

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-3>

УДК 681.516.75

Марія ЮХИМЧУК

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-8131-9739>

e-mail: umcmasha@gmail.com

ІДЕНТИФІКАЦІЯ БАГАТОЗОНАЛЬНИХ ТЕПЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ

Важливою складовою розв'язання проблеми координації управління багатозональних теплових об'єктів є отримання первинної інформації, яка необхідна для пошуку оптимального керування. Визначення параметрів об'єкта здійснюється шляхом розв'язання задачі ідентифікації. Інерційність об'єкта і, відповідно, можливість зміни стану його елементів протягом циклу координації обумовлює необхідність прогнозування процесів в багатозональних теплових об'єктах. Запропоновані методики активної і пасивної ідентифікації параметрів об'єкта керування. Активна ідентифікація використовується переважно на початковому етапі функціонування розподілених кібер-фізичних систем (РКФС) або у випадку зміни її структури. Пасивна ідентифікація використовується в процесі її експлуатації для підвищення точності оцінювання характеристик та врахування їх трендів. Ідентифікація здійснюється на основі моделі РКФС у вигляді передатної функції замкненої системи управління з урахуванням взаємного впливу елементів об'єкта. Задача ідентифікації може бути розв'язана як активним, так і пасивним методом. Проте найкращий результат дає методика на основі їх комбінації. При комбінованій активно-пасивній ідентифікації на початку роботи РКФС або при зміні її структури здійснюється тестовий вплив (активний етап) – внесення початкової фіксованої кількості ресурсу послідовно до кожного керованого елемента розподіленого об'єкта і реєстрація реакція зміни стану елементів у часі. На основі цієї інформації виконується оцінювання параметрів об'єкта. Далі у процесі роботи також здійснюється реєстрація керівних впливів на елементи об'єкта і зміни їх стану (пасивний етап), на основі чого уточнюються параметри об'єкта та враховується їх можливий тренд.

Ключові слова: пасивна ідентифікація, активна ідентифікація, багатозональний тепловий об'єкт.

Mariia YUKHIMCHUK

Vinnitsia National Technical University

IDENTIFICATION OF MULTI-ZONE THERMAL FACILITIES

An important component of solving the problem of coordination of control of multi-zone thermal facilities is obtaining primary information, which is necessary for finding optimal control. Determination of object parameters is carried out by solving the identification problem. The inertia of the object and, accordingly, the possibility of changing the state of its elements during the coordination cycle determines the need to forecast processes in multi-zone thermal objects. Proposed methods of active and passive identification of control object parameters. Active identification is used mainly at the initial stage of functioning of distributed cyber-physical systems (DCPS) or in the event of a change in its structure. Passive identification is used in the process of its operation to increase the accuracy of the assessment of characteristics and take into account their trends. Identification is carried out on the basis of the DCPS model in the form of a transfer function of a closed control system, taking into account the mutual influence of the object's elements. The problem of identification can be solved by both active and passive methods. However, the best result is given by a technique based on their combination. In the case of combined active-passive identification, at the beginning of the operation of the DCPS or when its structure is changed, a test effect (active stage) is carried out - the introduction of an initial fixed amount of the resource in sequence to each controlled element of the distributed object and the registration of the reaction of the change in the state of the elements over time. Based on this information, the object parameters are evaluated. Further, in the process of work, the control influences on the elements of the object and changes in their state are also registered (passive stage), on the basis of which the parameters of the object are specified and their possible trend is taken into account.

Keywords: passive identification, active identification, multi-zone thermal object.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Теплові об'єкти дуже розповсюджені як у виробництві, так і у побуті. Серед таких об'єктів виділяються розподілені багатозональні об'єкти, у яких в кожній зоні необхідно підтримувати різний температурний режим, проте через слабку відокремленість зон їх взаємний вплив ускладнює задачу забезпечення оптимального керування. Прикладом багатозональних теплових об'єктів (БТО) є житлові і виробничі приміщення, камери для тепло-вологісної обробки сільськогосподарської продукції (сушильні та пророщувальні камери) тощо [1].

Комфортні умови в багатозональних приміщеннях, таких як «open space» офіси, квартири-студії тощо, вимагають різної температури повітря в окремих зонах. Хоча такі зони називаються термостатично керованим навантаженням (ТКН), однак статичний режим у них спостерігається лише протягом обмеженого інтервалу часу. Характерною особливістю таких приміщень є швидка і часта зміна вимог: приміщення звільняються або заповнюються, вимоги до комфорту змінюються відповідно до індивідуальних потреб тощо. У таких приміщеннях встановлюються окремі засоби підтримки температури повітря (кондиціонери, конвектори, тепловентилятори, тощо) з локальними системами керування. Взаємовплив окремих областей

потребує координації локальних систем управління (ЛСУ). Завдання узгодження засобів налаштування температури в приєднаних зонах при використанні рухомих пристроїв має ряд загальних і спеціальних властивостей. Ці особливі властивості зумовлюють необхідність нового погляду на задачу координаційного керування рухомими обігрівачами/кондиціонерами ТКН у контексті загальної проблеми децентралізованого координаційного керування багатозональними розподіленими тепловими об'єктами [2].

