УДК681.516.75

https://doi.org/10.31649/mccs2022.14

М.С. Юхимчук

ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНЕ КООРДИНАЦІЙНЕ КЕРУВАННЯ РОЗПОДІЛЕНИМИ КІБЕР-ФІЗИЧНИМИ СИСТЕМАМИ З НЕПЕРЕРВНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

Вінницький національний технічний університет

АНОТАЦІЯ

Розподілена система – це така, яка складається з окремих елементів, що знаходяться у різних точках простору, функції і ресурси системи розділені між елементами, а розташування у просторі впливає на функціонування системи в цілому. Окремим випадком розподілених систем є розподілені системи керування (РСУ). В умовах сучасного ринку існує велика кількість розподілених систем керування, створених в різний час та різними компаніями. В роботі розроблений метод децентралізованої координації керування розподіленими кіберфізичними системами з неперервними об'єктами, розроблена модель РКФС з неперервним виробничим об’єктом і ресурсним керуванням станом, яка відрізняється врахуванням взаємного впливу керованих елементів неперервного виробничого об’єкта і витрат ресурсу на виробництво і подається у формі двохпотокового графа, запропоновано показник рівня координації, який визначає стан координації на проміжку від хаосу до заданого детермінованого стану, який дозволяє оцінювати ефективність системи координації, удосконалено критерій координації РКФС з неперервними виробничими об’єктами, який ґрунтується на моделі неперервного виробничого об’єкта і розподілі станів елементів об’єкта у просторі і часі, удосконалено метод прогнозування стану розподілених кібер-фізичних систем з неперервними об'єктами, який ґрунтується на моделі РКФС з неперервним виробничим об’єктом і ресурсним керуванням станом і просторово-часовому спектрі станів і збурень.

Ключові слова: децентралізоване керування, розподілені кібер-фізичні системи, координація.

ANNOTATION

A distributed system is one that consists of separate elements located at different points in space, the functions and resources of the system are divided between the elements, and the location in space affects the functioning of the system as a whole. A special case of distributed systems is distributed control systems (DCS). In today's market, there are a large number of distributed control systems created at different times and by different companies. In the work, a method of decentralized coordination of control of distributed cyber-physical systems with continuous objects is developed, a RKFS model with a continuous production object and resource state management is developed, which is characterized by taking into account the mutual influence of controlled elements of a continuous production object and resource costs for production and is presented in in the form of a two-flow graph, an indicator of the level of coordination is proposed, which determines the state of coordination in the interval from chaos to a given deterministic state, which allows to evaluate the effectiveness of the coordination system, the criterion of coordination of the RKFS with continuous production facilities, which is based on the model of a continuous production facility, and distribution of states of object elements in space and time, the method of forecasting the state of distributed cyber-physical systems with continuous objects, which is based on the RKFS model with a continuous production object and resource management of state and space-time spectrum, has been improved states and disturbances.

Вступ

Ускладнення і бурхливий розвиток розподілених систем управління (РСУ) особливо прискорився із здешевленням та мініатюризацією мікроконтролерів. Стало можливим включати мікроконтролери до складу давачів і виконавчих пристроїв (актуаторів) польового рівня. З іншого боку бурхливими темпами розвиваються комунікаційні системи. З цих двох фундаментальних досягнень народився «Інтернет речей» (Internet of Things, IoT), що у свою чергу підштовхнуло нові дослідження відомої проблеми координації виробничих процесів. Адже велика кількість локальних «мікросистем» керування вимагає їх узгодження в рамках автоматизованої системи управління. Останнім часом такі інтегровані системи, які об'єднують фізичні об'єкти, засоби збору і передачі інформації, обчислювальні підсистеми, які використовуються для обробки даних і прийняття керівних рішень за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, розглядаються в рамках концепції кібер-фізичних систем. Сучасні кібер-фізичні системи створені, як результат розвитку вбудованих розподілених систем, що функціонують у режимі реального часу. Окремим складним випадком задач координації є керування багатозональними неперервними розподіленими об'єктами, в яких спостерігається суттєвий взаємний вплив сусідніх зон. Таким чином усі ці процеси ставлять нові задачі координаційного управління і викликають необхідність створення нових моделей і методів їх розв'язання.

Метою роботи є підвищення ефективності координаційного управління кібер-фізичними системами з неперервними об'єктами шляхом розроблення і впровадження нових принципів, моделей, методів та алгоритмів децентралізованої координації.

З огляду на недоліки централізованих і ієрархічних систем керування **в роботі здійснюється розв'язання проблеми координаційного керування кібер-фізичними системами з неперервними об'єктами шляхом використання децентралізованих систем.** У децентралізованих системах координаційного керування вхідна інформація для координатора кожної локальної системи управління отримується від давачів, встановлених у локальній керованій зоні розподіленого об'єкта, і від інших координаторів. Це в першу чергу зручність масштабування системи, можливість запуску практично необмеженої кількості паралельних процесів управління, висока надійність підсистем зберігання і обробки даних.

Перспективним способом вирішення проблеми є використання децентралізованої координації за допомогою Smart-координаторів у кожній локальній системі управління. Найчастіше така координаційна архітектура використовується з дуже великою кількістю відносно автономних об'єктів, наприклад, в енергетиці [1, 2], у колективах автономних роботів та інженерних об'єктів [3], автономних літальних апаратах (дронах) [4, 5].

Децентралізовані системи є предметом багатьох досліджень. Багато цікавих результатів було отримано в дослідницькому проекті Control for Coordination of Distributed Systems (CON4COORD і C4C, використовуються обидва абревіатури) Консорціуму 12 дослідницьких центрів Європи [12]. Особливістю розподілених децентралізованих систем є значна невизначеність параметрів взаємодії підсистем, неповнозв'язаність системи та відсутність повної інформації про стан інших підсистем, які безпосередньо зв'язані з окремою підсистемою.

Залежно від типу системи завдання управління децентралізованими системами називають синхронізацією, децентралізованою стабілізацією, однорівневою координацією, однорангови керуванням [7] тощо. Лінійні та нелінійні системи, безперервні та дискретні, з оптимальним та адаптивним керуванням. , вважаються надійними та з елементами штучного інтелекту [8].

Адаптивне децентралізоване управління з модельною координацією було запропоновано в 1992 році Б.М. Міркіна і активно розвивалася багатьма авторами, наприклад, у [9]. Це передбачає наявність у локальних контролерах інформації про стан еталонних моделей усіх локальних підсистем.

Концепція розподіленої оптимізації контролю стану багатозонного приміщення запропонована в роботі [244]. У статті запропоновано розподілений метод оптимізації кондиціонування повітря, який можна реалізувати паралельно.

Децентралізовані системи є предметом багатьох досліджень. Особливістю розподілених децентралізованих систем є значна невизначеність параметрів взаємодії підсистем, неповнозв'язність системи і відсутність у окремої підсистеми повної інформації про стан інших підсистем, які знаходяться у безпосередньому зв'язку.

Залежно від виду систем задачі управління децентралізованими системами називають синхронізацією, децентралізованою стабілізацією, однорівневою координацією, одноранговим керуванням тощо [10]. Розглядаються лінійні і нелінійні системи, неперервні і дискретні, з оптимальним та з адаптивним управлінням, робастні та з елементами штучного інтелекту.

