

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ**

НАЗАРЕНКО АНДРІЙ ОЛЕГОВИЧ



УДК 681.552.6

**СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕПЛОСПОЖИВАННЯМ БУДІВЕЛЬ З
КОМБІНОВАНИМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯМ І ВИКОРИСТАННЯМ
СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ**

Спеціальність 05.14.01 – енергетичні системи та комплекси

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Інституті технічної теплофізики
Національної академії наук України, м. Київ.

Науковий керівник: член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук,
професор
Бабак Віталій Павлович
Інститут технічної теплофізики НАН України, м. Київ,
завідувач відділу теплометрії, діагностики
та оптимізації в енергетиці.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,
Василенко Сергій Михайлович,
Національний університет харчових технологій
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри теплоенергетики та
холодильної техніки;


доктор технічних наук, професор,
Желих Василь Михайлович
Національний університет «Львівська політехніка»
Міністерства освіти і науки України,
завідувач кафедри теплогазопостачання
та вентиляції.

Захист відбудеться « 26 » квітня 2016 р. о ____ год. на засіданні спеціалізованої
вченої ради К 26.224.02 в Інституті технічної теплофізики НАН України за
адресою: 03057, м. Київ, вул. Желябова, 2а, актовий зал.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту технічної теплофізики
НАН України за адресою: 03057, м. Київ, вул. Желябова, 2а.

Автореферат розіслано « ____ » березня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради К 26.224.02,
кандидат технічних наук



Г.Г. Гелетука

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Теплова енергетика України у XXI столітті опинилася перед необхідністю вирішення проблеми ресурсного забезпечення. Колись найдешевше паливо – природний газ – перейшло до розряду дефіцитних, за песимістичними прогнозами вичерпання його світових запасів прогнозується вже в 2040-2050 роках. Внаслідок цього має місце стійка тенденція зростання вартості природного газу, а відповідно теплової та електричної енергії. Зменшення дефіциту природного газу за рахунок використання традиційних викопних палив також має свої обмеження через зростання вимог до зменшення викидів в атмосферу парникових газів.

Одним з перспективних напрямів розвитку світової енергетики є використання відновлюваних джерел енергії, що знімає ряд обмежень, пов'язаних з використанням традиційних палив.

Відновлювана енергетика сьогодні – одна з галузей світової енергетики, яка найбільш стрімко розвивається. Згідно Директив Європейської комісії до 2020 року частка відновлюваних джерел енергії в ЄС має підвищитись до 20%. При цьому кількість викидів парникових газів має зменшитись щонайменше на 20% (в порівнянні з рівнем 1990 року), а ефективність використання енергії має збільшитись на 20%.

Ще однією проблемою теплоенергетики є неефективне керування теплопостачанням та теплоспоживанням, що призводить до понад 40% втрат теплової енергії. Для підвищення енергоефективності насамперед необхідне впровадження сучасних систем керування теплоспоживанням, диверсифікація джерел постачання енергоносіїв, в тому числі і використання відновлювальних джерел енергії.

Тому, розроблення і вдосконалення методів та засобів оптимізації керування теплоспоживанням з частковим використанням відновлюваних джерел енергії є актуальним науково-прикладним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано у відділі теплометрії, діагностики та оптимізації в енергетиці Інституту технічної теплофізики НАН України та пов'язано з інноваційним проектом НАН України за договором №22 від 02.04.2012 р. (№ДР 0112U001755): „Розробка та впровадження автоматизованого теплового пункту керування теплоспоживанням з сонячними колекторами та акумулятором тепла”.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення енергоефективності будівель за рахунок удосконалення системи керування теплоспоживанням з використанням додаткового джерела відновлюваної енергії (на прикладі сонячної енергії).

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

– провести порівняльний аналіз існуючих теплових систем та видів регулювання, доцільності використання альтернативних джерел енергії, блоків керування та теплообмінників для обґрунтування способу побудови та структури системи керування теплоспоживанням;

– розробити математичну та імітаційну моделі, які описують процес теплообміну в будівлі за умови комбінованого теплопостачання з використання зовнішнього теплоносія та сонячної енергії як в стаціонарному, так і в динамічному режимах;

– експериментально визначити тепловий опір огорожувальних конструкцій та коефіцієнт інфільтрації будівлі для верифікації запропонованої моделі;

– обґрунтувати структуру та дослідити функціонування блоку керування для оптимізації процесу керування теплоспоживанням з урахуванням теплової інерційності будівлі;

– створити експериментальний стенд системи керування теплоспоживанням будівель при комбінованому теплопостачанні з використанням традиційних енергоресурсів і сонячної енергії та провести його дослідження.

Об'єкт дослідження – процес керування теплоспоживанням будівель з комбінованим теплопостачанням та використанням традиційних енергоресурсів і сонячної енергії.

Предмет дослідження – моделі, метод та система керування теплоспоживанням з додатковим теплопостачанням від відновлюваного джерела енергії.

Методи дослідження ґрунтуються на використанні: методів теорії теплообміну, термодинаміки, теплофізики, математичного моделювання, обчислювального та інженерно-фізичного експерименту, теорії вимірювань, теорії ймовірностей та математичної статистики, теорії автоматичного управління.

Наукова новизна одержаних результатів. В роботі вперше:

– розроблено метод керування теплоспоживанням з оптимізацією за мінімальним критерієм, що дає можливість підтримувати задану температуру в будівлі та зменшити витрати теплоти за комбінованого теплопостачання з використанням сонячної енергії;

– розроблено математичну модель системи керування теплоспоживанням будівлі за комбінованого теплопостачання з використанням сонячної енергії, що дозволило провести імітаційне моделювання;

– вирішено обернену задачу визначення коефіцієнтів тепловіддачі на поверхнях огорожувальної конструкції будівлі за результатами експериментальних даних роботи системи та проведено верифікацію її моделі на експериментальному стенді, що в сукупності дозволяє оцінювати теплові характеристики будівель за даними системи;

– запропоновано метод використання сонячної енергії для теплозабезпечення будівель шляхом підмішування теплоносія від акумулятора тепла сонячного колектора у зворотний трубопровід, що дало можливість підвищити ефективність використання енергоресурсів.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні та практичному застосуванні системи керування теплоспоживанням будівель з сонячними колекторами та акумулятором тепла:

– розроблено імітаційну модель системи, на якій проведено дослідження теплообміну в будівлі за умови комбінованого теплопостачання;

- експериментально отримані значення теплового опору огорожувальних конструкцій будівлі в реальних умовах експлуатації;
- створено експериментальний стенд системи керування теплоспоживанням будівель при комбінованому теплопостачанні з використанням традиційних енергоресурсів і сонячної енергії та проведено його дослідження.

Напрацьовані проектні рішення систем керування теплоспоживанням для адміністративних, виробничих та житлових приміщень використано для розроблення, виготовлення та впровадження в: корпусі №1 ІТТФ НАН України (акт впровадження від 01.10.2011 р.); корпусі №7 ІТТФ НАН України при комбінованому теплопостачанні з використанням традиційних енергоресурсів і сонячної енергії (акт впровадження від 10.12.2012 р.); будівлі з гідророзподільувачем в ДП ВО «Київприлад» (акт впровадження від 02.02.2013 р.); житловому будинку в с. Тарасівка Київської обл. при комбінованому теплопостачанні з використанням природного газу та електроенергії (акт впровадження від 01.10.2009 р.); будівлі ДП «НТЦ новітніх технологій НАН України» (акт впровадження від 01.12.2013 р.).

Особистий внесок здобувача.

Всі наукові положення та результати роботи, які винесено на захист, належать автору особисто. В опублікованих колективних працях здобувачеві особисто належить: [2] – удосконалено метод використання сонячної енергії в системі опалення будівель; [4,5,7,8] – проведено аналіз експериментальних даних впроваджених систем; [6, 10] – розроблено математичну модель системи керування теплоспоживанням будівлі при комбінованому теплопостачанні з використанням сонячної енергії; [9] – встановлено закономірності регулювання температури теплоносія у системах теплоспоживання в залежності від температури зовнішнього середовища з урахуванням мінімаксного критерію; [10] – вирішено обернену задачу визначення середньоінтегрального теплового опору будівлі та досліджено динаміку зміни коефіцієнтів теплопередачі та середньоінтегрального теплового опору огорожувальної конструкції в залежності від параметрів зовнішнього середовища.

Апробація результатів дисертації. Основні результати за тематикою дисертаційної роботи оприлюднювались та обговорювались на 6 конференціях, а саме: IX Міжнародній конференції «Проблеми промислової теплотехніки», 20-22 жовтня 2015 р., м. Київ; Міжнародній науково-практичній конференції «NDT DAYS 2013», м. Созополь, Болгарія, 17-21 червня 2013 р.; II Міжнародній науково-технічній конференції «Метрологія, інформаційно-вимірювальні технології та системи», м. Одеса, 30 травня 2013 р.; VII Національній науково-технічній конференції «Неруйнівний контроль і технічна діагностика», м. Київ, 20-23 листопада 2012 р.; XX Міжнародній конференції «Сучасні методи та засоби неруйнівного контролю та технічної діагностики», м. Гурзуф, 1-5 жовтня 2012 р.; The Fifth World Congress «Aviation in the XXI-st Century», «Safety in Aviation and Space Technologies», Kyiv, 25-27 September 2012.

