

Марія ЯКИМЧУК

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0002-8131-9739>e-mail: umcmasha@gmail.com

Володимир ДУБОВИЙ

Вінницький національний технічний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0440-3643>

ІНФОРМАЦІЙНИЙ АСПЕКТ КООРДИНАЦІЇ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

Виробничі системи з багатозональними технологічними об'єктами разом із засобами управління технологічними процесами належать до класу кібер-фізичних систем. Поєднання трьох аспектів: наявність фізичних взаємодій у розподіленому технологічному об'єкті, наявність складних сценаріїв локального управління, які залежать від параметрів стану області об'єкта, децентралізація та наявність глобальних критеріїв зумовили новий клас завдань – просторово-часову координацію систем з безперервними технологічними об'єктами та логічним управлінням. Мета дослідження - підвищення ефективності децентралізованої координації за рахунок оптимізації інформаційних потоків та структури підсистем координації. Розглянуто зв'язок кількості інформації щодо стану виробничих процесів з невизначеністю координації пов'язаних операцій. Оцінено дисперсію стану елемента об'єкта з використанням просторово-часового спектру стану. Перевірка адекватності оцінок інформаційних потоків та його залежність від параметрів системи виконувалася з допомогою експериментів на імітаційній моделі на платформі Scilab. Отримані в результаті статистичної обробки даних імітаційних експериментів значення інформаційних потоків за мірою Шеннона відрізнялися від розрахункових в межах 18%. Враховуючи пакетну передачу даних це не впливає на загальну оцінку необхідної пропускної спроможності системи передачі даних. Запропонований підхід до оцінювання інформаційних потоків у системі децентралізованої координації може бути використаний для вибору параметрів системи передачі даних, а також для оптимізації структури і інформаційних потоків системи координації.

Ключові слова: децентралізована координація, інформація, невизначеність параметрів.

Mariia YUKHIMCHUK, Volodymyr DUBOVOI

Vinnytsia National Technical University

INFORMATION ASPECT OF COORDINATION OF PRODUCTION PROCESSES

Production systems with multi-zone technological facilities together with technological process management tools belong to the class of cyber-physical systems. The combination of three aspects: the presence of physical interactions in a distributed technological object, the presence of complex local control scenarios that depend on the state parameters of the object area, decentralization and the presence of global criteria led to a new class of tasks - spatio-temporal coordination of systems with continuous technological objects and logical management. The purpose of the research is to increase the effectiveness of decentralized coordination due to the optimization of information flows and the structure of coordination subsystems. The relationship between the amount of information regarding the state of production processes and the uncertainty of coordination of related operations is considered. The dispersion of the state of the object element was estimated using the spatio-temporal spectrum of the state. Checking the adequacy of information flow estimates and its dependence on system parameters was performed using experiments on a simulation model on the Scilab platform. The values of information flows obtained as a result of statistical processing of data from simulation experiments according to Shannon's measure differed from the calculated values by 18%. Considering packet data transmission, this does not affect the overall estimate of the required bandwidth of the data transmission system. The proposed approach to the assessment of information flows in the system of decentralized coordination can be used to select the parameters of the data transmission system, as well as to optimize the structure and information flows of the coordination system.

Keywords: decentralized coordination, information, parameter uncertainty.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Виробничі системи з багатозональними технологічними об'єктами разом із засобами управління технологічними процесами належать до класу кібер-фізичних систем. Поєднання трьох аспектів: наявність фізичних взаємодій у розподіленому технологічному об'єкті, наявність складних сценаріїв локального управління, які залежать від параметрів стану області об'єкта, децентралізація та наявність глобальних критеріїв зумовили новий клас завдань – просторово-часову координацію систем з безперервними технологічними об'єктами та логічним управлінням.

Важливим і досить поширеним підкласом є системи з безперервними розподіленими об'єктами управління – розподілені кібер-фізичні системи (РКФС). Під безперервністю об'єктів ми розумітимемо наявність фізичної взаємодії між елементами (зонами, областями) об'єкта на енергетичному та матеріальному рівні. Більшість досліджень, крім спрямованих на вимірювання [1], під час планування роботи РКФС не враховують фізичні взаємодії.

Особливістю децентралізованих РКФС з багатозональними об'єктами є значна невизначеність параметрів взаємодії зон внаслідок випадкових впливів, неповнозв'язності системи та відсутності у окремої підсистеми повної інформації про стан інших підсистем, що знаходяться у безпосередньому зв'язку.

