

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Вінницький національний технічний університет

МАРІЯ СЕРГІЇВНА ЮХИМЧУК



УДК 681.513.54+681.518

**ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНЕ КООРДИНАЦІЙНЕ КЕРУВАННЯ
РОЗПОДІЛЕНИМИ КІБЕР-ФІЗИЧНИМИ СИСТЕМАМИ
З БАГАТОЗОНАЛЬНИМИ ТЕПЛОВИМИ ОБ'ЄКТАМИ**

05.13.07 – автоматизація процесів керування

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Кременчук – 2023

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі комп'ютерних систем управління Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України.
Робота виконана самостійно.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Лисенко Віталій Пилипович,
Національний університет біоресурсів і
природокористування,
М. Київ,
завідувач кафедри автоматичних та робототехнічних
систем імені академіка І. І. Мартиненка

доктор технічних наук, професор
Осадчий Сергій Іванович,
Льотна академія Національного авіаційного
університету,
м. Кропивницький,
професор кафедри конструкції повітряних суден,
авіадвигунів та підтримання льотної придатності

доктор технічних наук, професор
Хобін Віктор Андрійович,
Одеський національний технологічний університет,
м. Одеса,
завідувач кафедри автоматизації
технологічних процесів і робототехнічних систем

Захист відбудеться “12” травня 2023 р. о 12 00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 45.052.04 у Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського за адресою: м. Кременчук, вул. Першотравнева, 20

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського за адресою: м. Кременчук, вул. Першотравнева, 20

Реферат розісланий “07” квітня 2023 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

 д.т.н., професор С.Е.Притчин

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність.

Теплові об'єкти дуже розповсюджені, як у виробництві, так і у побуті. Серед таких об'єктів виділяються розподілені багатозональні об'єкти, в яких в кожній зоні потрібно підтримувати різний температурний режим, проте через слабку відокремленість зон їх взаємний вплив ускладнює задачу забезпечення оптимального керування. Прикладом таких об'єктів є багатозональні житлові і виробничі приміщення, камери для тепло-вологісної обробки сільськогосподарської продукції (сушильні та пророщувальні камери) тощо.

Комфортні умови в багатозональних приміщеннях, таких як «open space» офіси, квартири-студії тощо, вимагають різної температури повітря в окремих зонах. Хоча такі зони називаються термостатично керованим навантаженням (ТКН), однак статичний режим у них спостерігається лише протягом обмеженого інтервалу часу. Характерною особливістю таких приміщень є швидка і часта зміна вимог: приміщення звільняються або заповнюються, вимоги до комфорту змінюються відповідно до індивідуальних потреб тощо. У таких приміщеннях встановлюються окремі засоби підтримки температури повітря (кондиціонери, конвектори, тепловентилятори, тощо) з локальними системами керування. Взаємовплив окремих зон потребує координації локальних систем керування (ЛСК). Завдання узгодження засобів налаштування температури у сусідніх зонах при використанні рухомих пристроїв має низку загальних і спеціальних властивостей. У технологічних об'єктах додаткові ускладнення зумовлені ширшим діапазоном температур і значними перепадами температур у зонах. Ці особливості зумовлюють потребу у новому погляді на задачу координаційного керування рухомими обігрівачами/кондиціонерами у контексті загальної проблеми децентралізованого координаційного керування багатозональними розподіленими тепловими об'єктами.

Нові підходи до керування багатозональними тепловими об'єктами зумовлені здешевленням та мініатюризацією мікроконтролерів, можливістю включати мікроконтролери до складу давачів і виконавчих пристроїв польового рівня, бурхливими темпами розвитку комунікаційних систем. Це підштовхнуло нові дослідження відомої проблеми координації виробничих процесів. Адже велика кількість локальних систем керування вимагає їх узгодження в рамках автоматизованої системи управління. Останнім часом такі інтегровані системи, які об'єднують фізичні об'єкти, засоби збирання та 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 керування (РСК), що функціонують у режимі реального часу. Сфера їх використання досить широка. Отже дослідження таких систем є досить актуальним.

Відносно новим фактором розвитку РСК, який спричинив їх якісні зміни,

стало широке застосування хмарних технологій збирання, зберігання і обробки інформації. Вони найбільше пристосовані для роботи з великими обсягами даних (Big Data), які породжуються РСК на базі Інтернету речей (IoT). Найближчим часом очікується новий стрибок технологій РСК, зумовлений розвитком 5G комунікацій.

Усі ці процеси ставлять нові задачі координаційного керування і викликають необхідність створення нових моделей і методів їх розв'язання.

У актуальних вітчизняних і закордонних наукових роботах істотний внесок у розвиток теоретичних і методологічних основ розробки кібер-фізичних виробничих систем внесли: Anwar M., Bagheri B., Edward R., Kao H., Месарович М., J. Jehn-Ruey, Rasman M., Pipan M., Roure D. De, Nicolescu R., Zhang H., Wagner T., Herrmann C., Thiede S.; Elhoone H., Zhang T. та вітчизняні вчені: Варшавський О. Є., Дубовой В. М., Жученко А.І., Жолткевич Г.М., Ладанюк А. П., Лисенко В.П., Осадчий С.І., Хобін В.А., Хаханов В. І., Крамарев Г. В., Васечко Д. Ю., Глазьев С. Ю., Сухарев О. С., Якубовський М. М. та ін. Однак, в роботах, що існують, не запропоновано єдиного системного підходу для вирішення задачі координаційного керування неперервними розподіленими, зокрема тепловими, об'єктами. Розповсюджені ієрархічні та централізовані системи координації характеризуються складністю розгортання, модифікації структури та низькою надійністю. Зазначені обставини зумовлюють необхідність системного розв'язання проблеми недостатності структурної гнучкості, надійності та ефективності координаційного керування розподіленими кібер-фізичними системами з багатозональними тепловими об'єктами.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наведені у дисертаційній роботі теоретичні і прикладні результати відповідають пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки (згідно з законом України зі змінами № 2031-IX від 01.02.2022): технології та засоби математичного моделювання, оптимізації та системного аналізу розв'язання надскладних завдань державного значення, технології ефективного енергозабезпечення будівель і споруд. Результати роботи отримано автором у рамках договору про творчу співдружність з підприємство ПРАТ Вінницький завод «Маяк», № держреєстрації 0121V114654; кафедральної науково-дослідної роботи 46К5 «Моделювання та оптимізація інформаційних систем в умовах невизначеності»; науково-дослідної роботи 46К7 «Розробка методів і технологій автоматизації процесів контролю і керування» на кафедрі комп'ютерних систем управління Вінницького національного технічного університету.

Мета дослідження. Метою роботи є підвищення структурної гнучкості, надійності та ефективності координаційного керування розподіленими кібер-фізичними системами з багатозональними тепловими об'єктами шляхом розроблення і впровадження нових принципів, моделей, методів та алгоритмів децентралізованої координації.

Для досягнення мети поставлено **задачі:**

- Розробити модель багатозонального теплового об'єкта і модель РКФС з багатозональним тепловим об'єктом і ресурсним керуванням станом;

- Розробити метод децентралізованої координації керування розподіленими кібер-фізичними системами з багатозональними тепловими об'єктами;

- Удосконалити критерій координації РКФС з багатозональними тепловими об'єктами і запропонувати показник рівня координації;

- Удосконалити метод прогнозування стану розподілених кібер-фізичних систем з багатозональними тепловими об'єктами;

- Розвинути принцип ближньої дії при децентралізованій координації керування розподіленими кібер-фізичними системами з багатозональними тепловими об'єктами;

- Реалізувати розроблені методи і моделі у вигляді методик, алгоритмів і програм, які у комплексі забезпечують практичне використання децентралізованої координації керування розподіленими кібер-фізичними системами з багатозональними тепловими об'єктами;

- Здійснити аналіз структурної гнучкості, надійності та ефективності запропонованих методів і засобів координаційного керування розподіленими кібер-фізичними системами з багатозональними тепловими об'єктами.

- Впровадити отримані науково-технічні результати і перевірити їх ефективність на практиці.

Об'єктом дослідження є процеси керування кібер-фізичними системами з багатозональними тепловими об'єктами.

Предметом дослідження є методи і засоби децентралізованого координаційного керування розподіленими кібер-фізичними системами з багатозональними тепловими об'єктами.

Методи дослідження. Для виконання поставлених у роботі завдань було використано: термодинаміку і теорію теплопровідності, методи теорії автоматичного керування, методи математичного моделювання; методи теорії випадкових процесів; методи математичного аналізу.

Наукова новизна одержаних результатів. В результаті проведених досліджень розроблена *методологія децентралізованої координації* РКФС з багатозональними тепловими об'єктами, яка ґрунтується на синергетичній взаємодії таких наукових результатів:

- *вперше* розроблений метод децентралізованої координації керування розподіленими кібер-фізичними системами з багатозональними тепловими об'єктами, який відрізняється застосуванням принципу ближньої дії, оптимізації керування за локально-глобальним критерієм і процедури ковзної координації, що забезпечує можливість динамічної зміни структури розподіленої кібер-фізичної системи і може використовуватися при керуванні іншими типами розподілених децентралізованих систем.

- *дістала подальший розвиток* модель багатозонального теплового об'єкта, яка відрізняється врахуванням розповсюдження керівних впливів від точки їх застосування у просторі і часі, що дозволяє визначити множину елементів РКФС у просторі і часі, для яких керівний вплив є суттєвим з урахуванням заданого критерію значущості;

- *вперше* розроблена модель РКФС з багатозональним тепловим об'єктом

і ресурсним керуванням станом, яка відрізняється врахуванням взаємного впливу керованих елементів багатозонального теплового об'єкта і витрат ресурсу на виробництво і подається у формі двопотокового графу, що дозволяє оцінювати стійкість, ресурсоемність та інші характеристики системи;

- *вперше* 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 багатозональними тепловими об'єктами, який ґрунтується на моделі багатозонального теплового об'єкта і розподілі станів елементів об'єкта у просторі і часі, що дозволяє здійснювати оптимальну координацію;

- *удосконалено* метод прогнозування стану розподілених кібер-фізичних систем з багатозональними тепловими об'єктами, який ґрунтується на моделі РКФС з багатозональним тепловим об'єктом і ресурсним керуванням станом і просторово-часовому спектрі станів і збурень, що дозволяє оптимізувати координацію керування на інтервалі кореляції впливів;

- *розвинуто* принцип ближньої дії при децентралізованій координації керування розподіленими кібер-фізичними системами з багатозональними тепловими об'єктами, який ґрунтується на моделі розповсюдження керівних впливів від точки їх застосування у просторі і часі, що дозволяє обмежити множину керованих елементів, які підлягають координації.

Практичне значення отриманих результатів узагальнено в:

- методу комбінованої активно-пасивної ідентифікації параметрів багатозональних теплових об'єктів;
- модифікований алгоритм кластеризації за методом найближчого сусіда;
- хвильовий алгоритм координації розподілених кібер-фізичних систем з багатозональними тепловими об'єктами;
- систему імітаційного моделювання розподілених кібер-фізичних систем з неперервними об'єктами, захищену патентами на винахід.
- децентралізовану систему керування системою опалення у приміщенні "Movable Smart Heaters".

Результати роботи впроваджені у: ТОВ Компанія "Технопром-Продукт", ПРАТ Вінницький завод "Маяк" відповідно до угоди № держреєстрації 0121V114654, ПОСП "Уманський Тепличний Комбінат", навчальний процес у Вінницькому національному технічному університеті, а також використані при виконанні науково-дослідної роботи № 46\8.

Особистий внесок здобувача. Всі результати дисертаційної роботи, які винесені на захист, отримані автором самостійно. У наукових працях, опублікованих не одноосібно автором дисертаційної роботи належать: в роботі [1] автору належить принцип ближньої дії в децентралізованій координації, локально-глобальний критерій децентралізованій координації, алгоритми ідентифікації параметрів багатозональних теплових об'єктів, концепція розумних мобільних нагрівачів; в роботі [3] запропоновано метод децентралізованої координації керування розподіленими кібер-фізичними

системами з багатозональними тепловими об'єктами і хвильовий алгоритм для його реалізації; в роботах [26, 14, 15] розроблено модель багатозонального теплового об'єкта і модель розподіленої кіберфізичної системи з багатозональним тепловим об'єктом і ресурсним керуванням станом, запропоновано локально-глобальний критерій децентралізованої координації та досліджено функціональну безпеку децентралізованої координації; в роботі [27] запропонована реалізація методу координації в умовах невизначеності на основі комбінованої стохастичної нечіткої моделі, та досліджено ефективність координації; в роботах [4, 35] досліджено стійкість та збіжність децентралізованої координації; в роботах [5, 29, 2, 19, 21, 9,25] дослідження процеси координації джерел тепла у будинку, досліджено стійкість розподіленої кібер-фізичної системи; в монографії [1] автору належать основні наукові результати, зокрема дослідження проблеми координації РКФС, розробка методів прогнозування процесів РКФС з неперервними об'єктами, модифікованого алгоритму кластеризації, системи імітаційного моделювання РКФС з неперервними об'єктами, запропоновано критерії координації керування РКФС і показник рівня координації, методу ідентифікації параметрів розподіленого теплового об'єкта; в роботах [6, 24, 8, 43, 46, 47, 48, 51] досліджено вплив параметричних збурень на стійкість та невизначеність керування РКФС; в роботах [10, 40] досліджено інформаційні потоки розподіленої системи керування; в роботах [8, 42, 44] досліджено стійкість РКФС з логічними управляючими пристроями; в роботах [9, 20, 26, 30, 50] автором проведений аналіз існуючих методів оцінювання та контролю процесів в релейних системах керування; в роботах [14, 16] автором запропоновано використання критерію узагальненого ризику; в роботі [17] автором запропоновано використання марковської моделі для оцінювання невизначеності дискретного процесу; в роботі [15] запропоновані елементи імітаційної моделі системи; в роботах [22, 54, 55] автором запропонована методика та досліджено характеристики РКФС; в роботах [18, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12] автором запропоновано методика оцінювання невизначеності стану РКФС з різними типами регуляторів; в роботах [15,37, 38, 52] автором досліджена модель децентралізованого координаційного керування неперервними розподіленими об'єктами; в роботах [31, 32] автором запропонована та досліджена архітектура системи координації РКФС з використанням хмарних сервісів; в роботах [33, 34] автором запропоновано спосіб інтелектуального координаційного керування температурою у багатозональних приміщеннях; в роботі [20] автором розроблена структура пристрою, який реалізує імітаційну модель пасивного елемента багатозонального теплового об'єкта; в роботах [2, 3, 4, 5] наведені результати розробки програмного забезпечення для дослідження моделей децентралізованої координації; в роботах [17,11, 38, 39, 54] описані підходи до координації джерел тепlopостачання будинку.

