

ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНЕ КООРДИНАЦІЙНЕ КЕРУВАННЯ НЕПЕРЕРВНИМИ БАГАТОЗОНАЛЬНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

В. М. Дубовой, доктор технічних наук, професор

E-mail: v.m.dubovoy@gmail.com

М. С. Юхимчук, кандидат технічних наук, доцент

E-mail: umcmasha@gmail.com

Вінницький національний технічний університет

Анотація. Розподілені неперервні багатозональні об'єкти розповсюджені як у виробництві, так і у побуті. Централізовані та ієрархічні системи керування ними мають жорстку структуру зв'язків і їх важко масштабувати. Це ускладнює їх застосування до об'єктів з частими і швидкими змінами структури та вимог. Авторами запропоновано новий підхід до децентралізованої координації керування багатозональними тепловими об'єктами, проте проблема координаційного керування станом неперервних багатозональних розподілених об'єктів з динамічною структурою та змінними вимогами досі не знайшла ефективного вирішення. Метою роботи є узагальнення підходу до децентралізованої координації керування розподіленими системами з багатозональними об'єктами неперервного типу. Результати роботи ґрунтуються на методах теорії автоматичного керування, теплотехніки та імітаційному моделюванні. У роботі узагальнено методологію децентралізованої координаційного керування, зокрема модель розподіленої системи керування багатозональним неперервним об'єктом, метод децентралізованої координації на основі глобально-локального критерію, принцип ближньої дії, підходи до активної і пасивної ідентифікації параметрів системи, метод прогнозування стану системи на основі аналізу просторово-часового спектру станів об'єкта. На основі теоретичних досліджень запропонована децентралізована система керування мікрокліматом у приміщеннях. Подальші дослідження передбачається спрямувати на задачі децентралізованої координації нелінійними об'єктами та на розширення сфери практичного застосування децентралізованої координації.

Ключові слова: *децентралізована координація, багатозональні об'єкти, принцип ближньої дії, локально-глобальний критерій*

Актуальність. Розподілені об'єкти розповсюджені як у виробництві, так і у побуті. Серед таких об'єктів виділяються неперервні багатозональні об'єкти, в яких в кожній зоні потрібно підтримувати різний стан, проте через слабку відокремленість зон їх взаємний вплив ускладнює задачу забезпечення керування.

Прикладом таких об'єктів є багатозональні житлові і виробничі приміщення, камери для тепло-вологісної обробки сільськогосподарської продукції (сушильні та пророщувальні камери) тощо. Проте задача координації керування багатозональними приміщеннями є дуже актуальною. У роботі [1] досліджено ефективність систем координаційного керування (СКК) для забезпечення теплового комфорту (HVAC) в реальній офісній будівлі з використанням *Modelica-based toolchain*. Було показано, що СКК економить приблизно 40 % енергії порівняно з існуючим керуванням. Нові підходи до керування багатозональними об'єктами зумовлені здешевленням та мініатюризацією мікроконтролерів, можливістю включати мікроконтролери до складу давачів і виконавчих пристроїв польового рівня, бурхливими темпами розвитку комунікаційних систем. Ці особливості зумовлюють потребу у новому погляді на задачу побудови розподілених систем керування багатозональними об'єктами у напрямку децентралізованого координаційного керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз розподілених систем координаційного керування виконано в [2]. Найбільш узагальнені підходи до координації локальних систем керування (ЛСК) базуються на централізованій (для невеликої кількості ЛСК і невеликій відстані між ними) або ієрархічній (для великої кількості ЛСК або великій відстані між ними) архітектурі координації [3, 4].

Однак централізовані та ієрархічні системи мають жорстку структуру зв'язків і їх важко масштабувати. Це ускладнює їх застосування до об'єктів з частими і швидкими змінами структури та вимог.

Перспективним способом вирішення проблеми є використання децентралізованої координації за допомогою Smart-координаторів у кожній локальній системі керування. Найчастіше така координаційна архітектура використовується з дуже великою кількістю відносно автономних об'єктів, наприклад, в енергетиці [5, 6]. У роботах [7, 8] авторами запропоновано новий підхід до децентралізованої координації керування багатозональними тепловими об'єктами.

Незважаючи на значну кількість робіт з дослідження децентралізованих систем координації, проблема координаційного керування станом неперервних багатозональних розподілених об'єктів з динамічною структурою та змінними вимогами досі не знайшла ефективного вирішення. Крім того, в існуючих роботах рідко враховується взаємний вплив координованих об'єктів один на одного.

Мета дослідження – узагальнення підходу до децентралізованої координації керування для підвищення структурної гнучкості, надійності та ефективності координаційного керування розподіленими системами з багатозональними об'єктами неперервного типу.

Матеріали та методи дослідження. Для досягнення мети в роботі розв'язані такі задачі узагальнення компонентів методології децентралізованої координації:

- методу децентралізованої координації на основі глобально-локального критерію,
- принципу ближньої дії,
- підходів до активної і пасивної ідентифікації параметрів системи,
- методу прогнозування стану системи на основі аналізу просторово-часового спектру станів об'єкта.

