

*Наведені результати розробки аналітичної моделі контуру гарячого водопостачання з котлом, сонячним колектором та баком-акумулятором тепла. Розглянуто варіанти структур та алгоритмів автоматичних регуляторів температури гарячої води на подачі до користувача. Описано процедуру налаштування регулятора з внутрішньою моделлю за допомогою отриманої аналітичної моделі. Показані умови ефективного застосування запропонованого рішення*

*Ключові слова: система гарячого водопостачання, алгоритм керування, регулятор з внутрішньою моделлю, енергоефективність*

*Приведены результаты разработки аналитической модели контура горячего водоснабжения с котлом, солнечным коллектором и баком-аккумулятором тепла. Рассмотрены варианты структур и алгоритмов автоматических регуляторов температуры горячей воды на подаче к потребителю. Описана процедура настройки регулятора с внутренней моделью с помощью полученной аналитической модели. Показаны условия эффективного применения предлагаемого решения*

*Ключевые слова: система горячего водоснабжения, алгоритм управления, регулятор с внутренней моделью, энергоэффективность*

УДК 621.311: 681.5.015

DOI: 10.15587/1729-4061.2016.73385

# РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЮ СИСТЕМОЮ ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ З МОДЕЛЛЮ ОБ'ЄКТА У СКЛАДІ РЕГУЛЯТОРА

**О. В. Степанець**

Кандидат технічних наук, доцент\*

E-mail: stepanets.av@gmail.com

**А. В. Андрасович\***

E-mail: andrasovich\_av@ukr.net

\*Кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»  
пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

## 1. Вступ

Енергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики. Економічне зростання України значно залежить від рівня забезпечення енергоносіями, потенціалу енергоефективності та рівня його використання у промисловості. Основні позиції енергозбереження України викладені в Комплексній державній програмі «Енергозбереження в Україні на 2005–2020 рр.» [1–3].

Задача підвищення енергоефективності та забезпечення комплексного розвитку промисловості України реалізується шляхом впровадження заходів, спрямованих на технічне оновлення виробництва, використання науково-технічного потенціалу країни і формування високотехнологічного виробництва.

Широке використання систем автоматизації інженерного обладнання сприяє економії енергоносіїв, покращенню якості роботи та підвищенню надійності. Ще більшої ефективності можна досягти, об'єднуючи засоби автоматизації в мережеві структури.

До 2020 р. за прогнозами Міжнародного комітету з енергетики (IAE) до 75 % опалювальних установок у розвинених країнах працюватимуть на базі енергоощадних технологій [4].

В сучасних умовах недостатнього забезпечення паливними ресурсами та проблемою виробництва тепла існує потреба в створенні альтернативної системи автономного опалення та гарячого водопостачання на основі інновацій в енергозбереженні. Тому існує потреба в розробці власного методологічного та методич-

ного апарату. Створення умов здорової конкуренції в даному секторі призведе до покращення якості послуг та зниження тарифів [5].

## 2. Аналіз останніх досліджень та постановка проблеми

Підвищення енергетичної ефективності установок, що використовують відновлювальні джерела енергії, є досить актуальною проблемою, що вирішується різними шляхами, які передбачають як поліпшення техніко-економічних характеристик власне енергетичного обладнання, так і оптимізацію його енергетичних балансів і режимів з урахуванням змінного навантаження й енергії відновлюваного джерела. Способи вирішення цих питань шукаються у багатьох країнах, зокрема Китаї, Японії, Франції, Філіппінах [6] і включають в себе створення нових матеріалів, технологій, інтеграцію альтернативних джерел в системи з діючими енергоустановками, алгоритми оптимізації взаємодії кількох джерел тощо.

Установки теплопостачання на базі нетрадиційних джерел енергії мають перспективи з точки зору економії ресурсів палива [7]. Залучення засобів автоматизації в даний тип систем дає перспективу збільшення терміну експлуатації установок та достатньо точного регулювання економічності використання тепла та палива.

Згідно даних Міжнародного енергетичного агентства (IEA) [8] у зв'язку з актуальними екологічними проблемами і усвідомленою необхідністю енергозбе-

реження, у всьому світі все більше уваги приділяється використанню відновлюваної енергії. Компанією АВВ (Швейцарія) було проведено дослідження та розглянуто можливі сфери застосування відновлюваних джерел енергії [9]. Згідно зведених статистичних даних доведено, що значні можливості енергозабезпечення будівель відкриваються завдяки впровадженню сонячних колекторів для систем гарячого водопостачання та опалення. За допомогою сонячних колекторів можна отримувати енергію без шкідливого навантаження на навколишнє середовище. Правильно розрахована геліосистема може покрити до 50–60 % енергетичних витрат, що витрачаються зазвичай на гаряче водопостачання.

Відповідно до кожного технологічного об'єкту існує конкретна сонячна енергетична установка, що пояснює [10] наявну різноманітність конфігурацій систем, способів рециркуляції теплоносія, принципів дії регуляторів. Система з використанням альтернативних джерел енергії та додатковим підігрівом води є двоконтурною з примусовою рециркуляцією теплоносія (рис. 1). Дані контури конструктивно розділені.

В [11] висвітлено основні принципи керування інженерними системами сонячних установок. Пристрої автоматичного керування потрібні для узгодження роботи всіх елементів системи. Це відбувається на основі даних, отриманих від різних датчиків, які вмонтовані в колектор, бак-акумулятор тепла, котел та трубопровідну арматуру. На основі аналізу даних про температуру приймається рішення про вмикання циркуляційного насосу або додаткового нагрівального обладнання. Це дозволяє регулювати параметри роботи, а саме: температуру води в накопичувальному баку, максимальну температуру ГВП, обмеження роботи котла протягом дня. В складніших системах можна використовувати автоматику для зміни кута нахилу колектора і змінювати орієнтацію за сонцем для збільшення продуктивності виробництва гарячої води на 30–35 %.