У технологічних об'єктах додаткові ускладнення зумовлені ширшим діапазоном температур і значними перепадами температур у зонах.

Наразі роботи, спрямовані на підвищення ефективності керування багатозональними тепловими об'єктами, базуються на моделюванні. Велика і складна робота з розробки інструментів моделювання та підвищення енергоефективності на його основі проводиться у відділі будівельних технологій та міських систем лабораторії Берклі (США). Вони розробили і продовжують удосконалювати такі продукти, як EnergyPlus [3], Modelica Buildings library [4], Building Controls Virtual Test Bed (BCVTB) [5], Generic Optimization Program (GenOpt®) [6], EnergyPlustoFMU [7], і т. д. Найбільш широко використовується система моделювання EnergyPlus. Ця система моделювання є основою більшості інших продуктів цього розробника.

Для здійснення координації необхідна первинна інформація. Таку інформацію можна розділити на умовно постійну – параметри об'єкта керування, і змінну – стан об'єкта керування. Визначення параметрів об'єкта здійснюється шляхом розв'язання задачі ідентифікації.

У роботі [8] представлена система, яка включає механізми прогнозування та інтелектуальні алгоритми керування опаленням на основі штучної нейронної мережі (ШНМ) для оптимізації енергоефективності. Для цього лабораторія Berkeley Lab протягом трьох років збирала дані про енергоспоживання всієї будівлі та кінцеве споживання, умови роботи системи, параметри зовнішнього та внутрішнього середовища, а також кількість мешканців і створила набір даних для аналізу та машинного навчання [9].

Проте такий підхід не дозволяє оперативно реагувати на зміни параметрів об'єкта. Уявляється перспективним розв'язання проблеми отримання первинної інформації про параметри БТО на основі методів ідентифікації динамічних систем [10, 11].

Формулювання цілей статті

Метою цієї роботи є розробка методики ідентифікації параметрів багатозональних теплових об'єктів безпосередньо в процесі керування ними.

Для досягнення мети пропонуються дві методики: активної і пасивної ідентифікації параметрів об'єкта керування. Активна ідентифікація використовується переважно на початковому етапі керування БТО або у випадку зміни структури системи керування – вмикання/вимикання окремих нагрівачів. Пасивна ідентифікація використовується в процесі роботи системи для підвищення точності оцінювання характеристик та врахування їх трендів. Особливістю методик, які пропонуються, є їх пристосованість до застосування у системах децентралізованої координації систем керування БТО. При децентралізованій координації ЛСУ кожної зони має координатор – блок визначення оптимального стану зони, в якому і реалізуються алгоритми ідентифікації.

Алгоритм активного етапу зображений на рис. 1. Алгоритм ґрунтується на моделі БТО [1, 12]. Алгоритм передбачає ковзний процес керування децентралізованою ідентифікацією, розрахунок відстані між зонами, тестову зміну стану зон і оцінювання коефіцієнтів взаємного впливу зон залежно від відстані між ними. Процедура тестування передбачає відправку повідомлення на всі координатори системи керування БТО і реєстрацію ними стану елементів об'єкта. Кожен координатор по черзі стає активним, тобто виконує цикл зміни стану на величину, яка дозволяє в ході перехідного процесу здійснити достатню для статистичної обробки кількість відліків стану елементів. Черговість визначається за алгоритмом пошуку гамільтонова циклу. Після проходження циклу відправляється нове повідомлення, за яким усі координатори здійснюється кореляційний аналіз і розрахунок параметрів РКФС.