Результати досліджень та їх обговорення. Методологія децентралізованої координації систем з багатозональними неперервними об'єктами (БНО) є комплексом методів принципів і підходів, яка реалізується у вигляді архітектури системи, критеріїв ефективності і алгоритмів основних процесів.

Основою усіх компонентів методології є модель багатозонального неперервного об'єкта, яка ґрунтується на моделі процесів у окремих зонах і аналізі взаємодії зон. Зону БНО разом з усіма контрольованими і неконтрольованими впливами на неї будемо називати елементом БНО. Схема окремого елемента БНО наведена на рис.1,а.

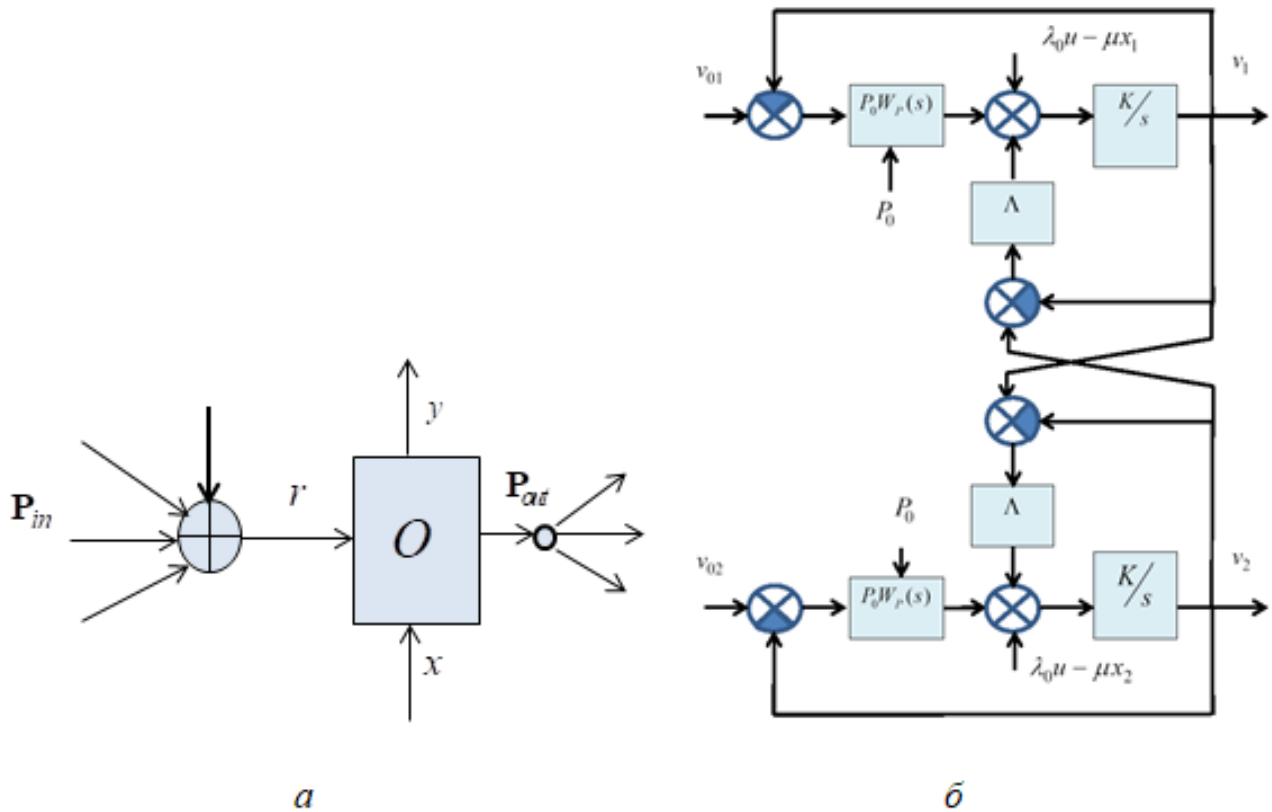


Рис. 1. Модель БНО:

a – елемент розподіленого технологічного об'єкта; *б* – модель взаємодії елементів

В зоні *O* здійснюється перетворення сировини *x* на продукт *y* відповідно до виробничої функції $y = w(x, s, T)$. Стан зони *s* залежить від накопиченого ресурсу *v*. У найпростішому випадку кількість накопиченого ресурсу *v* є параметром стану елемента. На виробництво витрачається час *T* і частина $\Delta v(x, s, T)$ накопиченого ресурсу. Особливістю неперервних багатозональних об'єктів є наявність потоків перетікання ресурсу між зонами $p_{ij}(s_i, s_j, \Lambda_{ij})$, де *i, j* - номери зон; Λ_{ij} - параметр розповсюдження. У результаті вхідний до зони БНО потік ресурсу *r* є сумою потоку потужністю p_0 , який надходить від ЛСК, і потоків ресурсу від сусідніх елементів, які утворюють вектор \mathbf{P}_{in} . Надлишок ресурсу \mathbf{P}_{out} надходить до інших сусідніх елементів.

