

## **ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ТА ЗБІЖНОСТІ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ КООРДИНАЦІЇ ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ РОЗПОДІЛЕНИМИ КІБЕР-ФІЗИЧНИМИ СИСТЕМАМИ**

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Застосування децентралізованої координації управління станом розподілених кібер-фізичних систем з неперервними об'єктами, за якої крім фізичної взаємодії елементів неперервного об'єкта існує інформаційна взаємодія локальних координаторів у складі агентів мультиагентної системи, приводить до утворення багатозв'язних систем управління. Особливості децентралізованого координаційного управління таких систем (нелінійність координаторів, взаємний фізичний вплив елементів об'єкта, наявність виробничих витрат накопиченого ресурсу, який визначає стан елементів тощо) зумовлюють необхідність додаткових досліджень стійкості системи і збіжності процесу координації. Метою роботи є дослідження умов стійкості і збіжності децентралізованої координації розподіленої кібер-фізичної системи управління з хвильовим алгоритмом координації. Отримано умову стійкості таких систем. Розроблено модель системи з двох зв'язаних керованих елементів і локальних систем управління. Отримана передатна функція системи за допомогою методу еквівалентних перетворень. Показано, що за відсутності координації така система є стійкою за умови затухання при розповсюдженні впливів на елементи неперервного об'єкта. Досліджено стійкість і збіжність децентралізованої координації локальних систем управління з хвильовим алгоритмом координації на основі імітаційної моделі на прикладі трьохелементної системи. Імітаційна модель створена в системі Scilab/Xcos. Результати проведених досліджень показують, що хоча система є стійкою, стан елементів об'єкта збігається до заданого, проте тривалість процесу координації значно перевищує тривалість перехідних процесів окремих елементів. Подальші дослідження передбачається спрямувати на доведення гіпотези щодо незалежності стійкості системи від кількості керованих елементів неперервного об'єкта і дослідження умов стійкості активних систем (зі збільшенням впливу в процесі розповсюдження).*

**Ключові слова:** стійкість, збіжність, децентралізована координація, розподілена кібер-фізична система, неперервний об'єкт.

### **Вступ**

Концепція кібер-фізичних систем, в якій поєднується розгляд взаємодії фізичних процесів в об'єктах контролю і управління, апаратних засобів управління з розглядом програмно-логічних (зокрема, інтелектуальних) процесів обробки інформації щодо їх стану і прийняття відповідних рішень [1], набуває все більшого поширення. Застосування децентралізованої координації управління станом розподілених кібер-фізичних систем (РКФС) з неперервними об'єктами, за якої крім фізичної взаємодії елементів неперервного об'єкта існує інформаційна взаємодія локальних координаторів у складі агентів мультиагентної системи, приводить до утворення багатозв'язних систем управління [2], [3]. Характерними прикладами таких систем є системи управління хімічними та біореакторами, багатозональними теплицями тощо. Нелінійність об'єкта та наявність затримок у розповсюдженні впливів в багатозв'язній системі може призводити до втрати стійкості, а взаємний вплив елементів об'єкта — до погіршення збіжності ітераційного процесу координації. Це вимагає дослідження умов стійкості системи і збіжності процедури координації. Ще однією причиною нестійкості

системи є застосування релейного управління, що часто використовується у теплових об'єктах.

Проблема дослідження і забезпечення стійкості багатозв'язних систем управління досліджується вже понад 60 років. У оглядовій роботі [4] підкреслюється внесок А. А. Красовського, М. В. Меєрова, В. Т. Морозовського, П. И. Чинаєва, В. А. Боднера, Р. Т. Янушевського, В. Я. Катковника, Р. А. Полуєктова, О. С. Соболева, Е. І. Баранчука, А. С. Баксенбома, Р. Худа, М. Д. Месаровича, Р. С. Каванажи, Е. Бона, Х. Розенброка, Р. Калмана, П. Фалба, М. Арбіба, М. Уонема, Мак Фарлена, Б. Н. Петрова, Б. Т. Поляка, Я. З. Ципкіна та інших. Запропоновані різноманітні методи, які ґрунтуються на матричних перетвореннях, частотних характеристиках, методах декомпозиції тощо. Існує також низка робіт щодо аналізу збіжності ітераційних алгоритмів налаштування систем управління [5], [6]. Ця тема не втрачає актуальності, оскільки розвиток Інтернету речей неухильно призводить до багатовимірності і багатоконтурності систем [7]—[9]. Проте особливості децентралізованого координаційного управління РКФС (нелінійність координаторів, взаємний фізичний вплив елементів об'єкта, наявність виробничих витрат накопиченого ресурсу, який визначає стан елементів тощо) зумовлюють необхідність додаткових досліджень стійкості системи і збіжності процесу координації.