У результаті виконання алгоритму активний координатор буде зберігати масив даних $\mathbf{V}(\tau)$, $\tau \in (0, T)$, де компонентами вектора \mathbf{V} є значення станів зон БТО у моменти часу τ . На основі цих даних здійснюється ідентифікація параметрів моделі БТО [1] і положень інженерної термодинаміки [13]. Оскільки в режимі ідентифікації тепла енергія надходить тільки до одного елемента БТО, то модель БТО спрощується:

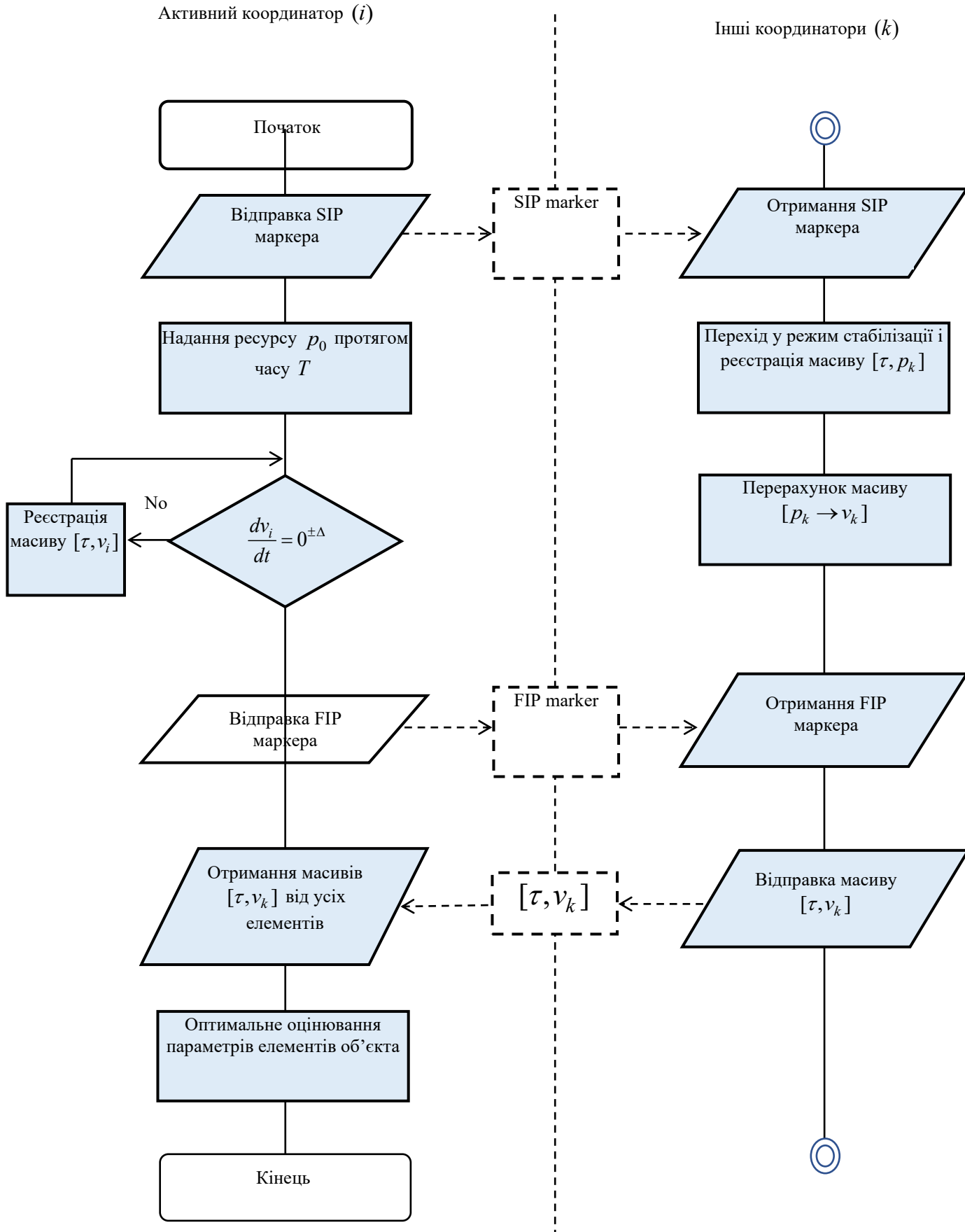


Рис. 1. Алгоритм активного етапу ідентифікації

Для активного елемента

$$\frac{dv_j(t)}{dt} = \frac{1}{C_j} p_{0j}(t) + \frac{1}{C_j} \sum_{k=1}^n \left\{ \frac{v_k(t) - v_j(t)}{8[\pi\lambda t]^{3/2}} e^{-\frac{d_{kj}^2}{4\lambda t}} \left[1 + \left(\frac{d_{kj}^2}{\lambda t} - 6 \right) \cdot \frac{r_{0j}^2}{40\lambda t} \right] \right\} + \frac{\lambda_u(u - v_j(t))}{C_j}; \quad (1)$$