Публікації. Основні положення та результати дисертаційної роботи викладено в 13 наукових працях, у тому числі: 4 публікації в наукових журналах, що входять до переліку фахових видань, 2 статті у виданнях, які включено до міжнародних

наукометричних баз, 5 статей у збірниках матеріалів і тез конференцій, отримано 1 патент України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 92 найменувань та додатків. Загальний обсяг роботи становить 185 сторінок, у тому числі 145 сторінки основного тексту, 106 рисунків, 8 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання наукових досліджень, викладено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено дані про зв'язок роботи з науковими програмами, апробацію результатів роботи, впровадження та публікації.

У **першому розділі** проведено порівняльний аналіз методів та засобів керування теплоспоживанням та визначено, що схемотехнічні рішення при проектуванні систем керування теплоспоживанням (надалі систем) залежать від характеристик об'єкта, технічних умов теплозабезпечення, метеофакторів тощо.

Проаналізовано існуючі засоби керування теплоспоживанням, виявлено низку недоліків та обмежень, на підставі чого було запропоновано розширений перелік функцій, які забезпечать ефективне керування теплоспоживанням, а саме:

- використання різних законів регулювання в залежності від об'єктів теплоспоживання;
- використання не тільки типових метеозалежних графіків, а й можливість їх коригування з урахуванням особливостей об'єктів теплоспоживання;
- розширення можливостей корекції теплового графіку залежно від часу доби, дня тижня, вихідних тощо;
- можливість введення додатково функції лічильника теплової енергії;
- використання мінімаксного критерію регулювання теплоспоживанням для підтримання заданої температури в приміщеннях за умови мінімізації споживання теплової енергії від мережі централізованого теплопостачання, підтримання мінімально допустимої температури під час відсутності людей у приміщеннях тощо;
- зменшення витрати теплоти від мережі централізованого теплопостачання за рахунок використанням сонячної енергії.

Проаналізовано методи підвищення ефективності систем за рахунок регулювання теплових навантажень та використання альтернативних джерел енергії.

Розглянуто принципи та способи використання сонячної енергії в системах опалення. Проведено порівняльний аналіз сучасних сонячних колекторів та обґрунтовано вибір основних параметрів геліоустановки для широти м. Києва. Показано доцільність використання плоских сонячних колекторів за співвідношенням ціна – ефективність.

За результатами проведеного аналізу сформульовано мету та завдання дослідження, намічено шляхи розробки та оптимізації систем керування теплоспоживанням будівель, напрями подальшого вдосконалення засобів керування режимами теплоспоживання.

У другому розділі розроблено математичні моделі систем керування теплоспоживанням при комбінованому теплопостачанні з використанням традиційних енергоресурсів та сонячної енергії в стаціонарному та динамічному режимах.

Обґрунтовано конфігурацію теплової схеми функціонування системи з використанням сонячної енергії, яку наведено на рис. 1.

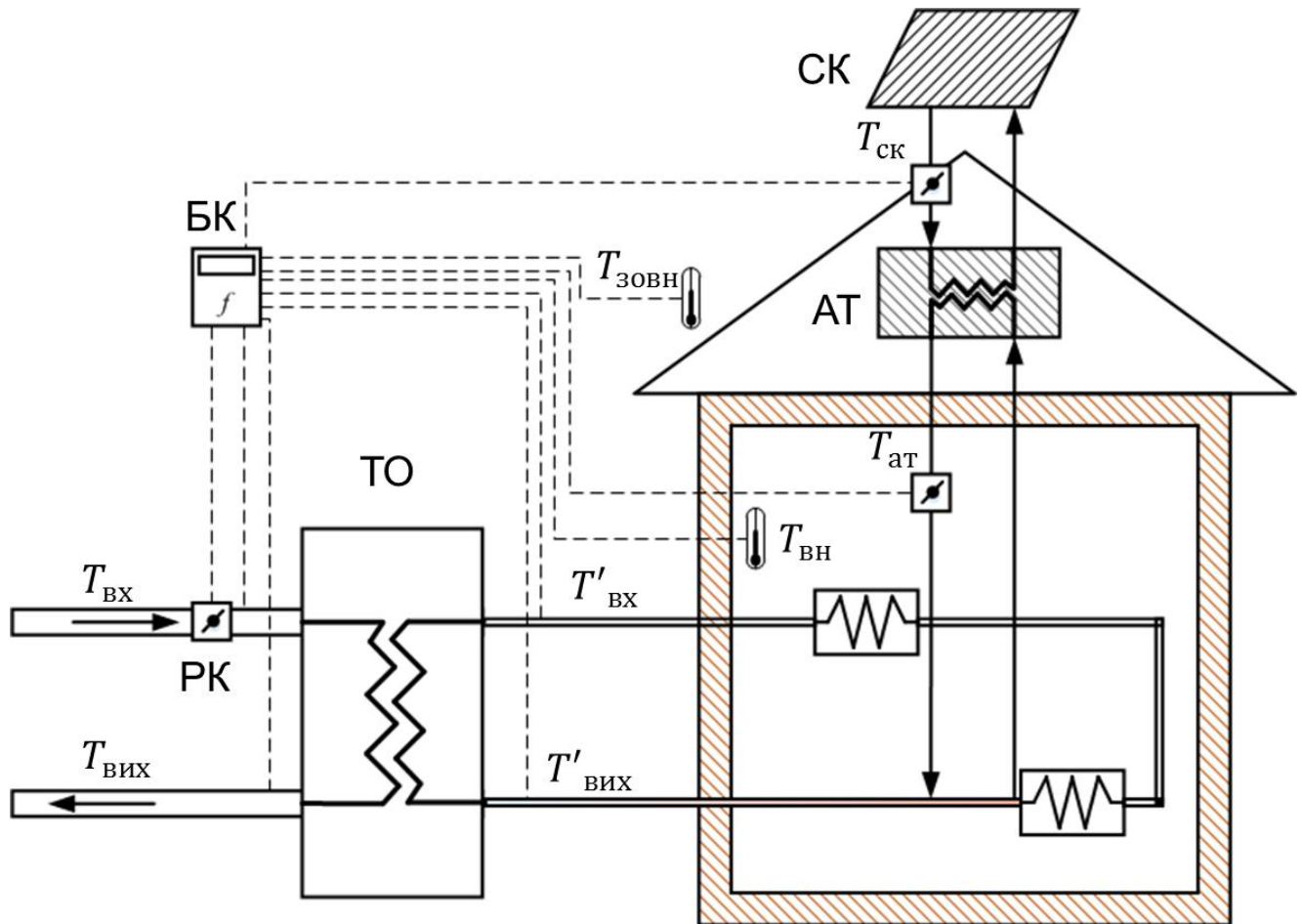


Рис. 1. Теплова схема функціонування системи з використанням сонячної енергії:
 T , $T_{\text{ВИХ}}$, $T'_{\text{ВХ}}$, $T'_{\text{ВИХ}}$ – вхідна та вихідна температури теплоносія у первинному та вторинному контурах системи; $T_{\text{АТ}}$, $T_{\text{СК}}$ – температура в акумуляторі тепла та сонячному колекторі; $T_{\text{ВН}}$, $T_{\text{ЗОВН}}$ – внутрішня та зовнішня температура повітря; РК – регулюючий електромагнітний клапан; БК – блок керування; ТО – теплообмінник; СК – сонячний колектор; АТ – акумулятор тепла

Для стаціонарного режиму роботи основними рівняннями, які визначають вигляд математичної моделі, є рівняння теплових балансів теплоносія:

– в первинному контурі

$$Q = G \cdot c_B \cdot (T_{\text{ВХ}} - T_{\text{ВИХ}}), \quad (1)$$

– у вторинному контурі

$$Q' = G' \cdot c_B \cdot (T'_{\text{ВХ}} - T'_{\text{ВИХ}}) - q_{\text{СК}} \cdot S_{\text{СК}}, \quad (2)$$

де Q, Q' – тепловий потік теплоносія з котельні та у внутрішньому контурі будівлі, G, G' – витрати теплоносія у первинному та вторинному контурах, c_B – теплоємність води, $q_{СК}$ – середній добовий сонячний тепловий потік за опалювальний сезон, $S_{СК}$ – площа сонячних колекторів.

Показано, що теплові потоки (1) та (2) відрізняються на величину теплових втрат із зовнішніх поверхонь теплообмінника в навколишнє середовище. Експериментально встановлено, що для подальших досліджень величиною цих втрат можна знехтувати.

Це дозволило одержати первинне рівняння якісного регулювання роботи системи з використанням сонячної енергії:

$$G \cdot c_B \cdot (T_{ВХ} - T_{ВІХ}) / S_{\Sigma} = T_{ВН} - T_{ЗОВН} / R_0 + Q_{ВЕНТ} / S_{\Sigma} - q_{СК} \cdot S_{СК} / S_{\Sigma}, \quad (3)$$

де S_{Σ} – площа огорожувальної конструкції, R_0 – питомий тепловий опір огороження, $Q_{ВЕНТ}$ – тепловий потік на компенсацію тепловтрат при повітрообміні, $Q_{ВЕНТ} = m \cdot \rho \cdot c_{П} \cdot V \cdot (T_{ВН} - T_{ЗОВН})$, m – коефіцієнт кратності вентиляції будівлі; ρ – густина повітря; $c_{П}$ – теплоємність повітря; V – об'єм приміщень будівлі.