Апробація: Основні положення й результати доповідалися і обговорювалися на наукових семінарах кафедри комп'ютерних систем управління Вінницького національного технічного університету. Також наведені в дисертаційній роботі наукові результати доповідалися й

обговорювалися на таких конференціях: «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення» (2016), «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» (ПКТ – 2014, 2015, 2016), «Перспективні напрямки захисту інформації» (Одеса, 2016), Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості, (2016), «Інформаційні технології та автоматизація» (2014, 2016), «Контроль і управління в складних системах» (КУСС-2016, 2018, 2020, 2022), Міжнародна науково-технічна конференція «Автоматика» (2017, 2020), Комп'ютерне моделювання і керування в техніці та технологіях КМКТТ-2021, Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) 2019, International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS) 2021, Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології АКІТ (2014, 2017), Информационные технологии и автоматизация 2015, «Перспективні напрями захисту інформації» 2015, Сучасні інформаційні технології 2014, Автоматизація технологічних і бізнес-процесів 2014.

Публікації: Всього за результатами дисертації опубліковано 55 робіт, з них за результатами, які розкривають основний зміст дисертації, опубліковані 22 роботи, зокрема, 2 монографії, 11 статей у наукових виданнях, внесених до Переліку наукових фахових видань України, 9 статей у наукових періодичних виданнях інших держав, які індексуються у базі даних Scopus (в тому числі одна стаття у журналі квартіля Q1).

Структура дисертації. Дисертація складається з переліку умовних скорочень і позначень, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 397 сторінок, із них обсяг основного тексту – 291 сторінка, 119 рисунків, 10 таблиць, список використаних джерел містить 340 найменувань та займає 49 сторінок, 5 додатків займають 35 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність теми дисертації, розглянуто зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульована мета та ідея роботи, завдання досліджень, визначені об'єкт, предмет і методи дослідження, викладені основні наукові положення, новизна наукових і практичних результатів, апробація результатів, структура роботи.

У **першому розділі** здійснено аналіз багатозональних теплових об'єктів і виділені їх характерні особливості. Проаналізовано значний обсяг існуючих робіт з проблеми координації керування розподіленими кібер-фізичними системами. Розглянуто типи розподілених систем керування, задачі керування РКФС, стан досліджень по проблемі координаційного керування. В результаті проведеного огляду існуючих робіт з проблеми координації керування розподіленими кібер-фізичними системами встановлено, що різноманіття РКФС зумовлене різноманіттям розподілених об'єктів керування, цілей і алгоритмів їх функціонування, зв'язків між окремими елементами. Розглянуто найбільш розповсюджені види РСК. Проведений аналіз популярності систем на

основі кількості згадувань у публікаціях дозволяє простежити зміни на ринку РСК. Характерною особливістю багатозональних розподілених об'єктів є природна взаємодія їх елементів (зон), що описується, як правило, фізичними моделями теплопередачі, дифузії, електропровідності тощо. Основні типи задач керування системами зв'язаних об'єктів мають певні особливості у порівнянні з аналогічними задачами щодо одного зосередженого об'єкта.

Теплові об'єкти дуже розповсюджені як у виробництві, так і у побуті. Серед таких об'єктів виділяються розподілені багатозональні об'єкти, у яких в кожній зоні необхідно підтримувати різний температурний режим, проте через слабку відокремленість зон їх взаємний вплив ускладнює задачу забезпечення оптимального керування. Прикладом таких об'єктів є багатозональні житлові і виробничі приміщення, камери для тепло-вологісної обробки сільськогосподарської продукції (сушильні та пророщувальні камери) тощо. Керування тепловим режимом багатозональних БТО здійснюється як за допомогою стаціонарних ЛСК, так і за допомогою пересувних пристроїв. Застосування останніх призводить до структурних змін у взаємодії локальних систем, що ускладнює задачі координаційного керування.

В РСК використовуються фундаментальні принципи координації. Такі принципи сформульовані переважно для ієрархічних систем координації. Окрема увага приділена аналізу критеріїв координації і співвідношенню між локальними, глобальними і глобально-локальними критеріями. Незважаючи на значну кількість робіт з дослідження децентралізованих систем координації, проблема недостатності структурної гнучкості, надійності та ефективності координаційного керування розподіленими кібер-фізичними системами з багатозональними тепловими об'єктами досі не знайшла ефективного вирішення. Крім того, в існуючих роботах рідко враховується взаємний вплив зон розподілених багатозональних об'єктів.

Значний внесок у дослідження проблеми координаційного керування в галузі тепlopостачання будинків, зокрема і щодо децентралізованих систем, зроблений вченими лабораторії Berkeley Lab (США), які є розробниками широко використовуваних в світі програмних продуктів “EnergyPlus”, “Modelica Buildings library”, “Building Controls Virtual Test Bed”, “Generic Optimization Program”, “Energy Plusto FMU” та інших. В дисертаційній роботі проаналізовано їх результати, що і враховано при визначенні напрямків власних досліджень.

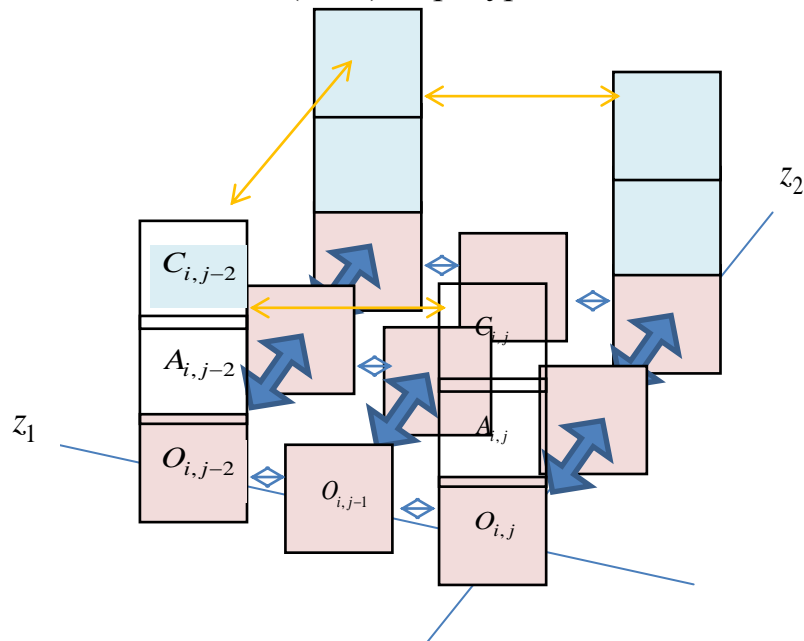
РСК все частіше почали використовувати хмарні технології, які забезпечують ряд істотних переваг при їх застосуванні. Це в першу чергу зручність масштабування системи, можливість запуску практично необмеженої кількості паралельних процесів керування, висока надійність підсистем зберігання і обробки даних. З розвитком систем Інтернету речей як основи РСК і впровадженням систем зв'язку 4G і 5G, які забезпечують великий трафік оперативної інформації, актуальність використання хмарних технологій в РСК стає безсумнівною.

Розподілені кібер-фізичні системи є переважно масштабними і високовартісними об'єктами. Можливості проведення експериментів з такими

об'єктами є дуже обмеженими, а часто взагалі відсутні. Тому основним методологічним підходом роботи є теоретичний аналіз і імітаційне моделювання систем з наступною перевіркою готових рішень на практиці.

У **другому розділі** розроблені методологічні основи децентралізованої координації, а саме узагальнена модель РКФС і модель багатозонального теплового об'єкта на основі аналізу та дослідження взаємодії керованих елементів розподіленого об'єкту. Також розроблена модель РКФС з багатозональним тепловим об'єктом і ресурсним керуванням станом у формі двохпотокowego графа, в якій здійснюється перетворення сировини та матеріалів на продукцію, причому для цього у керованому багатозональному тепловому об'єкті витрачається певний ресурс, зокрема, тепла енергія. Розвинуто принцип ближньої дії при децентралізованій координації керування РКФС з багатозональними тепловими об'єктами. Розроблений метод децентралізованої координації керування РКФС з багатозональними об'єктами. Запропоновано показник для оцінювання невизначеності координації. Здійснено оцінювання інформаційних потоків в системі децентралізованої координації. Сукупність розроблених принципів, моделей і методів утворюють **методологію децентралізованої координації РКФС з багатозональними тепловими об'єктами**, яка реалізується у вигляді архітектури системи, критеріїв ефективності і алгоритмів основних процесів.

Узагальнена модель РКФС наведена на рис.1. Для зручності зображена РКФС керування плоским розподіленим тепловим об'єктом (РТО). РТО складається з керованих і некерованих елементів O_{ij} . Стан керованих елементів регулюють локальні системи керування (ЛСК), позначені на рис.1 як A_{ij} . Заданий стан елементів визначається координаторами C_{ij} . В роботі розглядається багатозональні РТО (БТО) з ресурсною взаємодією. Елементи

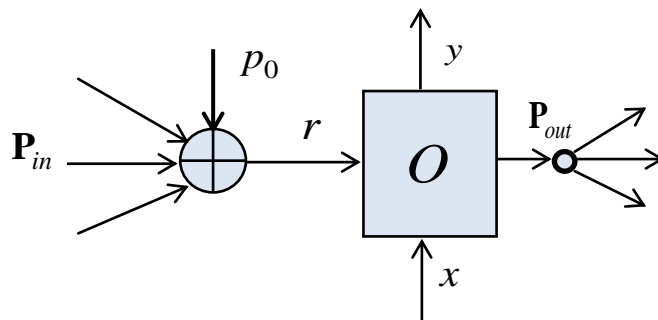


таких БТО взаємодіють (сині стрілки на рис.1) шляхом «перетікання» ресурсу (тепла) між елементами. Координатори також взаємодіють (жовті стрілки на рис.1) шляхом обміну інформацією про стан і параметри керованих елементів БТО.

У багатозональних об'єктах виділяють зони, які характеризуються набором оптимальних параметрів F . Кожна зона може містити декілька керованих елементів.

Розроблена модель багатозонального розподіленого теплового об'єкта на основі аналізу взаємодії його елементів. Схема окремого елемента БТО 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 керування, і потоків ресурсу від сусідніх елементів, які утворюють вектор \mathbf{P}_{in} . Надлишок ресурсу \mathbf{P}_{out} надходить до інших сусідніх елементів.



Розглянуто взаємодія елемента у вигляді нескінченно малої кулі із сусідніми елементами. 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.

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} - тепловий ресурс (теплова енергія керівного впливу); t - проміжок часу від моменту впливу на k -й елемент.

Відповідно, зміна стану j -го елемента

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

де C_j - ресурсоемність j -го елемента.

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

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

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

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

де $\varepsilon \ll 1$ - показник значущості.

Для забезпечення швидкодії і покращення економічних характеристик систем децентралізованої координації РКФС з багатозональними РТО розвинуто принцип ближньої дії. На відміну від принципу ближньої дії у ієрархічній координації, який зосереджується на обмеженні області дії глобальних критеріїв і застосуванні локально-глобальних критеріїв, причому ці області не перетинаються і не взаємодіють, розвинутий принцип виражається в кластеризації системи на ε -області, які можуть взаємодіяти і перетинатися.

Модель елемента БТО розглядає кожен елемент як центр ε -області і подається системою рівнянь

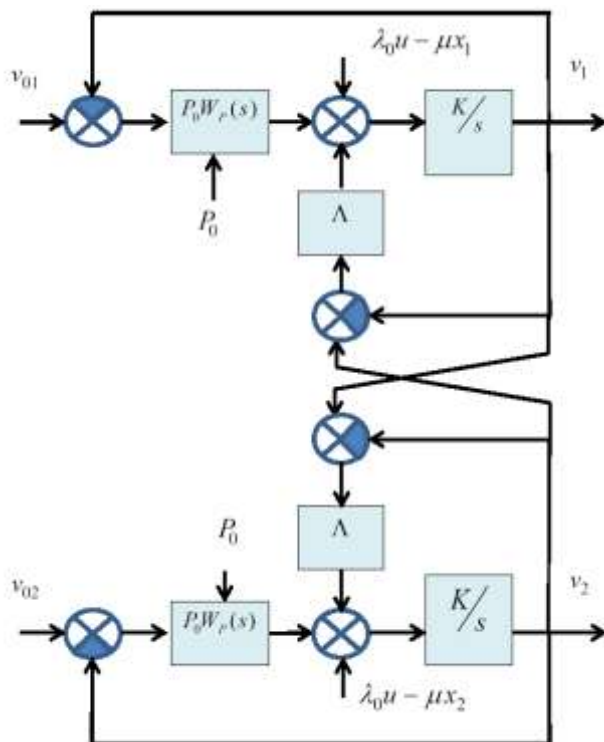
$$\begin{cases} dv_i = \left(K \left(p_{0i} + \sum_{j=1}^{n_\varepsilon} p_{ji} \right) - \Delta v_i \right) dt, \\ \forall (p_{ji} > 0) \in P_{in}; \forall (p_{ji} < 0) \in P_{out} \\ y = w(v, \Delta v) \\ \Delta v = \frac{\mu(v)x}{\eta} \end{cases} \quad (4)$$

де μ - питомі витрати ресурсу r на одиницю сировини x ; $\mathbf{P} = \{p_{ji}\}$ - матриця потоків ресурсів між елементами БТО; K - коефіцієнт ресурсоемності (характеризує величину зміни стану об'єкта на одиницю ресурсу, що

надійшов); η - коефіцієнт корисної дії (к.к.д.); n_ε - кількість елементів БТО в ε -області i -го елемента, вплив яких на його стан є суттєвим.