- Для решти елементів

$$\frac{dv_i(t)}{dt} = \frac{1}{C_i} \sum_{k=1}^n \left\{ \frac{v_k(t) - v_i(t)}{8[\pi\lambda t]^{3/2}} e^{-\frac{d_{ki}^2}{4\lambda t}} \right\} + \frac{\lambda_u(u - v_i(t))}{C_i}, \quad (2)$$

де j - індекс активного елемента; i - індекс неактивного елемента; $\mathbf{V} = \{v\}$ - вектор стану зон БТО; u - стан зовнішнього середовища; C_k - теплоємність k -ї зони; p_{0j} - тестовий вплив на j -ту зону; λ - коефіцієнт розповсюдження впливів між зонами; λ_u - коефіцієнт розповсюдження впливу зовнішнього середовища; d_{kj} - відстань між активним елементом і іншими елементами; r_{0j} - радіус частини зони БТО, на яку здійснюється вплив активного елемента.

Для зменшення обчислювальних похибок запишемо рівняння моделі у інтегральній формі

$$\begin{cases} v_j(\tau) = v_j(0) + \int_0^\tau \frac{1}{C_j} p_{0j}(t) + \frac{\lambda_u(u - v_j(t))}{C_j} + \frac{1}{C_j} \sum_{k=1}^n \left\{ \frac{v_k(t) - v_j(t)}{8[\pi\lambda t]^{3/2}} e^{-\frac{d_{kj}^2}{4\lambda t}} \left[1 + \left(\frac{d_{kj}^2}{\lambda t} - 6 \right) \cdot \frac{r_{0k}^2}{40\lambda t} \right] \right\} dt \\ v_i(\tau) = v_i(0) + \int_0^\tau \frac{\lambda_u(u - v_i(t))}{C_i} + \frac{1}{C_i} \sum_{k=1}^n \left\{ \frac{v_k(t) - v_i(t)}{8[\pi\lambda t]^{3/2}} e^{-\frac{d_{ki}^2}{4\lambda t}} \right\} dt \end{cases} \quad (3)$$

Оскільки дані щодо зміни стану елементів БТО реєструються у дискретні моменти часу, перепишемо систему рівнянь у дискретній формі:

$$\begin{cases} v_j(\tau) = v_j(0) + \frac{1}{C_j} \sum_{t=0}^{\tau} \left\{ p_{0j}(t) + \lambda_u(u - v_j(t)) + \sum_{k=1}^n \left\{ \frac{v_k(t) - v_j(t)}{8[\pi\lambda t]^{3/2}} e^{-\frac{d_{kj}^2}{4\lambda t}} \left[1 + \left(\frac{d_{kj}^2}{\lambda t} - 6 \right) \cdot \frac{r_{0k}^2}{40\lambda t} \right] \right\} \right\} \Delta_t \\ v_i(\tau) = v_i(0) + \frac{1}{C_i} \sum_{t=0}^{\tau} \left\{ \lambda_u(u - v_i(t)) + \sum_{k=1}^n \left\{ \frac{v_k(t) - v_i(t)}{8[\pi\lambda t]^{3/2}} e^{-\frac{d_{ki}^2}{4\lambda t}} \right\} \right\} \Delta_t \end{cases} \quad (4)$$

де Δ_t - інтервал часу реєстрації станів елементів.

Невідомими параметрами, які підлягають ідентифікації, є $\{\mathbf{C}, \mathbf{d}, \mathbf{r}, \lambda, \lambda_u, u\}$. Кількість рівнянь, які можуть бути використані для ідентифікації цих параметрів $N = n \cdot m$, де n - кількість елементів БТО, а m - кількість відліків станів елементів, зроблених в процесі активної ідентифікації. Очевидно, кількість невизначених параметрів не дорівнює кількості рівнянь, оскільки кількість рівнянь фіксована, а відліків від початку ідентифікаційного процесу до досягнення стаціонарного режиму залежить від стану системи і оточуючого середовища і є змінною. Тому пошук множини параметрів $\{\mathbf{C}, \mathbf{d}, \mathbf{r}, \lambda, \lambda_u, u\}$ доцільно здійснювати методом оптимального оцінювання. Як критерій оптимального оцінювання використаємо RMSE розрахункового $v_i(\tau_l)$ і реального $\tilde{v}_i(\tau_l)$ станів елементів БТО в моменти τ_l

$$RMSE = \sqrt{\sum_{l=0}^m \sum_{i=1}^n (v_i(\tau_l) - \tilde{v}_i(\tau_l))^2}. \quad (5)$$

Оскільки за фізичним змістом усі параметри $\{\mathbf{C}, \mathbf{d}, \mathbf{r}, \lambda, \lambda_u, u\}$ більші нуля, то легко показати, що за цієї умови залежність RMSE по усіх параметрах є диференційованою і унімодальною. Тому можемо

скористатися для пошуку оптимальних значень $\{C, d, r, \lambda, \lambda_u, u\}$ методом градієнту. Початкова точка $\{C_0, d_0, r_0, \lambda_0, \lambda_{u0}, u_0\}$ визначається фізичною природою БТО.

