається з 200 житлових будинків на 72 квартири кожен. В якості джерел теплової енергії обрані районні котельні на базі газових котлів та теплонасосних установок, дахові котельні та індивідуальні джерела у вигляді побутових газових котлів та теплових насосів. Розроблено комплекс математичного забезпечення для окремої квартири, будинку, обладнання систем теплопостачання та теплової мережі. Спочатку представлена спрощена структурна схема моделі окремої квартири (рис. 1). Для моделювання процесу

опалення вважалося, що кожна квартира забезпечена якимось універсальним опалювальним радіатором який можна підключити до будь-якого джерела теплової енергії. Знаючи коефіцієнт тепловіддачі радіатора  $\alpha_p$ , його площу  $S_p$ , температуру теплоносія на вході в радіатор  $t_p^{bx}$ , витрату теплоносія  $G_p$  через даний радіатор і температуру повітря  $t_k$  в квартирі, кількість теплоти надійшла в квартиру визначалося як:

$$Q_p = \xi \alpha_p S_p (t_p^{bx} - t_k) \Delta \tau. \quad (1)$$

Тому температура  $t_p^{bvx}$  на виході з радіатора визначалась як

$$t_p^{bvx} = t_p^{bx} - \frac{Q_p}{G_p C_p \Delta \tau}, \quad (2)$$

де  $C_p$  – теплоємність теплоносія, Дж/кг.

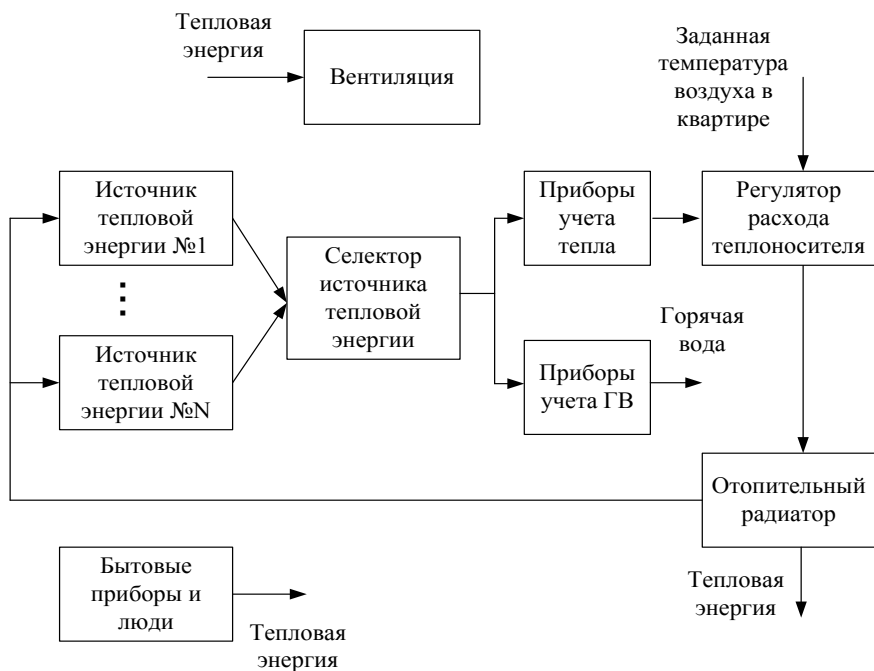


Рис. 1. Спрощена структурна схема моделі окремої квартири

У даній роботі було вирішено максимально спростити обчислювальну задачу і розглядати моделювання процесу теплопередачі через стіни, підлогу і стелю кожної квартири як нестационарну одновимірну задачу теплопередачі через плоску стінку. Відповідно тривимірне мірне температурне поле всього будинку було замінено окремими одновимірними полями огорожувальних конструкцій. Самі поля розраховувалися методом теплових балансів.

Для моделей теплогенеруючого обладнання оцінювалося тільки кількість корисної теплової енергії одержуваної з первинного енергоресурсу з урахуванням ККД. У моделі теплової мережі було розглянуто процес передачі теплоносія від районної котельні до окремих житлових будинків. Було прийнято, що від котельні відходить вісім окремих гілок теплової мережі. На кожній гілці розташовані п'ять центральних теплових пунктів (ЦТП). До кожного ЦТП підключено п'ять будинків. Кожна ділянка трубопроводу харак-

теризується певним рівнем теплових і фізичних втрат теплоносія. Мінімальні рівні втрат були прийняті рівними відповідним нормам.