Розроблена модель РКФС наведена на рис.1. Для зручності зображена РКФС керування пласким розподіленим технологічним об'єктом (РТО). РТО складається з керованих і некерованих елементів O_{ij}. Стан керованих елементів регулюють локальні системи керування (ЛСУ), позначені на рис.1 як A_{ij}. Заданий стан елементів визначається координаторами C_{ij}. В роботі розглядається неперервні РТО з ресурсною взаємодією. Елементи таких РТО взаємодіють (сині стрілки на рис.1) шляхом «перетікання» ресурсу між елементами. Координатори також взаємодіють (жовті стрілки на рис.1) шляхом обміну інформацією про стан і параметри керованих елементів РТО.

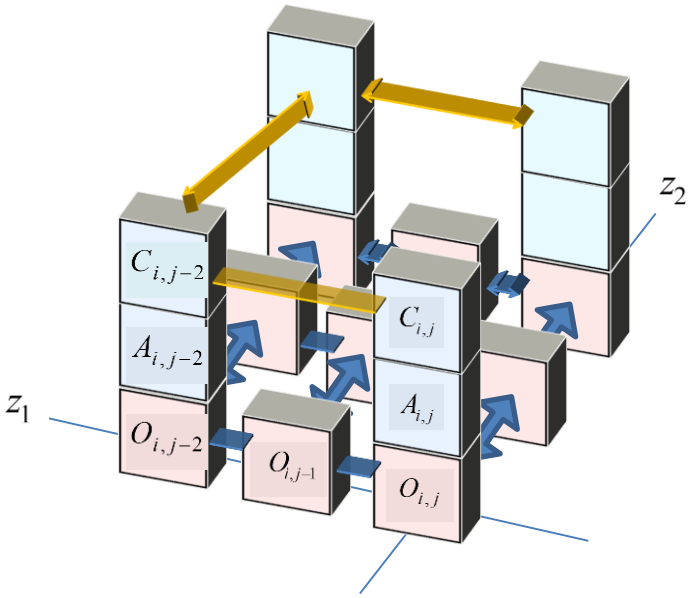


Рисунок 1– Структурна модель РКФС з пласким об'єктом

Розроблена модель неперервного виробничого об'єкта. Схема окремого елемента РТО наведена на рис.2.

В елементі O здійснюється перетворення сировини x на продукт y відповідно до виробничої функції w. На це витрачається частина Δv накопиченого ресурсу. Кількість накопиченого ресурсу v є параметром стану елемента. Вхідний потік ресурсу r є сумою потоку потужністю p_0, який надходить від локальної системи управління, і потоків ресурсу від сусідніх елементів, які утворюють вектор $\mathbf{P}_{in}$. Надлишок ресурсу $\mathbf{P}_{out}$ надходить до інших сусідніх елементів.

Розглянемо взаємодію елемента у вигляді нескінченно малої кулі із сусідніми елементами. Нехай стан кулі визначається вектором параметрів $v(\mathbf{Z}_k)$, де $\mathbf{Z}_k$ - координати центра кулі. На стан $P(\mathbf{Z}_k)$ впливають сусідні елементи, які розташовані в околі шириною dr у сферичних координатах. На рис.2 зображена схема елемента, де r і φ - узагальнені радіус і кут у

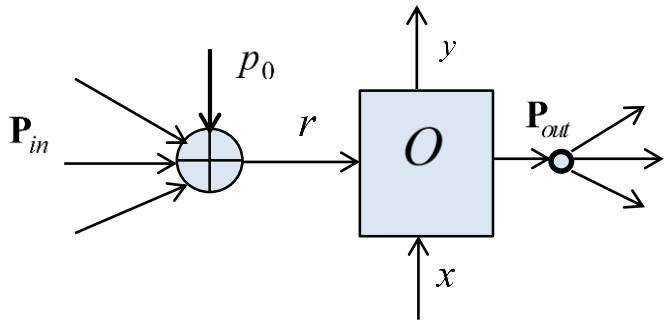


Рисунок 2 - Елемент розподіленого технологічного об'єкта

гіперсферичних координатах.

Вплив від елемента з координатами $\mathbf{Z}_k$ розповсюджується поступово відповідно до рівняння переносу (рівняння Бюргерса, зокрема рівняння дифузії і теплопровідності). Рівняння переносу має перший порядок відносно часу і другий порядок по просторових координатах. Розв'язок рівняння розповсюдження для різноманітних граничних і початкових умов відомий. Зокрема миттєвий точковий вплив на елемент k розповсюджується до елемента j відповідно до співвідношення

$$p_{kj}(d_k, t) = \frac{P_{0k}}{8(\pi\lambda t)^{3/2}} e^{-\frac{d_{kj}^2}{4\lambda t}}$$

де λ - коефіцієнт переносу; $d_{kj} = |\mathbf{Z}_k - \mathbf{Z}_j|$ - відстань від k-го місця керівного впливу; P_{0k} - енергія керівного впливу; t - проміжок часу від моменту впливу на k-й елемент.

Відповідно, зміна стану j-го елемента

$$\Delta v_j(T) = \frac{1}{C_j} \int_0^T \frac{P_{0k}}{8(\pi\lambda t)^{3/2}} e^{-\frac{d_{kj}^2}{4\lambda t}} dt, \qquad (1)$$

де C_j - ресурсоємність j-го елемента.

На кожен елемент об'єкта впливають усі керовані елементи. Для лінійного об'єкта

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

де t_k - момент впливу керування на k -й керований елемент.

Величина взаємного впливу елементів експоненціально спадає залежно від просторової відстані між елементами. Гранична відстань d_m до елементів, вплив на які вважається суттєвим, задовольняє співвідношення

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

де ε □ 1 - показник значущості.

Таким чином, модель окремого елемента системи подається системою рівнянь

$$\begin{cases} dv_i = \left(K\left(p_{0i} + \sum_{j=1}^{n_\varepsilon} p_{ji} \right) - \Delta v_i \right) dt, \\ \forall (p_{ji} > 0) \in P_{in}; \forall (p_{ji} < 0) \in P_{out} \\ y = w(v, \Delta v) \\ \Delta v = \dfrac{\mu(v)x}{\eta} \end{cases} \tag{4}$$

де μ - питомі витрати ресурсу r на одиницю сировини x; $\mathbf{P} = \{p_{ji}\}$ - матриця потоків ресурсів між елементами РТО; K - коефіцієнт ресурсоємності (характеризує величину зміни стану об'єкта на одиницю ресурсу, що надійшов); η - коефіцієнт корисної дії (к.к.д.); n_ε - кількість елементів РТО в ε -околі i -го елемента, вплив яких на його стан є суттєвим

Для забезпечення швидкодії і покращення економічних характеристик систем децентралізованої координації РКФС з неперервними РТО **розвинуто принцип ближньої дії** [11]. 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 ε -області, які можуть взаємодіяти і перетинатися. Запропонований алгоритм кластеризації елементів РКФС за розвинутим принципом ближньої дії. Доведено, що за умови перекриття кластерів в результаті ітеративної процедури координація на основі глобально-локального критерію сходиться до результату глобальної координації. 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.

Ґрунтуючись на моделі елемента РТО, узагальненій моделі РКФС і принципі ближньої дії розроблена модель взаємодії елементів РКФС у формі двохпотокового графа і у формі структурно-функціональної схеми, показаної на рис. 3.

