

## ПРИНЦИП БЛИЖНЬОЇ ДІЇ В ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМАХ ІЗ НЕПЕРЕРВНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

**Марія Юхимчук**

кандидат технічних наук, доцент

Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна, 21000, [umcmasha@gmail.com](mailto:umcmasha@gmail.com)

**ORCID: 0000-0002-8131-9739**

Децентралізовані системи управління передбачають наявність засобів координаційного управління у кожного елемента системи. Такі системи утворюються переважно при застосуванні інтелектуальних мультиагентних технологій керування. Найчастіше мультиагентна координаційна архітектура використовується з дуже великою кількістю відносно автономних об'єктів, наприклад, в енергетиці, у колективах автономних роботів та інженерних об'єктів, автономних літальних апаратах (дронах) тощо. Децентралізовані системи характеризуються гнучкістю архітектури і підвищеною надійністю, оскільки відмова одного елемента не призводить до відмови системи в цілому.

У децентралізованих системах принцип ближньої дії виражається в кластеризації системи на  $\varepsilon$ -області і визначенні глобального критерія для кластера. Одною з підзадач цього дослідження є перевірка гіпотези, що за умови перекриття кластерів в результаті ітеративної процедури координація на основі глобально-локального критерію сходиться до результату глобальної координації.

Незважаючи на значну кількість робіт з дослідження систем децентралізованої координації, проблема координаційного керування станом неперервних багатозональних розподілених об'єктів ще не знайшла ефективного розв'язання.

**Ключові слова:** локальна система управління, розподілені кіберфізичні системи керування, координація, децентралізоване управління.

Децентралізовані системи є предметом багатьох досліджень. Багато цікавих результатів було отримано в дослідницькому проєкті Control for Coordination of Distributed Systems (CON4COORD і C4C, використовуються обидва абрєвіатури) Консорціуму 12 дослідницьких центрів Європи [1]. Залежно від типу системи, завдання управління децентралізованими системами називають синхронізацією, децентралізованою стабілізацією, однорівневою координацією, одноранговим керуванням [2] тощо. Особливістю розподілених децентралізованих систем є значна невизначеність параметрів взаємодії підсистем, неповнзв'язаність системи та відсутність у окремої підсистеми повної інформації про стан інших підсистем, які безпосередньо зв'язані з цією підсистемою.

В наявних роботах розглядаються різні підходи до забезпечення децентралізованої координації. Адаптивне децентралізоване управління з модельною координацією було запропоновано в 1992 році Б.М. Міркіна і активно розвивалася багатьма авторами, наприклад, у [3]. Це передбачає наявність у локальних контролерах інформації про стан еталонних моделей усіх локальних підсистем. Модельний підхід до координації розвинутий у роботах [4; 5]. При цьому передбача-

ється доступність локальним контролерам інформації про стан еталонних моделей всіх локальних підсистем. В роботі [6] розв'язана задача асимптотичної синхронізації по станам в мережах ідентичних лінійних агентів при застосуванні консенсусного зворотного зв'язку по виходах. Авторами [7] розглянуто задачу децентралізованого управління системою, що складається з підсистем з декількома входами і виходами, для кожної з яких визначена еталонна модель реакції на вхідний вплив. Визначено умови існування рішення. Як методична основа рішення використовується технологія вкладення систем [8].

У наявних роботах досліджується проблема координації множини дискретних об'єктів. Проте задачі координаційного управління розподіленими кіберфізичними системами (РКФС) з багатозональними неперервними об'єктами мають певні особливості. Такі РКФС розповсюджені у теплових технологічних процесах, комунальній сфері, агропромислового комплексу тощо. Взаємний вплив керованих зон (або елементів) багатозонального об'єкта відбувається на параметричному рівні, а не на ситуаційно-подійному, як в мультиагентних системах.