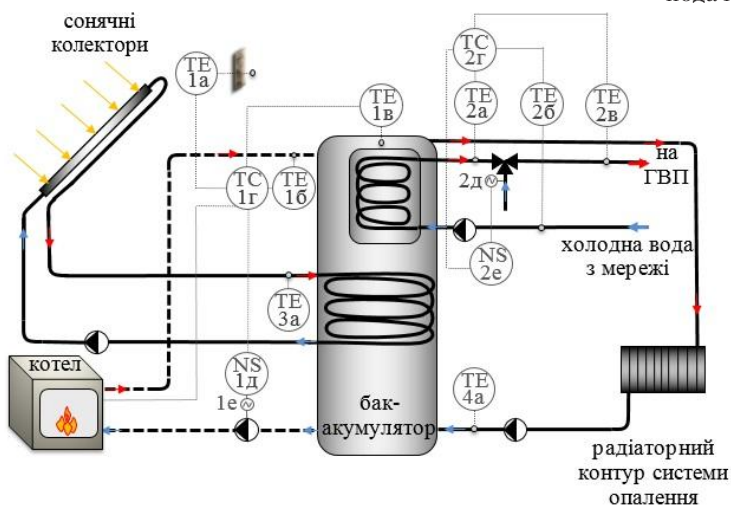


Рис. 1. Узагальнена функціональна схема установки

Установка забезпечує акумулювання максимально доступної кількості сонячної теплової енергії. В контурі колекторів підтримується постійна витрата теплоносія циркуляційним насосом. В контурі додаткового джерела енергії реалізовано погодозалежне регулювання температури теплоносія системи опалення, забезпечу-

ється підтримання заданого значення температури в баці-акумуляторі 1в регулятором 1г на основі інформації від давачів температури зовнішнього повітря 1а, 1б на подавальному трубопроводі від котлоагрегату та 1в за рахунок команди пуск/стоп котлоагрегату та формування сигналу на пускач 1д електродвигуна циркуляційного насоса 1е. Регулятор 2г здійснює регулювання температури подавальної води в систему гарячого водопостачання 2в шляхом надсилення керуючих сигналів на електромагнітне реле 2е триходового клапана 2д, що призводить до зміни об'ємних співвідношень витрат нагрітої 2а та холодної води 2б.

Точність математичної моделі об'єкта управління, на базі якої проводиться розрахунок налаштувань регулятора, є головним чинником, що впливає на якість перехідних процесів. Тому постає проблема математичного формулювання передавальної функції якомога більш універсальної та такої, що надаватиме точні розрахунки систем керування. На базі одного об'єкта існує можливість виведення математичної формули, що буде універсальна для подібних об'єктів за відміни константних значень технічних характеристик окремих апаратів системи. Основними вимогами, що висувуються до описаної системи регулювання, є максимальна швидкість досягнення заданої температури гарячого водопостачання при мінімальному динамічному відхиленні.

### 3. Мета та задачі дослідження

Мета роботи – розробка алгоритму керування системою гарячого водопостачання будинку в умовах, коли джерелами теплоти є поєднання класичного котла та сонячного колектора, що дозволяє побудувати енергоефективну систему, але водночас ускладнює процес підтримання комфортної температури води на подачі до споживачів.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

- визначити характер динаміки та розробити аналітичну модель об'єкта керування;
- розглянути можливі варіанти автоматичних регуляторів контуру гарячого водопостачання;
- провести порівняльні дослідження алгоритмів керування на базі обраних структур регуляторів на відповідність поставленим вимогам, визначити перспективи застосування.

### 4. Розробка моделі об'єкта керування

Для розрахунку моделі об'єкта керування та системи регулювання обираємо систему гарячого водопостачання (ГВП) та опалення житлового будинку. Нагрівання води здійснюється геліосистемою та котлом комбіновано [12].

Приймаємо, що температура холодної води з централізованої мережі складає 15 °С. Бажану температуру гарячого водопостачання встановлюємо 55 °С, на подачу в систему опалення – 70 °С.

Структурна схема об'єкта керування наведена на рис. 2.

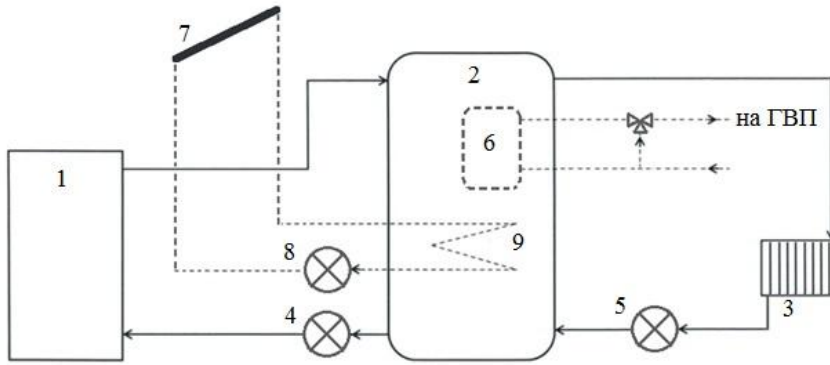


Рис. 2. Структурна схема об'єкта керування

На рис. 2 прийняті наступні позначення: 1 – котел; 2 – бак-акумулятор; 3 – пристрої для опалення приміщень; 4 – циркуляційний насос в зворотній магистралі між котлом і баком; 5 – циркуляційний насос в зворотній магистралі між пристроями для опалення приміщень і баком; 6 – теплообмінник для ГВП; 7 – сонячний колектор; 8 – циркуляційний насос контуру сонячного колектора; 9 – теплообмінник, з'єднаний з контуром сонячного колектора.

Обираємо бак-акумулятор об'ємом 500 л зважаючи на вимоги ефективного використання корисної площі колекторів. Це дозволить акумулювати максимальну кількість теплової енергії в баці та підвищити ефективність роботи геліосистеми [13]. В установці використовуються сонячні колектори з характеристиками, наведеними в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики сонячного колектора

Назва характеристики	Значення
Фірма-виробник	RUCELF
Модель	SCV-58-1800-30
Кількість трубок, шт.	30
Вага, кг	95
Продуктивність, кВт·год/доба	22
Абсорбуюча поверхня, м <sup>2</sup>	3,9
Об'єм теплообмінника, л	2,1
Матеріал внутрішнього теплообмінника	мідь
Теплоємність C <sup>к</sup> <sub>р</sub> , кДж/кг·К	0,385
Тепловіддача α, Вт/м <sup>2</sup> ·К	13,1
Теплоносій – 45 %-розчин пропиленгліколю	
Об'єм теплоносія в колекторі, см <sup>3</sup>	683,9
Густина ρ, г/см <sup>3</sup>	1,036
Максимальна швидкість потоку, м <sup>3</sup> /год	0,04
T <sub>min</sub> , °C	-30
T <sub>max</sub> , °C	120
C <sup>к</sup> <sub>рТ</sub> , кДж/кг·К	0,68

Розглянемо кожен контур об'єкта керування окремо.

