

**Міністерство освіти і науки України  
Національний університет “Львівська політехніка”**

**За редакцією професора А. О. Мельника**

# **Кіберфізичні системи: технології збору даних**

**О.Ю. Бочкарьов, В.А. Голембо,  
Я.С. Парамуд, В.О. Яцук**

**Видавництво “Магнолія 2006”**

**Львів 2024**

**УДК 004; 004.7; 004.8;004.9**

**Рецензенти:**

**Дунець Р.Б.** Завідувач кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем  
Національного університету «Львівська політехніка», д.т.н., професор

**Рак Т. Є.** Проректор з науково-педагогічної роботи ПЗВО “ІТ СТЕП  
Університет”, д.т.н., доцент

**Яцишин С.П.** Професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій  
Національного університету «Львівська політехніка», д.т.н., професор

Рекомендовано до опублікування Вченою радою  
Національного університету “Львівська політехніка”  
Протокол № 51 від 22 січня 2019р.

Кіберфізичні системи: технології збору даних [Текст]: монографія - О.Ю. Бочкар'юв, В.А. Голембо, Я.С. Парамуд, В.О. Яцук. За редакцією професора А. О. Мельника. Львів: “Магнолія 2006”, 2024. – 176 с.  
ISBN 978-617-574-139-9

У монографії розглянуто питання побудови комунікаційних засобів нижніх рівнів кіберфізичних систем, запропоновано технології збору даних в автономних мобільних кіберфізичних системах на основі принципів самоорганізації та концепції структурної адаптації, а також організації їх функціонування на основі технології багатоагентних систем, запропоновані методи та засоби дистанційного калібрування вимірювальних каналів кіберфізичних систем.

Для ІТ-спеціалістів, аспірантів та студентів спеціальностей “Комп'ютерна інженерія”, “Комп'ютерні науки”, “Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка”.

© О.Ю. Бочкар'юв, В.А. Голембо,  
Я.С. Парамуд, В.О. Яцук, 2024  
© “Магнолія 2006”, 2024

ISBN 98-617-574-139-9

## ЗМІСТ

<b>РОЗДІЛ 1. КОМУНІКАЦІЙНІ ЗАСОБИ НИЖНІХ РІВНІВ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ</b>	10
1.1. Особливості класифікації комунікаційних засобів кіберфізичних систем	10
1.2. Особливості застосування комунікаційних інтерфейсів у кіберфізичних системах	12
1.3. Базові структурні рішення комунікаційних підсистем КФС	33
1.4. Фізична модель одиночного інформаційного вимірювально-керувального вузла.	40
1.5. Фізична модель мережі інформаційних вимірювально-керувальних вузлів в режимі “клієнт-сервер”.	42
Висновки до розділу 1	50
Література	51
<b>РОЗДІЛ 2. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗБОРУ ДАНИХ У АВТОНОМНИХ МОБІЛЬНИХ КФС НА ОСНОВІ ПРИНЦИПІВ САМООРГАНІЗАЦІЇ ТА КОНЦЕПЦІЇ СТРУКТУРНОЇ АДАПТАЦІЇ</b>	52
2.1. Використання інтелектуальних технологій збору даних у автономних кіберфізичних системах	52
2.1.1. Проблема використання інтелектуальних технологій збору даних у автономних КФС	52
2.1.2. Поняття інтелектуальної технології збору даних	53
2.1.3. Інтелектуальні технології збору даних на основі принципів самоорганізації	54
2.1.4. Основні завдання дослідження та розробки нових інтелектуальних технологій збору даних	56
2.1.5. Класифікація наукових та науково-технічних завдань дослідження та розробки нових інтелектуальних технологій збору даних	56
2.2. Організація адаптивних процесів збору інформації у мобільних кіберфізичних системах	58
2.2.1. Проблема збору інформації у мобільних кіберфізичних системах	58
2.2.2. Узагальнена модель організації адаптивних процесів збору інформації	60
2.2.3. Структурна адаптація процесів збору інформації	62
2.3. Методи організації та координації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів у мобільних кіберфізичних системах	65
2.3.1. Аналіз проблеми розробки методів організації та координації адаптивних ВО-процесів	65
2.3.2. Моделі організації адаптивних ВО-процесів	66
2.3.3. Механізм координації спільних узгоджених дій адаптивних	

