

ІНТЕГРАЦІЯ РІВНІВ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ

© Мельник А. О., 2015

Виокремлено проблеми створення кіберфізичних систем, підходи до їх вирішення та описано базові засади побудови багаторівневої платформи кіберфізичних систем, сформовані відповідно до досягнень та сучасних концепцій застосування комп'ютерних, інформаційних та телекомунікаційних технологій. Подана структура, описано призначення та функції основних компонентів багаторівневої платформи кіберфізичних систем та запропоновано забезпечити взаємодію рівнів кіберфізичної системи через комп'ютерні мережі. Сформовано основні завдання, які постають в процесі інтеграції рівнів кіберфізичної системи та створення протоколів міжрівневої взаємодії.

Ключові слова: кіберфізична система, кібернетичні засоби, збір та доставка даних, опрацювання даних, прийняття рішень, персональний сервіс, інтеграція рівнів.

CYBER-PHYSICAL SYSTEM LAYERS INTEGRATION

© Melnyk A., 2015

The issues of cyber-physical systems creation and approaches to their solving are formed in the article. The base principles of the multilayer platform for Cyber-Physical Systems are formed in accordance with achievements and modern conceptions of computer, information and telecommunication technologies application. The structure of the multilayer platform for Cyber-Physical Systems are offered, its applications and functions are described. Application of the computer networks for Cyber-physical system layers integration is proposed and main challenges of its implementation are outlined.

Key words: cyber-physical systems, cybernetic tools, data acquisition, data processing, decision making, personal service, layers integration.

Вступ

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

Сфера застосування КФС – керування рухом транспортних засобів, медичні, виробничі та військові системи, виробництво, постачання та зберігання електроенергії, контроль доступом, постачання води та тепла, робототехніка тощо.

У КФС поєднуються математичні та інженерні моделі та методи фізики, хімії, біотехнології, механіки та електротехніки з моделями та методами комп'ютерних наук та технологій. На основі цього поєднання формується новий науково-інженерний напрям зі своїми моделями та методами.

Потенційний ефект від створення та застосування кіберфізичних систем можна порівняти за масштабом та впливом з ефектом від створення мережі Інтернет. Деякі наукові колективи вважають, що метою створення КФС є забезпечення суттєвого підвищення рівня взаємодії людини з фізичним світом подібно до того, як Інтернет підвищив рівень взаємодії між людьми [4, 5].

Спираючись на концепцію кіберфізичних систем, провідні наукові установи та групи в усьому світі спрямовують свої зусилля на пошук нових напрямів розвитку комп'ютерних та інформаційно-комунікаційних технологій через об'єднання та інтегрування різних за призначенням підсистем в одній децентралізованій гнучкій системі. Сьогодні ця проблематика набула особливої актуальності з огляду на істотне збільшення можливостей щодо практичної реалізації вимірювальних, обчислювальних та комунікаційних компонентів таких систем, ґрунтуючись на сучасних технологічних досягненнях з виготовлення інтегральних схем та засобів бездротового зв'язку. Наукові дослідження у сфері кіберфізичних систем визначено одним з ключових напрямів Національного наукового фонду США.

Попередниками цього наукового напрямку є вбудовані комп'ютерні системи, бездротові сенсорні мережі, системи дистанційного моніторингу тощо. До попередників цього напрямку слід також зарахувати концепцію SmartDust (бездротової мережі сенсорних, обчислювальних та виконавчих вузлів) [6], яку запропонували науковці Університету Каліфорнії (Берклі) та підтримало Агентство передових оборонних дослідницьких проєктів США (DARPA). Також відзначимо концепцію повсюдних обчислень (ubiquitous computing) [7] та концепцію оточуючого інтелекту (ambient intelligence) [8], які спрямовані на дослідження проблем організації спільної діяльності великої кількості автономних вбудованих обчислювальних вузлів. Подальший розвиток цих робіт призвів до виникнення концепції "Інтернету речей" (Internet of Things) [9], яка передбачає наявність фізичних об'єктів у глобальній комп'ютерній мережі.

1. Стан проблеми

У роботі [10] досліджено проблеми створення кіберфізичних систем та підходи до їх вирішення із застосуванням сучасних досягнень та концепцій комп'ютерних, інформаційних та комунікаційних технологій та запропоновано багаторівневу платформу кіберфізичних систем, яка забезпечує інтеграцію методів і засобів вимірювання, опрацювання, керування та захисту інформації. Разом з тим, незважаючи на високу актуальність наукових досліджень, багато проблем створення КФС залишаються невирішеними. Стержневою є проблема інтеграції гетерогенних компонентів у одній КФС. Питання інтеграції рівнів запропонованої базової платформи кіберфізичних систем висвітлене лише частково.