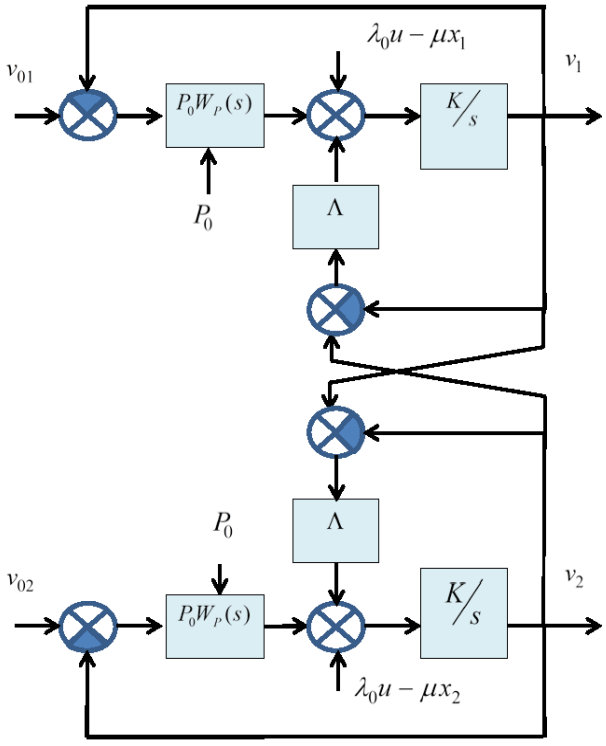


Рисунок 3 - модель взаємодії елементів РКФС

Запропонована модель разом з двохпотоковим графом і виробничою функцією елементів дозволяють здійснювати прогнозування стану РКФС і аналіз таких її важливих характеристик, як стійкість, ресурсоємність, якість регулювання стану тощо.

Розроблений метод децентралізованої координації керування розподіленими кіберфізичними системами з неперервними об'єктами передбачає:

- локальне керування станом елементів РКФС;
- введення до схеми кожної локальної системи управління окремих координаторів;
- забезпечення інформаційного зв’язку між координаторами типу «один до одного» в зоні ближньої дії кожного елемента РКФС;
- ідентифікацію параметрів елементів і їх взаємного впливу;
- 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 координація з встановленням такої процедури послідовної координації кожним координатором, щоб у кожній зоні ближньої дії одночасно здійснювалася координація тільки одним координатором.

Важливою складовою розв’язання проблеми координації управління РКФС є оцінювання невизначеності координації. Застосування степені координації як оцінки узгодженості підсистем керування елементами розподіленої системи практично не зустрічається. Тому запропоновано показник рівня координації [11], який визначає стан координації на проміжку від хаосу до заданого детермінованого стану, який дозволяє оцінювати ефективність системи координації.

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

задачі ідентифікації. Інерційність об'єкта і, відповідно, можливість зміни стану його елементів протягом циклу координації обумовлює необхідність прогнозування процесів в РКФС.

Запропоновані методики активної і пасивної ідентифікації параметрів об'єкта керування. Активна ідентифікація використовується переважно на початковому етапі функціонування РКФС або у випадку зміни її структури. Пасивна ідентифікація використовується в процесі її експлуатації для підвищення точності оцінювання характеристик та врахування їх трендів.

Удосконалено метод прогнозування стану РКФС в умовах комбінованої невизначеності. Метод ґрунтується на моделі РКФС з неперервним виробничим об'єктом і ресурсним керуванням станом і просторово-часовому спектрі станів і збурень, який дозволяє оптимізувати координацію керування на інтервалі кореляції.

Баланс спектральних щільностей ресурсу елемента

$$\begin{cases} G_{p_0v_0}(\omega,\boldsymbol{\Psi}) = G_{v_0v_0}(\omega,\boldsymbol{\Psi})\cdot W_{v_0p_0}(\omega) \\ G_{rr}(\omega,\boldsymbol{\Psi}) = G_{p_0v_0}(\omega,\boldsymbol{\Psi}) + G_{uu}(\omega,\boldsymbol{\Psi}) + G_{xx}(\omega,\boldsymbol{\Psi}) + \sum_{f\in\varepsilon} G_{p_fp_f} + \\ \quad + 2G_{p_0u}(\omega,\boldsymbol{\Psi}) + 2G_{p_0x}(\omega,\boldsymbol{\Psi}) + 2\sum_{f\in\varepsilon} G_{p_0p_f}(\omega,\boldsymbol{\Psi}) - \\ \quad - 2G_{ux}(\omega,\boldsymbol{\Psi}) + 2\sum_{f\in\varepsilon} G_{up_f}(\omega,\boldsymbol{\Psi}) - 2\sum_{f\in\varepsilon} G_{p_fx}(\omega,\boldsymbol{\Psi}) \\ G_{vv}(\omega,\boldsymbol{\Psi}) = G_{rr}(\omega,\boldsymbol{\Psi})\cdot\left(\frac{1}{T\omega}\right)^2 \\ G_{p_fp_f}(\omega,\boldsymbol{\Psi}) = \int_0^\infty \left\{ \iiint_\Omega \left[R_{p_fp_f}(\tau,\mathbf{Z}) e^{-j\boldsymbol{\Psi}\mathbf{Z}} \right] e^{-j\omega\tau} d\mathbf{Z} \right\} d\tau \end{cases} \quad (4)$$

де ω - часова кругова частота; $\boldsymbol{\Psi}$ - вектор просторових кругових 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; $G_{p_{f0}p_{f0}}$ - авто-спектральна щільність вхідного ресурсу з урахуванням розповсюдження; G_{ux} - взаємна спектральна щільність потужності збурення і сировини.

Спектральні щільності потужності пов'язані співвідношенням

$$G_{p_0x}(\omega,Z_0) = G_{xx}(\omega,Z_0)\cdot W_{x_0\to p_0}(j\omega) = \\ = G_{xx}(\omega,Z_0)\cdot\frac{1-T_{ЛСУ}T_0\omega^2+T_0 j\omega}{(1+T_K j\omega)(1+T_{ЛСУ}j\omega)T_0 j\omega+(1+T_K j\omega)+1} \quad (5)$$

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 відділенні від границь.