Параметром регулювання, що забезпечує заданий тепловий режим приміщення, обрано величину витрати теплоносія, що дало можливість записати рівняння управління системи:

$$G = [(T_{ВН} - T_{ЗОВН}) \cdot S_{\Sigma} / R_0 + \rho \cdot c_{П} \cdot V \cdot m - q_{СК} \cdot S_{СК}] / [c_B \cdot (T_{ВХ} - T_{ВІХ})] \quad (4)$$

Математичну модель в динамічному режимі реалізовано методом електричної аналогії (рис. 2). Електричні напруги та струми в запропонованій моделі відповідають температурі та тепловому потоку, а опори та конденсатори – термічним опорам та теплоємності. Джерела напруги імітують джерела теплоти заданої температури.

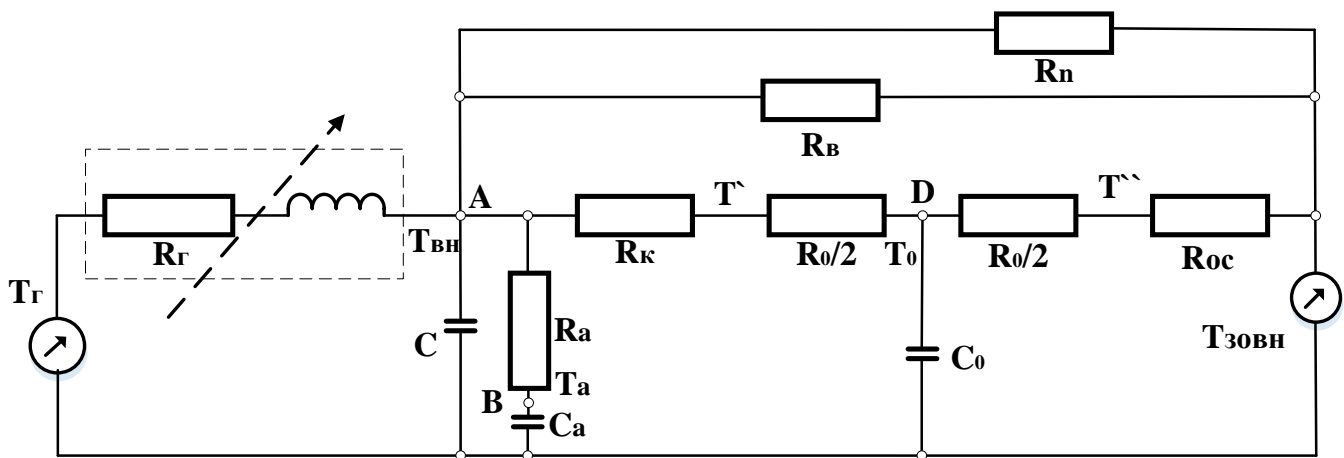


Рис. 2. Еквівалентна схема системи теплоспоживання

Для вузлів А, В, Д еквівалентної схеми (рис. 2) отримано диференціальні рівняння балансу теплових потоків:

$$C \frac{dT_{\text{ВН}}}{d\tau} = \frac{T_{\Gamma} - T_{\text{ВН}}}{R_{\Gamma}} - \frac{T_{\text{ВН}} - T_0}{R_{\text{К}} + \frac{R_0}{2}} - \frac{T_{\text{ВН}} - T_a}{R_a} - \frac{T_{\text{ВН}} - T_{\text{ЗОВН}}}{R_{\text{В}}} - \frac{T_{\text{ВН}} - T_{\text{ЗОВН}}}{R_{\Pi}}, \quad (5)$$

$$C_a \frac{dT_a}{d\tau} = \frac{T_{\text{ВН}} - T_a}{R_a}, \quad (6)$$

$$C_0 \frac{dT_0}{d\tau} = \frac{T_{\text{ВН}} - T_0}{R_{\text{К}} + \frac{R_0}{2}} - \frac{T_0 - T_{\text{ЗОВН}}}{R_{\text{ОС}} + \frac{R_0}{2}}, \quad (7)$$

де C, C_a, C_0 – теплоємність внутрішнього повітря, внутрішніх акумуляторів, огороження відповідно, T_{Γ} – температура на вході опалювального пристрою, T_0 – середня температура огорожувальної конструкції, T_a – температура внутрішніх акумуляторів, R_{Γ} – тепловий опір опалювального приладу, $R_{\text{К}}, R_{\text{ОС}}$ – конвективні опори теплообміну, R_a – тепловий опір конвективного теплообміну між внутрішнім повітрям та внутрішніми акумуляторами, $R_{\text{В}}$ – еквівалентний тепловий опір системи вентиляції, R_{Π} – тепловий опір віконних та дверних отворів, τ – час.

В результаті перетворень отримано:

$$\frac{dT_{\text{ВН}}}{d\tau} = \frac{g_{\text{К}}^*}{g^*} \cdot g_{\Gamma} \cdot T_{\Gamma} - \left(g_{\text{К}}^* + g_{\text{ОС}}^* - \frac{1}{g^*} \right) T_0 + \left(\frac{g_{\text{К}}^*}{g^*} \cdot g_{\text{ВП}} + g_{\text{ОС}}^* \right) \cdot T_{\text{ЗОВН}} \quad (8)$$

$$T_{\text{ВН}} = (g_{\Gamma} \cdot T_{\Gamma} + g_{\text{К}}^* \cdot T_0 + g_{\text{ВП}} \cdot T_{\text{ЗОВН}}) / g^* \quad (9)$$

де $g_{\text{К}}^* = (r_{\text{К}} + 0,5)^{-1}$, $g^* = g_{\text{К}}^* + g_{\Gamma} + g_{\text{ВП}}$, $g_{\text{ОС}}^* = (r_{\text{ОС}} + 0,5)^{-1}$, $g_{\Gamma} = r_{\Gamma}^{-1}$, $g_{\text{ВП}} = r_{\text{ВП}}^{-1}$, $r_{\text{К}} = R_{\text{К}}/R_0$, $r_{\text{ОС}} = R_{\text{ОС}}/R_0$, $r_{\Gamma} = R_{\Gamma}/R_0$, $r_{\text{ВП}} = R_{\text{ВП}}/R_0$, $R_0 = H_0/\lambda_0 \cdot F_0$, H_0 – товщина поверхні огорожувальної конструкції, λ_0 – коефіцієнт теплопровідності, F_0 – площа поверхні огороження, $R_{\text{К}} = 1/\alpha_{\text{СТВН}} \cdot F_{\text{ОС}}$, $\alpha_{\text{СТВН}}$ – коефіцієнт конвективного теплообміну на внутрішній поверхні стіни, $R_{\text{ОС}} = 1/\alpha_{\text{СТЗОВН}} \cdot F_{\text{ОС}}$, $\alpha_{\text{СТЗОВН}}$ – коефіцієнт конвективного теплообміну на зовнішній поверхні стіни, $F_{\text{ОС}}$ – площа поверхні стіни, $R_{\Gamma}(g) = 1/\alpha_{\Gamma} \cdot F_{\Gamma} \cdot \varphi(g)$, $\varphi(g) = g \cdot (1 - e^{-1/g})$, $g = G \cdot c_{\Gamma}/\alpha_{\Gamma} \cdot F_{\Gamma}$, c_{Γ} – теплоємність теплоносія, α_{Γ} – коефіцієнт конвективного теплообміну опалювального пристрою, F_{Γ} – площа поверхні опалювального пристрою, $R_{\Pi} = 1/\alpha_{\Pi} \cdot F_{\Pi}$, α_{Π} – коефіцієнт конвективного теплообміну вікон, F_{Π} – площа поверхні вікон, $R_{\text{В}} = 1/G_{\text{В}} \cdot c_{\text{В}}$, $c_{\text{В}}$ – середня ізобарна теплоємність повітря в температурному діапазоні $[T_{\text{ЗОВН}}, T_{\text{ВН}}]$, $G_{\text{В}}$ – витрата повітря, $G_{\text{В}} = V \cdot \rho \cdot m/3600$, V – об'єм будівлі, ρ – середня густина повітря в температурному діапазоні $[T_{\text{ЗОВН}}, T_{\text{ВН}}]$, $m = 353/[73 + 0,5(T_{\text{ВН}} - T_{\text{ЗОВН}})]$.

Рівняння (8) вирішено методом Бернуллі:

$$T_{\text{вн}}(\tau) = (a \cdot T_{\Gamma} + f \cdot T_{\text{зовн}})/b + (a \cdot T_{\Gamma} + f \cdot T_{\text{зовн}}) \cdot e^{-b \cdot \tau}/b \quad (10)$$

Показано, що для забезпечення контурів системи від гідравлічних ударів та збурень важливим є аналіз стійкості та якості системи керування, який проведено з використанням математичної моделі системи (10).

Використано два методи для аналізу стійкості: шляхом визначення положення полюсів передаточної функції на комплексній площині та побудови імпульсної перехідної характеристики. Основними інформативними параметрами для аналізу використанні a та b .