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



На схемі:

$W_p(s)$ - передатна функція регулятора;

K/s - передатна функція елемента (накопичення ресурсу);

λ - параметр розповсюдження впливів елементів один на одного;

v - стан елемента;

v_0 - параметр координації (заданий стан елемента);

u - стан зовнішнього середовища;

μx - витрати накопиченого ресурсу на переробку сировини x

Рисунок 3 - Модель взаємодії елементів РКФС

Запропонована модель разом з двохпотокowym графом і виробничою функцією елементів дозволяють здійснювати координацію ЛСК і аналіз таких важливих характеристик РКФС, як стійкість, ресурсоемність, якість регулювання стану тощо.

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

- локальне керування станом елементів РКФС;

- введення до схеми кожної локальної системи керування окремих координаторів;
- забезпечення інформаційного зв'язку між координаторами типу «один до одного» в зоні ближньої дії кожного елемента РКФС;
- ідентифікацію параметрів елементів і їх взаємного впливу;
- прогнозування стану РКФС;
- 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 керування РКФС є оцінювання ефективності координації. Застосування степені координації як оцінки узгодженості підсистем керування елементами розподіленої системи практично не зустрічається. Тому запропоновано показник рівня координації, який визначає стан координації на проміжку від хаосу до заданого детермінованого стану, який дозволяє оцінювати ефективність системи координації на основі оцінок невизначеності стану елементів БТО. Як оцінку степені координованості використано обернену зведену середню квадратичну похибки прогнозу вектору стану РКФС

$$coor = 1 - \frac{\sigma_{\mathbf{V}}(\tau)}{\max \|\mathbf{V}\|}, \quad (5)$$

де $\max \|\mathbf{V}\|$ - максимальна метрична відстань між векторами станів РКФС (діапазон значень вектора станів \mathbf{V}); τ - горизонт прогнозування. Оскільки відхилення прогнозу не може вийти за межі можливого діапазону значень вектора стану, то $coor \in [0;1]$.

Ще одним важливим аспектом дослідження систем децентралізованої координації є оцінювання інформаційних потоків в системі. З урахуванням принципу ближньої дії таке оцінювання виконане у загальному вигляді на основі відповідних оцінок невизначеності параметрів РКФС в ε -області елемента.

У **третьому розділі** запропоновані підходи до ідентифікація та прогнозування стану РКФС в умовах координаційного керування. Розроблені методики активної і пасивної ідентифікації параметрів об'єкта керування. Удосконалено метод прогнозування стану розподілених кібер-фізичних систем з багатозональними тепловими об'єктами на основі просторово-часового спектрального підходу до прогнозування стану РКФС з багатозональними тепловими об'єктами та дискретними станами. Проведене дослідження

характеристик прогнозування стану РКФС. Проведене 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.

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. 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.

Алгоритм активного етапу ідентифікації передбачає розрахунок відстані між зонами і коефіцієнтів взаємного впливу зон залежно від відстані між ними. В основі активної ідентифікації лежить процедура тестування, яка передбачає відправку повідомлення на всі координатори РКФС і реєстрацію ними стану елементів об'єкта. Кожен координатор по черзі виконує цикл зміни стану на величину, яка дозволяє в ході перехідного процесу здійснити достатню для статистичної обробки кількість відліків стану елементів.

Параметри БТО визначаються з системи рівнянь моделі РКФС:

$$\begin{cases} v_j(\tau) = v_j(0) + \frac{1}{C_j} \sum_{t=0}^{\tau} \left\{ p_{0j}(t) + \lambda_u(u - v_j(t)) + \sum_{k=1}^n \left\{ \frac{v_k(t) - v_j(t)}{8[\pi\lambda t]^{3/2}} e^{-\frac{d_{kj}^2}{4\lambda t}} \left[1 + \left(\frac{d_{kj}^2}{\lambda t} - 6 \right) \cdot \frac{r_{0k}^2}{40\lambda t} \right] \right\} \right\} \Delta_t \\ v_i(\tau) = v_i(0) + \frac{1}{C_i} \sum_{t=0}^{\tau} \left\{ \lambda_u(u - v_i(t)) + \sum_{k=1}^n \left\{ \frac{v_k(t) - v_i(t)}{8[\pi\lambda t]^{3/2}} e^{-\frac{d_{ki}^2}{4\lambda t}} \left[1 + \left(\frac{d_{ki}^2}{\lambda t} - 6 \right) \cdot \frac{r_{0k}^2}{40\lambda t} \right] \right\} \right\} \Delta_t \end{cases}$$

Невідомими параметрами, які підлягають ідентифікації, є $\{\mathbf{C}, \mathbf{d}, \mathbf{r}, \lambda, \lambda_u, u\}$.

Кількість рівнянь, які можуть бути використані для ідентифікації цих параметрів $N = n \cdot m$, де n - кількість елементів БТО, а m - кількість відліків станів елементів, зроблених в процесі активної ідентифікації. Оскільки кількість невизначених параметрів не дорівнює кількості рівнянь, пошук множини параметрів $\{\mathbf{C}, \mathbf{d}, \mathbf{r}, \lambda, \lambda_u, u\}$ доцільно здійснювати методом оптимального оцінювання. Як критерій оптимального оцінювання використаємо RMSE розрахункового $v_i(\tau_l)$ і реального $\tilde{v}_i(\tau_l)$ станів елементів БТО в моменти τ_l

$$RMSE = \sqrt{\sum_{l=0}^m \sum_{i=1}^n (v_i(\tau_l) - \tilde{v}_i(\tau_l))^2}$$

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

Пасивна ідентифікація здійснюється періодично в процесі роботи РКФС з метою уточнення та відстежування можливих змін параметрів системи. В роботі запропонована процедура пасивної ідентифікації. Отримано критерій оптимального оцінювання параметрів системи в усталеному режимі на основі значень станів елементів ε -області

$$\min_{\Lambda} \Delta v = |v_{ycm} \delta - v| = \left| \left(\lambda_0 u + \sum_{i=1}^{n_\varepsilon} \lambda_i v_i - \mu x \right) \frac{1}{\sum_{i=0}^{n_\varepsilon} \lambda_i} - v \right|$$

Удосконалено метод прогнозування стану РКФС в умовах комбінованої невизначеності. Метод ґрунтується на моделі РКФС з багатозональним тепловим 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 (6), де ω - часова кругова частота; Ψ - вектор просторових кругових частот; G_{rr} - авто-спектральна щільність потужності загального вхідного ресурсу; $G_{p_0 p_0}$ - авто-спектральна щільність потужності керівного впливу (зовнішнього ресурсу); G_{uu} - авто-спектральна щільність потужності збурень; G_{vv} - авто-спектральна щільність потужності стану (накопичений ресурс); G_{xx} - авто-спектральна щільність потужності використання та/або розсіювання ресурсу; $G_{p_{f_0} p_{f_0}}$ - авто-спектральна щільність вхідного ресурсу з урахуванням розповсюдження; G_{ux} - взаємна спектральна щільність потужності збурення і сировини, дозволяє знайти спектральні щільності факторів впливу на прогнозований стан:

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{p_0 v_0}(\omega, \Psi) = G_{v_0 v_0}(\omega, \Psi) \cdot W_{v_0 p_0}(\omega) \\ G_{rr}(\omega, \Psi) = G_{p_0 v_0}(\omega, \Psi) + G_{uu}(\omega, \Psi) + G_{xx}(\omega, \Psi) + \sum_{f \in \varepsilon} G_{p_f p_f} + \\ \quad + 2G_{p_0 u}(\omega, \Psi) + 2G_{p_0 x}(\omega, \Psi) + 2 \sum_{f \in \varepsilon} G_{p_0 p_f}(\omega, \Psi) - \\ \quad - 2G_{ux}(\omega, \Psi) + 2 \sum_{f \in \varepsilon} G_{u p_f}(\omega, \Psi) - 2 \sum_{f \in \varepsilon} G_{p_f x}(\omega, \Psi) \\ G_{vv}(\omega, \Psi) = G_{rr}(\omega, \Psi) \cdot \left(\frac{1}{T\omega} \right)^2 \\ G_{p_f p_f}(\omega, \Psi) = \int_0^\infty \left\{ \iiint_{\Omega} [R_{p_f p_f}(\tau, \mathbf{Z}) e^{-j\Psi \mathbf{Z}}] e^{-j\omega \tau} d\mathbf{Z} \right\} d\tau \end{array} \right. \quad (6)$$

В роботі отримані співвідношення між спектральними щільностями потужності системи рівнянь (6) з урахуванням передатних функцій елементів РКФС. Зокрема, для теплових технологічних об'єктів, які використовують

теплову енергію як витратний ресурс виробництва, спектральні щільності потужності потоків сировини x і теплової енергії p_0 пов'язані співвідношенням

$$\begin{aligned} G_{p_0x}(\omega, Z_0) &= G_{xx}(\omega, Z_0) \cdot W_{x_0 \rightarrow p_0}(j\omega) = \\ &= G_{xx}(\omega, Z_0) \cdot \frac{1 - T_{ЛСУ} T_0 \omega^2 + T_0 j\omega}{(1 + T_K j\omega)(1 + T_{ЛСУ} j\omega) T_0 j\omega + (1 + T_K j\omega) + 1} \end{aligned} \quad (7)$$

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.

Проведене дослідження характеристик прогнозування стану РКФС. Прогнозування запропонованим просторово-часовим спектральним методом досліджувалося на моделі у середовищі Scilab. Моделювалася РКФС з чотирма лінійно розташованими керованими елементами. Дослідження показало, що для РКФС зазначеної структури RMSE=14%, що прийнятно для використання результатів прогнозування для цілей координаційного керування.

Для прогнозування стану РКФС з неперервними (багатозональними) об'єктами і дискретними станами запропоновано ситуаційно-подійний метод. Для кожної зони процес зміни ситуації представлений у вигляді графа «ситуація-подія». Граф «ситуація-подія» описується ваговою матрицею, елементами якої є ймовірності переходу $P = \{p_{ij}; i, j = 1 \dots n\}$. Якщо ймовірність ідентифікації ситуації на основі моніторингу параметрів є $\mathbf{P}_0(t) = \{p_{0i}(t), i = 1 \dots n\}$, то уточнена ймовірність з урахуванням прогнозу

$$\mathbf{P}'(t) = \alpha \cdot \mathbf{P}_0(t) + \beta \cdot \left[\mathbf{P}_S^T(t - \Delta t) \cdot \mathbf{P}(t, \Delta t) \right], \quad (8)$$

де α і β - коефіцієнти довіри, $\alpha + \beta = 1$. Розглянуто також застосування ситуаційно-подійного підходу для прогнозування в умовах комбінованої стохастично-нечіткої невизначеності. Відповідний алгоритм показаний на рис.4.

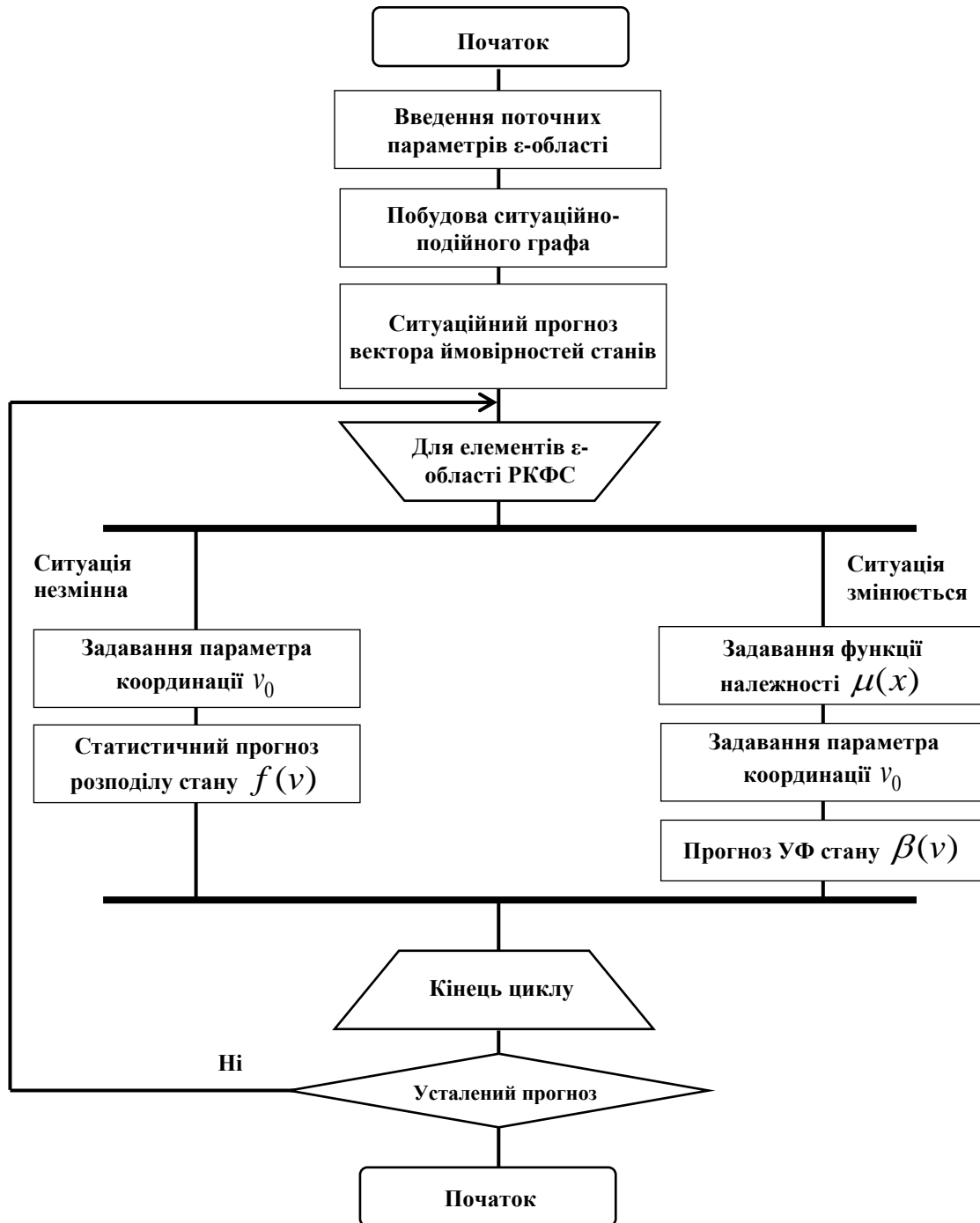


Рисунок 4 – Алгоритм прогнозування в умовах комбінованої невизначеності

Розглянута можливість реалізації методу прогнозування з використанням імітаційного моделювання в умовах комбінованої невизначеності. Імітаційну модель розроблено на платформі Scilab/Xcos. Результати дослідження RMSE предиктора на основі імітаційної моделі при різних наборах вхідних даних $\{x, p, u\}$ наведені на рис. 5.