На кожен елемент об'єкта впливають усі керовані елементи. Модель взаємодії елементів у формі структурно-функціональної схеми показана на рис. 1,б. На схемі:

$W_P(s)$ - передатна функція регулятора; K/s - передатна функція елемента (накопичення ресурсу); Λ - параметр розповсюдження впливів елементів один на одного; v - стан елемента; v_0 - параметр координації (заданий стан елемента); u - стан зовнішнього середовища; μx - витрати накопиченого ресурсу на переробку сировини x

Для лінійного об'єкта рівняння зміни кількості накопиченого ресурсу [8]

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

де t_k - момент впливу керування на k -й керований елемент. λ - коефіцієнт переносу; $d_{kj} = |\mathbf{Z}_k - \mathbf{Z}_j|$ - відстань від k -го місця керівного впливу; P_{0k} - ресурс; t - проміжок часу від моменту впливу на k -й елемент. C_j - ресурсоємність j -го елемента. Вплив від елемента з координатами \mathbf{Z}_k розповсюджується поступово відповідно до рівняння переносу (рівняння Бюргерса, зокрема рівняння дифузії і теплопровідності).

Для забезпечення швидкодії і покращення економічних характеристик систем децентралізованої координації систем з БНО запропоновано принцип ближньої дії [7]. Принцип виражається в кластеризації системи на ε -області, в яких взаємний вплив елементів є суттєвим і які можуть перетинатися. Величина взаємного впливу елементів експоненціально спадає залежно від просторової відстані між елементами. З рівняння (1) випливає, що гранична відстань d_m до елементів, вплив на які вважається суттєвим, задовольняє співвідношення

$$\frac{e^{-\frac{d_m^2}{4\lambda\tau_k}}}{8(\pi\lambda\tau_k)^{3/2}} > \varepsilon, \quad (2)$$

де $\varepsilon < 1$ - показник значущості.

Проведений аналіз показує, що головним чинником ефективності керування БНО є стан його зон і, відповідно, головним критерієм координації є відхилення вектору стану зон об'єкта \mathbf{S} від вектору бажаних станів \mathbf{F} . Таким чином, задача

координації може бути зведена до багатовимірної однокритеріальної оптимізації за критерієм мінімуму середнього квадратичного відхилення (RMSE) стану зон БНО від бажаних станів

$$E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_i - f_i)^2}, \quad s_i \in \mathbf{S}, \quad f_i \in \mathbf{F}, \quad (3)$$

з обмеженням $\mathbf{S} \subset \mathbf{S}_{don}$ - обмеження функціональної безпеки, а параметрами оптимізації є компоненти вектору $\mathbf{V}_0 = C(\mathbf{F}, \mathbf{V}, M)$ станів зон БНО, де C - функція координації; M - модель системи. Решта факторів: величина керівного впливу, витрати ресурсу, інші експлуатаційні показники виносяться у додаткові обмеження задачі оптимізації.

При децентралізованій координації є доцільним застосування локально-глобальних критеріїв. Сутність локально-глобального критерію полягає в тому, що оптимізація здійснюється за глобальним в межах одного кластера (ε -області) критерієм, тобто локально по відношенню до системи в цілому. При застосуванні локально-глобального критерію використовується принцип компромісу з використанням вагових коефіцієнтів локальних критеріїв. Тоді локально-глобальний критерій децентралізованої координації у системі з адитивним результатом матиме вигляд

$$E_i = \sqrt{\frac{1}{n_\varepsilon} \sum_{k=1}^{n_\varepsilon} \rho_{ik} (s_k - f_k)^2} \quad (4)$$

де ρ_{ik} - вагові коефіцієнти елементів ε -області i -го елемента, $\rho_{ik} : \begin{cases} =1 & \text{при } k=i \\ <1 & \text{при } k \neq i \end{cases}; n_\varepsilon$

- кількість елементів у ε -області.

У [7] доведено, що за умови перекриття кластерів в результаті ітеративної процедури координація на основі глобально-локального критерію сходиться до результату глобальної координації.

Метод децентралізованої координації керування системами з БНО передбачає: локальне керування станом елементів системи; введення до схеми кожної локальної системи керування окремих координаторів; забезпечення інформаційного зв'язку

між координаторами типу «один до одного» в зоні ближньої дії кожного елемента системи; ідентифікацію параметрів елементів і їх взаємного впливу; прогнозування стану системи; обмін даними між координаторами щодо параметрів керованих елементів, зв'язку між ними, поточного і заданого станів, параметрів виробничої функції і потоків сировини; оптимізацію локальних керувань за локально-глобальними критеріями; циклічна ковзна координація з встановленням такої процедури послідовної координації кожним координатором, щоб у кожній зоні ближньої дії одночасно здійснювалася координація тільки одним координатором.