Структурна схема контуру геліосистеми представлена на рис. 3.

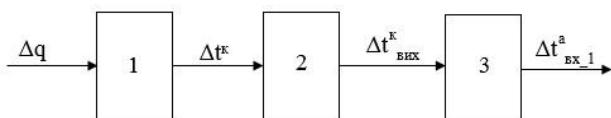


Рис. 3. Структурна схема сонячного колектора

На рис. 3 схематично показано контур геліосистеми, де 1 – поглинання сонячного потоку стінками трубок колектора, 2 – теплопередача від стінок колектора теплоносію (45 % розчин пропиленгліколю), 3 – теплообмін між теплоносієм колектора та теплоносієм контуру геліосистеми (вода). Використано такі позначення: q – сонячний тепловий потік; α – коефіцієнт тепловіддачі від стінки сонячного колектора до теплоносія (α=3,1 Вт/(м<sup>2</sup>·К)); t<sup>к</sup> – температура стінки сонячного колектора; m<sup>к</sup> – маса колектора (m<sup>к</sup>=95 кг);

m<sup>к</sup><sub>Т</sub> – маса колектора (m<sup>к</sup><sub>Т</sub>=0,7 кг); F<sup>к</sup> – площа абсорбуючої поверхні колектора (F<sup>к</sup>=3,9 м<sup>2</sup>); t<sup>к</sup><sub>вих</sub> – температура теплоносія на виході сонячного колектора; G<sup>к</sup><sub>Т</sub> – витрата теплоносія в сонячному колекторі (G<sup>к</sup><sub>Т</sub>=0,04 м<sup>3</sup>/год); G<sup>к</sup><sub>Т</sub> – витрата теплоносія в контурі геліосистеми (G<sup>к</sup><sub>Т</sub>=5,76 м<sup>3</sup>/год); m<sup>к</sup><sub>Т</sub> – маса води, що циркулює в контурі геліосистеми (m<sup>к</sup><sub>Т</sub>=12,5 кг); t<sup>а</sup><sub>вх\_1</sub> – температура теплоносія на вході в бак з контуру геліосистеми.

Згідно наведеної структурної схеми на рис. 3 складемо систему рівнянь теплового балансу (1) [14].

$$\begin{cases} F^k \Delta q = F^k \alpha \Delta t^k + m^k c_p^k \frac{dt^k}{d\tau}, \\ \alpha F^k \Delta t^k = G_T^k c_{pT}^k \Delta t_{\text{вих}}^k + m_T^k c_{pT}^k \frac{dt_{\text{вих}}^k}{d\tau}, \\ m_T^k c_{pT}^k \frac{dt_{\text{вх}_1}^a}{d\tau} = m_T^k c_{pT}^k \Delta t_{\text{вих}}^k - G_T^k c_{pT}^k \Delta t_{\text{вх}_1}^a. \end{cases} \quad (1)$$

Виконавши приведення рівнянь до стандартного вигляду диференційного рівняння та враховуючи значення констант, отримаємо (2):

$$\begin{cases} 715,9 \frac{dt^k}{d\tau} + \Delta t^k = 0,076 \Delta q, \\ 17,5 \frac{dt_{\text{вих}}^k}{d\tau} + \Delta t_{\text{вих}}^k = 3,32 \Delta t^k, \\ 2,17 \frac{dt_{\text{вх}_1}^a}{d\tau} + \Delta t_{\text{вх}_1}^a = 1,59 \Delta t_{\text{вих}}^k. \end{cases} \quad (2)$$

Розглянемо теплові процеси, що відбуваються у баці-акумуляторі (рис. 4).

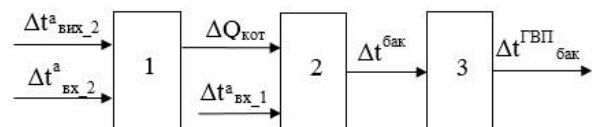


Рис. 4. Структурна схема бака-акумулятора

На рис. 4 схематично показано теплообмінні процеси в баці-акумуляторі, де 1 – нагрів котлом теплоносія системи, 2 – теплообмін між водою в баці системи опалення та нагрітим теплоносієм з контурів геліосистеми та котла, 3 – теплообмін між баками системи опалення та ГВП. Використано такі позначення: t<sup>а</sup><sub>вх\_1</sub> – температура теплоносія на вході в бак з контуру геліосистеми; t<sup>а</sup><sub>вх\_2</sub> – температура теплоносія на вході в бак з контуру

котла;  $t_{\text{вих}_2}^a$  – температура теплоносія на виході з бака в контур котла;  $t_{\text{вих}_3}^a$  – температура теплоносія на вході в бак від зворотної лінії системи опалення ( $t_{\text{вих}_3}^a=40^\circ\text{C}$ );  $t_{\text{вих}_3}^a$  – температура теплоносія на виході з бака до системи опалення ( $t_{\text{вих}_3}^a=70^\circ\text{C}$ );  $t^{\text{бак}}$  – температура в бойлері;  $t^m$  – температура води з тепломережі ( $t^m=15^\circ\text{C}$ );  $G_T^{\text{КОТ}}$  – витрата води в контурі котла ( $G_T^{\text{КОТ}}=6,2 \text{ м}^3/\text{год}$ );  $m_T^{\text{оп}}$  – маса теплоносія, що циркулює в системі опалення ( $m_T^{\text{оп}}=20 \text{ кг}$ );  $m_T^{\text{бак}}$  – маса теплоносія, що знаходиться в баку ( $m_T^{\text{бак}}=500 \text{ кг}$ );  $m_{\text{ГВП}}^{\text{бак}}$  – маса теплоносія, що знаходиться в баку для ГВП ( $m_{\text{ГВП}}^{\text{бак}}=200 \text{ кг}$ );  $t_{\text{ГВП}}^{\text{бак}}$  – температура теплоносія, що знаходиться в баку для ГВП;  $c_{\text{PT}}$  – питома теплоємність теплоносія (вода) ( $c_{\text{PT}}=4,218 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ );  $Q_{\text{КОТ}}$  – кількість теплоти, яку видає котел.