Значний вплив вхідних даних на RMSE призводить до висновку, що для отримання достовірного прогнозу необхідне налаштування на великій вибірці вхідних даних з наступним усередненням параметрів.

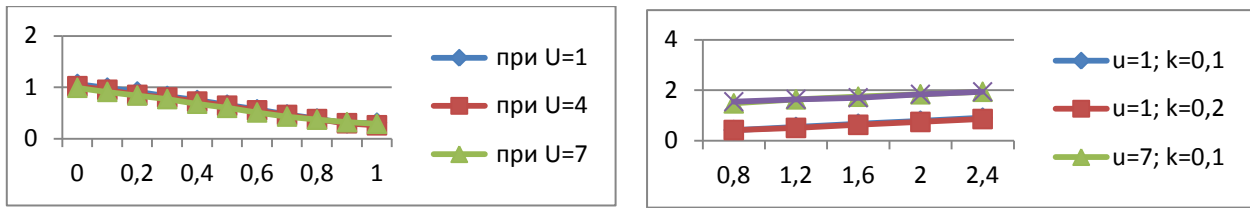


Рисунок 5 - Залежність RMSE від затухання при розповсюдженні впливу λ і від розкиду значень функції координації $\sigma_{v_{зад}}$ при різних рівнях зовнішніх завад

Визначена доцільна глибина прогнозування. Для цього оцінювалася залишкова дисперсія лінійного прогнозу

$$D_T = D_0(1 - k_{vv}^2(T)),$$

де $k_{vv}(T)$ - коефіцієнт кореляції; D_0 - апіорна дисперсія на початку інтервалу прогнозу. Порівнювалися виграш у вигляді підвищення рівня координації і витрати часу і енергії на виконання операції прогнозування.

Важливим аспектом розробки методів прогнозування для конкретних застосувань є порівняльне дослідження їх характеристик. У 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. Результати наведені у Табл.1.

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

Оптимальним уявляється застосування імітаційної моделі для прогнозування з одним циклом активного навчання і наступним поступовим покращенням результатів за допомогою пасивної ідентифікації.

У **четвертому розділі** розглянуто критерії та алгоритми координації РКФС за різних умов впливу на систему факторів. Удосконалено критерії координації РКФС з багатозональними тепловими об'єктами, зокрема, локально-глобальні критерій і критерій узагальненого ризику децентралізованої координації. Запропонована архітектура системи децентралізованої координації. Розроблені алгоритми ковзної децентралізованої координації. Для реалізації принципу ближньої дії запропонована оптимальна ковзна динамічна кластеризація. Для цього модифіковано алгоритм кластеризації за методом найближчого сусіда. Досліджена координація в умовах невизначеності, а саме статистична координація, нечітка координація, координація в умовах комбінованої невизначеності. Показано, що координація РКФС за обраними критеріями характеризується робастністю, що забезпечує можливість квазіоптимальної децентралізованої координації в умовах невизначеності.

Таблиця 1 Результати дослідження характеристик предикторів стану РКФС.

	Час навчання (налаштування)			Час прогнозування			RMSE (прогноз на 1 цикл)			RMSE (прогноз на 3 цикли)		
	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
Архітектура РКФС												
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
Бассівський 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

Проведений аналіз показує, що головним чинником ефективності керування БТО є стан його зон i , відповідно, головним критерієм координації є відхилення вектора стану зон об'єкта \mathbf{V} (температури) від бажаних станів \mathbf{F} . Таким чином, задача координації може бути зведена до багатовимірної однокритеріальної оптимізації за критерієм мінімуму середнього квадратичного відхилення (RMSE) стану зон БТО від бажаних станів

$$E = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - f_i)^2},$$

а параметрами оптимізації є компоненти вектору $\mathbf{V}_0 = C(\mathbf{F}, \mathbf{V}, M)$ станів зон БТО, де C - функція координації; M - модель системи.

Решта факторів: величина керівного впливу, витрати ресурсу теплової енергії, інші експлуатаційні показники виносяться в обмеження задачі оптимізації.

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 локально-глобальний критерій децентралізованої координації у системі з адитивним результатом матиме вигляд

$$E_i = \sum_{k=1}^{n_\varepsilon} \rho_{ik} e_{ik}$$

де ρ_{ik} - вагові коефіцієнти елементів ε -області i -го елемента, $\rho_{ik} : \begin{cases} =1 & \text{при } k=i \\ <1 & \text{при } k \neq i \end{cases}$; e_{ik} - локальні критерії; n_ε - кількість елементів у ε -області.

З урахуванням моделі БТО

$$E(v_{0i}, \gamma) = \sum_{k=1}^{n_\varepsilon} \rho_k \left\{ c_{yk} \alpha x_k \left[\frac{1}{1 + e^{-\delta(v_k + \gamma |W_{ik}|(v_{0i} - v_i) - bF_k)}} - \frac{1}{e^{-\delta(v_k + \gamma |W_{ik}|(v_{0i} - v_i) - b^{-1}F_k)}} \right] - q_{r0} \gamma |W_{ik}| |v_{0i} - v_i| \right\} \quad (9)$$

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

$$R = \sum_{k=1}^n \left\{ \int_0^\infty \int_0^\infty c_{yk} \alpha x_k \left[\frac{1}{1 + e^{-\delta(v_k - bF)}} - \frac{1}{e^{-\delta(v_k - b^{-1}F)}} \right] - q_{r0} \cdot (v_k - v_{0k}) - (c_{vk} \mu' + c_{xk}) x_k \right\} \cdot \beta(v_k) \beta(x_k) dx_k dv_k \quad (10)$$

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.6. Оптимізація здійснювалася циклічно, в результаті чого значення критерію поступово наближалася до глобального оптимуму. Швидкість наближення залежить від розміру ε -області.

Розроблений метод децентралізованої координації керування розподіленими кіберфізичними системами з багатозональними тепловими об'єктами передбачає ковзний процес керування послідовністю координації. Його застосування спрямоване на розв'язання однієї з проблем децентралізованої координації – проблеми забезпечення стійкості системи. Проблема зумовлена багатозв'язністю системи, а саме наявністю «фізичних» взаємних впливів елементів БТО і інформаційних зв'язків між координаторами. Застосування ковзного процесу дозволяє зменшити кількість інформаційних зв'язків, обмеживши їх координаторами ε -області, причому у кожний момент

часу розрахунок оптимальної координації здійснюється лише в одному координаторі.

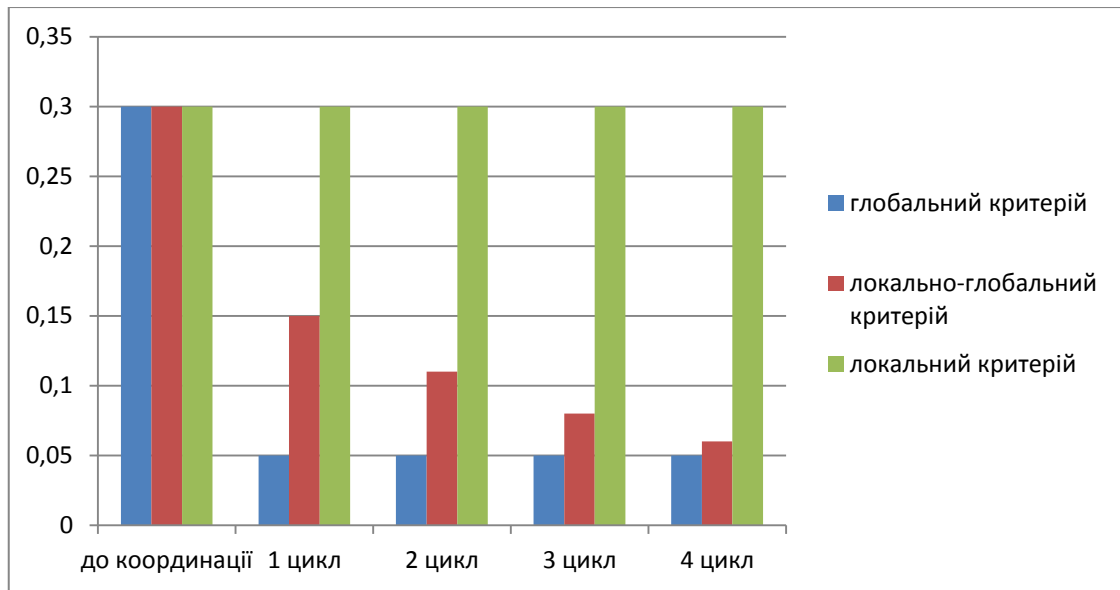


Рисунок 6 - Результати імітаційного моделювання оптимізації РКФС

Архітектура системи децентралізованої координації РКФС з багатозональними тепловими об'єктами ґрунтується 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;
- Оптимізація за локально-глобальним критерієм;
- 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.7.

Визначення послідовності ковзного процесу координації можливе за різними алгоритмами. В роботі розроблено та досліджено хвильовий алгоритм керування процесом ковзної децентралізованої координації у двох модифікаціях: синхронній і асинхронній. 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. Зокрема задача ковзного оцінювання розв'язується на декількох етапах: ідентифікація параметрів БТО, пошук оптимального параметра координації. Вона полягає у пошуку таких значень параметрів вектора Θ_1 , які задовольняють рівняння моделі системи і забезпечують максимальну близькість розрахункових параметрів стану V до вимірних

значень $\tilde{\mathbf{V}}$. Як критерій близькості використано квадратичний критерій, а задачу оцінювання зводиться до мінімізації функції вигляду

$$\delta = \sum_{i=1}^l \frac{[\tilde{v}_i - v(\Theta_1)]^2}{\sigma_{\tilde{v}_i}^2}, \quad (11)$$

або в матричному вигляді

$$\delta(\Theta_1) = [\tilde{\mathbf{V}} - \mathbf{M}_1(\Theta_1)]^T \mathbf{K}_{\tilde{\mathbf{V}}}^{-1} [\tilde{\mathbf{V}} - \mathbf{M}_1(\Theta_1)], \quad (12)$$

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

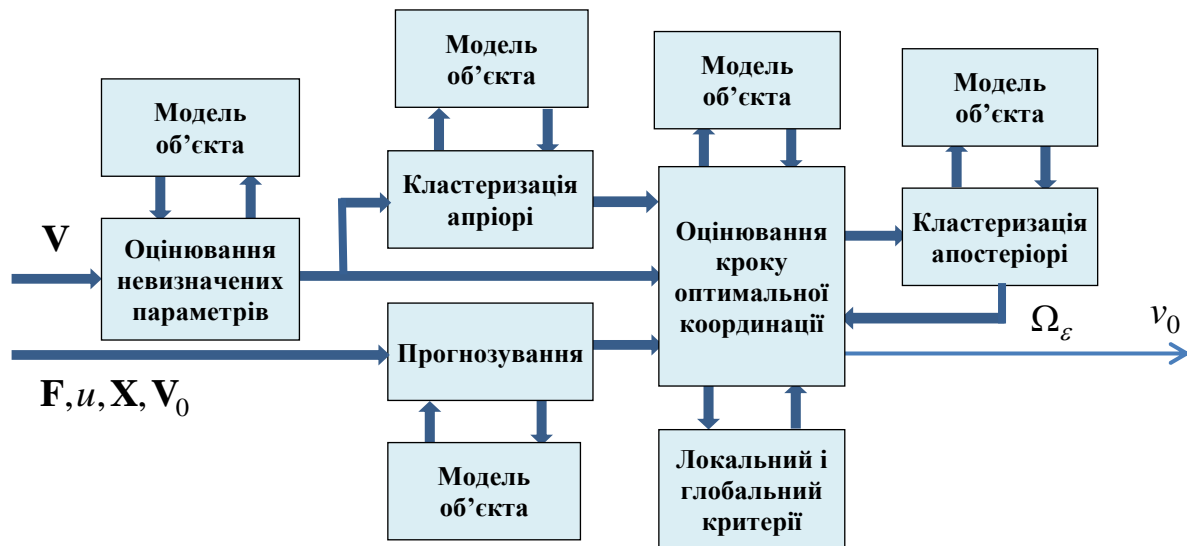


Рисунок 7 - Схема взаємодії модулів координатора

Для декомпозиції задач керування і ковзного визначення ε -оточення елемента запропоновано модифікований алгоритм кластеризації за методом найближчого сусіда. Близькість сусідства визначається як обернена до величини потоку теплової енергії між зонами багатозонального РТО. Слід відзначити, що результат кластеризації не є стаціонарним, оскільки потоки теплової енергії залежать від різниці температур зон, яка може змінюватися протягом циклу координації.

В роботі досліджено характеристики децентралізованого координаційного керування в умовах невизначеності. Оскільки невизначеність може бути зумовлена як випадковими факторами (випадкові зовнішні впливи, неточність дачивів стану, залишкова дисперсія оцінювання), так і нечіткими факторами (зміни надходження сировини до зон виробничого БТО, зміни технологічних режимів тощо), розглянуто відповідно характеристики координації в умовах стохастичної, нечіткої та комбінованої невизначеності.

Оскільки регулювання стану БТО здійснюється переважно релейними ЛСК, проаналізовано вплив релейних характеристик на невизначеність координації на прикладі трьохелементної системи, зображеної на рис. 8. У системі 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.