ВО-процесів.	68
2.3.4. Алгоритм управління адаптивним ВО-процесом на основі концепції структурної адаптації	70
Висновки до розділу 2	72
Література	74
<b>РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДИСТАНЦІЙНОГО КАЛІБРУВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ</b>	77
3.1. Обґрунтування принципів, нових методів і засобів реалізації багатоканальної інформаційно-вимірювальної системи для побудови кіберфізичних систем підвищеної метрологічної надійності	78
3.1.1. Аналітичний огляд існуючих методів та засобів підвищення метрологічної надійності вимірювальних каналів КФС	79
3.1.2. Вибір методу корекції адитивної складової похибки	80
3.1.3. Підвищення метрологічної надійності засобів вимірювання напруги в робочих умовах експлуатації КФС	82
3.1.4. Висновки щодо шляхів підвищення метрологічної надійності засобів вимірювання напруги в робочих умовах експлуатації КФС	87
3.2. Розроблення структур калібраторів напруги з автоматичним коригуванням похибок	87
3.2.1. Вибір структури переносних кодо-керованих калібраторів напруги та опору	87
3.2.2. Структура калібратора напруги з автоматичним коригуванням похибок	89
3.2.3. Результати експериментальної перевірки запропонованого методу віддаленого коригування похибок	89
3.2.4. Висновки щодо автоматичного коригування похибок кодо-керованих мір	90
3.3. Аналіз метрологічних властивостей та алгоритмів роботи калібраторів напруги та опору системного призначення для використання на місці експлуатації	91
3.3.1. Аналіз структур засобів оперативного контролю метрологічних характеристик вимірювальних каналів КФС	91
3.3.2. Аналіз частотних властивостей калібраторів напруги	92
3.3.3. Аналіз частотних властивостей імітаторів активного опору	93
3.4. Створення концепції сучасної вимірювально-інформаційної системи з апаратно-програмним коригуванням похибок на місці експлуатації та захищеним її передаванням між ієрархічними рівнями КФС	95
3.4.1. Особливості коригування похибок в кіберфізичних системах	96
3.4.2. Структура засобів дистанційного калібрування вимірювальних каналів	97
3.4.3. Перспективи практичного використання дистанційного	

калібрування вимірювальних каналів	99
3.4.4. Висновки щодо дистанційного калібрування вимірювальних каналів КФС	100
3.5. Розроблення багатоканальних інформаційно-вимірювальних систем для індивідуального обліку спожитого тепла в реальному масштабі часу та засобів їх калібрування на місці експлуатації	100
3.5.1. Особливості практичної реалізації засобів вимірювання електричних сигналів в системах контролю споживання енергоносіїв	100
3.5.2. Встановлення вимог до метрологічних параметрів цифрових вимірювачів температури	102
3.5.3. Результати експериментальних досліджень діодних сенсорів	103
3.5.4. Структура вдосконалених цифрових вимірювачів температури	107
3.5.5. Структура вдосконалених цифрових вимірювачів різниці температур	109
3.5.6. Висновки щодо засобів калібрування цифрових термометричних приладів на місці експлуатації	111
3.6. Багатоканальні спеціалізовані інформаційно-вимірювальні системи для фізико-хімічних вимірювань	112
3.6.1. Аналіз сучасних тенденцій розвитку фізико-хімічних вимірювань	112
3.6.2. Аналіз сучасних шляхів побудови кодо-керованих мір імпедансу	115
3.6.3. Розроблена структура кодо-керованої міри імітансу	115
3.6.4. Результати експериментальних досліджень кодо-керованих мір імітансу	118
3.6.5. Висновки підрозділу 3.6	120
Література	121
<b>РОЗДІЛ 4. ОРГАНІЗАЦІЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ</b>	
<b>АВТОНОМНИХ МОБІЛЬНИХ КФС НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ</b>	
<b>БАГАТОАГЕНТНИХ СИСТЕМ</b>	127
4.1. Організація переміщення автономних мобільних вимірювально-обчислювальних вузлів КФС	127
4.1.1. Аналіз способів організації переміщення автономних вузлів мобільної КФС	127
4.1.2. Узагальнена схема організації переміщення автономного вузла мобільної КФС	129
4.1.3. Операційна схема переміщення автономного вузла мобільної КФС	137
4.1.4. Моделювання способів організації переміщення автономних вузлів мобільної КФС	139
4.1.5. Використання моделей організації переміщення автономних вузлів мобільної КФС	140
4.2. Колективна поведінка автономних вузлів мобільної КФС в	