Кожна підсистема децентралізованої розподіленої системи містить, крім локальної системи

управління (ЛСУ), також і координатор, який здійснює оптимізацію керування на основі визначеного критерію [9]. Координатор може використовувати, залежно від наявної інформації, як локальний, так і глобальний критерії. Локальні критерії встановлюються для окремих підсистем РКФС. В однорідних РКФС для всіх підсистем встановлюються однакові критерії, в неоднорідних критерії можуть відрізнятися залежно від призначення кожної підсистеми. РКФС є складними, але звичайно знаходяться на нижньому рівні виробництва, отже, глобальні критерії переважно мають комбінований економічно-технологічний характер. У виробничих системах локальні критерії найчастіше мають технологічний характер (точність дотримання технологічного регламенту, витрати часу на виробництво заданої кількості продукту, відсоток помилок при виконанні певної технологічної операції тощо), а глобальні, як правило – економічні.

При побудові ієрархічних систем координації використовуються комбіновані глобально-локальні критерії на основі принципу ближньої дії [10]. За цим принципом дія глобального критерію розповсюджується лише на підсистеми однієї гілки ієрархічної структури.

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 знайшли ефективного вирішення.

**Метою** роботи є розвиток принципу ближньої дії для підвищення стійкості і швидкості децентралізованої координації.

**Отримані результати.** При децентралізованій координації РКФС з неперервними багатозональними розподіленими об'єктами принцип ближньої дії виражається в кластеризації системи на  $\varepsilon$ -області, де  $\varepsilon$  – нижня границя впливу оточення

на центральний елемент кластера, і здійсненні координації локально по відношенню до РКФС у цілому, але глобального критерія для елементів кластера. Таким чином, принцип ближньої дії для децентралізованої координації пов'язаний із застосуванням локально-глобального критерію.

Задача координації полягає у знаходженні такого вектора  $V_0 = \{v_{0k}, k = 1..M\}$  який забезпечує максимальний ефект (мінімальний ризик) або, якщо РКФС є стаціонарною і попередньо визначена оптимальна функція стану елементів  $F(Z, t)$ , максимальне наближення стану об'єкта до заданої функції  $F(Z, t)$ ,

$$R = \sqrt{\int \int_{T, S} [V(Z, t) - F(Z, t)]^2 dZ dt} \quad (1)$$

де  $Z \in S$  – вектор координат точки розподіленого об'єкта в межах керованої області  $S$ .

Оскільки із збільшенням віддалення точки прикладання керуючого впливу  $Z_i$  від заданої зони (елемента РКФС)  $|Z - Z_i|$  цей вплив зменшується, то при децентралізованій координації кожен координатор повинен враховувати лише ті керовані елементи, які знаходяться в його  $\varepsilon$ -області, як показано на рис. 1.

В роботах [9, 11] обґрунтовано оцінку  $\varepsilon$ -області елемента – це множина  $K_\varepsilon$  елементів керування, які задовольняють умову

$$(k \in K_\varepsilon) \rightarrow \forall t: \frac{\sum_{k \in K_\varepsilon} \frac{v_{0k}}{8(\pi\lambda t)^{3/2}} e^{-\frac{d_k^2}{4\lambda t}}}{\max_k V(d_k, t)} < \varepsilon \quad (2)$$

Залежно від кількості елементів, які належать до  $\varepsilon$ -області, граничними формами локально-глобального критерію є локальний критерій і глобальний критерій. На рис. 2 показано зв'язок принципу ближньої дії з локальністю критерію

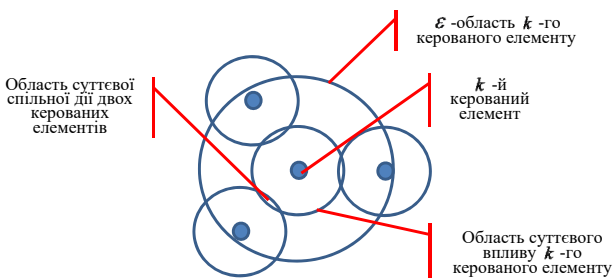


Рис. 1. Визначення  $\varepsilon$ -області елемента

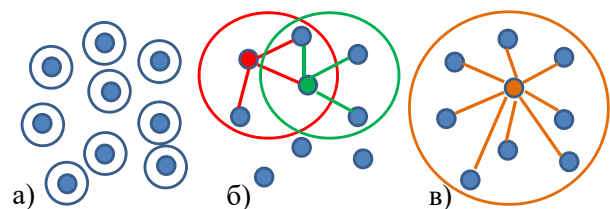


Рис. 2. Зв'язок принципу ближньої дії з локальністю критерію: а) – усі критерії локальні; б) – критерії локально-глобальні; в) – критерій глобальний