У розробленому комплексі моделей був також передбачений облік кількості і вартості витрачених енергоресурсів у всіх ключових точках з урахуванням обраних в даний момент тарифів на газ та електроенергію.

В результаті проведених досліджень розвинута математична модель системи тепlopостачання міського району, яка дозволяє імітувати процеси опалення та гарячого водопостачання від будь-якого джерела теплової енергії або їх комбінації.

Для оптимізації процесу тепlopостачання міських районів було проведено синтез та обґрунтування критеріїв та цільової функції оптимізації процесу тепlopостачання міста [7]. Сформульовано дві задачі оптимізації: локальна та глобальна.

Локальна задача оптимізації полягає у виборі в кожен момент часу тієї структури системи тепlopостачання, яка забезпечує мінімальні витрати на вирішення завдання тепlopостачання [8].

В якості цільової функції була обрана вартість, яка надається споживачеві теплової енергії. В якості факторів, які визначають поточне значення цільової функції, були обрані: надійність обладнання, ефективність процесу тепlopостачання і вартість витрачених ресурсів.

Аналіз показав, що для вираження в грошовому еквіваленті характеристики надійності доцільно використовувати методи актуарної математики, які дають можливість розрахунку тарифних ставок по масовим ризиковим видам страхування:

$$R(t, \Delta t) = \left( (1 - P(t)) 0,7 \left( 1 + 1,2\alpha(\gamma) \sqrt{\frac{P(t)}{n_c (1 - P(t))}} \right) \right) \times \frac{(C_e + C_{ia}) \Delta t}{T}, \tag{3}$$

де  $T$  – ресурс системи,  $c$ ;  $t$  – інтервал часу, з початку моделювання,  $c$ ;  $\Delta t$  – інтервал моделювання або інтервал, на якому оцінюється робота системи,  $c$ ;  $C_e$  – вартість обладнання;  $C_{ia}$  – вартість монтажу та наладки;  $\alpha(\gamma)$  – коефіцієнт, який залежить від гарантії безпеки  $\gamma$  (обирається за таблицями довідника);  $n_c$  – кількість підключених споживачів;  $P(t)$  – надійність джерела теплової енергії.

Подальші дослідження показали, що для коректного вибору споживачем джерела з мінімальною вартістю теплової енергії, структура цільової функції повинна включати в себе дві складові: адитивну  $A(\Delta t)$ , залежну тільки від часу; і мультиплікативну  $M(N_{tp}, \Delta t)$ , залежну як від часу, так і від потужності джерела

$$J(N_{tp}, \Delta t) = A(\Delta t) + M(N_{tp}, \Delta t).$$

Адитивна складова включає в себе амортизаційні відрахування, виражену в грошових одиницях надійності обладнання, а також різні додаткові витрати для забезпечення процесу і компенсації втрат. У вартість  $\Delta S$  входять: вартість холодної води підживлення, яка компенсує фізичні втрати теплоносія; вартість енерго-

ресурсів витрачаються для нагріву холодної води до регламентних значень; вартість електроенергії витрачається для роботи насосів та ін. У загальному вигляді адитивна складова визначалася як:

$$A(t, \Delta t) = \frac{(C_e + C_{ia} + C_s) \Delta t}{n_c T} + R(t, \Delta t) + \Delta S, \tag{4}$$

де  $C_s$  – вартість обслуговування системи за період часу  $T$ .

Мультиплікативна складова безпосередньо визначається потужністю джерела та ефективністю процесу перетворення енергії первинних енергоресурсів в теплову енергію, надану споживачеві.

$$M(N_{tp}, \Delta t) = C_r^i(t, G_c^i) \frac{N_{tp} \Delta t}{R_i \eta_i^*}, \tag{5}$$

де  $N_{tp}$  – необхідна сумарна потужність споживачів;  $G_c^i$  – кількість вже спожитого  $i$ -го енергоресурсу за звітний період (місяць);  $C_r^i(t, G_c^i)$  – поточна ціна  $i$ -го енергоресурсу, що залежить як від часу доби, так і від кількості вже спожитого енергоресурсу;  $G_r^i$  – поточна витрата  $i$ -го енергоресурсу за звітний період (місяць);  $R_i$  – питома енергоємність  $i$ -го енергоресурсу;  $\eta^*$  – тепловий ККД процесу отримання теплової енергії.