2. Постановка завдання

Метою цієї роботи є формування та окреслення в загальних рисах основних завдань, які постають в процесі інтеграції та організації взаємодії рівнів запропонованої платформи кіберфізичних систем та в процесі створення протоколів міжрівневої взаємодії.

3. Проблеми створення кіберфізичних систем та підходи до їх вирішення

Ґрунтуючись на результатах попередніх напрацювань та набутому досвіді [11] можна виокремити такі основні проблеми створення КФС:

- забезпечити можливість інтеграції в КФС великої кількості різнотипних компонентів;
- забезпечити отримання за результатом взаємодії кібернетичних засобів з фізичним світом тієї інформації, яку затребує користувач;
- забезпечити високу ефективність функціонування КФС;
- ефективно поєднати методи централізованого і децентралізованого управління функціонуванням кібернетичних засобів КФС;
- забезпечити таку швидкість функціонування кібернетичних засобів, яка дасть змогу досягти потрібної якості функціонування КФС;
- забезпечити накопичення набутих знань у процесі взаємодії кібернетичних засобів з фізичним світом та їх подальше використання у КФС;
- забезпечити розпізнавання компонентів КФС в умовах динамічної зміни її структури;
- забезпечити захищене функціонування КФС.

Сформуємо підходи до вирішення перерахованих вище проблем.

Проблема інтеграції компонентів кібернетичних засобів спричинена їхньою гетерогенністю та великою кількістю. Шлях до вирішення цієї проблеми вже визначений, а основні рішення відпрацьовані, передусім це застосування комп'ютерних та телекомунікаційних мереж, зокрема глобальної комп'ютерної мережі Інтернет, а також всеохопна стандартизація технологій інформаційної взаємодії компонентів кібернетичних засобів КФС.

Складною є також проблема отримання інформації, яку затребували користувачі КФС, сформованої кібернетичними засобами в процесі їх взаємодії з фізичним світом. Цю проблему вирішують введенням до складу кібернетичних засобів необхідних обчислювальних ресурсів, відповідно до призначення КФС, та програмних пакетів, здатних виокремити корисну інформацію з отриманих від фізичного світу потоків даних. Тут варто відзначити можливість застосування технологій опрацювання сигналів та зображень і технологій опрацювання великих даних з їх реалізацією на закріплених комп'ютерних ресурсах, а також доступних як хмарні технології. І навіть більше, для виокремлення та інтерпретації корисної інформації можуть знадобитися технології обчислювального інтелекту, експертних систем та самонавчання.

Вирішення проблеми забезпечення високої ефективності функціонування КФС вбачається в інтелектуалізації процесів збору, пересилання та опрацювання інформації й тісно пов'язане з вирішенням проблеми ефективного поєднання централізованого і децентралізованого керування функціонуванням КФС, з основним акцентом на децентралізацію, а також з упровадженням технологій штучного інтелекту, які містять такі елементи самоорганізації, як самоконфігурування, самоналаштування, самопрогнозування, самопорівняння, самоналагодження, самозахист, самонавчання.

Вирішення проблеми забезпечення потрібної швидкодії функціонування КФС потребує аналізу та підбору відповідних компонентів КФС, як апаратних, так і програмних, зокрема вибору відповідних протоколів інформаційного обміну.

Для накопичення набутих знань та їх подальшого використання необхідно мати в складі КФС засоби архівації великих об'ємів даних, підтримані технологіями експертних систем та самонавчання.

Проблеми розпізнавання компонентів КФС та їх захищеного функціонування вирішують через адаптацію в КФС відповідних технологій комп'ютерних мереж.

4. Багаторівнева платформа кіберфізичних систем

Першим основним завданням створення КФС, в якій будуть вирішені наведені вище проблеми, вважаємо її поділ на незалежні ієрархічні рівні та розроблення принципів взаємодії між засобами її рівнів, що спростить структурну організацію КФС та принципи її побудови.

