



УДК 631.2

© 2012

А. П. Слесаренко, О. С. Сорока

Термостабілізація підлог приміщень з максимальним акумулюванням тепла

(Представлено членом-кореспондентом НАН України О. Л. Шубенком)

На базі розв'язання серії зворотних задач теплопровідності запропоновано новий підхід щодо ідентифікації енергопотоків у електро теплоаккумулятивній системі обігріву приміщення, що одночасно забезпечує заданий рівень нагріву поверхні підлоги та максимальне акумулювання тепла. Побудовано енергограми для систем нагрівальних елементів, які демонструють можливість раціонального використання тепла за рахунок його максимального акумулювання, її температурні розподіли на поверхні підлоги, що характеризують високий ступінь термостабілізації.

Постановка проблеми. Раціональне використання енергоресурсів і енергозбереження в сучасних умовах досить частих і різких коливань параметрів клімату не може бути виконано тільки за рахунок високої теплоізоляції огорожувальних конструкцій будинків і споруд. Задачі підвищення енергоефективності таких об'єктів можуть бути розв'язані також на основі сучасних інформаційних технологій і комп'ютерних систем керування [1]. Застосування інформаційних технологій щодо контролю теплового режиму приміщень з урахуванням порівняно повільних перехідних процесів в елементах споруд при зміні зовнішніх теплових умов дозволить при використанні певного набору поточних даних про тепловий стан об'єкта (може забезпечити нескладна спостерігаюча вимірювально-інформаційна система — ВІС) і математичної теплової моделі приміщення одержати функції керування системою обігріву [2]. Останнє може бути визначено на основі розв'язання зворотної задачі теплопровідності щодо одержання величин необхідних потужностей нагрівальних елементів для стабілізації теплового стану об'єкта з урахуванням запізнювання.

Структурно споруда розглядається як система двох підобластей, що перебувають у тепловому контакті за рахунок конвекційного теплообміну. Одна з них містить нагрівальні елементи — нагрівальна система (НС) у вигляді масивного паралелепіпеда, одна із граней

якого робоча — поверхня підлоги, п'ять інших контактують із ґрунтом. Друга підсистема — приміщення частково або повністю обмежене огорожувальними конструкціями, має із НС спільну грань (вищезгадана поверхня підлоги), рівень нагрівання T_f^* якої повинен підтримуватися постійним відповідно до певних вимог. Така узагальнена структурна модель і вимога до його основного параметра T_f^* відповідає цілому ряду промислових і цивільних споруджень, наприклад, криті площадки, стадіони, храмові спорудження, полотно автодороги, що обігривається, сільськогосподарські приміщення.

Аналіз можливих підходів. НС являє собою [3, 4] шарувату пласку структуру, що має у загальному випадку довільне число N шарів з різних будівельних матеріалів. M шарів ($1 \leq M \leq N$) активні, тобто будучи підключеними до джерел енергії, виділяють тепло в НС. Задано також кількість нагрівальних елементів трубчастого типу в активних шарах, погонна потужність тепловиділення яких P_{ij} (Вт/м, i — номер шару, j — номер нагрівального елемента) може регулюватися. Всього таких однотипних нагрівачів у НС налічується K штук.

Таким чином, підтримка заданого рівня нагрівання T_f^* робочої поверхні при заданих умовах теплообміну споруди із навколишнім середовищем може бути забезпечена шляхом параметричної ідентифікації наявних K теплових джерел. Багатоярусне по глибині розміщення нагрівальних елементів дозволяє накопичувати частину енергії (акумулявати тепло) у часи пільгового тарифу енергоспоживання або при наявності лишків енергії, які можуть постачати, наприклад, нетрадиційні поновлювані джерела. Далі розглядається варіант 3-ярусної електротеплоакумулявальної НС, деякі режими роботи якої описані в роботах [3, 4]. Обмежимося двовимірним випадком системи, однорідної у напрямку нагрівальних елементів.