Властивості комплексної передаточної функції $z(a,b)$ визначено положенням нуля ($z_0(a,b)$) та полюсів ($z_{\Pi}(a,b)$), ($z_{\Pi}^*(a,b)$). Знайдено відповідність між положеннями цих точок на z -площині (рис. 3) і параметрами (a, b).

Оскільки z_0 може бути тільки дійсним числом, то для будь-яких a, b нулі лежать на дійсній осі x :

якщо $a < b$, то $-\infty < x_0 < 0$;

якщо $a = b$, то $x_0 = 0$;

якщо $a > b$, то $0 < x_0$.

Проаналізовано стійкість за критерієм Рауса-Гурвіца. Цей критерій накладає обмеження на коефіцієнти характеристичного полінома:

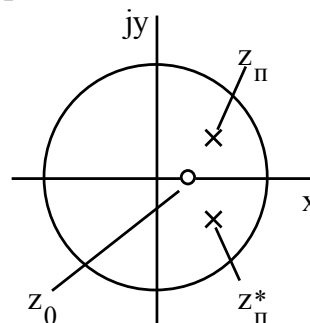


Рис. 3. Положення нуля і полюсів на z -площині

$$b_0 z^2 + b_1 z + b_2 = 0: b_0 + b_1 + b_2 > 0, b_0 - b_1 + b_2 > 0, b_0 - b_2 > 0 \quad (11)$$

Система є стійкою в області $0 < a < 1, 0 \leq b < 1$.

Швидкодію системи описано імпульсною перехідною характеристикою, функція $g(\tau)$ – реакція на вплив у вигляді короткого імпульсу одиничної площини. Досліджено імпульсну перехідну характеристику в залежності від їх параметрів (a, b) (рис. 4, 5).

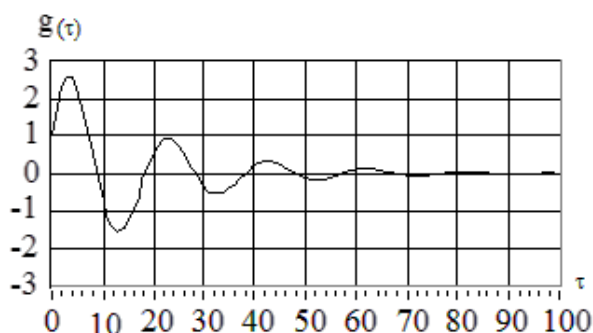


Рис. 4. Імпульсна характеристика – коливальний процес

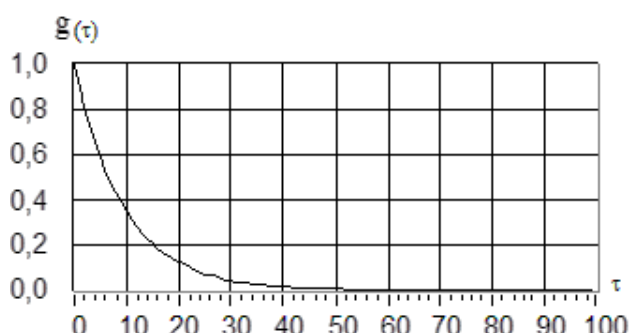


Рис. 5. Імпульсна характеристика - аперіодичний процес

В результаті моделювання встановлено, що динамічна модель системи при заданих нормованих параметрах є стійкою та дає похибку в межах 6 дБ та підібрано параметри, при яких система вчасно реагує на зміни метеоумов та вхідних даних.

Верифікацію математичної моделі (10) здійснено шляхом експериментального дослідження теплових характеристик будівлі з комбінованим теплопостачанням і використанням сонячної енергії.

Розв'язано обернену задачу визначення коефіцієнтів тепловіддачі на поверхнях огорожувальної конструкції будівлі за результатами експериментальних даних роботи системи. Уточнено дані про величини коефіцієнтів теплового опору елементів огороження (рис. 6).

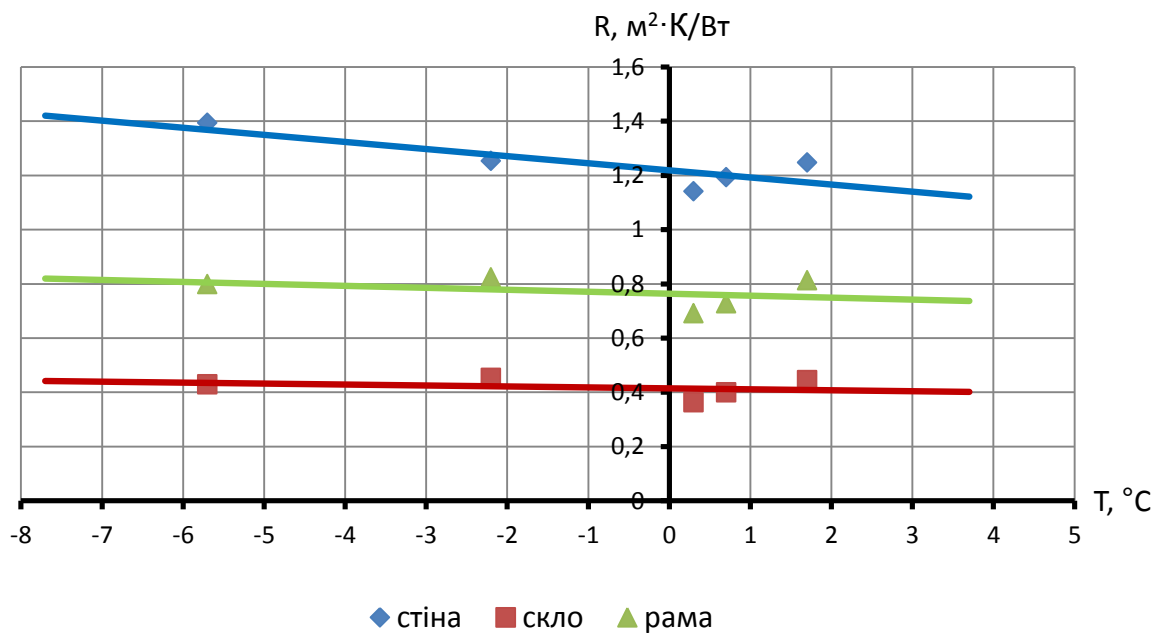


Рис. 6. Залежність коефіцієнтів теплового опору елементів огороження від температури зовнішнього середовища

Уточнено коефіцієнт кратності вентиляції будівлі (рис. 7).

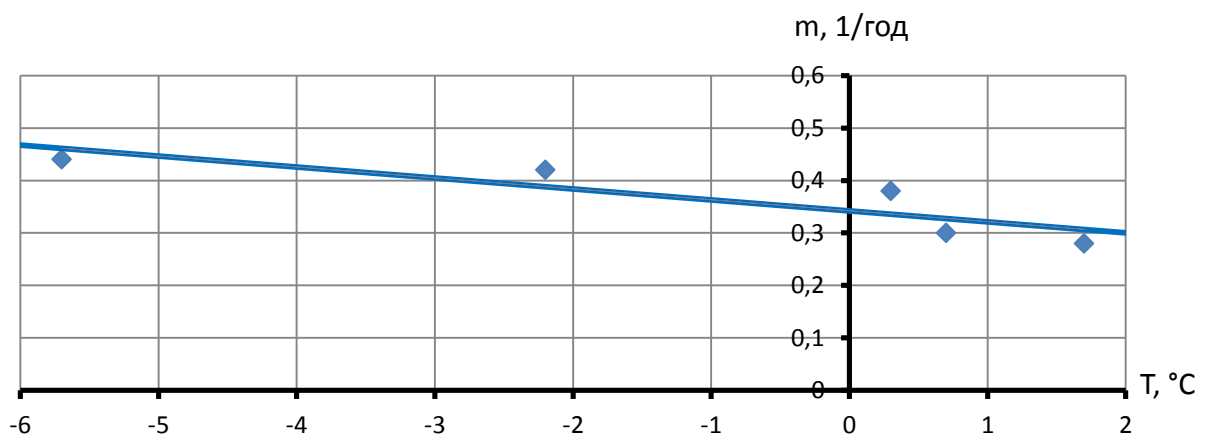


Рис. 7. Залежність коефіцієнтів кратності вентиляції будівлі від температури зовнішнього середовища

За експериментальними даними побудовано залежність коефіцієнта тепловіддачі на внутрішніх та зовнішніх поверхнях елементів огорожувальної конструкції будівлі від температури зовнішнього середовища (рис. 8).