Моделюванню випадкових впливів на компоненти РКФС [2] приділялося мало уваги. Зокрема, важливим завданням у процесі розробки РКФС є оптимізація параметрів протоколів передачі даних між

підсистемами. У системах IoT знайшли застосування протоколи LoRaWAN, IPv6, 6LoWPAN, Bluetooth Low Energy (BLE), ZigBee, Wi-Fi та Z-Wave та інші. Для децентралізованих РКФС виробничого призначення найбільш перспективними є LoRaWAN [3] для великих технологічних об'єктів, наприклад, сільськогосподарських, та ZigBee для об'єктів розміром до 100 метрів. Перевагою цих мереж є можливість створення шлюзів та комірчастої структури зв'язків, яка притаманна децентралізованим системам.

З розвитком та широким застосуванням IoT у автоматизації розподілених технологічних об'єктів та застосуванням хмарних технологій для накопичення та обробки інформації, значну актуальність набуває завдання дослідження та оптимізації інформаційних потоків у РКФС з урахуванням техніко-економічних характеристик інформаційної компоненти кібер-фізичної системи та завдань просторово-часової координації. У нашому дослідженні ми розглядаємо вплив фізичних та інформаційних процесів на вибір параметрів протоколу LoRaWAN.

Проте у зазначених роботах не розглядаються конструктивні моделі зв'язку між показниками і структурою систем координації і величинами інформаційних потоків, необхідних для здійснення координації, хоча у роботах з теорії активних систем [4] і приділяється увага зв'язку структури ієрархічних систем і інформаційними потоками.

Враховуючи переваги децентралізованої координації, сформулюємо мету дослідження як підвищення ефективності децентралізованої координації за рахунок оптимізації інформаційних потоків та структури підсистем координації.

Розглянемо РКФС з одновимірним технологічним об'єктом і ситуаційно-логічним керуванням технологічним процесом. Вибір одновимірного об'єкта не порушує загальності дослідження, проте спрощує його схематичне зображення. Модель архітектури системи зображено на рис.1. Система складається з об'єкта, розділеного на керовані елементи KE, локальних систем керування ЛСК і координаторів К, які узгоджують задані параметри ЛСК. Кожна LCS містить регулятор R, ситуаційний аналізатор SA і логічний контролер LC, який містить сценарії досягнення бажаного результату [5]. На рис. 1 ці сценарії утворюють ситуаційний граф переходів між станами елемента SE залежно від результату аналізу ситуації. Координатори взаємодіють один з одним за децентралізованим принципом, тобто безпосередньо, без координаторів верхнього рівня. Кожен координатор в процесі розв'язання задачі координації використовує інформацію про стан і цільову функцію елементів, які його оточують (елементів свого кластеру), відповідно до принципу ближньої дії [6].

Складемо матрицю кластерів – топологічну матрицю координації $\Omega_G = [\omega_0, \dots, \omega_i, \dots, \omega_m]^T$, де ω_i - вектор елементів i -го кластера, причому елементам в кластері i -го елемента відповідає 1, а іншим – 0.

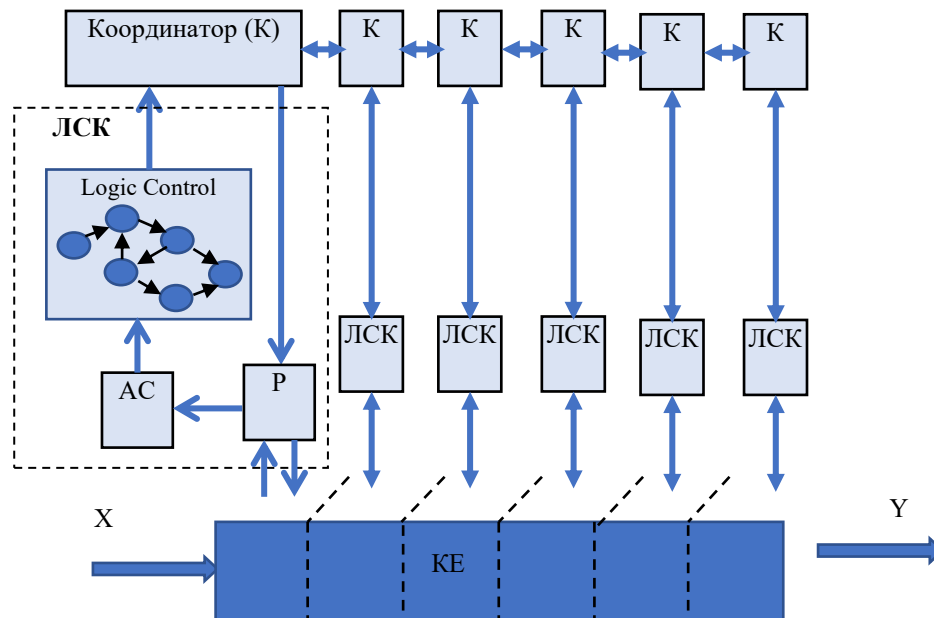


Рис.1. РКФС з одновимірним технологічним об'єктом і ситуаційно-логічним керуванням технологічним процесом

Зв'язок фізичної і інформаційної взаємодій здійснюється через процедури вимірювання і регулювання стану елементів:

- взаємодія [елемент об'єкта KE → регулятор P] (модель вимірювання)

$$\tilde{V}_i = V_i + \delta \tag{1}$$

де δ - випадкова похибка вимірювання;

- взаємодія [регулятор P → елемент об'єкта KE] (модель керування)

$$\mathbf{P}_{0i,j} = A_{i,j}(\mathbf{V}_{0i}, \mathbf{V}_i, u), \quad (2)$$

де \mathbf{V}_{0i} - параметр координації (бажаний стан); u - випадковий вплив зовнішнього середовища.