В основу запропонованого підходу покладено розроблення принципів побудови та функціонування кіберфізичних систем у вигляді багаторівневої, масштабованої, гнучкої та нарощуваної платформи, у складі якої організується захищена взаємодія вимірювальних, обчислювальних, керуючих, комунікаційних та виконавчих компонентів. Досягнення синергетичного ефекту від об'єднання та інтеграції різних за призначенням компонентів цієї платформи 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 платформи як основи для створення широкого спектра КФС. У межах цього підходу передбачається також розроблення та реалізація основних компонентів багаторівневої платформи з урахуванням їх подальшого об'єднання з іншими компонентами в одній системі.

5. Принципи інтеграції рівнів кіберфізичної системи

Запропонована в роботі [10] платформа кіберфізичних систем має п'ять рівнів, на яких послідовно розміщені такі засоби: взаємодії з фізичним світом, збору та доставки інформації, опрацювання інформації, прийняття рішень, персонального сервісу. Взаємодія користувачів з КФС здійснюється через засоби персонального сервісу. Пропонується інтегрувати рівні кіберфізичної системи, використавши комп'ютерні мережі, як показано на рис. 1.

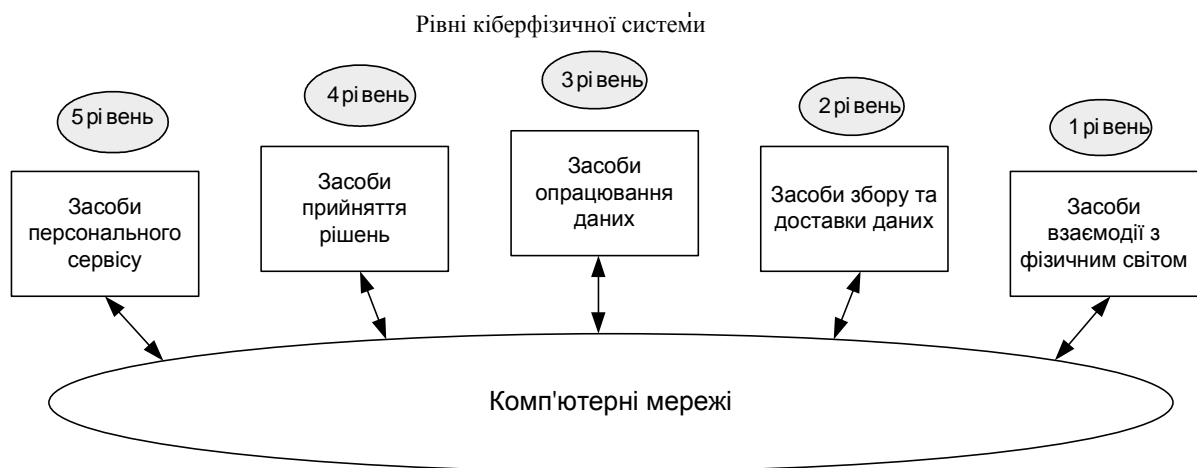


Рис. 1. Інтеграція рівнів КФС

У ролі комп'ютерних мереж можуть бути використані як окремі, так і об'єднані типи мереж, зокрема спеціалізовані та універсальні локальні та глобальні комп'ютерні мережі, а також глобальна комп'ютерна мережа Інтернет. Інтеграція рівнів кіберфізичної системи з використанням комп'ютерних мереж дозволить розробникам апаратно-програмного забезпечення різних рівнів КФС працювати незалежно та уникнути значних проблем через їх об'єднання. Керування взаємодією компонентів рівнів виконуватиметься сервісними апаратно-програмними засобами КФС. Такий підхід дозволить вносити зміни до компонентів будь-якого рівня без необхідності внесення змін до компонентів сусідніх рівнів. Крім цього, протоколи міжрівневої взаємодії та інтерфейси сервісів взаємодії апаратних засобів кожного рівня не будуть залежати від функціональних особливостей застосувань, для яких розробляється кожна конкретна КФС.

Зауважимо, що в створюваних протоколах взаємодії між засобами персонального сервісу і нижніми рівнями КФС потрібно задати:

- параметри та формати даних, які підлягають обміну;
- адреси доставки даних;
- запити та пакети завдань на опрацювання даних;
- адреси відправлення результатів, сформованих відповідно до вимог виконавчого засобу.

Крім того, в створюваних протоколах взаємодії між засобами персонального сервісу і нижніми рівнями КФС потрібно передбачити порядок розпізнавання та отримання належної їм інформації.