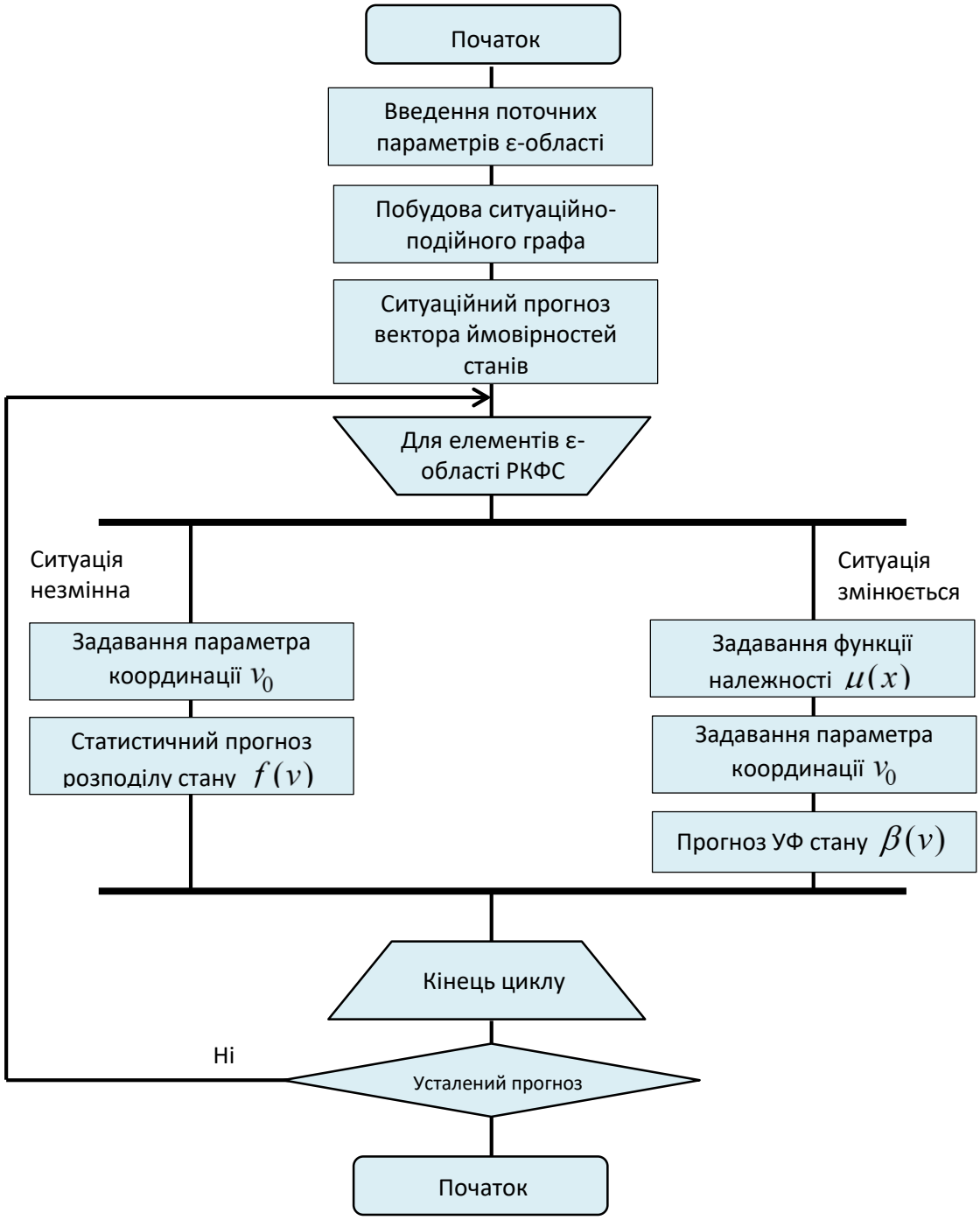
Результати моделювання процесу координації показують, що просторовий розподіл ресурсу є сумою експоненціально спадних функцій з модами в точках прикладання впливу.

Для прогнозування стану дискретних розподілених систем запропоновано ситуаційно-подійний метод. Процес зміни ситуації представлений у вигляді графа «ситуація-подія».). Граф «ситуація-подія» описується ваговою матрицею, елементами якої є ймовірності переходу $P = \left\{ p_{ij}; i, j = 1 \ldots n \right\}$. Якщо ймовірність ідентифікації ситуації на основі моніторингу параметрів є $\mathbf{P}_0(t) = \left\{ p_{0i}(t), i = 1..n \right\}$, то уточнена ймовірність з урахуванням прогнозу на основі моделі (3.35)

$$\mathbf{P}'(t) = \alpha \cdot \mathbf{P}_0(t) + \beta \cdot \left[\mathbf{P}_S^{\mathbf{T}}(t - \Delta t) \cdot \mathbf{P}(t, \Delta t) \right], \qquad (6)$$

де α і β - коефіцієнти довіри, $\alpha + \beta = 1$.

Рисунок 3– Алгоритм прогнозування в умовах комбінованої невизначеності


Початок
Введення поточних параметрів ε-області
Побудова ситуаційно-подійного графа
Ситуаційний прогноз вектора ймовірностей станів
Для елементів ε-області РКФС
Ситуація незмінна
Ситуація змінюється
Задавання параметра координації v_0
Статистичний прогноз розподілу стану $f(v)$
Задавання функції належності $\mu(x)$
Задавання параметра координації v_0
Прогноз УФ стану $\beta(v)$
Кінець циклу
Ні
Усталений прогноз
Початок

Проведене дослідження характеристик прогнозування стану РКФС. Розглянута можливість реалізації методу прогнозування з використанням машинного навчання та імітаційного моделювання в умовах комбінованої невизначеності. Визначена доцільна глибина прогнозування.

В роботі здійснювалося порівняння статистичних методів, які характеризуються простотою реалізації і налаштування, і реалізації удосконаленого методу прогнозування за допомогою нейронної мережі, просторово-часової спектральної моделі і імітаційної моделі. Оптимальним уявляється застосування імітаційної моделі для прогнозування з одним циклом активного навчання і наступним поступовим покращенням результатів за допомогою пасивної ідентифікації.

Важливим аспектом розробки методів прогнозування для конкретних застосувань є порівняльне дослідження їх характеристик. У цій роботі здійснювалося порівняння статистичних методів, які характеризуються простотою реалізації і налаштування, і запропонованих методів спектрального просторово-часового прогнозування і рекурентної нейронної мережі, яка враховує архітектурні і нелінійні особливості РКФС.

Наборів даних (dataset) для навчання і тестування предикторів для реальних РТО у відкритому доступі не існує. Оскільки створення таких наборів вимагає багато часу і витрат, за об’єкт дослідження було взято імітаційну модель.

Таблиця 1 Результати дослідження характеристик предикторів стану РКФС.

	Час навчання (налаштування)			**Час прогнозування**			**RMSE (прогноз на 1 цикл)**			**RMSE (прогноз на 3 цикли)**		
Архітектура РКФС	**1×4 (1 вхід, 1 вихід)**	**2×2 (2,2)**	**3×3 (3,3)**	**1×4**	**2×2**	**3×3**	**1×4**	**2×2**	**3×3**	**1×4**	**2×2**	**3×3**
Експоненціальне згладжування за 10 тактів	**1**	1,8	2,1	**1**	1,4	1,6	**1**	0,72	0,7	2,3	2,24	2,21
Векторна авторегресія	3,2	7,4	31,6	1,3	1,7	1,8	0,67	0,47	0,43	1,63	1,58	1,44
Баєсівський прогноз	57	2428	119407	47	132	331	0,43	0,37	0,33	1,32	1,26	1,24
Нейронна модель RNN (4 шари, логістична функція активації)	1200	1200	2300	-	-	-	0,32	0,24	0,14	0,96	0,88	0,85
Імітаційна модель (1 цикл ідентифікації) + експоненціальне згладжування впливів	1,4	2,2	2,9	28	31	72	0,33	0,26	0,18	0,99	0,92	0,90
Імітаційна модель (3 цикли ідентифікації) + експоненціальне згладжування впливів	4,1	6,3	8,2	28	31	72	0,31	0,22	0,12	0,98	0,90	0,90
Просторово-часове спектральне прогнозування	59	2434	119413	54	144	347	0,41	0,32	0,24	1,1	0,98	0,97

При децентралізованій координації, як і при ієрархічній, уявляється доцільним застосування локально-глобальних критеріїв. Сутність локально-глобального критерію полягає в тому, що оптимізація здійснюється за глобальним критерієм, але в межах одного кластера (ε - області), тобто локально по відношенню до РКФС в цілому.