Метою роботи є дослідження умов стійкості і збіжності децентралізованої координації розподіленої кібер-фізичної системи управління з хвильовим алгоритмом координації.

### Постановка задачі

Децентралізована система координаційного управління РКФС з неперервними об'єктами має структурну модель, показану на рис. 1 (до прикладу, показана модель для випадку лінійно-розподіленого об'єкта, яку можна зобразити на площині).

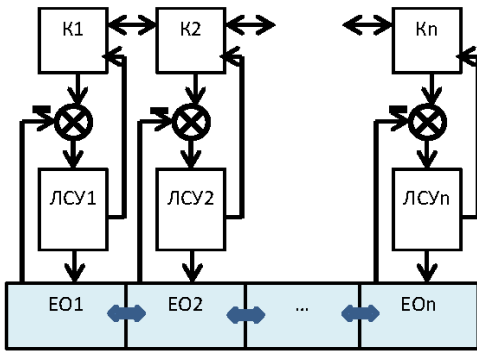


Рис. 1. Структурна модель децентралізованої системи координаційного управління РКФС з неперервними об'єктами

Система складається з розподіленого об'єкта, який має керувані елементи  $EO1 \dots EOn$ , локальних систем управління цими елементами  $ЛСУ1 \dots ЛСУn$  і координаторів  $K1 \dots Kn$ . Елементи розподіленого об'єкта впливають один на одного, що показано потовщеними стрілками. Координатори здійснюють пошук оптимального стану елементів об'єкта за заданим глобальним критерієм, для чого обмінюються інформацією з сусідніми координаторами. Децентралізована координація здійснюється відповідно до хвильового алгоритму [2].

Задачею дослідження є визначення умов стійкості такої багатозв'язної системи.

### Розв'язання задачі

Застосувати для розв'язання задачі класичні підходи аналізу стійкості неможливо через нелінійність координаторів та складну періодичність їхньої роботи [2]. Тому аналіз стійкості будемо здійснювати покроково, вибираючи на кожному кроці відповідний метод аналізу.

Проаналізуємо спочатку необхідну умову стійкості. Такою умовою є стійкість кожного замкненого контуру системи. Будемо вважати, що стійкість контуру локального управління елементом об'єкта забезпечена відповідними характеристиками ЛСУ.

Розглянемо базову модель РКФС — для лінійного об'єкта з двома керуваними елементами за відсутності координації. Відповідна схема показана на рис. 2.

На схемі:  $W_p(s)$  — передатна функція регулятора;

$K/s$  — передатна функція елемента (накопичення ресурсу);

$\lambda$  — параметр розповсюдження впливів елементів один на одного;

$v$  — стан елемента;  $v_0$  — параметр координації (заданий стан елемента);  $u$  — стан зовнішнього середовища;  $\mu x$  — витрати накопиченого ресурсу на переробку сировини  $x$ ;  $C$  — суматори.

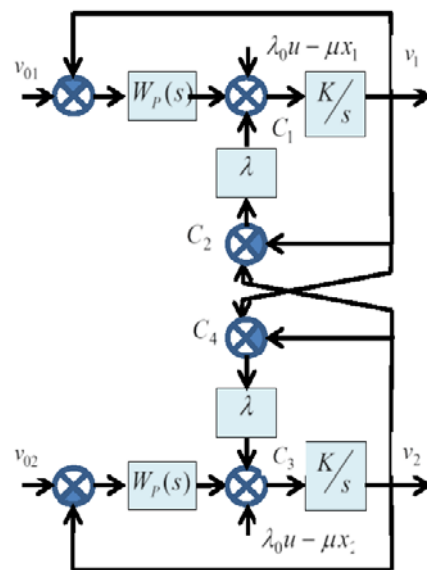


Рис. 2. Базова модель РКФС з двома елементами об'єкта

Для дослідження стійкості базової моделі здійснимо еквівалентні перетворення структурної схеми. Отримуємо зручну для подальшого аналізу структурну схему, показану на рис. 3.