Інформаційна взаємодія складається з наступних окремих взаємодій: [регулятор P → ситуаційний аналізатор СА], [ситуаційний аналізатор СА → логічний контролер LC], [логічний контролер LC → координатор К], [координатор i -го елемента ↔ координатори сусідніх елементів], [координатор К → регулятор P]. Розглянемо інформаційну взаємодію підсистем розподіленої системи. Вона забезпечується двома типами інформаційних потоків: інформаційний потік рішень (команд, керуючих сигналів) та інформаційний потік даних (контрольної інформації, значень параметрів стану тощо).

Охарактеризуємо задачі координації параметрами $\{\mathbf{V}, \mathbf{\Lambda}, \mathbf{F}, u, \mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Q}, \mathbf{V}_0, \mathbf{T}\}$:

\mathbf{V} - вектор стану елементів;

$\mathbf{\Lambda}$ - вектор параметрів зв'язку;

\mathbf{F} - вектор бажаних станів елементів;

u - стан оточуючого середовища;

\mathbf{X}, \mathbf{Y} - вектори матеріальних потоків між підсистемами (\mathbf{X} - вхідні, \mathbf{Y} - вихідні);

\mathbf{Q} - якісні характеристики матеріальних потоків;

\mathbf{V}_0 - вектор параметрів координації;

\mathbf{T} - час виконання операцій підсистемами об'єкта.

Інформаційна взаємодія [регулятор P → ситуаційний аналізатор СА] полягає у передачі даних вимірювання вектора стану елемента об'єкта до ситуаційного аналізатора.

Інформаційна взаємодія [ситуаційний аналізатор СА → логічний контролер LC] полягає у передачі до логічного контролера LC результатів класифікації ситуації на основі вектора $\tilde{\mathbf{V}}_i$ Ситуації, у яких здійснюється управління, утворюють множину $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$. Елемент об'єкта перебуває у ситуації s_{ik} , якщо його вектор стану лежить усередині гіперкубу ситуації: $\forall v_j \in [v_{kj \min}, v_{kj \max}]$. Оскільки вектор вимірювань містить випадкову похибку, класифікація виконується на основі умовних ймовірностей ситуацій. Якщо виміри параметрів ситуацій незалежні, компоненти вектора оцінок належності стану елемента об'єкта до заданого гіперкубу

$$\tilde{q}_{S_k} = \prod_{j=1}^m \left[\int_{v_{kj \min}}^{v_{kj \max}} G(\delta_{v_j}, \tilde{v}_j, \sigma_{v_j}) d\delta_{v_j} \right] \quad (3)$$

Оцінка невизначеності системи на основі векторно-матричної моделі

У процесі узгодження центральний елемент кожного кластера отримує інформацію про стан та параметри інших елементів кластера. Оцінимо інтенсивність такого обміну інформацією.

Кожен кластер характеризується вектором параметрів $\{\mathbf{V}_\varepsilon, \mathbf{\Lambda}_\varepsilon, \mathbf{F}_\varepsilon, u, \mathbf{X}_\varepsilon, \mathbf{V}_{0\varepsilon}\}$, що вимірюються або задаються з певним ступенем невизначеності.

Діапазони параметрів є константами, що визначаються особливостями РКФС. Середні квадратичні похибки визначаються на основі похибок вимірювання станів елементів \mathbf{V} , сировини \mathbf{X} та середовища u , похибок завдання вихідних даних \mathbf{F}_ε . З матричної моделі РКФС [7] знаходимо:

$$\mathbf{V}_o = \mathbf{W}_0^{-1} \left[\mathbf{V} (\mathbf{1} - \mathbf{W}\mathbf{\Lambda}\mathbf{1} - \mathbf{W}\mathbf{\Lambda}\mathbf{\Omega}\mathbf{1}^{-1}) - \mathbf{W}_u (u\mathbf{1} - \mathbf{V}) + \mathbf{W}_x \mu \mathbf{X} \right], \quad (4)$$

де \mathbf{W}_0 , \mathbf{W} , \mathbf{W}_u , \mathbf{W}_x - передатні функції зони об'єкта, регулятора, ЛСК по зовнішньому збуренню, ЛСК по входу сировини відповідно.