При застосуванні локально-глобального критерію оптимізація здійснюється за принципом компромісу з використанням вагових коефіцієнтів локальних критеріїв. Тоді локально-глобальний критерій децентралізованої координації у системі з адитивним результатом матиме вигляд

$$E = \sum_{i=1}^{n_\varepsilon} \rho_i e_i$$

де  $\rho_i$  – вагові коефіцієнти,  $\rho_k : \begin{cases} =1 & \text{при } k=i \\ <1 & \text{при } k \neq i \end{cases}$ ;  $e_i$  – локальні критерії.

У роботі [10] запропоновано локальний критерій координації для розподілених виробничих об'єктів, який враховує відхилення стану елемента від заданого значення, вплив стану елемента на сусідні елементи, вартість сировини, вартість ресурсу і продукту, витрати на регулювання в окремому елементі. Якщо  $i$  – центральний елемент  $\varepsilon$ -області, для якого розраховується оптимальна координація, то з урахуванням [10] локально-глобальний критерій матиме вигляд

$$E(v_{0i}, \gamma) = \left[ c_{yi} \alpha x_i \left[ \frac{1}{1 + e^{-\delta(v'_i - bF_i)}} - \frac{1}{e^{-\delta(v'_i - b^{-1}F_i)}} \right] - q_{r0} \cdot (v'_i - v_{0i}) - (c_{vi} \mu' + c_{xi}) x_i \right] + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n_\varepsilon} \rho_k \left[ c_{yk} \alpha x_k \left[ \frac{1}{1 + e^{-\delta(v'_k - bF_k)}} - \frac{1}{e^{-\delta(v'_k - b^{-1}F_k)}} \right] - q_{r0} \cdot (v'_k - v_k) - (c_{vk} \mu' + c_{xk}) x_k \right], \quad (3)$$

$$\text{де } v'_i = v_i + \frac{W_{ii}}{1 + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n_\varepsilon} W_{ik} W_{ki}} \gamma (v_{0i} - v_i);$$

$$v'_k = v_k + \frac{dv_k}{dv_i} (v'_i - v_i);$$

$$\mu' = 1/\zeta;$$

$$\frac{dv_k}{dv_i} = |W_{ik}|;$$

$F$  – вектор заданих станів елементів об'єкта;  $V$  – вектор фактичних станів елементів об'єкта;  $V_0$  – розрахунковий вектор координованих станів;  $X$  – вектор кількості вхідної сировини елементів об'єкта;  $n_\varepsilon$  – кількість керованих елементів  $\varepsilon$ -області  $i$ -го елемента;  $W_{ik}$  – передатна функція взаємного впливу елементів  $v_i \rightarrow v_k$ ;  $c_x$  – вартість сировини;  $c_v$  – вартість ресурсу;  $c_y$  – вартість продукту;  $q_{r0}$  – витрати на регулювання в окремому елементі;  $\zeta$  – к.к.д.;  $\gamma$  – коефіцієнт зменшення кроку наближення до оптимальної координації (необхідний для запобігання автоколиванням у процесі координації);  $\delta, \alpha, b$  – коефіцієнти логістичної функції, вибір яких є компромісом між швидкістю і точністю досягнення оптимальної координації та робастністю системи.