Система (див. рис. 3) крім двох контурів від'ємного зворотного зв'язку, має контур додатного зворотного зв'язку. Передатна функція розімкнутого контуру додатного зворотного зв'язку

$$W^+(j\omega) = \left[ \frac{\lambda K}{s + \lambda K + K W_p(s)} \right]^2. \quad (1)$$

Якщо у  $\varepsilon$ -області елемента знаходяться  $n$  інших керованих елементів, то передатна функція

$$W^+(j\omega) = n \left[ \frac{\lambda K}{s + \lambda K + K W_p(s)} \right]^2. \quad (2)$$

Якщо передатна функція  $W_p(s)$  відповідає ПІД-регулятору, а параметр розповсюдження фізично

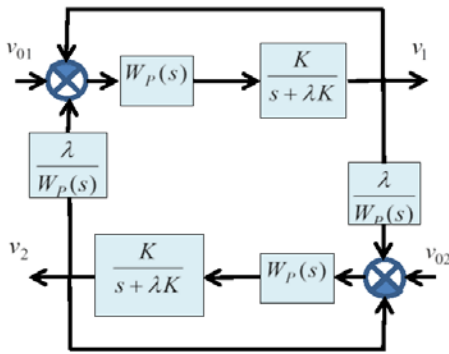


Рис. 3. Еквівалентна структурна схема

реалізованої системи  $\lambda < 1$ , то годограф повністю лежить в межах одиничного кола, що забезпечує стійкість системи.

Розглянемо процедуру хвильової координації. Хвильова координація передбачає зміну параметра координації елемента лише за умови проходження хвилі через цей елемент. Це означає релейно-дискретний характер зміни цього параметра.

Розглянемо вплив координаторів на стійкість РКФС з двох елементів. Значимо, що у такому простому випадку хвильова координація перетворюється на почергову пошукову оптимізацію. Доповнимо еквівалентну структурну схему (рис. 3) координаторами, які здійснюють оптимізацію за заданим критерієм  $E(\mathbf{V}_0, \mathbf{X}, \mathbf{V})$ . Тоді функція координації

$$v_{0k} = C_k(\mathbf{V}_0, \mathbf{X}, \mathbf{V}) = \begin{cases} \tilde{v}_{0k} = \arg \max_{v_{0k}} [E(\mathbf{V}_0, \mathbf{X}, \mathbf{V})], \\ v_k + \gamma(\tilde{v}_{0k} - v_k). \end{cases} \quad (3)$$

Еквівалентна схема РКФС з двома координаторами показана на рис. 4.

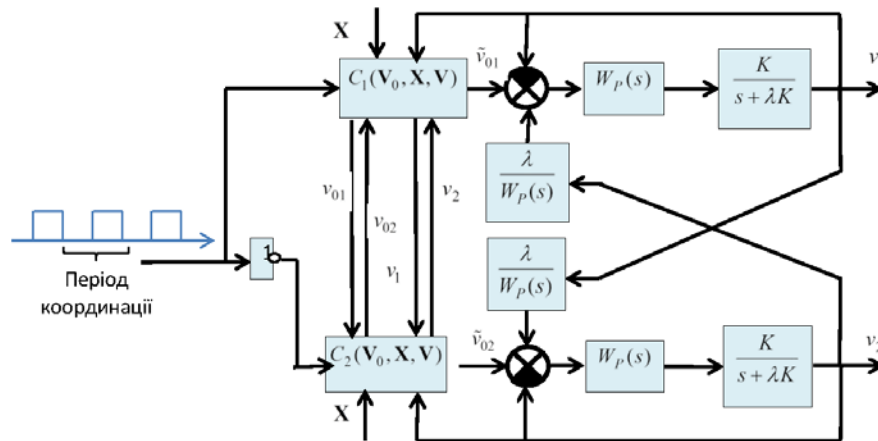


Рис. 4. Система з двома координаторами

Для двоелементної системи хвильова координація вироджується у двотактний періодичний процес. Розглянемо два можливих варіанти співвідношення станів елементів (припустимо, що координація починається з координатора  $C_1$ ):

1. Знаки відхилень  $(\tilde{v}_{0k} - v_k)$  різні.

2. Знаки відхилень  $(\tilde{v}_{0k} - v_k)$  однакові. У цьому випадку, якщо  $\frac{\lambda}{|W_p(0)|} \gamma(\tilde{v}_{01} - v_1) < (\tilde{v}_{02} - v_2)$ ,

то після першого такту координації обидва відхилення зменшаться і система наблизиться до стану

рівноваги. Якщо ж  $\frac{\lambda}{|W_p(0)|} \gamma (\widetilde{v}_{01} - v_1) > (\widetilde{v}_{02} - v_2)$ , то після першого такту різниця  $(\widetilde{v}_{02} - v_2)$  змінює знак і відбувається прихід до 1-го варіанта.

