

## КІБЕРФІЗИЧНІ СИСТЕМИ: ПРОБЛЕМИ СТВОРЕННЯ ТА НАПРЯМИ РОЗВИТКУ

© Мельник А. О., 2014

**Розглянуто проблеми створення та напрями розвитку кіберфізичних систем відповідно до досягнень та сучасних концепцій застосування комп'ютерних, інформаційних та телекомунікаційних технологій.**

**Ключові слова:** кіберфізичні системи, кібернетичні засоби, фізичне середовище.

## CYBER-PHYSICAL SYSTEMS: THE PROBLEMS OF CREATION AND DIRECTIONS OF DEVELOPMENT

© Melnyk A., 2014

**The problems of cyber-physical systems creation and directions of their development are considered in a paper in accordance to the achievements and today conceptions in application of computer, information and telecommunication technologies.**

**Key words:** cyber-physical systems, cybernetic tools, physical environment.

### Вступ

Упродовж останніх кількох років спостерігається підвищена активність в сфері створення кіберфізичних систем (КФС). Під кіберфізичною системою розуміють поєднання фізичних процесів та кібернетичних компонентів [1–3], які забезпечують організацію вимірювально-обчислювальних процесів, захищене зберігання та обмін вимірювальною і службовою інформацією, організацію та здійснення впливів на фізичні процеси. Об'єднання цих компонентів у межах єдиної системи дає змогу отримувати якісно нові результати, які можна використовувати для створення широкого спектра принципово нових наукових, технічних та сервісних засобів.

Розвиток та застосування концепції кіберфізичних систем можна порівняти за масштабом та впливом з ефектом від створення мережі Інтернет (як об'єднання локальних комп'ютерних мереж та різних за призначенням обчислювальних і мережевих пристроїв). Спираючись на концепцію кіберфізичних систем, провідні наукові установи та групи в усьому світі спрямовують свої зусилля на пошук нових напрямів розвитку інформаційно-обчислювальних технологій об'єднанням та інтегруванням різних за призначенням підсистем у єдину децентралізовану та гнучку систему. Сьогодні ця проблематика набула особливої актуальності з огляду на значне збільшення можливостей щодо практичної реалізації вимірювальних, обчислювальних та комунікаційних компонентів таких систем на основі сучасних технологічних досягнень у виготовленні інтегральних схем та засобів бездротового зв'язку. Центральне місце серед цих пошуків займають проекти систем, в яких передбачено взаємодію кібернетичних засобів (вимірювально-обчислювальних, комунікаційних, керуючих, виконавчих) з фізичними процесами навколишнього світу. У 2012 р. наукові дослідження у сфері кіберфізичних систем було визначено одним з ключових напрямів наукових досліджень Національного наукового фонду (National Science Foundation) США.

До попередників цього напрямку можна зарахувати концепцію SmartDust (бездротової мережі сенсорних, обчислювальних та виконавчих вузлів) [4], що запропонували науковці Університету Каліфорнії (Берклі) та підтримало Агентство передових оборонних дослідницьких проектів США

(DARPA). Також треба відзначити концепцію повсюдних обчислень (ubiquitous computing) [5] та концепцію оточуючого інтелекту (ambient intelligence) [6], спрямовану на дослідження проблем організації великої кількості автономних вбудованих вимірювально-обчислювальних вузлів. Подальший розвиток цих робіт призвів до виникнення концепції “Інтернету речей” (Internet of Things) [7], яка передбачає наявність фізичних об’єктів у глобальній мережі.

### Стан проблеми

Попри високу актуальність наукових досліджень, багато проблем створення КФС залишаються невирішеними. Зокрема, недостатнім є теоретичне обґрунтування принципів побудови КФС, відкритими залишаються питання функціональної повноти, синергетичного ефекту від об’єднання різних компонентів у систему та багато інших. Підходи до побудови кіберфізичних систем ґрунтуються на аналізі особливостей взаємодії фізичних процесів навколишнього світу з кібернетичними засобами (вимірювально-обчислювальними, комунікаційними, керуючими та виконавчими). До таких особливостей, зокрема, можна зарахувати швидкість перебігу фізичних процесів (порівняно з обчислювальними та комунікаційними можливостями кібернетичних засобів), тип фізичних процесів (лінійні, нелінійні, синергетичні), наявні можливості визначати стан фізичного процесу (повнота інформації, точність), наявні можливості впливати на зміну станів фізичного процесу тощо. Універсальний теоретичний опис та відповідні теоретичні рішення, які б дозволяли переходити від аналізу цих особливостей до синтезу кіберфізичних систем, поки що відсутні [3].