Структурна гнучкість децентралізованої координації ґрунтується на автоматичному визначенні параметрів об'єкта при зміні його структури шляхом розв'язання задачі ідентифікації. Для цього здійснюється активна і пасивна ідентифікація параметрів об'єкта керування. Активна ідентифікація використовується переважно на початковому етапі функціонування системи або у випадку зміни її структури. Пасивна ідентифікація використовується в процесі її експлуатації для підвищення точності оцінювання характеристик та врахування їх трендів.

В основі активної ідентифікації лежить процедура тестування, яка передбачає зміни стану кожним координатором по черзі на величину, яка дозволяє в ході перехідного процесу здійснити достатню для статистичної обробки кількість відліків стану елементів, і реєстрацію всіма координаторами станів керованих ними елементів об'єкта. Параметри БНО визначаються з системи рівнянь моделі системи. 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 БНО, а m - кількість відліків станів елементів, зроблених в процесі активної ідентифікації. Оскільки кількість невизначених параметрів не дорівнює кількості рівнянь, пошук множини параметрів $\{\mathbf{C}, \mathbf{d}, \mathbf{r}, \lambda, \lambda_u, u\}$ доцільно здійснювати методом оптимального оцінювання за критерієм RMSE розрахункового $v_i(\tau_l)$ і реального $\tilde{v}_i(\tau_l)$ станів елементів БНО в моменти τ_l . Пасивна ідентифікація

здійснюється періодично в процесі роботи системи з метою уточнення та відстежування можливих змін параметрів системи.

Прогнозування стану системи ґрунтується на моделі системи з БНО і просторово-часовому спектрі станів і впливів, який дозволяє оптимізувати координацію керування на інтервалі кореляції. Баланс спектральних щільностей ресурсу елемента (5) дозволяє знайти спектральні щільності факторів впливу на прогнозований стан:

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{p_0v_0}(\omega, \Psi) = G_{v_0v_0}(\omega, \Psi) \cdot W_{v_0p_0}(\omega) \\ G_{rr}(\omega, \Psi) = G_{p_0v_0}(\omega, \Psi) + G_{uu}(\omega, \Psi) + G_{xx}(\omega, \Psi) + \sum_{f \in \varepsilon} G_{p_f p_f} + \\ \quad + 2G_{p_0u}(\omega, \Psi) + 2G_{p_0x}(\omega, \Psi) + 2 \sum_{f \in \varepsilon} G_{p_0 p_f}(\omega, \Psi) - \\ \quad - 2G_{ux}(\omega, \Psi) + 2 \sum_{f \in \varepsilon} G_{up_f}(\omega, \Psi) - 2 \sum_{f \in \varepsilon} G_{p_f x}(\omega, \Psi) \quad , \quad (5) \\ G_{vv}(\omega, \Psi) = G_{rr}(\omega, \Psi) \cdot \left(\frac{1}{T\omega} \right)^2 \\ G_{p_f p_f}(\omega, \Psi) = \int_0^{\infty} \left\{ \iiint_{\Omega} [R_{p_f p_f}(\tau, \mathbf{Z}) e^{-j\Psi \mathbf{Z}}] e^{-j\omega \tau} d\mathbf{Z} \right\} d\tau \end{array} \right.$$

де ω - часова кутова частота; Ψ - вектор просторових кутових частот; G_{rr} - авто-спектральна щільність потужності загального вхідного ресурсу; $G_{p_0p_0}$ - авто-спектральна щільність потужності керівного впливу (зовнішнього ресурсу); G_{uu} - авто-спектральна щільність потужності збурень; G_{vv} - авто-спектральна щільність потужності стану (накопичений ресурс); G_{xx} - авто-спектральна щільність потужності використання та/або розсіювання ресурсу; $G_{p_{f_0} p_{f_0}}$ - авто-спектральна щільність вхідного ресурсу з урахуванням розповсюдження; G_{ux} - взаємна спектральна щільність потужності збурення і сировини,

Просторова складова спектральних щільностей визначається геометричними характеристиками розподіленого об'єкта і розташуванням точок прикладення керуючого впливу. Вплив зовнішнього збурення можна вважати білим шумом у часі, амплітуда якого максимальна на границях об'єкта і експоненціально спадає

при віддаленні від границь. Результати моделювання процесу координації показують, що просторовий розподіл ресурсу є сумою експоненціально спадних функцій з модами в точках прикладання впливу.