Подібно до "Інтернету речей", що є комунікаційною мережею об'єктів, які мають технології для взаємодії між собою та з навколишнім середовищем без втручання людини, тобто автономно, рівні КФС також взаємодіють між собою та з навколишнім середовищем автономно.

Крім взаємодії між компонентами різних рівнів КФС, є також і взаємодія між компонентами всередині кожного з рівнів, і реалізується вона також через комп'ютерні мережі. При цьому потрібно відзначити наявність відмінностей між даними, які пересилаються між компонентами різних рівнів КФС та між компонентами всередині кожного з рівнів. Якщо в першому випадку це результати виконання вирішуваних на певному рівні завдань для засобів іншого рівня, то в другому – це певні часткові завдання і проміжні результати.

Варто також звернути увагу, що дані, які передаються між компонентами рівнів КФС, відрізняються насамперед не форматами, а рівнями абстракції, які характерні для складу засобів КФС цих рівнів і є різними за суттю. Цим багаторівнева КФС відрізняється від моделі OSI, у якій між рівнями передається та сама інформація, але з використанням різних протоколів.

Нижче наведено опис призначення та функцій основних компонентів багаторівневої платформи кіберфізичних систем та сформовано основні завдання, які постають у процесі інтеграції рівнів кіберфізичної системи та під час створення протоколів міжрівневої взаємодії з використанням комп'ютерних мереж, починаючи з верхнього до нижнього рівнів.

5.1. Засоби персонального сервісу

Засоби персонального сервісу забезпечують взаємодію користувачів з КФС та надають їм сервіси відповідно до призначення КФС. До їх складу входять сервери доступу, зокрема мобільні комп'ютерні засоби, зокрема персональні цифрові асистенти з відповідним програмним забезпеченням.

Користувачі взаємодіють з КФС через відповідні інтерфейси користувачів, реалізовані в складі засобів персонального сервісу. Засоби персонального сервісу взаємодіють з іншими рівнями КФС через глобальну комп'ютерну мережу Інтернет та локальні мережі. Крім того, засоби персонального сервісу забезпечують взаємодію між собою і користувачів КФС.

Завданням засобів персонального сервісу стосовно нижніх рівнів КФС є формування для них завдань відповідно до запиту користувачів КФС. Крім того, засоби персонального сервісу отримують від нижніх рівнів КФС результати виконання завдань відповідно до запиту користувачів КФС та подають їх користувачам у зручній для них формі.

Отже, основним завданням організації взаємодії цього рівня з іншими рівнями кіберфізичної системи є такі:

- створення методів, алгоритмів, математичних та програмних моделей взаємодії користувачів з КФС, створення інтерфейсу КФС-користувачі;
- створення методів, алгоритмів, математичних та програмних моделей взаємодії засобів персонального сервісу з іншими рівнями КФС;
- створення засобів двостороннього перетворення сервісних форматів взаємодії з користувачами та з нижніми рівнями КФС.

5.2. Засоби прийняття рішень

Засоби прийняття рішень КФС призначені для формування статистик та прийняття рішень на основі запитів користувачів та результатів опрацювання у реальному часі даних від засобів вимірювання характеристик компонентів фізичного світу та від засобів спостереження за компонентами фізичного світу.

Реалізація КФС на цьому рівні передбачає наявність детальних знань щодо досліджуваного чи керованого об'єкта фізичного світу, що потребує створення експертних систем з елементами самонавчання та інших технологій штучного інтелекту, які допоможуть користувачам прийняти правильне рішення, зокрема бази знань та системи автоматизації логічного виведення як компоненти, необхідні для реалізації механізмів прийняття рішень, для побудови систем, основаних на знаннях.

На цьому рівні формується зворотний зв'язок від кібернетичного простору до фізичного світу з тим, щоб КФС змогла самоорганізуватися та автоматично конфігуруватися і адаптуватися до розв'язуваних задач. Тут можуть застосовуватися коригувальні та профілактичні рішення.

Засоби прийняття рішень взаємодіють з іншими рівнями КФС через глобальну комп'ютерну мережу Інтернет та локальні мережі. Завданням цих засобів є прийняття рішень на основі аналізу даних, які надходять з нижніх рівнів КФС, та на основі завдань, отриманих від першого рівня КФС відповідно до запиту користувачів.

Взаємодія цього рівня з іншими рівнями кіберфізичної системи має ґрунтуватися на принципах, закладених у хмарних технологіях, передусім PaaS та SaaS. Формати даних повинні відповідати вимогам хмарних технологій, і, що особливо важливо, надання хмарного сервісу має відбуватися в автоматичному режимі без участі людини, відповідно до принципів роботи КФС.