Таким чином, стійкість процесу координації визначається випадком 1. Проаналізуємо його, для цього знайдемо параметри стану елементів після двох тактів координації:

– після 1 такту

$$\begin{cases} v_1^{(1)} = \left\{ \left[ v_1 + \gamma (\widetilde{v}_{01} - v_1) \right] + v_2^{(1)} \frac{\lambda}{W_p(0)} \right\} \frac{W_p(0)}{W_p(0) + \lambda}, \\ v_2^{(1)} = \left\{ \widetilde{v}_{02} + v_1^{(1)} \frac{\lambda}{W_p(0)} \right\} \frac{W_p(0)}{W_p(0) + \lambda}. \end{cases} \quad (4)$$

Звідки

$$\begin{cases} v_1^{(1)} = \frac{\left[ v_1 + \gamma (\widetilde{v}_{01} - v_1) \right] W_p(0) (W_p(0) + \lambda) + \widetilde{v}_{02} \lambda W_p(0)}{(W_p(0))^2 + 2\lambda}, \\ v_2^{(1)} = \frac{\left[ v_1 + \gamma (\widetilde{v}_{01} - v_1) \right] \lambda W_p(0) + \widetilde{v}_{02} W_p(0) [W_p(0) + \lambda]}{(W_p(0))^2 + 2\lambda}; \end{cases} \quad (5)$$

– після другого такту аналогічно

$$\begin{cases} v_2^{(2)} = \frac{\left[ v_2^{(1)} + \gamma (\widetilde{v}_{01} - v_2^{(1)}) \right] W_p(0) (W_p(0) + \lambda) + \widetilde{v}_{01} \lambda W_p(0)}{(W_p(0))^2 + 2\lambda}, \\ v_1^{(1)} = \frac{\left[ v_2^{(1)} + \gamma (\widetilde{v}_{01} - v_2^{(1)}) \right] \lambda W_p(0) + \widetilde{v}_{01} W_p(0) [W_p(0) + \lambda]}{(W_p(0))^2 + 2\lambda}. \end{cases} \quad (6)$$

Підставляємо (5) у (6) і отримуємо:

$$\begin{cases} v_2^{(2)} = \frac{A \cdot W_p(0) (W_p(0) + \lambda) + \widetilde{v}_{01} \lambda W_p(0) \left[ (W_p(0))^2 + 2\lambda \right]}{\left[ (W_p(0))^2 + 2\lambda \right]^2}, \\ v_1^{(1)} = \frac{A \cdot \lambda W_p(0) + \widetilde{v}_{01} W_p(0) [W_p(0) + \lambda] \left[ (W_p(0))^2 + 2\lambda \right]}{\left[ (W_p(0))^2 + 2\lambda \right]^2}, \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{де } A = & \left[ v_1 + \gamma (\widetilde{v}_{01} - v_1) \right] \lambda W_p(0) + \widetilde{v}_{02} W_p(0) [W_p(0) + \lambda] + \\ & + \gamma \left( \widetilde{v}_{01} \left[ (W_p(0))^2 + 2\lambda \right] - \left[ v_1 + \gamma (\widetilde{v}_{01} - v_1) \right] \lambda W_p(0) - \widetilde{v}_{02} W_p(0) [W_p(0) + \lambda] \right). \end{aligned}$$

Запишемо умову стійкості

$$\begin{cases} \left| v_2^{(2)} - \widetilde{v}_{02} \right| < \left| v_2 - \widetilde{v}_{02} \right|, \\ \left| v_1^{(2)} - \widetilde{v}_{01} \right| < \left| v_1 - \widetilde{v}_{01} \right|. \end{cases} \quad (8)$$

За початковою умовою знаки відхилень  $(\widetilde{v}_{0k} - v_k)$  різні. Без порушення загальності припустимо

$$(\widetilde{v}_{01} - v_1) > 0 \text{ і } (\widetilde{v}_{02} - v_2) < 0. \quad (9)$$

Тоді умова стійкості 
$$\begin{cases} v_2^{(2)} - \widetilde{v}_{02} < v_2 - \widetilde{v}_{02}, \\ v_1^{(2)} - \widetilde{v}_{01} > v_1 - \widetilde{v}_{01} \end{cases}$$

або 
$$\begin{cases} v_2^{(2)} < v_2, \\ v_1^{(2)} > v_1. \end{cases}$$

З урахуванням (7) отримаємо

$$\begin{cases} \frac{A \cdot W_p(0)(W_p(0) + \lambda) + \widetilde{v}_{01} \lambda W_p(0) [(W_p(0))^2 + 2\lambda]}{[(W_p(0))^2 + 2\lambda]^2} < v_2, \\ \frac{A \cdot \lambda W_p(0) + \widetilde{v}_{01} W_p(0) [W_p(0) + \lambda] [(W_p(0))^2 + 2\lambda]}{[(W_p(0))^2 + 2\lambda]^2} > v_1. \end{cases} \quad (10)$$