### Постановка задачі

Розглянути основні складові кіберфізичної системи та напрацювання в цій галузі, а також проблеми створення та напрями розвитку кіберфізичних систем відповідно до сучасних досягнень та концепцій комп’ютерних, інформаційних та комунікаційних технологій.

#### 1. Складові кіберфізичної системи та напрацювання в їх створенні

Узагальнену структуру кіберфізичної системи наведено на рис. 1. КФС містить мережу інтелектуальних вимірювально-обчислювальних вузлів, об’єднаних комунікативним середовищем та підтриманих високопродуктивними обчислювальними засобами та засобами захисту інформації, підключених до центрів збору та опрацювання інформації.

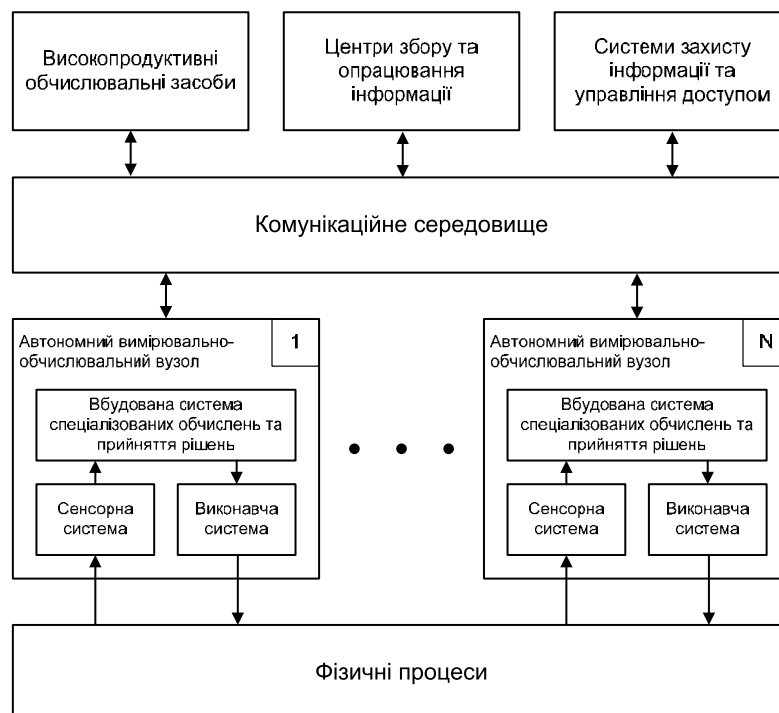


Рис. 1. Узагальнена структура кіберфізичної системи

Розглянемо далі складові кіберфізичної системи та наші напрацювання попередніх років у межах концепції КФС.

**Вбудовані системи.** Інтеграція фізичних процесів та обчислень не є чимось новим. Для опису таких систем давно використовують термін “вбудовані системи”. Серед успішних їх застосувань – системи зв’язку, домашня автоматика, озброєння, повітряний та наземний транспорт тощо. До перших розробок цього напрямку належать створені нами вбудовані процесори та комп’ютерні системи [8–16], впроваджені в технічних комплексах як цивільного, так і військового призначення. Зокрема, це розроблення та впровадження низки процесорів спектрального аналізу радіолокаційних сигналів, розробка та впровадження ряду програмованих процесорів цифрового опрацювання сигналів, створення широкого спектра спеціалізованих процесорів багатовимірного спектрального аналізу сигналів та зображень [13], шифрування та кодування інформації [14] тощо. Спектр розв’язуваних задач є надзвичайно широким. Зокрема, в частині опрацювання зображень ми розв’язували задачі виділення та ідентифікації рухомих об’єктів в полі зору відеокамери, визначення координат візуального об’єкта у просторі, побудови тривимірних моделей об’єктів та інші [15, 16].