В процесі функціонування системи керування БТО результати початкової активної ідентифікації можуть бути покращені на основі статистичної пасивної ідентифікації. При виконанні пасивної ідентифікації враховується принцип ближньої дії [12], згідно з яким в процесі координаційного керування БТО доцільно враховувати лише елементи певного кластеру – ближнє оточення керованого елемента. Для цього на основі зареєстрованих у координаторі елемента РКФС даних про стани і впливи елементів кластера здійснюється розрахунок кореляційних функцій між відповідними впливами і станами елемента центра кластера і станами кожного з елементів кластера, перетворення їх на спектральні щільності потужності і знаходження параметрів моделі БТО.

Розглянемо еквівалентну структурну схему керованого елемента БТО, зображену на рис. 2а. Для простоти, враховуючи інтегруючі властивості об'єкта, в ЛСУ використаний закон пропорційного керування і пропорційна функція витрат на виробництво. На рис. 2б зображено відповідну еквівалентну структурну схему некерованого елемента.

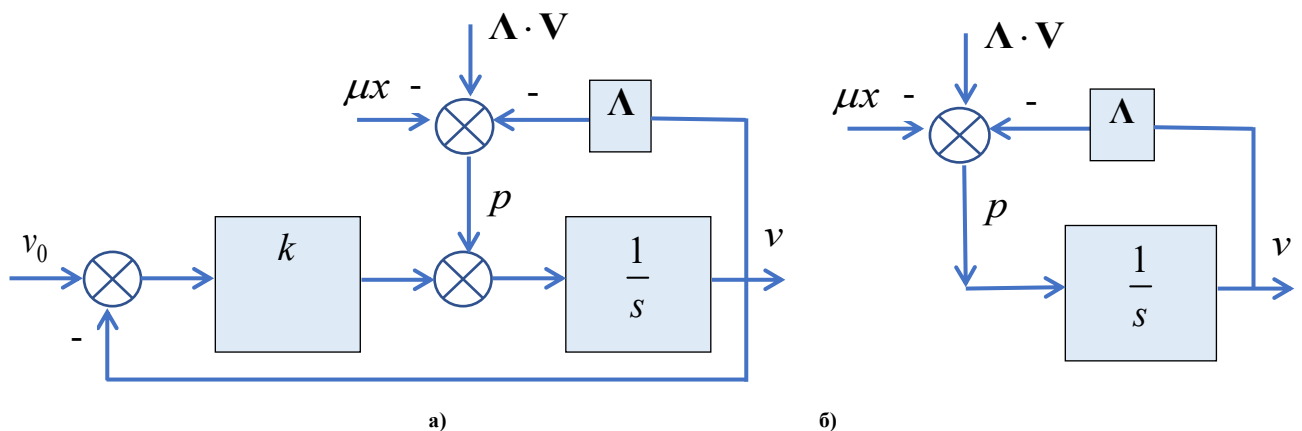


Рис. 2. Еквівалентні схеми елементів керованого (а) і некерованого (б) елементів БТО

Баланс потоків ресурсу до елемента об'єкта від сусідніх елементів, оточуючого середовища і витрат на виробництво [13]

$$p = \lambda_0(u - v) + \sum_{i=1}^{n_\varepsilon} \lambda_i(v_i - v) - \mu x = \left(\lambda_0 u + \sum_{i=1}^{n_\varepsilon} \lambda_i v_i - \mu x \right) - v \sum_{i=0}^{n_\varepsilon} \lambda_i, \quad (6)$$

де n_ε - кількість оточуючих елементів кластера.

Для отримання передатної функції керованого елемента здійснимо еквівалентне перенесення суматорів. Отримаємо схеми, зображені на рис. 3.