Розв'яжемо систему нерівностей (10) відносно кроку координації. Позначимо для компактності:

$$-(\widetilde{v}_{01} - v_1) \lambda W_p(0) = a;$$

$$(\widetilde{v}_{01} - v_1) \lambda W_p(0) + \widetilde{v}_{01} [(W_p(0))^2 + 2\lambda] - v_1 \lambda W_p(0) - \widetilde{v}_{02} W_p(0) [W_p(0) + \lambda] = b;$$

$$v_1 \frac{[(W_p(0))^2 + 2\lambda]^2 - \widetilde{v}_{01} W_p(0) [W_p(0) + \lambda] [(W_p(0))^2 + 2\lambda]}{\lambda W_p(0)} - v_1 \lambda W_p(0) - \widetilde{v}_{02} W_p(0) [W_p(0) + \lambda] = -c_1;$$

$$v_2 \frac{[(W_p(0))^2 + 2\lambda]^2 - \widetilde{v}_{01} \lambda W_p(0) [(W_p(0))^2 + 2\lambda]}{W_p(0)(W_p(0) + \lambda)} - v_1 \lambda W_p(0) - \widetilde{v}_{02} W_p(0) [W_p(0) + \lambda] = -c_2.$$

Тоді умова стійкості матиме вигляд

$$\begin{cases} a\gamma^2 + b\gamma + c_1 > 0, \\ a\gamma^2 + b\gamma + c_2 < 0. \end{cases} \quad (11)$$

З початкової умови (9) випливає, що  $a < 0$ . Враховуючи також, що з міркувань якості регулювання ЛСУ  $|W_p(0)| \gg 1$ , а також, що  $\lambda < 1$ , отримуємо  $c_1 \gg 0$  і  $c_2 < 0$ . Схематичне зображення умов (11) показано на рис. 5. Інтервал значень  $0 < \gamma < 1$  повністю покривається діапазоном стійкості відповідно до умов (11).

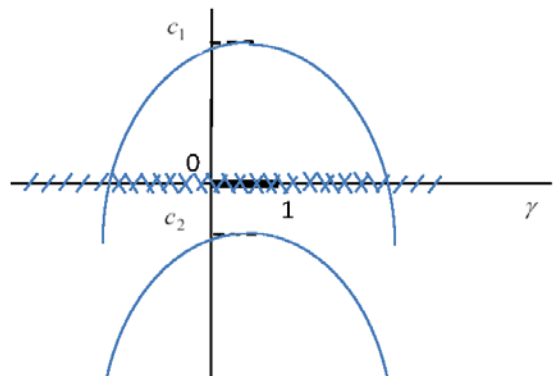


Рис. 5. Графічна інтерпретація умов стійкості

### Імітаційне моделювання і аналіз результатів

Імітаційна модель РКФС, яка складається з трьох керованих елементів, показана на рис. 6. Модель створена в системі Scilab/Xcos [10]. Така РКФС є найпростішою, яка містить як внутрішній, так і зовнішні елементи. Параметр координації  $\gamma$  (у моделі g) задається у контексті. Хвильовий процес забезпечується генератором тактових імпульсів, які генеруються у послідовності 1-2-3-2-1... Значення оптимального вектора станів  $\mathbf{F} = \{4, 2, 5\}$  задаються у контексті.

Графік процесу координації для  $\gamma = 0,5$  і  $\lambda = 0,3$  показаний на рис. 7. Процес стійкий навіть коли  $\lambda \rightarrow 1$  і  $\gamma = 1$ . У виносці видно черговість зміни стану елементів.

На рис. 8 показані процеси координації для випадків: *a* —  $v_2 < v_{02}$ ; *б* —  $v_2 > v_{02}$ .