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

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

де ρ_i - вагові коефіцієнти, $\rho_k : \begin{vmatrix} =1 & при\ k = i \\ <1 & при\ k \neq i \end{vmatrix}$; e_i - локальні критерії.

$$E(v_{0i},\gamma) = \sum_{k=1}^{n_\varepsilon} \rho_k \left\{ c_{yk}\alpha x_k \left[\frac{1}{1+e^{-\delta\left(v_k+\gamma|W_{ik}|(v_{0i}-v_i)-bF_k\right)}} - \right.\right. \\ \left.\left. - \frac{1}{e^{-\delta\left(v_k+\gamma|W_{ik}|(v_{0i}-v_i)-b^{-1}F_k\right)}} \right] - q_{r0}\gamma|W_{ik}||v_{0i}-v_i| \right\} \quad (7)$$

В умовах невизначеності процес характеризується загальним середнім ефектом/втратами (узагальненим ризиком)

$$R = \sum_{k=1}^{n} \left\{ \int_0^\infty \int_0^\infty \left[c_{yk}\alpha x_k \left[\frac{1}{1+e^{-\delta(v_k-bF)}} - \frac{1}{e^{-\delta\left(v_k-b^{-1}F\right)}} \right] - q_{r0}\cdot(v_k - v_{0k}) - \right.\right. \\ \left.\left. - (c_{vk}\mu' + c_{xk})x_k \right] \cdot \beta(v_k)\beta(x_k)\,dx_k\,dv_k \right\}, \quad (8)$$

де $\beta(v_k)$ - функція невизначеності стану k-го елемента.

В роботі проаналізовано використання локально-глобального критерію для здійснення координації РКФС. Результати імітаційного моделювання оптимізації РКФС з 16 керованих елементів об'єкта на основі глобального, локального і локально-глобального критерію показані на діаграмі рис.4. Оптимізація здійснювалася циклічно, в результаті чого значення критерію поступово наближалося до глобального оптимуму. Швидкість наближення залежить від розміру ε-області.

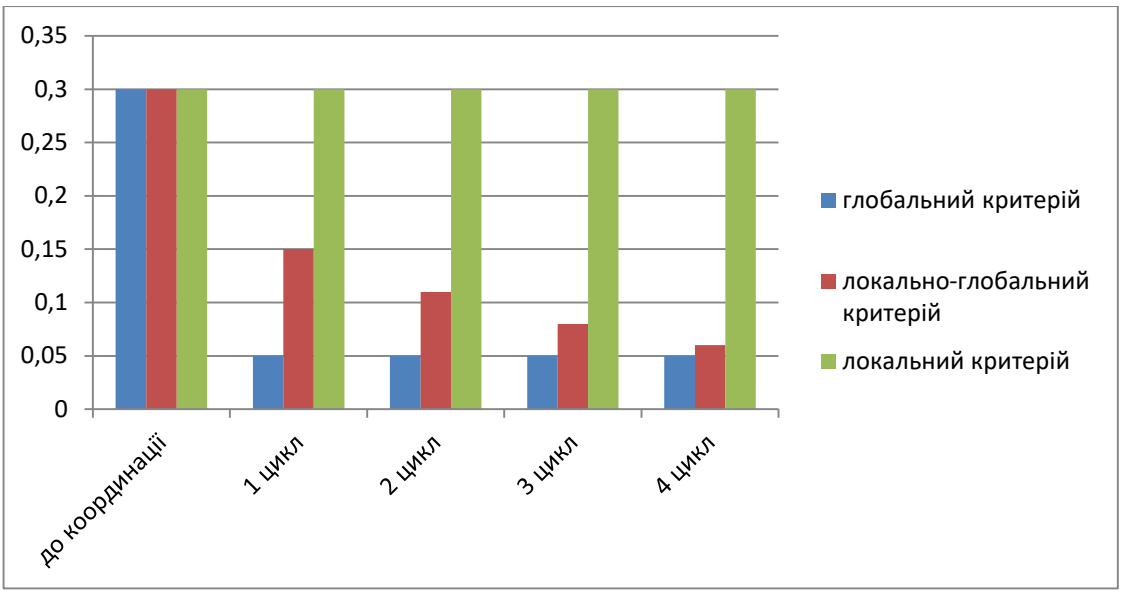


Рисунок 4 - Результати імітаційного моделювання оптимізації РКФС

В цьому дослідженні ми розглядаємо ковзний процес взаємодії координаторів. 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 РТО, і інформаційних зв'язків між координаторами. Застосування ковзного процесу дозволяє зменшити саме кількість інформаційних зв'язків, обмеживши їх координаторами $\mathcal{E}$-області.

Архітектура системи децентралізованої координації РКФС з неперервними технологічними об'єктами грунтується на таких компонентах і підходах:

- Модель розподіленої кібер-фізичної системи з децентралізованим керуванням;
- Ковзний підхід до організації процесу координації заради забезпечення стійкості системи (див. вище);
- Принцип ближньої дії;
- Методи оцінювання невизначених параметрів;
- Методи прогнозування впливів і станів системи.

Усі зазначені елементи архітектури системи децентралізованої координації РКФС поєднуються у синергетичній взаємодії як модулі координатора, зображені на рис.5

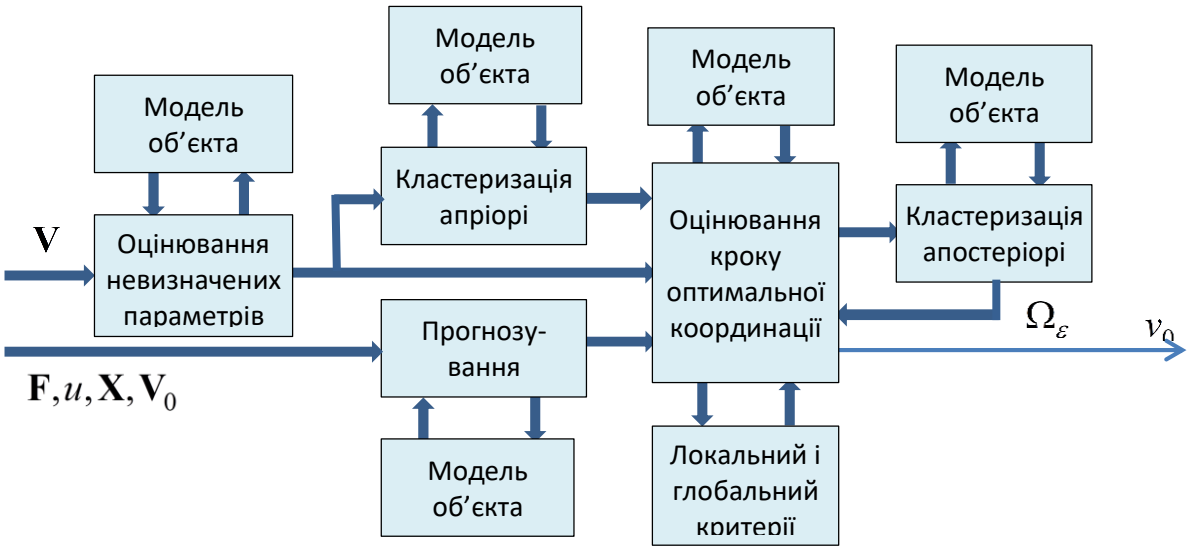


Рисунок 5 - Схема взаємодії модулів координатора

Розроблено хвильовий алгоритм керування процесом ковзної децентралізованої координації. Синхронний алгоритм реалізується за допомогою хвильового генератора імпульсів синхронізації. Асинхронний алгоритм реалізується за допомогою передачі маркера.