Визначення взаємних спектральних щільностей потужності всіх впливових факторів і параметрів стану БНО дозволяє на основі рівняння Вінера-Хінчина перейти до матриці парної кореляції факторів і побудувати відповідне рівняння множинної регресії

$$\begin{aligned}
 v(\tau, \mathbf{Z}_i) = & v(0, \mathbf{Z}_i) + K_{vu}(\tau, \mathbf{Z}_i) \sqrt{\frac{K_{vv}(0, \mathbf{Z}_i)}{K_{uu}(0, \mathbf{Z}_i)}} [u(0, \mathbf{Z}_i) - m_u(\mathbf{Z}_i)] + \\
 & + K_{vx}(\tau, \mathbf{Z}_i) \sqrt{\frac{K_{vv}(0, \mathbf{Z}_i)}{K_{xx}(0, \mathbf{Z}_i)}} [x(0, \mathbf{Z}_i) - m_x(\mathbf{Z}_i)] + \\
 & + \sum_{j \in \mathcal{E}(\mathbf{Z}_i)} \gamma(\mathbf{Z}_i - \mathbf{Z}_j) K_{vu}(\tau + \tau_{0j}, \mathbf{Z}_j) \sqrt{\frac{K_{vv}(0, \mathbf{Z}_j)}{K_{uu}(0, \mathbf{Z}_j)}} [u(\tau - \tau_{0j}, \mathbf{Z}_j) - m_u(\mathbf{Z}_j)] + \\
 & + \sum_{j \in \mathcal{E}(\mathbf{Z}_i)} \gamma(\mathbf{Z}_i - \mathbf{Z}_j) K_{vx}(\tau + \tau_{0j}, \mathbf{Z}_j) \sqrt{\frac{K_{vv}(0, \mathbf{Z}_j)}{K_{xx}(0, \mathbf{Z}_j)}} [x(\tau - \tau_{0j}, \mathbf{Z}_j) - m_x(\mathbf{Z}_j)]
 \end{aligned} \tag{6}$$

де $K(\tau, \mathbf{Z})$ - просторово-часова коваріаційна функція.

Проведене дослідження характеристик прогнозування стану системи на моделі у середовищі Scilab. Дослідження показало RMSE=14 %, що прийнятно для використання результатів прогнозування для цілей координаційного керування.

Розроблений метод децентралізованої координації керування системами з багатозональними об'єктами передбачає ковзний процес керування послідовністю координації. Його застосування спрямоване на розв'язання однієї з проблем децентралізованої координації – проблеми забезпечення стійкості системи. Проблема зумовлена багатозв'язністю системи, а саме наявністю «фізичних» взаємних впливів елементів БНО і інформаційних зв'язків між координаторами. Застосування ковзного процесу дозволяє зменшити кількість інформаційних зв'язків, обмеживши їх координаторами \mathcal{E} -області, причому у кожний момент часу розрахунок оптимальної координації здійснюється лише в одному координаторі.

Архітектура системи децентралізованої координації системи багатозональними об'єктами зображена на рис. 2.

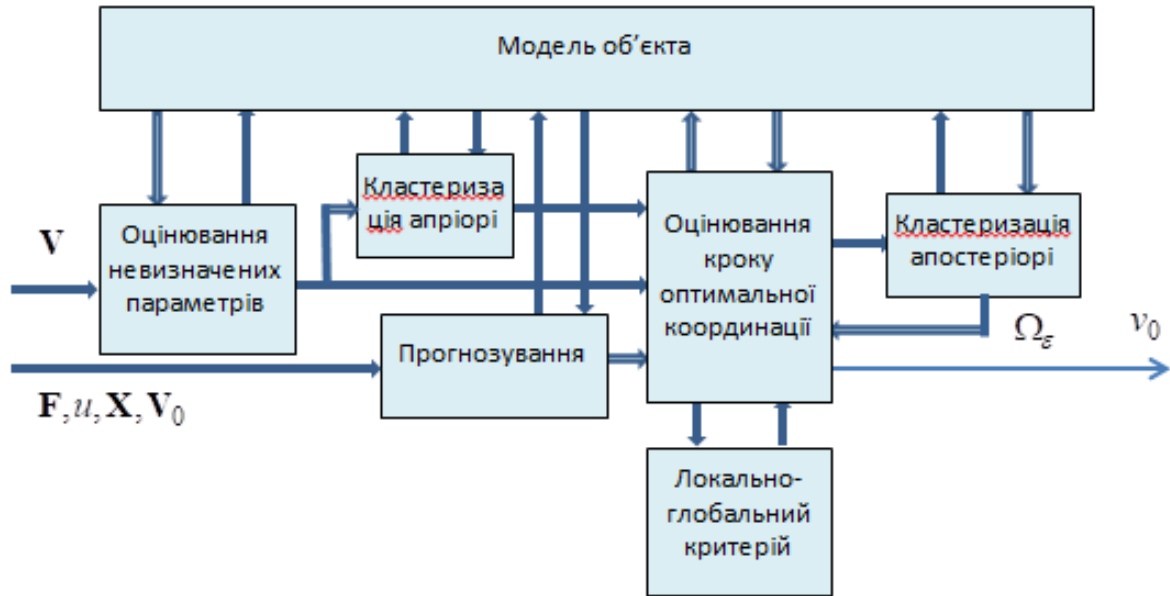


Рис. 2. Схема взаємодії модулів координатора

Ковзний процес координації передбачає ковзне виконання усіх модулів координатора. Зокрема задача ковзного оцінювання розв'язується на декількох етапах: ідентифікація параметрів БНО, пошук оптимального параметра координації в матричному вигляді [7]:

$$\delta(\mathbf{V}_0) = [\tilde{\mathbf{V}} - \mathbf{M}_1(\mathbf{V}_0)]^T \mathbf{K}_{\tilde{\mathbf{V}}}^{-1} [\tilde{\mathbf{V}} - \mathbf{M}_1(\mathbf{V}_0)], \quad (12)$$

де $\mathbf{K}_{\tilde{\mathbf{V}}}$ – коваріаційна матриця похибок результатів вимірювань.

Розроблені моделі і алгоритми реалізовані у системі імітаційного моделювання децентралізованої координації системи на платформі Scilab/Xcos. Це дозволяє як здійснювати чисельні експерименти і аналіз процесів децентралізованої координації, так і створювати на основі імітаційних моделей програмно-апаратні засоби децентралізованих систем керування та здійснювати перевірку теорії на реальних об'єктах.

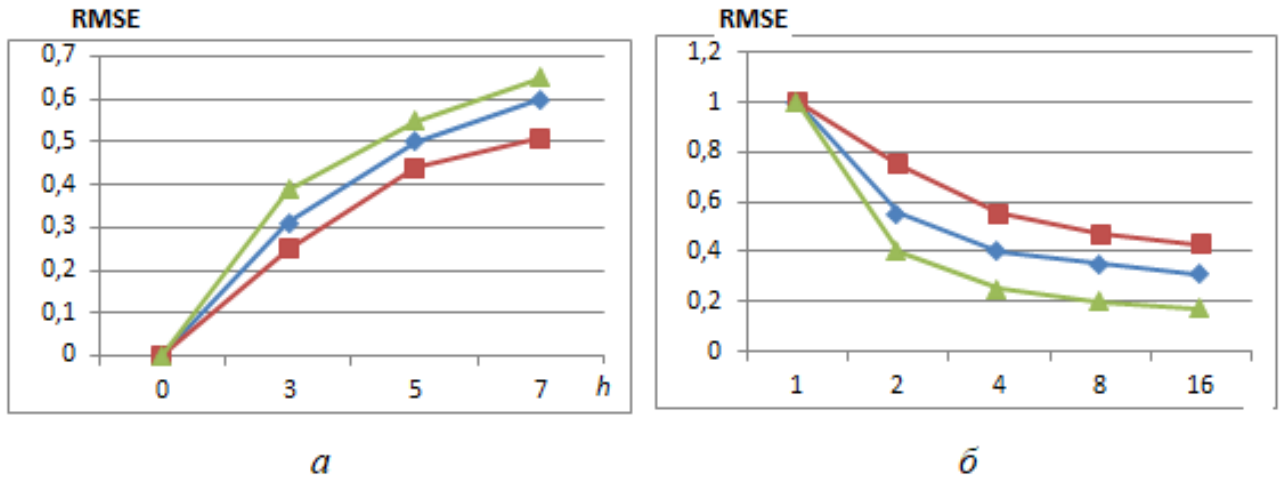


Рис. 3. Залежності рівня координації від відстані між керованими елементами і кількості хвиль координації

Ефективність координації є комплексним показником, який включає показники ефективності виробництва, надійність системи, складність її реалізації і підтримки, організаційні аспекти тощо. Загальна оцінка ефективності координації є складною задачею, яка не має загального універсального розв'язку, проте можливо оцінити показник рівня координації. Результати моделювання показують, що при великих значеннях параметра розповсюдження і відстані між керуючими елементами похибка координації швидко зростає. Збільшення кількості хвиль координації при використанні хвильового алгоритму дозволяє зменшити похибку, проте для використаних у моделі параметрів системи – лише на 50 %. Відповідно, залежність рівня координації від відстані між керованими елементами r_{ij} і кількості хвиль координації h наведене на рис. 3.

Для розв'язання проблеми забезпечення індивідуального теплового комфорту і ефективного використання електричної енергії запропонована концепція Mobile Smart Heaters – система «розумних» нагрівачів з децентралізованою координацією. На рис. 4 показано варіант схеми системи децентралізованого керування температурою повітря у багатозональних приміщеннях, реалізований в запропонованому способі. У показаному варіанті система містить три пересувних нагрівача: MSH-1, MSH-2, MSH-3. Кожен пересувний нагрівач містить: блок

нагрівання повітря 1, контролер 2, сенсор температури блоку нагрівання повітря 3, регулятор 4, сенсор температури повітря у приміщенні 5, інтерфейс 6.