Оскільки адитивні константи не впливають на результат оптимізації, а також враховуючи, що  $|W_{ik}| = |W_{ki}| < 1$  і  $|W_{ii}| > 1$ , локально-глобальний критерій (3) можна спростити

$$E(v_{0i}, \gamma) = \sum_{k=1}^{n_\varepsilon} \rho_k \left\{ c_{yk} \alpha x_k \left[ \frac{1}{1 + e^{-\delta(v_k + \gamma |W_{ik}| (v_{0i} - v_i) - bF_k)}} - \frac{1}{e^{-\delta(v_k + \gamma |W_{ik}| (v_{0i} - v_i) - b^{-1}F_k)}} \right] - q_{r0} \gamma |W_{ik}| |v_{0i} - v_i| \right\} \quad (4)$$

Типовий вигляд залежності показано на рис. 3. Унімодальність залежності (4) дозволяє здійснювати пошук оптимального значення  $v_{0i}$  градієнтним методом.

Покажемо, що координація за локально-глобальним критерієм забезпечує досягнення координації за глобальним критерієм за умови

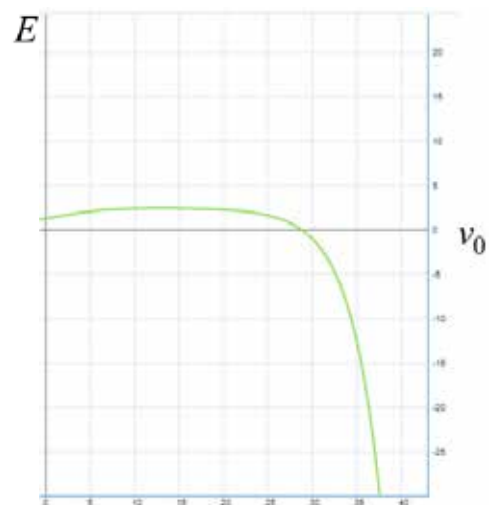


Рис. 3. Залежність критерію від параметра координації

зв'язності топологічного графу кластерів елементів  $\varepsilon$ -областей.

Знайдемо похідну

$$\frac{dE}{dv_{0i}}(v_{0i}, \gamma) = \sum_{k=1}^{n_\varepsilon} \rho_k \gamma |W_{ik}| \left[ \delta c_{yk} \alpha x_k \left[ \frac{e^{-\delta(v_k + \gamma |W_{ik}|(v_{0i} - v_i) - bF_k)}}{\left(1 + e^{-\delta(v_k + \gamma |W_{ik}|(v_{0i} - v_i) - bF_k)}\right)^2} - (5) \right. \right. \\ \left. \left. - e^{\delta(v_k + \gamma |W_{ik}|(v_{0i} - v_i) - bF_k)} \right] + q_{r0} \text{sign}(v_{0i} - v_i) \right]$$

Шукане значення оптимальної локальної координати задовольняє умову

Шукане значення оптимальної локальної координати задовольняє умову

$$\frac{\partial E(v_{0i}, \gamma)}{\partial v_{0i}} = 0 \quad (6)$$

Без порушення загальності вважатимемо, що система містить  $N$  підсистем, і для кожної підсистем визначається один параметр координати. Нехай в  $N$ -вимірному просторі параметрів координати  $V_0[N]$  задана диференційована критеріальна функція  $E(V_{0i}, i = 1 \dots N)$ . Необхідною умовою максимуму/мінімуму критерію є система рівнянь  $\left\{ \frac{\partial E}{\partial v_{0i}} = 0, v_{0i} \in V_0[N], i = 1 \dots N \right\}$ , розв'язком

якої є множина векторів  $V_0$ .

Розіб'ємо множину  $V_0[N]$  на дві підмножини  $V_{0A}[n_1]$  і  $V_{0B}[n_2]$ , причому

$$\bar{V}_0 \subset \bar{V}_{0A}$$

$$\bar{V}_0 \subset \bar{V}_{0B}$$

Умова зв'язності топологічного графу кластерів елементів  $\varepsilon$ -областей

$$V_{0A} \cap V_{0B} = V_{0C} \neq \emptyset. \quad (7)$$

Необхідними умовами екстремуму критерію в кластерах  $A, B$  і  $C$  є система рівнянь:

$$\left\{ \frac{\partial E}{\partial v_{0i}} = 0, v_{0i} \in V_{0A}[n_1], i = 1 \dots n_1 \right\}, \quad (8)$$