Задачу параметричної ідентифікації НС для моментів часу $\tau = \tau_l$ сформулюємо як задачу мінімізації функціонала вигляду

$$I_l = \int_0^B [T_l(y, \tau_l; P_1^{(l)}, \dots, P_K^{(l)}) - T_f^*]^2 dy, \quad (1)$$

де B — напівширина поверхні підлоги (в площині $y = 0$ прийнята умова симетрії); $T_l(y, \tau_l; P_1^{(l)}, \dots, P_K^{(l)})$ — температурне поле в площині $x = A$ на поверхні підлоги; $P_1^{(l)}, \dots, P_K^{(l)}$ — потужності джерел у момент часу $\tau = \tau_l$.

Для забезпечення заданого рівня нагрівання T_f^* в поточний момент часу $\tau = \tau_l$ необхідні такі реалізації розподілу потужності джерел $\{P_k^{(l)}\}_{k=1, \dots, K}$, які мінімізують функціонал (1). Оскільки постійна часу НС $\tau_{уст}$ досить значна (від декількох годин до десятків годин), то, вибираючи інтервал опитування ВІС $\Delta\tau$ набагато меншим постійної часу $\Delta\tau \ll \tau_{уст}$, розв'язок нестационарної задачі теплопровідності можна замінити послідовністю задач теплопровідності для сталого режиму. При цьому розв'язком рівнянь теплопровідності будуть відповідати розв'язки системи рівнянь, що мінімізують функціонал (1):

$$\frac{\partial I_l}{\partial P_k^{(l)}} = 0, \quad k = 1, \dots, K. \quad (2)$$

Пропонується три різних підходи до розв'язання таких нестационарних задач. Перший варіант — застосування методу прямих — дозволяє одержати послідовність граничних задач

для рівняння теплопровідності усталеного режиму, що приводять до рівняння для моменту часу $\tau = \tau_l$:

$$\frac{\partial^2 T_i^{(l)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i^{(l)}}{\partial y^2} - \frac{1}{a_i \Delta \tau} T_i^{(l)} = -\frac{1}{a_i \Delta \tau} T_i^{(l-1)} - \frac{1}{\lambda_i} p_i^{(l)}, \quad (3)$$

де a — коефіцієнт температуропровідності шарів; шукані функції розподілу температури $T_i^{(l)} = T_i^{(l)}(x, y, \tau_l)$ в шарах НС ($i = 1, \dots, N$) повинні задовольняти умови спряження в площинах контакту шарів і обрані граничні умови на зовнішніх границях; $p_i^{(l)}$ — розподіл щільності потужності джерел в i -му шарі.

Інші варіанти розглядаються як теоретико-експериментальні. У другому варіанті вихідні рівняння нестационарної теплопровідності зводяться до послідовності задач

$$\frac{\partial^2 T_i^{(l)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i^{(l)}}{\partial y^2} = \frac{1}{a_i \Delta \tau} T_i^{(l)*} - \frac{1}{a_i \Delta \tau} T_i^{(l-1)} - \frac{1}{\lambda_i} p_i^{(l)}, \quad (4)$$

де значення температури в шарах $T_i^{(l)*}$ визначаються з даних ВІС, які можуть бути наведені у вигляді інтерполяційних поліномів.

І, нарешті, у третьому варіанті розв'язання нестационарної задачі теплопровідності для НС розподіл температури в її об'ємі за умови регулярності теплових процесів можна шукати у вигляді

$$T(x, y, \tau; P_1, \dots, P_K) = e^{-p\tau} T_{\text{поч}} + (1 - e^{-p\tau}) \cdot T_{\text{уст}}(x, y; P_1, \dots, P_K), \quad (5)$$

де $p = \tau_{\text{уст}}^{-1}$ — постійна часу нагрівання (охолодження), поточний параметр, що залежить від поточних умов теплообміну, значення якого визначається на основі даних ВІС; $T_{\text{поч}}$, $T_{\text{уст}}$ — температура НС у початковий момент часу й температурний розподіл у сталому режимі.