Ядром вбудованої системи є універсальний процесор з набором з’єднаних з ним спеціалізованих процесорів. Зважаючи на велику кількість спеціалізованих процесорів, необхідних для використання у вбудованих системах, ми створили сучасні засоби їх автоматичного синтезу. Насамперед потрібно згадати систему Хамелеон, призначену для автоматичного синтезу спеціалізованих процесорів з мови високого рівня [17]. Вона дає змогу в сотні разів скоротити кількість людино-годин, необхідних для проектування і тестування спеціалізованих процесорів порівняно з розробленням традиційними засобами на рівні міжрегістрових передач. Під час побудови системи “Хамелеон” вперше розв’язано наукові задачі, зокрема удосконалено метод подання алгоритму графом для візуалізації та верифікації алгоритмів; розроблено новий метод запису алгоритму на рівні зв’язків між окремими операціями або блоками операцій, який зберігає паралельну структуру алгоритму; запропоновано метод визначення незалежних операцій або блоків операцій із тексту програми та збереження їх паралельної структури; удосконалено метод проектування алгоритмічних операційних пристроїв. На цій основі розроблено програмні засоби опрацювання структури алгоритмів, автоматичної побудови потокових графів алгоритмів та їх структурних матриць [18].

**Сенсорні мережі.** Бездротові сенсорні мережі є одним з попередників та ключовим елементом, що вплинув на формування концепції кіберфізичних систем. Роботи зі створення сенсорних мереж ми виконували, реалізуючи низку наукових проектів, метою яких було розроблення нових принципів побудови вимірювально-обчислювальних мереж на основі інтелектуальних агентів та створення системи розподілених контактних вимірювань на основі автономних мобільних інтелектуальних агентів [19, 29]. Рішення, отримані в результаті виконання цих проектів, дають змогу будувати автономні розподілені вимірювально-обчислювальні системи, що здатні самостійно приймати рішення щодо оптимізації процесів збору та попереднього опрацювання вимірювальної інформації.

**Комунікаційні мережі.** Ще одним ключовим елементом, що вплинув на формування концепції кіберфізичних систем, є сучасні засоби телекомунікацій. Сьогодні ці засоби забезпечують взаємодію компонентів системи практично довільного розміщення з використанням як дротового, так і бездротового зв’язку. Ми набули досвід проектування та синтезу просторових засобів телекомунікацій в межах створення системи попередження про природні катаклізми [21] та системи цифрового оперативно-технологічного зв’язку [22]. Зокрема, система цифрового оперативно-

технологічного зв'язку (ЦОТЗ) призначена для побудови мережі оперативно-технологічного зв'язку (ОТЗ) залізничного транспорту в цифрових і цифро-аналогових мережах, організованих по волоконно-оптичних лініях і кабельних лініях з мідними жилами. Система ЦОТЗ забезпечує можливість узгодженого з'єднання з фізичними ланцюгами і стандартними телефонними каналами систем передавання наявної аналогової мережі ОТЗ та використовується на розпорядній чи виконавчій станції відділкового оперативно-технологічного зв'язку, а також для організації станційного зв'язку. Система забезпечує можливість організації групових каналів вибіркового зв'язку, а також можливість організації каналів передачі даних, зокрема даних АСКОЕ, зв'язку нарад і радіозв'язку у поїздах. Система ЦОТЗ працює за асинхронним пакетним принципом передавання інформації, що забезпечує стійкість до навмисного пошкодження. Вихід з ладу будь-якого вузла або лінії зв'язку не приводить до виходу з ладу системи загалом.

**Інтелектуальні самоорганізовані системи.** В 2000 р. ми розпочали роботи зі створення багатоагентних систем як основи інтелектуальних систем збору інформації [23, 24]. У ході цих робіт розроблено методи структурної та функціональної адаптації автономних децентралізованих вимірювально-обчислювальних систем на основі принципів самоорганізації та самонавчання, функціонально повний набір базових алгоритмів колективної поведінки та універсальні нарощувані архітектури інтелектуальних агентів на їх основі. Створено моделі колективів штучних інтелектуальних агентів-дослідників, здатних самостійно генерувати нові дослідницькі задачі та знаходити способи їх розв'язання за рахунок спільних узгоджених дій.

**Засоби криптографічного захисту інформації.** Засоби криптографічного захисту інформації є важливою складовою кіберфізичних систем. До цих засобів належать створені нами процесори криптографічного захисту інформації, методи і засоби побудови пристроїв для формування цифрового підпису, методи та програми для побудови криптографічних систем з відкритим ключем, протоколи захисту даних симетричними блоковими шифрами в локальних комп'ютерних мережах, засоби визначення стійкості до вторгнень, виявлення атак і доступу до інформації [14, 25, 26].