розв'язком якої є множина векторів  $\bar{V}_{0A}$  і

$$\left\{ \frac{\partial E}{\partial v_{0i}} = 0, v_{0i} \in V_{0B}[n_2], i = (N - n_2) \dots N \right\}, \quad (9)$$

розв'язком якої є множина векторів  $\bar{V}_{0B}$ ;

$$\left\{ \frac{\partial E}{\partial v_{0i}} = 0, v_{0i} \in V_{0C}[n_1 + n_2 - N], i = n_1 \dots (N - n_2) \right\}, \quad (10)$$

розв'язком якої є множина векторів  $\bar{V}_{0C}$ .

Оскільки кожне додаткове рівняння у системі рівнянь обмежує кількість можливих розв'язків, то  $\bar{V}_{0A} \subset \bar{V}_{0C}$  і  $\bar{V}_{0B} \subset \bar{V}_{0C}$ . Звідси випливає:

$$\bar{V}_0 = \bar{V}_{0A} \cap \bar{V}_{0B} \subset \bar{V}_{0C} \quad (11)$$

Процес розділення кластерів на пари, що перетинаються, може бути продовжений. Таким чином, властивість асоціативності операції перетину множин розв'язків задачі оптимізації за локально-глобальними критеріями забезпечує збіжність послідовної оптимізації до глобально оптимального результату.

Алгоритм визначення кластеризації множини елементів керування на  $\varepsilon$ -області зображений на рис. 4.

Алгоритм локальної координати  $i$ -го керуючого елемента ґрунтується на припущенні про незмінність параметрів усіх керуючих елементів у радіусі  $r_{ie}$ . Керованою змінною координати є задана величина впливу  $v_{0i}$ .

Алгоритм реалізує «жадібний» метод. Для цього центральний елемент кластера отримує індекс «0», а решта елементів сортується відповідно до зменшення їх впливу на центральний елемент. Величина впливу  $k$ -го елемента визначається опосередковано через відстань  $r_{0k}$  від центру кластера до  $k$ -го елемента – вважаємо, що чим більша відстань, тим менший вплив. Відповідно до «жадібного» методу в алгоритмі у циклі до суми додається величина впливу  $k$ -го елемента на центральний елемент кластера починаючи з найбільшого впливу, доки не виконається умова (2). У цей момент фіксується радіус кластера.

В алгоритмі розглядаються два варіанти: коли усі елементи об'єкта РКФС повинні знаходитися у однакових станах ( $F(x, y, z) = \text{const}$ ) і коли ці стани відрізняються. У першому випадку задача спрощується, оскільки вплив елементів оточення знаходиться у оберненій залежності від їх дійсної відстані  $r_{0k}$ . У другому випадку для порівняння використовується еквівалентна відстань  $r_{ik}$ , яка розраховується шляхом зменшення/збільшення дійсної відстані на величину, яка залежить від відхилення  $\Delta F_k$  заданого стану  $k$ -го елемента від середнього.

Для перевірки принципу ближньої дії у децентралізованій координаті РКФС з неперервним об'єктом розроблена імітаційна модель в середовищі Scilab з використанням бібліотеки моделей [10].