Відповідно до структурної схеми, наведеної на рис. 4, отримуємо систему рівнянь теплового балансу (3).

$$\begin{cases} m_T^{\text{бак}} \frac{dt^{\text{бак}}}{dt} + G_T^{\text{КОТ}} \Delta t^{\text{бак}} = (\Delta t_{\text{вих}_2}^a - \Delta t_{\text{вих}_2}^a) G_T^{\text{КОТ}} + G_T^{\text{Г}} \Delta t_{\text{вих}_1}^a, \\ \Delta Q_{\text{КОТ}} = G_T^{\text{КОТ}} c_{\text{PT}} (\Delta t_{\text{вих}_2}^a - \Delta t_{\text{вих}_2}^a), \\ m_{\text{ГВП}}^{\text{бак}} \frac{dt_{\text{ГВП}}^{\text{бак}}}{dt} + (\Delta t_{\text{ГВП}}^{\text{бак}} - t^m) m_{\text{ГВП}}^{\text{бак}} = \\ = m_T^{\text{бак}} \Delta t^{\text{бак}} - m_T^{\text{оп}} (\Delta t_{\text{вих}_3}^a - \Delta t_{\text{вих}_3}^a). \end{cases} \quad (3)$$

З другого рівняння системи (3):

$$(\Delta t_{\text{вих}_2}^a - \Delta t_{\text{вих}_2}^a) = \frac{\Delta Q_{\text{КОТ}}}{G_T^{\text{КОТ}} c_{\text{PT}}}. \quad (4)$$

Застосуємо (4) для першого рівняння системи (3). Після проведення перетворень та підставлення значення констант отримуємо:

$$\begin{cases} 80,6 \frac{dt^{\text{бак}}}{dt} + \Delta t^{\text{бак}} = 3,8 \cdot 10^{-5} \Delta Q_{\text{КОТ}} + 0,93 \Delta t_{\text{вих}_1}^a, \\ \frac{dt_{\text{ГВП}}^{\text{бак}}}{dt} + \Delta t_{\text{ГВП}}^{\text{бак}} = 2,5 \Delta t^{\text{бак}} + 12. \end{cases} \quad (5)$$

На виході з (5) маємо температуру води в баці для ГВП. Але, згідно прийнятої структурної схеми об'єкта, та беручи до уваги процеси теплообміну, отримане значення буде орієнтовано на завдання температури теплоносія в системі опалення, що значно перевищує значення температури на подачу в систему гарячого водопостачання. Для усунення даної ситуації після бойлера встановлено триходовий клапан, за допомогою якого за рахунок змішування потоків гарячої та холодної води можна отримати воду бажаної температури в системі ГВП.

Рівняння теплового балансу для даної ділянки матиме вигляд:

$$\Delta G_{\text{ГВП}}^{\text{бак}} (\Delta t_{\text{ГВП}}^{\text{бак}} - \Delta t^{\text{ГВП}}) = \Delta G^m (\Delta t^{\text{ГВП}} - t^m), \quad (6)$$

де  $G_{\text{ГВП}}^{\text{бак}}$  – витрата гарячої води з баку ГВП;  $G^m$  – витрата мережевої води;  $G^{\text{ГВП}}$  – витрата води з ГВП;  $t_{\text{ГВП}}^{\text{бак}}$  – температура теплоносія, що знаходиться в баку для ГВП;  $t^{\text{ГВП}}$  – температура гарячої води, що надходить до користувача;  $t^m$  – температура води з тепломережі ( $t^m=15^\circ\text{C}$ ).

Враховуючи (2), (5), (6) змодельємо перехідний процес за допомогою пакету прикладних програм Matlab (рис. 5, 6). Для тестового дослідження нанесене збурення зміною завдання витрати гарячої води з баку, початкова температура води відповідає 50 %-му відкриттю клапана, кінцева – 60 % відкриття.