Тоді середня квадратична похибка координації

$$\sigma_{V_o} = \mathbf{W}_0^{-1} \left[\sigma_V (\mathbf{1} - \mathbf{W}\mathbf{\Lambda}\mathbf{1} - \mathbf{W}\mathbf{\Lambda}\mathbf{\Omega}\mathbf{1}^{-1}) - \mathbf{W}_u (\sigma_u \mathbf{1} - \mathbf{V}) + \mathbf{W}_x \mu \sigma_X \right] \quad (5)$$

Для оцінювання σ_v розглянемо динамічні процеси у розподіленому об'єкті з ресурсним управлінням як взаємодію трьох полів:

- Поле параметрів об'єкта $v(\mathbf{Z}, t)$, де v - стан елемента об'єкта; $\mathbf{Z} = \{z_k\}$ - вектор координат елементів;

- Поле керуючих впливів $\mathbf{p}_0(\mathbf{Z}, t)$;

- Поле збурень $\mathbf{u}(\mathbf{Z}, t)$.

Невизначеність стану елемента зумовлена такими факторами:

- Невизначеність впливу зовнішнього середовища \mathbf{u} ;

- Невизначеність стану оточуючих елементів, які впливають на елемент, що розглядається

\mathbf{V}_ε ;

- Невизначеність параметрів середовища розповсюдження впливу $\mathbf{\Lambda}$;

- Невизначеність виробничої програми \mathbf{X} і питомих витрат \mathbf{M} .

Вплив зовнішнього середовища і оточуючих елементів здійснюється через потік ресурсу. Дисперсія стану елемента

$$\sigma_v^2(\mathbf{Z}_i, \tau) = \sigma_{v(\mathbf{Z}_i, 0)}^2 + \sigma_{r(\mathbf{Z}_i, \tau)}^2 - 2R_{v\mathbf{Z}_i, 0r\mathbf{Z}_i, \tau}, \quad (6)$$

де $\sigma_{v(\mathbf{Z}_i, 0)}^2$ - дисперсія стану елемента в початковий момент; $\sigma_v^2(\mathbf{Z}_i, \tau)$ - дисперсія стану через проміжок часу τ ; $\sigma_{r(\mathbf{Z}_i, \tau)}^2$ - дисперсія кількості ресурсу за проміжок часу τ ; $R_{v\mathbf{Z}_i, 0r\mathbf{Z}_i, \tau}$ - кореляційна функція стану елемента і кількості ресурсу.

Оцінимо дисперсію стану елемента об'єкта з використанням просторово-часового спектру стану елементів об'єкта [8]. В лінійних об'єктах спектральні щільності потужності адитивні з урахуванням взаємної кореляції. Отже, баланс спектральних щільностей ресурсу елемента

$$\left\{ \begin{aligned} G_{p_0v_0}(\omega, \Psi) &= G_{v_0v_0}(\omega, \Psi) \cdot W_{v_0p_0}(\omega) \\ G_{rr}(\omega, \Psi) &= G_{p_0v_0}(\omega, \Psi) + G_{uu}(\omega, \Psi) + G_{xx}(\omega, \Psi) + \sum_{k \in \varepsilon} G_{p_k p_k} + \\ &+ 2G_{p_0u}(\omega, \Psi) + 2G_{p_0x}(\omega, \Psi) + 2 \sum_{k \in \varepsilon} G_{p_0 p_k}(\omega, \Psi) - \\ &- 2G_{ux}(\omega, \Psi) + 2 \sum_{f \in \varepsilon} G_{up_k}(\omega, \Psi) - 2 \sum_{f \in \varepsilon} G_{p_k x}(\omega, \Psi) \\ G_{vv}(\omega, \Psi) &= G_{rr}(\omega, \Psi) \cdot \left(\frac{1}{T\omega}\right)^2 \\ G_{p_k p_k}(\omega, \Psi) &= \int_0^\infty \left\{ \iiint_{\Omega} [R_{p_k p_k}(\tau, \mathbf{Z}) e^{-j\Psi\mathbf{Z}}] e^{-j\omega\tau} d\mathbf{Z} \right\} d\tau \end{aligned} \right. \quad (7)$$

де 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; $G_{p_k p_k}$ - авто-спектральна щільність вхідного ресурсу з урахуванням розповсюдження; G_{ux} - взаємна спектральна щільність потужності збурення і сировини; ω - часова кругова частота; Ψ - вектор просторових кругових частот; j - комплексна одиниця.

Вплив зовнішнього середовища і витрати сировини на виробництво можна вважати незалежними, отже $G_{ux} = 0$.