задачах рівномірного розподілу обмеженої території	141
4.2.1. Задача формування індивідуальних зон відповідальності колективом автономних вузлів мобільної КФС	141
4.2.2. Методи незалежного та узгодженого розподілу обмеженої території	143
4.2.3. Розподіл обмеженої території на основі ігрових методів координації багато-агентних систем	146
4.2.4. Розв'язок задачі рівномірного розподілу ділянки сферичної поверхні колективом автономних вузлів мобільної КФС	152
4.3. Колективна поведінка автономних вузлів мобільної КФС в задачі рівномірного оточення зони збурень	161
4.3.1. Задача рівномірного оточення зони збурень колективом автономних вузлів мобільної КФС	161
4.3.2. Алгоритми пошуку границі зони збурень колективом автономних вузлів мобільної КФС	163
4.3.3. Алгоритми руху автономних вузлів мобільної КФС вздовж границі зони збурень	164
4.3.4. Рівномірний розподіл автономних вузлів мобільної КФС вздовж границі зони збурень	165
4.3.5. Алгоритм просторової організації агентів з локальною передачею інформації	168
Висновки до розділу 4	171
Література	173

## ПЕРЕДМОВА

Монографія присвячена технологіям збору даних у кіберфізичних системах. Під кіберфізичною системою (КФС) розуміють поєднання процесів фізичного світу та кібернетичних засобів, які організують виконання вимірювань чи спостереження за цими процесами, збір та передачу даних, опрацювання даних, їх захищене зберігання та обмін, прийняття рішень, організацію та здійснення впливів на ці процеси. Ідея, покладена в основу концепції кіберфізичних систем, полягає у спробі кардинально розширити можливості людини щодо взаємодії з фізичними процесами оточуючого світу за посередництвом кібернетичних засобів. Масштаби проектування та застосування КФС в останній час швидко зростають. Вирішальними чинниками, які обумовлюють цей процес, є розвиток комп'ютерних та комунікаційних технологій, в тому числі перехід до моделей мобільних обчислень, в яких окремі компоненти КФС можуть переміщуватись у фізичному просторі. При цьому важливим є збільшення автономності КФС за рахунок передачі їм суттєвої частини повноважень у прийнятті рішень як в області практичних задач, які розв'язують ці КФС, так і в області оптимізації та забезпечення надійності роботи самих КФС. Для розв'язку цих задач широко застосовуються методи штучного інтелекту, в тому числі методи машинного навчання, технології багатоагентних систем, принципи адаптації та самоорганізації. Особливо актуальним є застосування цих методів при дослідженні та проектуванні засобів збору даних в КФС, в роботі яких завжди присутні фактори невизначеності щодо динаміки фізичних процесів, за якими ведеться спостереження, та непередбачуваних змін у оточенні КФС.

Монографія «Кіберфізичні системи: технології збору даних» присвячена питанням дослідження, організації функціонування та проектування кібернетичних засобів збору даних у складі КФС. В монографії розглянуто способи побудови ефективних комунікаційних засобів для отримання інформації від сенсорних підсистем КФС, запропоновано технології збору даних в автономних мобільних кіберфізичних системах на основі принципів самоорганізації та концепції структурної адаптації, а також організації їх функціонування на основі технології багатоагентних систем, запропоновано методи та засоби дистанційного калібрування вимірювальних каналів КФС. В ній розкрито поняття інтелектуальних технологій збору даних, під якими розуміються такі технології збору даних, які дозволяють адаптувати вимірювально-обчислювальні процеси до збурень у оточенні КФС, недетермінованих змін об'єкту дослідження або управління, змін у роботі самої КФС та змін цілей дослідження чи управління з боку вищих рівнів багаторівневої базової платформи КФС. Розглянуто один з найбільш перспективних напрямків вирішення проблеми дослідження та розроблення інтелектуальних технологій збору даних, який ґрунтується на ідеї самоорганізації колективу автономних вимірювальних агентів (вимірювально-обчислювальних вузлів КФС), як процесу взаємодоповнення та

впорядковуючого об'єднання агентів у єдиний колектив, функціональні можливості якого вищі за просту суму можливостей окремих агентів, та який здатний адаптуватись до змін і впливів зовнішнього середовища шляхом зміни своєї структури, функцій та параметрів.

Книга складається з чотирьох розділів. Короткий зміст кожного розділу такий.

В першому розділі розглянуті особливості класифікації комунікаційних засобів кіберфізичних систем. Наведені характеристики комунікаційних інтерфейсів для КФС. Запропоновано базові структурні рішення комунікаційних підсистем КФС. Наведені результати досліджень фізичної моделі одиночного інформаційного вимірювально-керувального вузла як базового елемента структури КФС, та фізичної моделі мережі таких вузлів в режимі "клієнт-сервер".