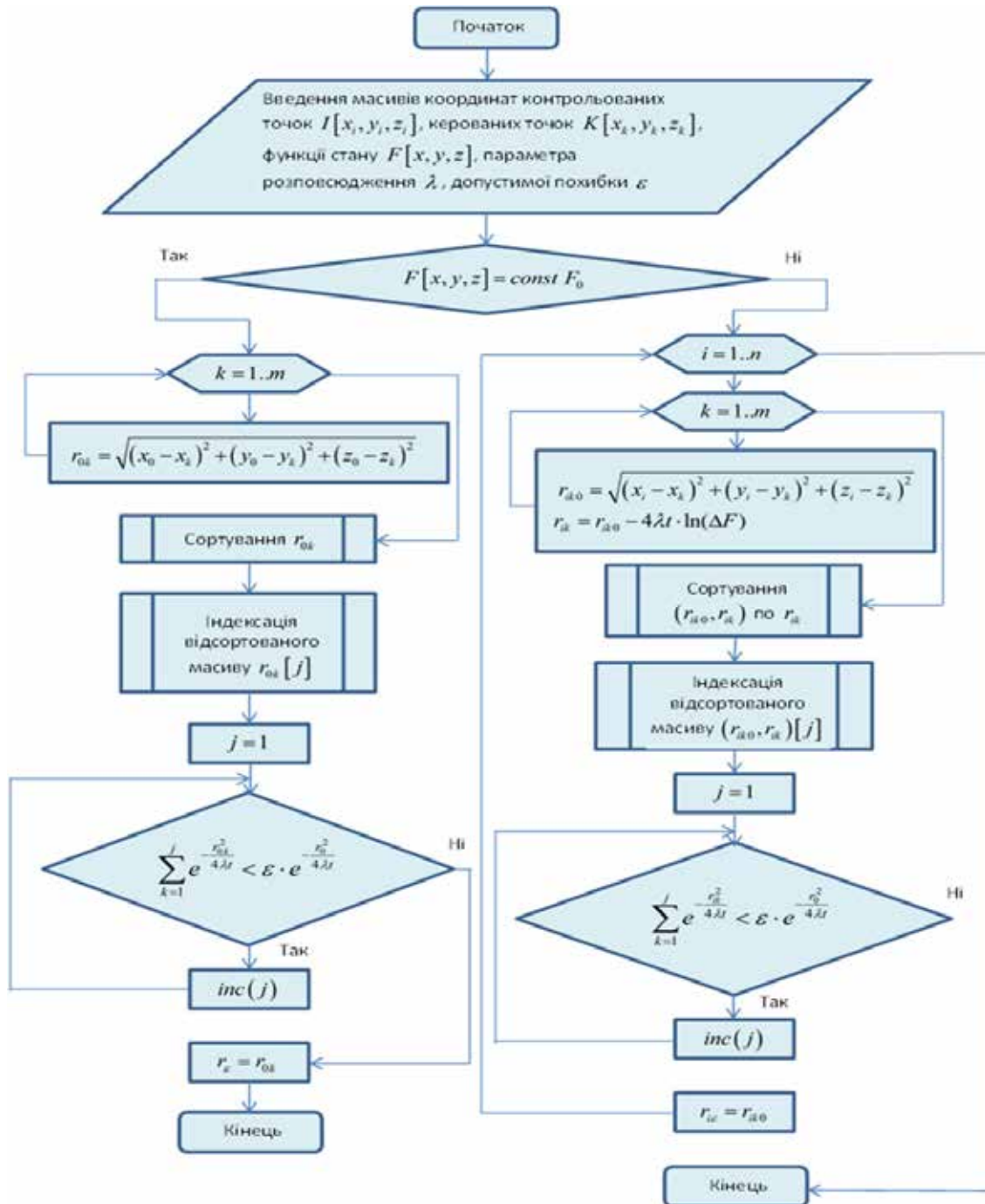


Рис. 4. Алгоритм визначення множини елементів керування

Результати імітаційного моделювання системи з 16 керованих елементів об'єкта на основі глобального, локального і локально-глобального критерію показані на діаграмі рис. 5. Зміна типу критерію здійснювалася за допомогою зміни розміру  $\varepsilon$ -області: при  $\varepsilon = 0$   $\varepsilon$ -область охоплює усі 16 елементів об'єкта і оптимізація виконується на основі глобального критерію; при  $\varepsilon = 1$   $\varepsilon$ -область охоплює тільки 1 елемент об'єкта і оптимізація виконується на основі локального критерію (фактично оптимізація додатково до локального

керування відсутня); при  $0 < \varepsilon < 1$   $\varepsilon$ -область охоплює декілька елементів об'єкта (показано випадок  $\varepsilon = 0,3$ ) і оптимізація виконується на основі локально-глобального критерію. У останньому випадку оптимізація здійснювалася циклічно, в результаті чого значення критерію поступово наближалось до глобального оптимуму. Швидкість наближення залежить від розміру  $\varepsilon$ -області.