Взаємна спектральна щільність потужності керівного впливу і вхідного ресурсу, який надходить від сусідніх елементів $G_{p_0 p_k}$ визначається алгоритмом і параметрами координатора і ЛСК. У найпростішому випадку координатор розраховує вплив

$$v_0 = \left(\mu x - \sum_{k \in \varepsilon} p_{ki} - |W_u| u \right) \cdot |W_{v_0 p_0}^{-1}|, \quad (8)$$

де $|W_u| = \left| \frac{W_0}{1 + W_0 W_{LCS}} \right|$ - коефіцієнт ослаблення впливу зовнішнього середовища впливом ЛСК

(Рис. 2), після чого розв'язує задачу оптимізації. Наявність в алгоритмі розрахунку великої кількості факторів, що впливають на результат, приводить до зменшення взаємної парної кореляції, отже можемо вважати $G_{v_0 p_{ki}} \approx 0$. Аналогічно $G_{p_{ki} x} \approx 0$ і $G_{u p_{ki}} \approx 0$.

Оскільки оптимальне значення вхідного ресурсу задається координатором, який враховує вплив зовнішнього середовища і ЛСК, для знаходження $G_{v_0 u}$ домножимо (8) на v_0 , усереднюємо і перетворюємо за Фур'є. Отримуємо

$$G_{v_0 v_0}(\omega, \mathbf{Z}_i) = \left[\mu G_{v_0 x}(\omega, \mathbf{Z}_i) - |W_u| G_{v_0 u}(\omega, \mathbf{Z}_i) \right] \cdot W_{v_0 p_0}^{-1}(\omega) \quad (9)$$

звідки

$$G_{v_0 u}(\omega, \mathbf{Z}_i) = \frac{\mu}{|W_u|} G_{v_0 x}(\omega, \mathbf{Z}_i) - \frac{W_{v_0 p_0}(\omega)}{|W_u|} G_{v_0 v_0}(\omega, \mathbf{Z}_i) \quad (10)$$

Для визначення $G_{p_0 x}$ будемо виходити з гіпотези, що чим більший збурюючий вплив сусідніх елементів і оточуючого середовища, тим більше відхиляється значення p_0 від номінального v_0 . Очевидно, при $\forall \mathbf{Z} v(\mathbf{Z}) = v_0 = u$ потоки перетікання ресурсу будуть відсутні. Для отримання часової залежності $R_{p_0 x}(\tau, \mathbf{Z}_i)$ розглянемо структурну схему локальної координації (рис.2)

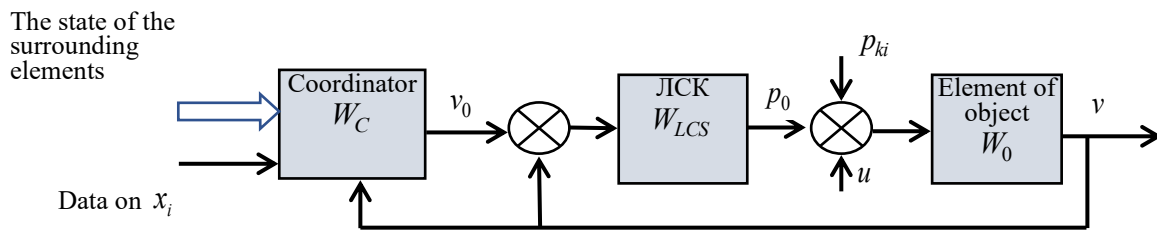


Рис. 2. Схема локальної координації

Передатна функція $x_0 \rightarrow v_0$

$$W_{x_0 \rightarrow v_0}(p) = \frac{W_C}{1 + W_C \frac{W_{LCS} W_0}{1 + W_{LCS} W_0}} = \frac{W_C (1 + W_{LCS} W_0)}{1 + W_{LCS} W_0 + W_C W_{LCS} W_0}$$

Вважатимемо координатор і ЛСК аперіодичними елементами з сталими часу відповідно T_C і T_{LCS} . Отримуємо

$$W_{x_0 \rightarrow v_0}(p) = \frac{\frac{1}{1 + T_C p} \left(1 + \frac{1}{1 + T_{LCS} p} \cdot \frac{1}{T_0 p} \right)}{1 + \frac{1}{1 + T_{LCS} p} \cdot \frac{1}{T_0 p} + \frac{1}{1 + T_C p} \cdot \frac{1}{1 + T_{LCS} p} \cdot \frac{1}{T_0 p}} = \frac{T_{LCS} p T_0 p + T_0 p + 1}{(1 + T_C p)(1 + T_{LCS} p) T_0 p + (1 + T_C p) + 1}$$

звідки частотна передатна функція

$$W_{x_0 \rightarrow v_0}(j\omega) = \frac{1 - T_{LCS} T_0 \omega^2 + T_0 j\omega}{(1 + T_C j\omega)(1 + T_{LCS} j\omega) T_0 j\omega + (1 + T_C j\omega) + 1} \quad (11)$$

Тоді спектральні щільності потужності пов'язані співвідношенням

$$G_{p_0x}(\omega, \mathbf{Z}_i) = G_{xx}(\omega, \mathbf{Z}_i) \cdot W_{x_0 \rightarrow p_0}(j\omega) = G_{xx}(\omega, \mathbf{Z}_i) \cdot \frac{1 - T_{LCS}T_0\omega^2 + T_0j\omega}{(1 + T_Cj\omega)(1 + T_{LCS}j\omega)T_0j\omega + (1 + T_Cj\omega) + 1} \quad (12)$$

Просторова складова спектральних щільностей визначається геометричними характеристиками розподіленого об'єкта і розташуванням точок прикладення впливу.