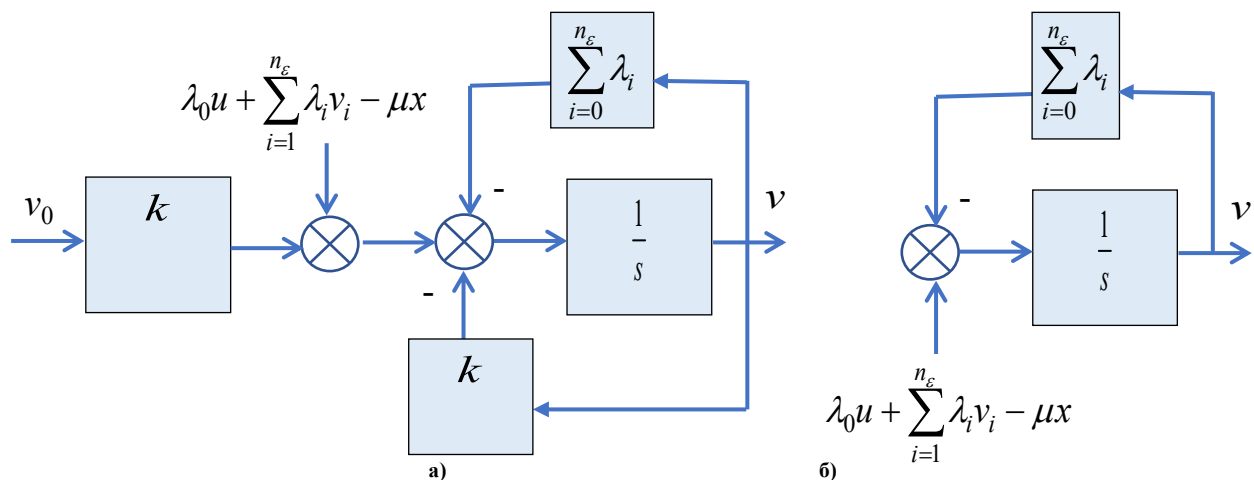


Рис. 3. Перетворені еквівалентні схеми елементів РКФС

Передатна функція замкненого контуру керованого елемента

$$W_a = \frac{1/s}{1 + \left(\sum_{i=0}^{n_\varepsilon} \lambda_i + k \right) 1/s} = \frac{1}{\sum_{i=0}^{n_\varepsilon} \lambda_i + k} \cdot \frac{1}{s+1}. \quad (7)$$

Передатна функція замкненого контуру некерованого елемента

$$W_\sigma = \frac{1/s}{1 + \left(\sum_{i=0}^{n_\varepsilon} \lambda_i \right) 1/s} = \frac{1}{\sum_{i=0}^{n_\varepsilon} \lambda_i} \cdot \frac{1}{s+1}. \quad (8)$$

В усталеному режимі моделі елементів матимуть вигляд відповідно

$$v_{ycm a} = \left[kv_0 + \left(\lambda_0 u + \sum_{i=1}^{n_\varepsilon} \lambda_i v_i - \mu x \right) \right] \frac{1}{\sum_{i=0}^{n_\varepsilon} \lambda_i + k} \quad (9)$$

i

$$v_{ycm \sigma} = \left(\lambda_0 u + \sum_{i=1}^{n_\varepsilon} \lambda_i v_i - \mu x \right) \frac{1}{\sum_{i=0}^{n_\varepsilon} \lambda_i}. \quad (10)$$

Відповідно критерієм оптимального оцінювання параметрів розповсюдження впливів $\Lambda = \{\lambda_i\}$ для керованого елемента є

$$\Delta v = \left| v_{ycm a} - v \right| = \left| \left[kv_0 + \left(\lambda_0 u + \sum_{i=1}^{n_\varepsilon} \lambda_i v_i - \mu x \right) \right] \frac{1}{\sum_{i=0}^{n_\varepsilon} \lambda_i + k} - v \right|. \quad (11)$$

Якщо стан некерованого елемента можна проконтролювати, то критерієм оцінювання буде відповідно

$$\Delta v = \left| v_{ycm \sigma} - v \right| = \left| \left(\lambda_0 u + \sum_{i=1}^{n_\varepsilon} \lambda_i v_i - \mu x \right) \frac{1}{\sum_{i=0}^{n_\varepsilon} \lambda_i} - v \right|. \quad (12)$$

Для керованого елемента точність визначення параметрів $\Lambda = \{\lambda_i\}$ може бути підвищена, якщо є можливість зміни коефіцієнта передачі локального регулятора k . Тоді для кожного значення k_j отримаємо окреме рівняння

$$v_{уст\ a\ j} = \left[k_j v_0 + \left(\lambda_0 u + \sum_{i=1}^{n_\varepsilon} \lambda_i v_{ij} - \mu x \right) \right] \frac{1}{\sum_{i=0}^{n_\varepsilon} \lambda_i + k_j}, \quad (13)$$

а критерієм оптимального оцінювання буде

$$\sigma = \sum_j (v_{уст\ a\ j} - v_j)^2. \quad (14)$$

У локально-ізотропних об'єктах $\forall \lambda_i = \lambda$ і вираз (3.6) спрощується

$$\Delta v_j = |v_{уст\ б} - v_j| = \left| \left[k_j v_{0j} + \left(\lambda_0 u + \lambda \sum_{i=1}^{n_{\varepsilon j}} v_i - \mu_j x_j \right) \right] \frac{1}{n_{\varepsilon j} \lambda + k_j} - v_j \right|. \quad (15)$$