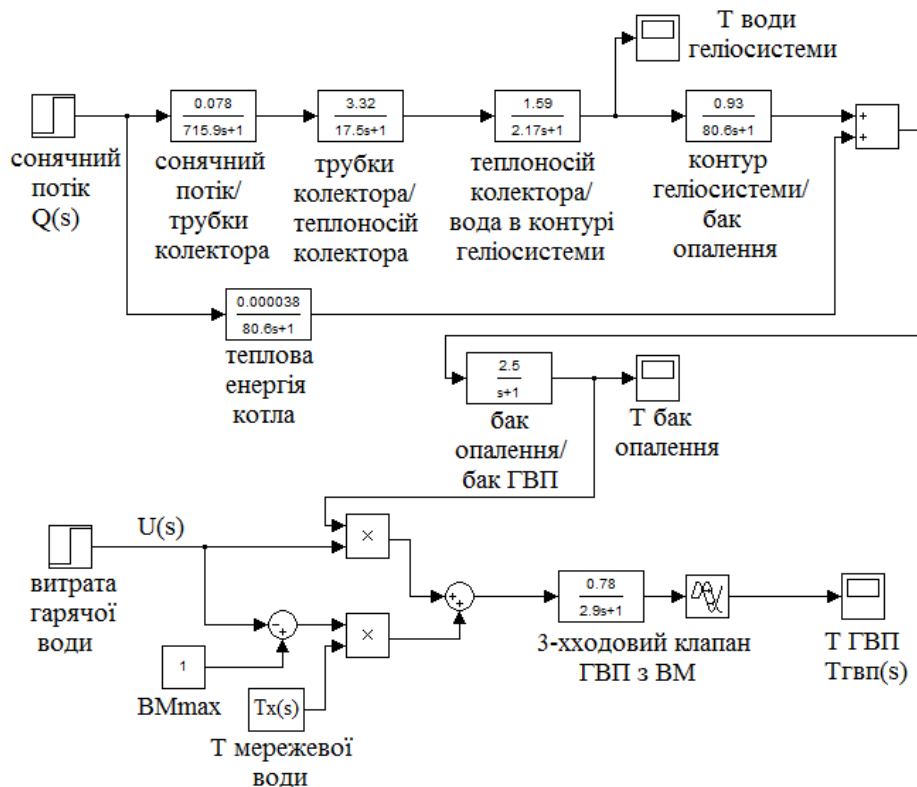


Рис. 5. Модель об'єкта керування в Matlab Simulink

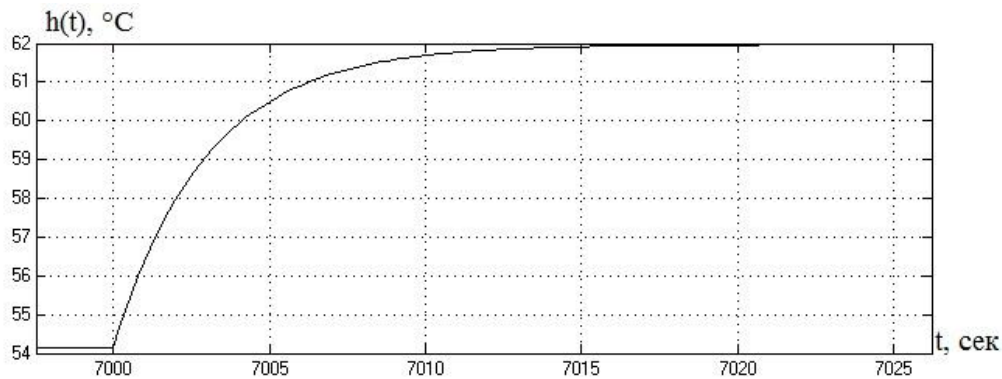


Рис. 6. Крива розгону температури ГВП при збуренні витратою гарячої води з баку

Отже, динаміку температури гарячої води на подачі до користувачів можна описати за допомогою апарату передавальних функцій:

$$T_{ГВП}(s) = \left[ \left( \frac{0,076}{715,9s+1} \cdot \frac{3,32}{17,5s+1} \cdot \frac{1,59}{2,17s+1} \cdot \frac{0,93}{80,6s+1} + \frac{3,8 \cdot 10^{-5}}{80,6s+1} \right) \times Q(s) \cdot \frac{2,5}{s+1} \cdot U(s) + (1-U(s))T_x(s) \right] \frac{0,78}{2,9s+1} e^{-0,2s}, \quad (7)$$

де  $U(s)$  – положення клапана гарячої води,  $Q(s)$  – сонячний тепловий потік,  $T_x(s)$  – температура холодної води,  $T_{ГВП}(s)$  – температура гарячої води на подачі.

Отриману результуючу модель об'єкта керування (7) далі використовуватимемо в процедурі розрахунку налаштування регуляторів.

### 5. Синтез системи автоматичного керування

Дослідимо перехідні процеси в одноконтурній системі керування з ПІ- та ПІД-регулятором з точки зору досягнення мінімальних значень динамічної похибки та часу регулювання (рис. 7).

Обираємо метод розширеної амплітудно-фазової характеристики (РАФХ), що може забезпечити необхідні показники якості системи керування з типовими законами регулювання. Орієнтуємось на результуючий перехідний процес, якому відповідає ступінь затухання  $\psi=0,95$  і, відповідно, кореневий показник коливальності  $m=0,4768$  [15].

Отримаємо ПІ-регулятор з налаштуваннями (8):

$$W_p(s) = 12,596 \left( 1 + \frac{1}{0,64s} \right). \quad (8)$$

Додатково розглянемо експрес-методики для розрахунку налаштувань:

– ПІ-регулятор: методика Thomasson (1997) [16], справедлива у випадку виконання рівності  $\tau_{об} < 0,5$ .

$$W_p(s) = 3,72 \left( 1 + \frac{1}{3s} \right). \quad (9)$$

– ПІД-регулятор: методика Huang and Jeng (2003) [16] орієнтована на minimum IAE та використовується у випадку виконання рівності  $\frac{\tau_{об}}{T_{об}} < 0,33$ :

$$W_p(s) = 14,52 \left( 1 + \frac{1}{2,994s} + 0,09s \right). \quad (10)$$

Зведені в табл. 2 показники якості роботи регуляторів з визначеними по вказаним методикам налаштувань свідчать про можливість використання традиційних структур ПІД-регуляторів для досліджуваного об'єкта.

Якщо модель об'єкта може бути ідентифікована, то можна уникнути процедури налаштування системи керування при використанні регулятора з внутрішньою моделлю (ІМС – internal model control) [17–20].

Принцип керування з використанням внутрішньої моделі базується на твердженні, що керування буде ефективним тоді, коли система в певній мірі включає в себе особливості об'єкту, яким керує. Тобто, якщо регулююча підсистема АСР включає в себе модель об'єкта, то теоретично можлива ідеальна якість керування (відсутність перерегулювання, коливальності процесу, мінімальний час регулювання).

Для досліджуваного об'єкта управління:

$$W_M(s) = \frac{0,78}{2,9s+1} e^{-0,2s} \Rightarrow \Rightarrow W_{M+}(s) = \frac{0,78}{2,9s+1}, W_{M-}(s) = e^{-0,2s}, \quad (11)$$

де  $W_{M-}(s)$  – частина моделі, яка не може бути обернена;  $W_{M+}(s)$  – включається до складу регулятора.

Для зменшення впливу похибок при визначенні моделі та підвищення грубості системи до складу регулятора вводиться фільтр:

$$W_\Phi(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^n}, \quad (12)$$

де  $\lambda$  – настроюваний параметр, обирається шляхом компромісу між швидкодією системи та робастністю (грубістю);  $n$  – порядок фільтра.

Побудуємо перехідні процеси (рис. 9) та порівняємо роботу фільтрів першого і другого порядків для досліджуваного об'єкта при  $\lambda = \tau_{об} = 0,2$  та  $\lambda = 0,5\tau_{об} = 0,1$ . Показники якості з табл. 3 свідчать, що при значенні  $\lambda = 0,1$  можна досягти кращої функціональності системи керування у порівнянні з типовими законами регулювання.

Однак використання фільтру першого порядку спричинює генерацію керуючої дії значної амплітуди,

яка не може бути відпрацьована виконавчим механізмом зі скінченною швидкістю та може стати причиною підвищеної зношуваності компонентів системи. Подолання цього аспекту досягається підбором сталої фільтра або вибором його порядку (рис. 8).

Перехідні процеси зміни температури, що відповідають вказаним керуючим діям регулятора (рис. 8), показують тенденції впливу вибір сталої фільтра та його порядок на технологічну змінну та якість роботи системи в цілому (табл. 3).