Вплив зовнішнього збурення можна вважати білим шумом у часі, амплітуда якого максимальна на границях об'єкта і експоненціально спадає при віддаленні від границь. Розкладаємо модель розповсюдження впливу [9] за Фур'є по вектору координат \mathbf{Z} і отримуємо

$$G_{uu}(\omega, \Psi) = \int_{\Omega} \left[\iiint_{\Omega} G_{uu}(\omega, \mathbf{Z}_{\Omega}) e^{-\frac{|\mathbf{Z}_{\Omega} - \mathbf{Z}|}{4\lambda\tau}} d\mathbf{Z}_{\Omega} \right] e^{-j\Psi\mathbf{Z}} d\mathbf{Z} \quad (13)$$

де $G_{uu}(\omega, \mathbf{Z}_{\Omega})$ - спектр зовнішнього шуму на поверхні розподіленого об'єкта; Ω - поверхня об'єкта. У загальному випадку довільної форми об'єкта інтеграл по поверхні можливо взяти тільки у числовому вигляді.

Аналогічно просторова спектральна щільність, зумовлена керуючими впливами,

$$G_{v_0v_0}(\omega, \Psi) = \int_0^{\infty} \left[\sum_j G_{v_0v_0}(\omega, \mathbf{Z}_j) \cdot e^{-\frac{|\mathbf{Z}_j - \mathbf{Z}|}{4\lambda\tau}} \right] e^{-j\Psi\mathbf{Z}} d\mathbf{Z} \quad (14)$$

де \mathbf{Z}_j - вектор координат j -ї точки прикладання керівного впливу.

У стаціонарному режимі використання розподіленого об'єкта виробниче завдання не змінюється у просторі і часі, отже

$$G_{xx}(\omega, \Psi) = G_{xx}(\omega = 0, \Psi = 0) = x\delta[\omega = 0]\delta[\Psi = 0].$$

де $\delta[\]$ - дельта-функція Дірака.

Знайдемо просторово-часову кореляційну функцію ресурсу. На основі теореми Вінера-Хінчина запишемо

$$R_{vv}(\tau, \Psi) = 2 \int_0^{\infty} G_{vv}(\omega, \Psi) \cdot e^{i\omega\tau} d\omega \quad (15)$$

Оцінимо кількість інформації щодо параметрів елементів кластера. Якщо середні квадратичні похибки параметрів відповідно $(\sigma_{V_{\varepsilon}}, \sigma_{\Lambda_{\varepsilon}}, \sigma_{F_{\varepsilon}}, \sigma_u, \sigma_{X_{\varepsilon}}, \sigma_{Y_{\varepsilon}}, \sigma_{Q_{\varepsilon}}, \sigma_{V_{0\varepsilon}}, \sigma_{T_{\varepsilon}})$, то за нормального розподілу похибок, нехтуючи кореляцією між параметрами, знаходимо залишкову ентропію стану елемента O_i :

$$\begin{aligned} H_{O_i} &= \log(\sigma_{v_i} \sqrt{2\pi e}) + \log(\sigma_{\lambda_i} \sqrt{2\pi e}) + \log(\sigma_{F_i} \sqrt{2\pi e}) + \log(\sigma_u \sqrt{2\pi e}) + \\ &+ \log(\sigma_{x_i} \sqrt{2\pi e}) + \log(\sigma_{y_i} \sqrt{2\pi e}) + \log(\sigma_{q_i} \sqrt{2\pi e}) + \log(\sigma_{v_{0i}} \sqrt{2\pi e}) + \log(\sigma_{T_i} \sqrt{2\pi e}) = \\ &= \log \left[(2\pi e)^{\frac{9}{2}} \right] + \log(\sigma_{v_i} \cdot \sigma_{\lambda_i} \cdot \sigma_{F_i} \cdot \sigma_u \cdot \sigma_{x_i} \cdot \sigma_{y_i} \cdot \sigma_{q_i} \cdot \sigma_{v_{0i}} \cdot \sigma_{T_i}) \end{aligned}$$

Апріорна ентропія значень параметрів елемента:

$$H_{O_i}^{(0)} = \log(D_{v_i} \cdot D_{\lambda_i} \cdot D_{F_i} \cdot D_u \cdot D_{x_i} \cdot D_{y_i} \cdot D_{q_i} \cdot D_{v_{0i}} \cdot D_{T_i}), \quad (16)$$

де D - діапазон значень параметра.