**Висновки.** Розвинуто принцип ближньої дії при децентралізованій координації керування розподіленими кіберфізичними системами

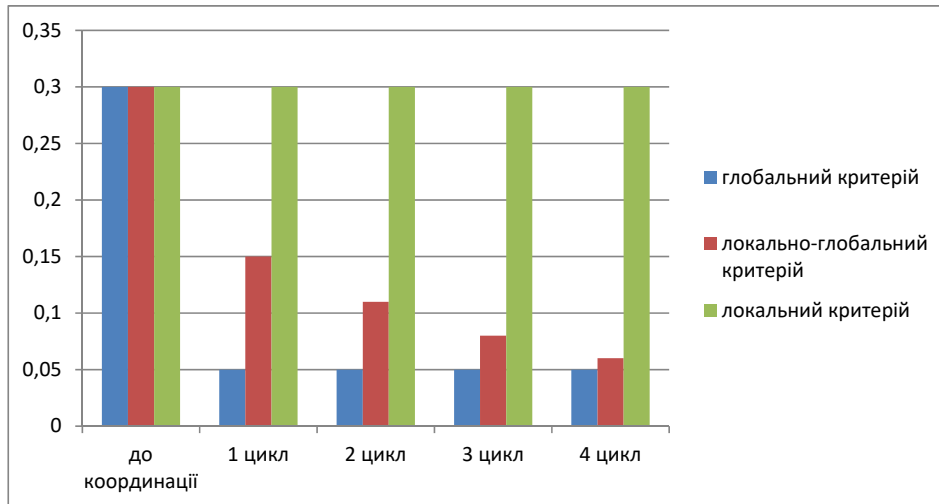


Рис. 5. Результати імітаційного моделювання оптимізації РКФС

з неперервними об'єктами. На відміну від принципу ближньої дії у ієрархічній координації, який зосереджується на обмеженні області дії глобальних критеріїв, причому ці області не перетинаються і не взаємодіють, розвинутий принцип виражається в кластеризації системи на -області, які можуть взаємодіяти і перетинатися. Принцип ближньої дії ґрунтується на моделі розповсюдження керівних впливів від точки їх застосування у просторі і часі, що дозволяє обмежити множину керованих елементів, які підлягають координації. Запропонований алгоритм кластеризації елементів РКФС за розвинутим принципом ближньої дії. Результати імітаційного моделювання підтверджують збіжність координації за локально-глобальним критерієм до координації за глобальним критерієм.

#### ЛІТЕРАТУРА

- Schuppen J. H., Villa T. Coordination Control of Distributed Systems. Lecture Notes in Control and Information Sciences. Springer International Publishing. (2015). URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-10407-2>
- Siljak D. Decentralized control of complex systems. Courier Corporation, 2013. P. 544.
- Yan, H., & Han, Y. Decentralized adaptive multi-dimensional Taylor network tracking control for a class of large-scale stochastic nonlinear systems. In International Journal of

Adaptive Control and Signal Processing (Vol. 33, Issue 4, pp. 664–683). Wiley. URL: <https://doi.org/10.1002/acs.2978>

- Mirkin B.M. A new decentralized model reference adaptive control scheme for large scale systems. *Mirkin B.M.. In Prepr. 4th IFAC International Symposium on Adaptive systems in control and signal processing, Grenoble, France.* 1992. P. 645–650.

- Миркин Б.М. Адаптивное децентрализованное управление с модельной координацией. *AuT.* 1999. № 1. С. 90–100.

- Джунусов И.А. Синхронизация в сетях линейных агентов с обратными связями по выходам. *Автоматика и телемеханика.* № 8. 2011.

- Буков В.Н. Децентрализованное координированное управление ММО-подсистемами, основанное на технологии вложения систем. *Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН.* Москва, 2011. 374 с.

- Дубовой В.М., Дерман Г.Ю., Пилипенко І.В. Прийняття рішень в управлінні розгалуженими технологічними процесами : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2013. 224 с.