Ковзний процес координації передбачає ковзний процес виконання усіх модулів координатора. Задача оцінювання полягає у пошуку таких значень параметрів вектора $\boldsymbol{\Theta}_1$, які задовольняють рівняння моделі системиі забезпечують максимальну близькість розрахункових параметрів стану $\mathbf{V}$ до виміряних значень $\tilde{\mathbf{V}}$. Як критерій близькості найчастіше беруть квадратичний критерій, а задачу оцінювання зводять до *мінімізації функції* вигляду

$$\delta = \sum_{i=1}^{l} \frac{\left[\tilde{v}_i - v\left(\boldsymbol{\Theta}_1\right)\right]^2}{\sigma_{\tilde{v}_i}^2}, \tag{9}$$

або в матричному вигляді

$$\delta\left(\boldsymbol{\Theta}_1\right) = \left[\tilde{\mathbf{V}} - \mathbf{M}_1\left(\boldsymbol{\Theta}_1\right)\right]^T \mathbf{K}_{\tilde{V}}^{-1} \left[\tilde{\mathbf{V}} - \mathbf{M}_1\left(\boldsymbol{\Theta}_1\right)\right], \tag{10}$$

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

Для декомпозиції задач управління і визначення ε-оточення елемента запропоновано модифікований алгоритм кластеризації за методом найближчого сусіда.

У складних системах з дискретними станами і логічною функцією переходів управління здійснюється в основному на основі ситуаційного підходу. Множина ситуацій і переходів між ними утворюють ситуативну мережу. Для динамічних систем, керованих на основі ситуаційних моделей, був запропонований ситуаційно-подієвий підхід [12].

На рис. 6 показана структурна схема, на якій сенсор S вимірює параметри стану об’єкта ОМ. Вимірювальний сигнал надходить на компаратор для контролю належності параметра до зони допуску. Якщо стан об'єкта характеризується вектором параметрів, то для визначення стану об'єкта необхідна логічна обробка його параметрів за допомогою логічного пристрою.

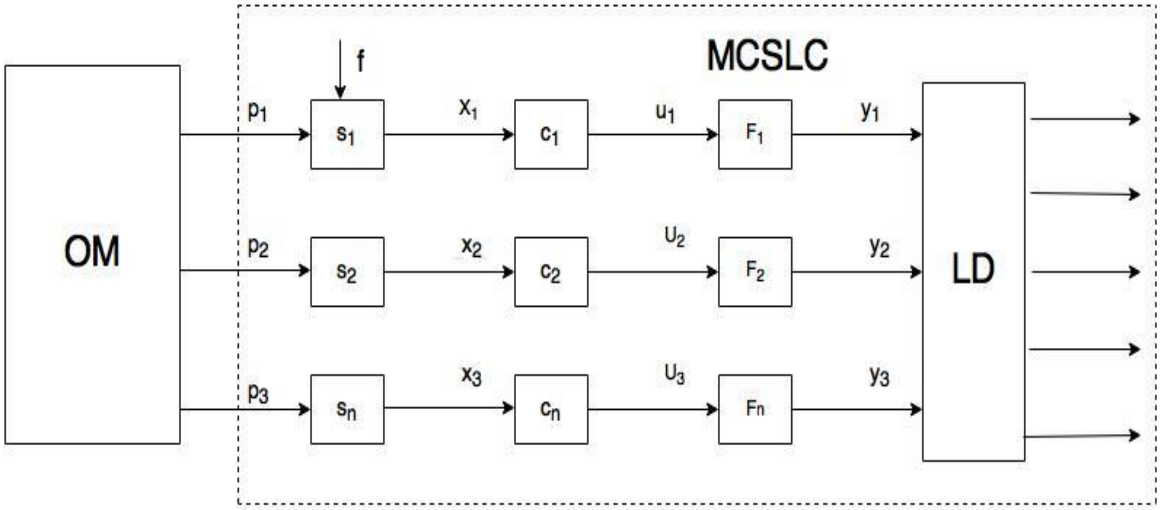


Рисунок 6 - Узагальнена схеми ідентифікації ситуації

Процес релейної стабілізації стану об’єкта характеризується періодичним спрацьовуванням реле, в результаті зміна стану об’єкту є коливальним процесом. На рис. 7а зображено приклад характеристики елементного реле з двома вихідними станами, а на рис. 7б показано випадок зміни сигналу в системі.

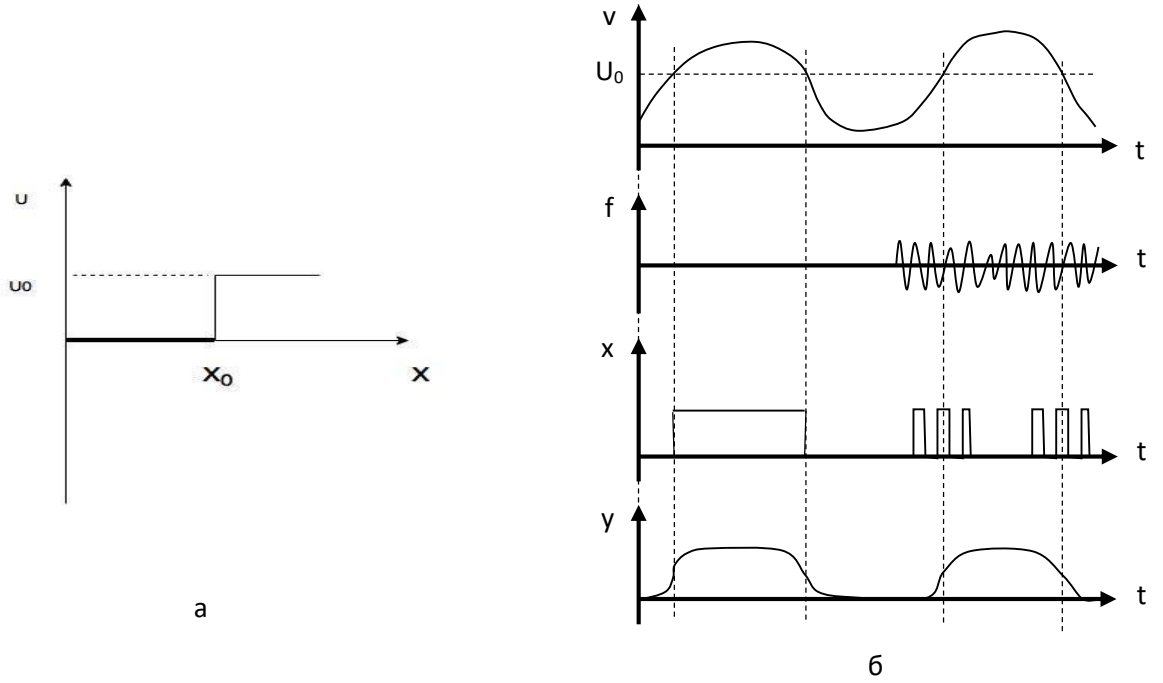


Рисунок 7 - Перетворення аналогового вхідного сигналу в дискретну форму за допомогою компаратора.

Алгоритм керування в умовах комбінованої невизначеності із застосуванням сценарно-подійного підходу передбачає мінімізацію ризику (середнього збитку $\overline{\Delta q_r} = \sum_S P'(s,\tau_1)\cdot \Delta q_r$), де ймовірність збитку залежить від сценарію:

Сценарій A: Ситуація не змінюється. Ймовірність реалізації сценарію P_A;

Сценарій B: Ситуація змінюється та визначається правильно. Перехід до нової ситуації повністю здійснено. Після цього система деякий час функціонує в новій ситуації. Ймовірність реалізації сценарію P_B;

Сценарій C: Ситуація змінюється та визначається правильно. Перехід до нової ситуації повністю не здійснений. Після цього ситуація знову змінюється. Ймовірність реалізації сценарію P_C;

Сценарій D: Ситуація змінюється і не визначається правильно. Перехід відбувається до параметрів неправильної ситуації. Цей процес триває, поки ідентифікація не стане правильною або ситуація не зміниться. Ймовірність реалізації сценарію P_D.