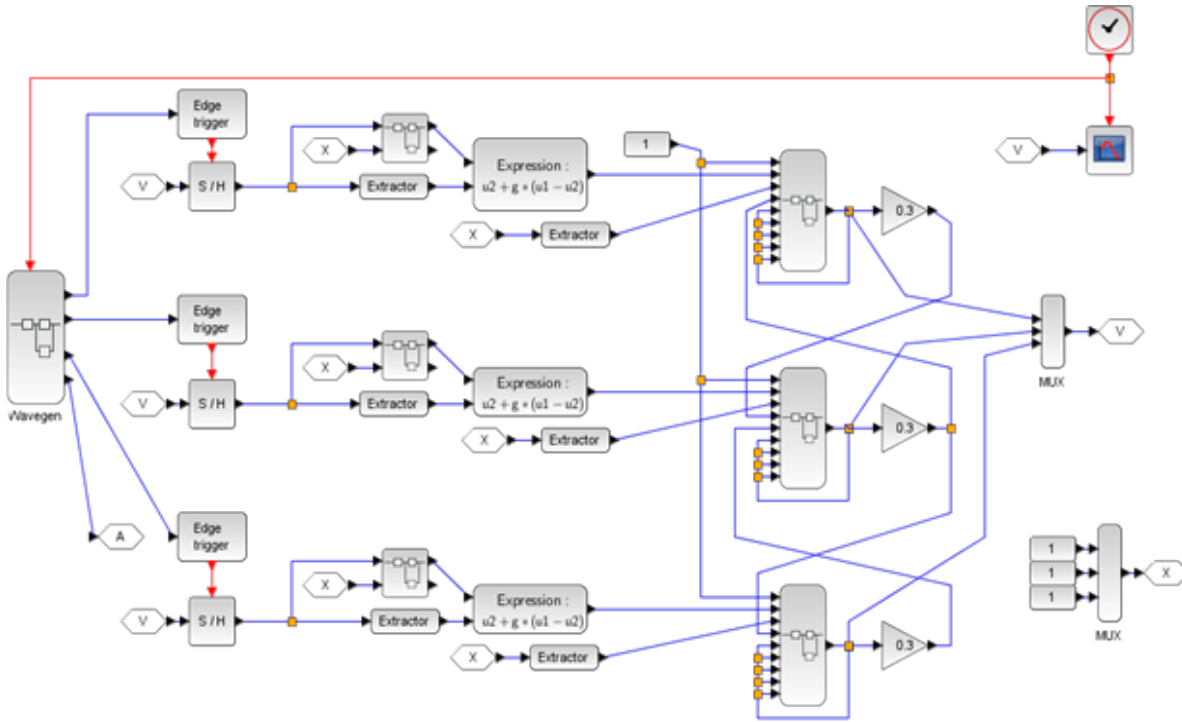


Рис. 6. Модель триелементної системи

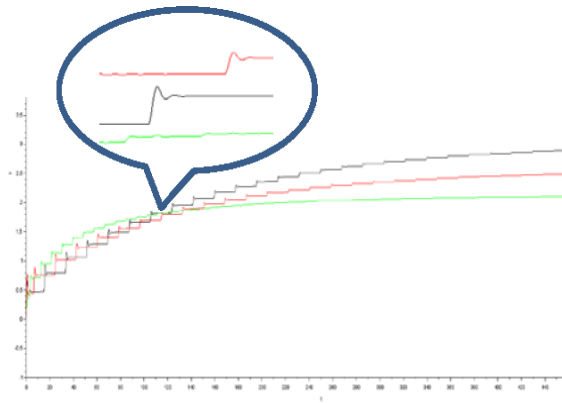
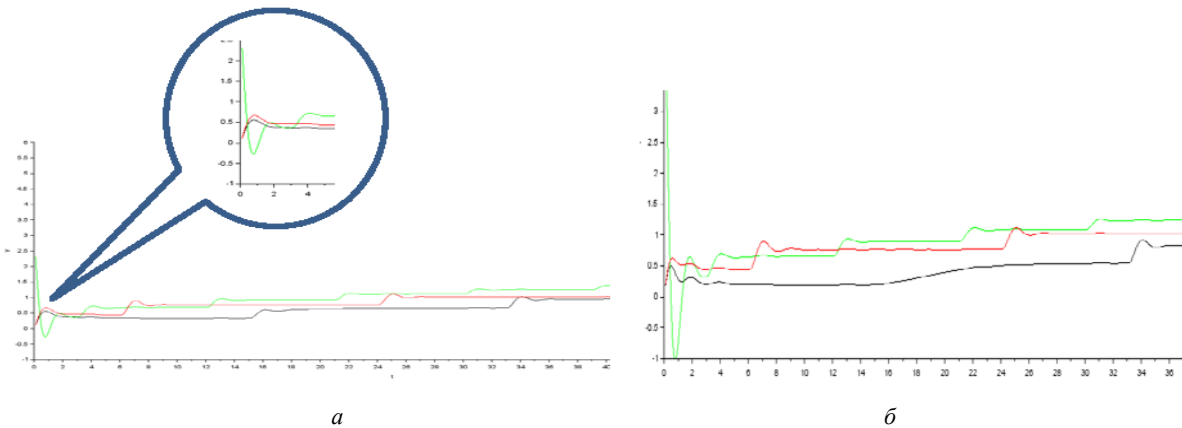


Рис. 7. Зміна станів елементів в процесі хвильової координації

На графіках видно, що в обох випадках вже на першому циклі координації взаємний вплив елементів приводить до затухання коливань і повільного подальшого наближення станів елементів до заданих значень.

Збільшення кількості елементів РКФС не впливає на стійкість системи, оскільки умова  $\gamma < 1$  забезпечує зменшення впливу віддалених елементів. Наявність локальних координаторів збільшує розмірність і кількість замкнених контурів системи, проте процес координації також стійкий. Фазові портрети елементів в системі  $3 \times 3$  елементів за різних значень  $\lambda$  показані на рис. 9.