Таким чином, задача зводиться до оцінювання усього двох параметрів: λ і λ_0 . Функція $\Delta v(\lambda, \lambda_0)$ є полімодальною, причому співвідношення екстремумів залежить від значень вхідних даних. Тому для визначення глобального мінімуму доцільно використовувати метод випадкового пошуку. Для збільшення рівномірності пошуку перейдемо до квадратичної оцінки

$$\delta_v = (v_{уст\ б} - v)^2 = \left\{ \left[k_j v_{0j} + \left(\lambda_0 u + \lambda \sum_{i=1}^{n_{\varepsilon j}} v_i - \mu_j x_j \right) \right] \frac{1}{n_{\varepsilon j} \lambda + k_j} - v_j \right\}^2. \quad (16)$$

Перевірка запропонованих методик і алгоритмів здійснювалася на дослідницькому стенді, який був розроблений в рамках договору про співробітництво з ПРАТ Вінницький завод «Маяк». Перевірка показала коректність алгоритмів і відповідного програмного забезпечення.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В результаті проведених досліджень запропоновані методики і алгоритми ідентифікації параметрів багатозональних теплових об'єктів. Методики орієнтовані на застосування у системах децентралізованого координаційного керування станом БТО. Комплексне застосування активної ідентифікації на стадії запуску системи і пасивної ідентифікації в процесі експлуатації дозволяє спростити процес впровадження систем децентралізованого координаційного керування БТО.

Література

1. В. М. Дубовой, М. С. Юхимчук. Децентралізоване координаційне керування розподіленими кібер-фізичними системами з неперервними об'єктами. Вінниця : ВНТУ, 2022. – 230 с.
2. М.С.Юхимчук. Розробка моделей і алгоритмів управління станом розподілених теплових об'єктів: Звіт з НДР № 0121V114654 // М.С.Юхимчук, Д. В. Сембрат, В.М.Дубовой, А. І. Пилявець, А. Р. Басай. Вінниця, 2022
3. R. Zhang, T. Hong. Modeling and Simulation of Operational Faults of HVAC Systems using EnergyPlus, ASHRAE/IBPSA-USA Building Simulation Conference SimBuild, August 10-12, 2016, Salt Lake City, UT.
4. Blum, D., Wang, Z., Weyandt, C., Kim, D., Wetter, M., Hong, T., & Piette, M. A. (2022). Field demonstration and implementation analysis of model predictive control in an office HVAC system. In Applied Energy (Vol. 318, p. 119104). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119104>
5. Pang, X., Wetter, M., Bhattacharya, P., & Haves, P. (2012). A framework for simulation-based real-time whole building performance assessment. In Building and Environment (Vol. 54, pp. 100–108). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.003>.
6. Battiti, R., Sergeyev, Y., Brunato, M., & Kvasov, D. (2016). GENOPT 2016: Design of a generalization-based challenge in global optimization. In AIP Conference Proceedings. NUMERICAL COMPUTATIONS: THEORY AND ALGORITHMS (NUMTA–2016): Proceedings of the 2nd International Conference “Numerical Computations: Theory and Algorithms.” Author(s). <https://doi.org/10.1063/1.4965339>
7. Nouidui, T. S., & Wetter, M. (2014). Tool coupling for the design and operation of building energy and control systems based on the Functional Mock-up Interface standard. In Linköping Electronic

Conference Proceedings. the 10th International Modelica Conference, March 10-12, 2014, Lund, Sweden. Linköping University Electronic Press. <https://doi.org/10.3384/ecp14096311>

8. Kwon, K., Lee, S., & Kim, S. (2022). AI-Based Home Energy Management System Considering Energy Efficiency and Resident Satisfaction. In IEEE Internet of Things Journal (Vol. 9, Issue 2, pp. 1608–1621). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/jiot.2021.3104830>.

9. Luo, N., Wang, Z., Blum, D., Weyandt, C., Bourassa, N., Piette, M. A., & Hong, T. (2022). A three-year dataset supporting research on building energy management and occupancy analytics. In Scientific Data (Vol. 9, Issue 1). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01257-x>

10. Мокін, Б. І. Математичні методи ідентифікації динамічних систем : навчальний посібник / Б. І. Мокін, В. Б. Мокін, О. Б. Мокін. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 260 с.