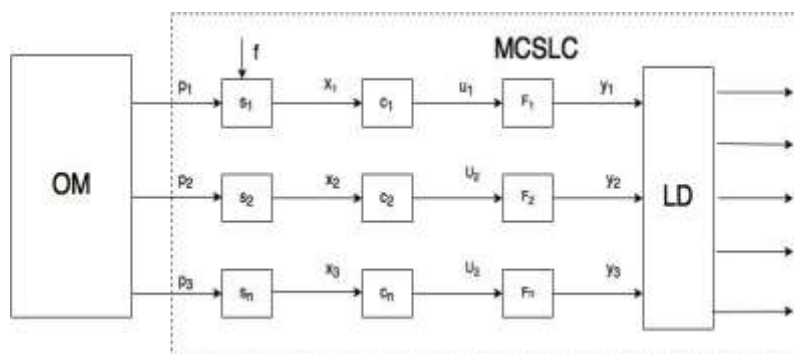


Рисунок 8 - Узагальнена схеми ідентифікації ситуації

Досліджено рівень координації для керування в умовах комбінованої невизначеності із застосуванням сценарно-подійного підходу. Оцінка невизначеності залежить від сценарію:

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

Сценарій В: 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 С: 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 .

У результаті чисельного моделювання визначено залежності показника невизначеності стану багатозонального об'єкта керування від ширини зони гістерезису локальних регуляторів (рис. 9) та потужності джерела енергії (рис. 10) отримані для різних рівнів випадкових впливів на об'єкт σ .

Залежності $K(\sigma, b)$ показують, що для кожного рівня випадкових впливів існує оптимальне значення ширини зони гістерезису b_{opt} , яке забезпечує мінімальну невизначеність керування. Крім того, наявність залежності від рівня впливу говорить про те, що релейне керування повинно мати змінні параметри для досягнення оптимальної роботи.

Залежності $K(\sigma, H)$ показують, що збільшення потужності джерела енергії зменшує невизначеність. Однак, це також призводить до збільшення частоти автоколивань і, як наслідок, до зниження надійності системи.

Залежність на рис. 10а отримано для об'єкта з однією зоною, а на рис. 10б з трьома зонами. Ці дані свідчать про те, що збільшення кількості зон згладжує критерій оптимізації.

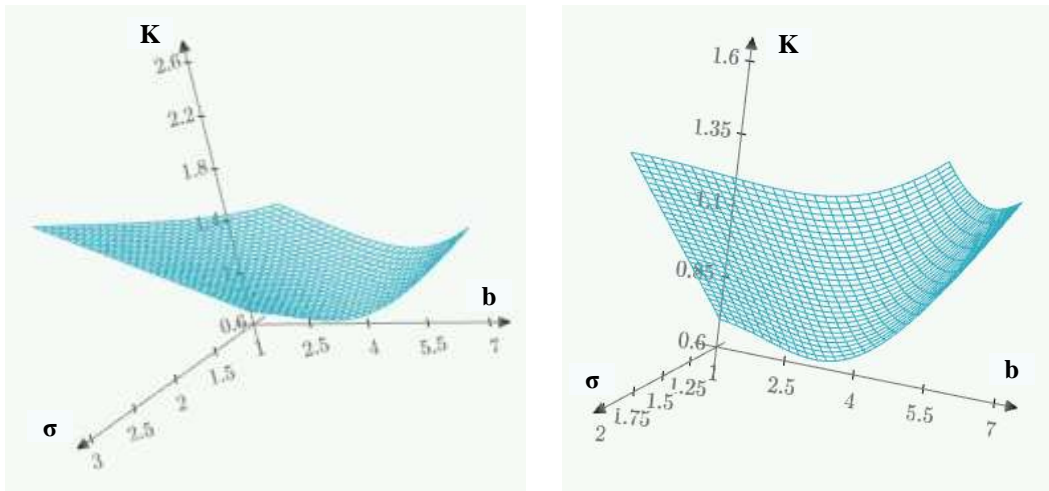


Рис. 9 – Залежності показника невизначеності стану багатозонального об'єкта керування від ширини зони гістерезису локальних регуляторів та рівня випадкових впливів

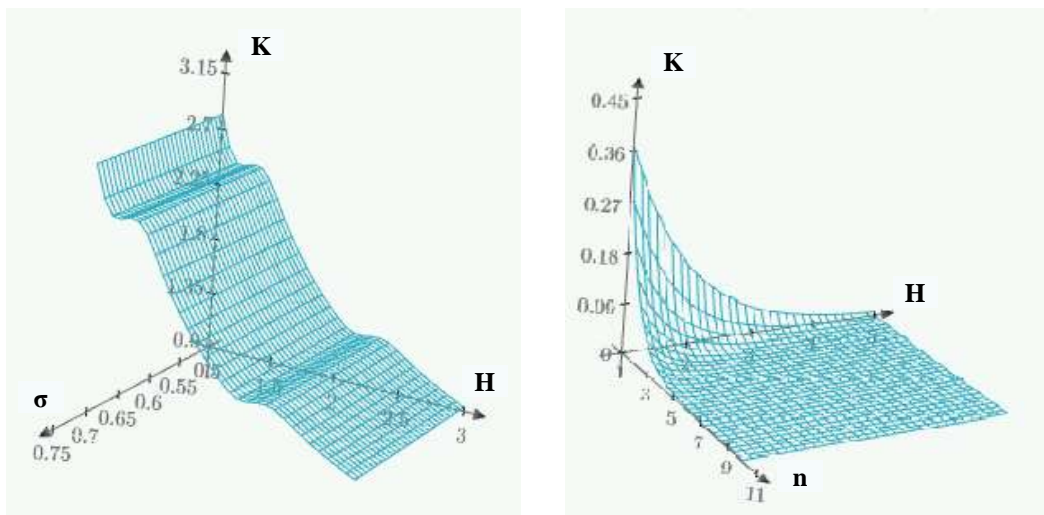


Рис. 10 – Залежності показника невизначеності стану багатозонного об'єкта керування від потужності джерела енергії та рівня випадкових впливів

У **п'ятому розділі** описана реалізація та досліджені характеристики систем децентралізованого координаційного керування РКФС з багатозональними тепловими об'єктами. Розроблена система імітаційного моделювання децентралізованої координації РКФС в середовищі Scilab. Досліджено стійкість та збіжність децентралізованої координації. Оцінено вплив хмарних технологій на динаміку децентралізованої координації. Проведене оцінювання ефективності децентралізованої координації. Описані впровадження результатів роботи у науковий і навчальний процеси та у виробництво.

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

перевірку теорії на реальних об'єктах.

Система імітаційного моделювання реалізована у вигляді «палітри суперблоків» Scilab/Xcos, частина якої наведена на рис.11.

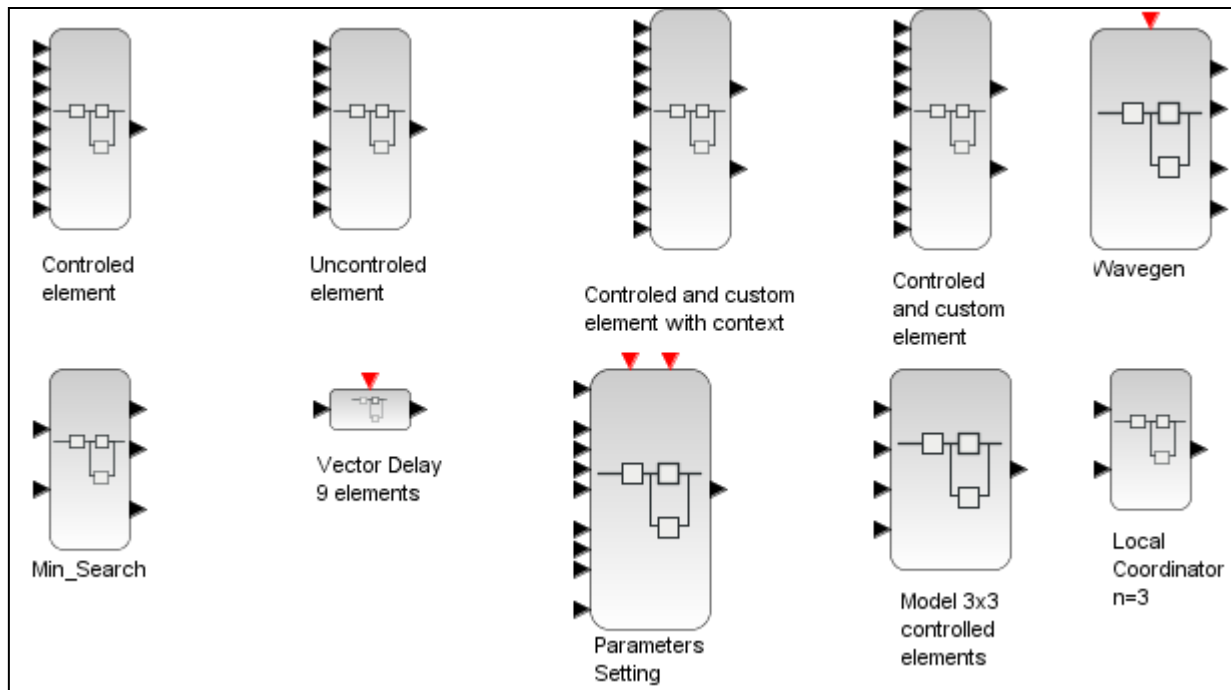


Рисунок 11 – Палітра блоків системи моделювання

Основою імітаційних моделей РКФС є моделі елементів розподілених об'єктів. У палітру блоків включені декілька типів моделей елементів: керовані (зони розподіленого об'єкта, розташовані у безпосередній близькості до елементів керування станом об'єкта) і некеровані (такі, що знаходяться на віддаленні від елементів керування); блоки з фіксованими параметрами і з можливістю їх зміни у процесі моделювання. Приклад схеми імітаційної моделі керованого елемента наведена на рис.11.

Базовим елементом моделі є суперблок, показаний на рис.12, який реалізує модель керованого елемента БТО. Фактично базовий суперблок є аналогом рекурентного нейрона з короткочасною пам'яттю. В елементі використана константна виробнича функція. Базовий суперблок розрахований на моделювання тривимірних об'єктів, тому в ньому передбачені 6 входів надходження ресурсу від сусідніх оточуючих елементів. При меншій кількості сусідніх елементів незадіяні входи оточуючих елементів замикаються на вихід. Тоді $v(Z_0) = v(Z_j) \rightarrow v(Z_0) - v(Z_0) = 0 \rightarrow p_f = 0$.

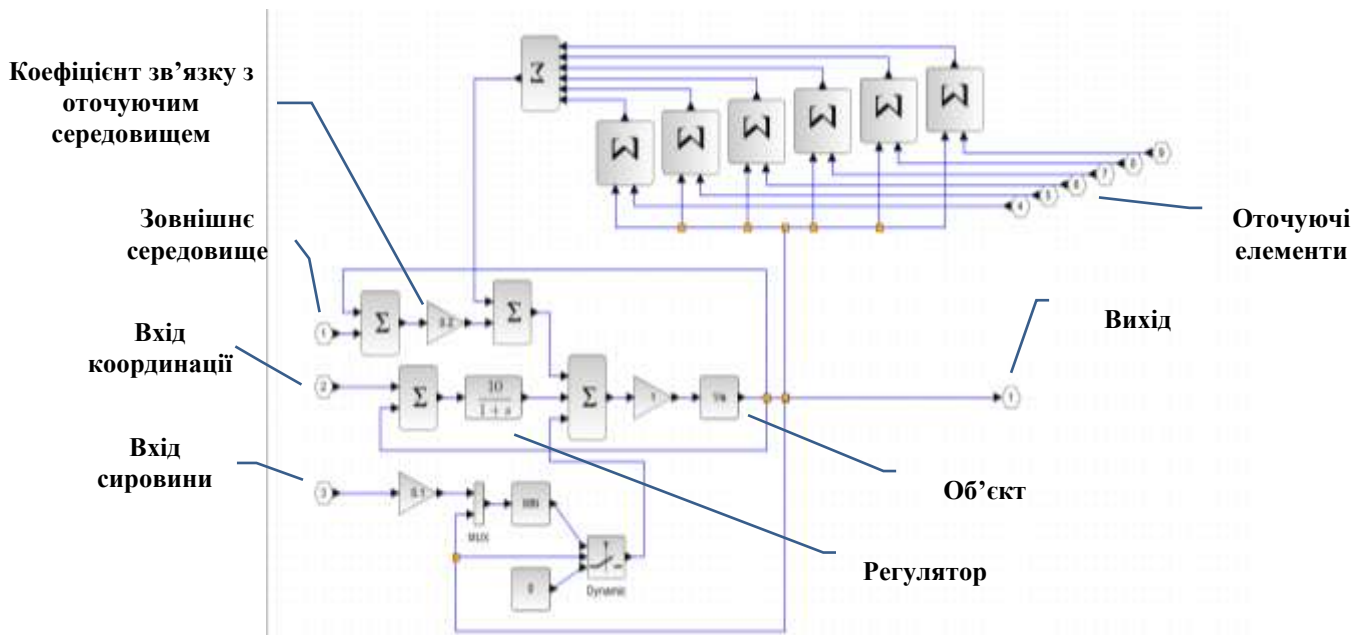


Рисунок 12 – Керований елемент РКФС

Взаємодія елементів зображена на рис.13. Коефіцієнт взаємодії розраховується за формулою $k = (4\pi\lambda\tau_{0j})^{-3/2} e^{-\frac{|Z_0-Z_j|^2}{4\lambda\tau_{0j}}}$.