*a* *б*  
Рис. 8. Процеси координації за різних початкових умов

На фазових портретах ми бачимо швидке затухання перехідних процесів для всіх  $\lambda < 1$ .

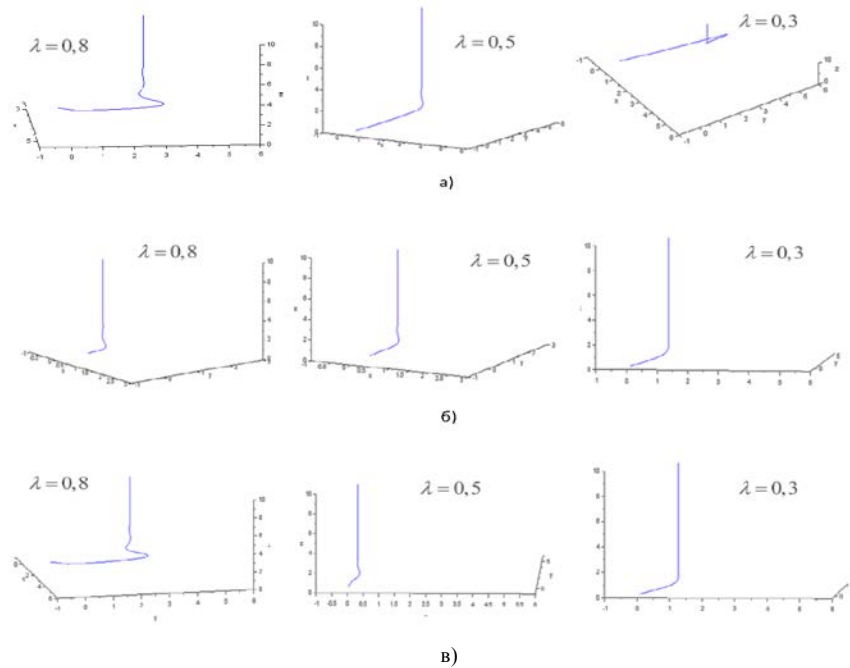


Рис. 9. Фазові портрети: а — кутовий елемент (два елементи оточення); б — бічний елемент (три елементи оточення); в — середній елемент (чотири елементи оточення)

### Висновки

В результаті проведених досліджень показано, що розподілена кібер-фізична система з децентралізованою хвильовою координацією є стійкою, стан елементів об'єкта збігається до заданого, проте тривалість процесу координації значно перевищує тривалість перехідних процесів окремих елементів.

Подальші дослідження передбачається спрямувати на доведення незалежності стійкості системи від кількості керованих елементів неперервного об'єкта і дослідження умов стійкості активних систем (зі збільшенням впливу в процесі розповсюдження).

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] S. C. Suh, J. N. Carbone, and A. E. Eroglu, *Applied Cyber-Physical Systems*. Springer, 2014.
- [2] V. M. Dubovoi, and M. S. Yuhymchuk, "Research of the synchronous waven coordination model of production processes," *Автоматизація технологічних та бізнес-процесів (Automation of technological and business processes)*, т. 12, № 1, с. 40-48. <https://doi.org/10.15673/atbp.v12i1.1702>.
- [3] В. М. Дубовой, Д. С. Сембрат, і М. С. Юхимчук, «Вплив віртуалізації на динаміку систем децентралізованої координації розподілених кібер-фізичних систем,» *Комп'ютерне моделювання і керування в техніці та технологіях КМКТТ-2021*, зб. наук. статей Дев'ятої Міжнар. наук.-практ. конф. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021, с. 80-85.
- [4] Б. Г. Ильясов, и Г. А. Саитова, «Системный подход к исследованию многосвязных систем автоматического управления на основе частотных методов,» *Автоматика и телемеханика*, вып. 3, с. 173-191, 2013.
- [5] А. В. Павлов, и В. А. Павлов, «Методика экспериментальных исследований сходимости итерационных алгоритмов метода группового учёта аргументов,» *Вісник НТУУ «КПІ» Інформатика, управління та обчислювальна техніка*, № 54, с. 3-7, 2011.
- [6] И. Н. Крутова, «Формирование алгоритма управления итерационным процессом настройки параметров в системе с упрощенной эталонной моделью,» *Автоматика и телемеханика*, вып. 2, с. 72-84, 1998.
- [7] S Gigi, and A. K. Tangirala, "Quantification of interaction in multiloop control systems using directed spectral decomposition," *Automatica*, no. 49(5), 2013.
- [8] *Introduction to Multi-loop*. [Electronic resource]. Available: <https://cse.sc.edu/~gatzke/cache/huang-multi-loop-control.pdf>
- [9] Zhiguo Wang, and Peng Wei, "Analytical Multiloop Control for Multivariable Systems with Time Delays," *Complexity*, vol. 2020, Article ID 8849483, 9 p., 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8849483>.
- [10] *Scilab*. [Electronic resource]. Available: <https://www.scilab.org/>.