Розроблені моделі і алгоритми реалізовані у системі імітаційного моделювання децентралізованої координації РКФС на платформі Scilab/Xcos. Система імітаційного моделювання реалізована у вигляді палітри суперблоків Scilab/Xcos

Оцінка ефективності 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 на основі попередніх досліджень ми можемо оцінити показник рівня координації.

Головною перевагою децентралізованої координації є структурна гнучкість РКФС. Гнучкість системи є важливою умовою автоматизації. Для гнучких виробництв гнучкість означає збільшення можливості переналагодження на виготовлення різноманітних виробів без зупинки виробництва.

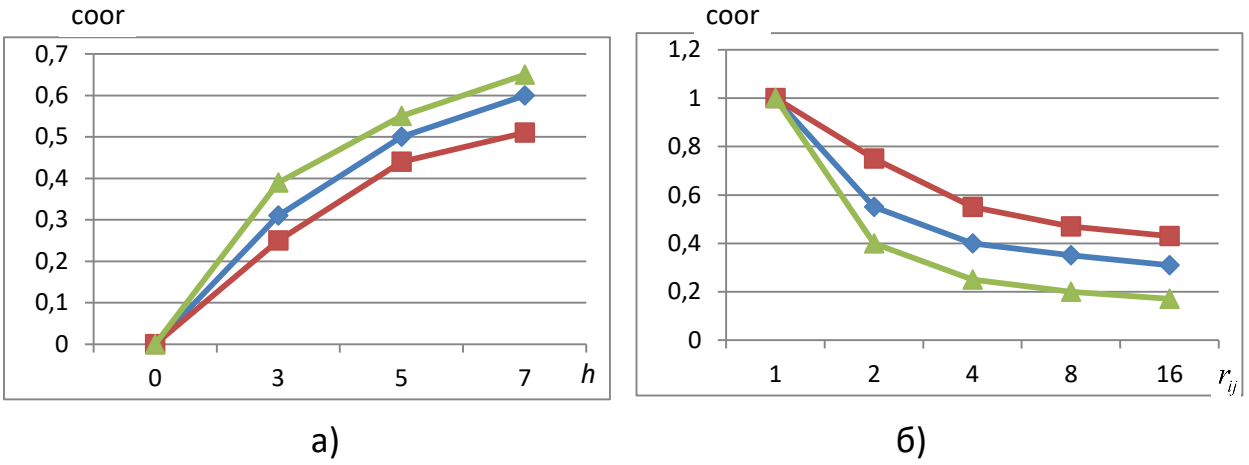


Рисунок 8- Залежності рівня координації від відстані між керованими елементами і кількості хвиль координації

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. 8.

Для проведення фізичного моделювання РКФС, перевірки розроблених моделей і алгоритмів створено дослідницький стенд.

Фото стенду в комплексі з інтерфейсом у смартфоні і екраном програми налаштування конфігурації системи в процесі виконання досліджень показане на рис.9.

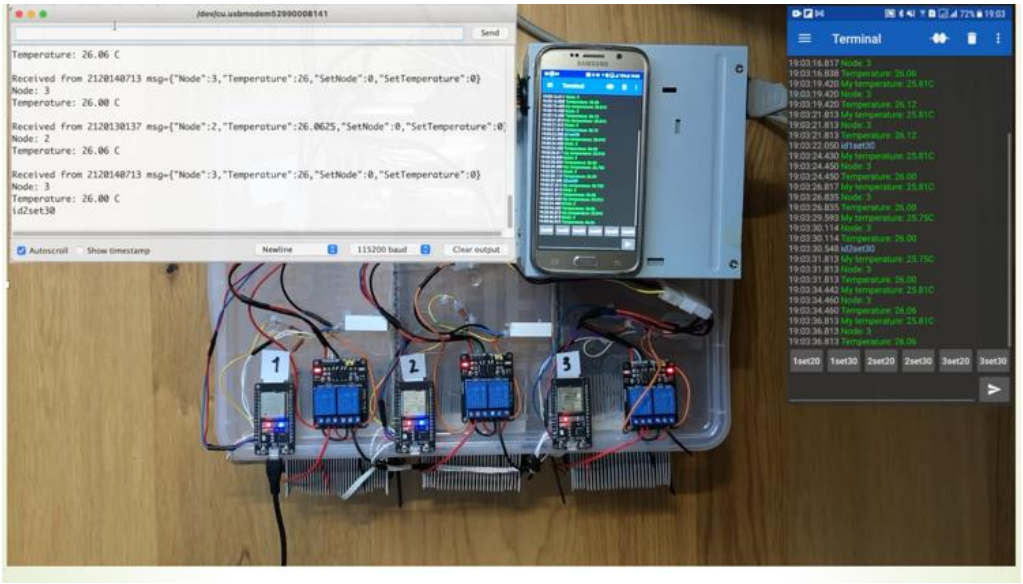


Рисунок 9 - Стенд в процесі експерименту.

Розроблений стенд використовується як для проведення фізичного моделювання РКФС, перевірки розроблених моделей і алгоритмів, так і у навчальному процесі при викладанні дисципліни «Ідентифікація та моделювання систем автоматизації».

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. 10 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 приміщення 5, інтерфейс 6.

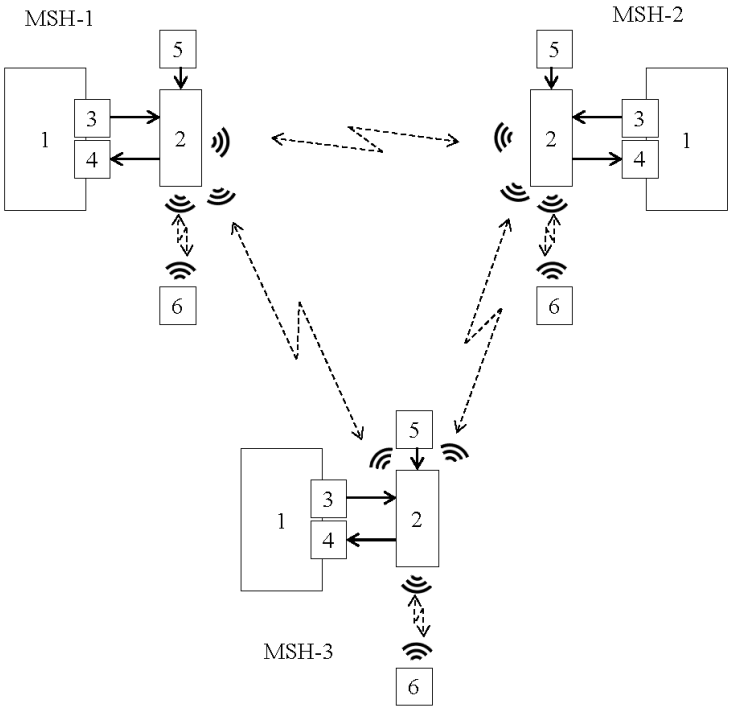


Рисунок 10 - Схема взаємодії Mobile Smart Heaters

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

Запропонована концепція Mobile Smart Heaters розроблялася в рамках угоди про творчу співпрацю з ПРАТ Вінницький завод «Маяк» під науковим керівництвом автора, де впроваджені результати роботи.

У агропромисловому комплексі широко застосовується технологічний процес сушіння аграрної продукції. Для цього використовуються сушильні шафи (сушарки) різного розміру і конструкції. Як правило, це багатозональні агрегати, в яких у кожній зоні необхідно забезпечити оптимальну температуру і вологість повітря, залежно від виду сировини і стадії сушіння.