**Високопродуктивні комп'ютерні системи.** Для побудови комп'ютерних систем високої продуктивності, необхідних для виконання складних алгоритмів опрацювання даних, розроблено теоретичні основи проектування паралельних спеціалізованих процесорів та паралельної пам'яті комп'ютера, а також основи організації багатопроекторних комп'ютерних систем на основі паралельної пам'яті [27–29]. Розгорнуто роботи зі створення самоконфігурованих комп'ютерних систем, які підтримані європейською науковою програмою Network for Sustainable Ultrascale Computing (NESUS), яка виконується у межах Європейської програми кооперації в науці та технологіях COST – European Cooperation in Science and Technology [30, 31].

### **Проблеми створення кіберфізичних систем**

До основних проблем створення КФС можна зарахувати такі:

- Забезпечення ефективного поєднання множини різнотипних компонентів у кіберфізичній системі. Для вирішення цієї проблеми потрібно дослідити різні підходи до побудови та організації роботи КФС та організувати пошук оптимальних рішень.
- Забезпечення ефективної взаємодії кібернетичних засобів з фізичним середовищем. Для вирішення цієї проблеми необхідно забезпечити адаптацію кібернетичних засобів до синергетичних процесів, які проходять в фізичному середовищі.
- Забезпечення ефективного поєднання централізованих та децентралізованих способів управління функціонуванням кібернетичних засобів з акцентом на впровадження принципів самоконфігурування та самоорганізації.

- Забезпечення такої швидкості прийняття рішень кібернетичними засобами, яка дозволяє досягти потрібної якості функціонування КФС.
- Забезпечення поділу КФС на незалежні ієрархічні рівні та розроблення принципів взаємодії між рівнями, що дозволить спростити структурну організацію КФС та принципи її побудови.
- Забезпечення розпізнавання та ефективного захищеного функціонування компонентів та КФС загалом.

### Апаратно-програмна платформа для створення прикладних кіберфізичних систем

Як перший крок у напрямі створення кіберфізичних систем, спираючись на результати наукових досліджень попередніх років, пропонуємо підхід, відповідно до якого предметом досліджень є принципи побудови універсальної апаратно-програмної платформи для створення прикладних кіберфізичних систем. Об'єктом дослідження є кіберфізична система як узагальнена об'єднувальна модель вимірювально-обчислювальних технологій, технологій комп'ютеризованого управління та прийняття рішень, комунікаційних технологій та технологій захисту інформації. Загальна фундаментальна проблема, яка розглядається у межах цього підходу, полягає у пошуку шляхів поєднання вимірювально-обчислювальних процесів та процесів управління з фізичними процесами різної природи для отримання нових можливостей під час планування та виконання комплексних задач з дослідження та управління фізичними процесами.