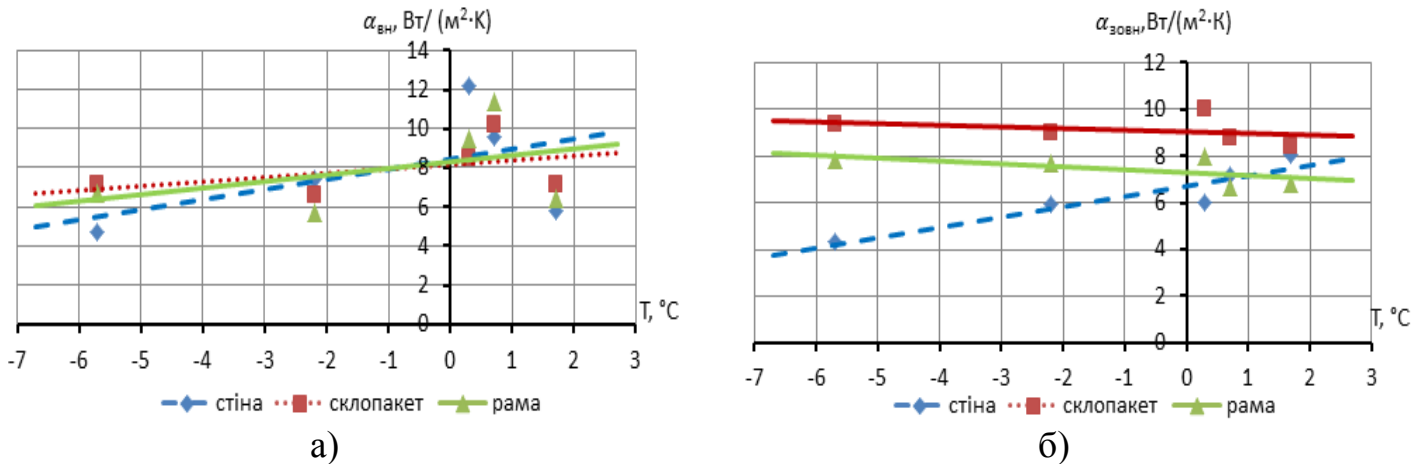


Рис. 8. Залежність коефіцієнтів тепловіддачі внутрішньої (а) та зовнішньої (б) поверхні огорожувальних конструкцій будівель від температури зовнішнього середовища

Проведене порівняння експериментальних досліджень та моделювання з використанням системи MathCad (рис. 9) підтверджує прийнятну збіжність одержаних результатів.

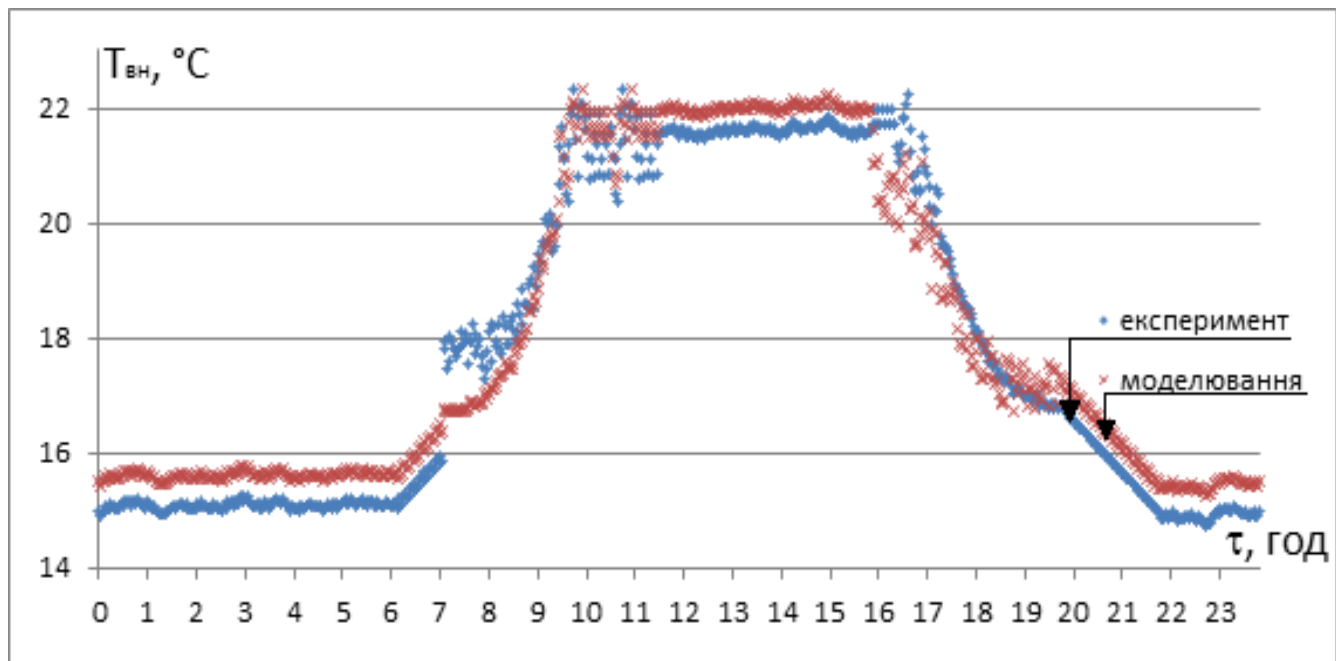


Рис. 9 Зміна температури повітря в приміщенні при зміні режиму керування

Експериментально визначено діапазон часу виходу системи на заданий режим, при якому забезпечується захист від гідравлічних ударів, який коливається від 2 до 5 годин.

В третьому розділі проведено порівняння методів регулювання систем. Перевагу надано регулюванню за збуренням, оскільки воно проводиться за

основними визначальними режимами теплоспоживання споруд (температура зовнішнього повітря, швидкість вітру, сонячна радіація). Вплив локальних, випадкових факторів на температуру повітря в тому або іншому приміщенні на процес керування не враховується.

При керуванні за збуренням система має кращі динамічні властивості в порівнянні з іншими методами, бо до контуру регулювання не входить опалюване приміщення. При цьому регулятор починає виконувати свою функцію ще до того, як збурюючий вплив проникне в опалювану будівлю і викликає в ній відхилення величини, яка регулюється (температура повітря), від заданого значення. Схема керування за збуренням передбачає наявність зворотного зв'язку за параметром теплоносія в тепловому пункті. Система керування є частково замкнутою (за регулюючим параметром), і до її контуру включається джерело теплоти, теплові мережі і система опалення зі встановленим сенсором температури на зворотному трубопроводі. Таким чином виключається вплив випадкових відхилень режиму роботи теплової мережі на тепловий режим будівлі.

Запропоновано в блоці керування системи реалізувати функцію використання двох способів регулювання, оскільки ПІД регулювання є ефективним, але не завжди доцільним через складнощі в розрахунку його коефіцієнтів

Розроблено алгоритм роботи блоку керування (БК) системи з сонячними колекторами (рис. 10) та його функціональну схему (рис. 11).

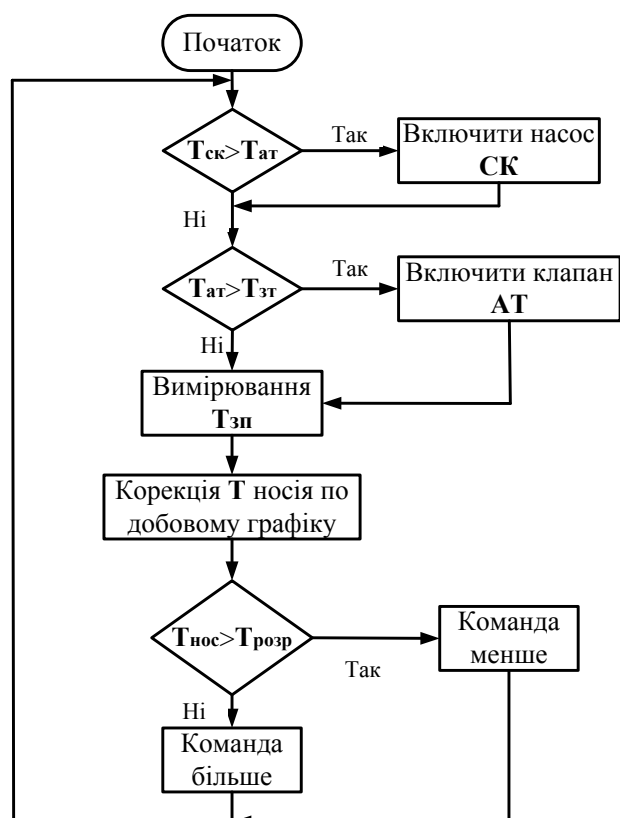


Рис. 10. Алгоритм роботи БК з сонячними колекторами

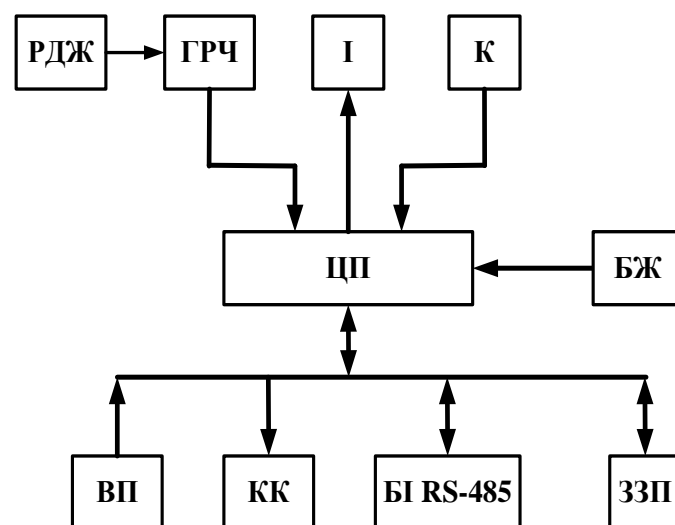


Рис. 11. Функціональна схема БК системи: ЦП - центральний процесор, ГРЧ – годинник реального часу, І – індикатор, К – клавіатура, РДЖ – резервне джерело живлення, БЖ – блок живлення, ВП – вхідні перетворювачі, КК – ключі керування, БІ RS-485 – блок інтерфейсу, ЗЗП – зовнішня пам'ять