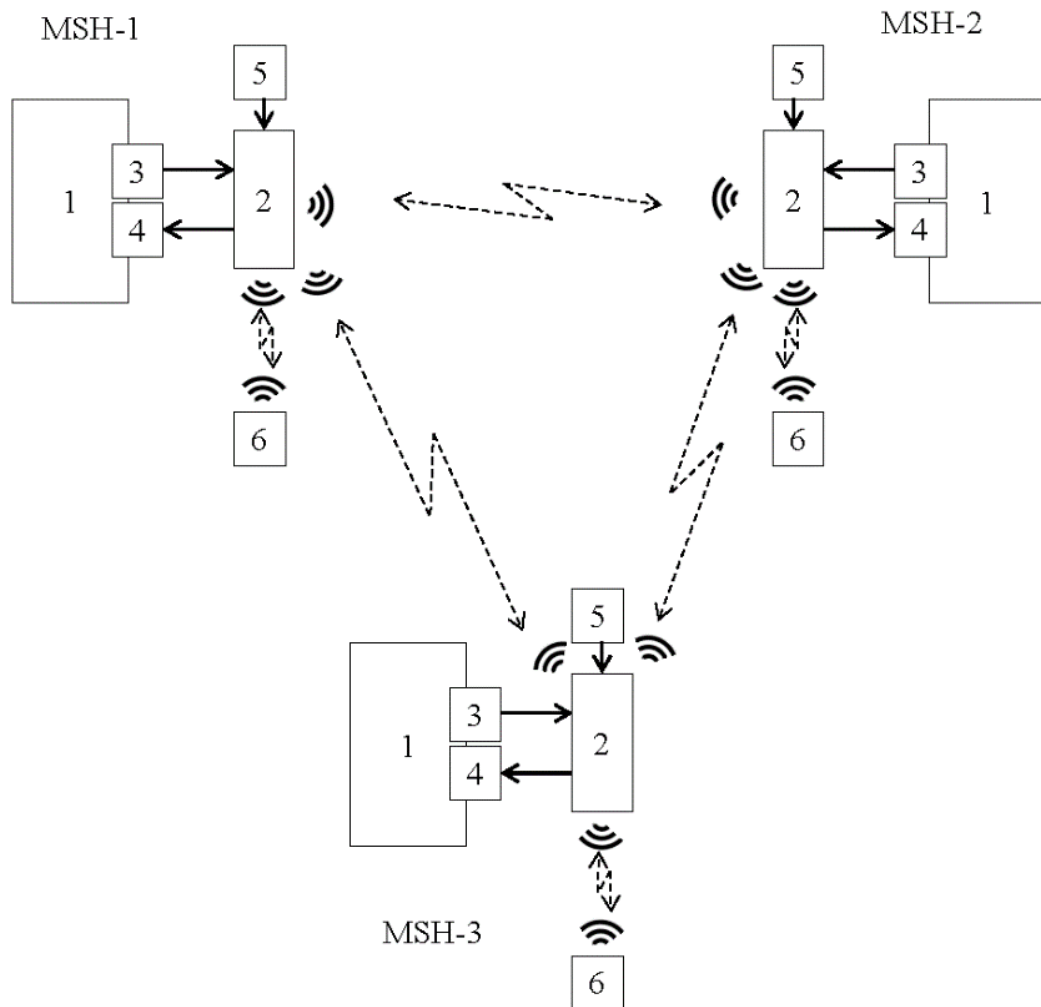


Рис. 4. Схема взаємодії Mobile Smart Heaters

Процес оптимізації режиму роботи MSH здійснюють по чергові, починаючи з того пересувного нагрівача, якого було останнім увімкнено або пересунуто, шляхом передавання маркера між контролерами MSH. Черговість визначається на основі матриці параметрів зв'язку між зонами приміщення.

Висновки і перспективи.

Проведені дослідження дозволяють узагальнити підхід до децентралізованої координації керування багатозональними тепловими об'єктами для підвищення структурної гнучкості, надійності та ефективності координаційного керування розподіленими системами з багатозональними об'єктами неперервного типу. Подальші дослідження передбачається спрямувати на задачі децентралізованої

координації нелінійними об'єктами та на розширення сфери практичного застосування децентралізованої координації.