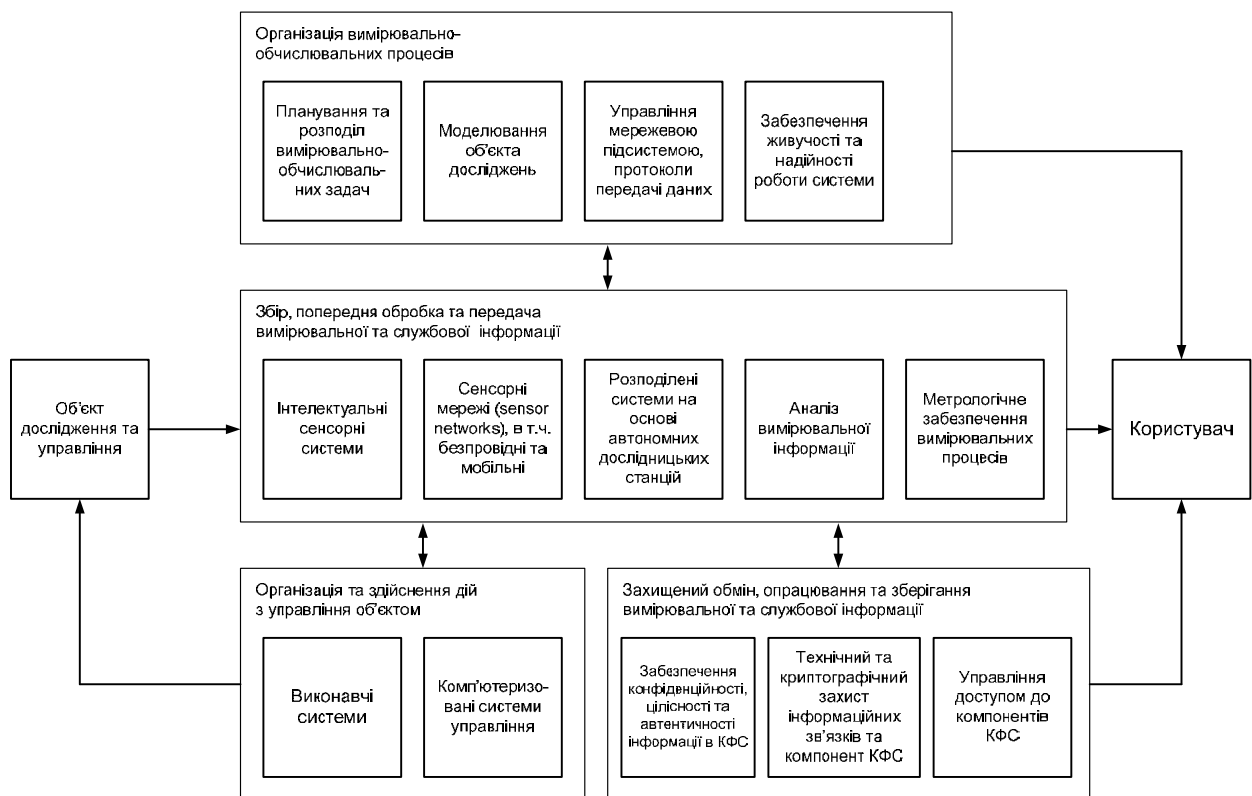


Рис. 2. Універсальна платформа для побудови прикладних кіберфізичних систем

В основу запропонованого підходу покладено розроблення теоретичних принципів побудови прикладних кіберфізичних систем та принципів їх функціонування і практичної реалізації у вигляді універсальної, масштабованої, гнучкої та нарощуваної апаратно-програмної платформи, у складі якої організується захищена взаємодія вимірювально-обчислювальних, керуючих, комунікаційних та виконавчих компонентів (рис. 2). Забезпечення функціональної повноти різних за призначенням

компонентів апаратно-програмної платформи та досягнення синергетичного ефекту від їх об'єднання дасть змогу вивести процеси дослідження та управління фізичними процесами (навколишнє середовище, технологічні процеси, об'єкти наукових досліджень тощо) на новий якісний рівень. Забезпечення масштабованості, гнучкості та здатності до нарощуваності відкриє широкі можливості застосування апаратно-програмної платформи як основи для створення інтелектуальних автономних захищених вимірювально-обчислювальних систем та мереж широкого спектра застосування. У межах цього підходу передбачається також розроблення та реалізація основних компонентів апаратно-програмної платформи з урахуванням їх подальшого об'єднання з іншими компонентами у єдину систему.

### **Напрями досліджень кіберфізичних систем та очікувані наукові результати**

У межах запропонованого підходу можна виділити основні завдання, які полягають у дослідженні та розробленні:

- нових способів об'єднання та організації захищеної взаємодії компонентів КФС для забезпечення високої ефективності планування та виконання комплексних задач з дослідження та управління цільовими об'єктами, зокрема дослідження способів забезпечення масштабованості, гнучкості, нарощуваності та реконфігурації;
- принципів збору, попереднього опрацювання та передавання вимірювальної інформації, зокрема дослідження принципів побудови інтелектуальних сенсорних систем, систем комп'ютерного зору для отримання тривимірних координат, сенсорних мереж, розподілених систем на основі автономних дослідницьких станцій, засобів аналізу та метрологічного забезпечення вимірювальних процесів;
- принципів організації вимірювально-обчислювальних процесів, зокрема принципів планування та розподілу вимірювально-обчислювальних задач, структурної адаптації, децентралізованого управління та самоорганізації автономних вимірювально-обчислювальних вузлів; технологій і засобів моделювання і високорівневого проектування відповідних реконфігурованих комп'ютерних засобів;
- принципів організації та здійснення дій з управління цільовим об'єктом, зокрема проектування систем управління, пристроїв автоматики та обчислювальної техніки, зокрема створення нових математичних моделей і алгоритмів перетворень та компресії інформативних, багатовимірних, неперіодичних сигналів;
- принципів захищеного обміну, опрацювання та зберігання вимірювальної та службової інформації, зокрема способів забезпечення конфіденційності, цілісності та автентичності інформації, технічного та криптографічного захисту інформаційних зв'язків між компонентами КФС та управління доступом до них, розроблення методологічних засад інформаційної та функціональної безпеки.