Отже, основні завдання організації взаємодії компонентів цього рівня з компонентами інших рівнів кіберфізичної системи такі:

- створення методів, алгоритмів, математичних та програмних моделей взаємодії засобів прийняття рішень з компонентами інших рівнів КФС;
- створення засобів організації автономного (без участі користувачів) надання сервісних функцій прийняття рішень на підставі аналізу даних, які надходять з нижніх рівнів КФС відповідно до запитів цих рівнів КФС, та завдань, отриманих від першого рівня КФС.

5.3. Засоби опрацювання даних

Засоби опрацювання даних призначені для опрацювання у реальному часі даних від засобів вимірювання характеристик компонентів фізичного світу та від засобів спостереження за

компонентами фізичного світу з метою виокремлення та формування корисної інформації для засобів прийняття рішень КФС, а також з метою підвищення рівня її захисту та швидкості пересилання, зменшення об'ємів зберігання, підвищення достовірності пересилання тощо.

До складу засобів опрацювання даних входить широкий набір апаратних та програмних комп'ютерних засобів, які забезпечують централізоване та розподілене опрацювання великих об'ємів даних за складними алгоритмами. Специфіка КФС вказує на те, що тут варто насамперед розглядати засоби, доступні через комп'ютерні мережі, тобто основані на хмарних технологіях. Тут необхідно впроваджувати такі сучасні технології опрацювання даних, як великі дані, адаптивні апаратні засоби, апаратні засоби з можливістю самовдосконалення. Важливим є продовження наукових досліджень щодо створення конфігурованих та самоконфігурованих апаратних засобів прискорення обчислень, зокрема засобів опрацювання та аналізу сигналів та зображень і захисту інформації, а також технологій високорівневого проектування засобів високопродуктивних обчислень.

Як і для попереднього рівня, взаємодія компонентів цього рівня з компонентами інших рівнів кіберфізичної системи має ґрунтуватися на принципах, закладених у хмарних технологіях. Тому формати даних також повинні відповідати вимогам хмарних технологій, і, що особливо важливо, надання хмарного сервісу має відбуватися в автоматичному режимі.

Отже, основні завдання організації взаємодії компонентів цього рівня з компонентами інших рівнів кіберфізичної системи такі:

- створення методів, алгоритмів, математичних та програмних моделей взаємодії засобів опрацювання даних з іншими рівнями КФС;
- створення засобів організації надання сервісних функцій автономного (без участі користувачів) опрацювання даних, які надходять з нижніх та верхніх рівнів КФС відповідно до запитів цих рівнів КФС.

5.4. Засоби збору та доставки даних

Засоби збору та доставки даних призначені для збору в реальному часі та попереднього опрацювання даних від засобів взаємодії з фізичним світом, а також для доставки вимірювальної та службової інформації до засобів взаємодії з фізичним світом. До складу засобів збору та доставки даних входять інтелектуальні сенсорні системи, сенсорні мережі (sensor networks), зокрема безкабельні та мобільні, розподілені системи на основі автономних дослідницьких станцій.

Як апаратну основу засобів збору та доставки даних передбачається використати розподілені системи на основі автономних дослідницьких станцій. Ці автономні дослідницькі станції повинні бути з'єднані між собою та з іншими рівнями КФС через комп'ютерну мережу Інтернет та локальні мережі.

Отже, основні завдання організації взаємодії компонентів цього рівня з компонентами інших рівнів кіберфізичної системи такі:

- створення методів, алгоритмів, математичних та програмних моделей взаємодії засобів збору та доставки даних з іншими рівнями КФС;
- створення методів та автономних засобів організації збору та доставки даних з та до нижнього рівня КФС відповідно до запитів верхніх рівнів КФС.

5.5. Засоби взаємодії з фізичним світом

Відповідно до основних типів взаємодії з фізичним світом можна сформулювати такий склад засобів взаємодії з фізичним світом [1]:

- засоби вимірювання певних характеристик компонентів фізичного світу, зокрема люксметри, термометри, тонометри, магнітометри тощо;
- засоби спостереження за компонентами фізичного світу, до яких належать відеокамери, фотоапарати, прилади нічного бачення, телескопи, фіксатори коливань, руху, рівнів та інших змін у фізичному світі;
- засоби формування компонентів фізичного світу, зокрема виробничі лінії, тривимірний принтер, засоби інтенсивного сільгоспвиробництва тощо;
- засоби впливу на компоненти фізичного світу, зокрема регулятори, вентилі, гальма;
- засоби взаємодії між КФС і користувачами, зокрема сенсорні екрани, клавіатура, мишка тощо.