Для зменшення негативних наслідків автором запропоновано виробнику сушарок здійснювати децентралізовану координацію роботи нагрівачів у окремих зонах. Відповідне програмне забезпечення системи керування, яке реалізує алгоритми налаштування локальних контролерів і координаційного керування потужністю нагрівачів Впроваджене на підприємстві ТОВ Компанія "Технопром-Продукт".

ВИСНОВКИ

В статті розроблена модель РКФС з неперервним виробничим об'єктом і ресурсним керуванням станом у формі двохпотокового графа в якій здійснюється перетворення сировини та матеріалів на продукцію. Модель РКФС відрізняється врахуванням взаємного впливу керованих елементів неперервного виробничого об'єкта і витрат ресурсу на виробництво. Взаємний вплив відображений у моделі ресурсного зв'язку між парами елементів РКФС. Розроблена модель РКФС дозволяє здійснювати оптимальну координацію стану елементів, оцінювати стійкість, степінь координації та інші характеристики системи. **Удосконалено критерій координації** РКФС з неперервними виробничими об'єктами, зокрема, локально-глобальні критерій і критерій узагальненого ризику децентралізованої координації. Критерії ґрунтуються на принципі ближньої дії і моделі неперервного виробничого об'єкта. **Запропоновано показник рівня координації**, який визначає стан координації на проміжку від хаосу до заданого детермінованого стану, який дозволяє оцінювати ефективність системи координації. Для оцінювання ризику досліджено розподіл ймовірностей станів елементів об'єкта у просторі і часі. Запропонована архітектура системи децентралізованої координації. Архітектура ґрунтується на взаємодії локальних координаторів. Кожен координатор містить модулі: модель об'єкта, оцінювання невизначених параметрів, кластеризації, прогнозування, оцінювання кроку оптимальної координації, оцінювання локально-глобального критерію. Для реалізації принципу ближньої дії запропонована оптимальна

ковзна динамічна кластеризація. Для цього модифіковано алгоритм кластеризації за методом найближчого сусіда. Особливість модифікованого алгоритму полягає у застосуванні принципу ближньої ді і виділенні єдиного кластеру навколо центрального елементу, який у момент кластеризації є центром ковзання. В роботі розроблена децентралізована система керування системою опалення у приміщенні “Movable Smart Heaters”.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТУРАТУРИ

1. Zhang, Y., & Wei, W. (2020). 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, Issue 15, pp. 8243–8256). Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.058
2. Yang, P., Xia, Y., Yu, M., Wei, W., & Peng, Y. (2018). A Decentralized Coordination Control Method for Parallel Bidirectional Power Converters in a Hybrid AC–DC Microgrid. In IEEE Transactions on Industrial Electronics (Vol. 65, Issue 8, pp. 6217–6228). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). https://doi.org/10.1109/tie.2017.2786200
3. Li, X., & Ercan, M. F. (2018). Decentralized Coordination Control for a Network of Mobile Robotic Sensors. In Wireless Personal Communications (Vol. 102, Issue 4, pp. 2429–2442). Springer Science and Business Media LLC. https://doi.org/10.1007/s11277-018-5263-y
4. Ali, Q., & Montenegro, S. (2016). Decentralized Control for Scalable Quadcopter Formations. In International Journal of Aerospace Engineering (Vol. 2016, pp. 1–10). Hindawi Limited. https://doi.org/10.1155/2016/9108983
5. S. Ragi and E. K. P. Chong, "Decentralized control of unmanned aerial vehicles for multitarget tracking," 2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2013, pp. 260-268, doi: 10.1109/ICUAS.2013.6564698.
6. Coordination Control of Distributed Systems. (2015). In J. H. van Schuppen & T. Villa (Eds.), Lecture Notes in Control and Information Sciences. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10407-2
7. Siljak D. Decentralized control of complex systems. – Courier Corporation, 2013. P.544.
8. Shaikh, P. H., Nor, N. B. M., Nallagownden, P., Elamvazuthi, I., & Ibrahim, T. (2014). A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings. In Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 34, pp. 409–429). Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.027
9. Yan, H., & Han, Y. (2019). 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
10. Gong Z. Stabilization of Decentralized Control Systems. Gong Z., Aldeen M. // Journal of Mathematical Systems, Estimation, and Control. 1997. V. 7, No. 1. P. 1 – 16.
11. Maria Yukhymchuk, Volodymyr Dubovoi, Viacheslav Kovtun, "Decentralized Coordination of Temperature Control in Multiarea Premises", *Complexity*, vol. 2022, Article ID 2588364, 18 pages, 2022. https://doi.org/10.1155/2022/2588364
12. N. Ashish. An Event Based Approach To Situational Representation (2009) / N. Ashish, D. Kalashnikov, S. Mehrotra, N. Venkatasubramanian. arXiv:0906.4096 [cs.DB]

REFERENCE

1. Zhang, Y., & Wei, W. (2020). 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, Issue 15, pp. 8243–8256). Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.01.058
2. Yang, P., Xia, Y., Yu, M., Wei, W., & Peng, Y. (2018). A Decentralized Coordination Control Method for Parallel Bidirectional Power Converters in a Hybrid AC–DC Microgrid. In IEEE Transactions on Industrial Electronics (Vol. 65, Issue 8, pp. 6217–6228). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). https://doi.org/10.1109/tie.2017.2786200
3. Li, X., & Ercan, M. F. (2018). Decentralized Coordination Control for a Network of Mobile Robotic Sensors. In Wireless Personal Communications (Vol. 102, Issue 4, pp. 2429–2442). Springer Science and Business Media LLC. https://doi.org/10.1007/s11277-018-5263-y

4. Ali, Q., & Montenegro, S. (2016). Decentralized Control for Scalable Quadcopter Formations. In International Journal of Aerospace Engineering (Vol. 2016, pp. 1–10). Hindawi Limited. https://doi.org/10.1155/2016/9108983
5. S. Ragi and E. K. P. Chong, "Decentralized control of unmanned aerial vehicles for multitarget tracking," 2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2013, pp. 260-268, doi: 10.1109/ICUAS.2013.6564698.
6. Coordination Control of Distributed Systems. (2015). In J. H. van Schuppen & T. Villa (Eds.), Lecture Notes in Control and Information Sciences. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10407-2
7. Siljak D. Decentralized control of complex systems. – Courier Corporation, 2013. P.544.
8. Shaikh, P. H., Nor, N. B. M., Nallagownden, P., Elamvazuthi, I., & Ibrahim, T. (2014). A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings. In Renewable and Sustainable Energy Reviews (Vol. 34, pp. 409–429). Elsevier BV. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.027
9. Yan, H., & Han, Y. (2019). 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
10. Gong Z. Stabilization of Decentralized Control Systems. Gong Z., Aldeen M. // Journal of Mathematical Systems, Estimation, and Control. 1997. V. 7, No. 1. P. 1 – 16.
11. Maria Yukhymchuk, Volodymyr Dubovoi, Viacheslav Kovtun, "Decentralized Coordination of Temperature Control in Multiarea Premises", *Complexity*, vol. 2022, Article ID 2588364, 18 pages, 2022. https://doi.org/10.1155/2022/2588364
12. N. Ashish. An Event Based Approach To Situational Representation (2009) / N. Ashish, D. Kalashnikov, S. Mehrotra, N. Venkatasubramanian. arXiv:0906.4096 [cs.DB]