Згідно з функціональною схемою та алгоритмом роботи розроблено блок керування в якому реалізовано два закони регулювання – дискретно імпульсний та ПД, який має наступні переваги:

- наявність 2 + 1 незалежних каналів зв'язку по стандартному протоколу RS485;
- контроль вхідних та вихідних параметрів (тиск, температура); автоматичне регулювання системи опалення за заданим алгоритмом роботи для підтримання комфортних умов;
- захист від заморожування системи теплопостачання при аваріях на теплотрасах;
- погодну компенсацію, встановлення добових або інших індивідуальних режимів подачі тепла;
- автоматичне та ручне коригування опалювального графіка;
- сигналізацію аварійного стану з повідомленням на диспетчерський пункт;
- архівування даних на період 1 місяць з можливістю відображення у вигляді графіків; некомерційний облік (оформлюються документи для дозволу на комерційний);
- вибір одного з двох законів регулювання;
- регулювання комбінованим теплопостачанням;
- визначення часу виходу системи на заданий режим.

Регулювання температури теплоносія в контурі опалення проводиться за розрахованим регулятором значенням $T_{розр} = f(T_{вх})$ та обчислюється за температурою зовнішнього повітря та встановленим температурним графіком.

Параметри графіка задаються спеціалістом при налагоджуванні регулятора, виходячи з експлуатаційних характеристик системи опалення, теплової конструкції будівлі та вимог до температурного режиму всередині приміщення. Робочі параметри, задані при налагоджуванні регулятора, заносяться у вбудовану енергонезалежну пам'ять і зберігаються протягом терміну експлуатації, в тому числі і при знеструмленні регулятора. Ця функція дозволяє уникнути «перегріву» приміщення внаслідок зміни погодних умов і неоперативного реагування.

Температура теплоносія в контурі опалення корегується на коефіцієнт K за часом доби, робочими або вихідними днями, та обчислюється за формулою:

$$T_{зад} = T_{розр}(1 + K/100) \quad (12)$$

Коефіцієнт K задається через меню для різних періодів доби (максимум вісім) та може змінюватись від -50% до +50% з дискретністю 5%.

Для вихідних та робочих днів задаються свої годинно-температурні графіки. В адміністративних будівлях зазвичай встановлюються вихідними всі суботи, неділі та святкові дні. При необхідності через меню можна скоригувати встановлені параметри. Це дозволяє зменшувати температуру в приміщеннях в період відсутності людей та досягти економії енергоресурсів.

Розроблено алгоритм керування теплоспоживанням з оптимізацією процесу регулювання за мінімаксним критерієм, який дозволив не тільки використання

мінімального споживання енергії для підтримання комфортної температури в приміщеннях при знаходженні там людей, а й підтримання мінімально допустимої температури під час їх відсутності в залежності як від зовнішньої температури, так і, що важливо, від максимального потенціалу енергії зовнішнього централізованого тепlopостачання та від сонячних колекторів (рис. 12).

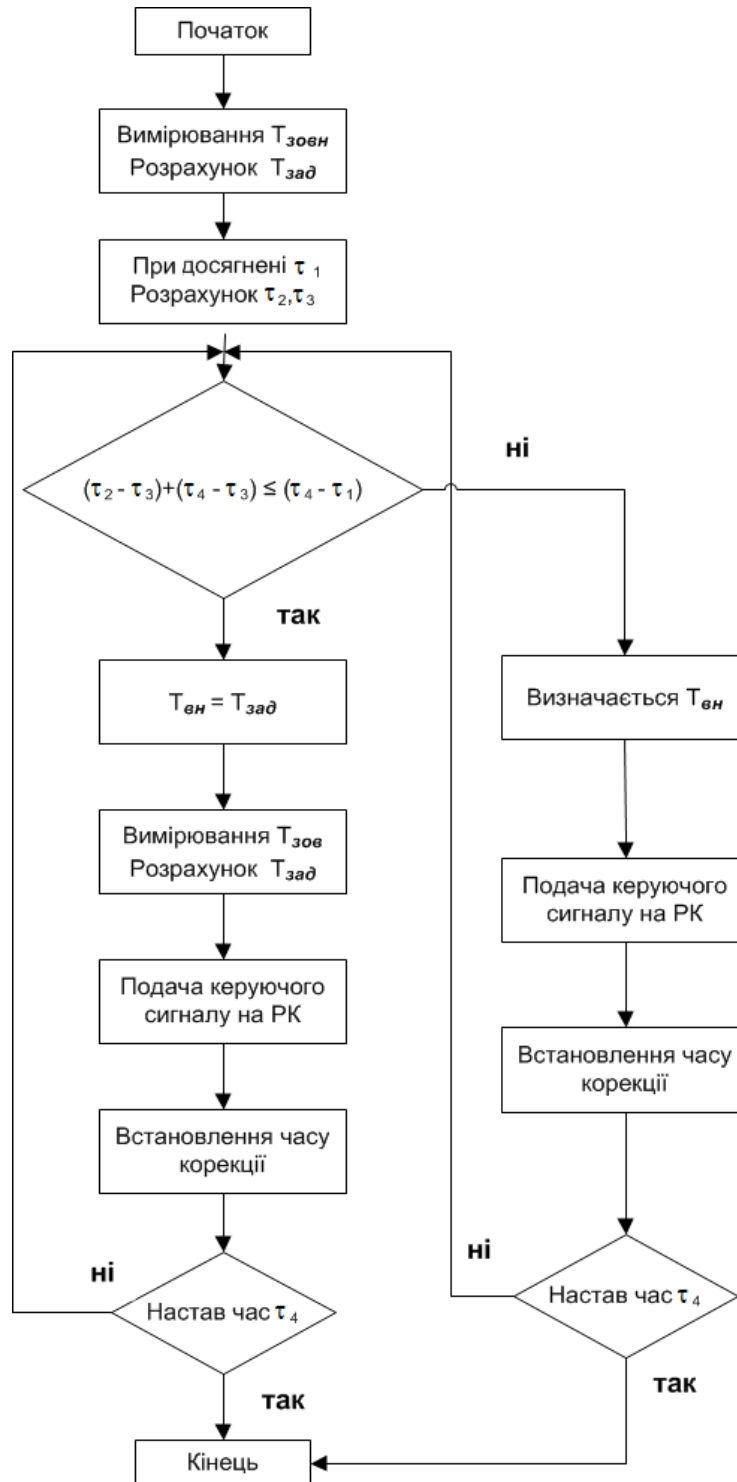


Рис. 12. Алгоритм роботи блоку керування за мінімаксімним критерієм

Розроблено програмне забезпечення блоку керування, яке включає наступні операції: вимірювання значень температури, розрахунок заданої температури,

розрахунок кількості теплоти та температури теплоносія, пошуку святкових та не робочих днів в базі, сканування датчиків температур, опрацювання внутрішніх сигналів програми, опрацювання даних по інтерфейсу MODBUS, записування даних на картку пам'яті.

У четвертому розділі наведені результати експериментальних досліджень та описані схеми розроблених та впроваджених систем керування теплоспоживанням, а саме: з комбінованим теплопостачанням і використанням сонячної енергії, з пластинчастим теплообмінником, з гідророзподільником, з експериментальним кожухотрубним теплообмінником «ТГК-350», з газовими та електрокотлами тощо. Залежно від технічних умов теплопостачання об'єкту вибирається відповідне обладнання системи, включно з теплообмінниками, яке відповідає максимальній енергоефективності роботи об'єкту теплоспоживання.

Вибір схеми підключення до теплової мережі, як правило, пов'язаний з гідравлічними характеристиками самої мережі. Так при низькому перепаді тиску між прямим і зворотнім трубопроводом подаючої тепломережі, використання теплообмінника (незалежна схема) є неможливим через значне падіння тиску на ньому.