- Дубовой В.М., Юхимчук М.С. Децентрализованное координаційне керування розподіленими кібер-фізичними системами з неперервними об'єктами : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2022. 230 с.

- Madala H.R., Ivakhnenko A. Inductive Learning Algorithms for Complex Systems Modeling. (1994) CRC Press, Inc. 373 p.

- Dubovoi V., Yukhimchuk M. et al. Functional safety assessment of one-level coordination of distributed cyber-physical objects. *Przeegląd Elektrotechniczny, NR 9/2021.* pp. 38–41.

## THE PRINCIPLE OF NEARBY ACTION IN DECENTRALIZED CYBERPHYSICAL SYSTEMS WITH CONTINUOUS OBJECTS

**Maria Yukhymchuk**

Ph.D., Associate Professor

Vinnitsia National Technical University, 95 Khmelnytskyi Shosse, Vinnitsia, Ukraine, 21000, umcmasha@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8131-9739

Decentralized management systems provide for the presence of means of coordination management in each element of the system. Such systems are formed mainly by the application of intelligent multi-agent control technologies. Most often, the multi-agent coordination architecture is used with a very large number of relatively autonomous objects, for example, in energy, in collectives of autonomous robots and engineering objects, autonomous aircraft (drones), etc. Decentralized systems are characterized by architecture flexibility and increased reliability, since the failure of one element does not lead to the failure of the system as a whole.

In decentralized systems, the principle of short-range action is expressed in the clustering of the system on the  $\varepsilon$ -region and the determination of the global criterion for the cluster. One of the sub-tasks of this study is to test the hypothesis that if the clusters overlap as a result of the iterative procedure, coordination based on the global-local criterion converges to the result of global coordination.

Despite a significant number of works on the study of decentralized coordination systems, the problem of coordination control of the state of continuous multi-zonal distributed objects has not yet found an effective solution.

**Key words:** local control system, distributed cyber-physical control systems, coordination, decentralized control.

### REFERENCES

- Schuppen J. H., Villa T. Coordination Control of Distributed Systems. Lecture Notes in Control and Information Sciences. Springer International Publishing. (2015). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-10407-2>
- Siljak D. Decentralized control of complex systems. – Courier Corporation, 2013. P. 544.
- Yan, H., & Han, Y. Decentralized adaptive multi-dimensional Taylor network tracking control for a class of large-scale stochastic nonlinear systems. In International Journal of Adaptive Control and Signal Processing (Vol. 33, Issue 4, pp. 664–683). Wiley. <https://doi.org/10.1002/acs.2978>
- Mirkin B.M. A new decentralized model reference adaptive control scheme for large scale systems // Mirkin B.M. In Prepr. 4th IFAC International Symposium on Adaptive systems in control and signal processing, Grenoble, France. 1992. P. 645–650.
- Миркин Б.М. Адаптивное децентрализованное управление с модельной координацией. // АиТ. 1999. № 1. С. 90–100.
- Джунусов И.А. Синхронизация в сетях линейных агентов с обратными связями по выходам. Автоматика и телемеханика, № 8, 2011
- Буков В.Н. Децентрализованное координированное управление МИМО-подсистемами, основанное на технологии вложения систем. // Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – М.: 2011. – 374 с.
- Дубовой В. М., Дерман Г. Ю., Пилипенко І. В., Байас М. М. Прийняття рішень в управлінні розгалуженими технологічними процесами : [монографія]. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 224 с.
- Дубовой В.М., Юхимчук М.С. Децентралізоване координаційне керування розподіленими кіберфізичними системами з неперервними об'єктами : [монографія]. Вінниця : ВНТУ, 2022. – 230 с.
- Madala H.R., Ivakhnenko A. Inductive Learning Algorithms for Complex Systems Modeling. (1994) CRC Press, Inc. 373 p.
- Dubovoi V., Yukhimchuk M. et al. Functional safety assessment of one-level coordination of distributed cyber-physical objects. Przegląd Elektrotechniczny, NR 9/2021, pp. 38–41.

*Стаття надійшла 07.08.2022*