В другому розділі розглянуто проблему використання інтелектуальних технологій збору даних у автономних кіберфізичних системах. Зокрема проаналізовано проблему використання інтелектуальних технологій збору даних у автономних КФС, розглянуто інтелектуальні технології збору даних на основі концепції самоорганізації, наведено основні завдання дослідження та розробки нових інтелектуальних технологій збору даних, наведено класифікацію наукових та науково-технічних завдань дослідження та розробки нових інтелектуальних технологій збору даних. В цьому розділі також розглянуто проблему організації адаптивних процесів збору інформації у мобільних КФС та проблему розробки методів організації та координації адаптивних вимірювально-обчислювальних процесів у мобільних КФС.

В третьому розділі обґрунтовано вибір принципів, нових методів і засобів реалізації багатоканальної інформаційно-вимірювальної системи для побудови кіберфізичних систем підвищеної метрологічної надійності в робочих умовах експлуатації та з автоматичним коригуванням похибок. Запропоновано проводити оперативне метрологічне контролювання вимірювальних каналів КФС на основі використання портативних кодированих мір. Розроблено структури, проаналізовано метрологічні властивості та алгоритми роботи калібраторів напруги та опору системного призначення для використання на місці експлуатації. Виготовлено та експериментально перевірено структури переносних калібраторів напруги з автоматичним коригуванням похибок.

Створено концепцію сучасної вимірювально-інформаційної системи з апаратно-програмним коригуванням похибок на місці експлуатації та захищеним її передаванням між ієрархічними рівнями КФС. Розроблено структуру багатоканальних інформаційно-вимірювальних систем для індивідуального обліку спожитого тепла в реальному масштабі часу та засобів їх калібрування на місці експлуатації та експериментально перевірено метрологічні властивості її основних складових елементів.

Для забезпечення єдності фізико-хімічних вимірювань розроблена концепція їх оперативного метрологічного підтвердження на основі використання експериментально встановлюваних відповідностей між традиційними фізико-хімічними та електричними властивостями об'єктів



неелектричної природи. Розроблено, проаналізовано похибки та експериментально перевірено структури кодированих мір імітансу для оперативного контролювання багатоканальних спеціалізованих інформаційно-вимірювальних систем для фізико-хімічних вимірювань.

В четвертому розділі розглянуто проблему організації переміщення автономних мобільних вимірювально-обчислювальних вузлів КФС. Зокрема проаналізовано способи організації переміщення автономних вузлів мобільної КФС та запропоновано узагальнену схему організації переміщення автономного вузла мобільної КФС. Також в цьому розділі розглянуто колективну поведінку автономних вузлів мобільної КФС в задачах рівномірного розподілу обмеженої території та колективну поведінку автономних вузлів мобільної КФС в задачі рівномірного оточення зони збурень.

Наукові результати, викладені в цій монографії, отримані в межах наукового проекту “Інтеграція методів і засобів вимірювання, автоматизації, опрацювання та захисту інформації в базисі кіберфізичних систем”, номер державної реєстрації 0115U000446, виконаного на замовлення Міністерства освіти і науки України в Національному університеті “Львівська політехніка” протягом 2015-2017 років, наукові дослідження за яким я очолював як науковий керівник.

Маю надію, що запропоновані у монографії технології збору даних в кіберфізичних системах будуть корисними для фахівців у галузі комп'ютерних та інформаційних технологій, а також аспірантам та студентам спеціальностей “Комп'ютерна інженерія”, “Комп'ютерні науки”, “Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка”.

Науковий редактор, д.т.н., професор Анатолій Мельник

Наукове видання

**За редакцією професора А. О. Мельника**

**О.Ю. Бочкарьов, В.А. Голембо,  
Я.С. Парамуд, В.О. Яцук**

**“Кіберфізичні системи:  
технології збору даних”**

МОНОГРАФІЯ

Редактор Н.В. Гузинець.

Формат 60×84/16. Умовн.друк.арк. 10,23

Гарнітура Таймс Нью Роман

ПП “Магнолія 2006”

м. Львів-53, 79053, Україна, тел.+380503701957

e-mail: magnol06@ukr.net

Свідоцтво про внесення суб’єкта видавничої справи  
до Державного реєстру видавців, виготівників і  
розповсюджувачів  
видавничої продукції: серія ДК №2534 від 21.06.2006 року,  
видане Державним комітетом інформаційної політики,  
телебачення та радіомовлення України

Надруковано у друкарні видавництва “Магнолія 2006”