Таким чином, задача пошуку оптимального розподілу потужності джерел НС для забезпечення заданого рівня нагрівання робочої поверхні T_f^* споруди, що перебуває під впливом зовнішніх кліматичних факторів, які змінюються за часом, може бути зведена до розв'язання серії задач сталого режиму теплопровідності для розглянутої НС. Далі індекс належності параметра задачі до моменту часу (l) скрізь опускаємо.

Аналіз сталого режиму. Для багатошарової НС моделювання теплових процесів зводиться до розв'язання задач теплопровідності усталеного режиму в кожному шарі:

$$\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} = -\frac{1}{\lambda_i} p_i(y), \quad i = 1, \dots, N, \quad 0 \leq x \leq x_N = A, \quad 0 \leq y \leq B, \quad (6)$$

$$T_1(x, y)|_{x=0} = T_0; \quad -\lambda_N \frac{\partial T_N}{\partial x} \Big|_{x=A} = \alpha(T_N - T_e)|_{x=A}, \quad (7)$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0; \quad T_i + h \frac{\partial T_i}{\partial y} \Big|_{y=B} = T_{s,i}, \quad x_{i-1} \leq x \leq x_i, \quad (8)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \Big|_{x=x_i} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial x} \Big|_{x=x_i}; \quad T_i|_{x=x_i} = \left(T_{i+1} - r_i^* \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}}{\partial x} \right) \Big|_{x=x_i}, \quad 0 \leq y \leq B, \quad (9)$$

де i — номер шару (відлік ведеться знизу до поверхні підлоги); $x_{i-1} \leq x \leq x_i$ — область локалізації i -го шару; $T_i = T_i(x, y)$ — розподіл температури по частковій області — i -му шару; $p_i = p_i(y)$ — задана функція щільності джерел тепла, розподілених по i -му шару, Вт/м³; λ_i — коефіцієнт теплопровідності матеріалу i -го шару; T_e — температура повітряного середовища на деякому віддаленні від поверхні підлоги; $T_{s,i}$ — температура ґрунту поза НС по її товщі (висоті), приймається постійною в межах кожного шару; r_i^* — термічні контактні опори між шарами; α — коефіцієнт тепловіддачі з поверхні підлоги у повітряне середовище, приймається постійною величиною; $h = \lambda^*/\alpha_s$ — параметр теплопередачі із блоку НС у ґрунт через бічну стінку, приймається постійною величиною по всій глибині, при цьому λ^* — деяке усереднене значення коефіцієнта теплопровідності НС по її товщі; α_s — коефіцієнт тепловіддачі за умовами 3-го роду.

Для одержання аналітичних рішень сформульованої математичної моделі будемо вважати коефіцієнт тепловіддачі α константою, що в рамках теоретико-експериментального підходу може бути кореговано при діагностиці теплових процесів НС у режимі реального часу.

В результаті розв'язання задачі теплопровідності, з застосуванням методу кінцевих перетворень [3], отримано функціональну залежність температури поверхні підлоги $T_f = T(x_N, y)$ (як однієї з складових розв'язку) від наявних теплоти повітряного середовища над поверхнею підлоги, глибинного ґрунту й ґрунту за бічною стінкою НС (відповідно T_e, T_0, T_s), а також потужності кожного окремого нагрівального елемента $\{P_k^{(l)}\}_{k=1, \dots, K}$ в поточний момент часу:

$$T(x_N, y, \tau; P_1, \dots, P_K) = e^{-p\tau} T_{\text{поч}} + (1 - e^{-p\tau}) T_{\text{уст}}(x_N, y; P_1, \dots, P_K).$$

Таким чином, встановлено зв'язок між стандартами на нагрівання поверхні підлоги T_f^* й потужністю енергопотоків у НС в реальних умовах теплообміну споруди з навколишнім середовищем, що дозволяє реалізувати *структурно-функціональне* керування енергопотоків. Це є дуже важливою властивістю запропонованої НС, тому що дозволяє при наявності надлишків енергії або у разі обігріву приміщення в періоди зниженого тарифу на енергоносії акумулювати в самій НС частину споживаної енергії у вигляді тепла (див. рис. 1). При цьому 3-ярусна структура НС дозволяє робити таке заощадження енергії ефективно — необхідна частина енергії використовується для забезпечення заданого стандарту нагрівання підлоги T_f^* , решта акумулюється в нижніх ярусах НС.