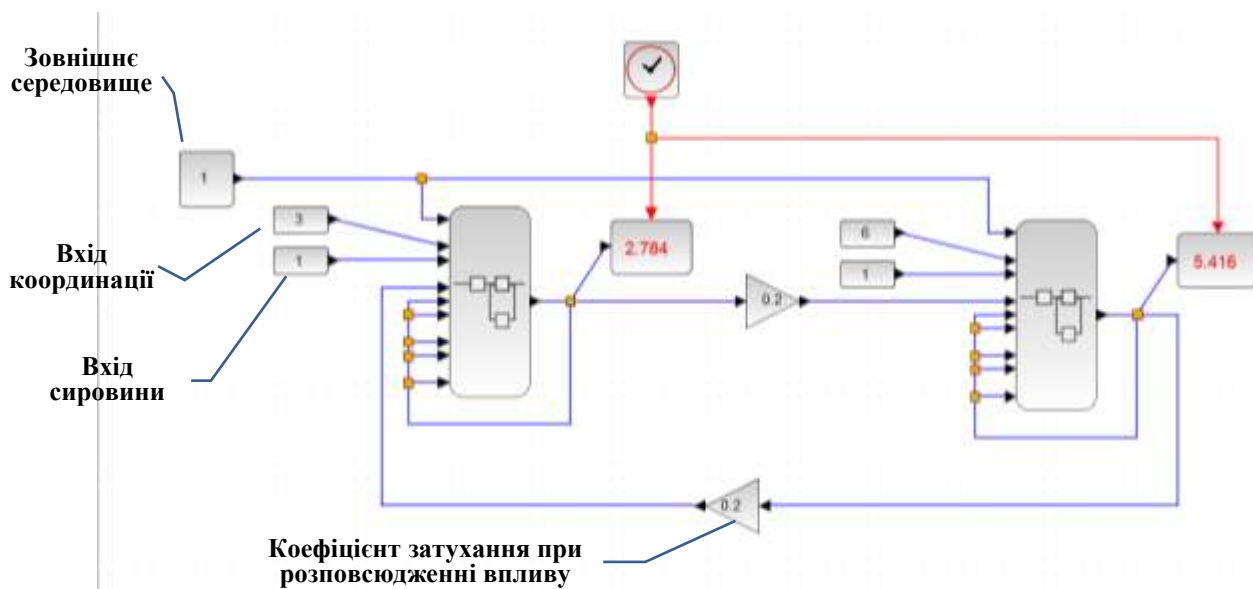


Рисунок 13 - Найпростіша модель об'єкта з двох елементів (суперблоків) в усталеному стані (детермінований режим)

Координація в системі імітаційного моделювання здійснюється відповідно до схеми рис.5.

Реальні розподілені об'єкти потребують ідентифікації їх параметрів. Такими параметрами є: параметр розповсюдження впливів в об'єкті (для теплових об'єктів – теплопровідність об'єкта), параметр проникності оболонки

об'єкта (для теплових об'єктів – теплопровідність оболонки), коефіцієнт накопичення ресурсу у елементі об'єкта (для теплових об'єктів – теплоємність зони об'єкта). Для реалізації такого підходу у палітру блоків включено блок налаштування, який здійснює один крок зміни параметрів елемента. Крім того, до палітри блоків імітаційного моделювання включено низку допоміжних блоків, які забезпечують обробку векторно-матричних даних великої розмірності у реальному часі.

Модель системи децентралізованої хвильової синхронної координації 3-елементної РКФС показана на рис. 14.

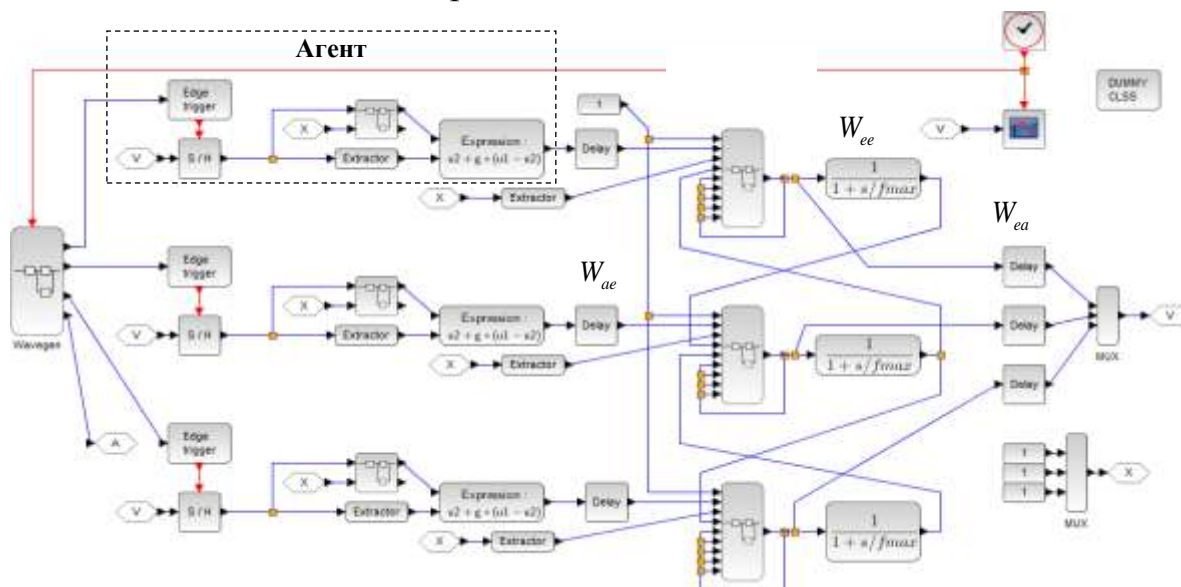


Рисунок 14 – Модель системи децентралізованої хвильової синхронної координації 3-хелементної РКФС у системі Scilab/Xcos

Досліджено стійкість та збіжність децентралізованої координації.

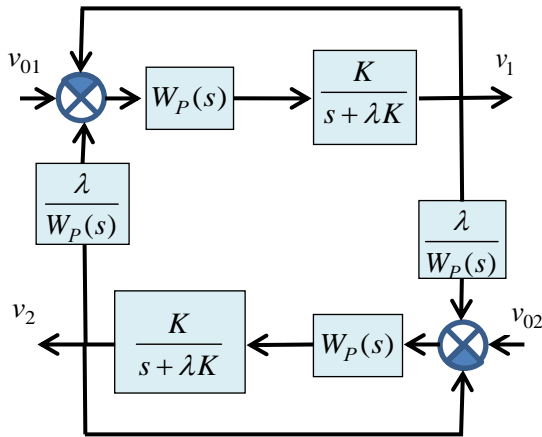
Розроблена система імітаційного моделювання використана для дослідження характеристик методів та алгоритмів децентралізованої координації. Результати моделювання показують, що навіть у найгіршому випадку максимального зв'язку елементів процес координації сходиться до оптимального стану.

Важливою складовою дослідження децентралізованої координації є аналіз стійкості системи. Причиною можливої нестійкості є багатозв'язність системи і затримки розповсюдження впливів. Ще одною причиною нестійкості системи є нелінійність виробничої функції та застосування релейного керування, що часто використовується у промислових об'єктах. Також часто зустрічається випадок групового керування, при якому одна область керування охоплює групу елементів спостереження.

Застосувати для розв'язання задачі класичні підходи аналізу стійкості не уявляється можливим через нелінійність координаторів та складну періодичність їх роботи. Тому аналіз стійкості здійснювався покроково, обираючи на кожному кроці підходящий метод аналізу.

Досліджена стійкість лінійного об'єкта з двома керованими елементами за відсутності координації. Відповідна схема зображена на рис. 15. Для

дослідження стійкості базової моделі здійснено еквівалентні перетворення структурної схеми. Отримано зручну для подальшого аналізу структурну схему, зображену на рис.15.



Показано, що якщо передатна функція $W_P(s)$ відповідає ПІД-регулятору, а параметр розповсюдження фізично реалізованої системи $\lambda < 1$, то годограф повністю лежить в межах одиничного кола, що забезпечує стійкість системи.

Розглянуто 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.

Отримано умову стійкості РКФС, яка

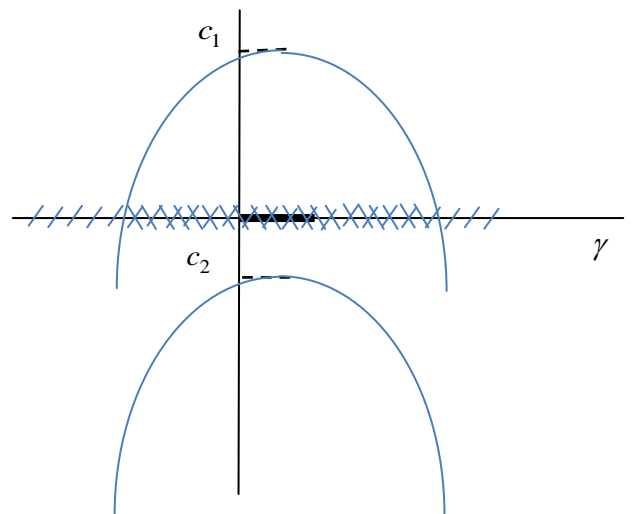
має вигляд

$$\begin{cases} a\gamma^2 + b\gamma + c_1 > 0 \\ a\gamma^2 + b\gamma + c_2 < 0 \end{cases} \quad (13)$$

Схематичне зображення умов (13) показано на рис.16. Інтервал значень параметра координації $0 < \gamma < 1$ повністю покривається діапазоном стійкості відповідно до умов (13).

Показано, що процес ковзної координації РКФС за локально-глобальним критерієм є стійким. Також показано, що стійкими є процеси пошукової оптимізації параметра координації в умовах невизначеності і релейного координаційного керування. Оцінено вплив хмарних технологій на динаміку децентралізованої координації. Результати моделювання показують, що навіть у найгіршому випадку максимального зв'язку елементів процес координації сходиться до оптимального стану.

Оскільки затримки у каналі не перевищують $1c$, то на стійкість більшості реальних розподілених кібер-фізичних систем вони не справляють суттєвого впливу. Проте їх необхідно враховувати при визначенні параметрів хвильового алгоритму.



Головною перевагою децентралізованої координації є структурна гнучкість РКФС. Гнучкість системи є важливою умовою автоматизації. За відсутності центрального координатора зміна кількості керованих елементів та/або їх взаємних зв'язків не призводить до необхідності втручання у алгоритми координації. Проте це вимагає дещо ускладненої процедури запуску системи при додаванні нового елемента або зміні конфігурації зв'язків. Запропоновано алгоритм цієї процедури:

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 можемо оцінити показник рівня координації. Результати моделювання показують, що при великих значеннях параметра розповсюдження і відстані між керуючими елементами похибка координації швидко зростає. Збільшення кількості хвиль координації при використанні хвильового алгоритму дозволяє зменшити похибку, проте для використаних у моделі параметрів системи – лише на 50%. Відповідно, залежність рівня координації від відстані між керованими елементами r_{ij} і кількості хвиль

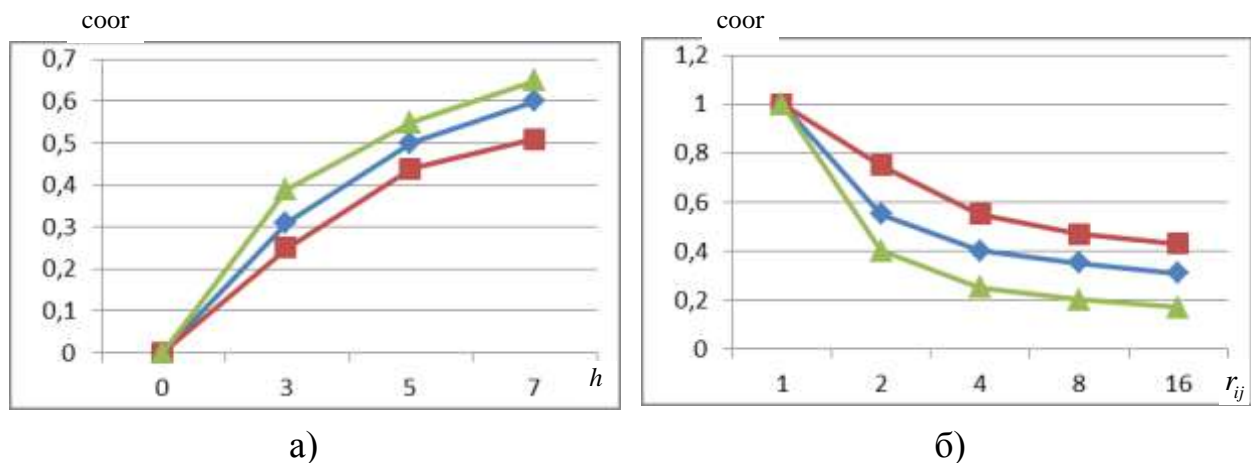


Рисунок 17- Залежності рівня координації від відстані між керованими елементами і кількості хвиль координації

координації h наведене на рис. 17.

Результати проведених досліджень впроваджені у практичне використання та у навчальний процес, що підтверджено відповідними актами.

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 показано на рис.18. 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. 19 показано варіант схеми системи децентралізованого керування температурою повітря у багатозональних приміщеннях, реалізований в запропонованому способі.

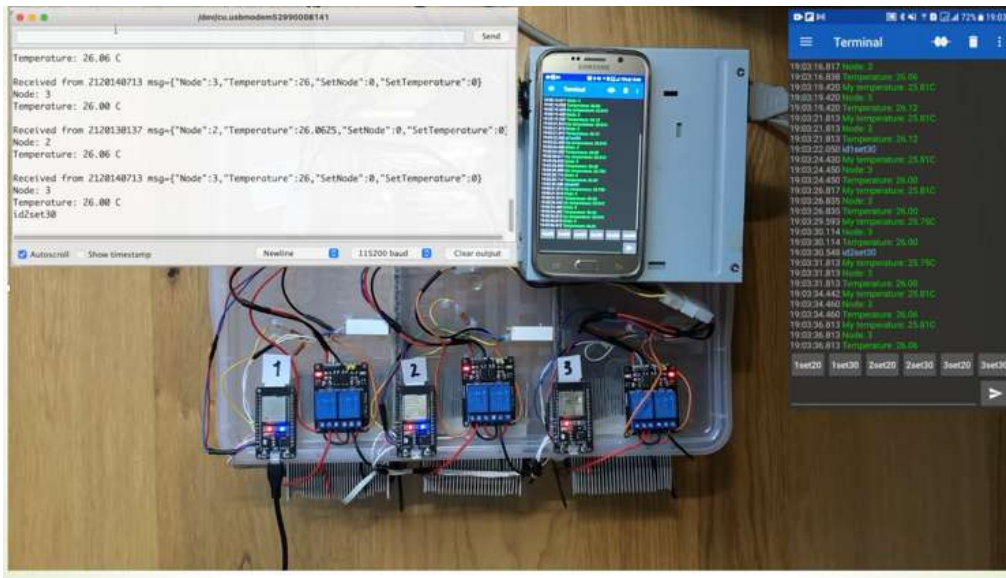


Рисунок 18 - Стенд в процесі експерименту

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.