Засоби взаємодії з фізичним світом мають бути доступні для верхніх рівнів КФС, що повинно забезпечуватись створенням методів, засобів та протоколів інформаційної взаємодії між цим та вищими рівнями КФС.

Отже, основним завданням організації взаємодії цього рівня з іншими рівнями базової платформи кіберфізичних систем є створення методів, алгоритмів, математичних та програмних моделей взаємодії засобів взаємодії з фізичним світом з іншими рівнями КФС.

5.6. Організація захищеної інформаційної взаємодії між компонентами рівнів КФС

Окремим питанням створення КФС є організація захищеної інформаційної взаємодії між компонентами її рівнів. Основна відмінність організації захищеної інформаційної взаємодії між компонентами рівнів КФС від організації захисту в комп'ютерній мережі полягає в потребі автономного виконання операцій захисту, оскільки в КФС для організації інформаційного обміну між компонентами рівнів не передбачено втручання користувача.

Висновки

1. У роботі виокремлено проблеми створення кіберфізичних систем, підходи до їх вирішення та описано базові засади побудови багаторівневої платформи кіберфізичних систем, сформовані відповідно до досягнень та сучасних концепцій застосування комп'ютерних, інформаційних та телекомунікаційних технологій.

2. Подана структура, описано призначення та функції основних компонентів багаторівневої платформи кіберфізичних систем та запропоновано проводити інтеграцію рівнів кіберфізичної системи з використанням комп'ютерних мереж, якими можуть слугувати як окремі, так і об'єднані типи мереж, зокрема спеціалізовані та універсальні локальні та глобальні комп'ютерні мережі, а також глобальна комп'ютерна мережа Інтернет.

3. Виокремлено переваги такого підходу, зокрема спрощення об'єднання та модифікації засобів рівнів КФС, незалежність від особливостей застосувань, для яких розробляється кожна конкретна КФС.

4. Сформовано основні завдання, які постають в процесі організації взаємодії компонентів рівнів кіберфізичної системи та в процесі створення протоколів міжрівневої взаємодії з використанням комп'ютерних мереж, серед основних з яких – створення методів, алгоритмів, математичних та програмних моделей міжрівневої взаємодії та створення засобів організації автономного надання сервісних функцій кожним рівнем КФС відповідно до запитів інших рівнів.

Наукові результати, подані у цій статті, отримано під час реалізації дослідницького проекту ДБ/КІБЕР з реєстраційним номером 0115U000446, 01.01.2015 – 31.12.2017, який фінансово підтримує Міністерство науки та освіти України.

1. Edward Lee. *Cyber Physical Systems: Design Challenges*. University of California // Berkeley Technical Report No. UCB/EECS-2008-86, January 23. – 2008. – 8 p. 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*, Vol. 1, № 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, № 11, November 2011. – P. 1891–1908. 4. Panos Antsaklis. *Goals and Challenges in Cyber-Physical Systems Research Editorial of the Editor in Chief* // *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 59, № 12. – P. 3117–3119, December 2014. 5. *Summer School on Cyber-Physical Systems 2013: some information July 8–12, 2013 Grenoble, France*. 6. Mohammad Ilyas, Imad Mahgoub, *Smart Dust: Sensor Network Applications, Architecture, and Design*, CRC Press, 2006. – 352 p. 7. Stefan Poslad, *Ubiquitous Computing: Smart Devices, Environments and Interactions*, Wiley, 2009. – 473 p. 8. *Ambient Intelligence*, Werner Weber et al. (Eds.), Springer, 2005. – 388 p. 9. Hakima Chaouchi. *The Internet of Things: Connecting Objects*, John Wiley & Sons, 2010. – 265 p. 10. Мельник А. О. *Багаторівнева базова платформа кіберфізичних систем* // *Кіберфізичні системи: досягнення та виклики* // *Матеріали першого наукового семінару*. – Львів, 2015. – С. 5–15. 11. Мельник А. О. *Кіберфізичні системи: проблеми створення та напрями розвитку* // *Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Комп'ютерні системи та мережі”*. – 2015. – № 692. – С. 100–107.