Наочний приклад щодо оптимізації режиму споживання, коли 80% енергії надходить у верхній ярус, а надлишок — у середній, наведено серією кривих та діаграм на рис. 1. Показано очікувані розподіли температури на поверхні підлоги для стандартів нагрівання $T_f^* = 18$ °С й $T_f^* = 38$ °С і відповідні енергограми (погонні потужності нагрівачів) при різних значеннях тепловтрат через бічну стінку НС: $\alpha_s = 0$ — випадок ідеальної теплоізоляції, $\alpha_s = 0,75$ Вт/(м² · К) і $\alpha_s = 1,5$ Вт/(м² · К). Спостерігається термостабілізація підлоги — тобто заданий рівень нагрівання поверхні підлоги точно забезпечується в точках проекції осей нагрівальних елементів на поверхню підлоги, між ними має місце лише незначне відхилення від заданого рівня, причому тим більше, чим глибше розташований активний шар.

Таким чином, можна зробити такі висновки. 1. Запропоновано методологію розв'язання комплексної проблеми оптимального структурно-функціонального керування енергопото-

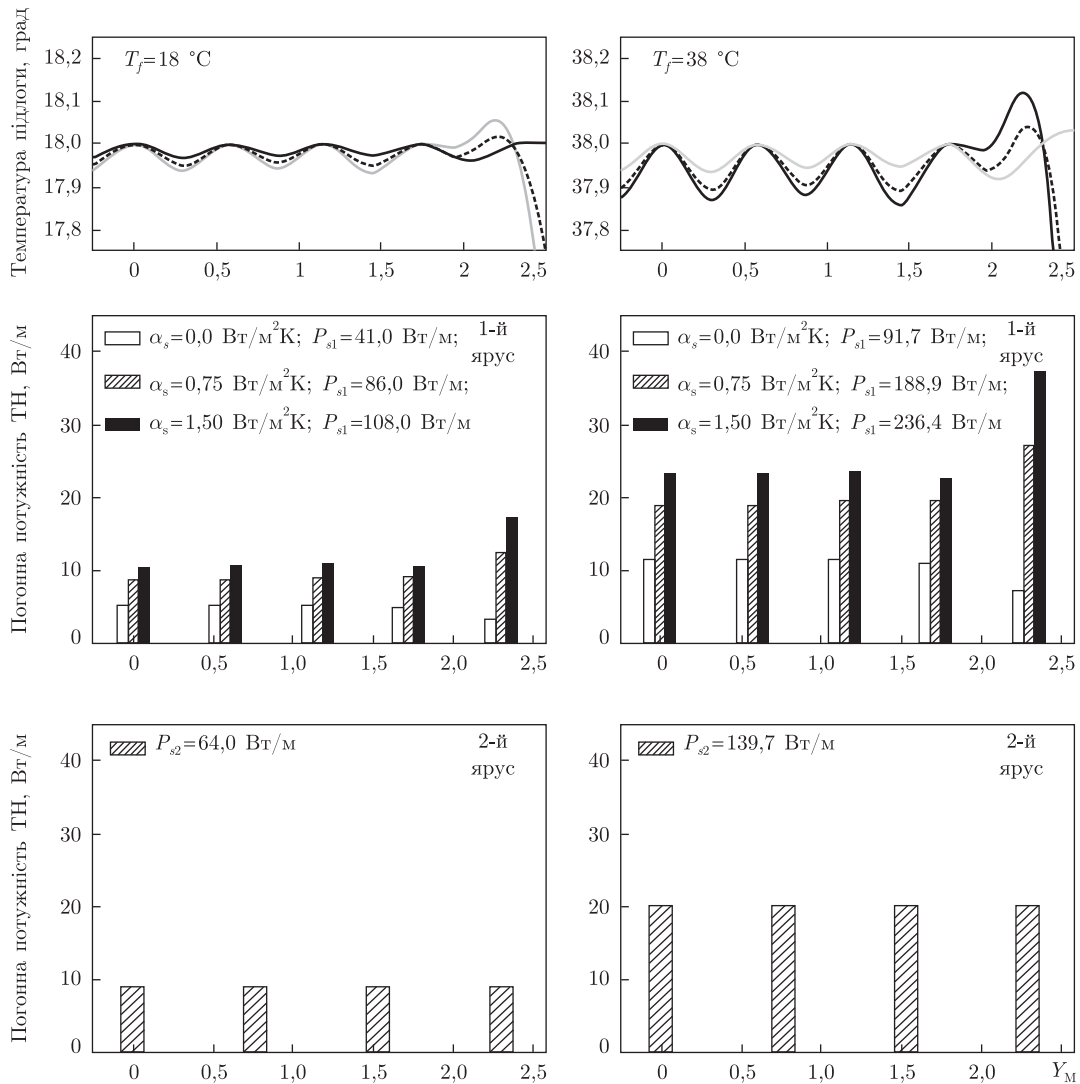


Рис. 1. Розподіл температури та енергограми розподілу потужності нагрівачів у двох ярусах системи обігріву

ками в нагрівальній системі споруди, що дозволяє одночасно забезпечувати заданий стандарт нагрівання робочої поверхні споруди й акумуляцію енергії. 2. Вперше сформульовано й розв'язано в рамках теоретико-експериментального підходу задачу про ефективний розподіл енергопотоків у нагрівальній системі на основі розв'язання серії зворотних задач теплопередачі з використанням реальних даних про тепловий стан нагрівальної системи в режимі реального часу. 3. Ідентифікація енергопотоків при забезпеченні заданих стандартів обігріву робочої поверхні споруди дозволяє проводити аналіз і прогнозувати рівень енергозбереження при структурно-функціональному керуванні енергопотокими.

1. Табулициков Ю. А., Бродач М. М., Шилкин Н. В. Энергоэффективные здания. – Москва: АВОК-ПРЕСС, 2003. – 200 с.