В залежності від виду використовуємого енергоресурсу величина  $R_i$  приймає різноманітні значення. Для палива це питома теплота згоряння Дж/м<sup>3</sup>, Дж/кг. Для електроенергії  $R_i = 3600000$  Дж/кВт\*год.

Тепловий ККД процесу визначається добутком ККД окремих елементів теплової мережі  $\eta^* = \prod_k \eta_k$ .

Таким чином маємо задачу оптимізації функції трьох змінних:

$$J(N_{tp}; t; \Delta t) \rightarrow \min_{N_{tp} \in R, t \in T, \Delta t \in T}. \tag{6}$$

Глобальна задача оптимізації була сформульована таким чином: в умовах обмеженості доступних енергетичних потоків необхідно забезпечити таку структуру енергоспоживання, яка забезпечить процес тепlopостачання міста протягом максимально можливого часу.

Єдиним доступним важелем управління процесом теплоспоживання в масштабах міста є ціна на енергоресурси [9]. Збільшення або зменшення ціни на газ та електроенергію призведе до зміни собівартості теплової енергії  $i$ , в свою чергу, до зміни структури локальних систем тепlopостачання кожного споживача.

Рівномірне підвищення цін на всі енергоресурси в цілому призведе до подорожчання теплової енергії  $i$ , як наслідок, до потенційного зниження заданої температури в будівлях у споживачів. Це дозволить знизити витрату енергоресурсів за рахунок вимушеного зниження споживачами якості тепlopостачання.

З іншого боку, зміна співвідношення цін на газ і електроенергію, дозволить змінювати структуру енергоспоживання при збереженні сумарних надходжень до бюджету.

Основним критерієм при вирішенні глобальної задачі оптимізації [10] слід прийняти час функціо-

нування  $t_{\text{функ}}$  міських систем тепlopостачання при поточному витраті енергоресурсів та їх доступному обмеженні  $M_i$ .

$$t_{\text{функ}} = f(G_1, G_2, \dots, M_1, M_2, \dots). \quad (7)$$

Очевидно, що при  $M_i = \text{const}$  функція

$$t_{\text{функ}}(G_1, G_2, \dots, M_1, M_2, \dots)$$

не має оптимуму і лінійно зростає зі зменшенням витрат  $G_i$ , а після використання доступної кількості енергоресурсів система закінчує своє існування.

Якщо ж прийняти, що доступне кількість енергоресурсів постійно оновлюється з деяким періодом  $t_m$ , то глобальна оптимізація буде досягнута при виконанні умови:

$$M_i^{\text{ост}} - G_i(t_m - t) - M_i^{\text{нз}} \leq \delta_i, \quad (8)$$

де  $M_i^{\text{ост}}$  – залишок  $i$ -го енергоресурсу;  $M_i^{\text{нз}}$  – недоторканий запас  $i$ -го енергоресурсу;  $\delta_i$  – допустима похибка визначення кількості  $i$ -го енергоресурсу.

При цьому слід зазначити, що величина  $G_i = f(C_r^i)$  носить імовірнісний характер і не піддається точному визначенню.

Таким чином, глобальна оптимізація полягає в підтримці балансу між залишками ресурсів  $M_i^{\text{ост}}$  і швидкістю їх споживання шляхом впливу на ціни енергоресурсів і швидкістю їх споживання шляхом впливу на ціни енергоресурсів  $C_r^i$ .

### 5. Результати імітаційного моделювання системи тепlopостачання міського району з різними обмеженнями на ресурси

Було проведено дослідження ефективності керування на імітаційній моделі системи тепlopостачання міського району. В ході моделювання визначався вплив на структуру системи тепlopостачання введенням різних обмежень на ресурси. Крок моделювання  $\Delta t$  було прийнято таким, що дорівнює 120 с. Інтервал моделювання становив 1 місяць з дискретом зміни часу в 1 с.

Була проведена серія розрахункових експериментів, в яких вважалося, що тепlopостачання будинків здійснюється тільки від одного джерела і альтернатива відсутня. При цьому вважалося, що рівні фізичних і теплових втрат відповідають нормативним значенням. У ході експериментів оцінювалися місячні витрати споживачів, джерел теплової енергії розглянутого міського району. Аналіз отриманих результатів показав, що найоптимальнішим джерелом є індивідуальні ТНУ. При цьому використання тепла стічних вод як джерела тепла для ТНУ дозволяє істотно (30 %) скоротити витрати на вирішення задачі тепlopостачання. Варто також відзначити, що в літній час середня температура стічних вод може досягати 28 °С, що також може скоротити витрати на ГВП в літній час.