Список використаних джерел

1. D. Blum, Z. Wang, C. Weyandt et al., "Field demonstration and implementation analysis of model predictive control in an office HVAC system," in *Applied Energy*, vol. 318, Elsevier BV, Article ID 119104, 2022.
2. X. Ge, Q.-L. Han, L. Ding, Y.-L. Wang, and X.-M. Zhang, "Dynamic event-triggered distributed coordination control and its applications: a survey of trends and techniques," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol. 50, no. 9, pp. 3112–3125, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2020.
3. M. Vasak, A. Banjac, N. Hure, H. Novak, D. Marusic, and V. Lesic, "Modular hierarchical model predictive control for coordinated and holistic energy management of buildings," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 36, no. 4, pp. 2670–2682, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2021.
4. R. Yuan and H. Li, "A multidisciplinary coupling relationship coordination algorithm using the hierarchical control methods of complex systems and its application in multidisciplinary design optimization," in *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 9, no. 1, SAGE Publications, Article ID 168781401668522, 2017.
5. S. Shrivastava and B. Subudhi, "Comprehensive review on hierarchical control of cyber-physical microgrid system," in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 14, no. 26, pp. 6397–6416, Institution of Engineering and Technology (IET), 2020.
6. Y. Zhang and W. Wei, "Decentralized coordination control of PV generators, storage battery, hydrogen production unit and fuel cell in islanded DC microgrid," in *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 15, pp. 8243–8256, Elsevier BV, 2020.
7. P. Yang, Y. Xia, M. Yu, W. Wei, and Y. Peng, "A decentralized coordination control method for parallel bidirectional power converters in a hybrid AC–DC microgrid," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 8, pp. 6217–6228, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2018.
8. Дубовой В. М., Юхимчук М. С. Децентралізоване координаційне керування розподіленими кібер-фізичними системами з неперервними об'єктами: монографія. Вінниця : ВНТУ, 2022. 230 с.
9. Yukhymchuk M., Dubovoi V., Kovtun V. «Decentralized Coordination of Temperature Control in Multiarea Premises». *Complexity*. 2022. ID 2588364, 18 pages, <https://doi.org/10.1155/2022/2588364>.

References

1. D. Blum, Z. Wang, C. Weyandt et al. (2022). Field demonstration and implementation analysis of model predictive control in an office HVAC system. *Applied Energy*, 318, Elsevier BV, Article ID 119104.
2. X. Ge, Q.-L. Han, L. Ding, Y.-L. Wang, and X.-M. Zhang (2020). Dynamic event-triggered distributed coordination control and its applications: a survey of trends and

techniques. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 50 (9), 3112–3125,

3. M. Vasak, A. Banjac, N. Hure, H. Novak, D. Marusic, V. Lesic (2021). Modular hierarchical model predictive control for coordinated and holistic energy management of buildings. IEEE Transactions on Energy Conversion, 36 (4), 2670–2682.

4. R. Yuan, H. Li (2017). A multidisciplinary coupling relationship coordination algorithm using the hierarchical control methods of complex systems and its application in multidisciplinary design optimization. Advances in Mechanical Engineering, 9 (1), SAGE Publications, Article ID 168781401668522.

5. S. Shrivastava, B. Subudhi (2020). Comprehensive review on hierarchical control of cyber-physical microgrid system. IET Generation, Transmission & Distribution, 14 (26), 6397–6416.

6. Y. Zhang, W. Wei (2020). Decentralized coordination control of PV generators, storage battery, hydrogen production unit and fuel cell in islanded DC microgrid. International Journal of Hydrogen Energy, 45 (15), 8243–8256.

7. P. Yang, Y. Xia, M. Yu, W. Wei, Y. Peng (2018). A decentralized coordination control method for parallel bidirectional power converters in a hybrid AC–DC microgrid. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 65 (8), 6217–6228.

8. Dubovoi, V. M., Yukhymchuk, M. S. (2022). Detsentralizovane koordynatsiine keruvannia rozpodilenyi kiber-fizychnymi systemamy z neperervnymi ob'iektamy [Decentralized coordination control of distributed cyber-physical systems with continuous objects]. Vinnytsia : VNTU, 230.

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

DECENTRALIZED COORDINATED CONTROL OF CONTINUOUS MULTI-ZONE OBJECTS

V. Dubovoi, M. Yukhymchuk

Abstract. *Distributed continuous multi-zone objects are widespread both in production and in everyday life. Centralized and hierarchical control systems have a rigid relationship structure and are difficult to scale. This complicates their application to objects with frequent and rapid changes in its structure and requirements. The authors have proposed a new approach to the decentralized coordination of control of multi-zone thermal objects, however, the problem of coordination control of the state of continuous multi-zone distributed objects with a dynamic structure and variable requirements has not yet been effectively solved. The aim of the work is to generalize the approach to decentralized coordination of control of distributed systems with multi-zone objects of continuous type. The results of the work are based on the methods of the automatic control theory, heat engineering and simulation modeling. The methodology of decentralized coordination control, in particular the model of the distributed control system of a multi-zonal continuous object, the method of decentralized coordination based on the global-local criterion, the principle of close action, the approaches to active and passive identification of system parameters, the method of forecasting the state of the system based*

on analysis of spatial-time spectrum of object states were generalized in the work. Based on theoretical studies, a decentralized indoor microclimate control system was proposed. Further research is expected to be directed to the tasks of decentralized coordination by non-linear objects and to the expansion of the scope of practical application of decentralized coordination.

Key words: *decentralized coordination, multi-zonal objects, principle of close action, local-global criterion*