Результатом досліджень стануть нові наукові знання з побудови КФС, зокрема:

- Нові методи організації вимірювально-обчислювальних процесів на основі принципів самоорганізації та адаптації у межах розроблених та досліджених моделей об'єднання та організації взаємодії вимірювальних, обчислювальних та виконавчих компонентів КФС.
- Нові принципи планування та розподілу задач, структурної адаптації процесів, децентралізованого управління та самоорганізації автономних вимірювально-обчислювальних вузлів; нові технології та засоби моделювання і високорівневого проектування відповідних реконфігурованих комп'ютерних засобів.
- Нові методи синтезу нейронних контролерів для керування процесами в нелінійних об'єктах, або в об'єктах, математичні моделі яких є надто складними, а також для тих випадків, коли інформація про об'єкт керування є неповною.

- Методика досліджень та метрологічні характеристики пристроїв автоматизованого вимірювання активних та пасивних фізичних величин, процесу контролювання параметрів інтелектуальних засобів вимірювань та їх метрологічного забезпечення.
- Принципи структурної організації прецизійних вимірювачів електричних та неелектричних величин, які використовуються під час сертифікаційних випробувань певного виду продукції та проекти нормативних документів щодо конструкцій та методів випробувань засобів метрологічного забезпечення вимірювального обладнання КФС.
- Аналітичні моделі сенсорів тривимірного сканера, методика розрахунку і розрахунки параметрів його компонентів.
- Методи корекції систематичних складових похибки АЦП, методи підвищення їх розрядності та завадостійкості за рахунок використання багаторозрядних та багатоконтурних структур з нелінійними і керованими елементами у колах прямого та/або зворотного поширення сигналу.
- Нові методи побудови елементів великого мультиплікативного порядку в скінченних полях, які використовують у криптографії та завадостійкому кодуванні.
- Нові методи та засоби захисту інформації в КФС, теорія розроблення підсистем захисту інформації в КФС, методи ефективного управління захистом інформації і методи оцінки захищеності інформації в таких системах.

Створені основи побудови базової платформи прикладних КФС, нові способи об'єднання та організації взаємодії вимірювальних, обчислювальних та виконавчих компонентів у складі КФС забезпечать високу ефективність планування та виконання комплексних завдань з дослідження та управління цільовими об'єктами, які неможливо вирішити відомими сьогодні засобами. Отримані результати будуть покладені в основу створення перспективних КФС наступних поколінь. Їх можна буде використовувати для побудови КФС довільного, зокрема промислового і військового, застосування.

### Висновки

Розглянуто проблеми створення та напрями розвитку кіберфізичних систем відповідно до досягнень та сучасних концепцій застосування комп'ютерних, інформаційних та телекомунікаційних технологій. Описані складові кіберфізичної системи та напрацювання в їх створенні. Сформовано проблеми побудови кіберфізичних систем та запропоновано принципи побудови апаратно-програмної платформи для створення прикладних кіберфізичних систем. Розглянуто напрями досліджень кіберфізичних систем та очікувані наукові результати.

1. Edward Lee, *Cyber Physical Systems: Design Challenges* // University of California, Berkeley Technical Report No. UCSB/EECS-2008-86, January 23, 2008. 2. Jules White et al. *R&D challenges and solutions for mobile cyber-physical applications and supporting Internet services* // Journal of Internet Services and Applications, Volume 1, Number 1, May 2010. – P. 45–56. 3. Jiafu Wan, Hehua Yan, Hui Suo, Fang Li, *Advances in Cyber-Physical Systems Research* // KSII Transactions On Internet And Information Systems, VOL. 5, NO. 11, November 2011. – P.1891–1908. 4. Mohammad Ilyas, Imad Mahgoub, *Smart Dust: Sensor Network Applications, Architecture, and Design*, CRC Press, 2006. – 352 p. 5. Stefan Poslad, *Ubiquitous Computing: Smart Devices, Environments and Interactions*, Wiley, 2009. – 473 p. 6. *Ambient Intelligence*, Werner Weber et al. (Eds.), Springer, 2005. – 388 p. 7. Hakima Chaouchi. *The Internet of Things: Connecting Objects*, John Wiley & Sons, 2010. – 265 p. 8. Мельник А. А. *Процессоры обработки сигналов*. – Львов, 1989. – 63 с. (Препринт / АН УССР. Ин-т прикл. проблем механики и математики; № 29–89). 9. Мельник А. А. *Проектирование поточного процессора БПФ на специализированных БИС* / Препринт, Львов, 1990. – 43 с. 10. Melnyk A. *DSP System Based on Programmable Processor with Scalable Parametrizable Fast Orthogonal Transforms Hardware Core* //