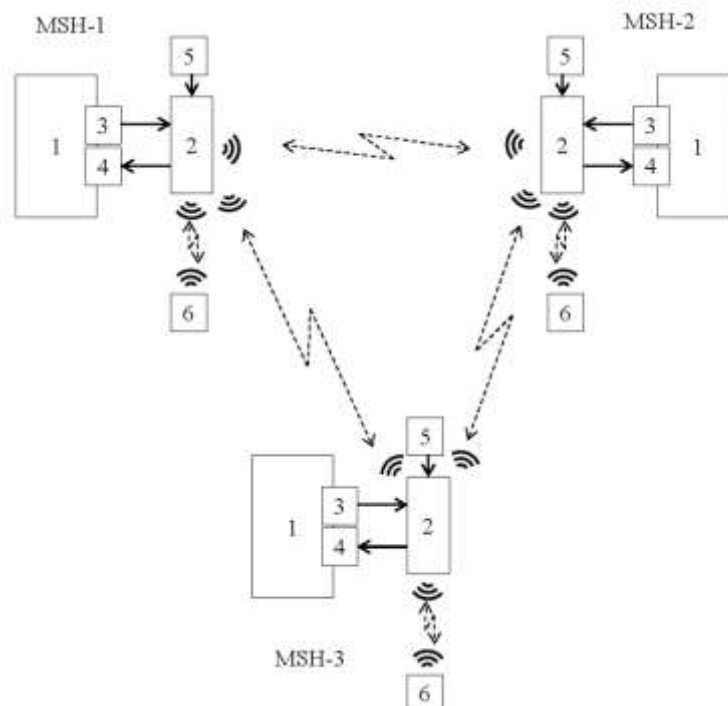


Рисунок 19 - Схема взаємодії Mobile Smart Heaters

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

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».

На підприємстві ПОСП «Уманський Тепличний Комбінат» результати використані під час створення нових систем керування для тепличного господарства. Експериментальне впровадження здійснювалося для керування температурою в теплиці, призначеній для вирощування світлокультур. В результаті досліджень встановлено, що застосування децентралізованої системи керування спрощує процес зміни кількості та розташування нагрівачів при зміні культур, які вирощуються у окремих зонах та забезпечує підвищення точності керування розподілом температури по простору теплиці та зменшення витрат енергії.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У роботі розв'язано актуальну науково-прикладну проблему недостатності структурної гнучкості, надійності та ефективності координаційного керування розподіленими кібер-фізичними системами (РКФС) з багатозональними тепловими об'єктами (БТО). В результаті проведених досліджень розроблена *методологія децентралізованої координації РКФС з багатозональними тепловими об'єктами*. Проведені дослідження зазначеної проблеми дозволяють зробити такі висновки.

1. Теплові об'єкти дуже розповсюджені як у виробництві, так і у побуті. Серед таких об'єктів виділяються розподілені багатозональні теплові об'єкти. Для керування БТО використовують локальні системи керування (ЛСК). Взаємний вплив зон зумовлює необхідність координації ЛСК. Сучасні тенденції розвитку засобів керування і інформаційних технологій сприяють переходу до децентралізованих систем керування. Проблеми децентралізованого координаційного керування станом багатозональних теплових об'єктів з динамічною структурою та змінними вимогами досі не знайшли ефективного вирішення, що і зумовило актуальність роботи.

2. Розроблена модель багатозонального теплового об'єкта на основі аналізу та дослідження взаємодії керованих елементів розподіленого об'єкту і модель РКФС з БТО і ресурсним керуванням станом. Модель БТО подає потоки ресурсу як керівні впливи та враховує використання ресурсу для виробництва продукції і відрізняється врахуванням розповсюдження потоків впливів від точки їх застосування у просторі і часі. Модель РКФС подана у формі двопотокового графу, який показує перетворення сировини та ресурсів на продукцію. Модель РКФС відрізняється врахуванням взаємного впливу керованих елементів. Результати перевірки адекватності моделі показують, що максимальне середнє квадратичне відхилення розробленої моделі від даних еталонної системи EnergyPlus для найгіршого випадку складає 9%, що прийнятно для розв'язання задач регулювання і координації. Розроблена модель РКФС дозволяє здійснювати оптимальну координацію стану елементів, оцінювати стійкість, ступінь координації та інші характеристики системи.

3. Розвинуто принцип ближньої дії при децентралізованій координації керування розподіленими кіберфізичними системами з багатозональними тепловими об'єктами. Розвинутий принцип виражається в кластеризації системи на області суттєвого взаємного впливу елементів РКФС, які можуть перетинатися. Принцип ближньої дії дозволяє обмежити множину керованих елементів, які підлягають координації.

4. Удосконалено критерій координації РКФС з багатозональними тепловими об'єктами, зокрема, локально-глобальний критерій і критерій узагальненого ризику децентралізованої координації. Критерії ґрунтуються на принципі ближньої дії, моделі багатозонального теплового об'єкта та оцінці середнього квадратичного відхилення стану зон БТО від заданого значення. Для оцінювання ризику досліджено розподіл ймовірностей станів елементів об'єкта у просторі і часі.

5. Розроблений метод децентралізованої координації керування розподіленими кіберфізичними системами з багатозональними тепловими об'єктами. Метод передбачає локальне керування станом елементів РКФС, введення до схеми кожної локальної системи керування окремих координаторів, забезпечення інформаційного зв'язку між координаторами типу «один до одного» в зоні ближньої дії кожного елемента РКФС, ідентифікацію параметрів елементів і їх взаємного впливу. Цей метод відрізняється застосуванням принципу ближньої дії, оптимізації керування за локально-глобальним критерієм і процедури ковзної координації, що забезпечує можливість динамічної зміни структури розподіленої кібер-фізичної системи.

6. В роботі удосконалено метод прогнозування стану РКФС з багатозональними тепловими об'єктами на основі просторово-часового спектрального підходу до прогнозування стану РКФС з неперервними та дискретними станами об'єктів. Порівняння статистичних методів, використання рекурентної нейронної мережі, імітаційної моделі і удосконаленого методу прогнозування за допомогою просторово-часової спектральної моделі показало, що найкращим за комплексом показників є застосування імітаційної моделі для прогнозування з одним циклом активного

навчання і наступним поступовим покращенням результатів за допомогою пасивної ідентифікації. Дослідження вірогідності прогнозів удосконаленим методом показало, що середня квадратична похибка прогнозування на один цикл координації 12%, що прийнятно для використання результатів прогнозування для цілей координаційного керування.

7. Розроблені методи і моделі реалізовані у вигляді методик, алгоритмів і програм, які у комплексі забезпечують практичне використання децентралізованій координації керування розподіленими кібер-фізичними системами з багатозональними тепловими об'єктами. Запропонована архітектура системи децентралізованої координації. Архітектура ґрунтується на взаємодії локальних координаторів. Кожен координатор містить модулі: моделі об'єкта, активної і пасивної ідентифікації параметрів об'єкта керування, оцінювання невизначених параметрів, кластеризації, прогнозування, оцінювання кроку оптимальної координації, оцінювання локально-глобального критерію. Розроблені алгоритми реалізації модулів.

8. Розроблена система імітаційного моделювання децентралізованої координації РКФС в середовищі Scilab, що дозволяє як здійснювати чисельні експерименти і аналіз процесів децентралізованої координації, так і створювати на основі імітаційних моделей програмно-апаратні засоби децентралізованих систем керування та здійснювати перевірку теорії на реальних об'єктах. Досліджено ефективність, стійкість та збіжність децентралізованої координації. Показано, що процес ковзної координації РКФС за локально-глобальним критерієм є стійким. Результати моделювання показують, що навіть у найгіршому випадку максимального зв'язку елементів процес координації збігається до оптимального стану. В роботі досліджена координація в умовах невизначеності, а також особливості координації при дискретних змінах станів елементів БТО і ситуаційно-подійному підході до керування. Проведене оцінювання ефективності децентралізованої координації за запропонованим показником рівня координації. Дослідження показало, що після першої хвилі координації RMSE зменшується на 20%-40% порівняно з нескоординованою системою. Збільшення кількості хвиль координації дозволяє довести зменшення RMSE до 30%-60%.

9. Результати дисертаційної роботи впроваджено на ряді підприємств, а також у навчальний процес Вінницького національного технічного університету. В роботі розроблена децентралізована система керування системою опалення у приміщенні "Movable Smart Heaters". Для проведення фізичного моделювання РКФС, перевірки розроблених моделей і алгоритмів створено дослідницький стенд, який впроваджений у наукові дослідження та навчальний процес Вінницького національного технічного університету. Програмне забезпечення для реалізації децентралізованої координації впроваджено для використання у системах керування температурою у промислових сушильних камерах та під час створення нових систем керування для тепличного господарства. Результати практичного використання підтверджують коректність, доцільність і ефективність розроблених методів, моделей і алгоритмів.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці, в яких містяться
основні наукові результати дисертації*

1. В. М. Дубовой, М. С. Юхимчук. Децентралізоване координаційне керування розподіленими кібер-фізичними системами з неперервними об'єктами : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2022. 230 с.
2. М. С. Юхимчук, С. М. Москвіна. Математичне моделювання автоматичних систем з логічними управляючими пристроями : монографія. Вінниця : ВНТУ. 2015. 124 с.
3. Dubovoi V. M., Yukhymchuk M. S. Research of the synchronous waven coordination model of production processes. *Автоматизація технологічних та бізнес-процесів*. 2020. Том 12. № 1. С. 40–48. DOI 10.15673/atbp.v12i1.1702.
4. Дубовой В. М., Юхимчук М. С. Дослідження стійкості та збіжності децентралізованої координації локальних систем управління розподіленими кібер-фізичними системами. *Вісник ВПІ*. 2021. Вип. 4, С. 62–69, doi: 10.31649/1997-9266-2021-157-4-62-69.
5. Юхимчук М. С., Манглієва Т. Н. Аналіз стійкості автоматизованої системи управління опаленням у будинку. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2017. № 3 (132). С. 7–13.
6. Юхимчук М. С., Деркач А. І. Розробка математичних моделей аналізу впливу параметричних збурень на стійкість автоматичних систем з логічними управляючими пристроями. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2016. № 2. С. 145–151.
7. Юхимчук М. С., Осіпенко Г. А. та ін. Аналіз швидкодії розподілених систем управління базами даних. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2014. № 3 (19). С. 59–63. DOI: <https://doi.org/10.15673/2312-3125.19/2014.27958>
8. Юхимчук М. С., Осіпенко Г. А. Метод аналізу стійкості автоматичних систем з логічними управляючими пристроями за впливу параметричних збурень на основі функцій чутливості. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2015. № 2 (119). С. 92–99.
9. Юхимчук М. С., Осіпенко Г. А. Аналіз існуючих методів оцінювання та контролю параметрів автоколиваний в релейних системах. *Вісник Житомирського державного технічного університету*. 2015. № 1 (72) С. 77–82.
10. Юхимчук М. С. Інформаційна технологія для моделювання систем з логічними управляючими пристроями. *Автоматизація технологічних і*

бизнес-процессов. 2014. № 2. С. 44–50. DOI: <https://doi.org/10.15673/2312-3125.18/2014.26448>.

11. Юхимчук М. С. Прогнозування стану розподілених кібер-фізичних систем. *Наукові праці ВНТУ*. 2022, вересень. Вип. 3. (<https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/669>).

12. Юхимчук М. С. Принцип ближньої дії в децентралізованих кіберфізичних системах з неперервними об'єктами. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2022. № 4. С. 69–75. DOI <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.4.9>.

13. Юхимчук М. С. Ідентифікація багатозональних теплових об'єктів. *Вимірвальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2022. № 4. С. 33-40.. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-72-4-3>.

14. Dubovoi V., Yukhimchuk M. et al. Functional safety assessment of one-level coordination of distributed cyber-physical objects. *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 97. NR 9/2021, P. 38–41. http://pe.org.pl/abstract_pl.php?nid=12681

15. Dubovoi V., Yukhimchuk M. et. al. Energy Efficiency of Smart Control Based on Situational Models. *Control Systems: Theory and Applications. Series in Automation, Control and Robotics*. River Publishers. 2018. P. 145–167.

16. Bisikalo O., Kovtun V., Yukhimchuk M., Voytyuk I. Analysis of the automated speaker recognition system of critical use operation results. *Radio Electronics, Computer Science, Contro*. 2018., № 4. P. 71–84. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-4-7.

17. Kovtun V., Yukhimchuk M. et al. Integration of hidden markov models in the automated speaker recognition system for critical use. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2019. № 1. P. 178–182. DOI: 10.15199/48.2019.04.32.

18. Bisikalo O., Kovtun V., Yukhimchuk M. Modeling the security policy of the information system for critical use. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2019. № 1. P. 132–149. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-1-13.

19. Rovira R. H., Duvoboi V. M., Yukhimchuk M. S., Bayas M. M., Torres W. D. A Model of Self-oscillations in Relay Outputs Control Systems with Elements of Artificial Intelligence. In: Rocha Á., Guarda T. (eds) *Proceedings of the International on Information Technology & Systems (ICITS 2018)*. ICITS 2018. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 721. Springer, Cham DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-73450-7_33.

20. Yukhimchuk M. et al. Evaluation of uncertainty of control by measurement with logical conditions. *Proceedings of SPIE*. 2016. Volume 10031 «Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments». DOI <http://dx.doi.org/10.1117/12.2248871>

21. Yukhimchuk M. S., Moskvina S. M. Evaluation of the impact of uncontrolled parametric perturbations on stability of automatic systems with logical

control units. *Proceedings of SPIE*. 2015. Volume 9816, Optical Fibers and Their Applications; 98161X (2015) <https://doi.org/10.1117/12.2229136>

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

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

23. В. М. Дубовой, М. С. Юхимчук. Пристрій для моделювання пасивного елемента розподіленого теплового виробничого об'єкта. Корисна модель Реєстр. № 202100446. Поз. ріш. № 5128/ЗУ/21 від 20.04.2021.