Тоді кількість інформації щодо одного елемента:

$$I_{O_i} = H_{O_i}^{(0)} - H_{O_i} = \log \left(\frac{D_{V_i} D_{\lambda_i} D_{F_i} D_u D_{X_i} D_{Y_i} D_{q_i} D_{V_{0i}} D_{T_i}}{\sigma_{V_i} \sigma_{\lambda_i} \sigma_{F_i} \sigma_u \sigma_{X_i} \sigma_{Y_i} \sigma_{q_i} \sigma_{V_{0i}} \sigma_{T_i}} \right) - C, \quad (17)$$

де C - константа, яка залежить від типу розподілу ймовірності похибки і кількості параметрів. Для нормального розподілу $C = \frac{9}{2} \log(2\pi e)$.

Інформація щодо елементів кластера \mathbf{K}_ε

$$I_{\mathbf{K}_\varepsilon} = \sum_{\forall O_i \in \mathbf{K}_\varepsilon} I_{O_i} = \log \left(\frac{D_{V_\varepsilon} D_{\Lambda_\varepsilon} D_{F_\varepsilon} D_u D_{X_\varepsilon} D_{Y_\varepsilon} D_{Q_\varepsilon} D_{V_{0\varepsilon}} D_{T_\varepsilon}}{\sigma_{V_\varepsilon} \sigma_{\Lambda_\varepsilon} \sigma_{F_\varepsilon} \sigma_u \sigma_{X_\varepsilon} \sigma_{Y_\varepsilon} \sigma_{Q_\varepsilon} \sigma_{V_{0\varepsilon}} \sigma_{T_\varepsilon}} \right) - C \quad (18)$$

Проте слід враховувати, що між параметрами елементів існує статистичний зв'язок, отже за умови використання оптимального статистичного оцінювання необхідна для координації кількість інформації дещо менша. Ентропія системи випадкових величин

$$H = \ln \left[(2\pi e)^{\frac{m}{2}} \sqrt{|R|} \right],$$

де $|R|$ - визначник коваріаційної матриці розміром $[m \times m]$. Відповідно необхідна кількість інформації

$$I_{\mathbf{K}_\varepsilon} = \log \left(\frac{\sqrt{|R_{V_\varepsilon, \Lambda_\varepsilon, F_\varepsilon, u, X_\varepsilon, Y_\varepsilon, Q_\varepsilon, V_{0\varepsilon}, T_\varepsilon}|}}{\prod_{\xi \in \{V_\varepsilon, \Lambda_\varepsilon, F_\varepsilon, u, X_\varepsilon, Y_\varepsilon, Q_\varepsilon, V_{0\varepsilon}, T_\varepsilon\}} \sigma_\xi} \right),$$

де $\xi \in \{V_\varepsilon, \Lambda_\varepsilon, F_\varepsilon, u, X_\varepsilon, Y_\varepsilon, Q_\varepsilon, V_{0\varepsilon}, T_\varepsilon\}$ означає перебір усіх компонент кожного вектора множини параметрів.

Перевірка адекватності оцінок інформаційних потоків та його залежність від параметрів системи виконувалася з допомогою експериментів на імітаційній моделі. Для цього було розроблено бібліотеку моделей типових блоків РКФС на платформі Scilab.

Результати моделювання процесу керування станом РТО, наведені на рис. 3, показують, що просторовий розподіл ресурсу є сумою експоненціально спадних функцій з модами в точках прикладання впливу.

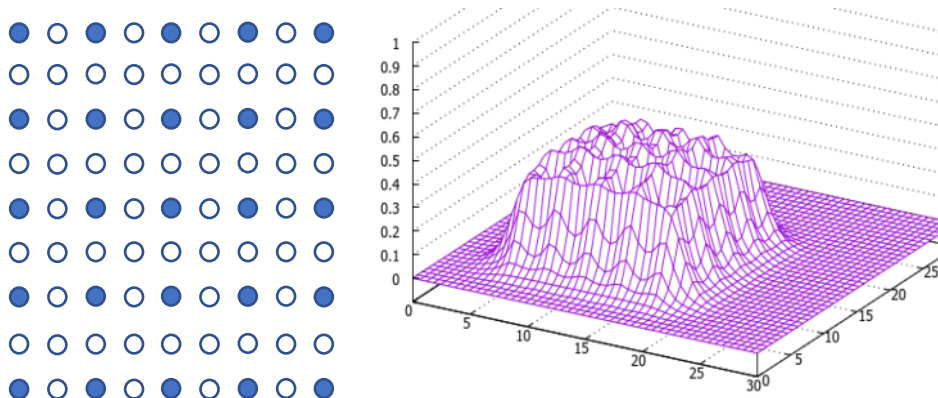


Рис. 3. Результат моделювання усталеного розподілу стану елементів РКФС для двовимірного об'єкта 5x5 елементів: ○ - некерований елемент; ● - керований елемент.