11. Мокін О. Б. Метод ідентифікації моделі авторегресії-ковзного середнього АРКС(р, q) з довільними значеннями порядків р, q, який узагальнює методику Юла – Уокера. / О. Б. Мокін, В. Б. Мокін, Б. І. Мокін. // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. - 2014. - Вип. 2. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNTUV_2014_2_11.

12. M. Yukhymchuk, V. Dubovoi, V. Kovtun, "Decentralized Coordination of Temperature Control in Multiarea Premises", Complexity, vol. 2022, Article ID 2588364, 18 pages, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/2588364/>

13. Fundamentals of Engineering Thermodynamics (2014) Michael J. Moran, Howard N. Shapiro, Daisie D. Boettner, Margaret B. Bailey. Wiley. 1062 P.

References

1. V. M. Dubovoi, M. S. Yukhymchuk. Detsentralizovane coordynatsiyne ceruvannya rozpodilenumu kiber-phizuchnumu systemamu neperervnumu obektamu. Vinnytsa VNTY, 2022. – 230 с.

2. M.S.Yukhymchuk. Rozrobka modeley i alhorytmiv upravlinnya stanom rozpodilykh teplovykh ob'yektiv: Zvit z NDR № 0121V114654 // M.S.Yukhymchuk, D. V. Sembrat, V.M.Dubovoy, A. I. Pylyavets', A. R. Basay. Vinnytsya, 2022

3. R. Zhang, T. Hong. Modeling and Simulation of Operational Faults of HVAC Systems using EnergyPlus, ASHRAE/IBPSA-USA Building Simulation Conference SimBuild, August 10-12, 2016, Salt Lake City, UT.

4. Blum, D., Wang, Z., Weyandt, C., Kim, D., Wetter, M., Hong, T., & Piette, M. A. (2022). Field demonstration and implementation analysis of model predictive control in an office HVAC system. In Applied Energy (Vol. 318, p. 119104). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119104>

5. Pang, X., Wetter, M., Bhattacharya, P., & Haves, P. (2012). A framework for simulation-based real-time whole building performance assessment. In Building and Environment (Vol. 54, pp. 100–108). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.003>.

6. Battiti, R., Sergeev, Y., Brunato, M., & Kvasov, D. (2016). GENOPT 2016: Design of a generalization-based challenge in global optimization. In AIP Conference Proceedings. NUMERICAL COMPUTATIONS: THEORY AND ALGORITHMS (NUMTA–2016): Proceedings of the 2nd International Conference “Numerical Computations: Theory and Algorithms.” Author(s). <https://doi.org/10.1063/1.4965339>

7. Nouidui, T. S., & Wetter, M. (2014). Tool coupling for the design and operation of building energy and control systems based on the Functional Mock-up Interface standard. In Linköping Electronic Conference Proceedings. the 10th International Modelica Conference, March 10-12, 2014, Lund, Sweden. Linköping University Electronic Press. <https://doi.org/10.3384/ecp14096311>

8. Kwon, K., Lee, S., & Kim, S. (2022). AI-Based Home Energy Management System Considering Energy Efficiency and Resident Satisfaction. In IEEE Internet of Things Journal (Vol. 9, Issue 2, pp. 1608–1621). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/jiot.2021.3104830>.

9. Luo, N., Wang, Z., Blum, D., Weyandt, C., Bourassa, N., Piette, M. A., & Hong, T. (2022). A three-year dataset supporting research on building energy management and occupancy analytics. In Scientific Data (Vol. 9, Issue 1). Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01257-x>

10. Mokin, B. I. Matematychni metody identyfikatsiyi dynamichnykh system : navchal'nyy posibnyk / B. I. Mokin, V. B. Mokin, O. B. Mokin. – Vinnytsya : VNTU, 2010. – 260 с.

11. Mokin O. B. Metod identyfikatsiyi modeli avtorehresiyi-kovznoho seredn'oho ARKS(r,q) z dovil'nymy znachennyamy poryadkiv r, q, yakyy uzahal'nyuye metodyku Yula – Uokera. / O. B. Mokin, V. B. Mokin, B. I. Mokin. // Naukovi pratsi Vinnyts'kohoho natsional'noho tekhnichnoho universytetu. - 2014. - Vyp. 2. - Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNTUV_2014_2_11.

12. M. Yukhymchuk, V. Dubovoi, V. Kovtun, "Decentralized Coordination of Temperature Control in Multiarea Premises", Complexity, vol. 2022, Article ID 2588364, 18 pages, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/2588364/>

13. Fundamentals of Engineering Thermodynamics (2014) Michael J. Moran, Howard N. Shapiro, Daisie D. Boettner, Margaret B. Bailey. Wiley. 1062 P.