Окремо було проведено моделювання тепlopостачання від районних котельень при рівні теплових і фізичних втрат в 10 разів більше нормативних. При цьому витрати споживачів для РК склали 10616,3 тис. грн, а для РК з ТНУ – 7066,6 тис. грн. Слід зазначити, що

в реальності дані цифри істотно вище, оскільки знос теплових мереж на сьогодні такий, що втрати в десятки разів вище нормативних. Крім того, використання ТНУ дозволяє потенційно знизити температуру теплоносія і тим самим зменшити теплові втрати.

У наступній групі експериментів всі джерела були взаємозамінними і могли працювати паралельно. Аналіз отриманих результатів показав, що оптимальне використання безлічі альтернативних джерел теплової енергії дозволяє стабільно отримувати рішення задачі тепlopостачання з меншими витратами в порівнянні з використанням тільки одного джерела.

Остання група експериментів ставила перед собою мету перевірити можливість керування швидкістю споживання первинних енергоресурсів шляхом впливу на їх ціну. На рис. 2 наведена залежність спожитої кількості електроенергії  $E$  від множника  $x$ . На рис. 3 наведена аналогічна залежність спожитого обсягу газу.

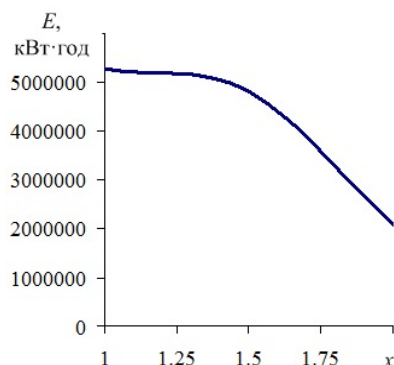


Рис. 2. Залежність спожитої кількості електроенергії від множника  $x$

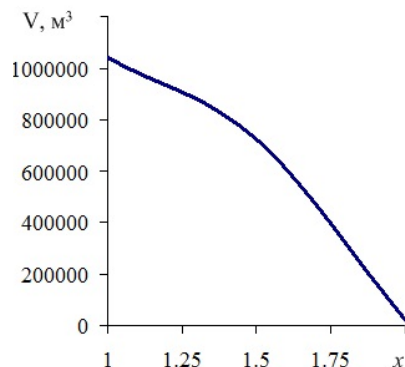


Рис. 3. Залежність спожитого обсягу газу від множника  $x$

В рамках експериментів ціна на електроенергію і газ змінювалася шляхом множення відповідних тарифів на масштабний множник. Аналіз отриманих результатів свідчить про потенційну можливість керувати споживанням енергоресурсів шляхом впливу на їх ціну.

### 6. Результати моделювання тепlopостачання з різними видами та кількістю джерел енергії

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити ряд висновків, а саме:

1) В системі теплопостачання, яка містить альтернативні, різні за своєю природою джерела теплової енергії, потенційно можливе вирішення завдання мінімізації фінансових витрат шляхом структурної оптимізації системи.

2) Пропонований підхід до управління системою теплопостачання міста дозволяє, певною мірою, регулювати витрату енергоресурсів в умовах їх обмеженості шляхом впливу на ціни відповідних ресурсів.

3) Розроблена система управління може бути використана як засіб діагностики стану теплових мереж, так як погіршення їх стану призведе до зростання вартості теплової енергії, що поставляється споживачам від районних котельень, ТЕЦ і т. п.

4) Результати моделювання також наочно показують, що фактичний знос сьогоденних теплових мереж неможливо компенсувати установкою сучасних високоефективних котлів або інших джерел теплової енергії. Усі витрати в першу чергу повинні виділятися на реконструкцію, ремонт і обслуговування трубопроводів. Подібні висновки також підтверджуються результатами енергоаудиту теплових мереж різних міст України.

До недоліків пропонованої системи управління можна віднести недостатньо опрацьований питання одночасного включення двох і більше джерел. При різкому зростанні енергоспоживання (час пік) іноді виникають ситуації коли районна котельня включається на кілька хвилин. Очевидно, що практичної точки зору такий варіант неприйнятний. Тому надалі необхідно розробити комплекс обмежень на включення джерел в різних умовах.