Генерування випадкових впливів u та X здійснювалося за нормальним розподілом ймовірностей, а заданого стану F - за рівномірним розподілом. Отримані в результаті статистичної обробки даних імітаційних експериментів значення інформаційних потоків за мірою Шеннона відрізнялися від розрахункових в межах 18%. Враховуючи пакетну передачу даних системи LoRaWAN, це не впливає на загальну оцінку необхідної пропускної спроможності системи передачі даних. Отже, запропонований підхід

до оцінювання інформаційних потоків у системі децентралізованої координації може бути використаний для вибору параметрів системи передачі даних.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Врахування просторово-часової кореляції параметрів дозволяє зменшити інформаційний потік, скоротити час передачі даних та загальний час координації. Але це вимагає ускладнення програмного забезпечення координаторів відновлення даних з урахуванням статистичних залежностей. З іншого боку, статистичну залежність при збереженні надлишковості можна використовувати для підвищення достовірності даних в умовах невизначеності.

Результати дослідження можуть бути використані для оптимізації структури і інформаційних потоків системи координації. У цьому контексті доцільно дослідити вплив структури системи координації на втрати.

Література

1. Zhang, F., Szwaykowska, K., Wolf, W., and Mooney, V. 2008. Task scheduling for control oriented requirements for cyber-physical systems. In Real-Time Systems Symposium, 2008. 47–56.
2. Gill, C. D. and Niehaus, D. 2006. Towards system software platforms for cyber-physical systems, Position Paper. In NSF Cyber-Physical Systems Workshop.
3. LoRaWAN™ Specification, N.Sornin (Semtech), M.Luis (Semtech), T.Eirich (IBM), T.Kramp (IBM), O.Hersent (Actility), V1 .0, 2015
4. Burkov V., Novikov D. (2009). *Active systems theory (history of development)*. Problemy Upravleniya, 3. 29-35.
5. Volodymyr Dubovoi, Mariya Yukhymchuk Energy Efficiency of Smart Control Based on Situational Models
6. В. М. Дубовой, М. С. Юхимчук. Децентралізоване координаційне керування розподіленими кібер-фізичними системами з неперервними об'єктами : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2022. 230 с.
7. A Framework for Analyzing Spectrum Characteristics in Large Spatio-temporal Scales. Yijing Zeng, Varun Chandrasekaran, Suman Banerjee, Domenico Giustiniano (2019) Association for Computing Machinery. ACM ISBN 978-1-4503-6169-9/19/10. <https://doi.org/10.1145/3300061.3345450>
8. Dubovoi V., Sembrat D. and Yuhymchuk M.. Optimal Decomposition of Control of Distributed Cyber-physical System. *11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*. 2021. P. 601–605, doi: 10.1109/IDAACS53288.2021.9661007

References

1. Zhang, F., Szwaykowska, K., Wolf, W., and Mooney, V. 2008. Task scheduling for control oriented requirements for cyber-physical systems. In Real-Time Systems Symposium, 2008. 47–56.
2. Gill, C. D. and Niehaus, D. 2006. Towards system software platforms for cyber-physical systems, Position Paper. In NSF Cyber-Physical Systems Workshop.
3. LoRaWAN™ Specification, N.Sornin (Semtech), M.Luis (Semtech), T.Eirich (IBM), T.Kramp (IBM), O.Hersent (Actility), V1 .0, 2015
4. Burkov V., Novikov D. (2009). *Active systems theory (history of development)*. Problemy Upravleniya, 3. 29-35.
5. Volodymyr Dubovoi, Mariya Yuhymchuk Energy Efficiency of Smart Control Based on Situational Models
6. V. M. Dubovoi, M. S. Yuhymchuk. *Detsentralizovane koordynatsiine keruvannya rozpodilenyi kiber-fizychny systemamy z neperervnyimi ob'ektamy : monohrafiia*. Vinnytsia : VNTU, 2022. 230 c.
7. A Framework for Analyzing Spectrum Characteristics in Large Spatio-temporal Scales. Yijing Zeng, Varun Chandrasekaran, Suman Banerjee, Domenico Giustiniano (2019) Association for Computing Machinery. ACM ISBN 978-1-4503-6169-9/19/10. <https://doi.org/10.1145/3300061.3345450>
8. Dubovoi V., Sembrat D. and Yuhymchuk M.. Optimal Decomposition of Control of Distributed Cyber-physical System. *11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*. 2021. R. 601–605, doi: 10.1109/IDAACS53288.2021.9661007