*Proceedings of the XI Conference "Application of Microprocessors in Automatic Control and Measurement", Volume 1, Warsaw, Poland, 1998, P.87–98.* 11. Мельник А. О. Програмовані процесори обробки сигналів. Видавництво Нац. ун-ту "Львівська політехніка", Львів, 2000. – 65 с. 12. Мельник А. О. Спеціалізовані комп'ютерні системи реального часу. Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", Львів, 1998. – 60 с. 13. *Fast Orthogonal Transformations IP Cores.* [www.intron-innovations.com](http://www.intron-innovations.com). 14. Коркішко Т. А., Мельник А. О., Мельник В. А. Алгоритми та процесори симетричного блокового шифрування. / Львів, БАК, 2003. – 182 с. 15. Moroz I. *Reconstruction of 3-D objects from raster altimeter data // Melnyk A., Emets V., Moroz I. and Marchyuka V. // Proceedings of the VIIth International Conference CADSM 2003 – February 18-22, 2003, Lviv-Slavsko, Ukraine.* 16. Мороз І. Виділення та опис об'єктів за воксельними даними комп'ютерної томографії / Мельник А., Ємець В., Мархивка В., Мороз І. та Акимишин О. // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Комп'ютерні науки та інформаційні технології". – № 604. – 2007. – С. 3–9. 17. Melnyk A. *Automatic generation of ASICs / A. Melnyk, A. Salo // NASA-ISA Conference AHS-2007, Edinburgh, 2007. – P. 96–101.* 18. *The Graphic System for Algorithm Structure Analysis and Processing.* [www.intron-innovations.com](http://www.intron-innovations.com). 19. Мельник А. О., Голембо В. А., Бочкар'єв О. Ю. Нові принципи побудови вимірювально-обчислювальних мереж на основі інтелектуальних агентів // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі". – 2003. – № 492. – С.100–107. 20. Бочкар'єв О. Ю., Голембо В. А. Система розподілених контактних вимірювань на основі автономних мобільних інтелектуальних агентів // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі". – 2001. – № 437. – С.14–20. 21. <http://www.icsroscher.de/CAEM/LNU.htm>. 22. Система цифрового оперативного технологічного зв'язку. [www.intron-innovations.com](http://www.intron-innovations.com). 23. Melnyk A., Golembo V., Bochkaryov A., *Multiagent approach to the distributed autonomous explorations // Proceedings of NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS-2007), Edinburgh, UK, 2007, p. 606-610.* 24. Бочкар'єв О. Ю., Голембо В. А. Самоорганізація автономних розподілених систем в задачах прийняття рішень в умовах невизначеності // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі", № 688, 2010. – С.23–30. 25. *Data Protection IP Cores.* [www.intron-innovations.com](http://www.intron-innovations.com). 26. Мельник А. О., Ємець В. Ф., Попович Р. Сучасна криптографія. Основні поняття. – Львів: БАК, 2003. – 144 с. 27. Мельник А. О., Мельник В. А. Персональні суперкомп'ютери: архітектура, проектування, застосування: монографія. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 516 с. 28. Мельник А. О. Пам'ять із впорядкованим доступом: монографія. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2014. – 296 с. 29. Мельник А. О. *Computer Memory with Parallel Conflict-Free Sorting Network-Based Ordered Data Access// Recent Patents on Computer Science. – 2014. – №7. – P.57–64.* 30. Melnyk A., Melnyk V. *Self-Configurable FPGA-Based Computer Systems. Advances in Electrical and Computer Engineering, volume 13, number 2, 2013, P. 33–38.* 31. Melnyk A., Melnyk V. *Improvement of heterogeneous systems efficiency using self-configurable FPGA-based computing. Proceedings of the First International Workshop on Sustainable Ultrascale Computing Systems (NESUS 2014), Porto, Portugal. – P. 59–64.*