Хоча запропонована в даній роботі система управління досліджена на прикладі теплопостачання міського району, основною сферою її практичного застосування бачаться об'єкти приватної власності, власники

яких зацікавлені в підвищенні ефективності виробництва і зниженні витрат на теплопостачання.

## 7. Висновки

Таким чином, отримані результати дозволяють зробити наступні висновки:

1. Для розрахунків запропоновано математичну модель системи теплопостачання споживача тепла при будь яких збуреннях, яка дала можливість формувати поточну модель об'єкта керування в залежності від збурень і різних витрат фінансових ресурсів.

2. Для вирішення задачі керування запропонована цільова функція оптимізаційної задачі для системи теплопостачання зі змінною структурою об'єкта керування, яка відрізняється від відомих тим, що критерій надійності розраховується на базі методів актуарної математики, що дозволило звести оптимізаційну задачу до одного аргументу (витрати), та знаходити її значення в реальному часі керування при будь яких обмеженнях та збуреннях.

3. Для керування структурою системи теплопостачання в умовах обмежень на ресурси та збуреннях розвинуто метод, який полягає в тому, що рішення задачі керування теплопостачанням на кожному кроці моделювання забезпечується множиною джерел теплової енергії, які забезпечують мінімальне значення цільової функції, що дозволило забезпечити найвищу ефективність.

4. Розглянуто и запропоновано метод керування процесом теплопостачання міських районів в умовах обмежень на ресурси за рахунок переходу від структурної оптимізації множини теплогенеруючих джерел до керування структурою ціни запропонованої споживачу енергетичного потоку, що дозволило досягти раціонального використання енергоресурсів в системі.

## Література

1. Максимова, О. Б. Управление системой теплоснабжения с изменяемой структурой технических средств [Текст] / О. Б. Максимова, В. О. Давыдов, С. В. Бабич // Проблемы управления и информатики. – 2014. – № 3. – С. 50–60.
2. Бабич, С. В. Анализ экономической эффективности систем теплоснабжения городских районов [Текст] / С. В. Бабич, В. О. Давыдов // Труды Одесского национального политехнического университета. – 2014. – Вып. 1 (43). – С. 141–147.
3. Бабич, С. В. Целевая функция структурной оптимизации городских систем теплоснабжения [Текст] / С. В. Бабич, В. О. Давыдов // Труды Одесского национального политехнического университета. – 2014. – Вып. 2 (36). – С. 146–154.
4. Verda, V. Reduction of primary energy needs in urban areas through optimal planning of district heating and heat pump installations [Text] / V. Verda, E. Guelpa, A. Kona, S. Lo Russo // Energy. – 2012. – Vol. 48, Issue 1. – P. 40–46. doi: 10.1016/j.energy.2012.07.001
5. Verda, V. Procedures for the Search of the Optimal Configuration of District Heating Networks [Text] / V. Verda, C. Ciano // The International Journal of Thermodynamics. – 2005. – Vol. 8, Issue 3. – P. 143–154.
6. Verda, V. Impact of district heating and groundwater heat pump systems on the primary energy needs in urban areas [Text] / V. Verda, G. Baccino, A. Sciacovelli, S. Lo Russo // Applied thermal engineering. – 2012. – Vol. 40. – P. 18–26. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2012.01.047
7. Shu, H. W. Energy-Saving Judgment of Electric-Driven Seawater Source Heat Pump District Heating System over Boiler House District Heating System [Text] / H. W. Shu, D. M. Lin, X. L. Li, Y. X. Zhu // Energy and Buildings. – 2010. – Vol. 42, Issue 6. – P. 889–895. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.01.001
8. Chen, C. M. Assessment for Central Heating Systems with Different Heat Sources: A Case Study [Text] / C. M. Chen, Y. F. Zhang, L. J. Ma // Energy and Buildings. – 2012. – Vol. 48. – P. 168–174. doi: 10.1016/j.enbuild.2012.01.025
9. Hepbaslia, A. A study on modeling and performance assessment of a heat pump system for utilizing low temperature geothermal resources in buildings [Text] / A. Hepbaslia, M. T. Balta // Building and Environment. – 2007. – Vol. 42, Issue 10. – P. 3747–3756. doi: 10.1016/j.buildenv.2006.09.003
10. Verda, V. A thermoeconomic approach for the analysis of district heating systems [Text] / V. Verda, R. Borchiellini, M. Cali // The International Journal of Applied Thermodynamics. – 2001. – Vol. 4, Issue 4. – P. 183–190.