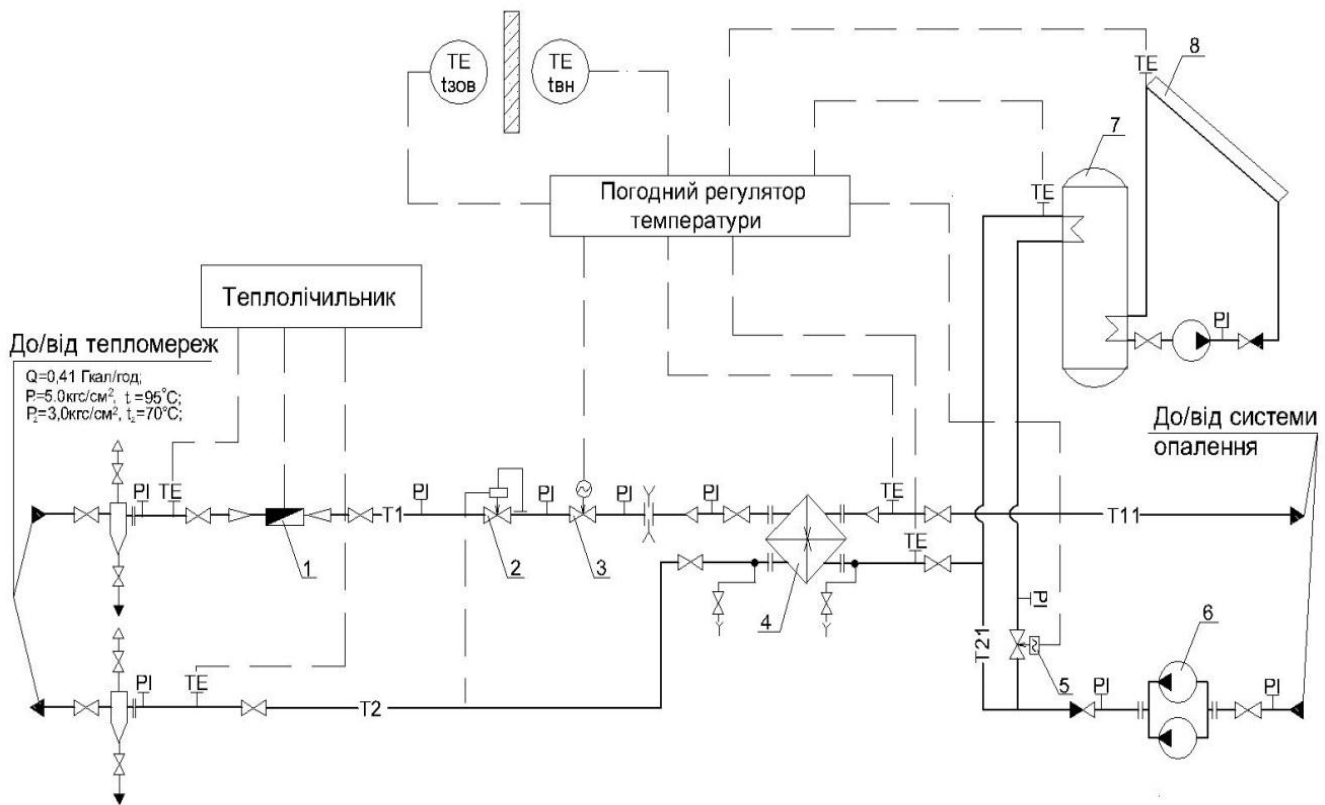


Рис. 13. Схема системи при комбінованому теплопостачанні з використанням традиційних енергоресурсів і сонячної енергії: 1 - витратомір, 2 - регулятор перепаду тиску, 3 - регулюючий клапан, 4 - теплообмінник, 5 - запірний клапан, 6 - циркуляційні насоси, 7 - бак акумулятора, 8 - сонячний колектор, TE- датчики температури, PI- манометри.

Для реалізації системи з комбінованим теплопостачанням і використанням сонячної енергії (рис. 13) розраховано геліоустановки для часткового заміщення витрат на опалення будівлі. Показано, що розрахунок сонячних установок включає

визначення наявної кількості сонячної енергії, теплопродуктивності сонячного колектора і установки в цілому, теплового навантаження на опалення, енергетичні та геометричні характеристики геліосистеми, в тому числі площі поверхні колектора, об'єм акумулятора теплової енергії, річної економії палива і терміну окупності.

Теплову потужність плоского колектора сонячної енергії визначено, як:

$$Q_k = A[I_k \eta_o - K_k(T_1 - T_{\text{зовн}})] = G c_k(T_2 - T_1), \quad (13)$$

де A – ефективна площа поверхні колектора; I_k – інтенсивність потоку сонячної енергії, що надходить на колектор; η_o – ефективний оптичний ККД; K_k – ефективний коефіцієнт тепловтрат колектора; T_1, T_2 – температура на вході та виході з колектора; G – масова витрата теплоносія в колекторі; c_k – питома теплоємність теплоносія в колекторі.

Об'єм бака-акумулятора теплоносія обчислено за формулою:

$$V = Q / (C_B \cdot \Delta T) \quad (14)$$

де V – об'єм бака-акумулятора; Q – кількість енергії; ΔT – різниця вхідної та вихідної температур теплоносія в бака-акумулятора.

Експлуатація розробленої системи протягом опалювальних сезонів у 2012-2016 р.р. (рис. 14) показала 25-35% економії теплової енергії в тому числі 4-6% за рахунок сонячної енергії. Термін окупності системи оцінюється у 3-4 роки враховуючи, що вартість сонячних колекторів з обов'язкою складає до 50% всієї вартості системи. Розрахункова вартість 1 кВт·год теплової енергії, отриманої від сонячних колекторів – 0,9 грн.

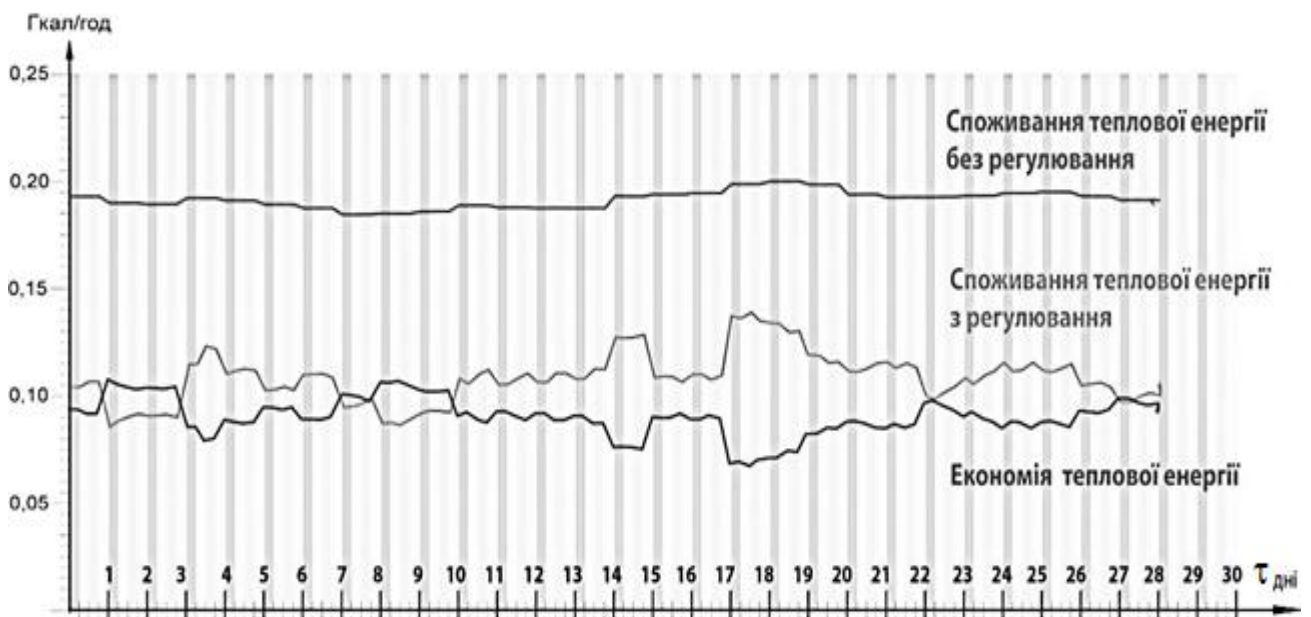


Рис. 14. Графік споживання теплової енергії за лютий 2013 р.

На прикладі адміністративної будівлі ІТТФ НАН України, де вставлено систему керування теплоспоживанням з комбінованим теплопостачанням і використанням сонячної енергії, показано, що при площі забудови 800 м² можливо розмістити і обслуговувати на даху сонячні колектори площею до 200 м². Розраховано, що максимальна опалювальна площа будівлі при комбінованому теплопостачанні з використанням сонячної енергії для часткового заміщення теплоносія в діапазоні 4-6% складає 8000 м².

У додатках наведено матеріали, які підтверджують впровадження результатів дисертації, технічні характеристики розроблених систем, приклади низки розроблених алгоритмів та програмного забезпечення блоку керування.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне наукове-прикладне завдання оптимізації режиму теплоспоживання промислових, адміністративних та житлових об'єктів, яке полягає в розробленні та вдосконаленні методів та засобів керування теплоспоживанням з частковим використанням відновлюваних джерел на прикладі сонячної енергії.

Основні висновки та результати:

1. Проведено порівняльний аналіз існуючих теплопунктів, методів та засобів керування теплоспоживанням, що дало можливість сформулювати завдання оптимізації процесу та розробити структуру системи керування теплоспоживанням.

2. Розроблено статичну та динамічну моделі системи керування теплоспоживанням, в яких враховано процес теплообміну в будівлі з комбінованим теплопостачанням від зовнішнього теплоносія та сонячних колекторів, що дозволило оптимізувати процес теплоспоживання.

3. Розв'язано обернену задачу визначення коефіцієнтів тепловіддачі на поверхнях огорожувальної конструкції будівлі за експериментальними даними дослідження системи керування теплоспоживанням, що дало можливість отримати значення теплового опору, теплового потоку та коефіцієнта інфільтрації.