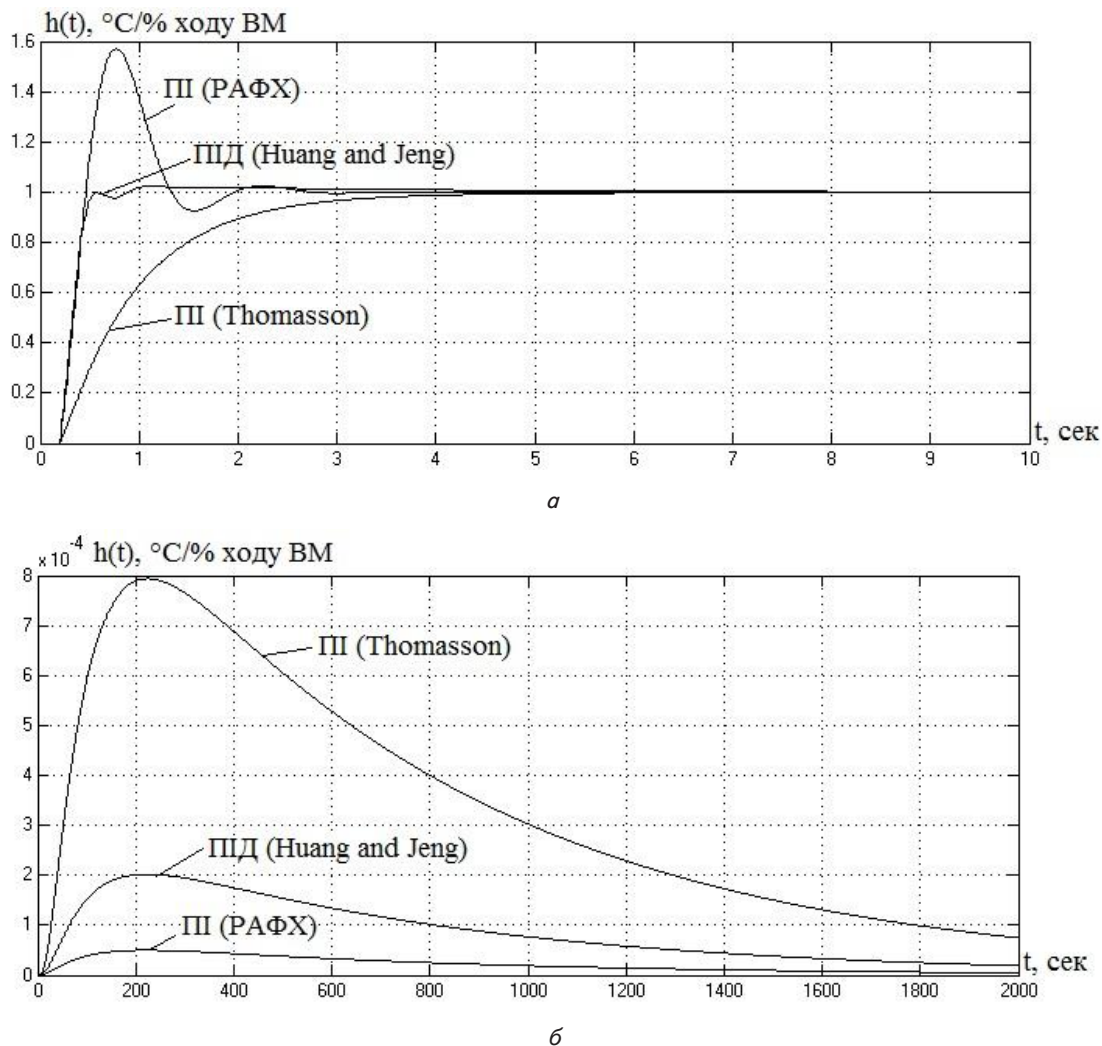


Рис. 7. Перехідні процеси одноконтурної системи регулювання:  
 а – по каналу «завдання-вихід», б – «збурення-вихід»

Таблиця 2

Прямі показники якості перехідних процесів одноконтурної системи регулювання

Показник якості	Завдання-вихід			Збурення-вихід		
	ПІ (РАФХ)	ПІ (Thomasson)	ПІД (Huang and Jeng)	ПІ (РАФХ)	ПІ (Thomasson)	ПІД (Huang and Jeng)
Статична похибка	0	0	0	0	0	0
Динамічна похибка	0,585	0	0,175	0,00005	0,00079	0,0002
Ступінь затухання	0,94	1	0,71	1	1	1
Перерегулювання, %	20,5	0	17,5	0	0	0
Час регулювання	1,85	2,65	1,28	807	801	814