Рекомендована кафедрою комп'ютерних систем управління ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 24.07.2021

**Дубовой Володимир Михайлович** — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних систем управління, e-mail: v.m.dubovoy@gmail.com ;

**Юхимчук Марія Сергіївна** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем управління.  
Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**V. M. Dubovoi<sup>1</sup>**  
**M. S. Yukhymchuk<sup>1</sup>**

## Research of Stability and Convergence of Decentralized Coordination of Local Control of Distributed Cyber-physical Systems

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

*The use of decentralized coordination of state control of distributed cyber-physical systems with continuous objects, in which, in addition to the physical interaction of the elements of a continuous object, there is information interaction of local coordinators as part of agents of a multi-agent system, leads to the formation of multi-loop control systems. The features of decentralized coordination control of such systems (nonlinearity of coordinators, mutual physical impact of the elements of the object, the presence of production costs of the accumulated resource, which determines the state of the elements, etc.) necessitate additional studies of the stability of the system and the convergence of the coordination process. The aim of the work is to study the conditions of stability and convergence of decentralized coordination of a distributed cyber-physical control system with a wave coordination method. A condition for the stability of such systems is obtained. The model of a system of two connected controllable elements and local control systems has been developed. The transfer function of the system is obtained using the method of equivalent transformations. It is shown that in the absence of coordination, such system is stable under the condition of attenuation under the propagation of influences on the elements of a continuous object. The stability and convergence of decentralized coordination of local control systems with the wave coordination method based on a simulation model is investigated using the example of three-element systems. The simulation model was created in the Scilab/Xcos system. As a result of the studies, it was shown that although the system is stable, the state of the object's elements coincides with the specified one, however, the duration of the coordination process significantly exceeds the duration of the transient processes of individual elements. Further research is supposed to be directed at the proof the hypothesis that the stability of the system independent of the number of controlled elements of a continuous object and studying the conditions for the stability of active systems (with an increase in the influence in the process of propagation).*

**Keywords:** stability, convergence, decentralized coordination, distributed cyber-physical system, continuous object

**Dubovoi Volodymyr M.** — Dc. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Computer Control Systems, e-mail: v.m.dubovoy@gmail.com ;

**Yukhymchuk Mariia S.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Computer Control System

**В. М. Дубовой<sup>1</sup>**  
**М. С. Юхимчук<sup>1</sup>**

## Исследование устойчивости и сходимости децентрализованной координации локальных систем управления распределенными кибер-физическими системами

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

*Применение децентрализованной координации управления состоянием распределенных кибер-физических систем с непрерывными объектами, при которой кроме физического взаимодействия элементов непрерывного объекта существует информационное взаимодействие локальных координаторов в составе агентов мультиагентной системы, приводит к образованию многосвязных систем управления. Особенности децентрализованного координационного управления таких систем (нелинейность координаторов, взаимный физическое воздействие элементов объекта, наличие производственных затрат накопленного ресурса, который определяет состояние элементов и т.д.) обуславливают необходимость дополнительных исследований устойчивости системы и сходимости процесса координации. Целью работы является исследование условий устойчивости и сходимости децентрализованной координации распределенной кибер-физической системы управления с волновым методом координации. Получено условие устойчивости таких систем. Разработана модель системы из двух связанных управляемых элементов и локальных систем управления. Получена передаточная функция системы с помощью метода эквивалентных преобразований. Показано, что при отсутствии координации такая система является устойчивой при условии затухания при распространении воздействий на элементы непрерывного объекта. Исследована устойчивость и сходимость децентрализованной координации локальных систем управления с волновым методом координации на основе имитационной модели на примере трехэлементной системы. Имитационная модель создана в системе Scilab/Xcos. В результате проведенных исследований показано, что хотя система является устойчивой, состояние элементов объекта совпадает с заданным, однако продолжительность процесса координации значительно превышает длительность переходных процессов отдельных элементов. Дальнейшие исследования предполагается нацелить на доказательство гипотезы независимости устойчивости системы от количества управляемых элементов непрерывного объекта и исследование условий устойчивости активных систем (с увеличением влияния в процессе распространения).*

**Ключевые слова:** устойчивость, сходимость, децентрализованная координация, распределенная кибер-физическая система, непрерывный объект.

**Дубовой Владимир Михайлович** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой компьютерных систем управления, e-mail: v.m.dubovoy@gmail.com ;

**Юхимчук Марія Сергіївна** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем управління