4. Розроблено алгоритм оптимізації регулювання за мінімаксімним критерієм у впровадженому блоці керування системою та використання сонячної енергії дозволило додатково зменшити споживання теплоносія з системи централізованого теплопостачання на 10-15%

5. Створено експериментальний стенд системи керування теплоспоживанням будівель при комбінованому теплопостачанні з використанням традиційних енергоресурсів і сонячної енергії, який підтвердив свою ефективність протягом трьох років експлуатації. Забезпечено зменшення використання теплової енергії на 25-35% з них 4-6% за рахунок використання сонячної енергії.

6. Матеріали дисертаційної роботи знайшли практичне використання при проектуванні і впровадженні низки систем керування теплоспоживанням, п'ять будівель у м. Києві та Київській області, що підтверджено відповідними актами впровадження. При цьому термін окупності витрат на впровадження складає 1...2 опалювальних сезони.

СПИСОК ОСНОВНИХ ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Назаренко А.О. Система управління теплоспоживанням з сонячними колекторами / А.О. Назаренко // Метрологія та прилади. – 2013. – №2 (40). – С. 151-158
2. Бабак В.П. Автоматизований пункт керування теплоспоживанням / В.П. Бабак, Б.Д. Білека, А.О. Назаренко // Промышленная теплотехника. – 2013. – №1 (35). – С. 57-65.
3. Назаренко А.О. Експериментальні дослідження автоматизованого пункту керування теплоспоживанням / А.О. Назаренко // Промышленная теплотехника. – 2013. – №2 (35). – С. 43-49.
4. Бабак В.П. Система керування теплоспоживанням з сонячними колекторами та акумулятором тепла / В.П. Бабак, О.О. Назаренко, А.О. Назаренко // Промышленная теплотехника. – 2013. – №4(35). – С. 31-38.
5. Бабак В.П. Автоматизовані системи керування теплоспоживанням: сучасний стан та перспективи впровадження / В.П. Бабак, О.О. Назаренко, А.О. Назаренко // Промышленная теплотехника. – 2014. – № 6(36). – С. 38-45.
6. Babak V.P. Mathematical models automatized unit of heat consumption regulation with solar collectors and the heat accumulator / V.P. Babak, B.D. Bileka, A.O. Nazarenko // NDT days 2013 : Int. Conf., 17 – 21 June 2013. – Sozopol, Bulgaria., 2013 – P. 120-123.
7. Назаренко А.О. Результати експериментального дослідження теплового стану офісної будівлі з системою комбінованого теплоспоживання / А.О. Назаренко, Б.Д. Білека, Т.Т. Супрун // IX Міжнародна конференція «Проблеми промислової теплотехніки»: наук. конф., 20-22 жовтня 2015 р.: тези доп. – К., 2015. – С. 75.
8. Бабак В.П. Автоматизація і контроль регулювання теплоспоживання з використанням сонячних колекторів та акумуляції тепла / В.П. Бабак, А.О. Назаренко // Неруйнівний контроль і технічна діагностика: наук конф., 20 - 23 листопада 2012 р.: тези доп. – К., 2012. – С. 229-231.
9. Бабак В.П. Контроль и автоматизация регулирования теплоспожребления / В.П. Бабак, А.О. Назаренко // Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики : междунар. науч.-техн. конф., 1-5 октября 2012 г. : тезисы. докл. – К., 2012. – С. 40-42.
10. Назаренко А.О. Вимірювання теплового опору огорожувальних конструкцій будівлі / А.О. Назаренко // Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах: міжнар. наук. конф., 29-31 жовтня 2013 р.: тези доп. – Вінниця, 2013. – С. 135-139
11. Nazarenko A.O. Automated system for regulation heat consumption / A.O. Nazarenko // Safety in Aviation and Space Technologies : World Congress, 25-27 September 2012: theses – К., 2012. – P. 3.5.54-3.5.58.
12. Патент України на корисну модель №72168 Автоматизований тепловий пункт / А.А. Долінський, В.П. Бабак, О.О. Назаренко, Є.Г. Жовнорук, А.В. Тихонюк,

А.О. Назаренко, заявник та власник Інститут технічної теплофізики НАН України –
Опубл. 10.08.2012, Бюл. №15.

АНОТАЦІЯ

Назаренко А.О. Система керування теплоспоживанням будівель з комбінованим теплопостачанням і використанням сонячної енергії. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.01 – Енергетичні системи та комплекси. – Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, Київ, 2016.

Дисертаційну роботу присвячено розвитку і вдосконаленню систем та методів керування теплоспоживанням з метою підвищення енергоефективності теплоспоживання будівель з частковим використанням відновлюваних джерел енергії (сонячних колекторів).

Розв'язано обернену задачу з визначення теплових характеристик огорожувальної конструкції будівлі за експериментальними даними дослідження системи керування теплоспоживанням, що дало можливість отримати значення теплового опору, теплового потоку та коефіцієнта інфільтрації.

За результатами математичного моделювання системи створено новітній блок керування теплоспоживанням з додатковими функціями, які дозволяють реалізувати мінімаксний критерій для вибору оптимальних режимів керування теплоспоживанням будівель.

Впроваджено п'ять систем керування теплоспоживанням. Створено експериментальний стенд системи керування теплоспоживанням будівлі з комбінованим теплопостачанням і використанням сонячної енергії, який показав ефективність та подальші перспективи його застосування.

Ключові слова: теплоспоживання, енергоефективність, математична модель, система керування, сонячні колектори.

АНОТАЦІЯ

Назаренко А.О Система управления теплоснабжением зданий с комбинированным теплоснабжением и использованием солнечной энергии. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы. Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины, Киев, 2016.

Диссертационная работа посвящена развитию и усовершенствованию систем и методов управления теплоснабжением с целью увеличения энергоэффективности теплоснабжения строений с частичным использованием возобновляемых источников энергии (солнечных коллекторов).

Решено обратную задачу по определению тепловых характеристик ограждающей конструкции здания по экспериментальным данным исследования

системы управления теплоснабжением, что позволило получить значение теплового сопротивления, теплового потока и коэффициента инфильтрации.

По результатам математического моделирования системы управления теплоснабжением был создан блок управления теплоснабжением с дополнительными функциями, которые позволяют реализовать минимаксный критерий для выбора оптимальных режимов управления теплоснабжением зданий.

Внедрено пять систем управления теплоснабжением. Создан экспериментальный стенд системы управления теплоснабжением здания с комбинированным теплоснабжением и использованием солнечной энергии, который показал эффективность и дальнейшие перспективы его применения.

Ключевые слова: теплоснабжение, энергоэффективность, математическая модель, система управления, солнечные коллекторы.

ANNOTATION

Nazarenko A.O. The control system of heat consumption of buildings with a combined heating and solar energy. – Manuscript.

The thesis for degree of Candidate of Engineering Sciences, specialty 05.14.01 – energy systems and complexes. – Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2016.

The thesis is devoted to the development and improvement of systems and methods to control heat consumption in order to increase the energy efficiency of heat consumption of buildings with partial use of renewable energy sources (solar collectors).

The existing heat consumption circuit (circuit connection, technical solutions using equipment, daily and seasonal schedules of thermal load characteristics for different types of buildings) using heat from solar collectors.

According to the characteristics of heat supply buildings implemented a number control systems of heat consumption, indicating the advantages and disadvantages of these systems and energy efficiency indicators deductible. The management methods of systems heat consumption have been classified and ranking. The priorities of their application have been identified. Modes of supply of thermal energy from an external power source, mode of SCT and heat consumption of heat energy is illustrated by the graphs.

The results of the thesis found practical application in the design and implementation of the five heat consumption control systems of various buildings (administrative, residential, industrial).

According to the results of mathematical modeling of SCT the new control unit for heat consumption with additional features that allow you to realize the minimax criterion to select optimum modes of buildings heat consumption, depending on the available potential sources of heat, was established.

Developed block scheme of basic processing and control systems of heat consumption algorithms and related software.

The paper decided the actual task of determining the most efficient modes of automated control system of heat consumption that provides energy savings through

automation of heat consumption without disruption of the consumer, networking and heat source.

Inverse problem to determine the thermal characteristics of the building were solved. Verification model heat consumption control system at the experimental stand was conducted. The first time proposed and implemented a method of using solar energy for heating buildings by mixing a battery coolant from the solar collector in the return pipe.

The calculation and experimental data of the solar heating system were made for support the heating of the building. Calculation of solar installations includes determining the available amount of solar energy, solar collector and heat generating installation as a whole, the thermal load on the heating energy and geometric characteristics of the solar system, including collector surface area, battery volume of heat energy, the annual fuel savings and payback period.

Experimental stand of SCT building with the combined use of district heating and solar energy for heat supply, showed the effectiveness and future prospects of its application.

Materials thesis found practical application in the design and implementation of a number of heat consumption of control systems, five buildings in the city Kyiv and Kyiv region, which is confirmed by relevant acts implementation. The period of payback for implementation is 1 ... 2 heating seasons, and reduction of thermal energy to 20-32%.

Savings through the use of solar energy was 4%

Keywords: heat consumption, energy efficiency, mathematical model, control system, solar collectors.