24. М. С. Юхимчук, Т. Н. Манглієва. Комп'ютерна програма. «Розробка програмного забезпечення комп'ютерної системи контролю якості кисломолочної продукції з використанням об'єктно-орієнтованого програмування». Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір. № 63395.

25. М. С. Юхимчук, Т. Н. Манглієва. Моделювання поведінки нелінійних систем з логічними управляючими пристроями». Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 40168.

26. В. М. Дубовой, М. С. Юхимчук, Д. О. Наумчук. Комп'ютерна програма «Hierarhical Control». Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 95496. Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, зареєстров. 21.01.2020 р.

27. В. М. Дубовой, М. С. Юхимчук, О. І. Шевчук. Комп'ютерна програма «P2P-coordination-control» («Coord-control»). Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 95498. Міністерство економічного розвитку і торгівлі України, зареєстров. 21.01.2020 р.

28. М. С. Юхимчук. Розробка методу аналізу стійкості автоматичних систем з логічними управляючими пристроями при впливі неконтрольованих параметричних збурень. Матеріали конференції: *Інформаційні технології і автоматизація*. 2014. Одеса. С. 61.

29. Юхимчук М. С., Осіпенко Г. А. Моделювання нелінійних систем управління за допомогою методу описуючих функцій. *Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення* : матеріали 1 Всеукраїнської науково-технічної конференції, 2016. С. 39–40.

30. Юхимчук М. С., Осіпенко Г. А. Аналіз методів дослідження поведінки нелінійних нестационарних систем. *«Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки»*: праці 4-ї Міжнародної науково-практичної конференції. Чернівці. 2016. С. 62–63.

31. Юхимчук М. С., Осіпенко Г. А. Розробка узагальненої методики

дослідження автоматичних систем з логічними управляючими пристроями при впливі неконтрольованих параметричних збурень. *Перспективні напрямки захисту інформації* : матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції, Одеса, 2016. С. 119–120.

32. Юхимчук М. С., Осіпенко Г. А. Розробка комп'ютерної програми для дослідження автоматичних систем з управляючими логічними пристроями при впливі неконтрольованих параметричних збурень. *Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості* : матеріали 2-ї Міжнародної науково-практичної конференції. С. 36–38.

33. Юхимчук М. С. Розробка методу оцінки впливу неконтрольованих параметричних збурень на стійкість автоматичних систем з логічними управляючими пристроями. *Інформаційні технології і автоматизація*. 2016. С. 48.

34. Юхимчук М. С., Манглієва Т. М. Розробка узагальненого підходу до математичного моделювання автоматичної системи з ЛУП. *«Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» (ПІКТ – 2016)*. Чернівці. С. 199–200.

35. Юхимчук М. С., Москвіна С. М. Метод аналізу стійкості автоматичних систем з логічними управляючими пристроями при впливі неконтрольованих параметричних збурень. *Контроль і управління в складних системах (КУСС-2016)* : матеріали XIII Міжнародної конференції. Вінниця, 2016. С. 44–46.

36. Дубовой В. М., Юхимчук М. С. Оцінювання функціональної безпеки децентралізованого координаційного керування розподіленими кіберфізичними об'єктами : матеріали XV Міжн. конф. *«Контроль і управління в складних системах»*, Вінниця, Електронне наукове видання матеріалів конференції. 2020. С. 167–170: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/30626>

37. Дубовой В. М., Юхимчук М. С. Модель децентралізованого координаційного керування неперервними розподіленими об'єктами : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції *«Автоматика 2020»*, С. 91–92. <http://iconfs.net/uploads/automatics2020/zbirnik-materialiv-avtomatika-2020.pdf>

38. Dubovoi V., Yukhimchuk M., Perepelytsia S. Optimization of smart systems in conditions of combined uncertainty under the criterion of energy cost : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції *«Контроль і управління в складних системах»*, 2018. С. 18. <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/22745>

39. Duvoboi V. M., Nikitenko O. D., Yukhymchuk M. S. Modeling of the automated control system of heating in the «smart house» *Automatics – 2017 : XXIV International Conference On Automated Control*, Kiev, Ukraine. 2017. P. 68

40. Дубовой В. М., Юхимчук М. С. Аналіз процесів в релейних системах управління з елементами штучного інтелекту : тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції *«Контроль і управління в складних системах»*. 2016. С. 29–31.

41. Юхимчук М. С. Гармонічна лінеаризація в системах із логічними керувальними пристроями. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології-2014* : матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, студентів та аспірантів АКИТ-2014, Київ, С. 86.

42. Юхимчук М. С., Москвіна С. М. Оцінка впливу неконтрольованих параметричних збурень на стійкість автоматичних систем з логічними управляючими пристроями. *Контроль і управління в складних системах (КУСС-2104)* : матеріали XII Міжнародної конференції. С. 4.

43. Юхимчук М. С., Осіпенко Г. А. Аналіз сучасних методів дослідження автоматичних систем управління з логічними управляючими пристроями. *Контроль і управління в складних системах (КУСС-2104)* : матеріали XII Міжнародної конференції. С. 5.

44. Осіпенко Г. А., Юхимчук М. С. Метод аналізу стійкості автоматичних систем з ЛУП на прикладі системи пожежогасіння на залізничному транспорті. *Сучасні інформаційні технології 2014* : матеріали Четвертої міжнародної конференції студентів і молодих науковців «Сучасні інформаційні технології 2014» Одеса. С. 68–69.

45. Юхимчук М. С. Метод аналізу автоматичних систем управління з логічними управляючими пристроями при впливі параметричних збурень. *«Informatics and computer technics problems» (PICT-2014)*. Chernivtsi. P. 76–77.

46. Юхимчук М. С., Осіпенко Г. А. Моделювання нелінійних систем управління за допомогою методу описуючих функцій. *I Всеукраїнська науково-технічна конференція. «Комп'ютерні технології: інновації, проблеми, рішення 2015»* Житомир. С. 39–40.

47. Юхимчук М. С., Осіпенко Г. А. Аналіз методів дослідження поведінки нелінійних нестационарних систем. *«Informatics and computer technics problems» (PICT-2015)*. Chernivtsi. P. 62–63.

48. Юхимчук М. С., Осіпенко Г. А. Розробка узагальненої методики дослідження автоматичних систем з логічними управляючими пристроями при впливі неконтрольованих параметричних збурень. *Перша Всеукраїнська науково-практична конференція «Перспективні напрями захисту інформації»*. 2015 С. 119–120.

49. Юхимчук М. С. Розробка методу оцінки впливу неконтрольованих параметричних збурень на стійкість автоматичних систем з логічними управляючими пристроями. *Информационные технологии и автоматизация* : VIII Международная научно-практическая конференция. 2015. С. 48

50. Юхимчук М. С., Манглієва Т. Н. Розробка узагальненого підходу до математичного моделювання автоматичної системи з ЛУП «Informatics and computer technics problems» (PICT-2016). P. 199–200.

51. Юхимчук М. С., Манглієва Т. Н.. Аналіз автоматизованої системи

управління опаленням в розумному будинку. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології-2017* : IV Міжнародна науково-практична конференція молодих учених, студентів та аспірантів АКІТ-2017, С. 86.

52. Dubovoi V., Sembrat D. and Yukhymchuk 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.

53. Дубовой В. М., Сембрат Д. С., Юхимчук М. С. Вплив віртуалізації на динаміку систем децентралізованої координації розподілених кібер-фізичних систем. *Комп'ютерне моделювання і керування в техніці та технологіях КМКТТ-2021*. 2021 С. 80–85.

54. Dubovoi Volodymyr, Yukhymchuk Maria et al. Smart Control of Multi-zone Object Heating with Multi-source System. *IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Lviv, Ukraine, 2019, P. 1018–1021. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879942

55. Dubovoy V. M., Yukhymchuk M. S. About the correlation of requirements to general and professional competences of the specialists in information systems. *Міжнародна науково-технічна конференція «Контроль і управління в складних системах»* (2016). С. 232–234. URI: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/13167>

АНОТАЦІЯ

Юхимчук М. С. ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНЕ КООРДИНАЦІЙНЕ КЕРУВАННЯ РОЗПОДІЛЕНИМИ КІБЕР-ФІЗИЧНИМИ СИСТЕМАМИ З БАГАТОЗОНАЛЬНИМИ ТЕПЛОВИМИ ОБ'ЄКТАМИ. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.13.07 — Автоматизація процесів керування. – Вінницький національний технічний університет. Вінниця, 2023.

Метою роботи є підвищення структурної гнучкості, надійності та ефективності координаційного керування розподіленими кібер-фізичними системами з багатозональними тепловими об'єктами шляхом розроблення і впровадження нових принципів, моделей, методів та алгоритмів децентралізованої координації.

Вперше запропоновано: метод децентралізованої координації керування розподіленими кіберфізичними системами з багатозональними тепловими об'єктами, який відрізняється застосуванням принципу ближньої дії, оптимізації керування за локально-глобальним критерієм і процедури послідовної координації, що забезпечує можливість динамічної зміни структури розподіленої кібер-фізичної системи і може використовуватися при

керуванні іншими типами розподілених децентралізованих систем; модель багатозонального теплового об'єкта, яка відрізняється врахуванням розповсюдження керівних впливів від точки їх застосування у просторі і часі, що дозволяє визначити множину елементів РКФС у просторі і часі, для яких керівний вплив є суттєвим з урахуванням заданого критерію значущості; модель РКФС з багатозональним тепловим об'єктом і ресурсним керуванням станом у формі двохпотокового графа, яка відрізняється врахуванням взаємного впливу керованих елементів багатозонального теплового об'єкта і витрат ресурсу на виробництво, що дозволяє оцінювати стійкість, ресурсоємність та інші характеристики системи; 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 багатозональними тепловими об'єктами, який ґрунтується на моделі багатозонального теплового об'єкта і розподілі станів елементів об'єкта у просторі і часі, що дозволяє здійснювати оптимальну координацію; метод прогнозування стану розподілених кіберфізичних систем з неперервними об'єктами, який ґрунтується на моделі РКФС з багатозональним тепловим об'єктом і ресурсним керуванням станом і просторово-часовому спектрі станів і збурень, який дозволяє оптимізувати координацію керування на інтервалі кореляції впливів.

Отримав подальший розвиток принцип ближньої дії при децентралізованій координації керування розподіленими кіберфізичними системами з багатозональними тепловими об'єктами, який ґрунтується на моделі розповсюдження керівних впливів від точки їх застосування у просторі і часі, що дозволяє обмежити множину керованих елементів, які підлягають координації.

Розроблені теоретичні положення дозволили створити методику комбінованої активно-пасивної ідентифікації параметрів розподіленого технологічного об'єкта, модифікований алгоритм кластеризації за методом найближчого сусіда, хвильовий алгоритм координації розподілених кіберфізичних систем з неперервними об'єктами, систему імітаційного моделювання розподілених кіберфізичних систем з неперервними об'єктами, захищену патентами на винахід, децентралізовану систему керування системою опалення у приміщенні “Movable Smart Heaters”.

Ключові слова: розподілена система керування,—децентралізована координація, кіберфізична система, багатозональний тепловий об'єкт, ковзна координація, рівень координації, принцип ближньої дії.

SUMMARY

Yukhymchuk M. S. DECENTRALIZED COORDINATED CONTROL OF DISTRIBUTED CYBER-PHYSICAL SYSTEMS WITH MULTI-ZONE THERMAL OBJECTS. - Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.13.07 — Automation of control processes. – Vinnytsia National

Technical University. Vinnytsia, 2023.

The aim of the work is to improve the efficiency of coordination control of cyber-physical systems with multi-zonal distributed thermal objects by developing and implementing new principles, models, methods and algorithms of decentralized coordination.

It was proposed for the first time: a method of decentralized coordination of control of distributed cyber-physical systems (DCPS) with multi-zone thermal objects, which is distinguished by the application of the principle of short-range action, optimization of control according to the local-global criterion and the procedure of the sequential coordination procedure, which provides the possibility of dynamic changes in the structure of the distributed cyber-physical system and can be used when control other types of distributed decentralized systems; a model of a multi-zonal thermal object, which is distinguished by taking into account the distribution of governing influences from the point of their application in space and time, which allows to determine the set of elements of the DCPS in space and time, for which the governing influence is significant, taking into account the given criterion of significance; the DCPS model with a multi-zone thermal object and resource control of the state in the form of a two-flow graph, which is distinguished by taking into account the mutual influence of the controlled elements of the multi-zone thermal object and resource costs for production, which allows you to evaluate the stability, resource intensity and other characteristics of the system; an indicator of the level of coordination, which determines the state of coordination in the interval from chaos to a given deterministic state, which allows evaluating the effectiveness of the coordination system.

The criterion for coordination of the DCPS with multi-zone thermal objects has been improved, which is based on the model of the multi-zone thermal object and the distribution of states of the object's elements in space and time, which allows for optimal coordination; the method of forecasting the state of distributed cyber-physical systems with continuous objects, which is based on the DCPS model with a multi-zone thermal object and resource state control and the spatio-temporal spectrum of states and disturbances, which allows for optimization of control coordination on the impact correlation interval.

The principle of short-term action during the decentralized coordination of control of distributed cyber-physical systems with multi-zone thermal objects, which is based on the model of the distribution of control influences from the point of their application in space and time, has received further development, which allows limiting the set of controlled elements that are subject to coordination.

The developed theoretical provisions made it possible to create a method of combined active-passive identification of the parameters of a distributed technological object, a modified clustering algorithm based on the nearest neighbor method, a wave algorithm for the coordination of distributed cyber-physical systems with continuous objects, a system of simulation modeling of distributed cyber-physical systems with continuous objects, protected by patents for the invention, a decentralized system for controlling the indoor heating system "Movable Smart Heaters".

Key words: distributed control system, decentralized coordination, cyber-physical system, continuous production facility, sliding coordination, level of coordination, principle of short-term action.