2. Алифанов О. М. Обратные задачи теплообмена. – Москва: Машиностроение, 1988. – 280 с.
3. Слесаренко А. П., Сорока О. А. Математичне моделювання термостабілізації підлог приміщень з урахуванням максимального теплоакмулювання в системі обігріву // Пробл. машиностроения. – 2011. – 14, № 1. – С. 31–37.

4. Слесаренко А. П., Сорока А. С. Математическое моделирование обогрева сооружений на базе идентификации распараллеленных энергопотоков // Вісн. ХНУ. Сер. МІА. – 2011. – № 987. – С. 120–130.

Інститут проблем машинобудування
ім. А. М. Підгорного НАН України, Харків

Надійшло до редакції 06.01.2012

А. П. Слесаренко, А. С. Сорока

Термостабилизация полов помещений с максимальным аккумулярованием тепла

На основе решения серии обратных задач теплопроводности предложен новый подход для идентификации энергопотоков в электротеплоаккумуляционной системе обогрева помещения, который одновременно обеспечивает заданный уровень нагрева поверхности пола и максимальное аккумулярование тепла. Построены энергограммы для систем нагревательных элементов, которые демонстрируют возможность рационального использования тепла за счет его максимального аккумулярования, и температурные распределения на поверхности пола, которые характеризуют высокую степень термостабилизации.

A. P. Slesarenko, A. S. Soroka

Thermostabilization of premises' floor with maximum heat accumulation

On the basis of solving a series of inverse problems for heat conductivity, a new approach to the identification of power flows in electroheated system with heat accumulation for premises, which simultaneously provides the set level of heating of the surface of a floor and the maximum accumulation of heat, is offered. Power diagrams for a system of heating elements, which show a possibility of rational use of heat at the expense of its maximum accumulation, and temperature distributions for the surface of a floor which characterize a high degree of thermostabilization are constructed.