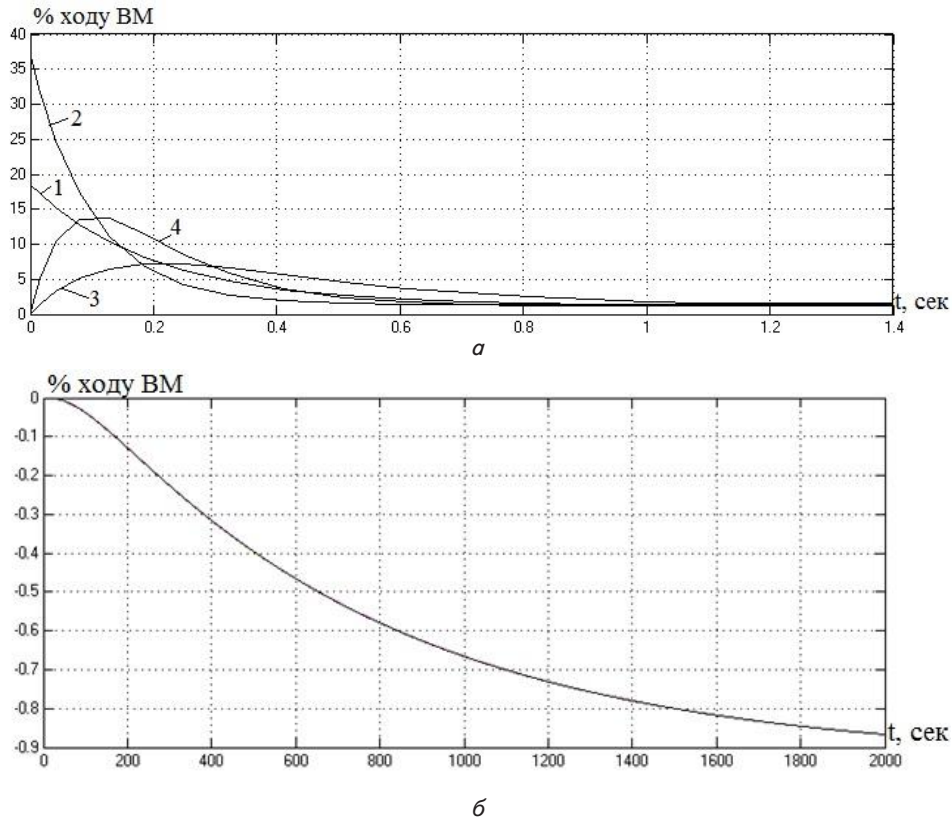


Рис. 8. Хід виконавчого механізму в одноконтурній системі керування з внутрішньою моделлю: 1 – фільтр першого порядку,  $\lambda=0,2$ ; 2 – фільтр першого порядку,  $\lambda=0,1$ ; 3 – фільтр другого порядку,  $\lambda=0,2$ ; 4 – фільтр другого порядку,  $\lambda=0,1$ ; а – по каналу «завдання-вихід»; б – по каналу «збурення-вихід»

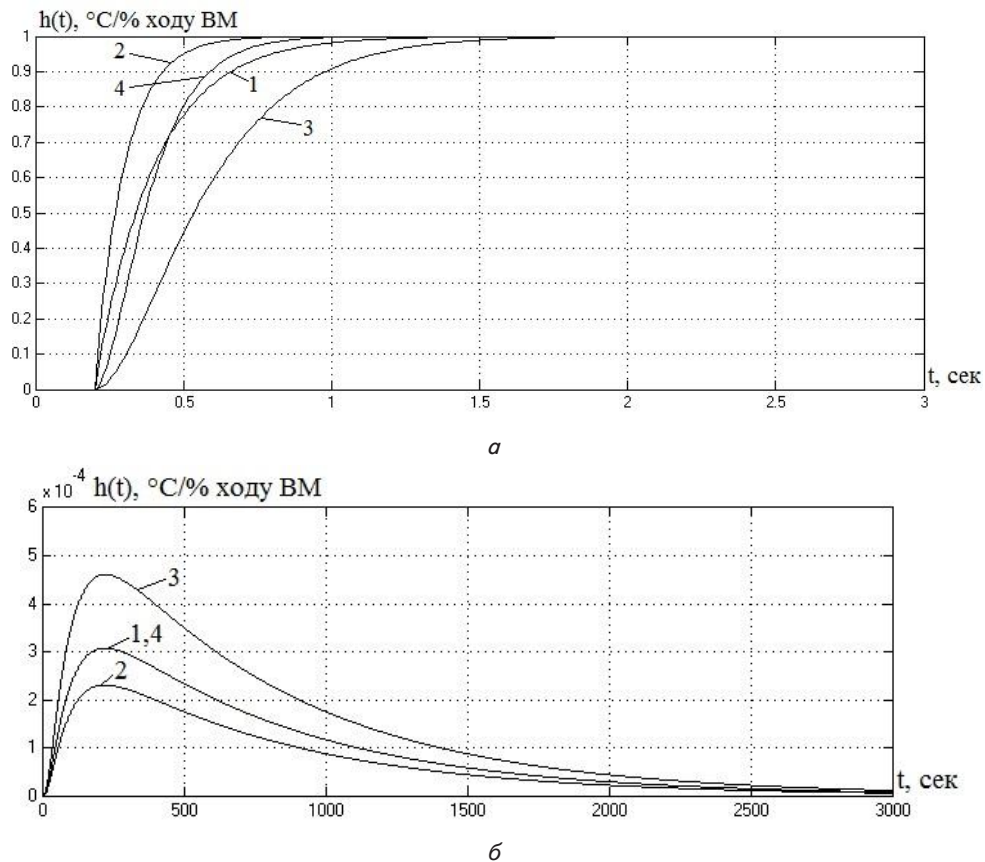


Рис. 9. Перехідні процеси в одноконтурній системі керування з внутрішньою моделлю: 1 – фільтр першого порядку,  $\lambda=0,2$ ; 2 – фільтр першого порядку,  $\lambda=0,1$ ; 3 – фільтр другого порядку,  $\lambda=0,2$ ; 4 – фільтр другого порядку,  $\lambda=0,1$ ; а – по каналу «завдання-вихід»; б – по каналу «збурення-вихід»

Таблиця 3

Прямі показники якості перехідних процесів одноконтурної системи керування з внутрішньою моделлю

Показник якості	Завдання-вихід				Збурення-вихід			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Статична похибка	0	0	0	0	0	0	0	0
Динамічна похибка	0	0	0	0	0,0003	0,00023	0,00046	0,0003
Ступінь затухання	1	1	1	1	1	1	1	1
Перерегулювання, %	0	0	0	0	0	0	0	0
Час регулювання	0,8	0,5	1,18	0,68	814	807	1100	814

Порівняємо значення прямих показників якості одноконтурних систем регулювання з ПІ-, ПІД-регуляторами (табл. 2) та системи регулювання з внутрішньою моделлю (табл. 3). З точки зору висунутих вимог в п. 2 до перехідного процесу можна зробити висновок про їх виконання системою з ІМС: відсутність перерегулювання, мінімальні час регулювання та динамічні закиди. Обираючи оптимальну серед систем з внутрішньою моделлю (рис. 8) необхідно приділити увагу поведінці виконавчого механізму, що вимагає м'якого впливу регулятора.

Отже, одноконтурна система керування при використанні регулятора з внутрішньою моделлю з фільтром другого порядку при  $\lambda=0,1$  має оптимальні перехідні процеси з найменшою амплітудністю роботи регулюючого органу (процес 4 на рис. 8, 9).

#### 6. Обговорення результатів математичного моделювання системи автоматичного керування гарячим водопостачанням

Результати математичного моделювання показують ефективність керування температурою в системі гарячого водопостачання як класичними ПІД-алгоритмами, так і з використанням моделі об'єкта безпосередньо у складі регулятора – підхід ІМС. Відсутність перерегулювання та малий час перехідних процесів у САР з регулятором з внутрішньою моделлю впливає із його структури, в якій по каналу «установка – поточне значення температури води» результуюча передавальна функція близька до  $1(t)$  з поправкою на транспортне запізнювання в інформаційному каналі, тобто динаміка зміни температури схожа на динаміку зміни її завдання.

Тривалість перехідних процесів при зміні завдання в дослідженнях пов'язана з величиною інерційності

виконавчого механізму та давача температури і може варіюватися в значних межах. Тому при розробці системи автоматичного керування варто звертати особливу увагу на вибір технічних засобів та враховувати їх параметри при попередній оцінці динаміки об'єкта. Дослідження впливу порядку фільтра ІМС-регулятора показують, що використання високих порядків більш придатне до практичного використання, так як зменшує інтенсивність руху виконавчого механізму через сповільнення реакції на зміну розузгодження в початковій фазі перехідного процесу.

Зважаючи на детермінованість процедури налаштування по аналітичній моделі система керування може бути доповнена контуром автоналаштування, вихідними даними якої будуть конструкційні та технічні параметри гарячого водопостачання, а результатом роботи – згенерована модель об'єкта, вбудована в структуру регулятора.

#### 7. Висновки

1. Отримана аналітична модель об'єкта керування, в якій відображено вплив потоку сонячного випромінювання та кількісної характеристики отриманого тепла для досягнення значення завдання температури систем опалення та гарячого водопостачання; динаміка впливу описується передавальною функцією, параметри якої залежать від конструктивних та технологічних характеристик установки й географічного місця розташування об'єкта, що впливає на загальну кількість отриманої сонячної енергії.

2. Проведена процедура налаштування регуляторів з ПІ- та ПІД-регуляторами методом РАФХ та експрес-методами, розроблена АСР на основі регулятора з внутрішньою моделлю, що використовує математичний опис ділянки від регулюючого клапана до місця встановлення давача температури гарячої води як модель об'єкта в структурі ІМС-регулятора; інтенсивність сонячного випромінювання, що впливає на температуру в баці-акумуляторі, виступає в ролі зовнішнього збурення. Перевага використання структури регулятора з внутрішньою моделлю полягає у тому, що відома модель об'єкта керування фактично забезпечує якісно налаштовану систему керування без проміжних розрахунків параметрів регулятора.

3. Оптимальні значення критеріїв оцінки серед розглянутих перехідних процесів, а саме мінімальне значення динамічної похибки та часу регулювання, отримані в системі керування на основі регулятора з внутрішньою моделлю, при цьому рекомендується використовувати фільтр другого порядку як такий, що зменшує інтенсивність руху виконавчого механізму при збереженні якості регулювання.

#### Література

1. Комплексна державна програма енергозбереження України. Постанова Кабінету Міністрів України №148 від 5 лютого 1997 року [Текст]. – К., 1997. – 220 с.
2. Бойко, В. С. Аналіз частотного регулювання відцентрових насосів водопостачання з метою енергозбереження [Текст] / В. С. Бойко, В. Г. Неня, М. І. Сотник, С. О. Хованський // Вісник КДПУ імені М. Остроградського. – 2009. – № 4 (57). – С. 168–171.
3. Жовтянський, В. А. Стратегія енергозбереження в Україні: Аналітично-довідкові матеріали в 2-х томах: Загальні засади енергозбереження. Т. 1 [Текст] / В. А. Жовтянського, М. М. Кулика, Б. С. Стогнія. – К.: Академперіодика, 2006. – 510 с.



4. Белоусов, А. В. Оптимизация управления низкотемпературной гелиоустановкой [Текст] / А. В. Белоусов, Ю. А. Кошлич // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2014. – № 14. – С. 1–7.
5. Півняк, Г. Г. Альтернативна енергетика в Україні [Текст]: монографія / Г. Г. Півняк, Ф. П. Шкрабець. – Д.: Національний гірничий університет, 2013. – 109 с.
6. Renewable energy country attractiveness index. Vol. 43 [Text] / B. Warren (Ed.). – Recai, 2015. – 40 p.
7. National solar jobs census 2015 [Text]. – The Solar Foundation's, 2016. – 66 p.
8. Renewable energy coming of age [Text] // The journal of the International Energy Agency. – 2012. – Vol. 2. – P. 44.
9. The solar challenge. ABB review [Text] // The corporate technical journal. – 2015. – Vol. 2. – P. 76.
10. Elmgaard, B. Integration of space heating and hot water supply in low temperature district heating [Text] / B. Elmgaard, T. S. Ommen, M. Markussen, J. Iversen // Energy and Buildings. – 2016. – Vol. 124. – P. 255–264. doi: 10.1016/j.enbuild.2015.09.003
11. Kalogirou, S. A. Solar energy engineering: processes and systems [Text] / S. A. Kalogirou. – Academic Press, 2013. – 760 с.
12. Бекман, У. А. Расчет систем солнечного теплоснабжения [Текст] / У. А. Бекман, С. Клейн, Дж. А. Даффи. – М.: Энергоиздат, 1982. – 79 с.
13. Lof, G. O. G. Cost of house heating with solar energy [Text] / G. O. G. Lof, R. A. Tybout // Solar energy. – 1973. – Vol. 14, Issue 3. – P. 253–278. doi: 10.1016/0038-092x(73)90094-7
14. Тодорцев, Ю. К. Модели элементов установки теплоснабжения как объекта автоматизации [Текст] / Ю. К. Тодорцев, К. В. Беллов, И. Н. Максименко // Автоматика. Автоматизация. Електротехнічні комплекси та системи. – 2005. – № 2. – С. 27–31.
15. Ротач, В. Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами [Текст] / В. Я. Ротач. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 296 с.
16. O'Dwyer, A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules [Text] / A. O'Dwyer. – Imperial College Press, 2000. – 533 p.
17. Arputha, V. S. J. Controller Selection for Flow Process with Dead Time [Text] / V. S. J. Arputha, T. K. Radhakrishnan, S. Sundaram // Sensors & Transducers Magazine. – 2005. – Vol. 62, Issue 12. – P. 473–482.
18. Novak, P. R. Simulation of HVAC Plants in 2 Brazilian Cities Using Matlab/Simulink [Text] / P. R. Novak, N. Mendes, G. H. C. Oliveira // Ninth International IBPSA Conference, 2005.
19. Денисенко, В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. Современные технологии автоматизации [Текст] / В. Денисенко // В записную книжку инженера. – 2007. – № 2. – С. 90–98.
20. Загарий, Г. И. Синтез систем управления на основе критерия максимальной степени устойчивости [Текст] / Г. И. Загарий, А. М. Шубладзе. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 104 с.